

# 15个燕麦品种萌发期耐旱、耐盐及耐碱性综合评价

周超凡<sup>1</sup>, 魏玉清<sup>1</sup>, 杨崇庆<sup>2</sup>, 陈一鑫<sup>2</sup>, 陈岩<sup>1</sup>, 马政<sup>1</sup>, 张涛<sup>1</sup>

(1. 北方民族大学生物科学与工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏农林科学院固原分院, 宁夏固原 756000)

**摘要:**采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫处理, NaCl 模拟盐胁迫处理, 混合碱性盐 ( $\text{NaHCO}_3$ :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  物质的量比为 9:1) 模拟碱胁迫处理, 每种胁迫设 4 个胁迫浓度, 以蒸馏水为对照, 通过测定各参试燕麦品种萌发期根长、芽长、总长、发芽率、发芽势、鲜质量、干质量、发芽指数、活力指数和根冠比共 10 个指标, 结合主成分、热图及聚类分析等方法, 对 15 个燕麦品种萌发期抗逆性进行了综合评价。结果表明, ‘张筱 9 号’、‘白燕 20 号’和‘魏都筱 5 号’抗旱能力较强, 而‘固燕 1 号’和‘固燕 3 号’属于干旱敏感品种; ‘晋燕 17 号’、‘迪燕 1 号’、‘魏都筱 5 号’和‘银燕 1 号’耐盐性较强, ‘固燕 3 号’耐盐能力较差; ‘固燕 2 号’耐碱能力较强, ‘固燕 1 号’为碱敏感品种。燕麦萌发期根长和总长适合抗旱性的鉴定; 发芽指数和发芽势适合耐盐性的鉴定; 发芽指数、发芽率和发芽势适合耐碱性的鉴定。

**关键词:** 燕麦品种; 种子萌发期; 耐旱性; 耐盐性; 耐碱性; 综合评价

**中图分类号:** S512.6; S338 **文献标志码:** A

## Comprehensive evaluation of drought and saline-alkali tolerance of 15 oat varieties during germination period

ZHOU Chaofan<sup>1</sup>, WEI Yuqing<sup>1</sup>, YANG Chongqing<sup>2</sup>, CHEN Yixin<sup>2</sup>,  
CHEN Yan<sup>1</sup>, MA Zheng<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>

(1. College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Guyuan Branch, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Guyuan, Ningxia 756000, China)

**Abstract:** This study comprehensively evaluated the drought and saline-alkali tolerance of 15 oat varieties during the germination stage. Ten indicators were measured, including root length, bud length, total length, germination rate, germination potential, fresh mass, dry mass, germination index, vigor index, and root-shoot ratio. Methods such as principal component analysis, heatmap, and cluster analysis were utilized. The experiment used PEG-6000 to simulate drought stress, NaCl for salt stress, a mixture of alkalis (with a ratio of  $\text{NaHCO}_3$  to  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  of 9:1) for alkaline stress, with distilled water as the control. The results showed that ‘Zhangyou NO.9’, ‘Baiyan NO.20’, and ‘Weidouyou NO.5’ exhibited strong drought resistance, while ‘Guyan NO.1’ and ‘Guyan NO.3’ were sensitive to drought. ‘Jinyan NO.17’, ‘Diyan NO.1’, ‘Weidouyou NO.5’, and ‘Yinyan NO.1’ demonstrated strong salt tolerance, whereas ‘Guyan NO.3’ displayed poor salt tolerance. ‘Guyan NO.2’ showed strong alkali tolerance, while ‘Guyan NO.1’ was sensitive to alkali. The root length and total length during the germination stage of oats were effective indicators for assessing drought resistance. The germination index and germination potential were suitable for evaluating salt tolerance, while the germination index, germination rate, and germination potential were appropriate for assessing alkali tolerance.

**Keywords:** oat varieties; seed germination period; drought tolerance; alkali resistance; saline tolerance; comprehensive evaluation

燕麦 (*Avena sativa* L.) 隶属于禾本科燕麦属 (*Avena*), 为一年生草本植物, 又称玉麦、铃铛麦<sup>[1]</sup>。燕麦是一种富含多种生理活性物质的作物, 在营养价值方面优于许多其他谷物 (大麦、玉米、小米、高粱等), 具有高产、适应性广、耐瘠薄等特点。其籽粒中的蛋白质、脂肪、维生素等含量均位列谷类作物之首, 且茎叶富含汁液, 口感良好, 是优质饲草原料<sup>[2]</sup>。

种子萌发期的各种逆境 (如干旱、盐碱等) 会抑制种子萌发和幼苗生长, 从而导致作物的产量和品质下降<sup>[3-5]</sup>。萌发期的抗旱能力在一定程度上反映了该作物的抗旱性, 且在各种鉴定方法中较方便易行, 故种子萌发期抗旱性可用来评价作物种质资源的抗旱性<sup>[6-9]</sup>。盐、碱胁迫主要通过渗透作用和离子毒害影响种子萌发<sup>[10]</sup>, 限制了植物的生长和发育<sup>[11-12]</sup>; 种子萌发期是对盐、碱胁迫最为敏感的时期<sup>[13-16]</sup>, 因此在萌发期对种质资源进行鉴定评价筛选抗盐碱品种, 是应对盐碱胁迫的重要途径之一<sup>[17]</sup>。付鸾鸿等<sup>[18]</sup>进行了燕麦苗期耐盐碱性评价筛选; 李珍等<sup>[19]</sup>明确了发芽势、发芽率为燕麦种子萌发期盐碱耐性评价的主要指标。目前对小麦<sup>[20-21]</sup>、玉米<sup>[22-23]</sup>、水稻<sup>[24-25]</sup>、高粱<sup>[26-27]</sup>等作物的抗逆性评价较多, 但对燕麦萌发期抗逆性的综合评价研究相对较少。为此, 本研究以 PEG-6000 模拟干旱胁迫、NaCl 模拟盐胁迫、混合碱性盐 ( $\text{NaHCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 模拟碱胁迫环境, 采用主成分分析、热图和聚类分析方法, 对我国北方地区主要栽培的 15 个燕麦品种萌发期性状进行综合鉴定, 筛选抗旱、耐盐碱能力强的品种及其主要鉴定指标, 以期为燕麦抗逆机理研究与品种选育提供依据<sup>[28]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试的 15 个燕麦品种由宁夏农林科学院固原分院提供, 品种信息如表 1 所示。

### 1.2 试验设计

燕麦萌发期抗逆性评价试验设计选择干旱胁迫 (以不同浓度 PEG-6000 进行模拟, 分别为: CK (蒸馏水), 5%、10%、15%、20% PEG)、盐胁迫 (以不同浓度 NaCl 进行模拟, 分别为: CK (蒸馏水), 50、100、150、200、250  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl) 和碱胁迫 (以不同浓度的  $\text{NaHCO}_3$  :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  物质的量比为 9 : 1 处理, 分别为: CK (蒸馏水), 10、20、30、40  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 三因素五水平的单因素完全随机试验设计, 处理浓

