

大麦苗期抗旱性鉴定及评价

汪军成^{1,2}, 孟亚雄^{1,2}, 徐先良^{1,2}, 王晋^{1,2}, 赖勇^{1,2},
李葆春³, 马小乐², 王化俊^{1,2}

(1. 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室/甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃兰州 730070;
2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070; 3. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 为了了解 20 份大麦 (*Hordeum vulgare* L.) 种质材料抗旱性差异, 采用温室模拟干旱胁迫-复水法, 对其苗期的相对含水量、相对电导率、叶绿素含量、丙二醛含量、超氧化物歧化酶和株高等 8 个抗旱指标进行测定, 利用相关分析、聚类分析研究了各项指标与种质材料抗旱性关系, 综合评价其抗旱性。结果显示: 叶片相对含水量与株高呈显著正相关, 其余各指标间没有显著的相关性; 以采用欧式距离法综合分析结果为依据, 可将 20 份种质材料划分为 3 个抗旱等级, 相对抗旱包括陇麦 1 号、新引 D5、Z126V004W、新引 D9、PREJTGE、SCARLETT、Z02751407、韭崎 12 号、Z127U016V、MAURITIA, 中等抗旱包括 J13-80、新引 D7、PASADENA、NCF-TIPPLE、甘啤 6 号, 相对敏感包括黑引瑞、Z200V017W、新啤 12 号、BEATRIX、Z204V021W。

关键词: 大麦; 苗期; 抗旱; 鉴定

中图分类号: S512.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)04-0135-09

Identification and assessment on drought-resistance of *Hordeum vulgare* L. at seedling stage

WANG Jun-cheng^{1,2}, MENG Ya-xiong^{1,2}, XU Xian-liang^{1,2}, WANG Jin^{1,2}, LAI Yong^{1,2},
LI Bao-chun³, MA Xiao-le², WANG Hua-jun^{1,2}

(1. Gansu Provincial Key Lab of Crop Improvement & Germplasm Enhancement/Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
3. College of Life Sciences and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: With the method of drought stress and water recovery simulated in greenhouse, 8 drought resistant indicators, including leaf relative water content (RWC), relative electrical conductivity (REC), chlorophyll content (Chl), malondialdehyde content (MDA), soluble sugar content (SSC), free proline accumulation (Pro), superoxide dismutase activity (SOD) and plant height (PH) were measured for 20 germplasms of *Hordeum vulgare* L., and the relationship between these indicators and drought resistance was determined by correlation analysis and cluster analysis, so as to evaluate the drought resistance of different germplasms. The results showed that the RWC was significantly and positively correlated with the plant height, and the tested germplasms of *Hordeum vulgare* L. could be classified into three groups: in the high drought-resistance group, there were Longmai 1, Xinyin D5, Z126V004W, Xinyin D9, PREJTGE, SCARLETT, Z02751407, Jiuqi 12, Z127U016V and MAURITIA; in the medium drought-resistance group, there were J13-80, Xinyin D7, PASADENA, NCF-TIPPLE and Ganpi 6; and in the low drought-resistance group, there were Heiyinrui, Z200V017W, Xinpi 12, BEATRIX and Z204V021W.

Keywords: *Hordeum vulgare* L.; seedling stage; drought resistance; identification

干旱是限制植物生长的主要逆境因子之一^[1]。旱地区, 占国土面积的 1/2^[2]。大麦 (*Hordeum vulgare* L.) 是一种主要的粮食和饲料作物, 也是酿造

收稿日期: 2012-09-03

基金项目: 国家支撑计划项目(2007BAD52B08); 国家自然科学基金项目(30771331); 大麦青稞产业技术体系岗位(CARS-XX)

作者简介: 汪军成(1988—), 男, 甘肃甘谷人, 在读硕士, 主要从事大麦育种研究。E-mail: wang1988022020@163.com。共同第一作者

孟亚雄(1977—), 男, 甘肃会宁人, 博士, 副教授, 主要从事大麦、小麦育种研究。E-mail: yxmeng@163.com。

通讯作者: 王化俊(1963—), 男, 甘肃会宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事小麦和大麦分子标记辅助育种研究。E-mail: whujun@yahoo.com。

啤酒的主要原料。在世界谷类作物中,大麦的种植总面积和总产量仅次于小麦、水稻、玉米,居第四位,也是中国古老粮种之一,已有几千年的种植历史。因其耐寒、耐瘠、抗旱,在盐碱、旱坡、丘陵以及干旱半干旱地区被当作抗旱作物栽培^[3]。目前,国内对大麦的植物学特性及利用^[3]、生产性能评价^[4]、耐盐碱特性评价^[5]、种质资源多样性^[6]等方面进行了研究,但关于不同种质材料间苗期抗旱性比较和评价的研究较少。本研究采用温室模拟干旱胁迫-复水法,测定了 20 份大麦种质材料苗期生理生化等指标的变化,比较了不同材料间抗旱性差异,以期筛选出抗旱性较强的种质材料,为小麦抗旱新品种选育及早地资源的开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料由甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室提供,共 20 份,详见表 1。

表 1 种质材料

Table 1 Materials of *Hordeum vulgare* L.

