

裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选

陈新¹, 张宗文^{1,2}, 吴斌²

(¹国际生物多样性中心东亚办事处, 北京 100081; ²中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要:【目的】对来自不同生态区的 278 份裸燕麦种质在萌发期的耐盐性进行综合评价, 以为裸燕麦萌发期耐盐性的鉴定和评价提供方法指导, 同时为裸燕麦耐盐育种的亲本选择提供丰富的耐盐材料。【方法】以 1.2%NaCl 水溶液进行盐胁迫, 以蒸馏水培养为对照, 利用培养皿纸上发芽法在人工气候培养箱中进行裸燕麦种质萌发期的耐盐性鉴定, 培养条件为 25℃恒温、相对湿度 (70±5)%、每天 12 h 光照 (6:00—18:00)、光照强度 150 μmol·m⁻²·s⁻¹。以胚根至少与种子等长、苗高不短于种子长的 1/2 为发芽标准, 培养 96 h 时统计各供试种质的发芽势, 培养 168 h 时统计各供试种质的最终发芽率并测量幼苗的最长初生根长和苗高, 以发芽势、发芽率、根长、苗高 4 个性状来鉴定供试种质对盐胁迫的反应。以基于 4 个鉴定指标的耐盐系数为评价依据, 根据各指标耐盐系数的隶属函数值的变异系数来分配各指标的权重, 利用加权隶属函数法对供试 278 份裸燕麦种质进行综合评价, 结合聚类分析对供试种质进行耐盐性级别划分。【结果】与正常条件相比, 在 1.2% NaCl 胁迫下, 除了 SHX88 和 NM47 以外, 其他所有材料的发芽势和发芽率都降低; 所有材料的根长和苗高都受到抑制。不同材料在 4 个鉴定指标上都表现出差异。根据加权隶属函数值和聚类分析, 可将供试 278 份裸燕麦种质分为耐盐性不同的 5 个级别: 17 份材料高度耐盐 (1 级)、114 份材料耐盐 (2 级)、106 份材料中等耐盐 (3 级)、25 份材料对盐胁迫敏感 (4 级)、16 份材料对盐胁迫高度敏感 (5 级)。在 4 项鉴定指标中, 发芽势和发芽率与萌发期耐盐性的关系最为密切, 但发芽率在材料间的表现比发芽势更为稳定。【结论】发芽率可作为裸燕麦萌发期耐盐性快速鉴定或种质资源初步筛选的鉴定指标。加权隶属函数法对于裸燕麦种质耐盐性综合评价具有较好的应用价值。SHX75 等 17 份高耐盐性裸燕麦材料可进一步用于耐盐机理研究、耐盐育种以及盐碱地栽培。

关键词: 裸燕麦; 萌发期; 耐盐性; 综合评价; 筛选

Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance and Screening for Salt Tolerant Accessions of Naked Oat (*Avena nuda* L.) at Germination Stage

CHEN Xin¹, ZHANG Zong-wen^{1,2}, WU Bin²

(¹Bioversity International East Asia Office, Beijing 100081; ²Institute of Crop Science of Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081)

Abstract: 【Objective】Salt tolerance of 278 naked oat accessions from different ecological zones at germination stage were comprehensively evaluated in order to provide a guide for identification and evaluation of salt tolerance of naked oat, and supply abundant materials of salt tolerance for breeding of salt tolerance as breeding parents. 【Method】Identification for salt tolerant germplasm of naked oat was conducted in an artificial climate incubator with germination method on paper in petri dish under 1.2% NaCl aqueous solution and distilled water, respectively. The culture condition was constant temperature 25℃, relative humidity (70±5)%, 12 h light (6:00-18:00), light intensity 150 μmol·m⁻²·s⁻¹ in the incubator. When the length of radicle was equal to that of

收稿日期: 2013-12-15; 接受日期: 2014-03-06

基金项目: 国际生物多样性中心合作项目 (APO12/003)、农业部作物种质资源保护专项 (NB2012-2130135-25-06)

联系方式: 陈新, E-mail: chenxin200824@163.com; x.chen@cgiar.org. 通信作者张宗文, Tel: 010-82105685/82105751; E-mail: z.zhang@cgiar.org; zhangzongwen@caas.cn

kernel at least, and the shoot height was not less than 1/2 of seed length, the seed was considered as germinated. Germination potential of tested accessions was counted after 96 hours cultivation. Final germination rate, length of the longest primary root and seedling height were measured after 168 hours cultivation. These four traits were used to identify salt tolerance of tested accessions. Based on salt tolerance coefficients derived from four identification indices, the weight of each index was allocated according to variation coefficient of membership function value of four salt tolerance coefficients, and 278 naked oat accessions were evaluated for salt tolerance with the weighted membership function method and classified through cluster analysis. **【Result】** Compared with distilled water control, germination potential and germination rate of all accessions were declined except SHX88 and NM47, and the root length and seedling height of all accessions were suppressed by salt stress. There were differences among tested accessions based on the four kinds of identification indices. With the weighted membership function method and cluster analysis, salt tolerance of 278 naked oat accessions were comprehensively evaluated and categorized into five grades. Seventeen accessions were highly salt tolerant, 114 accessions were salt tolerant, 106 accessions were middle tolerant, 25 accessions were susceptible and 16 accessions were highly susceptible. Germination potential and germination rate were closer with salt tolerance at germination stage among the four identification indices, but germination rate was more variable than germination potential among tested accessions. **【Conclusion】** Germination rate is an efficient identification index for rapid identifying and preliminary screening of salt tolerant accessions. The weighted membership function method has good application value in the comprehensive evaluation of tolerance of naked oat to salt stress. SHX75 and other sixteen naked oat accessions which are highly tolerant to salt stress have provided a basis for breeding, cultivation and mechanism research of salt tolerance.

