

钱娇娇,张丹婷,王蕊,等. 29 份小黑麦种质资源苗期耐盐性评价与筛选[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):200-209.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.026

29 份小黑麦种质资源苗期耐盐性评价与筛选

钱娇娇,张丹婷,王蕊,王彬,马巧丽,代红军,马天利

(宁夏大学农学院/宁夏优势特色作物现代分子育种重点实验室,宁夏银川 750021)

摘要:据统计,宁夏引黄灌区有近 20 万 hm^2 的盐碱地有待高效开发利用。种植耐盐碱小黑麦饲草可提高宁夏盐碱地利用效率,增加区内饲草产量,促进区内特色产业高质量可持续发展。对 29 份小黑麦种质资源进行苗期 200、300 mmol/L NaCl 的高盐梯度胁迫处理,测定胁迫处理动态过程(2、4、6、8、10、12、14、16、18 d)中的 SPAD 值、叶绿素荧光含量以及氮含量;盐胁迫 18 d 时,测定小黑麦的株高、黄叶率和鲜重等生长指标。运用主成分分析及隶属函数法分别对 9 个处理时间点和盐胁迫处理 18 d 的小黑麦种质资源进行苗期耐盐评价与筛选。结果表明,不同浓度 NaCl 胁迫处理下,不同种质资源的株高、SPAD 值、氮含量存在极显著差异($P < 0.01$)。结合 2 种分析方案的研究结果筛选出小黑麦苗期耐盐材料 1 份(49 区-JS923),筛选出敏盐性材料 4 种,分别是 92 区-JS1057、93 区-JS1058、90 区-JS1055 和 86 区-JS1050。本研究为后续在盐碱地利用小黑麦提供了候选种质资源,为深入研究小黑麦响应盐胁迫的分子机制提供了优异资源。

关键词:小黑麦;苗期;种质资源;隶属函数;耐盐性评价

中图分类号:S512.403.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0200-10

盐胁迫是一种能够对植物生长发育造成严重影响,最终降低农作物产量的非生物逆境^[1]。我国盐碱土地总面积约为 1 亿 hm^2 ,广泛分布在全国 17 个省份^[2]。宁夏引黄灌区是全国 12 个商品粮食生产基地之一,现有耕地约 14.79 万 hm^2 ,约占耕地面积的 33.54%,盐碱地给宁夏高质量农业发展带来了巨大的挑战^[3]。宁夏目前普遍采用的盐碱地改良方法包括化学改良、生物改良、农作改良、水利改良等,取得了一定的成效^[4]。然而,这些措施普遍存在周期长、效益低、不适合中重度盐碱地利用等问题^[5]。因此,如何稳定有效、低成本地改良宁夏引黄灌区中、重度盐碱地仍然是值得深入探讨的课题。其中,选择并种植适宜的耐盐碱植物,克隆并利用植物耐盐碱基因,是盐碱地改良、开发利用的最根本的可持续途径,能够实现经济效益与社会效益双赢^[6]。

小黑麦(*Triticosecale wittmack*)是由黑麦(*Secale cereale*)与小麦(*Triticum aestivum*)杂交培育而成的

一种新的异源多倍体植物^[7]。目前,小黑麦的类型主要有 2 种,一种是六倍体(AABBRR),另一种是八倍体(AABBDDRR)^[8]。其中,六倍体小黑麦是四倍体硬粒小麦(AABB)与黑麦杂种 F_1 代经染色体加倍获得的新物种,由小麦的 A、B 基因组和黑麦的 R 基因组全部染色体组成^[9];八倍体小黑麦是黑麦(RR)与普通小麦(AABBDD)杂交形成的人工组合,兼具一般小麦优良的品质与黑麦优良的抗病性^[10]。研究发现,小黑麦不仅保持了小麦的高产、籽粒多、籽粒重、优质等特征,还与黑麦具有抗旱、广泛适应性等特性相结合,并且小黑麦的蛋白、赖氨酸含量也比小麦、黑麦高,具有明显的杂种优势^[11-12]。

研究人员通过不同的盐胁迫处理条件筛选小黑麦不同生长时期的耐盐种质资源。例如,王萌等对国内外共 14 份小黑麦种质资源进行萌发期 0.9% 和苗期 1.2% 浓度的 NaCl 胁迫处理,通过对各种生理生化指标的测定筛选出萌发期和苗期较耐盐的 2 个材料,分别为甘农 4 号和冀饲 2 号^[13];谢楠等采用盐碱土培养法,通过对 32 个小黑麦种质资源在 0.3%、0.4%、0.5% 盐胁迫处理下苗期存活率以及其他生理指标的检测分析,筛选出包括冀饲 2 号在内的 5 个耐盐碱小黑麦材料^[14];李雪颖等以 25 个不同的粗饲料型小黑麦品种为材料,通过对

收稿日期:2024-06-12

基金项目:宁夏回族自治区重点研发项目(编号:2023BCF01012-02-1)。

作者简介:钱娇娇(1998—),女,宁夏固原人,硕士研究生,主要从事作物遗传育种方面的研究。E-mail:3229338819@qq.com。

通信作者:马天利,博士,讲师,主要从事植物分子生物学研究。E-mail:tianlima2018@163.com。

25 个不同品种的种子在 150 mmol/L NaCl 处理后的发芽势、萌发率和发芽指数等生理指标的比较,综合评定结果显示,冀饲 1 号的抗盐能力最强^[15]。

综上所述,目前筛选鉴定到的优异耐盐小黑麦种质资源较少,特别是高浓度 NaCl 盐胁迫下的筛选评价工作未见报道。本研究对 29 个小黑麦种质资源分别进行了 200、300 mmol/L NaCl 盐胁迫处理。检测小黑麦的株高、鲜重、叶绿素荧光含量、叶绿素相对含量(SPAD 值)、氮含量、叶黄率等生理指标,利用隶属函数法和主成分分析法对其耐盐性进行综合评价,筛选出苗期耐盐性状较好的品种,为以后在中重度盐碱地种植小黑麦提供优良的种质资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所需 29 份小黑麦种质资源详见表 1。所有种质资源来自河北省农林科学院旱作农业研究所。

表 1 供试小黑麦种质资源编号及名称

编号	种质资源名称	编号	种质资源名称
1	31 区 - JS900	16	60 区 - JS982
2	32 区 - JS901	17	67 区 - JS1002
3	37 区 - JS911	18	69 区 - JS1013
4	38 区 - JS912	19	78 区 - JS1034
5	39 区 - JS913	20	86 区 - JS1050
6	42 区 - JS916	21	88 区 - JS1052
7	46 区 - JS920	22	89 区 - JS1054
8	47 区 - JS921	23	90 区 - JS1055
9	48 区 - JS922	24	91 区 - JS1056
10	49 区 - JS923	25	92 区 - JS1057
11	52 区 - JS926	26	93 区 - JS1058
12	53 区 - JS948	27	95 区 - JS1060
13	54 区 - JS950	28	96 区 - JS1061
14	58 区 - JS969	29	99 区 - JS1066
15	59 区 - JS972		

1.2 试验方法

于 2023 年 11 月 7 日在宁夏大学农科实践基地温室(106°13'E,38°51'N)内对 29 个小黑麦种质资源进行盆栽试验。每个品种的每个处理种植 4 小盆,每盆种植颗粒饱满、大小均一的 5 粒种子,在小黑麦播种的当天,给小黑麦浇水至饱和,然后每隔 1 d 对小黑麦进行浇水,保持土壤湿润,大约播种后 4 d 小黑麦发芽,等小苗播种后 10 d,对幼苗进行盐