代号 Code	种质材料 Materials	代号 Code	种质材料 Materials
DM1	甘啤 6 号 Ganpi 6	DM11	PREJTGE
DM2	PASADENA	DM12	新引 D5 Xinyin D5
DM3	MAURITIA	DM13	新引 D7 Xinyin D7
DM4	BEATRIX	DM14	SCARLETT
DM5	NCF - TIPPLE	DM15	Z200V017W
DM6	陇麦 1 号 Longmai 1	DM16	新引 D9 Xinyin D9
DM7	Z126V004W	DM17	Z02751407
DM8	Z204V021W	DM18	韭崎 12 号 Jiuqi 12
DM9	J13 - 80	DM19	新啤 12 号 Xinyin 12
DM10	黑引瑞 Heiyinrui	DM20	Z127U016V

1.2 试验设计

试验于 2012 年 4—6 月在甘肃农业大学日光温室内进行。土壤由过筛大田土(干土)、草炭、牛粪按 6:1:1 体积混合均匀,装入塑料花盆(口径 28 cm,底径 20 cm,高 18 cm)内,每盆装 6.5 kg。将温水浸种后发芽良好一致的种子均匀点播于花盆中,每盆 25 粒,3 次重复,从播种之日起至采样前期间,土壤水分充足(土壤含水量为 $39.15\% \pm 1.21\%$),确保幼苗正常生长以及试验处理的一致性。待长到 4~5 片叶将水浇透(土壤含水量为 $51.32\% \pm 1.08\%$),进行干旱胁迫处理。分别于停水当天(CK)和干旱胁迫 7、14、21、28 d(土壤含水量降至 $7.26\% \pm 1.14\%$)及复水后 7 d 上午 8:00 时采样(叶片),测定生理生化指标,3 次重复。28 d 时测定株高,5 次重复。复水

后水分恢复到土壤正常含水量 $39.28\% \pm 0.97\%$,每天测定土壤含水量的动态变化,补充水分,以保持复水后土壤含水量恒定。

1.3 指标测定

土壤含水量采用烘干称重法测定^[7]。相对含水量(RWC)采用饱和称重法测定^[7]。相对电导率(REC)采用电导率法测定^[7]。叶绿素(Chl)含量采用丙酮法测定^[8]。可溶性糖(SSC)采用硫酸-蒽酮显色法测定^[7]。丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸法测定^[7]。游离脯氨酸(Pro)采用茚三酮法测定^[7]。超氧化物歧化酶(SOD)采用 NBT 光还原法测定^[7],以可抑制 NBT 光还原反应 50% 的酶量作为 1 个 SOD 活性单位(U),变化率 = $|(I_{28} - I_{CK})/I_{CK}|$, I_{28} 为各材料指标第 28 天测定值, I_{CK} 为各材料指标对照(CK)测定值。株高为地上部分高度,用钢卷尺测量(精度 0.1 cm)。

1.4 数据处理

实验数据采用 SPSS16.0 统计软件进行方差分析和相关性分析,以干旱胁迫到 28 d 时各项指标的测定值进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对叶片相对含水量(RWC)的影响

叶片相对含水量是衡量叶片保水力的一个常用指标。由表 2 可见,叶片相对含水量随着干旱胁迫时间的延长呈逐渐下降趋势。各种质材料 RWC 下降幅度差异显著。当胁迫到第 28 天时,以 DM6、DM12、DM16 的 RWC 下降趋势相对平缓,变化率在 23.50%~27.99% 之间,表现出保水力较强的特性。DM4、DM10、DM20 下降幅度最大,变化率在 45.42%~46.31% 之间,表现出保水力较弱的特性。复水 7 d 后,各种质材料的 RWC 均有不同程度恢复,但均不能恢复到胁迫前的水平。其中以 DM6、DM9、DM14、DM17 恢复最好,接近胁迫前水平;DM13、DM15 恢复最差。

2.2 干旱胁迫对叶片相对电导率(REC)的影响

相对电导率能够表示细胞膜透性的大小,可反映细胞膜在逆境下的受损程度^[9]。结果表明(表 3),随着干旱胁迫的持续加重,各材料叶片相对电导率逐渐上升,细胞膜透性增大,且存在显著性差异。当持续胁迫到第 28 天时,REC 上升幅度最大的是 DM4,变化率为 214.0%,干旱胁迫对其细胞膜的透性影响最大,抗旱性最弱。DM16、DM18 和 DM20 上升幅度最小,变化率在 64.46%~97.42% 之间,干旱胁迫对其细胞膜的透性影响不大,抗旱性较强。其

余各材料 REC 的变化率均在 102.88% ~ 180.92% 之间。复水 7 d 后,各材料的 REC 虽有不同程度的下降,但均未恢复到胁迫前的水平。其中 DM5、DM11、DM17、DM20 恢复最好,DM4 恢复最差。

表 2 干旱胁迫下大麦种质材料相对含水量的变化/%

Table 2 The RWC in leaves of different germplasms of *Hordeum vulgare* L. under drought stress

种质材料 Materials	干旱胁迫天数 Days of drought stress					复水 Rewatering	变化率 Variation rate
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
DM1	89.93h	86.19f	81.89gh	60.03j	56.16g	86.07ef	37.55
DM2	95.84a	94.05ab	87.49cd	84.00c	58.17ef	86.11de	39.31
DM3	93.03cde	90.44de	85.10e	69.43i	58.01ef	86.11de	37.64
DM4	93.44cd	90.00de	83.21fg	69.43i	50.17j	85.01fg	46.31
DM5	92.38def	91.32cd	83.51ef	79.49e	59.29e	87.33de	35.82
DM6	92.07defg	89.46e	88.95bc	75.42f	70.43a	91.17ab	23.50
DM7	91.40efgh	90.23de	86.89d	86.11a	62.08d	90.15b	32.08
DM8	90.39fg	90.01de	86.66d	85.16bc	63.05cd	88.23c	30.25
DM9	91.91defg	87.32f	81.62h	72.04g	53.10h	88.09c	42.23
DM10	94.18bc	92.77bc	84.92e	79.22e	51.40ij	92.43a	45.42
DM11	89.81h	89.11e	84.68ef	71.44gh	53.14h	84.20fg	40.83
DM12	91.00fgh	86.20f	81.33h	79.26e	69.45a	84.09g	23.68
DM13	95.47ab	94.05ab	78.37i	72.29g	62.31d	86.14de	34.73
DM14	91.76defg	87.02f	83.79ef	58.42k	58.42ef	90.12b	36.33
DM15	92.91cde	90.17de	87.11d	82.15d	51.22ij	73.45h	44.87
DM16	90.70fgh	87.40f	83.51ef	79.46e	65.31b	88.36c	27.99
DM17	91.95defg	89.25e	85.17e	70.42hi	58.46ef	90.28b	36.42
DM18	94.25bc	92.02c	90.32b	76.10f	57.31fg	85.34ef	39.19
DM19	94.07bc	90.15de	89.93b	69.37i	64.07bc	83.10g	31.89
DM20	96.69a	95.11a	93.55a	70.07hi	52.04hi	88.08cd	46.18

