

孙墨可,李俊伟,张 曼,等. 碱胁迫对不同品种燕麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):109-114.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.17.017

碱胁迫对不同品种燕麦幼苗生长及生理特性的影响

孙墨可¹,李俊伟²,张 曼¹,董玉迪¹,田 娟¹,李颖慧¹,徐威威³,郭来春¹,王春龙¹,任长忠¹

(1. 吉林省白城市农业科学院,吉林白城 1370001; 2. 内蒙古农业大学杂粮产业协同创新中心,内蒙古呼和浩特 010019;

3. 吉林农业大学农学院,吉林长春 015636)

摘要:为了筛选燕麦苗期的耐碱材料,明确耐碱性评价的关键指标,对 20 份燕麦幼苗施加 100 mmol/L 碱胁迫 (NaHCO_3 : $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 5:1$, pH 值 = 8.3),测定生长表型和生理指标共计 12 项指标的变化率,利用主成分分析、综合评价、热图和聚类等方法,评估各材料耐碱能力,剖析各项指标在评价过程中的作用。结果表明,不同燕麦材料对碱胁迫响应存在差异,各指标对碱胁迫的响应不同;根据综合打分结果,燕麦耐碱能力由大到小表现为 $\text{BY6} > \text{BY7} > \text{BY12} > \text{BY19} > \text{BY15} > \text{BY8} > \text{BY17} > \text{BY14} > \text{BY2} > \text{BY9} > \text{BY20} > \text{BY11} > \text{BY1} > \text{BY18} > \text{BY16} > \text{BY5} > \text{BY3} > \text{BY10} > \text{BY4} > \text{BY13}$;聚类分析将 20 份材料划分为耐碱能力不同的 4 个类群;各指标对鉴定燕麦耐碱性的影响力大小依次为可溶性糖含量 > 脯氨酸含量 > Na^+ 含量 > POD 活性 > SOD 活性 > CAT 活性 > MDA 含量 > 根系活力 > 根长 > 株高 > K^+ 含量 > 植株鲜质量。结果显示,BY7、BY6、BY19 等 12 份材料为燕麦苗期的耐碱材料。脯氨酸、 Na^+ 、可溶性糖含量等指标是燕麦苗期耐碱性评价中的关键指标。

关键词:燕麦;碱胁迫;主成分分析;聚类分析;生长表型;生理指标;热图

中图分类号: S512.601 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)17-0109-06

土地盐碱化是人类面临的重大生态环境问题,我国盐渍土面积约为 5 亿亩 ($1 \text{ hm}^2 = 15 \text{ 亩}$),可开发利用的面积达 2 亿亩,报道指出,盐碱化土壤面积还在逐年扩大^[1-2]。苏打盐碱土是一类具有较高

pH 值的盐碱土壤,其盐分主要是 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 ,该类型盐碱逆境严重影响植物的正常生长发育^[3-4]。燕麦是一种耐逆性较强的作物,在开发和改良盐碱地过程中具有潜在利用价值。以往研究主要集中在中性盐胁迫方面,对碱胁迫的研究相对较少,相较于盐胁迫,碱对植物的胁迫作用更强烈,其逆境胁迫机制也更为复杂,碱胁迫除了产生离子胁迫、渗透胁迫之外,还会产生 pH 值胁迫;植物能够通过离子再平衡、渗透调节、清除活性氧自由基、稳定 pH 值等方式响应盐碱胁迫^[5-9]。对于

收稿日期:2021-09-07

基金项目:国家现代农业产业技术体系专项(编号:CARS-07)。

作者简介:孙墨可(1988—),女,吉林镇赉人,硕士,助理研究员,主要从事作物育种工作。E-mail:337645598@qq.com。

通信作者:任长忠,博士,研究员,主要从事作物育种工作。E-mail:renchangzhong@163.com。

[28] Couée I, Sulmon C, Gouesbet G, et al. Involvement of soluble sugars in reactive oxygen species balance and responses to oxidative stress in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(3): 449-459.

[29] 路旭平,李芳兰,马晓娟,等. 不同碱敏感水稻品种根系对碱胁迫的生理响应策略[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(7): 1171-1184.

