

苜蓿和扁蓿豆萌发期耐盐指标筛选 及耐盐性综合评价

于洁¹, 闫利军², 冀晓婷¹, 穆怀斌³, 米福贵¹, 李鸿雁³

(¹ 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010019; ² 四川省草原科学研究院, 成都 611743;

³ 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010)

摘要:为探究苜蓿(*Medicago sativa* L.)和扁蓿豆(*Medicago ruthenica* (L.) Trautv.)种子萌发期的耐盐性强弱, 采用复盐溶液模拟盐胁迫的方法, 研究了不同浓度梯度(0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5%)盐胁迫对5份野生苜蓿和5份野生扁蓿豆种子萌发的影响。测定了发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、苗长、幼苗干重, 利用方差分析、相关分析、主成分分析、隶属函数分析和灰色关联分析进行了耐盐性综合评价。结果表明相同指标不同浓度盐溶液和不同材料之间多存在显著差异, 各指标之间存在不同程度的相关关系。各指标中与耐盐强弱最相关的指标为幼苗干重, 其关联度为0.752, 其次为发芽率, 关联度为0.745。供试10份材料中来源于中国内蒙古通辽市大青沟自然保护区的扁蓿豆和中国内蒙古呼和浩特武川县的扁蓿豆耐盐性较强, 其综合耐盐D值和关联度均较高, 分别为0.807、0.699和0.793、0.716。总体比较供试苜蓿和扁蓿豆材料, 扁蓿豆萌发期耐盐性较强。

关键词: 苜蓿; 扁蓿豆; 耐盐性; 综合评价

Evaluation of Salt Tolerance and Screening for Salt Tolerant Accessions of *Medicago sativa* and *Medicago ruthenica* at Germination Stage

YU Jie¹, YAN Li-jun², JI Xiao-ting¹, MU Huai-bin³, MI Fu-gui¹, LI Hong-yan³

(¹ College of Grassland Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019;

² Sichuan Academy of Grassland Sciences, Chengdu 611743;

³ Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010)

Abstract: The objective of this study was to investigate the salt tolerance between *Medicago sativa* L. and *Medicago ruthenica* (L.) Trautv. Five wild alfalfa and five wild ruthenian medic from different areas were selected as test materials. Compared to the control, the salt stress of 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%, 1.5% was used to explore the effect of tested materials at germination stage. The comprehensive evaluation index of salt tolerant coefficients containing the germination rate, germination energy, germination index, vital index, root length, seedling length and seedling dry weight were tested. The salt-tolerance comprehensive evaluation value were analyzed by variance analysis, correlation analysis, principal components analysis and subordinate function analysis. The results showed that different salt concentration and different materials had significant differences in the same index. There were different correlational relationships among different indexes. Two indexes including GR and DW were closely related to the salt tolerance, the correlation value was 0.745 and 0.752. Besides, the materials of ruthenian medic came from Tongliao Daqinggou Nature Reserve and Wuchuan county near Hohhot of Inner Mongolia had the higher salt resistance, the D

收稿日期: 2016-08-18 修回日期: 2016-10-11 网络出版日期: 2017-04-21

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20170421.0924.006.html>

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项项目(201403048-5); 四川省“十三五”育种攻关项目

第一作者研究方向为牧草育种与生物技术。E-mail: yujie090412@163.com

通信作者: 米福贵, 研究方向为牧草育种与生物技术。E-mail: mfguinm@163.com

李鸿雁, 研究方向为牧草种质资源保存、利用与创新。E-mail: hongyli1964@126.com

value and the correlation value was 0.807, 0.699 and 0.793, 0.716 respectively. To sum up, ruthenian medic were better than alfalfa in terms of salt resistance.

Key words: *Medicago sativa*; *Medicago ruthenica*; salt tolerance; evaluation

我国的盐渍土面积约占耕地面积的 20%, 并且每年仍在增加, 在西北、华北、东北西部和滨海地区都有分布, 类型多样。这些盐碱地多分布于我国少数民族地区, 据不完全统计, 我国内蒙古、新疆、宁夏、青海、西藏 5 个少数民族地区的盐碱地面积达到 6000 万 hm^2 以上, 占我国盐碱地面积的 60% 左右。土壤盐渍化使我国少数民族地区草场退化严重, 土壤沙化, 优质牧草短缺, 严重影响我国少数民族地区畜牧业健康快速的发展。盐渍土的改良和利用成为重要的资源开发利用问题^[1-3]。同传统土壤改良方法相比较, 生物改良是盐碱地开发利用的最有效方法和手段。大量的研究表明, 通过挖掘植物自身的耐盐能力, 筛选培育耐盐品种是对盐渍土的改良和利用最有效最经济的方法^[4-6]。对此, 各国科研人员做了大量研究工作, 并取得了突破性进展。美国 Arizona 大学 Glenn 等利用完全海水进行了大量盐生植物包括滨藜、盐角草、碱蓬、盐草属植物的栽培试验, 其中盐草的海水种植与综合开发技术成果已接近实用化^[7]。中国农业科学院畜牧研究所耿华珠、杨青川等以保定苜蓿、秘鲁苜蓿、RS 苜蓿等为亲本, 在含盐量为 0.3% ~ 0.5% 的盐碱地进行混合选择, 培育出耐盐品种中苜一号, 已在我国盐渍化地区大面积推广和应用, 效果显著^[8]。但我国利用生物改良盐碱地的植物资源相对较少, 因此, 对植物进行耐盐性评价是筛选耐盐植物和选育耐盐品种的基础性工作。扁蓿豆 (*Medicago ruthenica* (L.) Trautv.) 又名花苜蓿, 在我国北方的高山草原、典型草原和荒漠化草原均有分布^[9], 其以较强的抗寒、抗旱、耐盐碱、耐贫瘠以及较高的营养价值被研究者广泛应用^[10-13], 但其适口性、丰产性能较差。紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 因种植面积广泛, 良好的适口性以及高蛋白含量而有较高的经济和生态价值^[14], 但其适应能力弱于同属植物扁蓿豆, 我国学者将其二者杂交, 得到龙牧 801 和龙牧 803 号苜蓿, 前者具有抗寒、抗旱和耐盐碱的特性, 后者是生产性能较好的丰产型^[15]。因此研究扁蓿豆与苜蓿的耐盐性强弱, 对于苜蓿耐盐新品种培育具有重要意义。我国对于苜蓿和扁蓿豆耐盐性研究多集中在苜蓿、扁蓿豆品种间的比较, 对

苜蓿与扁蓿豆的综合评价及鉴定方面的研究较少, 或未考虑不同指标的权重^[10,16], 或并未对其进行综合评价^[17], 并且对于黄花苜蓿、紫花苜蓿和扁蓿豆的耐盐性描述不一致, 王俊杰等^[16]以中苜一号等苜蓿作对照, 探究其与黄花苜蓿幼苗的耐盐性, 结果表明黄花苜蓿的总体耐盐性强于紫花苜蓿。秦峰梅等^[18]对黄花苜蓿和紫花苜蓿的耐盐性研究表明, 黄花苜蓿耐盐性较紫花苜蓿强。张俊叶等^[19]对几种豆科牧草种子萌发期的耐盐性比较表明, 中苜 3 号紫花苜蓿的耐盐性优于扁蓿豆, 黄花苜蓿的耐盐性最差。史万光等^[17]对 4 个不同品系的扁蓿豆和 1 份黄花苜蓿材料进行了种子发芽期的耐盐性鉴定, 确定了扁蓿豆的耐盐性强于黄花苜蓿。为探究不同地区野生苜蓿和扁蓿豆材料的耐盐性, 采用复盐溶液模拟盐胁迫的方法, 对其种子萌发期各盐害指标进行计算, 利用方差分析、相关分析、主成分分析、隶属函数分析和灰色关联分析对 10 份不同苜蓿属材料种子萌发期进行了耐盐性综合评价及耐盐指标的筛选。为紫花苜蓿及扁蓿豆的耐盐种质资源创制和选育提供理论依据, 也为其耐盐性快速鉴定提供有效的方法。

