

苜蓿属植物苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价

田小霞, 毛培春, 张琳, 郭强, 孟林^①

(北京市农林科学院 北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097)

摘要: 通过 Hoagland 营养液培养法, 对苜蓿属(*Medicago* Linn.) 15 种植物 132 份样本幼苗进行 NaCl [0 (对照)、3、5、7 和 9 g · L⁻¹ NaCl] 胁迫处理, 测定了幼苗存活率 (SR)、幼苗生长速率 (GR)、叶片叶绿素含量 (Chl)、苗高 (SH)、叶片相对电导率 (REC)、单株干质量 (DW) 和单株绿叶数 (NGL) 的变化; 以这 7 个指标的耐盐系数为基础, 运用主成分分析和隶属函数分析, 结合耐盐性综合评价值 (*D*) 及聚类分析对各样本的耐盐性进行了综合评价和归类; 并采用逐步回归分析建立了耐盐性预测回归方程。结果表明: 经 NaCl 胁迫处理后, 供试样本的 SR、GR、Chl、SH、DW 和 NGL 值均低于对照, 仅 REC 值高于对照。不同样本 7 个指标的耐盐系数均存在明显差异, 且 7 个指标的耐盐系数间均存在不同程度的相关性; SR、GR、Chl、SH、REC、DW 和 NGL 的耐盐系数分别为 0.394~0.926、0.147~0.886、0.393~0.913、0.272~0.896、1.136~4.120、0.293~0.961 和 0.283~0.975, 其中, 各指标耐盐系数最高的样本分别为 10173、4187、4587、4799、10173、3172 和 4570, 耐盐系数最低的样本分别为 3754、4818、3773、4600、3803、4607 和 4818。主成分分析结果表明: 前 4 个主成分的贡献率分别为 45.656%、26.024%、9.637%、8.236%, 累计贡献率达 89.553%; 其中, 第 1 主成分的主要作用因子为 SH、DW 和 NGL, 第 2 主成分的主要作用因子为 SR 和 GR。根据 *D* 值由大至小排序, 供试 132 份样本可分为强耐盐型 (22 份样本)、中耐盐型 (39 份样本)、弱耐盐型 (59 份样本) 和敏感型 (12 份样本) 4 类, 与聚类分析结果总体一致。其中, 样本 10173 的 *D* 值最大, 耐盐性最强; 样本 3754 的 *D* 值最小, 耐盐性最弱。通过逐步回归分析, 获得回归方程 $Y = -0.353 + 0.471X_{\text{Chl}} - 0.367X_{\text{NGL}} + 0.197X_{\text{SH}} + 0.094X_{\text{REC}}$ ($R^2 = 0.971$), 表明 Chl、NGL、SH 和 REC 4 个指标对供试样本的耐盐性有显著影响。研究结果显示: 供试 132 个样本的耐盐性差异明显, 同种植物不同样本间的耐盐性也存在差异; 在相同的实验条件下, 可采用 Chl、NGL、SH 和 REC 4 个指标对苜蓿属植物苗期的耐盐性进行预测。

关键词: 苜蓿属; 苗期; NaCl 胁迫; 耐盐指标; 耐盐系数; 耐盐性

中图分类号: Q945.78; S541⁺.1; S551⁺.7 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)02-0046-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.02.07

Screening on salt tolerance index and comprehensive evaluation of salt tolerance of *Medicago* Linn. plants at seedling stage TIAN Xiaoxia, MAO Peichun, ZHANG Lin, GUO Qiang, MENG Lin^① (Beijing Research and Development Center for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(2): 46-56

Abstract: Changes in seedling survival rate (SR), seedling growth rate (GR), chlorophyll content in leaf (Chl), seedling height (SH), leaf relative electric conductivity (REC), dry weight per plant (DW), and green leaf number per plant (NGL) of seedlings of 132 samples of 15 species in *Medicago* Linn. were detected under NaCl stress treatment [0 (the control), 3, 5, 7, and 9 g · L⁻¹ NaCl] by Hoagland nutrition culture method. On the basis of salt tolerance coefficient of seven indexes, salt tolerance of each sample was comprehensively evaluated and classified by principal component analysis and subordinative function analysis combining with salt tolerance comprehensive evaluation value (*D*) and cluster analysis; and the regression equation of salt tolerance predicted was established by stepwise

收稿日期: 2017-07-28

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFR30570-6); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20170110)

作者简介: 田小霞(1980—), 女, 山西长治人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物生理生态学方面的研究。

^①通信作者 E-mail: menglin9599@sina.com

regression analysis. The results show that SR, GR, Chl, SH, DW, and NGL values of samples tested are all lower than those of the control after NaCl stress treatment, but only REC value is higher than that of the control. Salt tolerance coefficients of seven indexes of different samples are all obviously different and show correlations at different degrees. Salt tolerance coefficient of SR, GR, Chl, SH, REC, DW, and NGL is 0.394–0.926, 0.147–0.886, 0.393–0.913, 0.272–0.896, 1.136–4.120, 0.293–0.961, and 0.283–0.975, respectively, in which, sample with the highest salt tolerance coefficient of each index is 10173, 4187, 4587, 4799, 10173, 3172, and 4570, respectively, that with the lowest salt tolerance coefficient is 3754, 4818, 3773, 4600, 3803, 4607, and 4818, respectively. The result of principal component analysis shows that contribution rate of the first four principal components is 45.656%, 26.024%, 9.637%, and 8.236%, respectively, with the cumulative contribution rate of 89.553%; in which, the main action factors of the first principal component are SH, DW, and NGL, those of the second principal component are SR and GR. According to the order of D value from big to small, 132 samples tested can be divided into four classes of strong salt tolerance (22 samples), middle salt tolerance (39 samples), weak salt tolerance (59 samples), and salt sensitive (12 samples) types, which is generally in agreement with the cluster analysis result. Among them, D value of sample 10173 is the largest with the strongest salt tolerance; D value of sample 3754 is the smallest with the weakest salt tolerance. By stepwise regression analysis, regression equation of $Y = -0.353 + 0.471X_{\text{Chl}} - 0.367X_{\text{NGL}} + 0.197X_{\text{SH}} + 0.094X_{\text{REC}}$ ($R^2 = 0.971$) is established, indicating that four indexes of Chl, NGL, SH, and REC have significant effects on salt tolerance of samples tested. It is suggested that there is obvious difference in salt tolerance among 132 samples tested, even in different samples of the same plant; under the same experimental condition, four indexes of Chl, NGL, SH, and REC can be used to predict salt tolerance of *Medicago* plants at seedling stage.

Key words: *Medicago* Linn.; seedling stage; NaCl stress; salt tolerance index; salt tolerance coefficient; salt tolerance

土壤盐渍化造成土壤容重升高、结构板结、养分有效性降低,导致植株生理干旱,甚至严重危害植物生长,限制农业和林业的生产发展^[1-2]。采用适宜的生物学措施可以改良和利用盐渍土。筛选耐盐植物,尤其是采用遗传育种方法选育优良耐盐牧草,既可改良和利用盐渍土并发展畜牧业,又可遏制土地盐碱化、促进生态循环^[3],是盐渍土改良的有效措施之一。在相同环境条件下,不同植物种类的耐盐性不同^[4],甚至同种植物不同种源间或不同品种间的耐盐性也存在差异,因此,筛选耐盐能力强的植物是抗逆性杂交育种和分子育种的基础。

豆科 (Fabaceae) 苜蓿属 (*Medicago* Linn.) 种类多为一年生或多年生草本植物,富含丰富的矿质元素、维生素和蛋白质,具有重要的利用价值^[5]。紫花苜蓿 (*M. sativa* Linn.) 是全球广泛栽培的豆科草本植物之一,有“牧草之王”的美称^[6];黄花苜蓿 (*M. falcata* Linn.) 的产量略低于紫花苜蓿,但该种可在寒冷或干旱等逆境条件下生长,也是优良牧草之一^[7]。引种、筛选和培育耐盐的苜蓿属植物品种,不仅可用于盐碱地改良,而且还有利于增加饲料产量,促进畜牧业发展,而苜蓿属植物耐盐性评价是耐盐新品种培育的基