[30] Ren Y F, Wang W, He J Y, et al. Nitric oxide alleviates salt stress in seed germination and early seedling growth of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) by enhancing physiological and biochemical parameters[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 187: 109785.

[31] Sun J K, He L, Li T. Response of seedling growth and physiology of *Sorghum bicolor* (L.) Moench to saline-alkali stress[J]. PLoS One, 2019, 14(7): e0220340.

[32] Zhao J J, Feng N F, Wang X X, et al. Uniconazole confers chilling stress tolerance in soybean (*Glycine max* L.) by modulating photosynthesis, photoinhibition, and activating oxygen metabolism system[J]. Photosynthetica, 2019, 57(2): 446-457.

[33] Jia X M, Wang H, Svetla S, et al. Comparative physiological responses and adaptive strategies of apple *Malus halliana* to salt, alkali and saline-alkali stress[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 245: 154-162.

[34] 刘 铎,丛日春,高卫东,等. 盐碱胁迫对柳树抗氧化酶的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 53-57.

[35] Chen Y Y, Li Y Y, Sun P, et al. Interactive effects of salt and alkali stresses on growth, physiological responses and nutrient (N, P) removal performance of *Ruppia maritima* [J]. Ecological Engineering, 2017, 104: 177-183.

碱性盐逆境的研究,现已对向日葵、水稻、小麦、苜蓿、羊草、星星草、虎尾草、碱地肤等农作物或盐生植物开展了逆境影响下的植物生长发育、生理生化机制、生态适应性等多方面的研究^[10-17]。燕麦的耐盐碱特性逐渐受到人们的关注,已有燕麦耐盐碱机制、盐碱逆境栽培管理等方面的探究^[18-21]。盐碱逆境条件下,燕麦根系通过分泌草酸优化根际的盐碱土壤环境,茎叶对盐碱环境中的金属阳离子具有选择吸收特性,表明燕麦适应盐碱逆境的同时也对该类土壤本身具有改良作用^[22-23]。目前对种质耐碱性的评价报道较少,用于鉴定耐碱能力的主要指标也不明确,有必要对燕麦耐碱材料及其关键筛选指标进行探究。从 20 份燕麦材料中筛选耐碱燕麦材料,并明确评价燕麦耐碱能力的关键指标。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用 20 份燕麦品种为试验材料,以上材料由白城市农业科学院燕麦研究所选育,为中国与加拿大燕麦杂交后代,材料基因多样性丰富。各材料信息如表 1 所示。

表 1 燕麦材料信息

编号	材料	类型	编号	材料	类型
BY1	白燕 1 号	裸燕麦	BY11	白燕 11 号	裸燕麦
BY2	白燕 2 号	裸燕麦	BY12	白燕 12 号	皮燕麦
BY3	白燕 3 号	裸燕麦	BY13	白燕 13 号	裸燕麦
BY4	白燕 4 号	裸燕麦	BY14	白燕 14 号	皮燕麦
BY5	白燕 5 号	裸燕麦	BY15	白燕 15 号	裸燕麦
BY6	白燕 6 号	皮燕麦	BY16	白燕 16 号	皮燕麦
BY7	白燕 7 号	皮燕麦	BY17	白燕 17 号	皮燕麦
BY8	白燕 8 号	裸燕麦	BY18	白燕 18 号	裸燕麦
BY9	白燕 9 号	裸燕麦	BY19	白燕 19 号	皮燕麦
BY10	白燕 10 号	裸燕麦	BY20	白燕 20 号	裸燕麦

1.2 试验设计

试验于 2020 年在白城市农业科学院温室内进行,光照/黑暗处理(12 h/12 h),温度(23±2)℃。采用花盆播种,花盆直径 22 cm、高 18 cm,每盆装 5 kg 沙子。将 20 份材料重复 3 次分别播种于 60 盆内,每盆播种 30 粒。每隔 3 d 浇 1/2 Hoagland 营养液 500 mL。出苗后每盆定苗 20 株。待幼苗生长至三叶期,处理组每隔 3 d 施加 500 mL 碱溶液(NaHCO₃: Na₂CO₃ = 5 : 1,pH 值为 8.3),碱浓度由 25、50、75、100 mmol/L 分次逐渐增加,达到最终浓