1 材料与方法

1.1 供试材料

所有供试材料均来源于中国农业科学院草原研究所牧草种质中期库。其中苜蓿材料 5 份, 扁蓿豆材料 5 份, 均为野外采集的野生或衍生种质资源, 具体信息见表 1。

1.2 试验方法

供试材料中分别挑选 100 粒饱满的种子, 砂纸打磨后置于边长为 10 cm 的发芽盒中, 盒内铺 2 层滤纸。将 5 mL 浓度为 0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5% 的复盐 (NaCl 80%, CaCO_3 10%, MgSO_4 5%, K_2SO_4 5%) 溶液分别注入发芽盒中, 蒸馏水为对照 (CK), 每处理重复 3 次。发芽盒置于相对湿度 60%、恒温 25 °C 恒定条件的 E/PGC (E 系列光频调制) 进入式植物培养箱中, 昼夜交替培养 11 d。每日称重补充蒸馏水, 并记录发芽数。11 d 后随机测量 10 个种子的胚根长和胚芽长, 并将幼苗置于通风处风干后称重。

表 1 供试材料来源及编号

Table 1 Origin and code of tested varieties

编号 Code	材料名称 Material name	原产地 Origin	编号 Code	材料名称 Material name	原产地 Origin
H1	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	中国陕西兴平县	B1	扁蓿豆 <i>Medicago ruthenica</i> (L.) Trautv.	中国内蒙古呼和浩特市清水河县
H2	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	中国陕西榆林草原站	B2	扁蓿豆 <i>Medicago ruthenica</i> (L.) Trautv.	中国内蒙古锡林郭勒市白音锡勒
H3	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	日本	B3	扁蓿豆 <i>Medicago ruthenica</i> (L.) Trautv.	中国内蒙古通辽市大青沟自然保护区
H4	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	中国内蒙古乌兰察布市	B4	扁蓿豆 <i>Medicago ruthenica</i> (L.) Trautv.	中国内蒙古乌兰察布市四子王旗
H5	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	中国辽宁省	B5	扁蓿豆 <i>Medicago ruthenica</i> (L.) Trautv.	中国内蒙古呼和浩特市武川县

1.3 测定指标与方法

萌发期测定种子发芽率 (GR)、发芽势 (GE)、胚根长 (RL)、胚芽长 (SL)、幼苗干重 (DW), 并计算种子发芽指数 (GI)、活力指数 (VI)^[10]。

1.4 数据统计分析

用 Excel 2007 对数据统计及初步分析, SAS 9.0 进行方差分析、主成分分析, 加权隶属函数法对不同材料进行排序, 灰色关联分析对不同指标进行筛选并对品种间进行排序。

1.4.1 耐盐性评价 各指标的盐害系数 (STC)^[20] = 处理值/对照值 × 100%。隶属函数值: 先用公式 $X_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, $i = 1, 2, \dots, n$ 式中: X_i 表示第 i 个综合指标; X_{\min} 表示 i 个综合指标中的最小值; X_{\max} 表示 i 个综合指标中的最大值。各综合指标的权重:

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中, W_i 即权重, 代表第 i 个综合指标在所有综合指标中重要的程度; P_i 表示经主成分分析后, 第 i 个综合指标的贡献率。

各品种综合耐盐能力的评价:

$$D = \sum_{i=1}^n (X_i \times W_i) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中, D 值为不同材料在盐胁迫下, 由综合指标评价计算所得耐盐性综合评价值。

1.4.2 灰色关联分析 数据标准化处理^[21]

$$x_i(k) = \frac{x'(k) - x_i}{s_i} \quad (1)$$

式中 $x_i(k)$ 为无量纲化处理的结果, $x'(k)$ 为原始数据, x_i 和 s_i 分别为同一数列的平均值和标准差。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

$$r(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

式中, $\xi_i(k)$ 是供试材料或指标 x_0 与 x_i 在 k 点的关联系数, $r(i)$ 是比较数列与参考数列的关联度, 是具体反映该材料或指标与标准材料或指标之间的关联性的度量。 $|x_0(k) - x_i(k)|$ 表示数列 x_0 和 x_i 在 k 点的绝对差, $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 和 $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 分别为二级最小差值和二级最大差值, ρ 为分辨系数, 本试验中取值 0.5, 认为同等重要。

2 结果与分析

2.1 供试材料不同盐浓度各指标的方差分析 供试材料在对照 (CK) 水平下, 发芽率在 66% ~ 95% 之间 (表 2), 其中 H2、H3、H5 的发芽率在 80% 以下, 且都属于紫花苜蓿, 其他材料发芽率在 80% 以上。盐溶液浓度为 0.3% 时, 各材料的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数基本变化不大, 部分材料根长和苗长大于对照, 但幼苗干重变化不大, 说明低浓度盐溶液虽然促进幼根和幼苗的生长, 但对于物质的积累并无帮助。盐溶液浓度为 0.6% ~ 1.5% 时, 供试材料各指标值均呈现下降的趋势。盐浓度为 1.5% 时, 所有供试材料的发芽率不足 20%, 部分材料的发芽势和苗长为 0, 表明高浓度的盐溶液下, 种子虽然能够萌发, 但并不能生长成幼苗。由于供试材料之间发芽率等指标差距较大, 无法直接比较其耐盐性, 分别计算各供试材料各处理浓度的盐害系数, 对其盐害系数进行双因素方差分析 (表 3)。结果表明相同指标中各浓度、材料之间几乎都存在显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$) 差异。大部分指标在 1.2% 和 1.5% 的盐浓度处理之间无显著差异, 其他浓度之间均存在显著差异。

表 2 供试材料各指标原始数据(平均值 \pm 标准差)Table 2 Each original index data of tested material(mean \pm standard deviation)

