

吉林省 200 份骨干玉米自交系的芽、苗期耐盐碱性综合鉴评

陆程张^{1,2}, 张春宵², 李淑芳², 李万军³, 刘学岩², 郑大浩^{1*}, 李晓辉^{2*}

(1. 延边大学农学院, 吉林 延吉 133002; 2. 吉林省农业科学院作物资源研究所, 吉林 公主岭 136100; 3. 吉林省农业科学院洮南综合试验站, 吉林 洮南 137100)

摘要:在种子萌发期和幼苗三叶一心期,以吉林省 200 份骨干玉米自交系为试材,分别采用适宜盐、碱和混合盐碱筛选的 200 mmol/L NaCl、100 mmol/L Na₂CO₃、200 mmol/L NaCl+25 mmol/L Na₂CO₃ 混合溶液进行胁迫实验。分别测定种子发芽率、幼苗苗情等适宜耐盐碱筛选的生理指标,进而转化为耐性系数综合评价自交系的耐盐碱性。结果表明:不同时期、不同胁迫处理的玉米自交系间耐盐碱性差异显著;基于芽期和苗期的耐盐碱性综合评价对 200 份自交系进行聚类分析,划分为高耐、耐、中等、敏感、高感 5 个类群,筛选出 444、四 287、哲 446、A188、掖 52106、吉 741、吉 t9、吉 728 等 8 份高耐玉米自交系。研究结果为玉米耐盐碱种质资源筛选提供实验依据。

关键词:玉米;自交系;芽期;苗期;耐盐碱性

中图分类号:S513

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)01-0026-05

Comprehensive Identification and Evaluation on Saline-Alkaline Tolerance of 200 Maize Elite Inbred Lines at Bud and Seedling Stages in Jilin Province

LU Chengzhang^{1,2}, ZHANG Chunxiao², LI Shufang², LI Wanjun³, LIU Xueyan², ZHENG Dahao^{1*}, LI Xiaohui^{2*}

(1. Agricultural College, Yanbian University, Yanji 133002; 2. Crop Germplasm Resources Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling 136100; 3. Taonan Research Center, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Taonan 137100, China)

Abstract: With 200 maize elite inbred lines in Jilin Province as test materials, the experiments were carried out at seed germination and three-leaf stage, respectively. 200 mmol/L NaCl, 100 mmol/L Na₂CO₃, 200 mmol/L NaCl + 25 mmol/L Na₂CO₃ mixed solutions suitable for the screening of saline, alkaline and mixed saline-alkaline screening were used for stress test. Seed germination rate, seedling condition and other physiological indexes suitable for salt and alkali tolerance screening were measured, and then transformed into tolerance coefficient to comprehensively evaluate the salt and alkali tolerance of inbred lines. The results showed that there were significant differences for saline-alkaline tolerance among maize inbred lines in different stages and different treatments. Combined with the results at the bud and seedling stages, 200 inbred lines were divided into 5 groups (high tolerance, tolerance, moderate tolerance, sensitivity and high sensitivity). Eight inbred lines (444, Si 287, Zhe 446, A188, Ye 52106, Ji 741, Ji t9, Ji 728) with high saline-alkaline tolerance were selected. The results provided experimental basis for the selection of maize saline-alkaline resistant germplasm resources.

Key words: Maize (*Zea mays* L.); Inbred lines; Bud stage; Seedling stage; Saline-alkaline tolerance

土壤盐碱化严重影响玉米的产量^[1-2]。土壤的

盐碱化包括盐化(以土壤盐度升高为特征)和碱化(以土壤 pH 升高为特征),二者相伴而生^[3]。玉米生长适宜的土壤 pH 为 6.5~7.0^[4]。在盐碱胁迫下,植物的各种生理代谢和生长受到影响,玉米种子发芽指数和活力指数降低,发芽时间推后,幼苗含水量、植株干重等都受到不同程度的影响;蒸腾速率、净光合速率、气孔导度等逐渐降低;根系干重和活力、活跃吸收面积和总吸收面