度后,每次按最终浓度继续处理,CK 组继续浇灌 1/2 Hoagland 营养液,从处理开始计算,持续处理 21 d;取样测定幼苗株高、鲜质量、根长、Na⁺ 含量、K⁺ 含量、根系活力(RA)、脯氨酸(Pro)含量、可溶性糖(SS)含量、抗氧化酶活性和丙二醛(MDA)含量。

1.3 测定指标与方法

取 10 株材料,用直尺测量株高(PH)、根长(RL),植株鲜质量(FW)取地上部分用分析天平称质量。

取叶片测定以下生理指标:采用火焰分光光度法测定 Na⁺、K⁺ 含量;采用水合茚三酮法测定脯氨酸含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量;采用光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性;采用过氧化氢法测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量。采集根系,采用萘胺氧化法测定根系活力。测定方法参考李合生的《植物生理生化实验原理与技术》^[24]。

耐碱指数计算方法:耐碱指数 = (处理值/对照) × 100%。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 整理,显著性检验、相关性分析、主成分分析采用 SPSS 22.0 软件,聚类-热图采用 Heatmapper 绘制。

2 结果与分析

2.1 20 份材料各性状的耐碱指数

单项指标在不同材料之间的耐碱指数存在很大的变异,这可能与不同材料响应碱胁迫的方式不同有关;碱胁迫也引起植株从表型到生理物质等 12 项指标发生不同程度的变化。耐碱指数越大,表示碱处理之后该指标变化越大。由表 2 可知,碱胁迫引起植株株高、鲜质量、根长、K⁺ 含量等指标降低,而 Na⁺ 含量、根系活力、脯氨酸含量、可溶性糖含量、抗氧化酶活性、丙二醛含量等指标升高。

2.2 性状耐碱系数显著性分析

由表 3 各项指标耐碱系数方差检验表明,在 20 份燕麦材料间均具有极显著差异,表明各项指标在后续分析过程中具有统计学意义。

2.3 性状耐碱系数相关性分析

检验各项指标耐碱系数之间的相关性,如表 4 所示,多数指标之间达显著水平,不同程度的相关性说明多组数据之间存在部分信息重叠,通过主成

表 2 20 份材料各性状的耐碱指数

材料	耐碱指数(%)											
	PH	FW	RL	Na ⁺ 含量	K ⁺ 含量	RA	Pro 含量	SS 含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	MDA 含量
BY1	71.80	59.13	73.03	466.66	74.91	310.96	641.61	558.17	386.74	290.97	286.09	443.32
BY2	81.59	56.87	77.18	407.94	83.89	403.71	691.09	767.02	411.43	356.93	385.94	375.39
BY3	70.30	53.37	76.43	519.35	70.36	258.08	602.45	520.78	306.81	331.13	322.67	691.38
BY4	66.42	48.63	72.44	503.54	65.43	184.22	588.10	516.65	260.84	220.09	277.34	861.05
BY5	78.71	60.17	74.84	528.12	74.27	202.10	623.28	684.63	382.66	305.02	262.74	704.46
BY6	82.48	68.10	81.73	406.89	94.78	880.05	806.24	781.96	542.84	556.18	405.52	316.95
BY7	77.63	58.35	75.48	421.75	86.07	709.98	872.97	845.69	493.94	495.64	441.42	334.27
BY8	76.69	63.06	73.98	476.68	78.99	471.22	655.22	787.31	488.85	416.90	325.43	466.03
BY9	81.09	60.57	79.58	419.24	84.89	412.30	731.35	714.51	398.01	342.51	359.41	453.51
BY10	77.97	58.18	72.50	391.64	75.20	341.03	406.70	511.32	222.05	234.35	243.19	399.68
BY11	80.63	61.71	70.97	413.18	78.30	491.68	644.88	595.59	258.10	339.73	273.59	497.38
BY12	80.67	63.40	79.35	433.07	83.87	405.93	828.75	817.65	428.25	430.85	308.46	278.94
BY13	61.38	50.47	68.82	538.16	60.60	529.07	545.97	567.09	237.81	298.31	304.47	940.23
BY14	81.96	73.90	80.35	475.05	84.16	537.90	748.14	880.41	391.24	308.86	355.93	609.82
BY15	76.39	69.83	84.40	393.19	78.99	444.37	908.60	763.88	379.56	399.58	319.07	522.68
BY16	79.87	53.45	71.80	487.25	78.33	215.60	632.54	636.29	274.99	318.17	329.62	575.35
BY17	84.76	67.83	84.54	442.40	88.16	434.46	767.66	819.83	425.89	381.54	252.51	500.77
BY18	78.12	58.65	75.93	419.10	80.52	535.31	570.08	570.77	321.29	330.86	327.36	766.38
BY19	79.21	59.00	77.63	450.23	80.51	595.22	761.00	860.51	381.43	421.79	343.03	398.44
BY20	73.23	59.11	71.87	467.78	87.71	575.43	729.24	643.34	316.49	324.05	415.63	525.71