Key words: *Avena nuda* L.; germination stage; salt tolerance; comprehensive evaluation; screening

0 引言

【研究意义】土壤盐碱化是世界农业生产中主要的非生物胁迫因子之一,严重影响了作物的生长发育,进而造成产量降低、品质下降。目前,全球盐碱地面积约为 10 亿 hm^2 ,约占全球陆地面积的 6.7%^[1],并以每年 1.0×10^6 — 1.5×10^6 hm^2 的速度持续扩增^[2],已成为仅次于干旱的农业生产的第二大非生物胁迫。中国盐碱地总面积约为 0.99 亿 hm^2 ,约占中国国土面积的 1/3,主要分布在中国东北、华北、西北内陆地区以及长江以北沿海地带^[3]。通过筛选、培育耐盐作物来改良、利用盐碱地被认为是具有经济和生态双重效益的解决方案^[4]。燕麦(*Avena* spp.)是一种粮、经、饲、药多用途作物,具有较强的抗逆性、适应性等优点。生产上广泛种植有裸燕麦(*A.nuda* L.)和皮燕麦(*A.sativa* L.)^[5],中国以种植裸燕麦为主,主要集中在西北、华北、西南等地区的高海拔、冷凉地带^[6],而这些地区多为中国盐碱地密集分布区。因此,开展裸燕麦种质资源的耐盐性鉴定和耐盐种质的筛选,对于燕麦耐盐品种改良、促进盐碱地燕麦栽培具有重要的现实意义。**【前人研究进展】**作物的耐盐性是指作物在盐胁迫条件下通过一些生理途径降低或抵消盐分的伤害,维持基本生长的能力。近年来,国内外围绕小麦^[7]、水稻^[8]、玉米^[9]、大豆^[10-11]、黍稷^[12]、高粱^[13]等作物耐盐性的鉴定和耐盐品种的筛选开展了很多研究。作物的耐盐性是一种数量性状,在不同作物(或

品种)、不同生育阶段对盐胁迫的反应存在差异。许多研究指出,种子萌发期是作物能否在盐胁迫下完成生育周期最为关键的时期,对盐胁迫的积极响应决定着立苗和后期的生长发育^[14-15];常用的萌发期耐盐性评价方法有基于发芽率的相对盐害率分级法^[7]、分级赋分法^[16]、聚类分析^[13, 17]、模糊数学隶属函数法^[18]等。皮燕麦被认为是盐碱地改良的替代植物之一^[19],其在盐碱胁迫与耐盐机理^[20]、耐盐性鉴定与评价^[16, 21]、盐碱地栽培^[22]、耐盐性转基因^[23]等方面已有大量研究。尽管有研究指出裸燕麦对盐碱土也具有改良作用^[24],但是关于裸燕麦耐盐性机理^[25]、耐盐性鉴定^[26]等方面的研究进展缓慢,耐盐种质筛选方面的研究几乎未见报道。**【本研究切入点】**在作物耐盐性评价或种质资源筛选中,通常仅依据发芽率的相对盐害率来划分萌发期的耐盐性级别^[7,11],或者评价未能考虑不同鉴定指标的权重^[13, 16-18]。因而,采用多个鉴定指标并考察不同指标的权重对科学、有效地评价裸燕麦萌发期的耐盐性是十分必要的。

【拟解决的关键问题】本研究以种子萌发(发芽势、发芽率)和幼苗生长(根长、苗高)两类指标来评价裸燕麦品种萌发期的耐盐性,建立以加权隶属函数法综合评价燕麦种质耐盐性的技术体系,对来自国内外的裸燕麦种质材料进行综合评价,以期筛选出萌发期耐盐性较强的优异种质,为裸燕麦的耐盐育种提供亲本材料,发挥裸燕麦在利用和改良盐碱地方面的积极作用。

1 材料与amp;方法

1.1 供试裸燕麦种质材料

供试裸燕麦种质材料 278 份, 包括国外材料 35 份、国内材料 243 份。供试材料均由中国农业科学院国家农作物种质资源保存中心提供, 其地理来源和编号如表 1 所示。

1.2 耐盐性鉴定

利用人工气候培养箱进行裸燕麦萌发期的耐盐性鉴定, 采用培养皿纸上发芽法, 以 1.2%NaCl 水溶液 (由化学纯级 NaCl 和蒸馏水配制而成) 进行盐胁迫, 试验方法参照武俊英等^[17]的方法并略有改动。每个品种挑取饱满无残缺、大小基本一致的种子, 用 5% 次氯酸钠水溶液浸泡 15 min 进行消毒处理, 然后用自来水冲洗 2 min, 再用蒸馏水洗 1 min, 于纱布上摊开自然晾干备用。每个品种设蒸馏水对照和盐胁迫 2 种处理, 各处理 3 次重复, 1 个培养皿 (Φ 9 cm) 为 1 次重复, 每皿平铺 3 张中性滤纸 (Φ 10 cm)。用移液枪向进行盐胁迫的培养皿中加入 1.2%NaCl 水溶液 5 mL, 对照中加入蒸馏水 5 mL, 再用镊子 (70% 酒精消毒) 将已晾干的种子均匀地摆放在培养皿中, 随机挑选, 每皿 50 粒, 盖上皿盖。最后将培养皿一起放入人工气候培养箱 (Percival AR-36L3), 培养条件为 25℃ 恒温、相对湿度 (70±5) %、每天 12 h 光照 (6:00—18:00)、光照强度 150 μmol·m⁻²·s⁻¹。保持滤纸水分饱和状态, 用蒸馏水补充水分损失。