注:不同小写字母间差异显著($P < 0.05$),下表同。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level, the same in following tables.

表 3 干旱胁迫下大麦种质材料相对电导率的变化/%

Table 3 The REC in leaves of different germplasms of *Hordeum vulgare* L. under drought stress

种质材料 Materials	干旱胁迫天数 Days of drought stress					复水 Rewatering	变化率 Variation rate
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
DM1	11.13cd	13.05hi	17.88d	19.81f	24.59g	18.80f	120.95
DM2	13.58ab	23.27b	26.74bc	29.39a	31.01cd	27.27a	128.41
DM3	10.29defgh	16.30cde	18.47d	24.12c	28.15f	24.23b	173.69
DM4	10.47cdefg	22.24bc	25.18c	28.31ab	32.88b	22.09c	214.10
DM5	14.46a	22.90bc	28.18a	29.53a	39.60a	17.35g	173.83
DM6	9.41efgh	16.69c	18.03d	21.64e	25.48g	21.11cde	170.67
DM7	14.74a	24.89a	26.22c	27.21b	32.26bc	21.93cd	118.92
DM8	10.75cdef	15.97cde	18.12d	22.23de	28.41ef	16.44g	164.28
DM9	10.82cde	16.46c	25.30c	27.01b	29.86de	25.01b	176.03
DM10	8.86gh	14.40fg	16.32e	17.65hi	20.70ij	15.89gh	133.63
DM11	9.06fgh	16.59cd	18.05d	19.41fg	20.41ij	13.78i	125.30
DM12	9.47defgh	10.08i	16.28e	19.70fg	24.85g	24.85b	162.47
DM13	10.85cde	14.09gh	16.15e	23.49cd	30.48d	20.48def	180.92
DM14	10.73cdef	16.36cd	18.68d	19.19fgh	25.03g	20.02ef	133.22
DM15	8.61h	10.86hi	15.66e	17.61hi	20.95hi	19.97ef	143.36
DM16	10.16defgh	12.07hi	15.03ef	17.93i	19.19j	15.75gh	88.88
DM17	12.09bc	13.23gh	15.12e	17.59hi	24.52g	14.52hi	102.88
DM18	10.87cde	11.45hi	13.56f	18.08ghi	21.46hi	16.02gh	97.42
DM19	10.19defgh	15.91def	18.89d	21.68e	27.67f	16.28g	171.54
DM20	13.57ab	14.81fg	15.91e	19.32fg	22.32h	17.33g	64.46

2.3 干旱胁迫对叶片叶绿素(Chl)含量的影响

叶绿素是光合作用中最有效的色素,其含量在一定程度上能反映植物的同化能力及生长状况^[10]。由表 4 可见,随着干旱时间延长,供试材料的叶绿素含量随之降低,各材料间差异显著。当持续胁迫到第 28 天时,DM7、DM11、DM12 的 Chl 含量最高,分别是 26.95、25.44、25.95 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化率较小,在

27.18% ~ 49.91% 之间,抗旱性较强。DM01、DM04、DM08 的 Chl 含量最低,分别是 12.09、15.74、13.03 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化率较大,在 59.54% ~ 74.19% 之间,抗旱性较弱。复水 7 d 后,各材料的 Chl 含量均没有恢复到胁迫前的水平。其中 DM11、DM14 恢复最好,DM19 恢复最差。

表 4 干旱胁迫下大麦种质材料叶绿素含量的变化/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$

Table 4 The Chl content in leaves of different germplasms of *Hordeum vulgare* L. under drought stress

种质材料 Materials	干旱胁迫天数 Days of drought stress					复水 Rewatering	变化率/% Variation rate
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
DM1	49.98e	33.32i	19.54k	18.15j	12.90i	25.09j	74.19
DM2	56.22c	37.48ef	30.29f	29.82cd	18.25hi	33.30d	67.54
DM3	50.48de	33.65hi	25.42i	25.57g	18.83gh	31.42e	62.70
DM4	39.17ij	26.11k	21.70j	21.81i	15.74ij	31.41e	59.82
DM5	40.43i	35.21ghi	28.06gh	26.58fg	20.03fg	30.36ef	50.46
DM6	58.77b	52.12a	40.21a	27.04fg	23.78d	26.87hi	59.54
DM7	37.01k	24.67k	32.85e	29.70cd	26.95a	26.06ij	27.18
DM8	36.60k	34.40hi	32.52e	15.82l	13.03ij	29.23fg	64.40
DM9	37.43k	36.95f	36.71c	29.05de	20.74ef	29.91ef	44.59
DM10	36.91k	34.60ghi	30.03f	26.05g	24.76cd	27.88gh	32.92
DM11	38.59jk	36.06fg	34.43d	32.24ab	25.44b	33.93d	34.08
DM12	51.81d	34.54ghi	31.77e	30.96bc	25.95b	43.12a	49.91
DM13	44.08gh	29.38j	29.28gf	27.16fg	21.21e	34.62cd	51.88
DM14	43.36h	38.91ef	36.41c	28.08ef	23.41d	37.49cdb	46.01
DM15	45.74f	40.49d	28.20gh	25.87g	20.87ef	36.01c	54.37
DM16	40.16i	36.77f	27.66h	23.89h	21.56e	27.24hi	46.31
DM17	69.42a	46.28b	38.32b	33.32a	25.40c	37.61b	63.35
DM18	49.87e	42.50c	36.12c	23.12hi	21.71d	34.25d	56.47
DM19	69.48a	46.32b	32.85e	29.81cd	20.77ef	26.02ij	70.11
DM20	45.35fg	36.90f	24.38i	22.69hi	18.47hi	30.05ef	59.27