胁迫处理。把 29 份小黑麦种质资源分为 3 组:第 1 组为对照,浇灌 2 L 的自来水;第 2 组、第 3 组为处理组,分别浇灌浓度为 200、300 mmol/L 的 NaCl 溶液 2 L。NaCl 胁迫处理后,分 2 种方案对小黑麦各个指标进行测量,第 1 种方案是在盐胁迫后 2、4、6、8、10、12、14、16、18 d 对 29 份小黑麦的 SPAD 值、叶绿素荧光含量以及氮含量进行测定;第 2 种方案是在盐胁迫 18 d 后,测定小黑麦的株高、黄叶率、鲜重、SPAD 值、叶绿素荧光含量和氮含量等指标。

1.3 指标测定方法

1.3.1 小黑麦株高的测定 测量部位从小黑麦基部至主茎的顶端,每个处理测量 10 株小黑麦的株高,对测量的小黑麦株高进行筛选,去掉过高或者过矮的植株,选取长势均匀的 7 株植株求平均值、方差、标准差等,单位为 cm。

1.3.2 小黑麦鲜重的测定 采用称重法对小黑麦的鲜重进行称量,取小黑麦地上部分,每个处理取 5 株,以 5 株为 1 组称重,单位为 g。

1.3.3 小黑麦黄叶率的计算 黄叶率是黄叶数与总叶片的比值。叶片计数指标:对于总叶数而言,新抽出的芽 2 cm 左右即算,对于黄叶数而言有少量约 1/5 叶片的叶尖和叶缘发黄、卷曲即算^[16],在盐处理 18 d 后对小黑麦的发黄叶片进行统计,并计算黄叶率。

1.3.4 小黑麦 SPAD 值和氮含量的测定 选取顶层完全伸展的成熟叶片,用山东方科仪器有限公司提供的型号为 FK - AL04 的便携式叶绿素测定仪测量 SPAD 值和含氮量,直接读取数据即可。在盐处理后 2、4、6、8、10、12、14、16、18 d 对小黑麦的 SPAD 值和氮含量进行测定与数据统计。

1.3.5 小黑麦叶绿素荧光含量的测定 选取顶层完全舒展的成熟叶片,用北京雅欣理仪科技有限公司提供的型号为 Yaxin - 1162 的叶绿素荧光仪测量叶片叶绿素的荧光含量,直接读取数据即可。在盐处理后 2、4、6、8、10、12、14、16、18 d 对小黑麦的叶绿素荧光含量进行测定与数据统计。

1.3.6 数据处理与分析 使用 Excel 2022 对采集的数据进行初步分析,使用 SPSS 26 对数据进行统计分析、主成分分析(PCA)和隶属函数的计算,利用 Origin 2024 绘制图。

隶属函数的计算公式: $U(X) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

式中: $U(X)$ 是某评价指标的隶属函数值; X 是某指

标的测定值; X_{\min} 、 X_{\max} 分别表示所参试种质资源各项指标的最小值、最大值。

权重的计算公式:

$$W_j = P_j / \sum_{n=1}^j P_j \quad (2)$$

式中: $j=1,2,\cdots,n$; W_j 为权重; P_j 表示第 j 个主成分的贡献率。

综合评价 (D) 值计算公式为

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X) \times W_j] \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 不同浓度盐胁迫后 18 d 小黑麦种质资源苗期各指标的变异分析

由表 2 可知,除黄叶率外,29 份小黑麦材料苗期的各指标均值在浓度为 200、300 mmol/L NaCl 处理下,与对照相比均明显降低;小黑麦对照组的黄叶率比盐胁迫处理的黄叶率低。

表 2 盐胁迫下 29 份小黑麦材料测定指标结果

指标	CK				200 mmol/L NaCl				300 mmol/L NaCl			
	最小值	最大值	极差	平均值	最小值	最大值	极差	平均值	最小值	最大值	极差	平均值
株高 (cm)	13.300	28.460	15.160	18.300	11.170	20.930	9.760	15.950	12.070	22.810	10.740	16.490
SPAD 值	14.490	31.940	17.450	23.120	14.600	28.460	13.860	21.690	14.000	28.840	14.840	20.920
氮含量 (mg/g)	7.220	12.760	5.540	9.960	7.110	11.330	4.220	9.600	7.170	11.810	4.640	9.270
鲜重 (g)	0.840	2.620	1.780	1.770	0.750	2.310	1.560	1.470	0.740	2.220	1.480	1.350
黄叶率 (%)	0.000	0.420	0.420	0.120	0.030	0.396	0.366	0.130	0.029	0.350	0.029	0.180

对 29 份小黑麦种质资源进行方差分析(表 3)可得,小黑麦不同浓度(0、200、300 mmol/L) NaCl 处理下,株高、SPAD 值和氮含量存在极显著差异($P < 0.01$);不同品种之间,株高、SPAD 值、氮含量也存在极显著差异。

表 3 不同浓度盐胁迫下 29 份小黑麦材料苗期指标的方差分析

处理	氮含量	SPAD 值	株高
浓度	**	**	**
种质资源	**	**	**
浓度 × 品种	**	**	**

注: ** 表示差异达极显著水平($P < 0.01$)。

2.2 不同浓度盐胁迫 18 d 后 29 份小黑麦材料指标的比较

由表 4 可知,对 29 份小黑麦种质资源分别进行不同浓度的盐处理,不同材料间各个指标存在显著差异($P < 0.05$)。在 200 mmol/L NaCl 处理下,11 号、12 号、16 号、17 号种质资源的氮含量较高,分别为 13.33、11.66、11.14、11.14 mg/g;14 号、25 号、28 号种质资源的氮含量较低,分别为 7.38、7.11、7.44 mg/g。11 号、12 号、16 号和 17 号种质资源的 SPAD 值较高,分别为 26.38、28.45、26.82 和 26.82;14 号、25 号和 28 号种质资源的 SPAD 值较低,分别为 14.98、14.60 和 15.33。14 号、26 号、29 号种质资源的株高较高,分别为 20.93、19.09、

20.56 cm;3 号、4 号、5 号种质资源的株高较低,分别为 11.17、11.46、12.33 cm。

在 300 mmol/L NaCl 处理下,5 号、8 号、12 号种质资源的氮含量较高,分别为 11.38、11.81、11.49 mg/g;1 号、25 号、26 号种质资源的氮含量较低,分别为 7.17、7.33、7.33 mg/g。5 号、8 号和 12 号种质资源的 SPAD 值较高,分别为 27.61、28.84 和 27.95;1 号、25 号和 26 号种质资源的 SPAD 值较低,分别为 14.00、14.84 和 14.83。19 号、26 号、29 号种质资源的株高较高,分别为 20.61、20.83、22.81 cm;5 号、9 号、11 号种质资源的株高较低,分别为 12.07、12.57、13.01 cm。