以胚根至少与种子等长、苗高不短于种子长的 1/2 为发芽标准。培养的第 4 天 (培养约 96 h) 统计各品种的发芽数, 计算各品种的发芽势; 培养的第 7 天 (培养约 168 h), 首先统计各品种的发芽数, 计算发芽率, 然后按品种从其 2 个处理中分别随机挑取 10 株幼苗, 测量最长根长 (从种子胚到最长根根尖的长度, 后称“根长”) 和苗高 (从种子胚到叶尖的长度)。各重复间发芽势、发芽率、根长、苗高均无显著差异, 因而各指标均取平均值。

$$\text{发芽势}(\%) = (\text{培养第 4 天发芽数} / 50) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{发芽率}(\%) = (\text{培养第 7 天发芽数} / 50) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{耐盐系数} = \text{盐胁迫指标平均值} / \text{蒸馏水对照指标平均值} \quad (3)$$

发芽势、发芽率分别按公式 (1)、(2) 计算, 基于鉴定指标的耐盐系数参照杨书华等^[27]的方法按照公式 (3) 计算。以 GP、GR、RL、SH 分别表示发芽势 (germination potential, GP)、发芽率 (germination rate, GR)、根长 (root length, RL)、苗高 (shoot height, SH), 以 RGP (relative germination potential, RGP)、RGR (relative germination rate, RGR)、RRL (relative root length, RRL)、RSH (relative shoot height, RSH) 分别表示基于发芽势、发芽率、根长、苗高的耐盐系数 (salt tolerant coefficient, STC)。

1.3 耐盐性综合评价

以供试材料的 RGP、RGR、RRL、RSH 为依据, 利用加权隶属函数法对 278 份裸燕麦种质进行综合评价, 并根据加权隶属函数值 (*D* 值) 对供试裸燕麦种

表 1 供试裸燕麦种质材料地理来源及编号

Table 1 Geographical origin and code of tested accessions of naked oat

地理来源 Geographical origin	材料数量 Quantity	材料编号 Code	地理来源 Geographical origin	材料数量 Quantity	材料编号 Code
丹麦 Denmark	1	FC01	中国黑龙江 Heilongjiang, China	7	HL01—HL07
法国 France	1	FC02	中国吉林 Jilin, China	2	JL01、JL02
国外 (不详) Foreign (unknown)	1	FC03	中国内蒙古 Inner Mongolia, China	53	NM01—NM53
加拿大 Canada	9	FC04—FC12	中国宁夏 Ningxia, China	2	NX01、NX02
前苏联 Former Soviet Union	16	FC13—FC28	中国青海 Qinghai, China	11	QH01—QH11
日本 Japan	1	FC29	中国四川 Sichuan, China	7	SC01—SC07
匈牙利 Hungary	4	FC30—FC33	中国山西 Shanxi, China	96	SHX01—SHX96
智利 Chile	2	FC34、FC35	中国陕西 Shaanxi, China	10	SX01—SX10
中国甘肃 Gansu, China	12	GS01—GS12	中国西藏 Tibet, China	2	XZ01、XZ02
中国贵州 Guizhou, China	6	GZ01—GZ06	中国云南 Yunnan, China	8	YN01—YN08
中国河北 Hebei, China	27	HB01—HB27	合计 Total	278	

质萌发期的耐盐性进行聚类分析。加权隶属函数法计算公式如下:

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

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

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

式中, X_i 为各供试材料基于鉴定指标 i 的耐盐系数, $X_{i \max}$ 、 $X_{i \min}$ 分别为供试材料中 X_i 的最大值和最小值, $\mu(X_i)$ 为各供试材料 X_i 的隶属函数值, CV_i 为各供试材料 $\mu(X_i)$ 的变异系数, W_i 表示 CV_i 在总变异中所占比率。所用鉴定指标与耐盐性呈正相关, 用公式 (4) 计算隶属函数值; 鉴定指标的权重用公式 (5) 计算; 根据公式 (6) 计算 D 值。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2007 整理试验数据, 使用 SPSS Statistics 17.0 进行方差分析、相关性分析和聚类分析。

2 结果

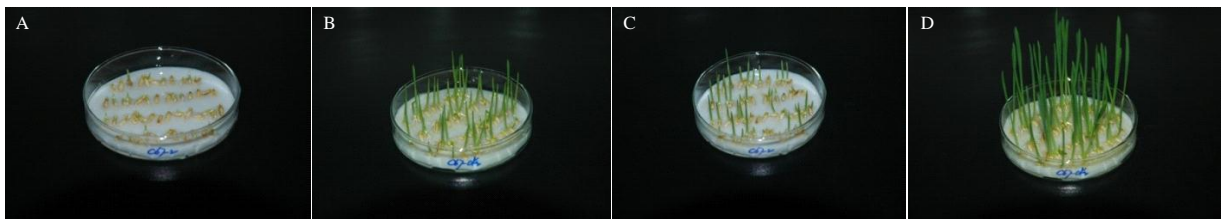
2.1 NaCl 胁迫对裸燕麦种子萌发和幼苗生长的影响与正常条件相比, 供试 278 份裸燕麦材料在 NaCl