指标 Index	编号 Code	盐浓度(%) Salt concentration					
		CK	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
发芽势 GE	H1	90.00 \pm 0.00	87.33 \pm 13.32	70.67 \pm 6.11	12.00 \pm 8.72	2.67 \pm 3.06	0.67 \pm 1.15
	H2	64.67 \pm 6.43	51.33 \pm 16.29	34.67 \pm 4.62	5.33 \pm 9.24	1.33 \pm 1.15	0.00 \pm 0.00
	H3	32.67 \pm 4.62	15.33 \pm 7.02	10.00 \pm 2.00	0.67 \pm 1.15	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
	H4	91.33 \pm 6.43	92.00 \pm 2.00	90.00 \pm 3.46	9.33 \pm 4.04	4.00 \pm 2.00	0.00 \pm 0.00
	H5	43.33 \pm 5.03	26.67 \pm 11.72	9.33 \pm 7.02	1.33 \pm 2.31	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
	B1	84.67 \pm 6.43	52.00 \pm 10.39	30.00 \pm 6.00	8.67 \pm 7.57	1.33 \pm 1.15	0.67 \pm 1.15
	B2	66.67 \pm 7.02	56.00 \pm 8.72	18.67 \pm 8.33	3.33 \pm 3.06	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
	B3	81.33 \pm 2.31	70.67 \pm 11.55	30.00 \pm 4.00	8.67 \pm 8.08	3.33 \pm 2.31	1.33 \pm 1.15
	B4	59.33 \pm 9.24	32.00 \pm 6.93	27.33 \pm 11.02	1.33 \pm 1.15	0.00 \pm 0.00	0.67 \pm 1.15
	B5	68.00 \pm 5.29	56.00 \pm 10.58	27.33 \pm 12.86	9.33 \pm 6.11	0.67 \pm 1.15	0.00 \pm 0.00
发芽率 GR	H1	90.67 \pm 1.15	93.33 \pm 4.62	83.33 \pm 3.06	47.33 \pm 8.33	29.33 \pm 5.77	18.00 \pm 9.17
	H2	76.67 \pm 2.31	62.67 \pm 11.55	48.00 \pm 10.00	18.67 \pm 9.87	14.67 \pm 3.06	6.00 \pm 6.00
	H3	66.67 \pm 3.06	40.00 \pm 4.00	28.00 \pm 2.00	16.67 \pm 8.08	4.00 \pm 2.00	2.00 \pm 3.46
	H4	92.67 \pm 4.16	94.00 \pm 3.46	92.67 \pm 2.31	46.67 \pm 9.02	18.67 \pm 5.03	16.67 \pm 1.15
	H5	71.33 \pm 7.02	49.33 \pm 12.06	19.33 \pm 8.08	14.67 \pm 2.31	4.00 \pm 2.00	3.33 \pm 3.06
	B1	94.67 \pm 3.06	89.33 \pm 9.02	89.33 \pm 3.06	51.33 \pm 2.52	33.33 \pm 6.11	15.33 \pm 6.43
	B2	86.67 \pm 4.16	85.33 \pm 6.43	63.33 \pm 8.08	36.67 \pm 10.26	18.00 \pm 4.00	15.47 \pm 4.74
	B3	88.00 \pm 7.21	90.67 \pm 1.15	84.67 \pm 4.62	35.33 \pm 1.15	19.33 \pm 6.11	14.67 \pm 4.16
	B4	80.00 \pm 2.00	76.67 \pm 10.26	73.33 \pm 6.11	22.00 \pm 9.17	18.67 \pm 8.08	17.33 \pm 5.03
	B5	84.00 \pm 3.46	79.33 \pm 5.03	83.33 \pm 4.62	54.67 \pm 9.24	28.00 \pm 3.46	18.67 \pm 3.06
发芽指数 GI	H1	29.96 \pm 4.25	21.15 \pm 1.71	16.22 \pm 1.61	3.75 \pm 1.08	2.23 \pm 0.99	1.18 \pm 0.60
	H2	19.16 \pm 6.17	13.65 \pm 1.70	7.88 \pm 3.19	1.46 \pm 0.96	1.38 \pm 0.57	0.36 \pm 0.38
	H3	9.82 \pm 2.86	4.47 \pm 0.86	3.03 \pm 0.01	1.24 \pm 0.49	0.24 \pm 0.10	0.10 \pm 0.18
	H4	41.40 \pm 2.40	28.75 \pm 1.78	22.03 \pm 2.25	3.96 \pm 2.03	1.28 \pm 0.20	2.08 \pm 0.70
	H5	10.91 \pm 0.49	6.47 \pm 2.96	2.19 \pm 1.21	0.98 \pm 0.62	0.19 \pm 0.11	0.16 \pm 0.15
	B1	15.49 \pm 1.55	13.28 \pm 1.42	9.96 \pm 1.34	4.10 \pm 1.39	2.19 \pm 0.48	0.95 \pm 0.45
	B2	12.51 \pm 0.79	12.39 \pm 1.34	6.76 \pm 1.57	2.25 \pm 0.40	1.00 \pm 0.23	0.85 \pm 0.19
	B3	13.84 \pm 0.87	14.60 \pm 0.96	9.75 \pm 1.87	3.26 \pm 1.01	1.68 \pm 0.87	1.02 \pm 0.18
	B4	11.65 \pm 1.88	9.58 \pm 1.18	8.24 \pm 0.63	1.70 \pm 0.59	1.26 \pm 0.51	1.04 \pm 0.50
	B5	14.23 \pm 1.30	13.02 \pm 1.02	9.47 \pm 1.84	4.15 \pm 1.58	1.79 \pm 0.88	1.13 \pm 0.60
活力指数 VI	H1	1.99 \pm 0.20	1.49 \pm 0.26	1.14 \pm 0.20	0.15 \pm 0.07	0.06 \pm 0.05	0.02 \pm 0.01
	H2	0.88 \pm 0.37	0.63 \pm 0.17	0.32 \pm 0.23	0.03 \pm 0.04	0.01 \pm 0.02	0.00 \pm 0.00
	H3	0.38 \pm 0.14	0.11 \pm 0.03	0.05 \pm 0.00	0.02 \pm 0.03	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
	H4	2.97 \pm 0.26	2.11 \pm 0.10	1.70 \pm 0.16	0.17 \pm 0.14	0.03 \pm 0.02	0.04 \pm 0.02
	H5	0.42 \pm 0.10	0.21 \pm 0.14	0.03 \pm 0.02	0.01 \pm 0.01	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00

表 2(续)