对 29 份小黑麦种质资源分别进行不同浓度的盐处理,通过做散点图(图 1、图 2、图 3、图 4 和图 5)来表明它的变化趋势,可以看出,29 份小黑麦种质资源在不同盐浓度处理下各个指标表现有所不同。在不同盐浓度处理下,大概一半的小黑麦品种 CK 的氮含量比 200、300 mmol/L NaCl 处理高(图 1);大多数小黑麦品种黄叶率最高的是 300 mmol/L NaCl 处理(图 2),小部分品种是 200 mmol/L NaCl 处理或 CK;大多数小黑麦品种的鲜重是 300 mmol/L NaCl 处理最低(图 3);小黑麦的 SPAD 值与氮含量成正比,故超过半数的小黑麦品种是 CK 的 SPAD 值最高(图 4);绝大部分小黑麦品种都是 CK 的株高高于盐处理后的株高(图 5)。

表 4 不同浓度 NaCl 处理下 29 份小黑麦测定指标的结果

种质 编号	200 mmol/L NaCl			300 mmol/L NaCl		
	氮含量 (mg/g)	SPAD 值	株高 (cm)	氮含量 (mg/g)	SPAD 值	株高 (cm)
1	9.01 ± 1.33defg	20.11 ± 4.19defgh	16.41 ± 0.59gh	7.17 ± 0.61i	14.00 ± 1.35i	17.11 ± 0.73def
2	10.18 ± 1.11bcde	23.80 ± 3.50abcde	16.11 ± 0.83gh	9.58 ± 0.24bcdefgh	21.92 ± 0.74bcdefg	15.99 ± 0.82h
3	9.60 ± 0.28cdef	21.94 ± 0.88bcdef	11.17 ± 0.73o	9.68 ± 0.52bcdefgh	22.23 ± 1.63bcdef	13.02 ± 1.20ij
4	10.61 ± 0.79bcd	24.10 ± 4.02abcde	11.46 ± 1.03no	10.73 ± 1.84abcd	25.55 ± 5.82abcd	13.11 ± 0.91ij
5	10.47 ± 0.25bcd	24.95 ± 0.60abcd	12.33 ± 0.31mn	11.38 ± 1.23ab	27.61 ± 3.86ab	12.07 ± 0.99jk
6	9.35 ± 1.57cdef	21.18 ± 4.93bcdefg	13.09 ± 0.82m	8.82 ± 0.78defghi	19.52 ± 2.46defghi	13.59 ± 0.49ij
7	10.08 ± 1.27bcde	23.49 ± 3.99abcde	14.91 ± 0.97hi	9.98 ± 0.71abcdefg	23.17 ± 2.24abcdef	17.70 ± 0.64def
8	10.14 ± 1.07bcde	23.68 ± 3.38abcde	13.63 ± 0.99jk	11.81 ± 1.48a	28.84 ± 4.70a	13.80 ± 0.59i
9	9.89 ± 1.24bcde	22.89 ± 3.90abcde	12.79 ± 0.92mn	9.94 ± 0.57abcdefg	23.04 ± 1.81abcdef	12.57 ± 0.56jk
10	10.59 ± 0.53bcd	25.09 ± 1.68abcd	15.17 ± 0.52hi	11.17 ± 0.91abc	26.91 ± 2.88abc	16.23 ± 1.20gh
11	13.33 ± 1.09a	26.38 ± 3.85abc	12.56 ± 0.89mn	8.83 ± 0.16defghi	19.55 ± 0.51defghi	13.01 ± 1.27ij
12	11.66 ± 0.92b	28.45 ± 2.88a	13.47 ± 1.18kl	11.49 ± 0.75ab	27.95 ± 2.33ab	15.23 ± 0.73h
13	9.79 ± 0.76bcde	22.58 ± 2.41abcde	15.54 ± 0.79hi	8.84 ± 1.44defghi	19.60 ± 4.56defghi	16.29 ± 1.03gh
14	7.38 ± 0.68gh	14.98 ± 2.13h	20.93 ± 0.87a	8.88 ± 0.70defghi	19.71 ± 2.20defghi	19.53 ± 1.76b
15	9.38 ± 1.25cdef	21.27 ± 3.94bcdefg	17.96 ± 1.12de	8.34 ± 1.79efghi	18.03 ± 5.64efghi	18.06 ± 1.41cd
16	11.14 ± 1.57bc	26.82 ± 4.94ab	17.86 ± 0.91de	10.20 ± 2.33abcde	23.86 ± 7.35abcdef	16.90 ± 1.23fg
17	11.14 ± 0.99bc	26.82 ± 3.09b	19.64 ± 1.01b	10.45 ± 0.85abcde	24.49 ± 2.43abcde	18.24 ± 0.45cde
18	10.51 ± 1.12bcd	24.88 ± 3.54abcd	18.80 ± 1.24cd	10.13 ± 0.94abcdef	23.65 ± 2.98abcdef	18.23 ± 0.99cd
19	9.13 ± 0.64defg	20.49 ± 2.01cdefgh	18.66 ± 0.77cd	9.98 ± 0.85abcdefg	23.17 ± 2.69abcdef	20.61 ± 0.91b
20	8.98 ± 1.13defg	20.03 ± 3.55defgh	14.79 ± 0.74ij	7.60 ± 1.27hi	15.68 ± 3.99ghi	17.17 ± 0.45fg
21	7.74 ± 0.61fgh	16.13 ± 1.92fgh	16.41 ± 0.77fg	8.24 ± 0.53fghi	17.70 ± 1.65fghi	17.70 ± 0.98ef
22	9.93 ± 0.38bcde	23.01 ± 1.22abcde	18.64 ± 1.00cd	9.47 ± 0.76bcdefgh	21.57 ± 2.39bcdefg	17.06 ± 0.74f
23	8.87 ± 0.32defgh	19.69 ± 1.01defgh	12.55 ± 0.63m	8.59 ± 0.71efghi	18.80 ± 2.23efghi	13.59 ± 0.71ij
24	9.44 ± 1.13cdef	21.47 ± 3.57bcdef	17.01 ± 0.88ef	9.20 ± 0.36cdefghi	20.74 ± 1.14cdefgh	16.00 ± 1.37fg
25	7.11 ± 0.24h	14.60 ± 1.58h	16.80 ± 0.70fg	7.33 ± 1.40i	14.84 ± 4.40hi	18.34 ± 0.47c
26	7.85 ± 0.80fgh	16.47 ± 2.49fgh	19.09 ± 0.94bc	7.33 ± 0.50i	14.83 ± 1.58hi	20.83 ± 1.34b
27	8.50 ± 1.08efgh	17.99 ± 3.30efgh	18.53 ± 1.10cd	7.63 ± 0.59hi	15.77 ± 1.87ghi	17.68 ± 0.43ef
28	7.44 ± 0.62gh	15.33 ± 1.73gh	15.77 ± 0.85ghi	7.87 ± 0.63ghi	16.23 ± 2.13ghi	15.63 ± 0.80h
29	9.09 ± 0.86defg	20.38 ± 2.73cdefgh	20.56 ± 0.93b	8.23 ± 1.71fghi	17.65 ± 5.40fghi	22.81 ± 0.81a