胁迫条件下的萌发和生长都有一些变化, 从参试材料来看, 在 1.2%NaCl 胁迫下, 除了 NM47 和 SHX88 的发芽势略有增大外, 其他所有材料的发芽势都减小了; 只有 SHX88 的发芽率稍有升高, 其他所有材料的发芽率都下降了; 所有材料的幼苗生长 (根长、苗高) 都受到了抑制 (图 1, 表 2)。从鉴定指标来看, 4 个鉴定指标 GP、GR、RL、SH 在 1.2%NaCl 条件下的平均值比正常条件下的平均值分别减小了 44.7%、27.6%、63.5% 和 54.3% (图 1, 表 2), 说明 1.2%NaCl 对裸燕麦的种子萌发和幼苗生长都有一定的抑制作用, 幼苗生长比种子萌发受抑制程度大, 其中, 根长受抑制程度最大、发芽率受抑制程度最小。

参试裸燕麦种质材料萌发期鉴定指标的方差分析 (表 3) 显示, 鉴定指标在不同材料间和不同处理条件下均存在极显著的差异, 这种差异是进行裸燕麦萌发期耐盐性鉴定的基础, 说明 1.2%NaCl 能够有效地区分不同种质材料的耐盐性, 这个盐浓度是适宜的鉴定浓度。

2.2 裸燕麦种质材料的耐盐性差异

如表 4 所示, 不同裸燕麦种质材料在基于 4 个鉴定指标的耐盐系数上都有不同的表现, 在 RGP 平均值



A: 盐胁迫第 4 天; B: 正常条件第 4 天; C: 盐胁迫第 6 天; D: 正常条件第 6 天
A: The 4th day under salt stress; B: The 4th day under distilled water; C: The 6th day under salt stress; D: The 6th day under distilled water

图 1 玉麦 (材料编号 GS04) 在盐胁迫和正常条件下的萌发和生长

Fig. 1 Seed germination and seedling growth of Yumai (Accession No.GS04) under salt stress and distilled water

表 2 278 份裸燕麦种质材料在盐胁迫和正常条件下的种子萌发和幼苗生长情况

Table 2 Seed germination and seedling growth of 278 naked oat accessions under salt stress and distilled water

鉴定指标 Identification index	对照 (蒸馏水) Control (Distilled water)					盐胁迫 Salt stress (1.2% NaCl)				
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	标准差 Std.	变异系数 CV(%)	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	标准差 Std.	变异系数 CV(%)
GP(%)	61.33	99.33	86.10	7.79	9.04	0.00	96.00	47.60	22.29	46.82
GR(%)	84.67	100.00	92.86	4.10	4.41	6.00	98.67	67.31	20.98	31.17
RL(cm)	3.49	10.34	6.19	1.07	17.26	0.87	6.09	2.26	0.80	35.63
SH(cm)	4.52	12.13	9.11	1.41	15.44	0.76	7.66	4.16	1.72	41.26

表 3 278 份裸燕麦种质材料萌发期性状的方差分析 (F 检验值)Table 3 Analysis of variance of germination traits of 278 naked oat accessions (F -test value)

变异来源 Source of variation	GP	GR	RL	SH
材料间 Inter-accession	1.576**	1.304**	4.016***	5.883***
处理间* Inter-treatment	952.057***	457.505***	6021.346***	4753.758***

* 处理包括蒸馏水 CK 与 1.2%NaCl 盐胁迫; ** 表示在 0.05 水平上显著相关; *** 表示在 0.01 水平上显著相关。下同

* Treatments include distilled water and 1.2%NaCl salt stress. ** This indicates significant correlation at 0.05 level. *** This indicates significant correlation at 0.01 level. The same as below

表 4 基于不同鉴定指标的耐盐系数

Table 4 Coefficient of salt tolerance based on different identification indices

STC	RGP	RGR	RRL	RSH
最小值 Minimum	0.0000	0.0652	0.1584	0.0927
最大值 Maximum	1.1509	1.0072	0.6424	0.9027
平均值 Average	0.5488	0.7228	0.3621	0.4461
标准差 Std.	0.2460	0.2174	0.0973	0.1538
变异系数 CV	0.4482	0.3008	0.2688	0.3448

以上的材料有 155 份, 在 RGR 平均值以上的材料有 178 份, 在 RRL 平均值以上的材料有 123 份, 在 RSH 平均值以上的品种有 156 份; RGP 最大的是材料 NM37 (1.1509), RGR 最大的是 SHX88 (1.0072), RRL 最大的是 JL01 (0.6424), RSH 最大的是 FC14 (0.9027)。据此, 分别以 RGP、RGR、RRL、RSH 为依据的种质耐盐性排序也就不一致了。因此, 依据 RGP、RGR、RRL、RSH 其中的任一单项耐盐系数都不能全面、有效地评价不同裸燕麦材料的耐盐性, 综合考察这些指标的评价是必要的。

2.3 裸燕麦萌发期耐盐性的综合评价

以 RGP、RGR、RRL、RSH 为依据, 利用加权隶属函数法得到了 278 份裸燕麦种质各指标耐盐系数的隶属函数值 (表 5), 就平均值而言, $\mu(\text{RGR})$ 最大, $\mu(\text{RRL})$ 与 $\mu(\text{RSH})$ 相当且都较小; 变异系数的比较表明, $\mu(\text{RGR})$ 在种质间的差异最小, $\mu(\text{RRL})$ 在种质间的差异最大; 在权重方面, 发芽率的权重最小, 根长的权重最大, 发芽势和苗高 2 个指标的权重居中且相当。

供试 278 份裸燕麦种质的 D 值变化范围为 0.0198—0.7891。对 $\mu(\text{RGP})$ 、 $\mu(\text{RGR})$ 、 $\mu(\text{RRL})$ 、 $\mu(\text{RSH})$ 与 D 值进行相关性分析, 结果 (表 6) 显示, D 值与这些指标值均呈极显著正相关关系, 表明 D 值可以综合评价供试裸燕麦萌发期的耐盐性, 并且 D 值越大对应材料的耐盐性越强。 $\mu(\text{RGP})$ 、 $\mu(\text{RGR})$ 与 D 值的相