度根据预试验结果确定。试验在北方民族大学植物生理生态实验室进行。挑选饱满、色泽和大小基本一致的燕麦种子, 经体积分数 10% 的  $\text{NaClO}_3$  溶液消毒 20 min 后用无菌水冲洗至干净无味, 铺在放有双层滤纸的培养皿中, 每个培养皿摆放 30 粒种子。将摆放好燕麦种子的培养皿分别加入 10 mL 处理液中, 对照加 10 mL 蒸馏水, 每处理重复 3 次, 将所有培养皿置于 12 h (25℃) 光照/12 h (20℃) 黑暗的人工气候培养箱中进行萌发试验, 试验期间每天更换培养基质, 以保证培养环境的恒定。

### 1.3 测定指标与方法

试验过程中, 每隔 24 h 观察记录种子萌发情况, 以胚根伸出种皮 2 mm 为萌发标准, 记录种子萌发数, 计算发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数<sup>[28]</sup>。经 7 d 萌发结束后, 从每个处理中随机选出 10 株幼苗, 以植株根、茎的分节点为起点测量幼苗芽长和根长, 根冠比 = 根长/芽长, 总长 = 芽长 + 根长, 用电子分析天平测量幼苗鲜质量和干质量。测干质量前先 105℃ 烘 2 h 杀青, 后 80℃ 烘至恒重。为了消除不同品种间的差异, 采用各指标的相对值 (以对照为基准) 来反映对逆境胁迫的响应程度。

### 1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2021 进行数据统计处理, 数据以“平均值 ± 标准差”表示。用 SPSS statistics 20.0 进行主成分分析和相关性分析, JMP 17 (Trial) 进行聚类分析, Origin 2023b 软件进行聚类分析和热图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 逆境胁迫对不同品种燕麦农艺性状的影响

2.1.1 干旱胁迫响应 由表 2 可知, 在 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫下, 15 个燕麦品种萌发期发芽率之间无显著差异, 其中品种 O7 和 O10 相对发芽率较高, 而 O11 相对发芽率较低。15 个燕麦品种相对根长为 24.56% ~ 136.39%, 相对芽长为 17.52% ~ 131.19%, 相对总长为 21.26% ~ 131.41%, 相对发芽率为 24.94% ~ 97.02%, 相对发芽势为 12.50% ~ 117.86%, 相对鲜质量为 66.71% ~ 141.79%, 相对干质量为 93.27% ~ 186.62%, 相对发芽指数为 16.12% ~ 106.86%, 相对活力指数为 9.00% ~ 141.85%, 相对根冠比为 53.98% ~ 158.77%。其中, 品种 O5、O7、O10 的相对根长、相对芽长、相对发芽率和相对活力指数的值较大, 有较强的抗旱性; 品种 O11 上述指标的值较小, 抗旱性较弱。

表 1 供试燕麦品种  
Table 1 Test oat varieties

品种 编号 Code	品种名称 Variety name	粒色 Grain color	千粒重/g 1000-grain weight	提供单位 Provider	主要栽培地区 Main cultivation area
01	固 TX09-16 Gu TX09-16	黄褐色 Tawny	22.39	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	宁夏固原 Guyuan, Ningxia
02	晋燕 17 号 Jinyan NO.17	黄褐色 Tawny	24.40	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	山西右玉 Youyu, Shanxi
03	晋燕 18 号 Jinyan NO.18	黄褐色 Tawny	24.46	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	山西右玉 Youyu, Shanxi
04	白燕 18 号 Baiyan NO.18	黄褐色 Tawny	27.77	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	吉林白城 Baicheng, Jilin
05	白燕 20 号 Baiyan NO.20	黄褐色 Tawny	23.81	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	吉林白城 Baicheng, Jilin
06	张筱 8 号 Zhangyou NO.8	黄褐色 Tawny	18.90	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei
07	张筱 9 号 Zhangyou NO.9	黄褐色 Tawny	25.40	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei
08	坝筱 18 号 Bayou NO.18	黄褐色 Tawny	20.01	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	河北坝上 Bashang, Hebei
09	迪燕 1 号 Diyan NO.1	黄褐色 Tawny	23.06	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	西藏迪庆 Diqing, Xizang
010	魏都筱 5 号 Weiduyou NO.5	黄褐色 Tawny	24.36	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	山西大同 Datong, Shanxi
011	固燕 1 号 Guyan NO.1	黄褐色 Tawny	22.90	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	宁夏固原 Guyuan, Ningxia
012	固燕 2 号 Guyan NO.2	黄褐色 Tawny	20.06	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	宁夏固原 Guyuan, Ningxia
013	固燕 3 号 Guyan NO.3	黄褐色 Tawny	20.39	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	宁夏固原 Guyuan, Ningxia
014	银燕 1 号 Yinyan NO.1	黄褐色 Tawny	24.23	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	甘肃白银 Baiyin, Gansu
015	燕科 1 号 Yanke NO.1	黄褐色 Tawny	19.63	宁夏农林科学院固原分院 Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences	宁夏固原 Guyuan, Ningxia

2.1.2 盐胁迫响应 由表 3 可知,在  $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 模拟盐胁迫下,15 个燕麦品种萌发期中品种 O2、O9 和 O10 的相对发芽率较高,而 O12 和 O13 相对发芽率较低。15 个品种相对根长为 2.66% ~ 70.37%,相对芽长为 1.22% ~ 84.07%,相对总长为 1.59% ~ 72.79%,相对发芽率为 26.39% ~ 99.63%,相对发芽势为 24.44% ~ 91.95%,相对鲜质量为 49.72%

~ 107.64%,相对干质量为 91.37% ~ 124.33%,相对发芽指数为 20.44% ~ 88.74%,相对活力指数为 0.08% ~ 70.78%,相对根冠比为 55.99% ~ 122.27%。其中,盐胁迫下 15 个燕麦品种相对根冠比无显著差异;品种 O2 和 O9 的相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数和相对活力指数较高,有较强的耐盐性;品种 O12 和 O13 上述指标均较低,耐盐性较弱。

表 2 干旱胁迫下 15 个燕麦品种萌发性状指标相对值/%

Table 2 Relative values of germination indexes of 15 oat varieties under drought stress