表 3 显著性分析

指标	<i>F</i> 值	性状	<i>F</i> 值	性状	<i>F</i> 值
PH	3 404.38 **	K ⁺ 含量	430.01 **	SOD 活性	4 082.23 **
FW	150 382 **	RA	2 260.8 **	POD 活性	38 134.65 **
RL	664.67 **	Pro 含量	3 516 517 **	CAT 活性	7 285.24 **
Na ⁺ 含量	601 529.6 **	SS 含量	915 240.8 **	MDA 含量	26 863.17 **

注:数据后标*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。表 4 同。

表 4 相关性分析

指标	相关系数											
	PH	FW	RL	Na ⁺ 含量	K ⁺ 含量	RA	Pro 含量	SS 含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	MDA 含量
PH	1.000											
FW	0.670 **	1.000										
RL	0.597 **	0.739 **	1.000									
Na ⁺ 含量	-0.616 **	-0.461 *	-0.447 *	1.000								
K ⁺ 含量	0.812 **	0.673 **	0.606 **	-0.632 **	1.000							
RA	0.25	0.439	0.275	-0.434	0.599 **	1.000						
Pro 含量	0.414	0.589 **	0.687 **	-0.344	0.640 **	0.488 *	1.000					
SS 含量	0.625 **	0.674 **	0.660 **	-0.294	0.672 **	0.507 *	0.796 **	1.000				
SOD 活性	0.505 *	0.575 **	0.620 **	-0.29	0.695 **	0.523 *	0.714 **	0.776 **	1.000			
POD 活性	0.450 *	0.463 *	0.523 *	-0.402	0.674 **	0.741 **	0.749 **	0.705 **	0.823 **	1.000		
CAT 活性	0.14	0.111	0.148	-0.215	0.556 *	0.649 **	0.543 *	0.450 *	0.504 *	0.583 **	1.000	
MDA 含量	-0.671 **	-0.464 *	-0.396	0.696 **	-0.739 **	-0.385	-0.509 *	-0.557 *	-0.605 **	-0.616 **	-0.344	1.000

分分析可以对原有信息进行有效提取,最终将原数据多项资料的主要信息浓缩到少数几个主要因子中^[25]。

2.4 主成分分析

主成分的特征根和贡献率是选择主成分的依据,载荷对应的指标可以反映盐碱胁迫下燕麦的逆境响应状况,载荷矩阵通过相关系数反映了主成分与其他指标之间的关系,可以明确具体指标对主成分负荷的相对大小和作用方向,相关系数绝对值越大,说明关系越密切^[26-27]。