指标 Index	编号 Code	盐浓度(%) Salt concentration					
		CK	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
活力指数 VI	B1	1.11 ± 0.14	0.89 ± 0.16	0.94 ± 0.36	0.21 ± 0.12	0.07 ± 0.03	0.02 ± 0.01
	B2	0.87 ± 0.07	0.84 ± 0.19	0.39 ± 0.08	0.09 ± 0.05	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
	B3	0.84 ± 0.12	1.04 ± 0.05	0.70 ± 0.14	0.09 ± 0.06	0.03 ± 0.02	0.01 ± 0.00
	B4	0.87 ± 0.27	0.59 ± 0.13	0.48 ± 0.25	0.04 ± 0.03	0.03 ± 0.03	0.03 ± 0.03
	B5	1.02 ± 0.13	0.96 ± 0.13	0.56 ± 0.20	0.21 ± 0.14	0.05 ± 0.04	0.02 ± 0.02
根长(cm) RL	H1	6.26 ± 0.51	4.23 ± 0.78	3.20 ± 1.27	2.20 ± 0.46	1.98 ± 0.84	1.76 ± 0.49
	H2	5.17 ± 1.42	3.98 ± 0.69	4.10 ± 1.99	2.31 ± 0.32	1.56 ± 1.50	0.77 ± 0.70
	H3	4.37 ± 1.10	2.61 ± 1.12	3.16 ± 1.83	1.17 ± 0.88	0.51 ± 0.05	0.39 ± 0.56
	H4	5.82 ± 0.67	4.09 ± 0.33	4.28 ± 0.52	2.62 ± 0.20	2.95 ± 0.57	1.71 ± 0.44
	H5	4.72 ± 0.24	2.73 ± 0.95	2.38 ± 0.48	1.42 ± 0.88	0.82 ± 0.61	0.36 ± 0.32
	B1	2.80 ± 0.46	2.06 ± 0.25	1.78 ± 0.39	1.49 ± 0.31	1.48 ± 0.32	0.80 ± 0.17
	B2	2.22 ± 0.35	2.59 ± 0.66	1.98 ± 0.83	1.48 ± 0.31	0.97 ± 0.45	1.00 ± 0.26
	B3	1.61 ± 0.58	1.49 ± 0.44	1.52 ± 0.12	1.30 ± 0.03	1.41 ± 0.32	0.88 ± 0.07
	B4	1.62 ± 0.05	2.09 ± 0.47	1.96 ± 0.15	1.44 ± 0.14	1.26 ± 0.50	0.63 ± 0.09
	B5	2.08 ± 0.13	2.53 ± 0.47	1.87 ± 0.17	1.97 ± 0.04	1.69 ± 0.25	0.94 ± 0.42
苗长(cm) SL	H1	1.44 ± 0.24	1.53 ± 0.03	1.27 ± 0.20	0.72 ± 0.13	0.63 ± 0.17	0.43 ± 0.31
	H2	1.34 ± 0.42	1.52 ± 0.24	1.62 ± 0.04	0.85 ± 0.27	0.37 ± 0.45	0.04 ± 0.07
	H3	1.04 ± 0.25	1.00 ± 0.32	0.90 ± 0.11	0.38 ± 0.33	0.10 ± 0.09	0.05 ± 0.08
	H4	1.39 ± 0.12	1.72 ± 0.48	1.93 ± 0.67	0.83 ± 0.35	0.69 ± 0.22	0.45 ± 0.04
	H5	1.09 ± 0.11	1.20 ± 0.12	0.78 ± 0.01	0.43 ± 0.37	0.07 ± 0.12	0.00 ± 0.00
	B1	1.47 ± 0.21	1.38 ± 0.26	1.47 ± 0.28	0.92 ± 0.10	0.73 ± 0.12	0.04 ± 0.08
	B2	1.33 ± 0.35	1.33 ± 0.12	1.76 ± 0.74	0.64 ± 0.18	0.14 ± 0.25	0.00 ± 0.00
	B3	1.22 ± 0.11	1.12 ± 0.10	1.12 ± 0.07	0.62 ± 0.13	0.69 ± 0.10	0.08 ± 0.13
	B4	1.30 ± 0.10	1.16 ± 0.30	1.10 ± 0.06	0.68 ± 0.35	0.38 ± 0.33	0.10 ± 0.17
	B5	0.93 ± 0.13	1.40 ± 0.42	1.17 ± 0.32	0.82 ± 0.05	0.66 ± 0.04	0.16 ± 0.27
幼苗干重(g) DW	H1	0.067 ± 0.004	0.071 ± 0.011	0.070 ± 0.006	0.039 ± 0.009	0.022 ± 0.012	0.012 ± 0.006
	H2	0.045 ± 0.005	0.046 ± 0.007	0.036 ± 0.015	0.012 ± 0.010	0.008 ± 0.010	0.003 ± 0.004
	H3	0.038 ± 0.003	0.024 ± 0.002	0.017 ± 0.002	0.011 ± 0.012	0.001 ± 0.001	0.001 ± 0.002
	H4	0.072 ± 0.004	0.074 ± 0.006	0.077 ± 0.001	0.040 ± 0.012	0.016 ± 0.005	0.014 ± 0.004
	H5	0.038 ± 0.009	0.030 ± 0.006	0.010 ± 0.004	0.010 ± 0.005	0.001 ± 0.002	0.000 ± 0.000
	B1	0.072 ± 0.002	0.067 ± 0.007	0.093 ± 0.030	0.048 ± 0.012	0.033 ± 0.007	0.016 ± 0.006
	B2	0.070 ± 0.003	0.068 ± 0.012	0.059 ± 0.002	0.033 ± 0.006	0.016 ± 0.005	0.018 ± 0.010
	B3	0.071 ± 0.008	0.071 ± 0.004	0.072 ± 0.009	0.028 ± 0.011	0.014 ± 0.008	0.011 ± 0.003
	B4	0.073 ± 0.012	0.061 ± 0.007	0.057 ± 0.027	0.021 ± 0.009	0.020 ± 0.010	0.019 ± 0.007
	B5	0.072 ± 0.016	0.073 ± 0.005	0.059 ± 0.016	0.047 ± 0.017	0.026 ± 0.012	0.018 ± 0.009

表 3 供试材料不同盐浓度下各指标盐害系数的方差分析

Table 3 STC variance analysis of each index in different salt concentration of tested materials

指标 Index	编号 Code	盐浓度(%) Salt concentration					平均 Mean	显著性分析 Significance analysis		
		0.3	0.6	0.9	1.2	1.5		材料 Materials	浓度 Concentration	材料×浓度 Materials× Concentration
发芽势 GE	H1	97.04 a	78.52 ab	13.33 a	2.96 ab	0.74 a	38.52 A	**	**	**
	H2	79.38 ab	53.61 bc	8.25 a	2.06 ab	0.00 a	28.66 B			
	H3	46.94 c	30.61 cd	2.04 a	0.00 b	0.00 a	15.92 C			
	H4	100.73 a	98.54 a	10.22 a	4.38 a	0.00 a	42.78 A			
	H5	61.54 bc	21.54 d	3.08 a	0.00 b	0.00 a	17.23 C			
	B1	61.42 bc	35.43 cd	10.24 a	1.57 ab	0.79 a	21.89 BC			
	B2	84.00 ab	28.00 cd	5.00 a	0.00 b	0.00 a	23.40 BC			
	B3	86.89 ab	36.89 cd	10.66 a	4.10 a	1.64 a	28.03 B			
	B4	53.93 bc	46.07 cd	2.25 a	0.00 b	1.12 a	20.67 BC			
	B5	82.35 ab	40.20 cd	13.73 a	0.98 ab	0.00 a	27.45 B			
	平均 Mean	75.42 A	46.94 B	7.88 C	1.61 D	0.43 D				
发芽率 GR	H1	102.94 a	91.91 a	52.21 ab	32.35 a	19.85 ab	59.85 AB	**	**	**
	H2	81.74 ab	62.61 b	24.35 bc	19.13 ab	7.83 bcd	39.13 D			
	H3	60.00 b	42.00 c	25.00 bc	6.00 b	3.00 d	27.00 C			
	H4	101.44 a	100.00 a	50.36 abc	20.14 ab	17.60 abc	57.91 AB			
	H5	69.16 b	27.10 c	20.56 c	5.61 b	4.67 cd	25.42 D			
	B1	94.36 a	94.36 a	54.22 ab	35.21 a	16.20 abc	58.87 AB			
	B2	98.46 a	73.08 b	42.31 abc	20.77 ab	17.95 ab	50.51 B			
	B3	103.03 a	96.21 a	40.15 abc	21.97 ab	16.67 abc	55.61 AB			
	B4	95.83 a	91.67 a	27.50 bc	23.33 ab	21.67 a	52.00 B			
	B5	94.44 a	99.21 a	65.08 a	33.33 a	22.22 a	62.86 A			
	平均 Mean	90.04 A	77.81 B	40.17 C	21.78 D	14.77 D				
发芽指数 GI	H1	70.60 cd	54.15 ab	12.50 cd	7.44 ab	3.93 bcd	29.72 C	**	**	**
	H2	71.23 cd	41.11 bc	7.62 d	7.18 ab	1.89 cd	25.81 C			
	H3	45.53 e	30.87 cd	12.53 cd	2.43 b	1.06 d	18.48 D			
	H4	69.44 cd	53.21 ab	9.57 d	3.08 b	5.03 abcd	28.07 C			
	H5	59.23 de	20.05 d	8.98 d	1.77 b	1.45 cd	18.30 D			
	B1	85.73 abc	64.30 a	26.46 ab	14.11 a	6.12 abc	39.34 AB			
	B2	98.99 ab	54.02 ab	17.28 bcd	7.96 ab	6.77 ac	37.00 B			
	B3	105.52 a	70.47 a	23.57 abc	12.11 a	7.36 ab	43.81 A			
	B4	82.22 bc	70.72 a	14.58 cd	10.81 a	8.90 a	37.45 B			
	B5	91.44 abc	66.55 a	29.16 a	12.58 a	7.95 ab	41.54 AB			
	平均 Mean	77.99 A	52.54 B	16.23 C	7.95 D	5.05 D				
活力指数 VI	H1	74.84 bc	57.14 ab	7.65 abc	2.80 abc	0.80 b	28.65 CD	**	**	**
	H2	73.57 bc	36.55 bcd	3.71 c	1.74 bc	0.24 b	23.16 D			
	H3	29.73 d	14.20 cd	5.22 bc	0.08 c	0.00 b	9.85 E			
	H4	71.17 bc	57.14 ab	5.85 bc	1.11 bc	1.42 b	27.34 CD			
	H5	49.43 cd	6.10 d	2.69 c	0.07 c	0.00 b	11.66 E			