2.4 干旱胁迫对叶片可溶性糖(SSC)含量的影响

可溶性糖是很多非盐生植物的主要渗透调节物质,对细胞膜有稳定作用^[9]。由表 5 可见,随着干旱胁迫时间的延长,各材料的叶片 SSC 逐渐升高,材料间存在显著差异。当干旱胁迫到 28 天时,DM3、DM18 的 SSC 含量最低,分别是 20.82 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、27.02 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化较平缓,变化率分别为 138.49%、176.61%。DM4、DM8 的 SSC 含量最高,分别是 43.78 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 47.71 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化较大,变化率分别为 248.01%、265.31%。复水 7 d 后,各种质材料的 SSC 含量有不同程度的恢复,但均未恢复到胁迫前的水平。其中 DM3、DM16 恢复最好,DM8、DM10

恢复最差。

2.5 干旱胁迫对叶片丙二醛(MDA)含量的影响

细胞膜脂质过氧化产物 MDA 含量,是反映植物逆境伤害的主要指标^[10],由表 6 可见,丙二醛含量随着干旱胁迫的加剧呈上升趋势,各材料间差异显著。当干旱胁迫到第 28 天时,DM6、DM14、DM17 的 MDA 含量上升最小,变化率分别为 118.86%、93.48%、55.68%;上升最大的是 DM3、DM9、DM13,变化率分别是 213.78%、270.17%、307.93%。复水 7 d 后,各种质材料的 MDA 含量有不同程度恢复,但均没有恢复到胁迫前的水平。其中 DM12、DM17、DM20 恢复最好,DM1、DM9 恢复最差。

表5 干旱胁迫下大麦种质材料可溶性糖含量的变化/(mg·g⁻¹)Table 5 The SSC in leaves of different germplasms of *Hordeum vulgare* L. under drought stress

种质材料 Materials	干旱胁迫天数 Days of drought stress					复水 Rewatering	变化率/% Variation rate
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
DM1	10.09efgh	13.78de	17.95efg	20.25i	29.84h	15.25ef	195.74
DM2	9.54fgh	10.34g	25.16b	25.29ef	28.64hi	16.19e	200.21
DM3	8.73h	13.77de	18.16ef	18.43j	20.82k	11.52j	138.49
DM4	12.58ab	17.26b	17.18fg	25.92ef	43.78b	19.84cd	248.01
DM5	10.45defg	15.05c	22.86e	25.60ef	38.87e	25.61a	271.96
DM6	12.44ab	18.96a	27.46a	30.66b	32.77g	24.35ab	163.42
DM7	11.36bcde	12.04f	16.37g	20.61i	33.16g	18.51d	191.90
DM8	13.06a	13.40def	22.63c	39.08a	47.71a	25.54a	265.31
DM9	11.19bcdef	14.39c	18.18ef	28.80c	35.24g	15.07ef	214.92
DM10	5.39I	6.40h	11.62i	28.49c	41.65c	25.92a	672.73
DM11	12.12abc	12.40ef	22.66c	27.66cd	32.20g	14.79ef	165.68
DM12	12.20abc	12.42ef	13.99h	26.41de	32.95g	14.06f	170.08
DM13	11.76abcd	14.60c	19.19de	27.60cd	36.98f	15.87e	214.46
DM14	6.86i	19.02a	20.28d	24.65fg	39.51d	20.50c	475.95
DM15	9.85efgh	10.31g	17.83efg	22.13gh	32.07h	19.85cd	225.58
DM16	9.86efgh	10.30g	11.78i	15.17k	28.31ij	12.16j	187.12
DM17	6.36i	9.84g	19.19de	23.56fg	27.02j	14.80ef	324.84
DM18	9.49gh	14.54c	24.47b	24.49fg	26.25j	14.20f	176.61
DM19	12.59ab	18.68ab	19.27de	21.82hi	40.45cd	22.95b	221.29
DM20	10.60cdefg	17.76ab	17.99efg	24.40fg	33.20g	18.41d	213.21

表6 干旱胁迫下大麦种质材料丙二醛含量的变化/(mg·g⁻¹)Table 6 The MDA content in leaves of different germplasms of *Hordeum vulgare* L. under drought stress