品种编号 Code	根长 Root length	芽长 Bud length	总长 Total length	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination potential
O1	67.33±25.93abcd	76.14±20.31abc	72.11±22.86bcd	72.47±21.15a	83.07±34.65ab
O2	89.06±53.29abcd	55.78±33.77bcd	70.50±42.09bcd	51.87±9.94ab	46.60±25.92bc
O3	53.98±29.31cd	67.24±25.65bcd	71.76±26.37bcd	51.88±17.86ab	56.59±38.13bc
O4	73.09±17.00abcd	77.99±20.97abc	74.97±19.30abcd	71.37±16.41a	70.57±24.32abc
O5	134.18±24.37ab	100.38±3.77ab	110.96±4.88ab	72.04±9.48a	69.44±12.73abc
O6	107.42±54.23abc	74.19±18.45bc	89.50±34.44abc	77.86±8.37a	73.12±17.54ab
O7	136.39±11.73a	131.19±9.51a	131.41±4.88a	97.02±36.09a	117.86±64.10a
O8	60.66±29.06cd	68.00±28.18bcd	65.19±28.35bcd	69.00±19.76ab	73.66±18.75ab
O9	74.90±33.35abcd	79.82±25.84abc	77.25±28.24abcd	82.82±10.25a	66.62±20.28abc
O10	106.86±51.47abc	81.29±18.04abc	89.13±25.83abc	94.50±6.38a	93.51±11.79ab
O11	28.37±49.14d	17.52±30.35d	21.26±36.82d	24.94±21.63b	12.50±21.65c
O12	52.48±40.76cd	56.38±47.95bcd	55.65±45.64bcd	52.24±25.45ab	59.72±44.16abc
O13	24.56±21.44d	41.98±38.63cd	32.61±28.53cd	66.67±57.74ab	33.33±28.87bc
O14	74.70±46.88abcd	80.41±49.66abc	77.39±47.79abcd	80.24±22.60a	59.58±30.89abc
O15	64.74±23.39bcd	56.22±30.82bcd	59.66±27.64bcd	96.59±24.03a	74.62±23.42ab

品种编号 Code	鲜质量 Fresh mass	干质量 Dry mass	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	根冠比 Root-shoot ratio
O1	103.30±30.84ab	118.27±19.93ab	65.68±25.50abc	65.68±25.50bcd	86.73±9.58bcd
O2	115.67±12.68a	157.63±57.13ab	42.90±9.77cde	25.90±19.57bcd	158.77±12.69a
O3	91.81±13.68ab	112.52±10.26ab	43.58±23.03cde	32.18±28.26bcd	79.22±21.14bcd
O4	78.81±7.36b	93.27±20.51b	59.59±11.46bcd	44.95±4.77bcd	94.52±7.11bcd
O5	141.79±60.11a	131.30±18.27ab	69.52±9.44abc	69.97±11.81bc	134.38±29.30ab
O6	81.26±17.38ab	126.16±45.55ab	77.52±4.04abc	57.63±15.72bcd	138.67±36.91ab
O7	113.66±12.04ab	186.62±106.47a	106.86±47.00a	141.85±69.08a	104.74±16.57abcd
O8	78.11±35.88b	117.09±52.21ab	61.37±25.55bcd	46.28±30.54bcd	87.86±13.04bcd
O9	97.41±22.21ab	132.73±14.38ab	65.36±13.43abc	54.39±27.31bcd	93.05±18.52bcd
O10	97.96±27.33ab	121.13±14.73ab	91.42±18.96ab	76.50±29.98b	128.58±44.84abc
O11	82.22±9.61ab	124.27±3.67ab	16.12±15.67e	11.44±19.82cd	53.98±93.49d
O12	100.18±66.34ab	161.21±29.18ab	51.64±35.58bcde	38.81±34.36bcd	99.10±17.77abcd
O13	67.58±16.93b	160.75±42.47ab	22.13±20.08de	9.00±8.72d	66.17±14.43cd
O14	97.12±42.32ab	97.63±50.07b	65.08±16.55abc	53.58±41.01bcd	93.17±5.40bcd
O15	66.71±10.29b	107.95±48.12ab	69.08±17.18abc	42.16±30.97bcd	126.66±40.20abc

注: 同列数据后不同小写字母表示品种间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant differences between varieties ( $P<0.05$ ). The same below.

2.1.3 碱胁迫响应 由表 4 可知, 在  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合碱性盐模拟碱胁迫下, 15 个燕麦品种萌发期相对活力指数相差很大。O12 的相对发芽率较高, 而 O11 的相对发芽率较低。15 个品种相对根长为 9.22%~139.46%, 相对芽长为 24.27%~122.53%, 相对总长为 23.34%~120.78%, 相对发芽率为 52.22%~131.75%, 相对发芽势为 77.78%~213.33%, 相对鲜质量为 67.85%~115.19%, 相对干质量为 53.23%~128.17%, 相对发芽指数为 62.13%~142.04%, 相对活力指数为 31.25%~581.82%, 相对根冠比为 58.42%~123.14%。其中, 模拟碱胁迫下 15 个燕麦品种相对根长和相对芽长差异较大; 品种 O12 和 O15 的相对根长、相对总长、相对发芽率、相对发芽势、相

对发芽指数和相对活力指数较高, 有较强的耐碱性; 品种 O9 和 O11 上述指标较低, 耐碱性较弱。

## 2.2 不同品种燕麦萌发期抗逆性的主成分分析

2.2.1 抗旱性 由表 5 和表 6 可知, 15 个燕麦品种萌发期抗旱性前 2 个成分的累计贡献率达到 80.23%, 所以提取前 2 个主成分代替 10 个指标来评价其抗旱性。第 I 主成分的贡献率为 65.91%, 其中相对总长 ( $X_3$ )、相对发芽指数 ( $X_8$ )、相对芽长 ( $X_2$ ) 的相关系数较大, 说明其在第 I 主成分上有较大载荷, 可以反映干旱胁迫下燕麦早期幼苗生长状况; 第 II 主成分的贡献率为 14.32%, 以相对鲜质量 ( $X_6$ )、相对根长 ( $X_1$ ) 和相对干质量 ( $X_7$ ) 的载荷较大, 可以反映干旱胁迫下燕麦的萌发状况。

表 3 盐胁迫下 15 个燕麦品种萌发性状指标相对值/%

Table 3 Relative values of germination indexes of 15 oat varieties under salt stress

品种编号 Code	根长 Root length	芽长 Bud length	总长 Total length	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination potential
O1	62.27±19.95a	71.26±19.59ab	66.45±19.01a	79.58±31.39ab	56.90±14.29bc
O2	70.09±33.72a	76.20±35.25a	72.79±33.94a	83.73±30.36ab	81.38±10.83ab
O3	63.63±29.65a	61.32±15.57ab	61.93±22.35ab	57.55±7.05abc	63.53±16.20abc
O4	51.09±25.66ab	53.80±37.60ab	52.06±31.59ab	74.94±39.75ab	63.17±21.10abc
O5	56.97±28.59ab	84.07±50.47a	70.69±39.68a	65.59±11.50abc	55.97±12.49bcd
O6	45.60±50.15ab	57.57±74.79ab	53.44±65.75ab	57.39±24.99abc	38.29±8.16cd
O7	57.80±3.98ab	75.98±13.40a	66.80±8.27a	54.84±0.58abc	62.88±2.58abc
O8	48.69±20.75ab	62.87±5.92ab	55.08±12.28ab	73.46±5.79abc	90.43±9.13a
O9	58.63±26.38ab	51.75±32.87ab	54.92±29.93ab	99.63±10.56a	87.50±10.83a
O10	54.11±14.81ab	58.97±28.61ab	56.87±21.78ab	83.68±16.97ab	91.95±26.03a
O11	36.21±46.57ab	46.26±53.11ab	42.12±50.47ab	66.67±41.63abc	48.41±19.10cd
O12	21.64±21.85ab	18.62±16.09ab	20.10±15.91ab	47.26±38.79bc	40.71±16.08cd
O13	2.66±4.61b	1.22±2.12b	1.59±2.76b	26.39±10.49c	24.44±21.43d
O14	70.37±43.97a	74.09±53.07a	72.10±49.03a	75.30±17.88ab	67.10±12.86abc
O15	32.32±13.28ab	47.08±21.42ab	39.81±17.46ab	62.42±26.99abc	46.28±18.69cd