础。如何对苜蓿属植物进行耐盐性评价并提高耐盐植物的筛选效率,是不同学科研究者一直探索的问题^[8]。相关研究结果^[9-10]表明:苗期阶段是苜蓿属植物耐盐性评价的最佳时期;李源等^[11]采用盆栽法,利用植株的地上部和地下部干质量、存活率和苗高等指标进行聚类分析,从 48 份苜蓿属植物样本筛选出 15 份耐盐能力强的样本;岳明强等^[8]认为,营养液培养法适用于苜蓿属植物苗期耐盐性的评价。

为筛选适宜苜蓿属植物耐盐性评价的方法和指标,综合上述研究结果,作者采用营养液培养法,对苜蓿属 15 种 132 份样本苗期的生长和生理指标进行测定;并基于各指标的耐盐系数,采用主成分分析与隶属函数值相结合的综合分析方法,并结合耐盐性综合评价及聚类分析对供试样本的耐盐性进行归类分析,以期初步筛选出苗期耐盐性强的样本,为选育适宜盐渍土栽培的苜蓿属植物新品种提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试 132 份样本隶属于苜蓿属 15 种,分别为紫

花苜蓿(样本 1519、4559、4570、4587、4600、4607、5457、5468、5476、5486、5492、9145、9186、9190、9210、9222、9225、9486、9498、9508、9531、9539、9617、9626、10059、10088、10105、10126、10131、10149、10162、10163、10173、10192、10203、10206、10216、10223、10231、10244 和 10271) 及其品种‘中苜一号’(‘Zhongmu 1’)和‘AZ-88NDC’; *M. cancellata* M. Bieb.(样本 3012); *M. carstiensis* Wulf(样本 3062); *M. hemicycla* Grossh.(样本 4818 和 4827); *M. prostrata* Jacq.(样本 5453); 黄花苜蓿(样本 3537、3674、3694、3701、3745、3749、3754、3773、3792、3803、3821、3847、3855、3988、3996、4037、4045、4062、5234、5316、3653、3779、3555a、3645 和 10099); *M. varia* Mart.(样本 7050、7399、7408、7152、7137、7144、7118、7104、7037、7024、7012、7006、7432、9958、9724、9750 和 9767); *M. coerulea* Less.(样本 1604、1836、1866、1969、2001 和 5407); *M. difalcata* Sinskaya(样本 3385、4944、3264、3314、3253a 和 3325); *M. quasifalcata* Sinskaya(样本 4969、5069、5078、5035、5046 和 5098); *M. trautvetterii* Sumnev.(样本 4158、4075、4137、4200、4187、4092、4169、2288、2163、2225 和 2279); *M. glutinosa* Bieb.(样本 2652、4799、4773 和 4805); *M. glandulosa* David.(样本 2461 和 2470); *M. borealis* Grossh.(样本 3172、3211 和 3142); *M. tianschanica* Vass.(样本 4745、4758、4737 和 4712)。设置紫花苜蓿品种‘中苜一号’和‘AZ-88NDC’为对照。

除品种‘AZ-88NDC’由北京克劳沃草业技术开发中心提供外,其他样本均由中国农业科学院北京畜牧兽医研究所牧草资源室提供。

1.2 方法

1.2.1 幼苗培养与胁迫处理 实验在北京市农林科学院温室内进行,控制日均温(25 ± 3) $^{\circ}\text{C}$ 、平均空气相对湿度(60 ± 5)%。选择籽粒饱满的种子,先用体积分数 5% NaClO 溶液消毒 15 min,后用去离子水冲洗 6 次,置于铺有双层滤纸(蒸馏水湿润)的培养皿中,每皿 100 粒种子,每份样本 4 个培养皿;置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱(宁波江南仪器厂)中,于光照度 3 000 lx、光照时间 16 h \cdot d $^{-1}$ 的条件下培养。待种子萌发至 2 枚子叶完全展开时,选择长势基本一致的幼苗移至用锡箔纸包裹的水培盒(长 35.0 cm、宽 27.0 cm、高 10.5 cm)中,幼苗用薄海绵条包裹并固定在 96 孔泡沫板上,每个水培盒 6 份样本,每份样本 16

株;用 Hoagland 营养液培养,每隔 3 h 通气 1 h,每 7 d 更换 1 次营养液,待幼苗长至三叶期时进行 NaCl 胁迫处理。

NaCl 处理液用 Hoagland 营养液配制,质量浓度分别设置为 0(对照)、3、5、7 和 9 g \cdot L $^{-1}$;在每个水培盒中一次性加入 9 L 不同质量浓度的 NaCl 处理液,胁迫处理 15 d;处理期间,每 2 d 补充 1 次 Hoagland 营养液,使处理液体积保持在 9 L,每 7 d 更换 1 次处理液;每处理每份样本 16 株幼苗,3 次重复。NaCl 胁迫处理结束后测定各项指标。

1.2.2 生长和生理指标测定 在胁迫处理开始前用直尺(精度 0.01 cm)定株测量幼苗株高,胁迫处理结束时按上述方法测量幼苗株高;同时统计单株绿叶数(复叶叶片 2/3 以上呈现绿色的绿叶总数)。胁迫处理结束后,取整株幼苗置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青 30 min,然后于 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,用电子天平(精度 0.001 g)称量其干质量。各样本每处理各测定 6 株。

在各处理的每份样本上分别随机选取相同部位叶片,采用电导仪法^{[12]208-209}测定叶片相对电导率,采用紫外分光光度法^{[12]74-76}测定叶片叶绿素含量。上述指标均重复测定 3 次。

1.3 数据处理和分析

按照公式“生长速率=(胁迫结束时幼苗株高-胁迫开始前幼苗株高)/15”计算幼苗生长速率;按照公式“存活率=(胁迫结束时存活植株数/移植总株数) \times 100%”计算幼苗存活率;按照公式“耐盐系数(ω)=处理组某指标测定值的平均值/对照组同指标测定值的平均值”分别计算各供试样本各指标的耐盐系数(ω)。

采用戴海芳等^[13]的方法,依据各指标的耐盐系数进行主成分分析,并依据主成分分析结果分别计算各供试样本的各项综合指标值(CI_x)和隶属函数值 $[\mu(x)]$ 。采用贾亚雄等^[14]的方法计算各综合指标的权重和各供试样本的耐盐性综合评价值(D),并采用系统聚类法依据 D 值对供试样本进行聚类分析。以紫花苜蓿品种‘中苜一号’和‘AZ-88NDC’的 D 值为对照对供试样本的耐盐性进行归类, D 值大于‘中苜一号’的样本归类为强耐盐型, D 值小于或等于‘中苜一号’但大于‘AZ-88NDC’的样本归类为中耐盐型, D 值小于或等于‘AZ-88NDC’但大于 0.5 的样本归类为弱耐盐型, D 值小于或等于 0.5 的样本归类为敏盐型。

采用 EXCEL 2010 软件进行数据处理, 并采用 SPSS 19.0 软件进行多元统计分析。

2 结果和分析

2.1 不同指标的耐盐系数及相关性分析

实验结果表明: 经不同质量浓度 NaCl 胁迫处理 15 d 后, 供试的 132 份苜蓿属植物样本的幼苗存活率、幼苗生长速率、叶片叶绿素含量、苗高、单株干质量和单株绿叶数 6 个指标的测定值均低于对照 ($0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl), 但叶片相对电导率的测定值均高于对照。基于 NaCl 胁迫条件下供试 132 份样本幼苗各指标的测定值分别计算耐盐系数, 结果见表 1。

由表 1 可见: 样本 4187 幼苗生长速率的耐盐系数最大, 为 0.886, 但其幼苗存活率和叶片叶绿素含量的耐盐系数均较小, 分别仅为 0.559 和 0.585。样本 4587 的幼苗存活率、叶片叶绿素含量、苗高、单株干质量和单株绿叶数的耐盐系数分别达到 0.790、0.913、0.720、0.819 和 0.880, 但其幼苗生长速率的