关系数较大, 说明发芽势、发芽率与萌发期耐盐性的关系最为密切。

根据供试裸燕麦种质材料的 D 值, 对供试裸燕麦种质进行聚类分析。根据聚类结果, 278 份裸燕麦种质材料可被分为 5 个类群, 依据 D 值大小分别归为 5 个耐盐性级别 (表 7), SHX75 等 17 份材料 (6.1%, 占总数, 下同) 高度耐盐 (1 级)、QH11 等 114 份材料 (41.0%) 耐盐 (2 级)、HB02 等 106 份材料 (38.1%) 中等耐盐 (3 级)、NM08 等 25 份材料 (9.0%) 对盐胁迫敏感 (4 级)、NM16 等 16 份材料 (5.8%) 对盐胁迫高度敏感 (5 级)。从中可以看出, 两端分布较少、中间类型较多, 符合正态分布, 因而这种分级是合理的。其中, 属于耐盐性 1 级的 17 份材料都具有较大的耐盐系数, 这些材料基于 4 个鉴定指标的耐盐系数都在平均水平以上。

表 5 278 份裸燕麦种质基于 4 种耐盐系数的隶属函数值

Table 5 Membership function values of 278 naked oat accessions based on four kinds of salt tolerant coefficient

项目 Item	$\mu(\text{RGP})$	$\mu(\text{RGR})$	$\mu(\text{RRL})$	$\mu(\text{RSH})$
平均值 Average	0.4769	0.6981	0.4209	0.4363
标准差 Std.	0.2137	0.2308	0.2011	0.1899
变异系数 CV	0.4481	0.3306	0.4778	0.4353
权重 Weight	0.2649	0.1954	0.2824	0.2573

表 6 基于各指标的耐盐系数的隶属函数值与 D 值的相关性分析Table 6 Correlation analysis of the D value with membership function values based on salt tolerant coefficient of identification indices

项目 Item	$\mu(\text{RGP})$	$\mu(\text{RGR})$	$\mu(\text{RRL})$	$\mu(\text{RSH})$	D value
$\mu(\text{RGP})$	1				
$\mu(\text{RGR})$	0.875***	1			
$\mu(\text{RRL})$	0.433***	0.405***	1		
$\mu(\text{RSH})$	0.756***	0.726***	0.387***	1	
D value	0.914***	0.888***	0.687***	0.849***	1

表 7 基于 D 值对 278 份裸燕麦种质耐盐性的分级结果Table 7 Classification of salt tolerance of 278 naked oat accessions based on the D value

级别	D 值变化范围	相对耐盐性	材料数量	材料编号										
Grade	Range of D value	Relative tolerance	Quantity	Code										
1	0.7223—0.7891	高耐 High tolerance	17	SHX75	SHX15	SHX88	FC26	FC02	FC20	FC30	NM37	SHX80	FC14	QH08
				NM26	SHX41	SHX13	SHX22	HB12	FC24					
2	0.5386—0.6987	耐盐 Tolerance	114	QH11	SHX79	FC18	NM02	HB11	JL01	SHX47	FC19	NM31	HB23	HB20
				SHX45	SHX19	SHX08	SHX67	FC21	SHX18	FC31	SHX63	SHX81	HB17	
				HB15	NM36	SHX78	SHX87	SHX59	HB03	SHX07	FC25	GS08	NM04	SHX17
				SHX60	NM42	SHX43	NM38	SHX32	HB22	SHX02	FC22	FC03	FC06	SHX33
				SHX04	NM48	FC35	SHX89	HB10	NM41	SHX77	FC27	HL05	NM33	NM53
				NM32	HB01	FC08	NM05	NM30	HB04	HB18	HB14	NM29	NM44	NM19
				SHX72	XZ01	SHX44	SHX42	SHX48	NM18	NM28	GS11	SHX46	SHX66	
				SHX49	NM51	SHX31	SHX06	SHX24	SHX03	SHX64	FC09	SHX16	QH04	
				NM06	NM09	FC33	XZ02	HB09	GS09	NM35	GS10	SHX96	SHX26	GS06
				SHX94	HL03	FC32	GS05	NM43	NM07	SHX56	NM17	HB25	SX02	NM49
				GS02	SHX83	QH01	YN03	SHX40	SHX76	HB05				
3	0.3178—0.5352	中耐 Middle tolerance	106	HB02	SHX54	SHX38	HB13	NM39	SHX62	NM34	NM52	SHX52	SHX05	
				SHX73	SHX25	HL04	SHX28	FC01	NM27	NM21	GS04	SHX30	SHX93	NM01
				FC17	FC15	SHX36	NM40	SHX35	SHX10	HL02	SHX23	FC07	SC06	QH02
				SHX57	SHX84	NM22	SHX58	SHX70	HB07	GS03	QH05	SX06	GS12	SHX95
				SHX34	SHX65	SHX21	HB08	HB24	SHX51	FC16	SHX50	FC28	SHX68	
				SHX27	GZ02	NX01	SHX90	SHX12	SX09	NM50	NM20	GS07	SHX92	QH07
				FC23	NM23	SX04	NM13	NM11	FC29	SHX74	SHX69	SC07	NM25	NX02
				SHX85	SHX20	SHX53	SHX91	HL07	NM03	HL01	QH09	NM24	FC13	GS01
				HB21	FC10	QH10	FC11	GZ01	GZ05	SHX09	SX03	SHX61	SHX29	SX10
				HB16	NM45	JL02	FC34	GZ04	SHX82	HL06	YN07	QH06		
4	0.1532—0.3057	敏感 Susceptibility	25	NM08	HB26	SX07	HB06	SX05	SHX55	HB19	FC12	SHX86	GZ03	QH03
				HB27	SHX01	SX01	SHX39	FC04	SHX11	NM46	SHX37	FC05	YN02	SC05
				YN08	NM10	SHX14								
5	0.0198—0.1306	高敏 High susceptibility	16	NM16	SC02	NM12	YN06	NM47	SC01	SC04	SX08	GZ06	YN01	NM15
				NM14	SHX71	YN04	YN05	SC03						