表 3(续)

指标 Index	编号 Code	盐浓度(%) Salt concentration					平均 Mean	显著性分析 Significance analysis		
		0.3	0.6	0.9	1.2	1.5		材料 Materials	浓度 Concentration	材料×浓度 Materials × Concentration
活力指数	B1	79.99 bc	84.43 a	18.51 ab	6.74 a	1.56 b	38.25 AB			
VI	B2	96.58 ab	45.24 bc	10.22 abc	1.95 bc	1.70 ab	31.14 BCD			
	B3	124.47 a	83.89 a	11.31 abc	3.29 abc	1.42 b	44.88 A			
	B4	67.98 bc	56.02 ab	4.67 c	3.29 abc	3.96 a	27.38 CD			
	B5	94.14 b	54.08 ab	20.60 a	5.19 ab	2.31 ab	35.04 BC			
	平均 Mean	76.18 A	49.48 B	9.04 C	2.63 D	1.34 D				
根长	H1	67.63 b	51.12 b	35.14 de	31.59 cde	28.12 bc	42.72 CDE	**	**	
RL	H2	76.94 b	79.30 ab	44.70 de	30.09 cde	14.83 cd	49.17 CD			
	H3	59.75 b	72.21 b	26.70 e	11.70 e	8.90 cd	35.85 DE			
	H4	77.44 b	73.44 b	45.24 de	50.72 bed	29.25 bc	55.22 C			
	H5	57.91 b	50.38 b	30.13 e	17.42 de	7.53 d	32.67 E			
	平均 Mean	87.59 A	78.61 A	56.61 B	48.69 B	30.21 C				
苗长	H1	106.17 ab	87.96 ab	50.15 ab	43.98 abc	29.63 a	63.58 BCD	**	**	
SL	H2	150.72 a	120.37 ab	62.50 ab	25.46 cd	3.09 b	72.43 BC			
	H3	96.15 b	86.42 ab	36.27 b	6.94 d	4.63 b	46.08 DE			
	H4	123.90 ab	134.26 a	57.87 ab	47.84 abc	32.32 a	79.24 AB			
	H5	110.09 ab	72.53 b	39.35 b	4.63 d	0.00 b	45.32 E			
	平均 Mean	111.45 A	103.74 A	55.01 B	34.66 C	10.37 D				
幼苗干重	H1	105.95 a	104.95 ab	58.97 ab	32.48 ab	17.49 abc	63.97 AB	**	**	*
DW	H2	102.22 ab	80.74 bc	27.41 b	18.52 bc	7.41 bcd	47.26 D			
	H3	64.54 c	45.98 cd	28.29 b	2.65 c	2.77 cd	28.85 D			
	H4	103.76 a	108.45 ab	56.34 ab	22.07 bc	19.53 ab	62.03 AB			
	H5	79.82 bc	27.19 d	25.44 b	2.63 c	0.00 d	27.02 D			
	平均 Mean	92.98 A	84.06 B	44.34 C	23.02 D	16.09 D				

不同大小写字母之间存在显著差异; * 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著水平,下同

Different capital and lower case mean significant difference at the level of 0.05 and 0.01, respectively; * and ** mean significant difference at the levels of 0.05 and 0.01, respectively, the same as below

2.2 供试材料各指标的相关分析、主成分分析及综合耐盐 D 值

相关分析能够确定各单项指标之间的相关关系及其强度。对供试材料的 7 个单项指标进行相关分析,结果表明,不同指标之间均存在一定的相关性,其中发芽势和发芽率、活力指数和发芽指数之间存在显著差异,发芽指数和根长存在极显著差异(表 4)。通过单项指标进行耐盐性鉴定是不可靠的,应在此基础上利用其他手段进一步分析。

表 4 各单项指标的相关分析

Table 4 Correlation analysis of each single index

指标 Index	发芽势 GE	发芽率 GR	发芽指数 GI	活力指数 VI	根长 RL	苗长 SL	幼苗干重 DW
发芽势 GE	1.000						
发芽率 GR	0.709 *	1.000					
发芽指数 GI	0.015	0.644	1.000				
活力指数 VI	0.062	0.538	0.777 *	1.000			
根长 RL	-0.246	0.431	0.931 **	0.616	1.000		
苗长 SL	0.646	0.068	-0.344	-0.476	-0.448	1.000	
幼苗干重 DW	0.458	0.067	-0.354	0.205	-0.525	0.161	1.000

表 5 各综合指标的系数和贡献率

Table 5 Coefficients of comprehensive indexes and proportion

项目 Item	第 1 主成分 F ₁ The 1 st principal component	第 2 主成分 F ₂ The 2 nd principal component	第 3 主成分 F ₃ The 3 rd principal component
特征根 Eigen values	3.253	2.226	1.134
贡献率(%) Contributive ratio	46.470	31.800	16.200
累计贡献率(%) Cumulative contributive ratio	46.470	78.270	94.470
特征向量 Eigenvector	1	-0.060	0.655
	2	0.329	0.495
	3	0.539	0.078
	4	0.451	0.166
	5	0.519	-0.111
	6	-0.301	0.375
	7	-0.187	0.373

根据各综合指标的贡献率,通过权重公式计算得到供试材料萌发期 3 个综合指标的权重(W)分别为 0.492、0.337 和 0.171,计算综合评价 D 值,并将其排序(表 6)。其中耐盐结果表现最好的是来源于中国内蒙古通辽市大青沟自然保护区扁蓿豆(B3),其次是来源于中国内蒙古呼和浩特清水河县扁蓿豆(B1),来源于中国内蒙古呼和浩特武川县扁

主成分分析可以在损失较少信息量的前提下,将较多的测定指标转化成少量的综合指标,弥补了单项指标耐盐性评价的不足^[20]。供试材料萌发期测定了 7 个单项指标,对其盐害系数进行主成分分析,结果表明,前 3 个综合指标 F₁ ~ F₃ 的贡献率分别为 46.470%、31.800% 和 16.200%,累计贡献率达到 94.470%,其余则可忽略。这样,将 7 个单项指标转化为 3 个综合指标(F₁、F₂、F₃),并且保留了原有的绝大部分信息(表 5)。