收稿日期:2020-03-23

基金项目:吉林省农业科技创新工程人才基金项目(C92072215);
吉林省科技厅重点研发项目(20200402024NC)

作者简介:陆程张(1996-),男,在读硕士,主要从事玉米耐盐碱研究。

通讯作者:郑大浩,男,博士,教授,E-mail: ljzdh@163.com

李晓辉,男,博士,研究员,E-mail: lixiaohui2002lix@163.com

积明显下降,电导率上升;脯氨酸含量升高^[5-9]。作为生长发育的初始阶段,芽期的耐盐碱性对其能否在盐碱地中存活与正常生长起至关重要的作用。玉米在苗期对盐分中度敏感,耐盐能力比较低,保证苗齐苗壮是获得玉米高产的基础^[10]。不同玉米品种受基因型、表现型和体内生理生化反应影响,盐胁迫敏感程度不同,耐盐碱性差异大^[11]。因此,开展玉米耐盐碱鉴定方法与评价体系的建立和耐盐碱种质资源的筛选,进一步培育耐盐碱品种,对确保我国玉米的稳产和高产意义重大。目前发芽率、发芽势等形态指标因测定方法简单而被广泛应用于评价种质耐盐碱性^[12-15]。本研究基于吉林省地方标准 DB22-T 2621-2017 的耐盐碱筛选适宜浓度和生理指标^[16],通过对200份骨干玉米自交系进行芽期和苗期的耐盐碱性鉴

定,筛选优异耐盐碱种质资源,为加快耐盐碱种质创新和品种培育提供方法和理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料与处理

选择充分成熟、饱满且大小均匀的玉米骨干自交系200份(表1),用0.1%升汞消毒10 min,灭菌蒸馏水冲洗3遍。每份材料设200 mmol/L NaCl、100 mmol/L Na₂CO₃、200 mmol/L NaCl+25 mmol/L Na₂CO₃混合溶液、正常对照(蒸馏水)四种处理。将种子放置于铺有胁迫液滤纸的消毒培养皿内,每皿15粒,放置于25℃的光照培养箱中培养。每2 d更换一次滤纸。以萌发出的幼根达到粒长、胚芽达到粒长1/2为发芽标准^[17],每2 d对发芽种子数进行记录,直至8 d为止。

表1 200份玉米自交系

编号	自交系	编号	自交系	编号	自交系	编号	自交系	编号	自交系
1	444	31	沈137	61	A801	91	吉915	121	吉08
2	郑58	32	P010	62	中系09/02	92	吉916	122	吉三77
3	吉4112	33	冲72	63	掖52106	93	吉918	123	吉742-2
4	齐319	34	铁84	64	掖515	94	吉926	124	吉63
5	Mo17	35	黄早四	65	丹360	95	吉928	125	吉727-1
6	掖8112	36	K22	66	Bup43	96	吉933	126	吉742-1
7	龙抗11	37	C8605-2	67	吉1026	97	吉941	127	吉932
8	农大178	38	中自01	68	吉154	98	吉946	128	吉984
9	掖81162	39	武314	69	吉22	99	吉959	129	吉980
10	835	40	中451	70	吉41	100	吉967	130	吉988
11	铁7922	41	丹黄02	71	吉503	101	吉488	131	吉黄64
12	H99	42	吉1037	72	吉69	102	吉824	132	吉772
13	B73	43	H21	73	吉708	103	吉35	133	吉755-2
14	自330	44	J002	74	吉713	104	吉917	134	吉734
15	四287	45	Oh43	75	吉723	105	吉920	135	吉841
16	掖478	46	Pa91	76	吉741	106	吉850	136	吉716
17	78599	47	多16/AH	77	吉770	107	吉930	137	吉973
18	哲446	48	黄野四3	78	吉803	108	吉924	138	吉923
19	PH6WC	49	吉42	79	吉818	109	吉837	139	吉892
20	PH4CV	50	昌7-2	80	吉823	110	吉990	140	吉885
21	综31	51	四-273	81	吉832	111	吉153	141	吉919
22	7884-7矮	52	丹9046	82	吉838	112	吉729	142	吉资15
23	P138	53	丹340	83	吉845	113	吉880	143	吉996
24	丹598	54	吉853	84	吉851	114	吉711	144	吉873
25	齐318	55	新446	85	吉854	115	吉724	145	吉881
26	沈5003	56	E28	86	吉856	116	吉1015	146	吉农254
27	铁9010	57	旅九宽	87	吉872	117	吉827	147	吉1002
28	8723	58	A188	88	吉895	118	吉846	148	吉878
29	中106	59	红598	89	吉903	119	吉752-2	149	吉825
30	P135	60	掖502	90	吉909	120	吉852	150	吉867