3 讨论

3.1 萌发期耐盐性的鉴定

盐碱土里的可溶性盐主要由 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等离子组成, 而 Cl^- 是中国盐碱区的主要离子成分^[28], 并且 NaCl 是中性盐的主要形式。供试裸燕麦种质地理来源包括中国的华北、西北、东北等地区, 以及前苏联、加拿大等国家, 因而, 利用 NaCl 进行盐胁迫来评价燕麦耐盐性具有现实意义, 既能评价中国的裸燕麦耐盐种质资源, 又能为引进国外耐盐种质资源提供一些参考。

与正常条件相比, 在 1.2% NaCl 胁迫下, 几乎所有供试材料的萌发和生长都受到了抑制, 但是 NM47 的发芽势稍有升高、SHX88 的发芽势和发芽率略有升高, 这可能与不同材料对这种盐胁迫强度的适应性差异有关; NM47 和 SHX88 的萌发指标不降反升, 也说明 1.2% NaCl 在它们的萌发进程中可能发挥了离子正

效应^[29]。在 1.2% NaCl 条件下, 各项鉴定指标都出现下降趋势, 而且引起不同材料间的差异达到极显著, 说明这些指标能够有效地鉴别不同材料的耐盐性。在这些指标中, 幼苗生长指标比种子萌发指标受胁迫的作用大, 这可能是体外高浓度 NaCl 溶液大量渗入体内引起 Na^+ 、 Cl^- 等离子富集产生离子毒害并引起体内营养水平失衡而造成幼苗生长受到严重抑制的缘故。

关于鉴定指标, 本研究结果表明, 发芽势、发芽率与裸燕麦萌发期的耐盐性关系最为密切(表 6), 但发芽率在材料间的表现比发芽势更稳定(表 4, 表 5), 这与祁栋灵等^[8]在水稻上的研究结论一致, 武俊英等^[17]也认为发芽率是野燕麦萌发期耐盐性鉴定的主要指标之一, 这可能也是大部分作物萌发期耐盐性鉴定以发芽率为鉴定指标、以相对发芽率为评价依据的原因。

1.2% NaCl 胁迫下的发芽率与蒸馏水对照下的发芽率呈极显著的正相关关系, 这种关系在小麦^[7]、大

豆^[11]等作物上也存在,意味着在正常条件下发芽率高的材料在盐胁迫条件下的发芽率也高,而正常条件下的发芽率主要由种子活力决定,因而,盐胁迫下种子的发芽率不仅受其耐盐性决定还受到种子活力的影响。因此,在进行耐盐性鉴定时,应尽量选择新收获的具有正常生活力的种子。

3.2 萌发期耐盐性的综合评价

在作物种质资源的耐盐性评价中,常以基于发芽率的相对盐害率^[7-8,11]来划分作物萌发期的耐盐性级别,或以基于发芽率的耐盐临界值^[26]来直接比较萌发期耐盐性的大小,但是仅仅以发芽率可能并不能全面、有效地反映作物萌发期的耐盐性。本研究分别以RGP、RGR、RRL、RSH为依据的耐盐性排序并不一致(表4),进一步说明了单一指标并不能对作物的耐盐性进行全面、有效的评价,也表明了综合评价是必要的。与分级赋分法、聚类分析、平均隶属函数法等评价方法相比,加权隶属函数法通过无量纲化将各指标的耐盐系数都转换为[0,1]的度量值,从而将不同指标放到了同一比较平台上,增强了不同指标间的可比性,可以较好地定量评价每个品种,同时还考虑了各项鉴定指标对耐盐性的“贡献”(即权重),因而,其能科学、有效地对耐盐性进行评价。本研究以各指标耐盐系数的隶属函数值的变异系数来分配各指标的权重,由表5可知,根长比发芽势、苗高、发芽率所荷载的萌发期耐盐性信息要多,其原因可能是根系作为吸收水肥的主要器官与盐分有更直接的接触并最先响应盐胁迫,而发芽势、发芽率除了受盐分的影响还有种子本身活力的限制。用变异系数来分配权重的方法在披碱草属野生种质苗期耐盐性评价^[30]等研究中也应用。朱世杨等^[31]曾以各指标耐盐系数的隶属函数值的标准差系数来划分各指标的权重进而评价花椰菜萌发期的耐盐性。基于变异系数分配权重的方法与基于标准差系数分配权重的方法基本一致,都是以试验数据为基础客观地评判各指标的重要性,并未附带像萌发期人们侧重考虑发芽率那样的主观考量。另外,采用多种鉴定指标时还需考察鉴定指标之间是否存在信息重叠,如若存在,则可通过主成分分析获得综合指标^[10],这一点对于裸燕麦萌发期耐盐性的综合评价具有借鉴意义。

4 结论

发芽率可作为裸燕麦萌发期耐盐性快速鉴定或大量材料初步筛选的鉴定指标。通过加权隶属函数法综合评价和聚类分析,278份裸燕麦种质材料可被划归5个耐盐级别:高耐盐类(1级)17份材料、耐盐类(2级)114份材料、中等耐盐类(3级)106份材料、敏感类(4级)25份材料以及高敏感类(5级)16份材料。