耐盐系数仅为 0.450。

从各单项指标看, 幼苗存活率的耐盐系数为 0.394~0.926, 大于 0.8 的样本有 24 份, 其中最高的为样本 10173, 最低的为样本 3754。幼苗生长速率的耐盐系数为 0.147~0.886, 大于 0.8 的样本有 6 份, 小于 0.3 的样本有 12 份, 其中最高的为样本 4187, 最低的为样本 4818。叶片叶绿素含量的耐盐系数为 0.393~0.913, 大于 0.8 的样本有 17 份, 其中最高的为样本 4587, 最低的为样本 3773。苗高的耐盐系数为 0.272~0.896, 大于 0.8 的样本有 10 份, 小于 0.3 的样本有 1 份, 其中最高的为样本 4799, 最低的为样本 4600。叶片相对电导率的耐盐系数为 1.136~4.120, 其中最高的为样本 10173, 最低的为样本 3803。单株干质量的耐盐系数为 0.293~0.961, 高于 0.8 的样本有 21 份, 小于 0.3 的样本仅 1 份, 其中最高的为样本 3172, 最低的为样本 4607。单株绿叶数的耐盐系数为 0.283~0.975, 高于 0.8 的样本有 44 份, 小于 0.3 的样本仅 1 份, 其中最高的为样本 4570, 最低的为样本 4818。

表 1 NaCl 胁迫条件下苜蓿属 15 种植物 132 份样本的幼苗生长和生理指标的耐盐系数 (ω)
Table 1 Salt tolerant coefficient (ω) of growth and physiological indexes of seedlings of 132 samples of 15 species in *Medicago* Linn. under NaCl stress condition

编号 ¹⁾ No. ¹⁾	样本 Sample	各指标的 ω 值 ²⁾ ω value of each index ²⁾							编号 ¹⁾ No. ¹⁾	样本 Sample	各指标的 ω 值 ²⁾ ω value of each index ²⁾						
		SR	GR	Chl	SH	REC	DW	NGL			SR	GR	Chl	SH	REC	DW	NGL
1	1519	0.713	0.370	0.816	0.579	2.463	0.677	0.509	67	3653	0.718	0.748	0.727	0.719	2.611	0.731	0.681
2	4559	0.661	0.380	0.836	0.755	2.954	0.779	0.504	68	3779	0.469	0.308	0.468	0.427	1.445	0.460	0.538
3	4570	0.715	0.416	0.791	0.604	2.152	0.888	0.975	69	3555a	0.462	0.526	0.473	0.471	1.623	0.510	0.528
4	4587	0.790	0.450	0.913	0.720	1.494	0.819	0.880	70	7050	0.638	0.500	0.686	0.630	2.031	0.655	0.726
5	4600	0.685	0.224	0.794	0.272	2.973	0.567	0.565	71	7399	0.619	0.593	0.613	0.608	1.854	0.641	0.719
6	4607	0.676	0.434	0.593	0.438	2.609	0.293	0.753	72	7408	0.824	0.760	0.703	0.826	2.954	0.743	0.785
7	5457	0.560	0.271	0.591	0.509	2.376	0.595	0.816	73	7152	0.772	0.707	0.709	0.782	3.183	0.763	0.710
8	5468	0.531	0.291	0.670	0.505	3.757	0.820	0.686	74	7137	0.632	0.564	0.684	0.625	2.192	0.648	0.544
9	5476	0.552	0.299	0.600	0.477	2.864	0.430	0.577	75	7144	0.681	0.612	0.663	0.686	2.026	0.644	0.746
10	5486	0.567	0.200	0.743	0.401	2.055	0.377	0.568	76	7118	0.706	0.693	0.718	0.717	2.189	0.711	0.777
11	5492	0.521	0.250	0.587	0.436	2.835	0.383	0.525	77	7104	0.703	0.653	0.783	0.740	3.058	0.739	0.775
12	9145	0.786	0.545	0.622	0.634	2.828	0.528	0.735	78	7037	0.620	0.572	0.680	0.632	2.202	0.649	0.745
13	9186	0.851	0.391	0.703	0.618	2.841	0.687	0.632	79	7024	0.578	0.535	0.561	0.578	1.824	0.542	0.758
14	9190	0.852	0.511	0.807	0.618	3.042	0.750	0.910	80	7012	0.616	0.543	0.604	0.606	2.007	0.555	0.629
15	9210	0.714	0.371	0.683	0.502	3.212	0.419	0.744	81	7006	0.584	0.496	0.601	0.568	1.821	0.581	0.822
16	9222	0.820	0.539	0.820	0.614	3.437	0.860	0.880	82	7432	0.587	0.435	0.583	0.508	1.731	0.489	0.754
17	9225	0.810	0.530	0.790	0.760	3.650	0.830	0.810	83	9958	0.778	0.669	0.706	0.713	2.290	0.719	0.688
18	9486	0.833	0.436	0.685	0.493	4.003	0.524	0.775	84	9724	0.779	0.668	0.695	0.711	2.800	0.722	0.731
19	9498	0.859	0.383	0.644	0.473	2.612	0.475	0.909	85	9750	0.681	0.570	0.641	0.618	2.495	0.612	0.711
20	9508	0.906	0.351	0.829	0.517	2.774	0.492	0.752	86	9767	0.662	0.617	0.639	0.618	2.128	0.682	0.885
21	9531	0.766	0.339	0.824	0.609	3.327	0.590	0.955	87	1604	0.696	0.463	0.675	0.673	2.221	0.620	0.767
22	9539	0.872	0.470	0.799	0.720	3.681	0.850	0.830	88	1836	0.704	0.711	0.671	0.700	2.408	0.720	0.690

续表1 Table 1 (Continued)