续表 1

编号	自交系	编号	自交系	编号	自交系	编号	自交系	编号	自交系
151	吉 818/02	161	吉资 12	171	吉资 14	181	吉 884	191	吉资 4
152	吉 964	162	吉 1055	172	吉 858	182	吉 1078	192	吉 63CB
153	吉 913	163	吉 1007	173	吉 1733	183	吉 1006	193	吉 843
154	吉 900	164	吉 63-19	174	吉 871	184	吉 904	194	吉 719-2
155	吉 t9	165	吉 868	175	吉 739	185	吉 714	195	吉 1044
156	吉 876	166	吉 896	176	吉 891	186	吉 883	196	吉农 41-2
157	吉 1050	167	吉黄 61	177	吉 1062	187	吉 754	197	127(吉 t5)
158	吉 912	168	吉 905	178	吉 769	188	吉 1056	198	G1(吉 t6)
159	吉 936	169	吉 842	179	吉 983	189	吉 866	199	1914(吉 t4)
160	吉 877	170	吉 728	180	吉 914	190	吉 63Ht	200	吉黄 11

将另一批种子播种于装入蛭石的塑料钵中,并用蒸馏水将其完全浸湿,每钵种 3 株,25 °C 温室中培养,约一周种子发芽。待幼苗长至三叶一心时,每 2 d 用含有 Hoagland 营养液的 3 种胁迫溶液浇灌。为将以前的累积盐分冲洗掉,以保持各处理液浓度的恒定,溶液浇灌量为蛭石体积的 2 倍。对照处理为完全 Hoagland 营养液。培养 8 d 后,对不同胁迫处理的幼苗数量、苗情进行统计。

1.2 测定方法

1.2.1 芽、苗期调查指标及方法

芽期以萌发出的幼根达到粒长、胚芽达到粒长 1/2 为发芽标准^[7],每 2 d 对发芽种子数进行记录,直至 8 d 为止。苗期以胁迫处理 8 d 后,观察苗情表现进行统计(表 2)。

表 2 盐、碱、盐碱胁迫处理下单株苗情分类

苗情类别	受害情况
0	生长正常,无受害症状
1	生长基本正常,全株几乎无萎蔫或叶缘卷曲
2	全株 1/4 叶片萎蔫或叶缘卷曲,叶色变黄
3	全株 1/3 叶片萎蔫或叶缘卷曲,叶尖、叶缘焦枯
4	全株 1/2 叶片萎蔫或叶缘卷曲,叶枯、叶落
5	全株枯死或接近死亡

1.2.2 分析统计方法

200 份自交系 8 d 后进行耐盐碱率计算。

种子发芽率(GR)=(在特定时间的种子发芽数/种子总数)×100%

发芽指数(GI)= $1.00 \times nd_2 + 0.75 \times nd_4 + 0.50 \times nd_6 + 0.25 \times nd_8$

其中,nd₂、nd₄、nd₆、nd₈分别为第 2、4、6 和 8 天的种子发芽率。

芽期耐盐/碱/盐碱率(GTI)=(胁迫发芽指数/对照发芽指数)×100%

苗期耐盐/碱/盐碱率(STI)= $1 - \sum C_i N_i / (5 \times N_i) \times 100\%$

式中,C_i为苗情类别,N_i为每类苗情株数,N₀为检验样本总株数。

采用 Excel 2016、GraphPad Prism 7、SPSS 22 软件对数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 芽期耐盐碱性鉴定结果分析