种质材料 Materials	干旱胁迫天数 Days of drought stress					复水 Rewatering	变化率/% Variation rate
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
DM1	8.19ab	11.89a	14.37a	18.55a	22.97c	18.50	180.46
DM2	5.32defgh	8.69bcde	11.42bc	12.84cd	18.48de	13.23fg	247.37
DM3	4.21gh	5.40hij	6.46i	7.77i	13.21hig	12.25fgh	213.78
DM4	5.45defgh	7.52defg	10.40bcde	11.97de	12.45j	11.31hi	128.44
DM5	8.33ab	9.98b	11.88b	15.00b	22.45c	20.36b	169.51
DM6	7.21bc	7.25efgh	10.01cdef	13.69bc	15.78fgh	16.33d	118.86
DM7	4.98fgh	5.01j	6.40i	10.04fgh	16.16fg	15.26de	224.50
DM8	5.26efgh	5.09ij	7.76hi	12.46cd	15.29ghi	13.88ef	190.68
DM9	8.08ab	9.27bc	9.86cdef	10.05fgh	29.91a	22.51a	270.17
DM10	7.01bcd	8.74bcde	10.06cdef	11.60def	17.01ef	10.07i	142.65
DM11	5.97cdef	6.43fghi	11.70b	15.16b	21.51c	16.49d	260.30
DM12	5.65cdefgh	5.82ghij	8.12gh	10.03fgh	12.71ij	8.26j	124.96
DM13	6.68bcde	6.96fghi	7.86hi	11.87de	27.25a	13.25fg	307.93
DM14	8.89a	8.95bed	9.98cdef	10.74efgh	17.20ef	12.54fgh	93.48
DM15	5.57cdefgh	7.10efgh	9.05efgh	11.34defg	14.38hig	10.19i	158.17
DM16	6.72bcde	7.65cdefg	9.61defg	18.80a	18.92d	12.08ghi	181.55
DM17	8.98a	8.68bcde	8.61fgh	9.91fgh	13.98hij	10.32i	55.68
DM18	6.96bcde	7.32defgh	10.98bcd	13.00cd	16.08fg	10.71i	131.03
DM19	4.05h	6.03ghij	8.38fgh	9.28gh	12.12j	7.69j	199.26
DM20	5.89cdefg	8.21cdef	9.07efgh	9.12hi	10.28k	8.24j	74.53

2.6 干旱胁迫对叶片脯氨酸(Pro)含量的影响

脯氨酸(Pro)作为渗透调节重要物质之一,在植物的抗旱生理中发挥着重要作用,植物体内脯氨酸合成、累积和代谢与植物的供水条件有关^[11]。由表 7 可知,Pro 含量随着干旱胁迫延长和程度的加重而呈剧烈升高的趋势,各材料间存在显著差异。当干旱胁迫持续到第 28 天时,Pro 含量最低的是 DM6、DM10、DM12、DM16、DM20,分别为 506.36、507.17、

590.01、623.02 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;含量最高的是 DM9、DM14,分别是 1 303.28、1 344.06 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。变化率最小的是 DM6、DM12、DM16,分别是 3193.30%、3369.84%、1762.34%,变化率最大的是 DM2、DM13、DM19,分别是 7909.50%、8119.84%、8440.21%。复水 7 d 后,各种质材料的 Pro 含量均有不同程度的恢复,其中 DM6、DM12、DM17 恢复最好,DM1、DM19 恢复最差,但均没有恢复到胁迫前的水平。

表 7 干旱胁迫下 20 份大麦种质材料脯氨酸含量的变化/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$

Table 7 The Pro content in leaves of different germplasms of *Hordeum vulgare* L. under drought stress

种质材料 Materials	干旱胁迫天数 Days of drought stress					复水 Rewatering	变化率/% Variation rate
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
DM1	15.36ef	28.01fg	62.22g	204.22j	1193.41d	337.45a	7669.60
DM2	13.16gh	18.39j	32.28k	258.38j	1054.05e	193.05h	7909.50
DM3	12.42hi	21.18i	40.33j	655.20c	921.38g	379.24a	7318.52
DM4	17.98cd	15.98j	28.10l	593.21de	1122.41e	280.18c	6142.55
DM5	17.71cd	32.30e	50.03e	777.39b	1272.21c	178.26i	7083.57
DM6	14.50fg	41.38b	87.02b	329.30hi	506.36l	148.37l	3193.30
DM7	16.15e	25.24h	54.13hi	205.29j	975.43f	241.29d	5939.81
DM8	12.99gh	44.13a	62.36a	294.25i	641.26h	203.31g	4836.56
DM9	20.12b	36.48c	71.11c	272.14i	1303.28b	152.31k	6377.53
DM10	11.36ij	29.15f	62.04fg	161.08k	507.17l	219.45f	4363.02
DM11	13.20gh	13.46k	29.23m	717.19b	906.01h	150.27k	6763.71
DM12	11.24ij	13.80k	27.50m	136.15l	590.01j	150.10l	3369.84
DM13	15.27ef	20.23j	39.48j	361.41h	1255.17c	231.10a	8119.84
DM14	16.80de	21.43hi	31.04j	937.34a	1344.06a	229.17ef	7662.26
DM15	18.73bc	29.70f	38.37f	665.32c	1101.19e	129.38n	5779.28
DM16	27.88a	40.15b	65.17b	395.48h	519.22k	158.16j	1762.34
DM17	17.91cd	34.19d	59.17d	628.26d	1014.48e	142.02m	5564.32
DM18	14.25fg	26.48g	38.02h	488.15f	1185.13d	123.56o	4707.93
DM19	12.16hi	12.45k	33.07m	427.44fg	1038.49e	299.03b	8440.21
DM20	10.01j	24.48h	57.15i	498.35e	623.02i	269.13cd	6123.98