品种编号 Code	鲜质量 Fresh mass	干质量 Dry mass	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	根冠比 Root-shoot ratio
O1	101.62±27.82ab	108.82±3.09ab	59.82±20.48abcde	50.08±6.43abc	86.79±10.19a
O2	93.98±26.69ab	101.79±14.61ab	77.43±17.80abc	70.78±31.74a	91.32±2.66a
O3	89.48±9.19ab	94.31±18.52ab	66.72±18.19abcd	54.14±26.23ab	99.57±27.19a
O4	74.71±33.18ab	110.69±13.74ab	46.17±32.46bcde	67.19±14.06ab	105.05±35.12a
O5	107.64±30.90a	113.45±23.25ab	62.38±13.35abcd	57.85±22.78ab	70.16±7.21a
O6	80.27±62.92ab	124.33±32.15a	31.09±38.13de	47.06±19.71abc	100.86±25.51a
O7	101.43±24.83ab	108.86±20.51ab	55.94±5.81abcde	52.31±12.99abc	77.09±8.61a
O8	93.00±17.97ab	94.70±10.83ab	71.51±6.77abc	56.22±7.81ab	76.13±27.06a
O9	64.94±18.50ab	106.83±5.91ab	88.74±8.94a	59.71±43.55ab	122.27±21.89a
O10	72.02±18.37ab	104.09±17.32ab	80.86±2.13ab	58.02±28.55ab	101.77±30.99a
O11	67.27±4.48ab	101.52±18.91ab	54.34±35.47abcde	44.33±57.41abc	55.99±48.50a
O12	69.67±17.36b	91.96±6.60ab	39.13±18.58cde	12.20±15.12bc	103.23±130.18a
O13	49.72±8.15ab	91.37±10.42b	20.44±15.70e	0.08±0.14c	72.42±125.43a
O14	79.39±33.07ab	101.16±17.17ab	68.14±9.23abcd	60.67±42.69ab	101.27±18.24a
O15	50.08±9.54b	92.89±7.32ab	51.04±22.01abcde	31.77±24.72abc	69.64±4.79a

表 4 碱胁迫下 15 个燕麦品种萌发性状指标相对值/%

Table 4 Relative values of germination indexes of 15 oat varieties under alkali stress

品种编号 Code	根长 Root length	芽长 Bud length	总长 Total length	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination potential
O1	106.81±33.65ab	85.33±16.34ab	93.26±22.34ab	103.14±36.25ab	101.39±31.76b
O2	98.10±31.67ab	103.16±5.38ab	99.20±17.25a	103.14±36.25ab	101.39±31.76b
O3	77.48±22.24abcd	89.13±16.89abcd	80.82±7.78a	103.51±36.97ab	103.91±25.90b
O4	107.59±28.24ab	106.93±36.68ab	107.02±33.41a	97.22±20.97ab	102.56±10.94b
O5	75.48±19.95abcd	83.61±11.85abcd	79.92±14.37ab	105.63±29.03ab	111.99±35.01b
O6	87.02±24.67abc	100.23±15.21abc	93.00±19.07a	98.98±14.44ab	96.11±14.56b
O7	105.97±21.52ab	105.47±7.42ab	106.01±6.64a	105.49±48.69ab	95.63±19.36b
O8	75.82±8.98abcd	84.90±11.18abcd	81.09±10.09ab	74.44±10.72ab	78.76±7.09b
O9	61.80±15.25bcd	84.52±21.56bcd	73.00±18.25ab	92.19±40.15ab	89.09±33.07b
O10	94.09±26.63ab	101.93±13.63ab	98.19±13.90a	92.30±9.81ab	93.39±29.22b
O11	22.01±20.52cd	33.44±25.53cd	28.86±24.06bc	52.22±13.47bab	77.78±19.25b
O12	139.46±116.20a	117.83±85.56a	120.78±88.95a	131.75±102.39a	213.33±150.11a
O13	9.22±8.06d	24.27±19.37d	23.34±18.08c	83.33±28.87ab	116.67±76.38b
O14	79.54±11.20abc	94.85±3.43abc	87.45±4.42a	108.83±20.07ab	92.09±12.36b
O15	106.37±0.29ab	122.53±33.87ab	113.08±16.93a	110.46±21.41ab	99.54±29.67b

续表 4

Continued table 4

品种编号 Code	鲜质量 Fresh mass	干质量 Dry mass	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	根冠比 Root-shoot ratio
O1	96.77±20.70ab	93.25±6.23ab	95.79±35.46b	103.21±23.18ab	123.14±18.32a
O2	98.33±12.55ab	128.17±23.97a	98.40±23.36b	127.82±32.14ab	94.22±25.24ab
O3	105.94±6.44ab	110.04±9.47ab	103.94±29.55b	113.07±28.10ab	90.35±36.19ab
O4	103.74±21.20ab	117.52±46.25a	101.32±10.55b	145.42±64.76ab	102.31±7.43ab
O5	100.93±16.44ab	87.53±16.40ab	103.86±29.26b	110.87±41.50ab	89.68±15.04ab
O6	108.04±16.61a	53.23±52.41b	100.15±10.77b	120.30±25.15ab	86.02±17.29ab
O7	98.07±12.51ab	99.15±24.83ab	81.66±16.31b	107.01±16.57ab	101.08±24.03ab
O8	115.19±16.76a	93.63±8.30ab	75.60±11.27b	81.38±0.73ab	89.51±5.08ab
O9	88.79±17.05ab	103.58±13.92ab	87.16±31.59b	96.84±56.37ab	73.26±1.16ab
O10	113.95±23.82a	89.16±67.68ab	93.59±17.06b	122.36±36.07ab	92.91±25.69ab
O11	67.85±14.21b	113.21±15.27a	62.13±25.22b	31.25±31.97b	58.42±55.45b
O12	109.71±42.71a	111.84±18.20a	142.04±108.76a	214.09±178.79ab	115.43±19.41a
O13	91.23±18.66ab	92.85±14.03ab	101.28±69.22b	581.82±984.68a	70.45±61.49ab
O14	109.48±11.77a	89.39±11.44ab	97.68±12.19b	146.26±38.07ab	84.16±14.68ab
O15	97.72±23.74ab	107.70±23.78ab	110.19±21.56b	156.12±60.89ab	91.67±26.68ab

表 5 燕麦萌发期主成分的特征值及贡献率

Table 5 Characteristic values and contribution rates of principal components during oat germination period

处理 Treatment	主成分 Principal component	特征值 Eigen value	贡献率/% Contribution	累计贡献率/% Cumulative contribution
干旱胁迫 Drought stress	I	6.59	65.91	65.91
	II	1.43	14.32	80.23
盐胁迫 Salt stress	I	6.39	63.87	63.87
	II	1.63	16.28	80.16
碱胁迫 Alkali stress	I	5.58	55.79	55.79
	II	1.93	19.25	75.05
	III	1.26	12.57	87.62