芽、苗期耐盐碱性分析结果见表 3。芽期对照处理的发芽率最小值为 95.00%,最大值为 100.00%,平均值为 96.00%,符合正常条件下玉米的生长情况。三种胁迫处理的最大值和平均值均有所不同,盐胁迫的最大值为 89.00%,平均值为 49.00%;碱胁迫最大值为 87.00%,平均值为 31.00%;混合胁迫的最大值仅为 60.00%,平均值为 11.00%。三种胁迫处理在变异幅度(变异幅度为最大值减最小值)方面,盐胁迫变异幅度最大,达到 89.00%,碱胁迫次之,为 87.00%,混合胁迫为 60.00%,可以看出三种胁迫都对玉米的发芽率产生不同的影响。通过计算得到芽期耐盐碱率,盐、碱、混合胁迫的最大值分别为 99.00%、97.00%和 88.00%,而平均值分别为 43.00%、35.00%、32.00%,从平均值方面来看,盐胁迫下的平均耐盐碱率要略高于碱胁迫和混合胁迫。三种胁迫处理都明显对种子的萌发产生不同程度的影响,其中以混合胁迫的影响最为明显,因此,在混合盐碱的土壤上种植玉米将对产量造成极大的影响。

由表 4 可知,盐、碱、混合胁迫下高耐的材料比例分别为 14.00%、9.50%、9.50%,高感的材料比例分别为 51.50%、65.00%、65.00%。盐胁迫下不仅高耐的材料比碱和混合胁迫条件下多,并且高感的材料较其他胁迫也要少。

2.2 苗期耐盐碱性鉴定结果分析

由表 3 可知,苗期对照处理的存活苗数最小

表3 芽、苗期耐盐碱性分析

生理指标	处理	最小值	最大值	平均值	变异系数
芽期发芽率 (%)	对照	95.00	100.00	96.00	2.48
	盐胁迫	0.00	89.00	49.00	52.90
	碱胁迫	0.00	87.00	31.00	64.51
芽期耐盐碱率 (%)	盐碱胁迫	0.00	60.00	11.00	90.91
	盐胁迫	0.00	99.00	43.00	55.42
	碱胁迫	0.00	97.00	35.00	69.23
苗期存活苗数	盐碱胁迫	0.00	88.00	32.00	75.59
	对照	14.00	15.00	15.00	2.70
	盐胁迫	1.00	14.00	12.00	24.08
苗期耐盐碱率 (%)	碱胁迫	0.00	14.00	12.00	24.58
	盐碱胁迫	0.00	11.00	10.00	35.47
	盐胁迫	0.00	85.00	43.00	46.51
苗期耐盐碱率 (%)	碱胁迫	0.00	82.00	40.00	58.59
	盐碱胁迫	0.00	80.00	33.00	66.88

表4 芽期耐盐碱性材料比例 %

处理	高耐	中耐	耐	敏感	高感
盐胁迫	14.00	8.00	15.00	11.50	51.50
碱胁迫	9.50	7.00	8.00	10.50	65.00
盐碱胁迫	9.50	6.50	5.50	13.50	65.00

值14.00,最大值15.00,平均值15.00,符合正常条件下玉米的生长情况。三种胁迫处理的最小值和最大值差距非常明显,盐胁迫的最小值1.00,最大值14.00;碱胁迫的最小值0.00,最大值14.00;混合胁迫的最小值0.00,最大值11.00。苗期耐盐碱率三种胁迫的最大值分别为85.00%、82.00%、80.00%,苗期平均耐盐率、耐碱率、耐盐碱率分别

为43.00%、40.00%和33.00%,混合胁迫下的平均耐盐碱率要低于盐胁迫和碱胁迫。三种胁迫处理后的苗期耐盐碱率最大值都略低于芽期,但平均耐盐碱率要略高于芽期。

表5 苗期耐盐碱性材料比例 %

处理	高耐	中耐	耐	敏感	高感
盐胁迫	2.50	24.50	30.50	28.50	14.00
碱胁迫	2.50	22.00	27.50	23.00	25.00
盐碱胁迫	3.00	14.50	17.00	31.00	34.50