注:同列数据后不同小写字母表示同一处理下不同材料间差异达显著水平($P < 0.05$)。

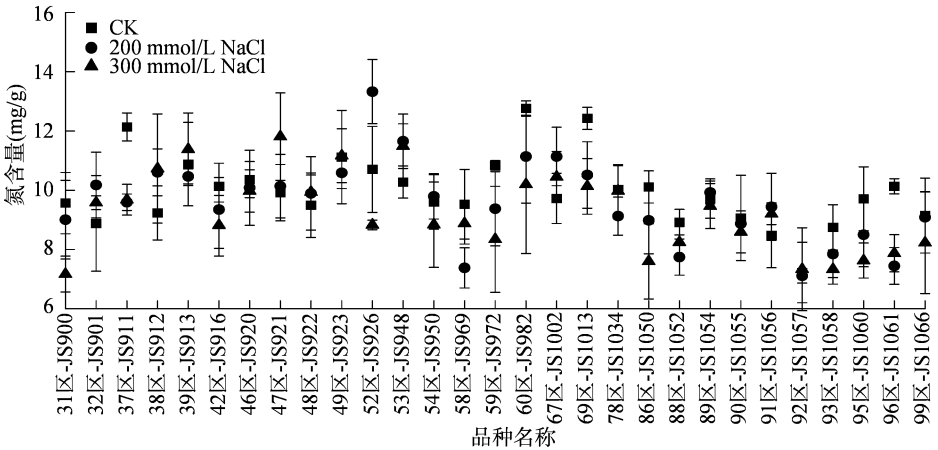


图1 29 份小黑麦种质资源在不同浓度盐处理下氮含量的变化

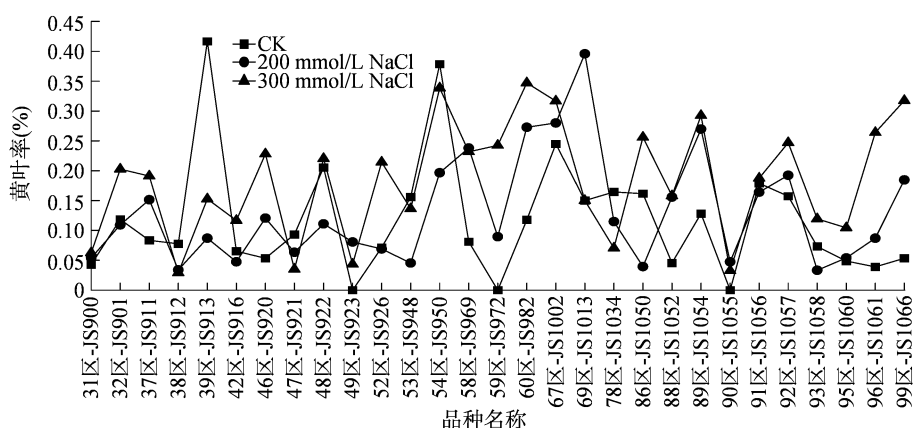


图2 29份小黑麦种质资源在不同浓度盐处理下黄叶率的变化

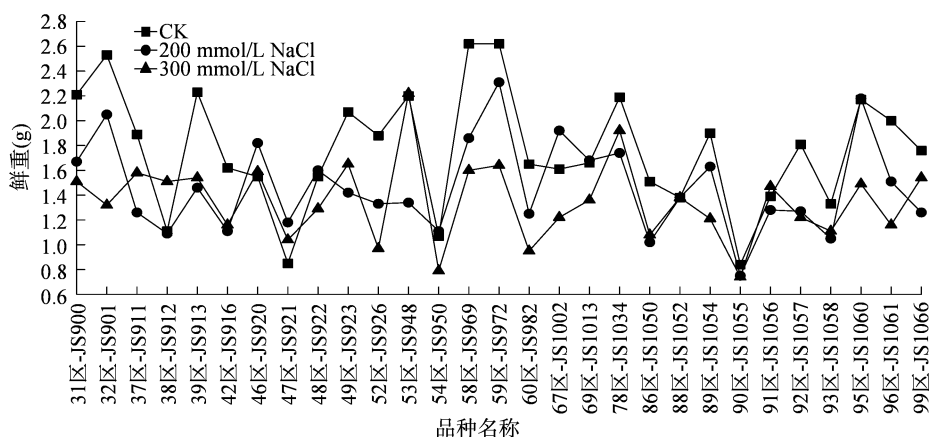


图3 29份小黑麦种质资源在不同浓度盐处理下鲜重的变化

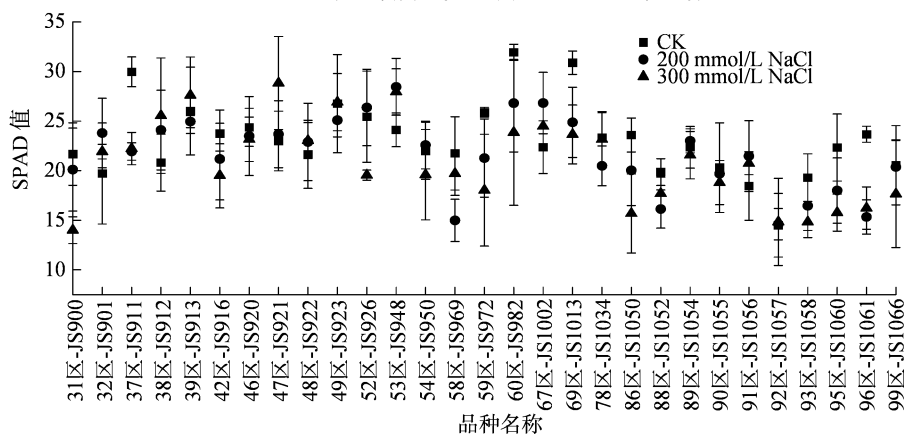


图4 29份小黑麦种质资源在不同浓度盐处理下 SPAD 值的变化

2.3 盐胁迫 18 d 后不同小黑麦材料苗期耐盐性的综合评价

2.3.1 不同浓度下小黑麦苗期各指标主成分特征值及特征向量分析 PCA 分析可以对数据进行降维处理,从而有效去除冗余信息带来的负面影响。近几年来,在农作物种植和育种中,采用主成分分析的综合评判法已成为研究的热点^[17]。对 29 份小黑麦种质资源不同浓度 NaCl 处理的 5 个指标性状进行主成分分析,具体结果见表 5。300 mmol/L

NaCl 处理结果显示:特征值大于 1 的主成分有 2 个,累计贡献率达到了 73.320%,即保留了原始指标 73.320%的信息;第 1 主成分的特征值是 2.462,贡献率是 49.244%,SPAD 值和氮含量是其对应特征向量中绝对值较大的指标;第 2 主成分的特征值是 1.204,贡献率是 24.076%,株高和鲜重是其对应特征向量中绝对值较大的指标。200 mmol/L NaCl 处理结果显示:特征值大于 1 的主成分有 2 个,累计贡献率达到了 78.237%,即保留了原始指标 78.237%

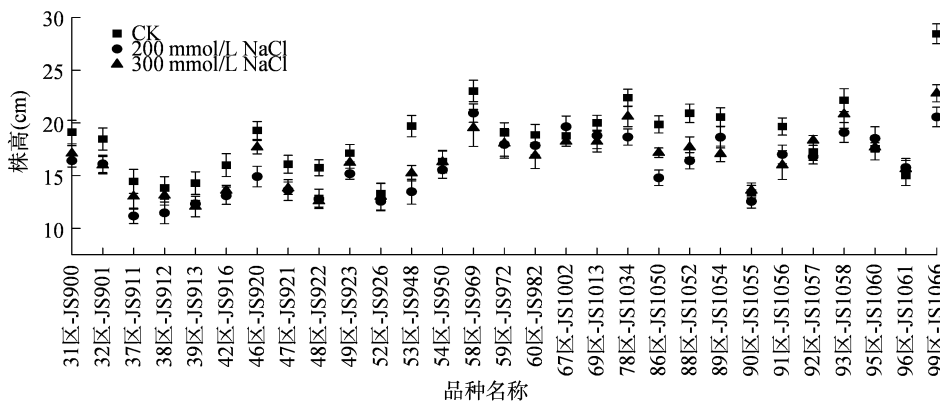


图5 29 份小黑麦种质资源在不同浓度盐处理下株高的变化

的信息;第 1 主成分的特征值是 2. 214, 贡献率是 44. 281%, SPAD 值和氮含量是其对应特征向量中绝对值较大的指标;第 2 主成分的特征值是 1. 698, 贡献率是 33. 957%, 黄叶率和鲜重是其对应特征向量中绝对值较大的指标。