2.2.2 耐盐性 由表 5 和表 6 可知,15 个燕麦品种萌发期耐盐性前 2 个成分的累计贡献率达到 80.16%,所以提取前 2 个主成分代替 10 个指标来评价其耐盐性。第 I 主成分的贡献率为 63.87%,其中相对根长( $X_1$ )、相对活力指数( $X_9$ )、相对总长( $X_3$ )的相关系数较大,说明其在第 I 主成分上有较大载荷,可以反映盐胁迫下燕麦早期幼苗生长状况;第 II 主成分的贡献率为 16.28%,以相对发芽势( $X_5$ )、相对发芽指数( $X_8$ )和相对发芽率( $X_4$ )的载荷较大,可以反映盐胁迫下燕麦的萌发状况。

2.2.3 耐碱性 由表 5 和表 6 可知,15 个燕麦品种萌发期耐碱性前 3 个成分的累计贡献率达到 87.62%,所以提取前 3 个主成分代替 10 个指标来评价其耐碱性。第 I 主成分的贡献率为 55.79%,其中相对根长( $X_1$ )、相对发芽率( $X_4$ )、相对总长( $X_3$ )的相关系数较大,说明其在第 I 主成分上有较大载荷,可以反映碱胁迫下燕麦早期幼苗生长状况;第 II 主成分的贡献率为 19.25%,以相对活力指数( $X_9$ )、相对发芽势( $X_5$ )和相对发芽指数( $X_8$ )的载荷较大;第 III 主成分的贡献率为 12.57%,其中相对

干质量( $X_7$ )的载荷较大,可以反映碱胁迫下燕麦的萌发状况。

结合特征向量,参考林海明等<sup>[29]</sup>的方法,以特征向量为权重分别构建燕麦萌发期抗旱性、耐盐性和耐碱性的主成分函数表达式。

抗旱性函数表达式为:

$$Y_1 = 0.363X_1 + 0.369X_2 + 0.378X_3 + 0.296X_4 + 0.356X_5 + 0.221X_6 + 0.084X_7 + 0.370X_8 + 0.363X_9 + 0.226X_{10}$$

$$Y_2 = 0.175X_1 - 0.016X_2 + 0.077X_3 - 0.430X_4 - 0.242X_5 + 0.586X_6 + 0.538X_7 - 0.215X_8 - 0.036X_9 + 0.199X_{10}$$

耐盐性函数表达式为:

$$Y_1 = 0.382X_1 + 0.360X_2 + 0.378X_3 + 0.329X_4 + 0.318X_5 + 0.267X_6 + 0.184X_7 + 0.325X_8 + 0.378X_9 + 0.133X_{10}$$

$$Y_2 = -0.052X_1 - 0.279X_2 - 0.189X_3 + 0.312X_4 + 0.376X_5 - 0.439X_6 - 0.414X_7 + 0.356X_8 - 0.015X_9 + 0.393X_{10}$$

耐碱性函数表达式为:

$$Y_1 = 0.404X_1 + 0.379X_2 + 0.396X_3 + 0.383X_4 + 0.256X_5 + 0.293X_6 + 0.024X_7 + 0.322X_8 - 0.064X_9 + 0.361X_{10}$$

$$Y_2 = -0.175X_1 - 0.257X_2 - 0.224X_3 + 0.175X_4 + 0.478X_5 - 0.051X_6 + 0.030X_7 + 0.428X_8 + 0.637X_9 - 0.041X_{10}$$

$$Y_3 = 0.094X_1 + 0.006X_2 + 0.029X_3 - 0.019X_4 + 0.176X_5 - 0.480X_6 + 0.835X_7 + 0.005X_8 - 0.166X_9 + 0.051X_{10}$$

式中, $Y_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为主成分, $X_1 \sim X_{10}$  分别为根长、芽长、总长、发芽率、发芽势、鲜质量、干质量、发芽

指数、活力指数、根冠比的相对值。

利用单一的  $Y_1$ 、 $Y_2$  或  $Y_3$  无法对燕麦萌发期的抗逆性作出综合评价,故以每个主成分贡献率占提取主成分累计贡献率的比例作为权重计算主成分综合模型,得到其抗逆性模型为  $Y=0.659Y_1+0.143Y_2$ ;耐盐性模型为  $Y=0.639Y_1+0.163Y_2$ ;耐碱性模型为:  $Y=0.558Y_1+0.193Y_2+0.126Y_3$ 。根据模型计算得到 15 个燕麦品种萌发期抗旱性、耐盐性和耐碱性的主成分综合得分和具体排序见表 7。15 个燕麦品种的抗旱性以‘张筱 9 号’最强,‘固燕 1 号’最弱;耐盐性为‘晋燕 17 号’最强,‘固燕 3 号’最弱;耐碱性为‘固燕 2 号’最强,‘固燕 1 号’最弱。对 15 个燕麦品种抗旱性、耐盐性和耐碱性的主成分综合得分进行相关性分析,发现抗旱性与耐盐性的相关系数为 0.488,抗旱性与耐碱性的相关系数为 0.394,耐盐性

与耐碱性的相关系数为-0.00036。

### 2.3 燕麦萌发期抗旱性、耐盐性和耐碱性的热图及聚类分析

利用热图对不同逆境胁迫下燕麦萌发期性状的变化量进行可视化处理,通过横向聚类反映不同燕麦品种在逆境胁迫下的变化情况,用纵向聚类反映 10 个指标在某一逆境胁迫下的相互关系(图 1~3)。

2.3.1 干旱胁迫 由图 1A 可以看出,O11、O13、O9 和 O14 颜色多为红色,说明干旱对这 4 个品种生长有抑制作用;且这 4 个品种的  $X_4$  都为红色,发芽率较低,是抗旱能力较差的品种。O7 指标多为绿色且颜色较深,表明这个品种对干旱胁迫有较强抗性。结合主成分分析综合排名结果,通过层状聚类分析将 15 个燕麦分为 4 大类(图 1B),品种 O2、O5、O7、

表 6 萌发期抗逆性主成分分析中各因子的载荷矩阵

Table 6 Load matrix of each factor in the principal component analysis of stress resistance during germination