由表5可知,盐、碱、混合胁迫下高耐的材料比例分别为2.50%、2.50%、3.00%,高感的材料比例分别为14.00%、25.00%、34.50%。从高耐材料来看,三种胁迫的材料数基本相同;而从高感材料来看,盐胁迫下材料数量少于碱胁迫少于混合盐碱胁迫;苗期高耐和高感的材料数量都少于芽期,中等耐性的材料数量明显多于芽期。

2.3 芽、苗期耐盐碱性鉴定结果综合分析

芽期对盐、碱、盐碱混合胁迫高耐的自交系数分别为28、19、19份,对两种胁迫均高耐的12份,对三种胁迫均高耐的4份,在两种胁迫中表现为高耐的在第三种胁迫中表现的耐性均较好。苗期对盐、碱、盐碱混合胁迫高耐的自交系数分别为5、5、6份,对两种胁迫均高耐的1份,对三种胁迫均高耐的1份,但对两种以上胁迫表现为中耐的33份。芽期的高耐数量要多于苗期,但苗期处于中耐的自交系要明显多于芽期。通过对200份玉米自交系芽、苗期耐盐碱性鉴定分析,筛选

表6 聚类分析结果

类群	材料数量	材料名称
I	8	444、四287、哲446、A188、掖52106、吉741、吉t9、吉728
II	19	Mo17、835、铁7922、自330、掖478、PH6WC、PH4CV、综31、7884-7矮、沈5003、8723、P135、P010、中451、Pa91、昌7-2、四-273、吉63Ht、吉936
III	32	P138、丹598、丹360、吉1026、吉708、吉903、吉926、吉488、吉920、吉930、吉880、吉1015、吉752-2、吉08、吉资12、吉988、吉841、吉876、吉896、吉842、吉资14、吉858、吉1733、吉739、吉891、吉1062、吉983、吉884、吉1006、吉资4、吉1044、吉农41-2
IV	75	郑58、吉4112、齐319、掖8112、龙抗11、农大178、掖81162、H99、B73、78599、齐318、铁9010、中106、沈137、丹黄02、吉1037、H21、J002、Oh43、多16/AH、吉42、吉832、吉838、吉845、吉851、吉854、吉856、吉872、吉895、吉932、吉905、吉909、吉915、吉916、吉918、丹9046、丹340、吉853、新446、E28、旅九宽、吉928、吉933、吉941、吉946、吉959、吉967、红598、掖502、A801、中系09/02、吉914、吉904、掖515、吉873、Bup43、吉866、吉154、吉22、吉41、吉69、冲72、铁84、黄早四、K22、C8605-2、中自01、武314、吉713、吉723、127(吉t5)、吉770、吉803、吉818、吉823
V	66	黄野四3、吉503、吉三77、吉742-2、吉63、吉727-1、吉742-1、吉984、吉980、吉1055、吉1007、吉63-19、吉868、吉黄61、吉黄64、吉772、吉755-2、吉734、吉871、吉716、吉973、吉923、吉892、吉885、吉919、吉资15、吉996、吉769、吉1078、吉824、吉35、吉917、吉850、吉881、吉农254、吉1002、吉878、吉825、吉867、吉818/O2、吉964、吉913、吉900、吉714、吉883、吉754、吉1056、吉924、吉837、吉990、吉153、吉729、吉63CB、吉843、吉719-2、吉711、吉724、吉827、吉846、吉1050、吉912、G1(吉t6)、1914(吉t4)、吉黄11、吉852、吉877

出四 287、哲 446、444 等 8 份基本符合要求的材料。将芽期和苗期三种胁迫进行耐盐碱性综合聚类分析(表 6),聚类结果五个类群与上述结果比较后发现,虽然在对应类群中所包含的数量存在一些差异(实验误差、种子年份及存活率等),但是总体结果相符程度较高。