从表 5 可知,前 3 个主成分的单独特征根均大于 1,其累积贡献率达到 80.983%,提取前 3 个因子作为主成分替代原始数据中的 12 类分量。第 1 主成分的贡献率为 59.413%,其中,K⁺ 含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、SOD 活性、POD 活性等指标的耐碱系数对第 1 主成分的贡献最大,第 1 主成分因子可视为生理调节综合因子;第 2 主成分的贡献率为 12.172%,CAT 活性耐碱系数的载荷较大,第 2 主成分因子可称为过氧化氢酶活性因子;第 3 主成分的贡献率为 9.398%,载荷最高的是 Na⁺ 含量和 MDA 含量,第 3 主成分可称为毒害物质因子。

表 5 入选的特征根及特征向量

特征根	1	2	3	分量来源
	7.13	1.461	1.128	
贡献率(%)	59.413	12.172	9.398	
累计贡献率(%)	59.413	71.585	80.983	
特征向量	0.78	-0.42	-0.17	PH
	0.75	-0.37	0.26	FW
	0.74	-0.34	0.41	RL
	-0.62	0.37	0.57	Na ⁺ 含量
	0.90	-0.08	-0.20	K ⁺ 含量
	0.68	0.47	-0.23	RA
	0.83	0.17	0.31	Pro 含量
	0.85	0.05	0.32	SS 含量
	0.85	0.17	0.23	SOD 活性
	0.85	0.33	0.02	POD 活性
	0.57	0.68	-0.21	CAT 活性
	-0.76	0.19	0.39	MDA 含量

根据主成分分析,利用各分量的特征向量,构建各指标与材料的抗碱性函数关系式,抗碱性函数表达式如下所示:

$$Y_1 = -0.780X_1 + 0.757X_2 + 0.741X_3 - 0.622X_4 + 0.905X_5 + 0.675X_6 + X_7 + 0.854X_8 + 0.844X_9 + 0.847X_{10} + 0.558X_{11} - 0.762X_{12};$$

$$Y_2 = -0.516X_1 - 0.369X_2 - 0.326X_3 + 0.353X_4 - 0.087X_5 + 0.468X_6 + 0.188X_7 - 0.051X_8 + 0.181X_9 + 0.342X_{10} + 0.683X_{11} + 0.177X_{12};$$

$$Y_3 = -0.133X_1 + 0.251X_2 + 0.398X_3 + 0.572X_4 - 0.208X_5 - 0.241X_6 + 0.310X_7 + 0.325X_8 + 0.230X_9 + 0.012X_{10} - 0.210X_{11} + 0.392X_{12}。$$

式中:Y_i(i=1,2,3)为主成分;X₁~X₁₂分别为株高、鲜质量、根长、Na⁺ 含量、K⁺ 含量、根系活力、脯氨酸含量、可溶性糖含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和 MDA 含量的耐碱系数。

直接使用 Y₁、Y₂ 或 Y₃ 不能对燕麦苗期的抗碱性做出综合评价,按照各主成分的贡献率得到综合因子得分函数,即:

$$Y = 0.59Y_1 + 0.19Y_2 + 0.09Y_3。$$

该函数评估了 20 份燕麦苗期耐碱能力的综合得分,结果见表 6。

由表 6 可见,20 份燕麦材料的耐碱能力从强到弱依次为 BY6 > BY7 > BY12 > BY19 > BY15 > BY8 > BY17 > BY14 > BY2 > BY9 > BY20 > BY11 > BY1 > BY18 > BY16 > BY5 > BY3 > BY10 > BY4 > BY13。

表 6 20 份燕麦材料苗期耐碱能力的综合得分及排名

材料	得分	排名	材料	得分	排名
BY1	10.86	13	BY11	11.37	12
BY2	14.06	9	BY12	15.60	3
BY3	9.00	17	BY13	6.84	20
BY4	8.35	19	BY14	14.06	8
BY5	9.77	16	BY15	14.68	5
BY6	19.07	1	BY16	9.97	15
BY7	18.35	2	BY17	14.09	7
BY8	14.20	6	BY18	10.48	14
BY9	13.46	10	BY19	15.57	4
BY10	8.49	18	BY20	13.00	11