参数 Parameter	指标 Index	干旱胁迫 Drought stress		盐胁迫 Salt stress		碱胁迫 Alkali stress		
		主成分 I $Y_1$	主成分 II $Y_2$	主成分 I $Y_1$	主成分 II $Y_2$	主成分 I $Y_1$	主成分 II $Y_2$	主成分 III $Y_3$
		$X_1$	根长 Root length	0.933	0.209	0.966	-0.066	0.954
$X_2$	芽长 Bud length	0.948	-0.020	0.911	-0.356	0.895	-0.357	0.001
$X_3$	总长 Total length	0.970	0.092	0.955	-0.241	0.936	-0.311	0.033
$X_4$	发芽率 Germination rate	0.759	-0.514	0.832	0.398	0.904	0.243	-0.021
$X_5$	发芽势 Germination potential	0.913	-0.290	0.804	0.480	0.604	0.663	0.198
$X_6$	鲜质量 Fresh mass	0.566	0.702	0.674	-0.560	0.692	-0.071	-0.538
$X_7$	干质量 Dry mass	0.215	0.209	0.465	-0.528	0.057	0.041	0.937
$X_8$	发芽指数 Germination index	0.949	-0.257	0.822	0.454	0.761	0.593	0.005
$X_9$	活力指数 Vigor index	0.932	-0.043	0.956	-0.019	-0.152	0.884	-0.186
$X_{10}$	根冠比 Root-shoot ratio	0.579	0.238	0.337	0.501	0.852	-0.057	0.057

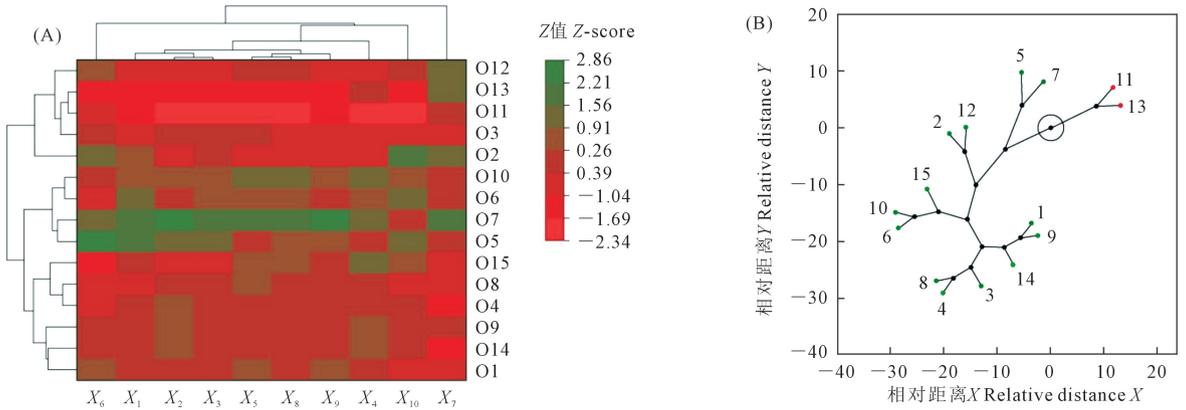
表 7 15 个燕麦品种抗逆性综合得分及其排序

Table 7 Comprehensive score and ranking of stress resistance for 15 oat varieties

品种编号 Code	品种名称 Variety	抗旱性 Drought resistance		耐盐性 Salinity resistance		耐碱性 Alkali resistance	
		综合得分 Score	排序 Order	综合得分 Score	排序 Order	综合得分 Score	排序 Order
O1	固 TX09-16 Gu TX09-16	52.12	6	57.50	6	54.94	4
O2	晋燕 17 号 Jinyan NO.17	50.25	7	68.00	1	54.19	5
O3	晋燕 18 号 Jinyan NO.18	40.09	13	55.05	8	51.78	7
O4	白燕 18 号 Baiyan NO.18	46.24	9	53.53	9	56.56	3
O5	白燕 20 号 Baiyan NO.20	70.97	2	56.67	7	50.84	9
O6	张筱 8 号 Zhangyou NO.8	57.86	4	43.53	11	50.07	11
O7	张筱 9 号 Zhangyou NO.9	88.05	1	53.39	10	52.41	6
O8	坝筱 18 号 Bayou NO.18	44.44	11	57.68	5	41.59	12
O9	迪燕 1 号 Diyan NO.1	52.5	5	67.27	2	40.63	13
O10	魏都筱 5 号 Weiduyou NO.5	64.94	3	62.96	3	51.41	8
O11	固燕 1 号 Guyan NO.1	17.05	15	40.21	12	18.08	15
O12	固燕 2 号 Guyan NO.2	43.55	12	27.30	14	81.69	1
O13	固燕 3 号 Guyan NO.3	25.94	14	8.45	15	36.46	14
O14	银燕 1 号 Yinyan NO.1	49.92	8	62.10	4	50.82	10
O15	燕科 1 号 Yanke NO.1	46.08	10	36.36	13	58.53	2

O12 聚为一类,属于高抗旱能力类别;品种 O6、O10、O15 聚为一类,属于中度抗旱类别;品种 O1、O3、O4、O8、O9、O14 聚为一类,其某些指标易受到干旱

胁迫的抑制,属于干旱敏感类别;品种 O11 和 O13 聚为一类,其某些指标受到干旱胁迫的抑制程度较为严重,属于高度干旱敏感类别。



注:O1~O15 代表 15 个燕麦品种(同表 1), $X_1 \sim X_{10}$ 代表 10 个指标(同表 6);热图中绿色表示胁迫有促进作用,红色表示有抑制作用,且颜色越深作用越强。下同。

Notes: O1~O15 represent 15 oat varieties (as in Table 1), and  $X_1 \sim X_{10}$  represent 10 indicators (as in Table 6). In the heat map, green indicates that stress has a promoting effect, while red indicates that it has an inhibitory effect, and the darker the color, the stronger the effect. The same applies below.

图 1 干旱胁迫下 15 个燕麦品种萌发期各指标热图和聚类分析

Fig.1 Heat map and clustering analysis of various indicators for germination of 15 oat varieties under drought stress

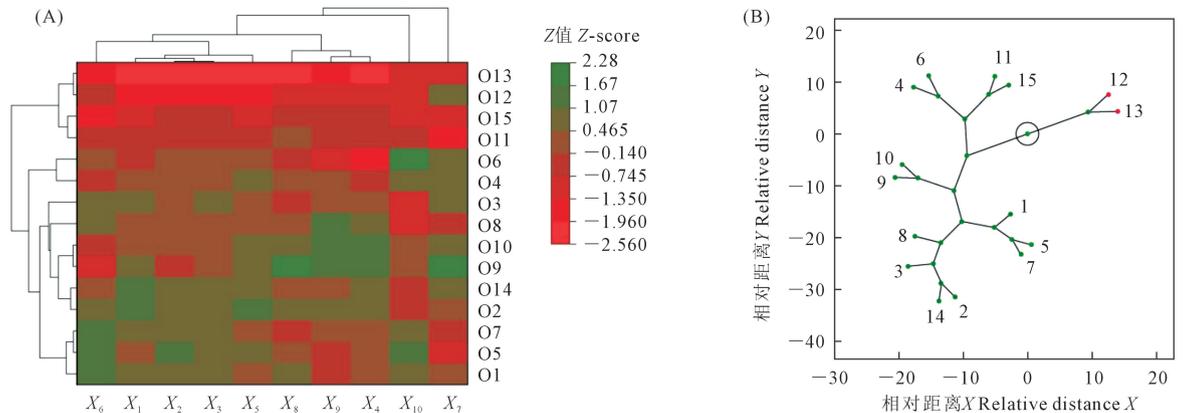


图 2 盐胁迫下 15 个燕麦品种萌发期各指标热图和聚类分析

Fig.2 Heat map and clustering analysis of various indicators for germination of 15 oat varieties under salt stress