3 讨 论

本研究中选用的 200 份玉米自交系中,极少数材料的鉴定结果与一些文献报道存在差异,如彭云玲等^[18]认为 P138 是盐敏感类型,崔美燕^[19]认为是耐碱类型,而本鉴定结果为中耐盐碱;齐 319 被认为是耐盐类型和中耐碱类型^[19-21],而本鉴定结果为耐盐和碱敏感类型。

耐盐碱筛选技术体系构建的关键是筛选浓度和指标的确定。目前对技术体系的构建有大量报道^[22]。浓度筛选方面,崔美燕等指出,当 Na_2CO_3 溶液浓度大于 25 mmol/L 时,各自交系均枯萎死亡,且不能恢复^[19]。汤华等通过对各个性状的深入统计分析发现,100~120 mmol/L 的 NaCl 浓度是一个临界下限值,NaCl 浓度必须大于或等于这个值,性状才能与对照处理有显著性差异^[23]。

在耐性评价方面,大多数均采用系数评价的方法。崔美燕等通过比较发芽率等 4 项指标的盐碱伤害指数划分材料的耐盐碱性^[19]。于永涛等认为,由抗旱系数得到的抗旱指数是玉米种质资源抗性鉴定评价的良好指标^[24]。吴文荣对发芽率等 5 项指标在胁迫条件下的变化趋势研究分析,得出不同的指标应选用不同的计算公式^[25]。玉米耐盐碱性是受多基因调控的数量性状,盐碱胁迫对玉米生长发育有着严重的影响,在芽期和苗期表现最为明显。本研究通过对芽期和苗期的发芽率以及苗情进行测定,客观地评价 200 份骨干自交系耐盐碱性。200 mmol/L NaCl 在实际生境中属于中盐渍化土,且被众多研究者接受;100 mmol/L Na_2CO_3 依据在实际生境中含盐量属于中盐渍化土,同时提供高 pH 效应,且 Na^+ 浓度与 200 mmol/L NaCl 溶液相同,为耐碱机理研究提供横向比较依据;200 mmol/L NaCl+25 mmol/L Na_2CO_3 混合溶液在保证含盐量的同时,兼顾高 pH,且保证含盐量不至于过高。

4 结 论

基于芽期和苗期的耐盐碱性综合评价,200 份自交系划分为高耐、耐、中等、敏感、高感 5 个类群,筛选出 444、四 287、哲 446、A188、掖 52106、吉

741、吉 t9 和吉 728 等 8 份高耐系,芽期耐盐率为 64.17%~96.43%,耐碱率为 53.73%~89.29%,耐盐碱率为 56.00%~83.00%;苗期耐盐率为 48.57%~85.00%,耐碱率为 50.00%~82.00%,耐盐碱率为 61.00%~80.00%。

参考文献:

- [1] 刘梅先,杨劲松,李晓明,等.滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2012,28(S1):98-105.
- [2] 常国伟,孙丽芳,高天,等.苏打碱胁迫对玉米自交系苗期生长及生理特性的影响[J].东北农业科学,2019,44(1):18-21.
- [3] 曲冰冰.混合盐碱胁迫对碱地肤生长的影响及统计学分析[D].长春:东北师范大学,2007.
- [4] 赵可夫.植物抗盐机理[M].北京:中国科学技术出版社,1993:264-265.
- [5] 张磊,侯云鹏,王立春.盐碱胁迫对植物的影响及提高植物耐盐碱性的方法[J].东北农业科学,2018,43(4):11-16.
- [6] 王玉凤,薛盈文,杨克军,等.NaCl胁迫对玉米幼苗不同器官离子含量的影响[J].生态学杂志,2011,30(8):1654-1661.
- [7] 王晓雪,杨祥波,任旭东,等.植物耐盐碱基因的克隆及其在水稻中遗传转化研究进展[J].东北农业科学,2016,41(5):46-51.
- [8] 张 骏.NaCl胁迫对玉米幼苗几项生理指标的影响[J].吉林农业科学,2012,37(1):12-14.
- [9] 张春宵,杨书华,刘文国,等.脯氨酸含量与玉米耐盐碱鉴定[J].吉林农业科学,2011,36(4):12-17.
- [10] 李 乔,李 明,晏君瑶,等.玉米耐盐碱生理特性的杂种优势及遗传分析[J].玉米科学,2019,27(2):21-28,35.
- [11] 张会丽,袁 闯,许 兴,等.不同基因型玉米杂交种大喇叭口期的耐盐性[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):140-147.
- [12] 于 崧,郭潇潇,梁海芸,等.不同基因型绿豆萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J].植物生理学报,2017,53(9):1629-1639.
- [13] 杨德光,雷光宇,杨 姗,等.作物耐盐碱 QTL 定位的表型鉴定研究进展[J].分子植物育种,2018,16(5):1619-1625.
- [14] Kan Guizhen, Zhang Wei, Yang Wenming. Association mapping of soybean seed germination under salt stress[J]. Molecular Genetics and Genomics, 2015, 290(6): 2147-2162.
- [15] Zhang W J, Niu Y, Bu S H. Epistatic association mapping for alkaline and salinity tolerance traits in the soybean germination stage[J]. PLoS ONE, 2014, 9(1): e84750.
- [16] 吉林省农业科学院. DB22/T 2621-2017 玉米耐盐碱性鉴定技术规程[S]. 长春:吉林省质量技术监督局,2017.
- [17] 河南工业大学. GB/T 5520-2011 粮油检验发芽试验[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [18] 彭云玲,李伟丽,王坤泽. NaCl 胁迫对玉米耐盐系与盐敏感系萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报,2012,21(4):62-71.
- [19] 崔美燕. 玉米苗期耐碱种质资源评价及盐碱条件下部分性状遗传分析[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2009.

(下转第 50 页)

种现象可能是由于CDPK蛋白家族不同亚型的作用底物不同,调控机制不同造成的^[15]。

进一步分析LcCDPK1蛋白的特征序列,该蛋白多肽链N端起始氨基酸序列为“MGQCCSRAT”,是豆蔻酰化和棕榈酰化作用所必需的保守序列“MGXXC(S/Q)XXT”^[17]。其205~217位的Ser/Thr蛋白激酶活性位点含有交感序列“DLKPEN”^[17]。对比LcCDPK蛋白序列,发现也具有这两个保守性极高的关键序列。目前对CDPK蛋白的研究发现,其N端的豆蔻酰化和棕榈酰化与蛋白间的互作及蛋白的膜定位有关,关键酰基化位点为甘氨酸(Gly)或半胱氨酸(Cys)残基^[18]。但酰基化只是膜定位的特征之一,目前已知定位质膜的CDPK蛋白并没有其他明显的保守序列。因此,有可能许多定位质膜的亚型实际上被整合到不同的特异性调控复合物中发挥作用^[15]。对LcCDPK1与LcCDPK进行序列比对,发现其相似性仅为46.11%,其中可变区的相似性是最低的,调控区和连接区相似性次之,蛋白激酶区是保守性较高的部分。由于植物CDPK基因可能来自蛋白激酶和CaM基因的融合,因此会出现不同亚型在结构与序列组成上有较大差异的情况^[16,19]。

拟南芥、烟草、水稻、玉米和梨等植物的CDPK蛋白家族进化分析结果均聚类为4个亚族,推测LcCDPK和LcCDPK1蛋白序列相似性低的原因是两个蛋白分属不同亚族^[15]。后续可能会发现更多羊草的CDPK基因,这些基因分属哪一亚族,各亚族序列的差异与其翻译后修饰、亚细胞定位等之间的关系,这种差异对其功能的影响,不同亚型的CDPK如何响应干旱盐碱胁迫这些方面有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 李永宏. 放牧影响下羊草草原和大针茅草原植物多样性的变化[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1993, 35(11): 877-884.
- [2] 王萍, 殷立娟, 李建东. 中性盐和碱性盐对羊草幼苗胁迫的研究[J]. *草业学报*, 1994, 3(2): 37-43.
- [3] 王志锋, 张世忠. 吉林省草业经济发展优势及其途径分析[J]. *吉林农业科学*, 2003, 28(5): 38-43.