编号 ¹⁾ No. ¹⁾	样本 Sample	各指标的 ω 值 ²⁾ ω value of each index ²⁾							编号 ¹⁾ No. ¹⁾	样本 Sample	各指标的 ω 值 ²⁾ ω value of each index ²⁾						
		SR	GR	Chl	SH	REC	DW	NGL			SR	GR	Chl	SH	REC	DW	NGL
23	9617	0.880	0.464	0.840	0.690	2.964	0.760	0.881	89	1866	0.562	0.535	0.625	0.585	2.383	0.550	0.720
24	9626	0.818	0.465	0.712	0.627	2.870	0.631	0.728	90	1969	0.731	0.718	0.707	0.733	2.474	0.709	0.837
25	10059	0.633	0.322	0.806	0.518	1.444	0.486	0.859	91	2001	0.687	0.702	0.644	0.688	2.752	0.591	0.644
26	10088	0.807	0.336	0.718	0.561	2.515	0.394	0.790	92	5407	0.682	0.675	0.736	0.745	3.187	0.775	0.719
27	10105	0.760	0.245	0.766	0.535	2.413	0.345	0.622	93	3385	0.705	0.687	0.639	0.829	2.730	0.752	0.926
28	10126	0.726	0.442	0.640	0.488	3.016	0.366	0.761	94	4969	0.530	0.711	0.680	0.668	1.700	0.739	0.771
29	10131	0.781	0.327	0.731	0.505	2.268	0.388	0.635	95	5069	0.653	0.636	0.812	0.787	1.963	0.874	0.854
30	10149	0.604	0.339	0.769	0.534	2.877	0.465	0.602	96	5078	0.474	0.650	0.623	0.675	3.293	0.707	0.650
31	10162	0.854	0.423	0.763	0.721	1.911	0.864	0.814	97	4158	0.594	0.575	0.608	0.649	3.266	0.692	0.854
32	10163	0.906	0.523	0.753	0.702	3.306	0.793	0.851	98	2288	0.510	0.522	0.619	0.654	3.222	0.719	0.744
33	10173	0.926	0.550	0.830	0.709	4.120	0.830	0.880	99	2163	0.661	0.606	0.765	0.708	2.082	0.736	0.845
34	10192	0.835	0.405	0.641	0.603	2.709	0.629	0.851	100	2225	0.749	0.521	0.805	0.676	2.796	0.796	0.908
35	10203	0.846	0.520	0.850	0.719	4.091	0.788	0.944	101	2279	0.779	0.693	0.714	0.879	1.795	0.836	0.812
36	10206	0.901	0.587	0.746	0.667	2.871	0.676	0.930	102	2652	0.720	0.869	0.734	0.766	2.474	0.638	0.897
37	10216	0.813	0.338	0.655	0.544	1.355	0.642	0.818	103	4799	0.755	0.855	0.858	0.896	2.082	0.780	0.811
38	10223	0.875	0.490	0.795	0.690	1.445	0.790	0.916	104	2461	0.762	0.740	0.684	0.776	3.175	0.917	0.910
38	10231	0.885	0.480	0.768	0.710	1.957	0.733	0.966	105	2470	0.628	0.781	0.736	0.793	1.530	0.803	0.771
40	10244	0.844	0.377	0.659	0.519	1.622	0.526	0.932	106	3172	0.421	0.834	0.595	0.683	1.305	0.961	0.717
41	10271	0.835	0.401	0.638	0.529	2.095	0.668	0.865	107	3211	0.515	0.687	0.658	0.770	2.505	0.719	0.810
42	3012	0.766	0.418	0.719	0.627	2.450	0.541	0.658	108	3645	0.560	0.796	0.632	0.824	1.461	0.924	0.765
43	3062	0.814	0.380	0.761	0.506	2.492	0.518	0.836	109	4745	0.541	0.778	0.549	0.724	1.878	0.791	0.902
44	4818	0.668	0.147	0.566	0.673	1.500	0.709	0.283	110	5035	0.654	0.787	0.812	0.745	1.710	0.830	0.853
45	4827	0.618	0.278	0.715	0.617	1.464	0.780	0.411	111	4944	0.523	0.630	0.653	0.701	2.771	0.734	0.766
46	5453	0.694	0.233	0.617	0.500	1.851	0.594	0.414	112	3264	0.540	0.817	0.755	0.723	2.546	0.920	0.808
47	3537	0.587	0.492	0.615	0.582	1.998	0.571	0.686	113	3314	0.536	0.684	0.649	0.717	2.547	0.749	0.797
48	3674	0.637	0.582	0.686	0.681	2.478	0.675	0.527	114	4075	0.624	0.789	0.620	0.670	2.011	0.853	0.844
49	3694	0.555	0.592	0.552	0.576	1.910	0.554	0.593	115	4137	0.631	0.605	0.705	0.827	1.665	0.744	0.773
50	3701	0.665	0.602	0.641	0.632	2.054	0.648	0.645	116	10099	0.740	0.815	0.809	0.849	1.547	0.849	0.756
51	3745	0.499	0.519	0.522	0.450	1.745	0.467	0.505	117	5046	0.563	0.665	0.801	0.821	1.923	0.742	0.789
52	3749	0.582	0.322	0.537	0.609	2.014	0.660	0.714	118	5098	0.429	0.450	0.588	0.638	2.764	0.603	0.697
53	3754	0.394	0.297	0.459	0.388	1.345	0.394	0.484	119	4200	0.478	0.527	0.623	0.821	1.614	0.919	0.825
54	3773	0.431	0.270	0.393	0.425	1.306	0.482	0.513	120	4187	0.559	0.886	0.585	0.809	2.176	0.740	0.813
55	3792	0.502	0.476	0.602	0.510	1.588	0.514	0.778	121	4773	0.493	0.593	0.562	0.643	2.545	0.713	0.742
56	3803	0.513	0.591	0.548	0.585	1.136	0.589	0.660	122	4805	0.513	0.587	0.650	0.747	2.627	0.740	0.773
57	3821	0.648	0.651	0.633	0.656	2.081	0.636	0.740	123	4758	0.484	0.580	0.626	0.656	2.670	0.711	0.768
58	3847	0.718	0.711	0.723	0.743	3.207	0.701	0.715	124	4737	0.400	0.669	0.625	0.701	2.017	0.735	0.774
59	3855	0.494	0.307	0.486	0.493	1.689	0.532	0.523	125	4712	0.478	0.564	0.610	0.633	2.649	0.701	0.731
60	3988	0.577	0.619	0.658	0.672	2.503	0.625	0.625	126	3142	0.454	0.774	0.621	0.764	1.571	0.785	0.818
61	3996	0.798	0.752	0.688	0.779	2.322	0.727	0.720	127	3253a	0.442	0.577	0.599	0.636	1.928	0.689	0.500
62	4037	0.476	0.397	0.518	0.473	1.910	0.474	0.405	128	3325	0.519	0.663	0.664	0.753	1.941	0.738	0.790
63	4045	0.508	0.582	0.589	0.543	1.991	0.516	0.688	129	4092	0.446	0.657	0.579	0.693	2.322	0.709	0.744
64	4062	0.398	0.440	0.470	0.441	1.353	0.477	0.527	130	4169	0.505	0.747	0.509	0.779	1.709	0.911	0.777
65	5234	0.430	0.396	0.479	0.426	1.463	0.487	0.523	131	中肯一号 Zhongmu 1	0.781	0.740	0.745	0.771	2.170	0.810	0.867
66	5316	0.605	0.621	0.677	0.621	2.065	0.641	0.659	132	AZ-88NDC	0.708	0.466	0.673	0.614	2.488	0.614	0.736

¹⁾ 1-41, 131, 132: *Medicago sativa* Linn.; 42: *M. cancellata* M. Bieb.; 43: *M. carstiensis* Wulf; 44, 45: *M. hemicycla* Grossh.; 46: *M. prostrata* Jacq.; 47-69, 108, 116: *M. falcata* Linn.; 70-86: *M. varia* Mart.; 87-92: *M. coerulea* Less.; 93, 111-113, 127, 128: *M. difalcata* Sinskaya; 94-96, 110, 117, 118: *M. quasifalcata* Sinskaya; 97-101, 114, 115, 119, 120, 129, 130: *M. trautvetterii* Sumnev.; 102, 103, 121, 122: *M. glutinosa* Bieb.; 104, 105: *M. glandulosa* David.; 106, 107, 126: *M. borealis* Grossh.; 109, 123-125: *M. tianschanica* Vass.

²⁾ SR: 幼苗存活率 Survival rate of seedling; GR: 幼苗生长速率 Growth rate of seedling; Chl: 叶片叶绿素含量 Chlorophyll content in leaf; SH: 苗高 Seedling height; REC: 叶片相对电导率 Relative electric conductivity of leaf; DW: 单株干质量 Dry weight per plant; NGL: 单株绿叶数 Number of green leaf per plant.

相关性分析结果(表 2)表明:132 份样本 7 个指标的耐盐系数间均存在不同程度的相关性,幼苗存活率与叶片叶绿素含量、叶片相对电导率和单株绿叶数呈极显著($P<0.01$)正相关,与苗高呈显著($P<0.05$)正相关;幼苗生长速率与苗高、单株干质量和单株绿

叶数呈极显著正相关;叶片叶绿素含量与苗高、叶片相对电导率、单株干质量和单株绿叶数呈极显著正相关;苗高还与单株干质量和单株绿叶数呈极显著正相关;叶片相对电导率还与单株绿叶数呈极显著正相关;单株干质量还与单株绿叶数呈极显著正相关。

表 2 NaCl 胁迫条件下苜蓿属植物幼苗的生长和生理指标的相关性分析结果¹⁾
Table 2 Result of correlation analysis on growth and physiological indexes of seedlings of *Medicago* Linn. plants under NaCl stress condition¹⁾

指标 Index	不同指标间的相关系数 Correlation coefficient among different indexes						
	SR	GR	Chl	SH	REC	DW	NGL
SR	1.000						
GR	-0.073	1.000					
Chl	0.690**	0.093	1.000				
SH	0.188*	0.761**	0.395**	1.000			
REC	0.428**	-0.023	0.405**	0.083	1.000		
DW	0.131	0.596**	0.379**	0.795**	0.082	1.000	
NGL	0.450**	0.387**	0.456**	0.438**	0.246**	0.424**	1.000

¹⁾SR: 幼苗存活率 Survival rate of seedling; GR: 幼苗生长速率 Growth rate of seedling; Chl: 叶片叶绿素含量 Chlorophyll content in leaf; SH: 苗高 Seedling height; REC: 叶片相对电导率 Relative electric conductivity of leaf; DW: 单株干质量 Dry weight per plant; NGL: 单株绿叶数 Number of green leaf per plant. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