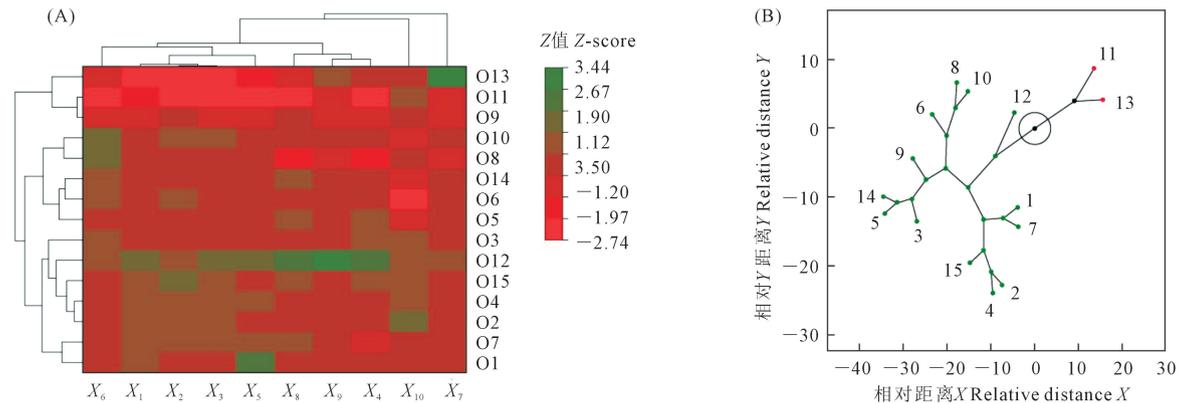


图 3 碱胁迫下 15 个燕麦品种萌发期各指标热图和聚类分析

Fig.3 Heat map and clustering analysis of various indicators for germination of 15 oat varieties under alkali stress

2.3.2 盐胁迫 由图 2A 可以看出, O13 和 O15 颜色大多为红色, 说明盐胁迫对这两个品种生长有抑制作用; 且这两个品种的  $X_4$  为红色, 发芽率较低, 是耐盐性较差的品种。O9 指标多为绿色, 表明此品种对盐胁迫有较强抗性。结合主成分分析综合排名结果, 通过层状聚类分析将 15 个燕麦分为 4 大类 (图 2B), 品种 O2、O3、O8、O9、O10、O14 聚为一类, 属于高耐盐能力类别; 品种 O1、O5、O7 聚为一类, 属于中度耐盐类别; 品种 O4、O6、O11、O15 聚为一类, 其某些指标易受到盐胁迫的抑制, 属于盐敏感类别; 品种 O12、O13 聚为一类, 其某些指标受到盐胁迫的抑制程度较为严重, 属于高度盐敏感类别。

2.3.3 碱胁迫 由图 3A 可以看出, 品种 O11 的 9 个指标为红色, 且  $X_3$  和  $X_4$  红色更深, 发芽势和发芽率较低, 说明碱胁迫对其生长有抑制作用, 是耐碱性较差的品种。品种 O12 指标多为绿色,  $X_4$  绿色较深, 表明此品种对碱胁迫有较强抗性。结合主成分分析综合排名结果, 通过层状聚类分析将 15 个燕麦分为 4 大类 (图 3B), 品种 O1、O7、O12 聚为一类, 属于高耐碱能力类别; 品种 O2、O3、O4、O5、O14、O15 聚为一类, 属于中度耐盐类别; 品种 O6、O8、O9 和 O10 聚为一类, 其某些指标易受到碱胁迫的抑制, 属于碱敏感类别; 品种 O11 和 O13 聚为一类, 其某些指标受到碱胁迫的抑制程度较为严重, 属于高度碱敏感类别。

### 3 讨论

种子萌发期是植物生活史中最脆弱的阶段, 极易受到外界因素的影响<sup>[30]</sup>。不同植物种子萌发对环境适应与其本身特性有很大关联, 尤其在恶劣环境下对植物的生长发育有很大限制。根系是植物直接吸收水分的重要器官, 它对植物的抗逆性具有至关重要的作用<sup>[31-32]</sup>, 发达的根系可使植物充分吸收利用贮存在土壤中的水分, 使植物在逆境中生存<sup>[33]</sup>。本研究发现, 在干旱胁迫下, 参试燕麦品种相对根长为 24.56%~136.39%, 干旱胁迫会刺激燕麦根系不断伸长以吸收更多的水分, 这与干旱胁迫下小麦<sup>[34]</sup>、紫花苜蓿<sup>[35]</sup>等耐旱作物的研究基本一致。 $\text{Na}^+$  是盐渍土的主要成分之一, 对种子萌发既有离子毒害, 又有渗透胁迫效应<sup>[36]</sup>。本研究发现, 在盐胁迫下, 参试燕麦品种的相对发芽势为 24.44%~91.95%。在碱胁迫下, 参试燕麦品种的相对活力指数为 31.25%~581.82%。盐碱胁迫前期能够萌发的品种, 耐盐碱能力较强。利用综合得分函数可以在综合分析基础上对试验材料的抗逆性进行有效、

准确的评定<sup>[37]</sup>。本研究选取根长、芽长、总长、发芽率、发芽势、鲜质量、干质量、发芽指数、活力指数和根冠比 10 个指标, 通过主成分分析对燕麦萌发期抗逆性进行综合评价。由于大田多变环境, 因此在种子萌发期进行室内抗逆性鉴定和筛选, 选择耐性较强的品种, 再进行大田验证, 可以提高品种选育效率。农作物在不同生长发育阶段的抗性表现不同, 因此应将种子萌发期抗旱、耐盐碱鉴定结果与其在苗期、开花期、灌浆期、成熟期等全生育期鉴定结果相结合, 才能准确鉴定燕麦品种的抗逆性, 同时形成较为完善的燕麦抗逆性评价体系, 这将是今后的重要研究方向。

### 4 结论

本试验条件下, ‘张筱 9 号’、‘白燕 20 号’和‘魏都筱 5 号’抗旱能力较强; ‘晋燕 17 号’、‘迪燕 1 号’、‘魏都筱 5 号’和‘银燕 1 号’耐盐性较强; ‘固燕 2 号’为耐碱能力较强的品种。根长和总长适用于抗旱性鉴定, 发芽指数和发芽势适用于耐盐性鉴定, 发芽指数、发芽率和发芽势适用于耐碱性鉴定。