表 5 不同浓度 NaCl 处理下小黑麦种质资源各指标的主成分分析结果

指标	载荷			
	200 mmol/L NaCl 处理		300 mmol/L NaCl 处理	
	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
株高	-0. 736	0. 549	-0. 570	0. 682
黄叶率	-0. 272	0. 754	-0. 440	-0. 108
鲜重	-0. 321	0. 623	0. 380	0. 853
SPAD 值	0. 852	0. 495	0. 948	0. 010
氮含量	0. 877	0. 441	0. 949	0. 008
特征值	2. 214	1. 698	2. 462	1. 204
贡献率(%)	44. 281	33. 957	49. 244	24. 076
累计贡献率(%)	44. 281	78. 237	49. 244	73. 320

2. 3. 2 小黑麦种质苗期耐盐性评价主成分值、隶属函数值与综合评价 *D* 值分析 采用隶属函数法对经过降维的综合指标进行综合评价,根据公式(1)计算出各主成分的隶属函数,根据公式(2)计算出权重,根据公式(3)计算出小黑麦品种的 *D* 值,具体数据见表 6。对不同浓度盐处理后 18 d 的 *D* 值进行排序,统计盐胁迫 18 d 后 *D* 值排名前十的种质资源作为候选的耐盐种质资源,*D* 值排名最后 10 名的种质资源作为盐敏感种质资源。根据以上分析方法,200 mmol/L NaCl 处理下耐盐的种质资源编号分别是 11、17、12、16、18、5、10、2、22、7,盐敏感型的种质资源编号为 25、26、28、14、21、27、23、20、1、29; 300 mmol/L NaCl 处理耐盐的种质资源编号分别为 12、10、5、19、4、8、7、18、3、9,盐敏感型的种质资源编号为 27、29、1、11、23、28、26、13、25、20。进一步分

表 6 不同浓度 NaCl 处理下各小黑麦品种隶属函数值综合评价

种质编号	200 mmol/L NaCl				300 mmol/L NaCl			
	隶属函数值		<i>D</i> 值	排名	隶属函数值		<i>D</i> 值	排名
	U ₁	U ₂			U ₁	U ₂		
1	0. 429	0. 353	0. 396	21	0. 146	0. 588	0. 292	22
2	0. 551	0. 627	0. 584	8	0. 491	0. 402	0. 462	13
3	0. 663	0. 285	0. 500	15	0. 627	0. 391	0. 549	9
4	0. 826	0. 200	0. 557	11	0. 884	0. 400	0. 724	5
5	0. 763	0. 387	0. 601	6	0. 958	0. 335	0. 752	3
6	0. 621	0. 153	0. 420	19	0. 448	0. 208	0. 369	17
7	0. 588	0. 541	0. 568	10	0. 539	0. 633	0. 570	7
8	0. 708	0. 288	0. 527	13	0. 978	0. 184	0. 716	6
9	0. 642	0. 396	0. 537	12	0. 625	0. 205	0. 487	10
10	0. 702	0. 458	0. 597	7	0. 890	0. 636	0. 806	2
11	1. 000	0. 500	0. 785	1	0. 383	0. 053	0. 274	23
12	0. 918	0. 462	0. 722	3	1. 000	0. 872	0. 958	1
13	0. 572	0. 446	0. 518	14	0. 207	0. 097	0. 171	27
14	0. 031	0. 541	0. 250	26	0. 304	0. 729	0. 444	14
15	0. 369	0. 633	0. 482	16	0. 250	0. 670	0. 389	15
16	0. 663	0. 779	0. 713	4	0. 441	0. 218	0. 367	18
17	0. 551	1. 000	0. 744	2	0. 500	0. 442	0. 481	11
18	0. 472	0. 990	0. 695	5	0. 562	0. 555	0. 560	8
19	0. 359	0. 518	0. 428	18	0. 598	1. 000	0. 730	4
20	0. 534	0. 130	0. 361	22	0. 059	0. 315	0. 144	29
21	0. 245	0. 270	0. 256	25	0. 252	0. 530	0. 344	19
22	0. 436	0. 761	0. 575	9	0. 379	0. 377	0. 379	16
23	0. 582	0. 054	0. 355	23	0. 247	0. 302	0. 265	24
24	0. 476	0. 453	0. 466	17	0. 456	0. 487	0. 466	12
25	0. 154	0. 239	0. 191	29	0. 009	0. 453	0. 155	28
26	0. 255	0. 130	0. 202	28	0. 068	0. 414	0. 182	26
27	0. 239	0. 473	0. 340	24	0. 193	0. 599	0. 327	20
28	0. 232	0. 172	0. 207	27	0. 144	0. 277	0. 188	25
29	0. 325	0. 534	0. 415	20	0. 053	0. 845	0. 314	21
权重	0. 57	0. 43			0. 67	0. 33		

析显示,200 mmol/L NaCl 处理和 300 mmol/L NaCl 处理同时出现的耐盐种质编号有 12、18、5、10、7;在

2 种浓度 NaCl 处理同时出现的盐敏感种质资源编号有 1、20、23、27、26、25、29。

2.4 盐胁迫动态过程中不同小黑麦材料苗期耐盐性的综合评价

2.4.1 不同浓度下小黑麦苗期各指标主成分特征值及特征向量分析 对 29 份小黑麦种质资源进行不同浓度的盐胁迫,在盐胁迫后 2、4、6、8、10、12、14、16、18 d 对小黑麦的 SPAD 值、叶绿素荧光含量、氮含量进行测定,并对其进行主成分分析。由表 7 可知,200 mmol/L NaCl 处理下,各时间点筛选出 1 个主成分,即特征值大于 1 的主成分只有 1 个,其对应的累计贡献率分别为 68.359%、66.700%、68.140%、63.767%、66.526%、66.345%、66.029%、70.820% 和 67.426%,这 9 个时间点中特

征向量正向绝对值较大的指标是 SPAD 值和氮含量。由表 8 可知,300 mmol/L NaCl 处理下,盐胁迫后 2、4、6、8、10、14、16、18 d 各筛选出 1 个主成分,即特征值大于 1 的主成分只有 1 个,其对应的累计贡献率分别为 63.505%、47.027%、70.595%、66.294%、67.227%、67.327%、73.007%、69.751%,而盐胁迫后 12 d 筛选出 2 个主成分,即特征值大于 1 的主成分有 2 个,其对应的累计贡献率为 66.321% 和 99.568%;盐胁迫后 2、4、6、8、10、14、16、18 d 这 8 d 中特征向量中正向绝对值较大的指标是 SPAD 值和氮含量,而盐胁迫后 12 d,第 1 主成分对应的特征向量中正向绝对值较大的指标是 SPAD 值和氮含量,第 2 主成分对应的特征向量中正向绝对值较大的指标是叶绿素荧光含量。