2.7 干旱胁迫对叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

植物细胞内的保护酶系统主要有超氧化物歧化酶和过氧化物酶等。酶活性越高,消除自由基及活性氧的能力越强,植物的抗逆性也越强^[12]。从表 8 可以看出,SOD 随着干旱胁迫时间的延长呈上升趋势,各材料间存在显著差异。当干旱胁迫到第 28 天时,DM9、DM16、DM17、DM18 的 SOD 含量分别为 480.61、210.53、373.77、390.72 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,上升较平缓,变化率分别是 139.45%、74.76%、106.91%、93.63%,表明其抗旱性较强。DM4、DM19 的 SOD 含量是 422.1、393.88 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,上升比较剧烈,变化率分别是 216.58%、248.96%,表明其抗旱性较弱。复

水 7 d 后,各材料的 SOD 含量均有不同程度的恢复,但均未恢复到胁迫前的水平。其中 DM6、DM16、DM18 恢复最好,DM1、DM2、DM10 恢复最差。

2.8 干旱胁迫对株高的影响

植物在干旱条件下会发生相应的形态变化,其中株高变化最直观^[13]。随着干旱胁迫时间的延长,各材料生长速度减慢,说明干旱胁迫时间越长,程度越重,抑制作用越显著。当干旱胁迫持续到第 28 天时,各材料的株高与正常浇水的对照相比较,明显降低,且各材料间的降低程度差异显著,其中 DM6、DM12、DM16、DM18、DM20 的株高降低幅度较小,抗旱性能较强。DM1、DM9、DM13、DM19 的株高降低幅度较大,抗旱性能较弱(表 9)。

表8 干旱胁迫下大麦种质材料超氧化物歧化酶活性的变化/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)Table 8 The SOD activity in leaves of different germplasms of *Hordeum vulgare* L. under drought stress

种质材料 Materials	干旱胁迫天数 Days of drought stress					复水 Rewatering	变化率/% Variation rate
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
DM1	142.23f	190.11c	203.53f	249.71f	456.00d	439.60b	220.60
DM2	182.00c	170.59f	247.31b	249.47f	517.07a	481.69a	184.10
DM3	100.23l	136.11l	136.93j	271.19e	341.59h	237.06m	240.81
DM4	133.33g	154.29j	176.85h	388.21a	422.10e	284.92l	216.58
DM5	120.65h	136.67l	179.17h	296.29d	390.78g	294.66g	223.90
DM6	102.48k	119.47m	183.13g	209.17h	330.28j	189.74p	222.29
DM7	99.98l	100.43n	131.14j	205.36hi	334.39i	290.09k	234.46
DM8	94.37m	66.37o	100.79k	149.85j	271.80l	286.47k	188.91
DM9	200.71a	212.50a	299.52a	373.78a	480.61b	340.61d	139.45
DM10	128.25g	203.71b	234.38h	294.54d	331.58i	442.87b	158.50
DM11	169.50d	181.50d	215.38e	333.11c	483.05b	307.76f	184.99
DM12	145.20f	178.40e	236.42d	308.86d	432.48e	394.67cd	197.85
DM13	149.88e	181.70d	208.80f	352.85c	473.20c	339.36e	215.72
DM14	149.21e	171.60f	240.78c	357.33b	432.67e	330.43f	189.97
DM15	107.22j	161.98i	136.55j	189.84i	303.97k	221.47n	183.50
DM16	120.47h	141.77k	159.50i	196.99i	210.53m	169.95q	74.76
DM17	180.64c	190.12c	204.20f	218.97g	373.77h	283.26l	106.91
DM18	201.79a	202.82b	242.71bc	202.98i	390.72g	202.98o	93.63
DM19	112.87i	154.02j	174.64h	246.89f	393.88fg	343.66d	248.96
DM20	190.15b	104.49n	100.77k	207.13hi	400.77f	267.98l	146.11

表9 干旱胁迫至28 d时大麦种质材料株高的比较

Table 9 Comparison of plant height of different germplasms after 28 d of drought stress

种质材料 Materials	CK株高/cm Plant height under CK	胁迫株高/cm Plant height under stress	差值/cm D-values	种质材料 Materials	CK株高/cm Plant height under CK	胁迫株高/cm Stress plant height	差值/cm D-values
	DM1	38.0 ± 0.40	33.1 ± 0.30		4.9cd	DM11	40.0 ± 0.73
DM2	38.0 ± 0.96	33.9 ± 0.70	4.1de	DM12	47.1 ± 0.60	44.0 ± 0.37	3.1ef
DM3	38.2 ± 0.60	36.0 ± 0.58	2.2fg	DM13	38.0 ± 0.64	34.2 ± 0.55	3.8de
DM4	40.0 ± 1.00	32.0 ± 0.61	8.0a	DM14	40.0 ± 0.47	36.1 ± 0.55	3.9de
DM5	41.0 ± 0.86	38.0 ± 0.40	3.0de	DM15	39.1 ± 0.60	33.0 ± 0.20	6.1bc
DM6	46.1 ± 0.66	43.1 ± 0.36	3.0de	DM16	43.0 ± 0.79	40.0 ± 0.32	3.0ef
DM7	42.1 ± 0.83	41.0 ± 0.32	1.1g	DM17	40.1 ± 0.15	36.1 ± 0.15	4.0de
DM8	42.0 ± 0.51	34.9 ± 0.61	7.1ab	DM18	43.1 ± 0.30	38.0 ± 0.28	5.1cd
DM9	36.2 ± 1.05	32.1 ± 0.25	4.1de	DM19	36.0 ± 0.45	30.9 ± 0.10	5.1cd
DM10	40.0 ± 0.36	33.0 ± 0.40	7.0ab	DM20	43.8 ± 0.40	42.1 ± 0.20	1.7fg