2.2 不同指标耐盐系数的主成分分析

对上述 7 个生长和生理指标的耐盐系数进行主成分分析,结果见表 3。

由表 3 可见:前 4 个主成分的贡献率分别为 45.656%、26.024%、9.637% 和 8.236%,累计贡献率达 89.553%,这 4 个主成分基本代表了供试样本 7 个指标的大部分信息,因此,可以将这 4 个主成分用于

苜蓿属植物的耐盐性分析。另外,在第 1 主成分中,苗高、单株干质量和单株绿叶数的耐盐系数特征向量较高,分别为 0.470、0.440 和 0.409,表明这 3 个指标为第 1 主成分的主要作用因子;在第 2 主成分中,幼苗存活率和幼苗生长速率的耐盐系数特征向量较高,分别为 0.520 和 -0.462,表明这 2 个指标为第 2 主成分的主要作用因子。

表 3 NaCl 胁迫条件下苜蓿属植物幼苗的生长和生理指标的主成分分析结果
Table 3 Result of principal component analysis on growth and physiological indexes of seedlings of *Medicago* Linn. plants under NaCl stress condition

主成分 Principal component	特征向量 ¹⁾ Eigenvector ¹⁾							特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	SR	GR	Chl	SH	REC	DW	NGL			
1	0.302	0.359	0.394	0.470	0.208	0.440	0.409	3.196	45.656	45.656
2	0.520	-0.462	0.374	-0.308	0.438	-0.284	0.096	1.822	26.024	71.680
3	-0.302	0.192	-0.224	0.050	0.866	0.032	-0.262	0.675	9.637	81.317
4	-0.061	0.215	-0.393	-0.224	0.094	-0.325	0.794	0.577	8.236	89.553

¹⁾SR: 幼苗存活率 Survival rate of seedling; GR: 幼苗生长速率 Growth rate of seedling; Chl: 叶片叶绿素含量 Chlorophyll content in leaf; SH: 苗高 Seedling height; REC: 叶片相对电导率 Relative electric conductivity of leaf; DW: 单株干质量 Dry weight per plant; NGL: 单株绿叶数 Number of green leaf per plant.

2.3 供试样本的耐盐性评价

依据主成分分析结果,计算 NaCl 胁迫下各供试样本的综合指标值(CI_x)和隶属函数值 $[\mu(x)]$,并依据上述 4 个主成分的贡献率计算 4 个综合指标的权重(分别为 0.510、0.291、0.108 和 0.092),据此计算

各样本的耐盐性综合评价值(D),并对其耐盐类型进行归类,结果见表 4。

由表 4 可见:样本 10173 的 D 值最大,样本 3754 的 D 值最小,根据 D 值越大耐盐性越强,推断样本 10173 的耐盐性最强,样本 3754 的耐盐性最弱。从耐

表 4 NaCl 胁迫条件下苜蓿属 15 种植物 132 份样本幼苗的综合指标值 (CI_x)、隶属函数值 [$\mu(x)$] 和耐盐性综合评价值 (D) 及耐盐类型
 Table 4 Comprehensive index value (CI_x), subordinative function value [$\mu(x)$], salt tolerance comprehensive evaluation value (D), and salt tolerance type of seedlings of 132 samples of 15 species in *Medicago* Linn. under NaCl stress condition

编号 ¹⁾ No. ¹⁾	样本 Sample	综合指标值 Comprehensive index value				隶属函数值 Subordinative function value				D 值 D value	D 值排序 Order of D value	类型 ²⁾ Type ²⁾
		CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	$\mu(1)$	$\mu(2)$	$\mu(3)$	$\mu(4)$			
1	1519	-0.513	1.286	-0.062	-2.058	0.541	0.730	0.510	0.213	0.563	77	W
2	4559	0.629	0.806	0.782	-2.625	0.683	0.655	0.700	0.093	0.623	49	M
3	4570	1.563	0.711	-1.226	0.299	0.799	0.640	0.246	0.715	0.687	25	M
4	4587	2.038	0.687	-2.290	-0.902	0.859	0.637	0.006	0.459	0.666	29	M
5	4600	-2.202	2.905	0.299	-0.909	0.331	0.981	0.591	0.458	0.560	78	W
6	4607	-2.294	1.518	0.174	1.540	0.320	0.765	0.563	0.979	0.537	88	W
7	5457	-1.584	0.631	-0.093	0.910	0.408	0.628	0.502	0.845	0.523	97	W
8	5468	-0.569	1.173	1.963	-0.440	0.534	0.712	0.967	0.558	0.636	43	M
9	5476	-2.713	1.125	1.006	-0.001	0.268	0.705	0.751	0.651	0.483	103	W
10	5486	-3.073	1.753	-0.575	-0.615	0.223	0.802	0.393	0.520	0.438	117	W
11	5492	-3.415	1.238	1.082	-0.128	0.181	0.722	0.768	0.624	0.443	115	W
12	9145	-0.181	0.895	0.458	0.541	0.583	0.669	0.627	0.767	0.630	47	M
13	9186	0.066	1.542	0.200	-0.951	0.613	0.769	0.569	0.449	0.639	41	M
14	9190	1.854	1.817	-0.161	0.327	0.836	0.812	0.487	0.721	0.781	8	St
15	9210	-1.179	2.165	0.691	0.709	0.459	0.866	0.680	0.802	0.633	45	M
16	9222	2.252	1.706	0.522	-0.037	0.885	0.795	0.642	0.644	0.811	4	St
17	9225	2.433	1.352	1.079	-0.518	0.908	0.740	0.767	0.541	0.811	5	St
18	9486	-0.134	2.815	1.518	0.812	0.589	0.967	0.867	0.824	0.751	12	St
19	9498	-0.622	2.209	-0.649	1.638	0.528	0.873	0.377	1.000	0.656	36	M
20	9508	-0.048	3.030	-0.664	-0.196	0.599	1.000	0.373	0.610	0.693	24	M
21	9531	1.064	2.600	0.043	0.760	0.737	0.933	0.533	0.813	0.780	9	St
22	9539	2.449	1.888	0.843	-0.506	0.910	0.823	0.714	0.544	0.831	3	St
23	9617	2.149	1.899	-0.367	-0.222	0.872	0.825	0.441	0.604	0.788	7	St
24	9626	0.357	1.420	0.180	-0.192	0.650	0.750	0.564	0.611	0.667	28	M
25	10059	-0.917	1.177	-2.035	0.433	0.491	0.713	0.064	0.744	0.533	90	W
26	10088	-0.835	2.206	-0.636	0.599	0.501	0.872	0.380	0.779	0.622	50	M
27	10105	-1.743	2.440	-0.577	-0.543	0.388	0.908	0.393	0.536	0.554	80	W
28	10126	-1.400	1.870	0.532	1.187	0.431	0.820	0.644	0.904	0.611	52	M
29	10131	-1.654	2.062	-0.671	-0.290	0.399	0.850	0.372	0.590	0.545	85	W
30	10149	-1.419	1.664	0.554	-0.685	0.429	0.788	0.649	0.506	0.565	75	W
31	10162	1.593	0.576	-1.422	-0.801	0.803	0.620	0.202	0.481	0.656	35	M
32	10163	2.152	1.615	0.371	-0.034	0.873	0.781	0.607	0.644	0.797	6	St
33	10173	3.054	2.388	1.226	-0.122	0.985	0.900	0.801	0.625	0.908	1	St
34	10192	0.203	1.427	-0.231	0.763	0.630	0.751	0.471	0.814	0.666	30	M
35	10203	2.991	2.328	1.152	0.246	0.977	0.891	0.784	0.704	0.907	2	St
36	10206	1.856	1.476	-0.305	0.816	0.836	0.759	0.455	0.825	0.772	11	St
37	10216	-0.665	0.773	-2.060	0.320	0.522	0.650	0.058	0.719	0.528	93	W
38	10223	1.725	0.576	-2.316	-0.087	0.820	0.619	0.000	0.633	0.657	34	M
39	10231	1.839	0.981	-1.706	0.466	0.834	0.682	0.138	0.751	0.708	19	St
40	10244	-0.516	1.353	-1.995	1.366	0.541	0.740	0.073	0.942	0.586	67	W
41	10271	-0.147	1.137	-1.100	0.816	0.587	0.707	0.275	0.825	0.611	54	M
42	3012	-0.456	1.225	-0.221	-0.532	0.548	0.720	0.474	0.538	0.590	66	W
43	3062	-0.257	2.189	-0.814	0.575	0.573	0.870	0.340	0.774	0.653	37	M
44	4818	-2.627	-0.335	-0.451	-3.061	0.279	0.478	0.422	0.000	0.327	124	Se
45	4827	-1.480	-0.249	-0.835	-2.764	0.421	0.492	0.335	0.063	0.400	120	W