表 7 200mmol/L NaCl 处理不同小黑麦种质资源各指标不同时间点主成分分析结果

指标	主成分 F_1 载荷								
	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d	16 d	18 d
叶绿素荧光含量	-0.332	0.08	0.449	0.089	-0.023	-0.384	-0.474	0.46	-0.308
SPAD 值	0.986	0.999	0.959	0.976	0.999	0.958	0.94	0.978	0.983
氮含量	0.984	0.998	0.961	0.976	0.999	0.962	0.935	0.978	0.981
特征值	2.051	2.001	2.044	1.913	1.996	1.990	1.981	2.125	2.023
贡献率(%)	68.359	66.700	68.140	63.767	66.526	66.345	66.029	70.820	67.426
累计贡献率(%)	68.359	66.700	68.140	63.767	66.526	66.345	66.029	70.820	67.426

表 8 300 mmol/L NaCl 处理不同小黑麦种质资源各指标的主成分分析结果

指标	主成分载荷									
	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d		14 d	16 d	18 d
	F_1	F_1	F_1	F_1	F_1	F_1	F_2	F_1	F_1	F_1
叶绿素荧光含量	0.035	-0.408	-0.455	0.054	-0.266	0.017	1	-0.495	0.565	0.405
SPAD 值	0.976	0.836	0.977	0.997	0.989	0.997	0.003	0.928	0.964	0.982
氮含量	0.976	0.739	0.978	0.996	0.984	0.997	-0.020	0.956	0.971	0.982
特征值	1.905	1.411	2.118	1.989	2.017	1.99	1	2.02	2.19	2.093
贡献率(%)	63.505	47.027	70.595	66.294	67.227	66.321	33.337	67.327	73.007	69.751
累计贡献率(%)	63.505	47.027	70.595	66.294	67.227	66.321	99.568	67.327	73.007	69.751

2.4.2 29 份小黑麦种质苗期 D 值及排名分析 采用隶属函数法对经过降维的综合指标进行综合评价,根据公式(3)计算出小黑麦种质资源的 D 值,对不同浓度的盐处理后 2、4、6、8、10、12、14、16、18 d 的 D 值分别进行排序,分析每个胁迫处理时间点 D 值排名前十和最后 10 名的种质资源,统计全部胁迫处理时间点 D 值排名前十出现次数最多的种质资源作为候选耐盐种质资源, D 值排名后十出现次数最多的种质资源作为候选盐敏感种质资源。由表 9 可知,在 200 mmol/L NaCl 处理下耐盐的种质资源编号有 10、8、16、9、17、4、11、19、29、32,盐敏感型的

种质资源编号有 21、1、14、25、15、26、23、6、24、29;在 300 mmol/L NaCl 处理下(表 10)耐盐的种质资源编号有 18、4、9、12、5、17、8、16、10、19,盐敏感型的种质资源编号有 27、22、20、24、25、21、11、13、23、26。进一步分析显示,在 200 mmol/L NaCl 和 300 mmol/L NaCl 同时出现的耐盐种质编号有 4、9、17、8、16、10、19;在 2 种浓度 NaCl 处理下同时出现的盐敏感种质编号有 21、25、26、23、24、20。

2.5 2 套方案共同筛选到的耐盐和盐敏感的品种

本研究对 29 份小黑麦种质资源进行苗期 200、300 mmol/L NaCl 浓度的盐胁迫处理,制定出 2 套方

表 9 200 mmol/L NaCl 处理下的 29 份小黑麦的动态 *D* 值及排名

种质 编号	2 d		4 d		6 d		8 d		10 d		12 d		14 d		16 d		18 d	
	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序
1	0.526	15	0.287	24	0.545	21	0.037	29	0.304	21	0.525	11	0.210	24	0.633	12	0.359	21
2	0.311	21	0.416	13	0.655	15	0.155	23	0.410	9	0.508	13	0.395	7	0.929	2	0.580	9
3	0.830	4	0.434	10	0.520	22	0.219	15	0.218	26	0.384	16	0.487	2	0.585	15	0.469	15
4	0.330	20	0.420	12	0.989	2	0.136	26	0.434	5	0.579	9	0.447	4	0.669	11	0.619	6
5	0.271	24	0.422	11	0.625	16	0.178	19	0.427	6	0.299	21	0.361	14	0.507	18	0.616	8
6	0.389	19	0.283	25	0.488	23	0.298	5	0.226	25	0.047	28	0.240	22	0.789	7	0.419	18
7	0.898	1	0.416	14	0.573	20	0.227	12	0.363	12	0.636	6	0.286	21	0.569	16	0.541	11
8	0.850	3	0.491	5	0.999	1	0.220	14	0.372	10	0.699	2	0.498	1	0.838	4	0.569	10
9	0.615	10	0.487	6	0.599	18	0.274	8	0.469	2	0.690	3	0.296	20	0.823	5	0.539	12
10	0.858	2	0.364	20	0.914	3	0.312	4	0.370	11	0.672	5	0.478	3	0.732	9	0.634	5
11	0.542	14	0.369	18	0.830	6	0.339	2	0.425	7	0.130	26	0.373	11	0.790	6	0.850	1
12	0.458	16	0.468	8	0.656	14	0.215	16	0.332	16	0.833	1	0.383	8	0.841	3	0.833	2
13	0.631	8	0.434	9	0.708	11	0.155	24	0.328	18	0.188	25	0.440	5	0.439	22	0.497	14
14	0.101	28	0.259	29	0.450	25	1.000	1	0.115	28	0.241	23	0.158	25	0.162	29	0.079	28
15	0.179	26	0.281	27	0.747	10	0.265	9	0.287	22	0.034	29	0.368	13	0.327	26	0.426	17
16	0.773	5	0.522	4	0.890	4	0.292	6	0.477	1	0.590	8	0.359	15	0.481	20	0.742	3
17	0.615	11	0.564	1	0.857	5	0.290	7	0.440	4	0.266	22	0.334	16	0.708	10	0.690	4
18	0.581	12	0.480	7	0.754	9	0.221	13	0.411	8	0.344	19	0.401	6	0.967	1	0.618	7
19	0.678	6	0.365	19	0.768	8	0.177	20	0.340	14	0.674	4	0.376	9	0.498	19	0.391	19
20	0.126	27	0.387	17	0.574	19	0.130	27	0.337	15	0.546	10	0.370	12	0.769	8	0.350	22
21	0.001	29	0.396	16	0.413	27	0.178	18	0.254	24	0.062	27	0.153	28	0.424	23	0.164	26
22	0.625	9	0.529	3	0.698	12	0.336	3	0.465	3	0.629	7	0.216	23	0.592	13	0.529	13
23	0.273	22	0.273	28	0.235	28	0.236	11	0.282	23	0.217	24	0.157	26	0.356	24	0.348	23
24	0.188	25	0.323	22	0.486	24	0.162	22	0.328	17	0.348	17	0.315	17	0.589	14	0.437	16
25	0.402	18	0.306	23	0.018	29	0.128	28	0.077	29	0.344	18	0.066	29	0.350	25	0.079	29
26	0.272	23	0.282	26	0.450	26	0.170	21	0.217	27	0.310	20	0.156	27	0.454	21	0.170	25
27	0.444	17	0.414	15	0.608	17	0.257	10	0.343	13	0.519	12	0.303	19	0.295	28	0.258	24
28	0.547	13	0.361	21	0.693	13	0.149	25	0.326	19	0.475	14	0.305	18	0.510	17	0.101	27
29	0.647	7	0.559	2	0.815	7	0.202	17	0.324	20	0.394	15	0.374	10	0.309	27	0.375	20