References

- [1] 邢军武. 盐碱环境与盐碱农业. 地球科学进展, 2001, 16(2): 257-266.
Xing J W. Saline environment and saline agriculture. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(2): 257-266. (in Chinese)
- [2] Kovda V A. Loss of productive land due to salinization. *Ambio*, 1983, 12(2): 91-93.
- [3] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 黎立群, 单光宗, 尤文璘, 曾宪修, 张粹雯, 张丽君, 宋荣华. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993: 250-252.
Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, Li L Q, Shan G Z, You W L, Zeng X X, Zhang C W, Zhang L J, Song R H. *Saline-Alkaline Soil in China*. Beijing: Science Press, 1993: 250-252. (in Chinese)
- [4] 王善仙, 刘宛, 李培军, 吴海燕. 盐碱土植物改良研究进展. 中国农学通报, 2011, 27(24): 1-7.
Wang S X, Liu W, Li P J, Wu H Y. Advances of researches in plant-improvement of saline-alkaline soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24): 1-7. (in Chinese)
- [5] 郑殿升, 张宗文. 大粒裸燕麦(莜麦)(*Avena nuda* L.)起源及分类问题的探讨. 植物遗传资源学报, 2011, 12(5): 667-670.
Zheng D S, Zhang Z W. Discussion on the origin and taxonomy of naked oat (*Avena nuda* L.). *Journal of Plant Genetic Resources*, 2011, 12(5): 667-670. (in Chinese)
- [6] 董玉琛, 郑殿升. 中国作物及其野生近缘植物. 北京: 中国农业出版社, 2006: 250-254.
Dong Y C, Zheng D S. *Crops and Their Wild Relatives in China: Food Crops*. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 250-254. (in Chinese)
- [7] 王萌萌, 姜奇彦, 胡正, 张辉, 樊守金, 冯沂, 张海玲. 小麦品种资源耐盐性鉴定. 植物遗传资源学报, 2012, 13(2): 189-194.
Wang M M, Jiang Q Y, Hu Z, Zhang H, Fan S J, Feng L, Zhang H L. Evaluation for salt tolerance of wheat cultivars. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2012, 13(2): 189-194. (in Chinese)

- [8] 祁栋灵, 张三元, 曹桂兰, 阮仁超, 孙明茂, 张艳蕊, 周庆阳, 韩龙植. 水稻发芽期和幼苗前期耐碱性的鉴定方法研究. 植物遗传资源学报, 2006, 7(1): 74-80.
- Qi D L, Zhang S Y, Cao G L, Ruan R C, Sun M M, Zhang Y R, Zhou Q Y, Han L Z. Studies on screening methods for alkaline tolerance at germination period and early seedling stage in rice. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2006, 7(1): 74-80. (in Chinese)
- [9] Giaveno C D, Ribeiro R V, Souza G M, de Oliveira R F. Screening of tropical maize for salt stress tolerance. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2007, 7(3): 304-313.
- [10] 肖鑫辉, 李向华, 刘洋, 王克晶. 野生大豆 (*Glycine soja*) 耐高盐碱土壤种质的鉴定与评价. 植物遗传资源学报, 2009, 10(3): 392-398.
- Xiao X H, Li X H, Liu Y, Wang K J. Identification and assessment of salt-tolerant germplasm of wild soybean (*Glycine soja*) in high saline soil. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2009, 10(3): 392-398. (in Chinese)
- [11] 姜奇彦, 胡正, 张辉, 王萌萌, 唐俊源, 倪志勇, 姜锋. 大豆种质资源耐盐性鉴定与研究. 植物遗传资源学报, 2012, 13(5): 726-732.
- Jiang Q Y, Hu Z, Zhang H, Wang M M, Tang J Y, Ni Z Y, Jiang F. Evaluation for salt tolerance in soybean cultivars [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2012, 13(5): 726-732. (in Chinese)
- [12] 刘敏轩, 张宗文, 吴斌, 陆平. 黍稷种质资源芽、苗期耐中性混合盐胁迫评价与耐盐生理机制研究. 中国农业科学, 2012, 45(18): 3733-3743.
- Liu M X, Zhang Z W, Wu B, Lu P. Evaluation of mixed salt-tolerance at germination stage and seedling stage and the related physiological characteristics of *Panicum miliaceum* L.. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(18): 3733-3743. (in Chinese)
- [13] 孙璐, 周宇飞, 汪澈, 肖木辑, 陶冶, 许文娟, 黄瑞冬. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1714-1722.
- Sun L, Zhou Y F, Wang C, Xiao M J, Tao Y, Xu W J, Huang R D. Screening and identification of sorghum cultivars for salinity tolerance during germination. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(9): 1714-1722. (in Chinese)
- [14] Verma O P S, Yadava R B R. Salt tolerance of some oats (*Avena sativa* L.) varieties at germination and seedling stage. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1986, 156(2): 123-127.
- [15] Khan A A, Rao S A, McNeilly T. Assessment of salinity tolerance based upon seedling root growth response functions in maize (*Zea mays* L.). *Euphytica*, 2003, 131(1): 81-89.
- [16] 罗志娜, 赵桂琴, 刘欢. 24 个燕麦品种种子萌发耐盐性综合评价. 草地与草坪, 2012, 32(1): 34-41.
- Luo Z N, Zhao G Q, Liu H. The comprehensive evaluation of salt tolerance for 24 oat cultivars. *Grassland and Turf*, 2012, 32(1): 34-41. (in Chinese)
- [17] 武俊英, 刘景辉, 翟利剑, 李倩, 李立军. 不同品种燕麦种子萌发和幼苗生长的耐盐性. 生态学杂志, 2009, 28(10): 1960-1965.
- Wu J Y, Liu J H, Zhai L J, Li Q, Li L J. Salt tolerance of seed germination and seedling growth of different oat varieties. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(10): 1960-1965. (in Chinese)
- [18] 陈托兄, 王铁梅, 卢欣石. 紫花苜蓿非秋眠型标准品种种子萌发耐盐性评价. 草业科学, 2011, 28(1): 121-126.
- Chen T X, Wang T M, Lu X S. Evaluation on the salt tolerance of fall non-dormancy standard varieties of alfalfa at the germination period. *Pratacultural Science*, 2011, 28(1): 121-126. (in Chinese)
- [19] Ashraf M Y, Ashraf M, Mahmood K, Akhter J, Hussain F, Arshad M. Phytoremediation of saline soils for sustainable agricultural productivity//Ashraf M, Ozturk M, Ahmad M S A. *Plant Adaptation and Phytoremediation*. Dordrecht; New York: Springer, 2010: 335-355.
- [20] Zhao G Q, Ma B L, Ren C Z. Growth, gas exchange, chlorophyll fluorescence, and ion content of naked oat in response to salinity. *Crop Science*, 2007, 47(1): 123-131.
- [21] Talwar H S, Kumari A, Surwenshi A, Seetharama N. Sodium: Potassium ratio in foliage as an indicator of tolerance to chloride-dominant soil salinity in oat (*Avena sativa* L.). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 81(5): 481-484.
- [22] 吴姝菊, 刘凤歧, 张月学, 刘杰淋, 韩微波, 朱瑞芬, 唐凤兰. 盐碱化土壤上不同因素对饲用燕麦鲜草产量的影响. 中国农学通报, 2011, 27(21): 199-202.
- Wu S J, Liu F Q, Zhang Y X, Liu J L, Han W B, Zhu R F, Tang F L. Effect of different factors of saline alkali soil stress on yield of fresh feed oat. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 199-202. (in Chinese)
- [23] Maqbool S B, Zhong H, El-Maghraby Y, Ahmad A, Chai B, Wang W, Sabzikar R, Sticklen M B. Competence of oat (*Avena sativa* L.) shoot apical meristems for integrative transformation, inherited expression, and osmotic tolerance of transgenic lines containing *HVA1*. *Theoretical and Applied Genetics*, 2002, 105(2/3): 201-208.
- [24] Wu J Y, Liu J H, Li Q, Zhao B, Li L. Regulating effect of sowing depth on saline land oat growth and K^+ and Na^+ migration//Iranpour R, Zhao J, Wang A, Yang F L, Li X. *Advances in Environmental Science and Engineering*, Pts 1-6. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd., 2012, 518-523: 4633-4641.