续表4 Table 4 (Continued)

编号 ¹⁾ No. ¹⁾	样本 Sample	综合指标值 Comprehensive index value				隶属函数值 Subordinative function value				D 值 D value	D 值排序 Order of D value	类型 ²⁾ Type ²⁾
		CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	$\mu(1)$	$\mu(2)$	$\mu(3)$	$\mu(4)$			
46	5453	-2.705	0.727	-0.410	-1.747	0.269	0.643	0.431	0.280	0.396	121	Se
47	3537	-1.253	-0.282	-0.177	0.178	0.449	0.486	0.484	0.689	0.486	107	W
48	3674	-0.283	-0.326	0.674	-1.309	0.570	0.480	0.676	0.373	0.538	87	W
49	3694	-1.748	-0.999	0.211	0.059	0.388	0.375	0.571	0.664	0.430	118	W
50	3701	-0.412	-0.469	-0.086	-0.322	0.554	0.458	0.504	0.583	0.524	96	W
51	3745	-3.240	-0.796	0.196	-0.002	0.202	0.407	0.568	0.651	0.343	123	Se
52	3749	-1.474	-0.340	-0.187	0.187	0.422	0.478	0.481	0.691	0.470	111	W
53	3754	-4.867	-0.794	-0.223	0.108	0.000	0.407	0.473	0.674	0.232	132	Se
54	3773	-4.615	-1.106	-0.259	0.217	0.031	0.359	0.465	0.698	0.235	131	Se
55	3792	-1.838	-0.520	-0.751	0.999	0.377	0.450	0.354	0.864	0.441	116	W
56	3803	-1.759	-1.738	-0.844	0.281	0.386	0.261	0.333	0.711	0.374	122	Se
57	3821	-0.017	-0.653	-0.117	0.331	0.603	0.429	0.497	0.722	0.553	81	W
58	3847	1.458	0.176	1.200	-0.279	0.786	0.557	0.795	0.592	0.704	21	St
59	3855	-3.447	-0.626	-0.034	-0.261	0.177	0.433	0.516	0.596	0.327	125	Se
60	3988	-0.328	-0.554	0.739	-0.406	0.564	0.444	0.691	0.565	0.544	86	W
61	3996	1.536	-0.509	-0.020	-0.347	0.796	0.451	0.519	0.578	0.647	38	M
62	4037	-3.710	-0.592	0.542	-0.764	0.144	0.438	0.646	0.489	0.316	127	Se
63	4045	-1.656	-0.724	0.118	0.643	0.399	0.418	0.550	0.788	0.457	112	W
64	4062	-3.905	-1.402	-0.124	0.216	0.120	0.313	0.496	0.697	0.270	130	Se
65	5234	-3.900	-1.033	-0.115	0.107	0.120	0.370	0.498	0.674	0.285	129	Se
66	5316	-0.377	-0.552	-0.034	-0.293	0.558	0.445	0.516	0.589	0.524	95	W
67	3653	1.255	-0.336	0.500	-0.557	0.761	0.478	0.637	0.533	0.645	40	M
68	3779	-4.087	-0.632	-0.336	0.165	0.097	0.432	0.448	0.686	0.287	128	Se
69	3555a	-3.256	-1.348	0.207	0.201	0.200	0.321	0.570	0.694	0.321	126	Se
70	7050	-0.257	-0.081	-0.436	-0.157	0.573	0.518	0.425	0.618	0.546	84	W
71	7399	-0.599	-0.730	-0.356	0.271	0.531	0.417	0.443	0.709	0.505	105	W
72	7408	2.309	-0.056	0.639	-0.056	0.892	0.522	0.668	0.640	0.738	14	St
73	7152	1.834	0.094	1.117	-0.499	0.833	0.545	0.776	0.545	0.717	16	St
74	7137	-0.687	-0.285	0.223	-1.095	0.520	0.486	0.574	0.418	0.507	102	W
75	7144	0.236	-0.432	-0.373	0.098	0.635	0.463	0.439	0.672	0.568	73	W
76	7118	1.163	-0.434	-0.274	-0.030	0.750	0.463	0.462	0.645	0.626	48	M
77	7104	1.781	0.384	0.720	-0.333	0.827	0.590	0.686	0.581	0.721	15	St
78	7037	-0.062	-0.237	-0.109	0.116	0.597	0.493	0.499	0.676	0.564	76	W
79	7024	-1.336	-0.640	-0.366	0.929	0.439	0.431	0.441	0.849	0.475	110	W
80	7012	-1.248	-0.422	-0.026	-0.071	0.450	0.465	0.518	0.636	0.479	109	W
81	7006	-0.973	-0.364	-0.640	1.026	0.484	0.474	0.379	0.870	0.506	104	W
82	7432	-1.928	-0.022	-0.710	0.923	0.365	0.527	0.363	0.848	0.457	113	W
83	9958	0.990	-0.141	-0.123	-0.569	0.728	0.508	0.496	0.530	0.622	51	M
84	9724	1.242	0.198	0.496	-0.200	0.760	0.561	0.636	0.609	0.675	26	M
85	9750	-0.268	0.134	0.288	0.194	0.572	0.551	0.589	0.693	0.579	70	W
86	9767	0.413	-0.339	-0.427	1.093	0.657	0.478	0.427	0.884	0.601	60	M
87	1604	-0.004	0.314	-0.397	0.082	0.605	0.579	0.434	0.669	0.585	68	W
88	1836	0.773	-0.559	0.316	-0.290	0.701	0.444	0.595	0.590	0.605	56	M
89	1866	-0.999	-0.141	0.350	0.505	0.481	0.508	0.603	0.759	0.528	92	W
90	1969	1.560	-0.253	-0.005	0.408	0.799	0.491	0.522	0.738	0.675	27	M
91	2001	0.135	-0.215	0.920	-0.095	0.622	0.497	0.732	0.631	0.599	61	M

续表4 Table 4 (Continued)