2.5 燕麦耐碱能力聚类-热图

热图中,红色表示相应指标在划分类群中发挥的作用强,深绿色其次,绿色则最小^[18]。如图 1 所示,聚类分析将 20 份材料划分为 4 类,其中,第 1 类属于高耐碱性材料,包括 BY7、BY6、BY19、BY9、BY12、BY11、BY18,共计 7 份材料;第 2 类属于耐碱性材料,包括 BY8、BY2、BY15、BY10、BY14 等 5 份材料;第 3 类属于不耐碱材料,包括 BY1、BY5、BY20、BY16、BY17 等 5 份材料;第 4 类属于碱敏感材料,包括 BY13、BY4、BY3 等 3 份材料。

由热图可知,不同指标对评价燕麦耐碱性的影

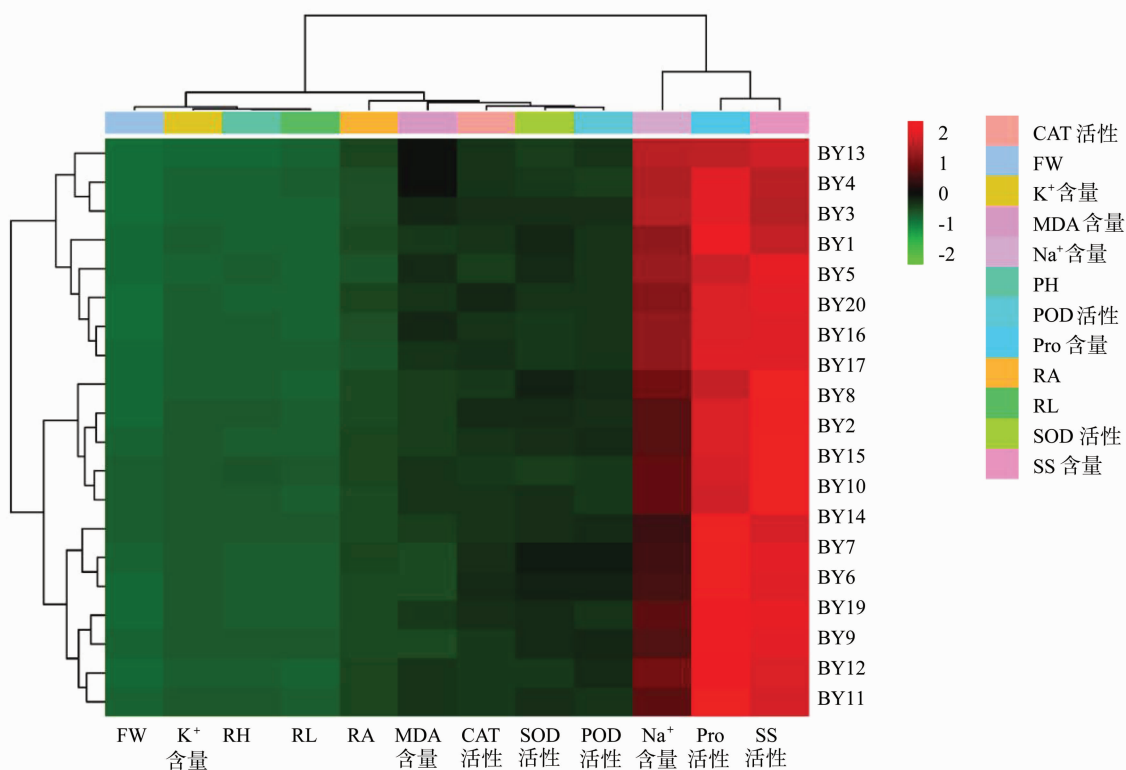


图1 20份燕麦材料及其12项评价指标的聚类结果及热图

响不同,影响作用从强到弱的顺序依次为可溶性糖含量>脯氨酸含量> Na^+ 含量>POD活性>SOD活性>CAT活性>MDA含量>根系活力>根长>株高> K^+ 含量>植株鲜质量。