#### 参考文献:

- [1] 徐长林. 高寒牧区不同燕麦品种生长特性比较研究[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 280-285.  
XU C L. A study on growth characteristics of different cultivars of oat (*Avena sativa*) in alpine region[J]. Acta prataculturae Sinica, 2012, 21(2): 280-285.
- [2] 杨成峻, 陈明舜, 戴涛涛, 等. 燕麦  $\beta$ -葡聚糖功能与应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 301-311.  
YANG C J, CHEN M S, DAIT T, et al. Research advances in functional properties and application of oat  $\beta$ -glucan [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 301-311.
- [3] GUO R, ZHOU J, REN G X, et al. Physiological responses of linseed seedlings to ISO osmotic polyethylene glycol, salt, and alkali stresses [J]. Agronomy Journal, 2013, 105(3): 764-772.
- [4] YANG S L, CHEN K, WANG S S, et al. Osmoregulation as a key factor in drought hardening-induced drought tolerance in *Jatropha curcas* [J]. Biologia Plantarum, 2015, 59(3): 529-536.
- [5] WENG B S, ZHANG P, LI S N. Drought risk assessment in China with different spatial scales[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(12): 10193-10202.
- [6] 孙欢欢, 韩兆雪, 谭登峰, 等. 新培育玉米自交系苗期生理生化指标与其抗旱性综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 9-14, 53.  
SUN H H, HAN Z X, TAN D F, et al. Comprehensive evaluation of physiological and biochemical indexes and drought resistance of new maize inbred lines during seedling stage[J]. Agricultural Research in

- the Arid Areas, 2016, 34(5): 9-14, 53.
- [7] 宋丽华, 刘雯雯, 陈淑芬. PEG 处理对臭椿种子萌发的影响[J]. 农业科学研究, 2005, 26(4): 25-29.  
SONG L H, LIU W W, CHEN S F. Effect of PEG on seed germination of *Ailanthus altissima* [J]. Journal of agricultural sciences, 2005, 26(4): 25-29.
- [8] 王征宏, 赵威, 郭秀璞, 等. 不同倍性小麦种子萌发特征及其对水分胁迫敏感性的差异[J]. 植物生理学报, 2013, 49(8): 817-823.  
WANG Z H, ZHAO W, GUO X P, et al. Seed germination characteristics and their differences in sensitivity to water stress in wheat with different ploidy levels [J]. Plant Physiology Journal, 2013, 49(8): 817-823.
- [9] TOBE K, LI X, OMASA K J. Seed germination and radicle growth of a halophyte, *Kalidium caspicum* (Chenopodiaceae) [J]. Annals of Botany, 2000, 85(3): 391-396.
- [10] 王善仙, 刘宛, 李培军, 等. 盐碱土植物改良研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 1-7.  
WANG S X, LIU W, LI P J, et al. Advances of researches in plant-improvement of saline-alkaline soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(24): 1-7.
- [11] 董飞, 王焯楠, 朱娇, 等. NaCl 胁迫对 5 种菊科植物种子萌发的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(11): 45-50.  
DONG F, WANG Y N, ZHU J, et al. Effects of NaCl stress on seed germination of five compositae species [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(11): 45-50.
- [12] LI J, YIN L Y, JONGSMA M A, et al. Effects of light, hydropriming and abiotic stress on seed germination, and shoot and root growth of pyrethrum (*Tanacetum cinerariifolium*) [J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(3): 1543-1549.
- [13] 朱建峰, 张会龙, 杨秀艳, 等. 35 个白榆优良家系种子萌发期耐盐碱性评价[J]. 西北农业学报, 2020, 29(9): 1417-1429.  
ZHU J F, ZHANG H L, YANG X Y, et al. Comprehensive evaluation of saline-alkali resistance in seed germination period of 35 *Ulmus pumila* families [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2020, 29(9): 1417-1429.
- [14] 张庆昕, 张玉霞, 刘庆鹏, 等. 33 个油用向日葵品种种子萌发期抗盐碱性的综合评价[J]. 种子, 2015, 34(11): 23-25, 30.  
ZHANG Q X, ZHANG Y X, LIU Q P, et al. The comprehensive evaluation of salineresistance in the seed germination period of 33 oil-sunflower varieties [J]. Seed, 2015, 34(11): 23-25, 30.
- [15] 李建国, 濮瀚杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点 [J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.  
LI J G, PU L J, ZHU M, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [16] 唐于银, 乔海龙. 我国盐渍土资源及其综合利用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(8): 19-22.  
TANG Y Y, QIAO H L. Saline Soil and the comprehensive utilization of resources progress in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2008, 14(8): 19-22.
- [17] 张明伟, 高欣梅, 福英, 等. 燕麦种子萌发和幼苗生长盐碱耐性综合鉴定及评价[J]. 农业与技术, 2024, 44(4): 31-36.  
ZHANG M W, GAO X M, FU Y, et al. Comprehensive identification and evaluation of salt alkali tolerance in oat seed germination and seedling growth [J]. Agriculture & Technology, 2024, 44(4): 31-36.
- [18] 付鸾鸿, 于崧, 于立河, 等. 不同基因型燕麦苗期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 23-30.  
FU L H, YU S, YU L H, et al. Analysis of saline-alkaline tolerance in seedling stage and screening of identification indexes of different oat genotypes [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 23-30.
- [19] 李珍, 云岚, 张玉霞, 等. 10 个饲用燕麦品种种子萌发期耐盐碱性的综合评价[J]. 种子, 2019, 38(11): 90-95.  
LI Z, YUN L, ZHANG Y X, et al. Comprehensive evaluation of saline-alkaline resistance in 10 forage oat varieties during seed germination [J]. Seed, 2019, 38(11): 90-95.
- [20] 张婷婷, 于崧, 于立河, 等. 松嫩平原春小麦耐盐碱性鉴定及品种(系)筛选[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(8): 1008-1019.  
ZHANG T T, YU S, YU L H, et al. Saline-alkaline tolerance identification and varieties (lines) screening of spring wheat in Songnen Plain [J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(8): 1008-1019.
- [21] 李国瑞, 李朝苏, 吴春, 等. 西南地区小麦品种萌发期抗旱性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 212-219.  
LI G R, LI C S, WU C, et al. The analysis of drought resistance in different wheat varieties during germination in southwest area of China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 212-219.
- [22] 张春. 辽宁省主栽玉米抗旱品种的筛选及其抗旱生理机制的研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.  
ZHANG C. Screening of drought-resistant cultivars of maize in Liaoning Province and studying on their drought-resistance mechanism of physiology [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [23] 崔静宇, 关小康, 杨明达, 等. 基于主成分分析的玉米萌发期抗旱性综合评定[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 62-72.  
CUI J Y, GUAN X K, YANG M D, et al. Integrative evaluation of maize drought tolerance in germination period by PCA method [J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 62-72.
- [24] 田又升, 谢宗铭, 吴向东, 等. 水稻种质资源萌发期抗旱性综合鉴定[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 173-180.  
TIAN Y S, XIE Z M, WU X D, et al. Identification of drought tolerance of rice germplasm during germination period [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 173-180.
- [25] 杨瑰丽, 杨美娜, 李帅良, 等. 水稻萌芽期抗旱指标筛选与抗旱性综合评价[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2): 1-5.  
YANG G L, YANG M N, LI S L, et al. Screening and comprehensive evaluation of drought resistance indices of rice at germination stage [J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(2): 1-5.
- [26] 孙璐, 周宇飞, 汪澈, 等. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1714-1722.  
SUN L, ZHOU Y F, WANG C, et al. Screening and identification of sorghum cultivars for salinity tolerance during germination [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9): 1714-1722.