编号 ¹⁾ No. ¹⁾	样本 Sample	综合指标值 Comprehensive index value				隶属函数值 Subordinative function value				D 值 D value	D 值排序 Order of D value	类型 ²⁾ Type ²⁾
		CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	μ(1)	μ(2)	μ(3)	μ(4)			
92	5407	1.594	0.027	1.191	-0.512	0.803	0.534	0.793	0.542	0.701	22	St
93	3385	2.032	-0.623	0.389	0.937	0.858	0.434	0.612	0.851	0.708	18	St
94	4969	0.378	-1.558	-0.437	0.146	0.652	0.289	0.425	0.683	0.525	94	W
95	5069	2.241	-0.720	-0.825	-0.534	0.884	0.419	0.337	0.538	0.658	33	M
96	5078	-0.035	-0.782	2.108	-0.108	0.601	0.409	1.000	0.628	0.591	65	W
97	4158	0.473	0.049	1.342	1.092	0.664	0.538	0.827	0.884	0.666	21	M
98	2288	-0.031	-0.254	1.604	0.286	0.601	0.491	0.886	0.712	0.611	53	M
99	2163	1.279	-0.233	-0.658	0.038	0.764	0.494	0.375	0.659	0.635	44	M
100	2225	1.927	0.982	-0.209	0.131	0.845	0.682	0.476	0.679	0.743	13	St
101	2279	2.315	-1.083	-0.924	-0.486	0.893	0.362	0.315	0.548	0.645	39	M
102	2652	2.069	-0.516	0.013	0.955	0.862	0.450	0.526	0.855	0.706	20	St
103	4799	3.176	-0.818	-0.632	-0.710	1.000	0.403	0.381	0.500	0.715	17	St
104	2461	2.841	-0.282	0.864	0.498	0.958	0.486	0.719	0.757	0.778	10	St
105	2470	1.608	-1.736	-0.859	-0.437	0.805	0.261	0.329	0.558	0.574	71	W
106	3172	0.511	-3.420	-0.228	-0.214	0.669	0.000	0.472	0.606	0.448	114	W
107	3211	0.927	-1.286	0.657	0.410	0.720	0.331	0.672	0.739	0.604	58	M
108	3645	1.527	-2.802	-0.496	-0.349	0.795	0.096	0.411	0.577	0.531	91	W
109	4745	0.862	-2.237	-0.068	1.333	0.712	0.184	0.508	0.935	0.558	79	W
110	5035	2.184	-1.112	-1.016	-0.201	0.877	0.358	0.294	0.609	0.639	42	M
111	4944	0.523	-0.817	1.001	0.227	0.670	0.404	0.750	0.700	0.605	57	M
112	3264	2.088	-1.433	0.615	-0.191	0.865	0.308	0.663	0.611	0.658	32	M
113	3314	0.785	-1.134	0.694	0.395	0.703	0.354	0.680	0.735	0.603	59	M
114	4075	1.193	-1.616	-0.117	0.664	0.754	0.280	0.497	0.793	0.592	64	W
115	4137	1.113	-1.231	-0.821	-0.443	0.744	0.339	0.338	0.557	0.566	74	W
116	10099	2.544	-1.364	-1.146	-1.031	0.921	0.319	0.265	0.432	0.631	46	M
117	5046	1.580	-1.084	-0.510	-0.570	0.802	0.362	0.408	0.530	0.607	55	M
118	5098	-1.199	-0.550	1.216	0.299	0.456	0.445	0.798	0.715	0.514	100	W
119	4200	0.934	-2.232	-0.522	-0.231	0.721	0.184	0.406	0.602	0.521	98	W
120	4187	1.285	-2.315	0.532	0.790	0.765	0.171	0.644	0.819	0.585	69	W
121	4773	-0.429	-1.151	0.946	0.538	0.552	0.352	0.737	0.766	0.534	89	W
122	4805	0.573	-0.970	0.794	0.107	0.676	0.380	0.703	0.674	0.593	63	W
123	4758	-0.055	-0.832	0.927	0.422	0.598	0.401	0.733	0.741	0.569	72	W
124	4737	0.010	-2.004	0.356	0.380	0.606	0.220	0.604	0.732	0.506	103	W
125	4712	-0.409	-0.832	0.990	0.311	0.554	0.401	0.747	0.718	0.546	83	W
126	3142	0.736	-2.640	-0.277	0.472	0.697	0.121	0.461	0.752	0.509	101	W
127	3253a	-1.467	-1.683	0.596	-1.068	0.423	0.269	0.658	0.424	0.404	119	W
128	3325	0.656	-1.569	-0.111	0.141	0.687	0.287	0.498	0.682	0.550	85	W
129	4092	-0.204	-1.715	0.803	0.468	0.580	0.264	0.705	0.751	0.518	99	W
130	4169	0.705	-3.023	0.135	0.326	0.693	0.062	0.554	0.721	0.497	106	W
131	中苜一号 Zhongmu 1	2.325	-0.463	-0.602	0.095	0.894	0.458	0.387	0.672	0.693	23	M
132	AZ-88NDC	-0.241	0.668	-0.024	0.069	0.575	0.634	0.518	0.666	0.595	62	W

¹⁾ 1-41, 131, 132: *Medicago sativa* Linn.; 42: *M. cancellata* M. Bieb.; 43: *M. carstiensis* Wulf; 44, 45: *M. hemicycla* Grossh.; 46: *M. prostrata* Jacq.; 47-69, 108, 116: *M. falcata* Linn.; 70-86: *M. varia* Mart.; 87-92: *M. coerulea* Less.; 93, 111-113, 127, 128: *M. difalcata* Sinskaya; 94-96, 110, 117, 118: *M. quasifalcata* Sinskaya; 97-101, 114, 115, 119, 120, 129, 130: *M. trautvetterii* Sumnev.; 102, 103, 121, 122: *M. glutinosa* Bieb.; 104, 105: *M. glandulosa* David.; 106, 107, 126: *M. borealis* Grossh.; 109, 123-125: *M. tianschanica* Vass.

²⁾ W: 弱耐盐型 Weak salt tolerance type; M: 中耐盐型 Middle salt tolerance type; St: 强耐盐型 Strong salt tolerance type; Se: 敏盐型 Salt sensitive type.

盐类型看,强耐盐型样本(D 值大于‘中苜一号’)22 份,中耐盐型样本(D 值小于或等于‘中苜一号’但大于‘AZ-88NDC’)39 份,弱耐盐型样本(D 值小于或等于‘AZ-88NDC’但大于 0.5)59 份,敏盐型样本(D 值小于或等于 0.5)12 份。

根据 D 值进行聚类分析,结果显示:供试 132 份样本分为 4 类:第 I 类为强耐盐型,占供试样本总数的 18.9%,包括 9508、‘中苜一号’和 10203 等 25 份样本;第 II 类为中耐盐型,占供试样本总数的 27.3%,包括 10271、2288 和 3062 等 36 份样本;第 III 类为弱耐盐型,占供试样本总数的 46.2%,包括 4827、3253a 和‘AZ-88NDC’等 61 份样本;第 IV 类为敏盐型,占供试样本总数的 7.5%,包括 3754、3773 和 3745 等 10 份样本。与根据 D 值推断的供试样本耐盐类型略有差异。

2.4 回归模型建立及鉴定指标筛选

为分析供试样本的耐盐性与生长和生理指标间的关系,以耐盐性综合评价值(D)作因变量(Y),以幼苗存活率(SR)、幼苗生长速率(GR)、叶片叶绿素含量(Chl)、苗高(SH)、叶片相对电导率(REC)、单株干质量(DW)和单株绿叶数(NGL)7 个指标的耐盐系数作自变量(X)进行逐步回归分析,获得的回归方程为 $Y = -0.353 + 0.471X_{\text{Chl}} - 0.367X_{\text{NGL}} + 0.197X_{\text{SH}} + 0.094X_{\text{REC}}$ ($R^2 = 0.971$),表明 Chl、NGL、SH 和 REC 4 个指标对供试 132 份样本的耐盐性有显著影响。利用上述回归方程计算各样本的耐盐性预测值,与 D 值的差值为 $-0.001 \sim 0.043$;将 132 份样本的 D 值与利用回归方程计算的预测值进行相关性分析,其相关性极显著($R = 0.986, P < 0.01$),说明该方程可用于苜蓿属不同种类样本间的耐盐性预测。

3 讨论和结论

苗期是评价植物耐盐性的最佳生育期^[15-17]。苜蓿属植物的三叶期幼苗苗龄小,对 NaCl 胁迫比较敏感,易遭受毒害而导致植株发育迟缓甚至死苗,因此,本研究采用 Hoagland 营养液培养法并选择在三叶期对苜蓿属植物的不同样本进行耐盐性评价。植物耐盐性易受外界环境和自身基因型差异影响,从而导致耐盐性评价结果不准确。经 NaCl 胁迫处理后,供试苜蓿属 15 种植物 132 份样本的幼苗存活率、幼苗生长速率、叶片叶绿素含量、苗高、单株干质量和单株绿

叶数 6 个指标值均不同程度降低,而叶片相对电导率则大幅提高,且不同样本间存在差异。相关性分析结果表明:幼苗存活率、幼苗生长速率、苗高、单株干质量、单株绿叶数、叶片相对电导率以及叶片叶绿素含量间均存在不同程度的相关性,使得这些指标提供的信息有一定的重叠,因此,单项指标并不能全面反映植物耐盐性,应采用多项指标综合评价植物耐盐性^[13,18]。