案对小黑麦各个指标进行分析,旨在能得到耐盐和敏感型的小黑麦种质资源。第 1 套方案是在小黑麦盐胁迫处理后 18 d,测定小黑麦的株高、黄叶率、鲜重、氮含量、SPAD 值,对所测指标进行主成分分析以及隶属函数法分析,得出综合评价 *D* 值,筛选出耐盐型的小黑麦种质资源编号为 12、18、5、10、7;敏感型的小黑麦种质资源编号为 1、20、23、27、26、25、29。第 2 套方案是一个动态过程,在小黑麦进行盐胁迫处理的 2、4、6、8、10、12、14、16、18 d 这 9 个时间段,测定小黑麦的氮含量、SPAD 值以及叶绿素荧光含量,对所测指标进行主成分分析以及隶属函数法分析,得出综合评价 *D* 值,筛选出耐盐型的小黑麦种质资源编号为 4、9、17、8、16、10、19;敏感型的小黑麦种质资源编号为 21、25、26、23、24、20。结合

2 套方案共有的耐盐型和敏感型小黑麦种质资源筛选出耐盐型小黑麦种质资源编号为 10 (49 区 - JS923);敏感型小黑麦种质资源编号为 20、23、26、25,即为 92 区 - JS1057、93 区 - JS1058、90 区 - JS1055、86 区 - JS1050。

3 讨论

在全球范围内,土壤盐渍化已经成为资源和生态方面的难题,不仅对生态问题造成了严重的影响,对农业生产也造成了巨大的挑战^[4]。小黑麦是粮、料、草兼具的谷类作物,具有高产、抗逆性强等特点^[18],目前,国内外对小黑麦的研究主要集中在小黑麦生产性能、混播比例、种植密度、氮肥施用量、抗寒抗旱性能等方面^[19]。我国盐碱地面积巨

表 10 300 mmol/L NaCl 处理下的 29 份小黑麦的动态 *D* 值及排名

种质 编号	2 d		4 d		6 d		8 d		10 d		12 d		14 d		16 d		18 d	
	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序	<i>D</i> 值	排序
1	0.159	29	0.495	11	0.444	26	0.198	16	0.216	28	0.367	19	0.251	14	0.781	2	0.000	29
2	0.308	28	0.464	15	0.454	25	0.142	24	0.356	16	0.492	12	0.299	12	0.329	22	0.459	13
3	0.491	20	0.856	2	0.631	15	0.219	10	0.425	10	0.526	11	0.342	8	0.360	20	0.462	12
4	0.952	2	1.000	1	0.873	3	0.256	6	0.581	3	0.740	4	0.385	5	0.413	16	0.655	5
5	0.835	5	0.445	17	0.848	7	0.179	20	0.391	13	0.546	9	0.379	6	0.768	4	0.765	3
6	0.558	13	0.417	22	0.590	18	0.179	19	0.324	20	0.687	5	0.473	1	0.412	17	0.314	17
7	0.483	22	0.338	28	0.368	29	0.221	9	0.365	15	0.407	16	0.182	20	0.657	6	0.492	11
8	0.618	9	0.634	4	0.867	5	0.217	11	0.674	2	1.000	1	0.202	18	0.781	3	0.839	1
9	0.946	3	0.472	13	0.869	4	0.269	5	0.449	8	0.447	14	0.358	7	0.520	11	0.500	10
10	0.576	12	0.483	12	0.740	9	0.306	2	0.533	6	0.746	3	0.442	2	0.789	1	0.729	4
11	0.530	16	0.431	19	0.588	19	0.133	25	0.315	21	0.154	27	0.176	22	0.288	24	0.285	18
12	0.844	4	0.550	7	0.883	2	0.204	13	0.553	4	0.819	2	0.411	4	0.619	7	0.787	2
13	0.578	11	0.395	25	0.582	20	0.000	29	0.197	29	0.078	28	0.246	15	0.332	21	0.212	22
14	0.605	10	0.513	10	0.775	8	0.063	28	0.327	19	0.036	29	0.177	21	0.382	19	0.333	16
15	0.472	23	0.380	26	0.562	21	0.210	12	0.470	7	0.457	13	0.182	19	0.489	13	0.192	23
16	0.497	19	0.532	8	0.887	1	0.310	1	0.431	9	0.646	6	0.341	9	0.671	5	0.571	6
17	0.751	6	0.557	6	0.666	12	0.300	4	0.411	11	0.554	8	0.326	11	0.581	10	0.537	7
18	0.999	1	0.592	5	0.851	6	0.127	26	0.552	5	0.611	7	0.433	3	0.513	12	0.500	9
19	0.525	18	0.440	18	0.734	10	0.300	3	0.401	12	0.544	10	0.333	10	0.593	9	0.535	8
20	0.419	25	0.843	3	0.421	28	0.065	27	0.287	26	0.331	22	0.217	17	0.176	26	0.058	27
21	0.683	8	0.530	9	0.591	17	0.192	18	0.295	24	0.178	26	0.050	28	0.119	28	0.238	20
22	0.399	26	0.428	20	0.494	24	0.177	21	0.344	17	0.404	17	0.139	25	0.417	15	0.419	14
23	0.557	14	0.366	27	0.435	27	0.234	8	0.296	23	0.396	18	0.044	29	0.243	25	0.283	19
24	0.450	24	0.424	21	0.515	23	0.204	14	0.257	27	0.306	24	0.126	26	0.596	8	0.401	15
25	0.490	21	0.406	23	0.683	11	0.193	17	0.329	18	0.359	21	0.147	24	0.301	23	0.076	26
26	0.527	17	0.305	29	0.613	16	0.166	23	0.883	1	0.271	25	0.148	23	0.172	27	0.049	28
27	0.366	27	0.399	24	0.555	22	0.171	22	0.291	25	0.364	20	0.241	16	0.000	29	0.116	25
28	0.538	15	0.464	14	0.661	13	0.198	15	0.372	14	0.426	15	0.113	27	0.386	18	0.123	24
29	0.694	7	0.458	16	0.633	14	0.244	7	0.301	22	0.314	23	0.298	13	0.425	14	0.218	21

大、分布广泛,目前仍有约 1/5 的盐渍化耕地存在,且由于人为因素和环境因素的双重作用造成土壤盐渍化和次生盐渍化现象不断增加^[20]。潘香逾等对 14 种绿肥植物的种子开展萌发期耐盐鉴定,结果表明,小黑麦能够耐受 100 ~ 200 mmol/L 浓度的 NaCl 胁迫^[21]。彭泽等对 100 多份小麦及其远缘杂交后代苗期进行耐盐性综合评价,在黑麦、小黑麦以及黑麦与燕麦(*Avena sativa*)杂交后代中,小黑麦材料的耐盐性最强^[22]。故要因地制宜,筛选出耐盐的作物品种,小黑麦是一个不错的选择,作为饲料作物,减少了与粮食作物用地的矛盾。

植物苗期耐盐碱能力是决定其是否能够在盐碱土上建植的重要因子,而幼苗对盐胁迫的反应最为直接^[23-24]。盐胁迫可使植物光合作用中心受损、电子转移受阻、叶绿素分解加快、光合速率下降、营