蓿豆(B5)和中国陕西兴平县紫花苜蓿(H1)耐盐性相近,排第 3 名和第 4 名。来源于中国内蒙古乌兰察布市紫花苜蓿(H4)与中国内蒙古乌兰察布市四子王旗扁蓿豆(B4)和中国内蒙古锡林郭勒市白音锡勒扁蓿豆(B2)耐盐性相近,排序分别为 5、6、7。来源于中国陕西榆林草原站(H2)、日本(H3)以及中国辽宁省的紫花苜蓿(H5)耐盐性均较差。

表 6 各材料的综合指标值 F、隶属函数值 X、权重、综合评价值(D 值)及排序
Table 6 Values of each material's comprehensive index (F), subordinate function (X), index weight, comprehensive assessment (D value) and the order

编号 Code	F ₁	F ₂	F ₃	X ₁	X ₂	X ₃	D 值 D value	综合排序 Order
H1	0.474	1.049	-0.012	0.492	0.912	0.651	0.661	4
H2	0.304	0.833	-0.147	0.179	0.549	0.197	0.307	8
H3	0.217	0.509	-0.135	0.018	0.004	0.237	0.051	9
H4	0.372	1.101	-0.121	0.303	1.000	0.284	0.535	5
H5	0.207	0.507	-0.129	0.000	0.000	0.024	0.004	10
B1	0.527	0.968	0.092	0.589	0.776	1.000	0.723	2
B2	0.500	0.824	-0.068	0.540	0.533	0.464	0.525	7
B3	0.749	0.904	-0.051	1.000	0.668	0.520	0.807	1
B4	0.597	0.751	-0.133	0.719	0.410	0.246	0.534	6
B5	0.634	1.056	-0.206	0.787	0.923	0.000	0.699	3
权重 Index weight				0.492	0.337	0.171		

F₁、F₂、F₃ 分别表示第 1 综合指标、第 2 综合指标、第 3 综合指标。X₁、X₂、X₃ 分别表示第 1 综合指标隶属函数值、第 2 综合指标隶属函数值、第 3 综合指标隶属函数值

F₁, F₂, F₃ is the 1st comprehensive index, the 2nd comprehensive index, the 3rd comprehensive index. X₁, X₂, X₃ is the 1st subordinate function, the 2nd subordinate function, the 3rd subordinate function

2.3 灰色关联分析

2.3.1 各测定指标与耐盐评价价值间的关联分析

将各材料的耐盐指标的耐盐评价价值作为参考数列, 记为 X₀, X₀ = (0.661, 0.307, 0.051, 0.535, 0.004, 0.723, 0.525, 0.807, 0.534, 0.699), 各测定指标盐害系数平均值作为比较数列, 即发芽势(X₁)、发芽率(X₂)、发芽指数(X₃)、活力指数(X₄)、根长(X₅)、苗长(X₆)、幼苗干重(X₇)。

将各品种数据用公式(1)做无量纲化处理, 得

到一个新的数列(表 7), 分别用公式(2)、(3)计算出其耐盐性与各指标的关联系数(ξ_i)、关联度和关联序(表 8)。关联度分析原则中, 关联度较大的数列与比较数列最为接近, 各材料的耐盐性与各指标之间的关联度在 0.564 ~ 0.752 之间, 其中关联度最大的是幼苗干重, 其次为发芽率, 分别为 0.752 和 0.745。各指标按关联度从大到小排序为: 幼苗干重、发芽率、苗长、根长、发芽指数、活力指数、发芽势。

表 7 参考数列与各性状比较数列无量纲化处理

Table 7 Date disposal of the reference and main traits series with non-dimensional change

指标 Index	编号 Code									
	H1	H2	H3	H4	H5	B1	B2	B3	B4	B5
X ₀	1.065	-0.537	-1.338	0.157	-1.610	1.129	0.324	1.329	0.234	0.449
X ₁	-0.661	-0.661	-0.546	-0.459	-0.373	-1.718	-1.519	-1.531	-1.261	-1.381
X ₂	0.672	-0.023	0.263	0.406	0.230	0.371	0.197	-0.032	0.169	0.145
X ₃	-1.211	-0.835	-0.359	-1.299	-0.294	-0.732	-0.658	-0.674	-0.496	-0.774
X ₄	-1.278	-0.996	-0.989	-1.341	-0.782	-0.794	-1.029	-0.615	-0.955	-1.054
X ₅	-0.399	0.590	0.909	0.253	0.763	0.112	1.566	1.411	2.019	1.172
X ₆	0.905	2.008	1.656	1.625	1.693	0.538	0.691	0.186	0.247	1.329
X ₇	0.929	0.473	0.398	0.642	0.347	1.095	0.414	-0.082	0.051	0.113

表 8 各指标的关联系数、关联度及序位

Table 8 Grey correlation coefficient, value and sequence of different traits

指标 Index	编号 Code										关联度 Value	关联序 Sequence
	H1	H2	H3	H4	H5	B1	B2	B3	B4	B5		
ξ_1	0.493	0.938	0.681	0.734	0.576	0.370	0.476	0.369	0.529	0.478	0.564	7
ξ_2	0.814	0.769	0.512	0.876	0.477	0.691	0.936	0.553	0.970	0.851	0.745	2
ξ_3	0.424	0.854	0.633	0.536	0.561	0.474	0.632	0.456	0.699	0.579	0.585	5
ξ_4	0.417	0.789	0.832	0.529	0.672	0.466	0.554	0.463	0.586	0.528	0.583	6
ξ_5	0.534	0.599	0.427	0.953	0.414	0.624	0.575	0.960	0.484	0.701	0.627	4
ξ_6	0.919	0.397	0.358	0.534	0.336	0.742	0.825	0.596	1.000	0.658	0.636	3
ξ_7	0.931	0.625	0.492	0.779	0.461	0.988	0.956	0.544	0.908	0.837	0.752	1

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7$ 分别表示耐盐性与发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长、苗长、幼苗干重的关联系数

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7$ is the correlation coefficient between D value and GE, GR, GI, VI, RL, SL, DW

$\min_{i,k} |x_0(k) - x_i(k)| = 0.013, \max_{i,k} |x_0(k) - x_i(k)| = 3.303$

2.3.2 各材料与标准材料之间的关联分析 将各指标的盐害系数最大值作为标准材料,得到最优数列, $X_0 = \{0.428, 0.629, 0.438, 0.449, 0.925, 0.903, 0.717\}$; 各材料盐害系数作为比较数列,即 $H1(X_1)$ 、 $H2(X_2)$ 、 $H3(X_3)$ 、 $H4(X_4)$ 、 $H5(X_5)$ 、 $B1(X_6)$ 、 $B2(X_7)$ 、 $B3(X_8)$ 、 $B4(X_9)$ 、 $B5(X_{10})$, 将其按照公式(1)进行无量纲化处理(表 9), 通过公式(2)和公式(3)计算得到各材料与标准材料的关联度(ξ_i), 判断各材料种子萌发期耐盐性强弱(表 10)。结果表明: 各材料与标准材料之间的关联度在 0.353 ~ 0.793 之间, 其中与标准材料关联度最大的是来源于中国内蒙古呼

和浩特市武川县扁蓿豆($B5$)和中国内蒙古通辽市大青沟自然保护区扁蓿豆($B3$), 其关联度均在 0.7 以上。其次是中国内蒙古呼和浩特市清水河县扁蓿豆($B1$)、中国内蒙古乌兰察布市紫花苜蓿($H4$)和中国陕西兴平县紫花苜蓿($H1$)耐盐性相近排名为第 3、4、5, 与标准品种的关联度均在 0.6 以上。来源于中国内蒙古乌兰察布市四子王旗的扁蓿豆($B4$)和中国内蒙古锡林郭勒市白音锡勒扁蓿豆($B2$)耐盐性居中, 排序为第 6、7, 与标准品种的关联度在 0.5 以上。来源于中国陕西榆林草原站($H2$)、日本($H3$)以及中国辽宁省($H5$)的紫花苜蓿耐盐性均较差。