- [25] Xu Q, Xu X, Zhao Y, Jiao K, Herbert S J, Hao L. Salicylic acid, hydrogen peroxide and calcium-induced saline tolerance associated with endogenous hydrogenperoxide homeostasis in naked oat seedlings. *Plant Growth Regulation*, 2008, 54(3): 249-259.
- [26] 张向前, 刘景辉, 齐冰洁, 郭晓霞, 贺鹏程. 复盐胁迫对几种燕麦种子萌发指数的影响. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 233-238.
Zhang X Q, Liu J H, Qi B J, Guo X X, He P C. Effects of mixed salt stress on seed germination index of seven Canadian naked oat varieties. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(6): 233-238. (in Chinese)
- [27] 杨书华, 张春宵, 朴明鑫, 赵泽双, 杨德光, 李万军, 刘文国, 李晓辉. 69 份玉米自交系的苗期耐盐碱性分析. 种子, 2011, 30(3): 1-6.
Yang S H, Zhang C X, Piao M X, Zhao Z S, Yang D G, Li W J, Liu W G, Li X H. Analysis on salt and alkaline tolerance of sixty-nine maize inbred lines at seedling stage. *Seed*, 2011, 30(3): 1-6. (in Chinese)
- [28] 张建锋, 张旭东, 周金星, 刘国华, 李冬雪. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施. 水土保持研究, 2005, 12(6): 28-30.
Zhang J F, Zhang X D, Zhou J X, Liu G H, Li D X. World resources of saline soil and main amelioration measures. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(6): 28-30. (in Chinese)
- [29] 张红香, 田雨, 周道玮, 郑伟, 王敏玲. 大麦种子对盐的发芽响应模型. 植物生态学报, 2012, 36(8): 849-858.
Zhang H X, Tian Y, Zhou D W, Zheng W, Wang M L. Research on modeling germination response to salinity of barley seeds. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(8): 849-858. (in Chinese)
- [30] 贾亚雄, 李向林, 袁庆华, 万里强, 孟芳. 披碱草属野生种质资源苗期耐盐性评价及相关生理机制研究. 中国农业科学, 2008, 41(10): 2999-3007.
Jia Y X, Li X L, Yuan Q H, Wan L Q, Meng F. Evaluation of salt-tolerance and the related physiological characteristics of wild *Elymus* spp.. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 2999-3007. (in Chinese)
- [31] 朱世杨, 张小玲, 罗天宽, 刘庆, 唐征, 荆赞革. 花椰菜种质资源萌发期耐盐性综合评价. 核农学报, 2012, 26(2): 380-390.
Zhu S Y, Zhang X L, Luo T K, Liu Q, Tang Z, Jing Z G. Comprehensive evaluation of salt tolerance in cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.) during germination stage. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(2): 380-390. (in Chinese)

(责任编辑 李莉)