养物质吸收减少,严重影响植物生长^[25-28]。有研究表明,盐胁迫下植物的光合作用强度会显著下降^[29],叶绿素是植物吸收光能进行光合作用的色素之一^[30],SPAD 叶绿素测试仪能通过对比叶片上的光密度差来获得 SPAD 值,进而实现对叶片中叶绿素含量的直接测量^[31]。本试验也有类似的规律(图 4),在 300、200 mmol/L NaCl 处理下的小黑麦品种的 SPAD 值较对照组而言有明显下降趋势。叶片氮含量与叶绿素含量密切相关^[32],本试验也有类似的规律,在 300、200 mmol/L NaCl 处理下的小黑麦品种的氮含量与叶绿素含量趋势一致,较对照组而言有明显下降趋势。株高是影响饲草产量的重要指标^[33]。孟晨等对不同品种小黑麦的幼苗进行不同浓度的盐胁迫处理,7 d 后对小黑麦的株高进行了测定,结果表明,在一定程度上,低浓度的盐分能够

提高小黑麦的株高,在中高盐浓度处理下小黑麦幼苗株高明显受到抑制^[34]。本试验中 29 份小黑麦品种在 300、200 mmol/L NaCl 处理下株高存在明显差异。下一步将利用筛选出来的耐盐种质资源开展田间试验,分析农艺性状和产量性状,为在盐碱地推广种植小黑麦奠定重要基础。同时,也可以利用耐盐和盐敏感的种质资源作为亲本深入研究小黑麦响应盐胁迫的分子机制。

4 结论

本试验对 29 份不同种质资源的小黑麦进行不同浓度的盐处理,并采取 2 种方案对株高、SPAD 值、氮含量、叶绿素荧光含量、黄叶率、鲜重等指标进行主成分分析、隶属函数分析和综合评价。综合 2 种方案下 300、200 mmol/L NaCl 处理的 29 份小黑麦种质资源各个指标的隶属函数值、主成分分析以及 *D* 值排名,筛选出耐盐种质 1 份(49 区-JS923)、敏盐种质 4 份(92 区-JS1057、93 区-JS1058、90 区-JS1055、86 区-JS1050)。本研究为以后在中重度盐碱地种植小黑麦提供了优良的种质资源。

参考文献:

- [1] 王亚新,冯乃杰,赵黎明,等. 植物生长调节剂与氮肥对盐胁迫下水稻幼苗生理特性的影响[J]. 核农学报,2024,38(3):561-573.
- [2] 胡远艺,谭炎宁,刘小林,等. 中国耐盐碱水稻产业化发展面临的问题与建议[J]. 杂交水稻,2023,38(5):1-5.
- [3] 刘涛. 宁夏引黄灌区盐碱荒地水肥盐与植物根系调控技术研究[D]. 北京:北京林业大学,2020.
- [4] 马永辉,刘娟. 宁夏引黄灌区盐碱地治理措施研究进展[J]. 农业与技术,2023,43(16):56-59.
- [5] 王小锋,杨松. 盐碱地改良措施概述[J]. 施工技术,2020,49(增刊1):220-222.
- [6] 邓超宏. 小黑麦芽期和苗期耐盐材料筛选及转录组分析[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [7] 孙元枢. 中国小黑麦遗传育种研究与应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2002.
- [8] 王贝麟,陈麒帆,门文强,等. 六倍体小黑麦株高分离的染色体构成分析[J]. 河南农业大学学报,2021,55(4):631-638.
- [9] 张红. 引进 CIMMYT 小黑麦的鉴定及其遗传多样性分析[D]. 泰安:山东农业大学,2005.
- [10] 毛浩田,陈梦莹,吴楠,等. 干旱胁迫对不同倍性小麦和八倍体小黑麦苗期光合能力与抗氧化系统的影响[J]. 麦类作物学报,2018,38(10):1246-1254.
- [11] 王萌,任丽彤,凌悦铭,等. 小黑麦 *TwNAC01* 基因功能分析[J]. 分子植物育种,2020,18(16):5221-5229.
- [12] 郭莹,杨芳萍. 六倍体小黑麦饲用特性及应用前景[J]. 草业科学,2018,35(3):635-644.
- [13] 王萌,鲁雪莉,王菊英,等. 小黑麦种质萌发期苗期耐盐资源评价与筛选[J]. 草业学报,2024,33(5):58-68.
- [14] 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.
- [15] 李雪颖,高志昊,兰剑,等. NaCl 胁迫下 25 份饲用型小黑麦种子的萌发特性及耐盐性评价[J]. 草原与草坪,2023,43(4):65-71.
- [16] 徐泽,芮秋治,刘震宇,等. 缩节胺运筹对夏直播棉熟相的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2024,45(1):33-40.
- [17] 王斌,李满有,王欣盼,等. 深松浅旋对半干旱区退化紫花苜蓿人工草地改良效果研究[J]. 草业学报,2022,31(1):107-117.
- [18] 褚红丽,田新会,杜文华. 不同小黑麦种质在甘肃中部地区的农艺性状比较[J]. 草原与草坪,2024,44(1):106-112.
- [19] 张舒芸. 小黑麦和黑麦的抗旱性与抗寒性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2018.
- [20] 陆宝金,田生昌,左忠,等. 盐渍化土地可持续利用研究综述及展望[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),2023,44(1):79-88.
- [21] 潘香逾,李瑜婷,刘立军,等. 盐胁迫下 14 种绿肥植物种子萌发特性及耐盐性评价[J]. 草原与草坪,2019,39(3):98-105.
- [22] 彭泽,杨春苗,耿广东,等. 小麦及远缘杂交后代苗期耐盐性综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2020,21(3):597-604.
- [23] 张译尹,李雪颖,王斌,等. 盐胁迫对不同种质小黑麦幼苗水分利用效率和渗透调节的影响[J]. 草业学报,2024,33(4):87-98.
- [24] 余桂红,张鹏,马鸿翔,等. 长江中下游麦区 100 个小麦品种发芽期耐盐性的鉴定与评价[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):87-90.
- [25] 彭笑洁,崔玉莹,王浩,等. 外源褪黑素对盐胁迫下萝卜幼苗生长的影响[J]. 中国瓜菜,2024(5):157-162.
- [26] 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.
- [27] 卢艳. 不同苹果砧穗组合耐盐性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [28] 崔兴国. 盐碱胁迫对不同品种饲用小黑麦种子萌发的影响[J]. 现代农村科技,2015(20):54-55.
- [29] 齐琪,马书荣,徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J]. 分子植物育种,2020,18(8):2741-2746.
- [30] 龙文飞,傅志强,钟娟,等. 节水灌溉条件下氮密互作对双季晚稻丰源优 299 物质生产特性的影响[J]. 华北农学报,2017,32(2):185-193.
- [31] 张金恒,王珂,王人潮. 叶绿素计 SPAD-502 在水稻氮素营养诊断中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(2):177-180.
- [32] 贾朋,钱磊,罗树凯,等. 洋紫荆叶绿素含量的分布特征及与叶片氮含量的关系[J]. 中国城市林业,2019,17(6):13-17.
- [33] 马霞,王斌,王腾飞,等. 宁夏盐碱地饲用小黑麦品种(系)生产性能及营养品质综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(9):19-29.
- [34] 孟晨,鲁雪莉,王菊英,等. 不同类型盐胁迫对小黑麦种子萌发的影响[J]. 草业学报,2023,32(12):171-180.