3 讨论与结论

通过耐碱系数计算、方差分析、相关性分析、主成分分析、综合分析、聚类-热图分析,对20份材料的耐碱性进行评价和类群划分,分析各项指标在评价耐碱能力中的作用大小。

本试验参照已有研究方法^[28-30],首先计算材料的耐碱系数。从不同材料角度来看,单项指标在不同材料之间的耐碱系数存在较大的变异,这可能与不同材料响应碱胁迫的敏感度存在差异有关;从不同评价指标角度来看,碱胁迫也引起植株12项指标发生不同程度的变化,表现为碱胁迫抑制株高、鲜质量、根长等,导致植株 K^+ 含量减少, Na^+ 含量升高,生理调节物质、抗氧化物质和细胞毒害物质等含量大幅度升高。

利用主成分分析将燕麦响应碱胁迫的12项耐碱系数归纳成生理调节综合因子、抗氧化酶因子、毒害物质因子3个主成分,贡献率分别为59.413%、12.172%、9.398%,累积贡献率为80.983%,各指

标按照不同比例被提取到主要的3个主成分中,其中, K^+ 含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、SOD活性、POD活性在第1主成分中的负荷量最大,CAT活性在第2主成分中的负荷量最大, Na^+ 含量和MDA含量在第3主成分中的负荷量最大。主成分分析结合聚类分析是一种典型的数据分析方法,在群体材料分类研究中得到广泛应用^[31-34]。

通过综合因子得分函数评价20份燕麦材料的耐碱能力,结果显示,白燕6号、白燕7号及白燕12号等材料属于强耐碱燕麦材料,白燕13号、白燕4号、白燕3号等属于碱敏感材料,这与实际观测结果基本一致。利用多指标对种质资源的耐碱性进行综合评价,能更好地揭示燕麦对碱胁迫的适应机制,提高耐碱性鉴定的准确性。段文学等采用主成分分析结合聚类方法评价了甘薯苗期的耐盐性^[30];王志恒等评价藜麦生长初期对不同类型逆境的耐性,发现材料耐性水平因逆境类型而异^[27]。

热图将不同指标的影响作用进行了区分;聚类结果将20份燕麦材料划分为4类,包括7份强耐碱性材料、5份耐碱性材料、5份不耐碱材料和3份碱敏感材料,该聚类结果与综合因子得分函数计算的排名结果基本一致,说明本次研究中所采用的评价方法及其评价结果较为可靠;不同指标对碱胁迫的

响应变化不同,不同材料在单个指标维度上的响应水平存在差异,这与本研究中表 1 反映的结果相吻合,热图能区分 12 项评价指标在类群划分过程中的效应强度,可溶性糖含量、脯氨酸含量和 Na^+ 含量等对类群划分的影响较大,是评价材料耐碱能力的关键指标,而株高、鲜质量和根长等指标对类群划分的作用最小,可能与表型指标的变化幅度较小有关。

本研究对 20 份燕麦材料的耐碱能力进行了评价和划分,并明确了燕麦苗期耐碱能力的鉴定指标,为相关研究的材料选择和研究方法运用提供参考。

参考文献:

- [1] 李建国,濮励杰,朱 明,等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报,2012,67(9):1233–1245.
- [2] 杜良宗,谭 昆,周少梁. 土壤盐碱地改良的研究分析与发展概况[J]. 土壤科学,2021,9(1):14–17.
- [3] 宋长春,邓 伟. 吉林西部地下水特征及其与土壤盐渍化的关系[J]. 地理科学,2000,20(3):246–250.
- [4] 杨 真,王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学,2015,47(4):125–130.
- [5] Li R L, Shi F C, Fukuda K, et al. Effects of salt and alkali stresses on germination, growth, photosynthesis and ion accumulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(5):725–733.
- [6] Wang X P, Geng S J, Ri Y J, et al. Physiological responses and adaptive strategies of tomato plants to salt and alkali stresses[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1):248–255.
- [7] Bai J H, Yan W K, Wang Y Q, et al. Screening oat genotypes for tolerance to salinity and alkalinity[J]. Frontiers in Plant Science, 2018,9:1302.
- [8] 萨如拉,刘景辉,刘 伟,等. 燕麦对碱胁迫的阳离子响应机制[J]. 作物学报,2014,40(2):362–368.
- [9] 董京铭,刘瑞翔,马晨晨,等. 利用主成分回归方法预估连云港地区水稻气象产量[J]. 江苏农业学报,2021,37(3):606–612.
- [10] 石德成,盛艳敏,赵可夫. 复杂盐碱条件对向日葵胁迫作用主导因素的实验确定[J]. 作物学报,2002,28(4):461–467.
- [11] Zhang Y H, Lin X Y, Ou X F, et al. Transcriptome alteration in a rice introgression line with enhanced alkali tolerance [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013,68:111–117.
- [12] Guo R, Yang Z Z, Li F, et al. Comparative metabolic responses and adaptive strategies of wheat (*Triticum aestivum*) to salt and alkali stress[J]. BMC Plant Biology, 2015,15:170.
- [13] Wei T J, Jiang C J, Jin Y Y, et al. $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ratio as a critical marker for field evaluation of saline–alkaline tolerance in alfalfa