2.9 综合评价

2.9.1 抗旱指标相关性分析 将以上8项测定指标进行相关性分析,如表10所示,RWC与株高呈显著正相关,其余各指标之间没有显著的相关性。单一的抗旱性鉴定指标难以反映植物对干旱适应的综合能力^[14],为了准确真实地评价不同种质材料的抗旱性能,将测定的8项指标均参与综合聚类分析和评价。

2.9.2 综合聚类分析 采用离差平方和-平方欧式距离法进行聚类分析并对测定的8项抗旱指标进行综合抗旱性评价。可将20份大麦种质材料划分为3个抗旱等级,相对抗旱的是DM6、DM12、DM7、DM16、DM11、DM14、DM17、DM18、DM20、DM3,中等抗旱的是DM9、DM13、DM2、DM5、DM1,相对敏感的是DM10、DM15、DM19、DM4、DM8(图1)。

表 10 不同指标之间的相关性分析
Table 10 Correlation analysis among different indicators

项目 Item	相对含水量 RWC	相对电导率 REC	叶绿素 Chl	可溶性糖 SSR	丙二醛 MDA	脯氨酸 Pro	超氧化物歧化酶 SOD	株高 H
相对含水量 RWC	1							
相对电导率 REC	0.102	1						
叶绿素 Chl	0.237	-0.245	1					
可溶性糖 SSR	-0.056	0.314	-0.213	1				
丙二醛 MDA	-0.085	0.239	-0.043	0.028	1			
脯氨酸 Pro	-0.293	0.421	-0.183	0.067	0.419	1		
超氧化物歧化酶 SOD	-0.265	0.280	-0.032	-0.026	0.402	0.458	1	
株高 H	0.470*	-0.262	-0.289	-0.168	-0.433	-0.372	-0.351	1

注: * 表示在 0.05 水平显著相关。

Note: * means significant correlation at 0.05 level (2-tailed).

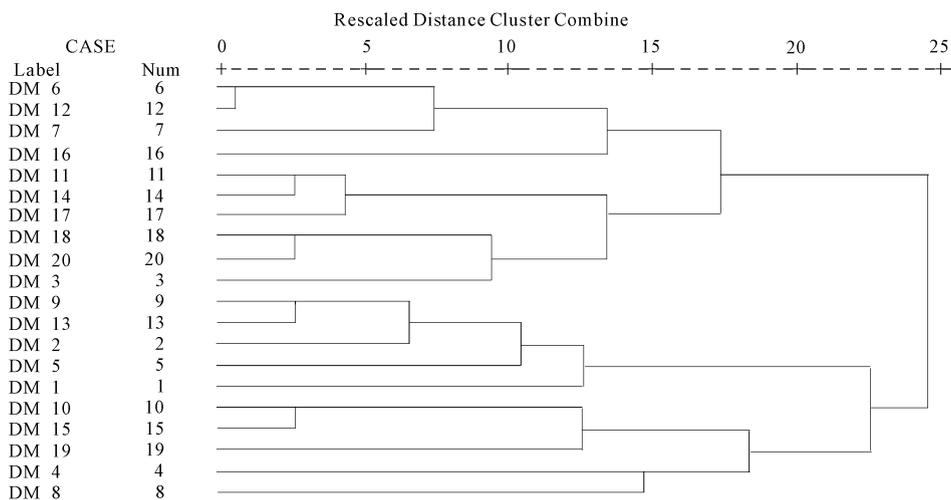


图 1 20 份大麦种质材料抗旱性聚类树状图

Fig.1 Graph of cluster analysis for 20 germplasms of *Hordeum vulgare* L.

3 讨论与结论

在持续干旱胁迫下,植株的形态、结构等各方面都将受到影响。随着干旱胁迫时间的延长和程度的加剧,在 1~7 d 时大麦种质材料植株外观无明显变化,保持旺盛生长状态,叶片色泽正常。胁迫 7~21 d 时,大麦植株生长减缓,叶片颜色变暗,萎焉,卷曲,后期叶尖部分开始变黄。在胁迫至 21~28 d,土壤含水量在 14.8% 以下,大麦叶片少半变黄,叶尖干枯,植株生长停止,并伴有少量弱小植株的死亡。本文中对各大麦种质材料株高的测定结果与其生理指标的研究结果大体一致。

Marshall 等研究表明:在干旱胁迫下,耐旱植物以缓慢降低叶片含水量来维持植物体内生理生化代谢正常运转,RWC 较高的植物较耐旱,反之则不耐旱^[15]。随着 RWC 的下降,细胞质膜就会受到一定程度的破坏,干旱胁迫下膜透性变化实际上反映了

植物的避旱和耐旱的能力,可以较综合而准确地鉴定植物抗旱性。水分亏缺时细胞的膜脂过氧化和脱脂化导致了膜透性的加大,其中耐旱性品种膜透性增加幅度较小,不耐旱品种增加幅度较大^[16]。丙二醛作为膜脂氧化的主要产物之一,常被作为判断膜脂过氧化作用的主要指标^[17]。文建成等研究表明,在干旱、盐碱等逆境条件下,植物叶片丙二醛含量增加,增幅小的品种对逆境的忍耐力较强,增幅较大的品种对逆境的忍耐力较小^[18]。张红萍^[16]、王晶英^[19]、任红旭^[20]、华春^[21]、史吉平^[22]等的研究表明,干旱胁迫导致叶绿素含量减少,抗性强的植物叶绿素含量减少幅度较少。本研究中,随干旱胁迫程度的加重,大麦叶片的 RWC 与 Chl 含量显著降低,REC 和 MDA 含量显著升高,复水后,各指标均不能恢复到胁迫前的水平,说明持续干旱胁迫对细胞膜造成的损伤是不可恢复的。本研究结果与上述研究结果一致。