(上接第30页)

- [20] 付艳, 高树仁, 王振华. 玉米种质苗期耐盐性的评价[J]. *玉米科学*, 2009, 17(1): 36-39, 50.
- [21] 单长建. 抗逆转基因玉米苗期耐盐碱评价方法的初步建立及功能验证[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [22] 杨书华, 张春宵, 朴明鑫, 等. 大田苗期耐盐碱鉴定指标筛选及玉米自交系盐碱耐性分析[J]. *种子*, 2012, 31(1): 9-13.

- [4] 刘滨硕, 康春莉, 王鑫, 等. 羊草对盐碱胁迫的生理生化响应特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 166-173.
- [5] 郭坚, 王涛, 薛娟, 等. 松嫩沙地荒漠化现状和原因[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(5): 99-103.
- [6] 张丽, 张磊, 康乐, 等. 绒毛状烟草钙依赖蛋白激酶基因家族分析[J]. *中国烟草科学*, 2012, 33(3): 56-62.
- [7] Cheng S H, Willmann M R, Chen H C, et al. Calcium signaling through protein kinases: The Arabidopsis calcium-dependent protein kinase gene family[J]. *Plant Physiology*, 2002, 129(2): 469-485.
- [8] Harmon A C, Gribskov M, Gubrium E, et al. The CDPK superfamily of protein kinases[J]. *New Phytologist*, 2001, 151(1): 175-183.
- [9] Yusuke S, Shingo H, Junko K, et al. Over-expression of a single Ca²⁺-dependent protein kinase confers both cold and salt/drought tolerance on rice plants[J]. *The Plant Journal*, 2000, 23(3): 319-327.
- [10] Urao T, Katagiri T, Mizoguchi T, et al. Two genes that encode Ca²⁺-dependent protein kinases are induced by drought and high-salt stresses in *Arabidopsis Thaliana*[J]. *Molecular and General Genetics*, 1994, 244(4): 331-340.
- [11] Li A L, Zhu Y F, Tan X M, et al. Evolutionary and functional study of the CDPK gene family in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Plant Molecular Biology*, 2007, 66(4): 429-443.
- [12] 崔喜艳, 张继伟, 秦思余, 等. 羊草钙依赖型蛋白激酶基因生物信息学及表达特性分析[J]. *中国草地学报*, 2015, 37(3): 11-18.
- [13] 赵英, 刘晶莹, 杨梦丹, 等. 羊草14-3-3基因的克隆及序列分析[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(2): 269-274.
- [14] 云巾宴, 任春宇, 车达, 等. 气肿疽梭菌细胞毒素CctA基因的克隆及生物信息学分析[J]. *吉林农业科学*, 2015, 40(1): 82-85.
- [15] Christian D, Audrey I, Bimei H, et al. Subcellular targeting of nine calcium-dependent protein kinase isoforms from *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2003, 132(4): 1840-1848.
- [16] 麻浩, 王爽, 周亚丽. 植物中钙依赖蛋白激酶的研究进展[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(4): 565-572.
- [17] 杨洪强, 梁小娥. 高等植物中的CDPK及其生理生化功能[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2003, 34(2): 186-190.
- [18] Lu S X, Hrabak E M. An *Arabidopsis* calcium-dependent protein kinase is associated with the endoplasmic reticulum[J]. *Plant Physiology*, 2002, 128(3): 1008-1021.
- [19] 孟义淳, 曲柏宏, 王甜元, 等. 苹果梨MYB108基因的克隆与序列分析[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(2): 60-63.

(责任编辑: 刘洪霞)

- [23] 汤华, 柳晓磊, 罗秋芸. 玉米耐盐早期筛选体系的初步研究[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2007(2): 169-172, 176.
- [24] 于永涛, 刘成, 吕玲. 玉米品种耐旱性评价及相关鉴定指标的研究[J]. *作物杂志*, 2008, 25(4): 55-58.
- [25] 吴文荣. 玉米不同品种芽苗期抗旱性及指标的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.

(责任编辑: 王昱)