- (*Medicago sativa* L.) [J]. Agronomy, 2020,10(2):191.
- [14] Shi D C, Wang D L. Effects of various salt–alkaline mixed stresses on *Aneurolepidium chinense* (Trin.) Kitag [J]. Plant and Soil, 2005,271(1/2):15–26.
- [15] 杨春武,贾娜尔·阿汗,石德成,等. 复杂盐碱条件对星星草种子萌发的影响[J]. 草业学报,2006,15(5):45–51.
- [16] 李长有,胡亚忱,倪福太,等. 盐碱胁迫对虎尾草生长的影响[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版),2008,29(4):24–27.
- [17] 麻 莹,石德成. 盐碱混合胁迫下抗碱盐生植物碱地肤的渗透调节及其离子平衡特点[C]//2007 中国植物生理学会全国学术会议论文摘要汇编. 石家庄:中国植物生理学会,2007.
- [18] 彭远英,颜红海,郭来春,等. 燕麦属不同倍性种质资源抗碱性状评价及筛选[J]. 生态学报,2011,31(9):2478–2491.
- [19] 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.
- [20] 范 远,任长忠,李品芳,等. 盐碱胁迫下燕麦生长及阳离子吸收特征[J]. 应用生态学报,2011,22(11):2875–2882.
- [21] 李建设,沈国伟,任长忠,等. 燕麦种子萌发和幼苗生长对不同盐胁迫的反应[J]. 麦类作物学报,2009,29(6):1043–1047.
- [22] 萨如拉,刘景辉,刘 伟,等. 碱性盐胁迫对燕麦矿质离子吸收与分配的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(2):261–266.
- [23] 卢培娜,刘景辉,赵宝平,等. 菌肥对盐碱地土壤特性及燕麦根系分泌物的影响[J]. 作物杂志,2017(5):85–92.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [25] 虞晓芬,傅 玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策,2004(11):119–121.
- [26] 李丰先,周宇飞,王艺陶,等. 高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定[J]. 中国农业科学,2013,46(9):1762–1771.
- [27] 王志恒,徐中伟,周吴艳,等. 藜麦种子萌发阶段响应干旱和盐胁迫变化的综合评价[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(7):1033–1042.
- [28] 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.
- [29] 吴 奇,周宇飞,高 悦,等. 不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定[J]. 作物学报,2016,42(8):1233–1246.
- [30] 段文学,张海燕,解备涛,等. 甘薯苗期耐盐性鉴定及其指标筛选[J]. 作物学报,2018,44(8):1237–1247.
- [31] 李培富,杨淑琴,马宏伟. 宁夏水稻主要农艺性状的主成分及聚类分析[J]. 中国农学通报,2006,22(12):162–166.
- [32] 王德青,朱建平,谢邦昌. 主成分聚类分析有效性的思考[J]. 统计研究,2012,29(11):84–87.
- [33] 陶爱芬,祁建民,林培青,等. 红麻优异种质产量和品质性状主成分聚类分析与综合评价[J]. 中国农业科学,2008,41(9):2859–2867.
- [34] 张 洪,王先凤. 基于主成分与聚类分析的安徽省旅游目的地竞争力研究[J]. 华东经济管理,2013,27(12):43–48.