表 9 标准数列与各材料比较数列无量纲化处理

Table 9 Date disposal of standard series and compared series with non-dimensional change

指标 Index	指标 Index						
	发芽势	发芽率	发芽指数	活力指数	根长	苗长	幼苗干重
	GE	GR	GI	VI	RL	SL	DW
X_0	1.550	0.931	1.137	1.343	1.155	1.571	1.178
X_1	1.106	0.710	-0.345	-0.056	-1.039	-0.121	0.667
X_2	0.079	-0.814	-0.757	-0.529	-0.755	0.438	-0.440
X_3	-1.248	-1.706	-1.528	-1.677	-1.341	-1.229	-1.659
X_4	1.550	0.567	-0.519	-0.169	-0.488	0.870	0.538
X_5	-1.111	-1.822	-1.548	-1.521	-1.481	-1.277	-1.780
X_6	-0.626	0.638	0.668	0.771	-0.529	-0.232	1.178
X_7	-0.469	0.023	0.422	0.159	0.257	-0.455	0.003
X_8	0.014	0.398	1.137	1.343	0.699	-0.372	0.052
X_9	-0.753	0.132	0.468	-0.165	1.155	-0.746	-0.296
X_{10}	-0.047	0.931	0.898	0.495	0.898	1.571	0.544

X_0 : 标准数列; $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$ 分别是 $H1, H2, H3, H4, H5, B1, B2, B3, B4, B5$ 的盐害系数

X_0 : Standard data array, $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$ is STC of $H1, H2, H3, H4, H5, B1, B2, B3, B4, B5$

表 10 供试材料与标准材料之间的关联系数、关联度及其序位

Table 10 Grey correlation coefficient, value and sequence of tested materials with standard variety

指标 Index	指标 Index							关联度 Value	关联序 Sequence
	GE	GR	GI	VI	RL	SL	GW		
ξ ₁	0.773	0.872	0.505	0.519	0.408	0.472	0.747	0.614	5
ξ ₂	0.507	0.464	0.444	0.446	0.442	0.571	0.483	0.479	8
ξ ₃	0.351	0.364	0.362	0.333	0.377	0.350	0.347	0.355	9
ξ ₄	1.000	0.806	0.477	0.500	0.479	0.683	0.702	0.664	4
ξ ₅	0.362	0.354	0.360	0.345	0.364	0.346	0.338	0.353	10
ξ ₆	0.410	0.837	0.763	0.725	0.473	0.456	1.000	0.666	3
ξ ₇	0.428	0.624	0.679	0.560	0.627	0.427	0.562	0.558	7
ξ ₈	0.496	0.739	1.000	1.000	0.768	0.437	0.573	0.716	2
ξ ₉	0.396	0.654	0.693	0.500	1.000	0.395	0.506	0.592	6
ξ ₁₀	0.486	1.000	0.864	0.640	0.854	1.000	0.704	0.793	1

ξ₁、ξ₂、ξ₃、ξ₄、ξ₅、ξ₆、ξ₇、ξ₈、ξ₉、ξ₁₀ 分别表示标准材料与 H1、H2、H3、H4、H5、B1、B2、B3、B4、B5 的关联系数
ξ₁、ξ₂、ξ₃、ξ₄、ξ₅、ξ₆、ξ₇、ξ₈、ξ₉、ξ₁₀ is the correlation coefficient between standard material and H1、H2、H3、H4、H5、B1、B2、B3、B4、B5
$$\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0.000, \max_k |x_0(k) - x_i(k)| = 3.020$$

3 讨论与结论

3.1 关于耐盐性评价的关键时期及耐盐指标

种子萌发期和幼苗期是植物生长周期中最脆弱但十分重要的时期,成为评价耐盐性强弱的关键时期^[22-23],大量的研究表明,用复盐溶液模拟盐胁迫,对植物种子萌发期的鉴定及植物耐盐性的评价是可行的^[19,24]。本试验中用复盐溶液对 10 份供试材料进行了种子萌发试验。由于植物的耐盐性是复杂的生理过程,不能用单一指标准确地表达^[25-26],国内外学者已对植物耐盐相关的形态指标、生理生化反应以及代谢等指标进行了筛选,为了准确的比较各材料的耐盐性,采用 5 个复盐浓度梯度对其进行萌发处理,以蒸馏水为对照,采用便捷、直观的 7 项指标进行了研究。将各指标处理后得到盐害系数,并进行方差分析,结果表明,不同材料在不同盐浓度下各项指标大部分存在显著差异($P < 0.05$),但不同材料的不同指标之间的差异不一致,无法简单的从各单项指标中获取耐盐性强弱的信息。相关分析的结果表明,不同指标之间存在不同程度的相关关系,即它们提供的信息具有重叠部分,并且各指标在供试材料的耐盐性鉴定上重要性不同,无法用单项指标直接、准确判断其耐盐性^[20],需进一步用其他方法进行分析。主成分分析可以将较多的单项指标转化成综合指标,并且保留大部分原有的信息,弥补了单项指标评价的不足^[27]。本试验中,将 7 个单项指标转化为 3 个综合指标,并且保留了原来的 94.

470% 的信息。通过对 3 个综合指标的隶属函数值进行加权分析,得到耐盐评价值(D 值),根据 D 值的大小确定各供试材料的耐盐性强弱,这与陈新等^[28]、魏秀君等^[29]的研究方法一致。耐盐性较强的是来源于中国内蒙古通辽市大青沟自然保护区扁蓿豆(B3)、中国内蒙古呼和浩特市清水河县扁蓿豆(B1)和中国内蒙古呼和浩特市武川县扁蓿豆(B5)。耐盐性较差的是来源于中国陕西榆林草原站(H2)、日本(H3)以及中国辽宁省的紫花苜蓿(H5)。

3.2 关于耐盐指标分析方法

为进一步验证所得耐盐性排序的准确性,以及各测定指标在耐盐性鉴定中的重要性,对各材料的盐害系数进行了灰色关联分析。灰色系统理论能够相对全面地反映出测定指标与耐盐性之间的相关程度^[21],找到与耐盐性相关的主要指标,为以后的鉴定中减少用途较少指标的检测,节约时间和成本^[30-31]。本试验采用灰色关联分析对 10 份苜蓿属植物萌发期的 7 个耐盐性指标进行鉴定,结果表明各测定指标中,与耐盐强弱最相关的 2 项为:发芽率和幼苗干重,作为鉴定供试材料耐盐性指标,分别代表了该材料不同盐浓度下的发芽数及幼苗的生长情况。发芽率作为种子成活的先决条件,在耐盐性鉴定中成为最重要的鉴定指标,陈新等^[28]在对裸燕麦萌发期耐盐性评价中,通过相关分析,得出发芽率和发芽势与裸燕麦萌发期的耐盐性最为相关,发芽率比发芽势表现更为稳定,并且指出正常水分条件下种子发芽率与盐胁迫下发芽率呈显著相关,因此将