主成分分析结果表明:前 4 个主成分的贡献率分别为 45.656%、26.024%、9.637% 和 8.236%,累计贡献率达 89.553%,表明这 4 个主成分基本代表了供试样本 7 个指标的绝大部分信息;基于主成分分析结果,结合隶属函数法得出综合指标值(CI_x)及隶属函数值 $[\mu(x)]$,进而获得供试 132 份样本苗期的耐盐性综合评价值(D),而 D 值是 1 个 $[0, 1]$ 闭区间的无量纲系数^[13],增加了样本间耐盐性的可比性及准确性。根据 D 值可将供试 132 份样本分为强耐盐型(D 值大于‘中苜一号’)、中耐盐型(D 值小于或等于‘中苜一号’但大于‘AZ-88NDC’)、弱耐盐型(D 值小于或等于‘AZ-88NDC’但大于 0.5)和敏盐型(D 值小于或等于 0.5)4 类。这与聚类分析结果略有差异,但总体趋势一致;其中,样本 10173 的耐盐性最强,样本 3754 的耐盐性最弱,因而,采用上述综合评价法可对苜蓿属植物耐盐性进行初步评价。在供试 132 份样本中筛选出耐盐性极强或极弱的样本,可为开展苜蓿属植物耐盐性遗传机制以及与其耐盐性相关的基因 QTL 定位等方面的研究奠定基础。

不同植物的耐盐性可采用不同的生长和生理指标进行评价,例如:戴海芳等^[13]认为,叶绿素含量可作为棉花(*Gossypium hirsutum* Linn.)耐盐性评价指标之一;谢楠等^[19]认为,绿叶数可作为饲用黑麦(*Secale cereale* Linn.)和小黑麦(*Secale sylvestre* Host)苗期耐盐性评价指标,该指标不仅可以反映耐盐性强弱,而且与耐盐指数法的评价结果总体趋势一致;张耿等^[20]和吴欣明等^[21]认为,苗高是评价偃麦草属(*Elytrigia* Desv.)和羊茅属(*Festuca* Linn.)植物耐盐性的最直观有效的指标,能够真实反映盐胁迫下植株的生长状况。不同研究者对苜蓿属植物耐盐性评价采用了不同的指标,例如:王保平等^[22]认为,苗高可作为苜蓿属植物苗期耐盐性评价的表观指标之一;王运琦等^[23]发现,细胞质膜透性可作为紫花苜蓿耐盐性评价的鉴定指标之一;田小霞等^[24]认为,苗高和相

对电导率均可作为紫花苜蓿耐盐性的鉴定指标。本研究中,以 D 值对不同指标进行逐步回归分析,获得供试样本幼苗耐盐性评价的回归方程 $Y = -0.353 + 0.471X_{\text{Chl}} - 0.367X_{\text{NGL}} + 0.197X_{\text{SH}} + 0.094X_{\text{REC}}$, 回归方程的4个自变量为叶片叶绿素含量、单株绿叶数、苗高和叶片相对电导率,除前述的其他研究者用于苜蓿属植物耐盐性评价的苗高和相对电导率,还增加了叶片叶绿素含量和单株绿叶数,这4个指标可作为苜蓿属植物苗期耐盐性评价的指标,因此,在相同的逆境条件下,可通过测定苗期的叶片叶绿素含量、单株绿叶数、苗高和叶片相对电导率,利用该回归方程可以初步预测其他苜蓿属植物样本的耐盐性。

综上所述,通过苗期的幼苗生长速率、单株干质量和单株绿叶数等7个生长和生理指标的测定和比较,结合主成分分析和隶属函数分析,根据 D 值对供试苜蓿属15种植物132份样本的耐盐性进行了筛选和归类。根据对照耐盐样本‘中苜一号’和盐敏感样本‘AZ-88NDC’的 D 值可将供试的132份样本分为强耐盐型、中耐盐型、弱耐盐型和敏盐型4类,且聚类分析结果与 D 值排序结果总体一致,表明在苗期选择合适的生长和生理指标可以对苜蓿属植物的耐盐性进行初步评价。而利用本研究建立的回归方程,可在相同实验条件下,仅通过叶片叶绿素含量、单株绿叶数、苗高和叶片相对电导率4个指标就能预测苜蓿属植物耐盐性。植物耐盐性是一个复杂的数量性状,同种植物不同种源甚至不同生长阶段其耐盐性也有差异,因此,要筛选出适用于实际生产应用的苜蓿属耐盐植物资源,还需要进行全生育期的耐盐性鉴定评价。

参考文献:

- [1] ZHU J K. Plant salt tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6: 66-71.
- [2] ZHOU D, LIN Z L, LIU L M. Regional land salinization assessment and simulation through cellular automaton-Markov modeling and spatial pattern analysis [J]. Science of the Total Environment, 2012, 439: 260-274.
- [3] 王占升, 朱 汉. 牧草耐盐力及盐碱地引种试验[J]. 中国草地, 1995(2): 38-42, 19.
- [4] 桂 枝, 高建明, 袁庆华, 等. 46个紫花苜蓿品种芽期耐盐性的研究[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(5): 301-303.
- [5] 李飞飞, 羊海军, 崔大方. 利用 SSR 及 ISSR 分子标记研究苜蓿属及其近缘植物的亲缘关系[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(1): 113-120.
- [6] 包爱科, 杜宝强, 王锁民. 紫花苜蓿耐盐、抗旱生理机制研究进展[J]. 草业科学, 2011, 28(9): 1700-1705.
- [7] IRWIN J A G, LLOYD D L, LOWE K F. Lucerne biology and genetic improvement: an analysis of past activities and future goals in Australia[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2001, 52: 699-712.
- [8] 岳明强, 刘艳昆, 徐玉鹏, 等. 紫花苜蓿萌发出苗期的耐盐鉴定方法[J]. 草业科学, 2012, 29(1): 88-91.
- [9] AL-KHATIB M, MCNEILLY T, COLLINS J C. The potential of selection and breeding for improved salt tolerance in lucerne (*Medicago sativa* L.) [J]. Euphytica, 1993, 65: 43-51.
- [10] 杨青川, 孙 彦, 苏加楷, 等. 紫花苜蓿耐盐育种及耐盐遗传基础的研究进展[J]. 中国草地, 2001, 23(1): 59-62.
- [11] 李 源, 刘贵波, 高洪文, 等. NaCl 胁迫对不同苜蓿种质苗期生长特性的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(增刊): 109-116.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 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.
- [14] 贾亚雄, 李向林, 袁庆华, 等. 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[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 2999-3007.
- [15] MCCOY T J. Tissue culture evaluation of NaCl tolerance in *Medicago* species: cellular versus whole plant response[J]. Plant Cell Reports, 1987, 6: 31-34.
- [16] 于 卓, 孙 祥, 张文忠, 等. 苜蓿品种间种子萌发及苗期耐盐性差异的研究[J]. 干旱区资源与环境, 1993, 7(2): 106-111.
- [17] GOUIA H, GHORBAL M H, TOURAINE B. Effects of NaCl on flows of N and mineral ions and on NO_3^- reduction rate within whole plants of salt-sensitive bean and salt-tolerant cotton [J]. Plant Physiology, 1994, 105: 1409-1418.
- [18] 彭玉梅, 石国亮, 崔辉梅. 加工番茄幼苗期耐盐生理指标筛选及耐盐性综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 61-67.
- [19] 谢 楠, 赵海明, 李 源, 等. 饲用黑麦、小黑麦品种苗期耐盐性评价及盐胁迫下的生理响应[J]. 草地学报, 2016, 24(1): 84-92.
- [20] 张 耿, 王 赞, 高洪文, 等. 21份偃麦草属牧草苗期耐盐性评价[J]. 草业科学, 2008, 25(1): 51-54.
- [21] 吴欣明, 王运琦, 刘建宁, 等. 羊茅属植物耐盐性评价及其对盐胁迫的生理反应[J]. 草业学报, 2007, 16(6): 67-73.
- [22] 王保平, 董晓燕, 董宽虎, 等. 盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(6): 1124-1129.
- [23] 王运琦, 吴欣明, 刘建宁, 等. 引进紫花苜蓿耐盐性的评价[J]. 草业与畜牧, 2009(3): 22-28.
- [24] 田小霞, 毛培春, 李彬彬, 等. 紫花苜蓿苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价[J]. 草地学报, 2017, 25(3): 545-553.

(责任编辑: 郭严冬)