发芽率作为判定种子萌发期间耐盐强弱的重要指标,这与本试验的研究结果一致。幼苗干重反映了幼苗的生长情况,是影响种子活力的重要因素之一,盐胁迫下,幼苗的生长情况更能体现种子对盐的耐受程度^[32]。建议用发芽率及幼苗干重快速鉴定苜蓿及扁蓿豆材料的耐盐性强弱。通过灰色关联分析,计算标准材料和各供试材料之间的关联度大小,鉴别各材料的耐盐性。结果表明与标准材料最接近的是来源于中国内蒙古呼和浩特市武川县扁蓿豆(B5)和中国内蒙古通辽市大青沟自然保护区扁蓿豆(B3),其次是来源于中国内蒙古呼和浩特市清水河县扁蓿豆(B1)和中国内蒙古乌兰察布市紫花苜蓿(H4)及中国陕西兴平县紫花苜蓿(H1)。

3.3 关于苜蓿属下种的耐盐性

加权隶属函数法和灰色关联分析法对7份野生苜蓿属材料的耐盐性鉴定结果基本一致:耐盐性较好的是来源于中国内蒙古呼和浩特市武川县扁蓿豆(B5)和中国内蒙古通辽市大青沟自然保护区扁蓿豆(B3)以及中国内蒙古呼和浩特市清水河县扁蓿豆(B1)。耐盐性中等的是来源于中国内蒙古乌兰察布市紫花苜蓿(H4)和中国陕西兴平县紫花苜蓿(H1)以及中国内蒙古乌兰察布市四子王旗扁蓿豆(B4)和中国内蒙古锡林郭勒市白音锡勒扁蓿豆(B2)。来源于中国陕西榆林草原站(H2)、日本(H3)以及中国辽宁省(H5)的紫花苜蓿耐盐性的表现较差。总体比较供试野生紫花苜蓿和扁蓿豆材料,扁蓿豆萌发期耐盐性较强。由于多数情况下同一材料在萌发期和幼苗期表现出的耐盐性不相同^[33],M. Farissi 等^[34]指出苜蓿在种子萌发期和幼苗期的耐盐性敏感性强于其他时期,因此为进一步探究其耐盐性强弱应当继续对苗期的耐盐性进行鉴定。

参考文献

- [1] 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
- [2] 肖克飏,吴普特,雷金银,等. 不同类型耐盐植物对盐碱土生物改良研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(12):2433-2440
- [3] 姜奇彦,胡正,张辉,等. 大豆种质资源耐盐性鉴定与研究[J]. 植物遗传资源学报,2012,13(5):726-732
- [4] 马晨,马履一,刘太祥,等. 盐碱地改良利用技术研究进展[J]. 世界林业研究,2010,23(2):28-32
- [5] 胡时开,陶红剑,钱前,等. 水稻耐盐性的遗传和分子育种的研究进展[J]. 分子植物育种,2010,8(4):629-640
- [6] 刘敏轩,张宗文,吴斌,等. 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[J]. 中国农业科学,2012,45(18):3733-3743
- [7] 赵可夫,范海. 世界上可以用海水灌溉的盐生植物资源[J]. 植物学通报,2000,17(3):282-288
- [8] 徐春波,王勇,赵来喜,等. 我国牧草种质资源创新研究进展[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(5):809-815
- [9] 黄迎新,周道玮,岳秀泉,等. 扁蓿豆研究进展[J]. 草业科学,2007,24(12):34-39
- [10] 鱼小军,肖红,徐长林,等. 扁蓿豆和苜蓿种子萌发期抗旱性和耐盐性比较[J]. 植物遗传资源学报,2015,16(2):405-410
- [11] 崔秀妹,刘信宝,李志华,等. 不同水分胁迫下水杨酸对分枝期扁蓿豆生长及光合生理的影响[J]. 草业学报,2012,21(6):82-93
- [12] 耿华珠. 中国苜蓿[M]. 北京:农业出版社,1995
- [13] 姜慧敏,宝音陶格涛. 黄花苜蓿根系生长特征研究[J]. 中国草地学报,2014,36(1):53-57
- [14] 李文晓,张岁岐,丁圣彦,等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报,2010,30(19):5140-5150
- [15] 王殿魁,李红,罗新义,等. 扁蓿豆与紫花苜蓿杂交育种研究[J]. 草地学报,2008,16(5):458-465
- [16] 王俊杰,云锦凤,吕世杰. 黄花苜蓿种质的优良特性与利用价值[J]. 内蒙古农业大学学报,2008,29(1):215-219
- [17] 史万光,王照兰,杜建材,等. 扁蓿豆不同品系种子发芽期耐盐性鉴定[J]. 中国草地学报,2008,30(1):40-44
- [18] 秦峰梅,张红香,武祎,等. 盐胁迫对黄花苜蓿发芽及幼苗生长的影响[J]. 草业学报,2010,19(4):71-78
- [19] 张俊叶,张力君,赵青山,等. 几种豆科牧草种子萌发期的耐盐性[J]. 中国草地学报,2012,34(4):116-120
- [20] 戴海芳,武辉,阿曼古丽·买买提阿力,等. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J]. 中国农业科学,2014,47(7):1290-1300
- [21] 伏兵哲,高雪芹,高永发,等. 21个苜蓿品种主要农艺性状关联分析与综合评价[J]. 草业学报,2015,24(11):174-182
- [22] Chang C S, Wang B L, Shi L, et al. Alleviation of salt stress-induced inhibition of seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.) by ethylene and glutamate [J]. Oecologia, 2010, 167(14):1152-1156
- [23] 姚佳,刘信宝,郭米山,等. 不同浓度 NaCl 胁迫对扁蓿豆苗期生长及生理指标的影响[J]. 草地学报,2014,22(3):564-571
- [24] 武俊英,刘景辉,翟利剑,等. 不同燕麦种子萌发和幼苗生长的耐盐性[J]. 生态学杂志,2009,28(10):1960-1965
- [25] Anaya F, Rachid F, Said W, et al. Influence of salicylic acid on seed germination of *Vicia faba* L. under salt stress[J]. J Saudi Soc Agric Sci DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2015.10.002
- [26] 宋晓荭,李广. 油菜种子千粒重与幼苗干重相关性分析及应用[J]. 种子,2002(1):34-36
- [27] 秦红艳,艾军,李昌禹,等. 山葡萄组培苗盐害指数和耐盐指数主成分分析[J]. 北方园艺,2013(16):18-21
- [28] 陈新,张宗文,吴斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. 中国农业科学,2014,47(10):2038-2046
- [29] 魏秀君,殷云龙,芦治国,等. NaCl 胁迫对5种绿化植物幼苗生长和生理指标的影响及耐盐性综合评价[J]. 植物资源与环境学报,2011,20(2):35-42
- [30] 杨升,刘正祥,张华新,等. 3个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选[J]. 林业科学,2013,49(1):91-98
- [31] 彭振,何守朴,孙君灵,等. 陆地棉苗期耐盐性的高效鉴定方法[J]. 作物学报,2014,40(3):476-486
- [32] Liu H J, Sha H J, Wang J G, et al. Effect of seed soaking with exogenous proline on seed germination of rice under salt stress[J]. J Northeast Agric Univ, 2014, 21(3):1-6
- [33] Dkhil B B, Denden M. Salt stress induced changes in germination, sugars, starch and enzyme of carbohydrate metabolism in *Abelmoschus esculentus* L. (Moench) seeds [J]. African J Agric Res, 2010, 5(12):1412-1418
- [34] Farissi M, Bouizgaren A, Faghire M, et al. Agro-physiological responses of Moroccan alfalfa (*Medicago sativa* L.) populations to salt stress during germination and early seedling stages[J]. Seed Sci Technol, 2011, 39(2):389-401