SOD 是抵御活性氧自由基介导的氧化损伤的第一道防线,为保护酶系统中的关键酶^[23]。有关干旱胁迫下 SOD 活性变化的研究较多,但试验结果不尽相同。一般认为,干旱胁迫下,SOD 的活性与植物抗氧化胁迫能力成正相关。赵黎芳等^[24]、时连辉等^[25]、周小梅等^[26]的研究也表明,抗旱性强的植物 SOD 活性也较高。在本研究中显示,随着干旱胁迫时间的延长,大麦叶片中 SOD 酶活性明显上升,但叶片质膜相对透性及 MDA 含量也呈上升趋势。这可能是在干旱胁迫下,大麦叶片部分保护酶活性的上升,并不能显著提高保护酶防御系统清除活性氧的能力,活性氧产生和清除的失衡,引发膜过氧化反应破坏膜结构。

植物抵御或忍耐干旱胁迫是一个非常复杂的生理过程,受各种抗旱性指标共同制约,且各种抗旱性指标互相影响存在着一定的线性或曲线关系^[14]。本研究结果表明,在干旱胁迫下,除 RWC 与株高呈显著正相关外,其余各指标之间存在一定的相关性,但不显著。叶片含水量、相对电导率、叶绿素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量、可溶性糖含量与干旱胁迫压力呈正相关,而叶片相对含水量、株高与干旱胁迫压力呈负相关。这与刘永财^[27]、杨宏新^[28]的研究一致。

以种质材料苗期测定的 8 项指标为依据,对 20 份大麦种质进行数学聚类分析划分为 3 个抗旱等级,相对抗旱包括陇麦 1 号、新引 D5、Z126V004W、新引 D9、PREJTGE、SCARLETT、Z02751407、韭崎 12 号、Z127U016V、MAURITIA,中等抗旱包括 J13-80、新引 D7、PASADENA、NCF-TIPPLE、甘啤 6 号,相对敏感包括黑引瑞、Z200V017W、新啤 12 号、BEATRIX、Z204V021W。

参考文献:

- [1] Chaves MM, Maroco JP, Pereira JS. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant[J]. *Funct Plant Biol*, 2003, 30: 239-264.
- [2] 赵福庚,何龙飞,罗庆云.植物逆境生理生态学[M].北京:化学工业出版社,2004:8.
- [3] 杨巧珍.大麦的特性及其利用[J].农产品加工,2012,6:30.
- [4] 安尼瓦尔·赛买提,哈力·胡麻力,阿依夏木·依不拉音.大麦的饲用[J].新疆畜牧业,2012,4:56-57.
- [5] 陆一鸣,李彦舫,曹明富,等.短芒大麦耐盐碱新品系的生理生化和分子生物学分析[J].中国农业科学,2002,35(3):282-286.
- [6] 刘志敏,金能,吕超,等.大麦种质资源的 SSR 遗传多样性分析[J].麦类作物学报,2011,31(5):839-846.
- [7] 邹琦.植物生理实验指导[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [8] 郝建军.植物生理学实验技术[M].北京:化学工业出版社,2007:68-72.
- [9] 姜卫兵,高光林,俞开锦,等.水分胁迫对果树光合作用及同化代谢的影响研究进展[J].果树学报,2002,19(6):416-420.
- [10] 袁金娥,刘家娟,卫先,等.大麦耐盐性鉴定方法及耐盐机理研究进展[J].大麦与谷类科学,2011,4:11-12.
- [11] 张红萍,牛俊义,轩春香,等.干旱胁迫及复水对豌豆叶片脯氨酸和丙二醛含量的影响[J].甘肃农业大学学报,2008,43(5):50-54.
- [12] 张怡,罗晓芳,沈应柏.土壤逐渐干旱过程中刺槐新品种苗木抗氧化系统的动态变化[J].浙江林学院学报,2005,22(2):166-169.
- [13] 林叶春,曾昭海,郭来春,等.裸燕麦不同生育时期对干旱胁迫后复水的响应[J].麦类作物学报,2012,32(2):284-288.
- [14] 吴建华.冷蒿对干旱胁迫适应机制的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [15] Marshall J, Rutledge R, Blumwald E. Reduction in turgid water volume in jack pine, white spruce and black spruce in response to drought and paclobutrazol[J]. *Tree Physiol*, 2000, 20: 701-707.
- [16] 张红萍.干旱胁迫对豌豆冠层生长及叶片生理生化指标的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [17] 陈立松,刘星辉.作物抗旱鉴定指标的种类及其综合评价[J].福建农业大学学报,1997,26(1):48-55.
- [18] 文建成,陈学宽,符菊芬,等.质膜透性与丙二醛含量的变化评价甘蔗品种抗旱性初探[J].甘蔗,1998,5(3):1-5.
- [19] 王晶英,赵雨森,王臻,等.干旱胁迫对银中杨生理生化特性的影响[J].水土保持学报,2006,20(1):197-200.
- [20] 任红旭,陈雄,吴冬秀.CO₂浓度升高对干旱胁迫下蚕豆光合作用和抗氧化能力的影响[J].作物学报,2001,27(6):11-18.
- [21] 华春,周泉澄,张边江,等.毕氏海蓬子和盐角草幼苗对 PEG6000 模拟干旱的生理响应[J].干旱地区农业研究,2009,26(5):702-707.
- [22] 史吉平,董永华.水分胁迫对小麦光合作用的影响[J].麦类作物学报,1995,(5):49-51.
- [23] 孙景宽,张文辉,陆兆华,等.沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)和孩儿拳头(*Grewia biloba* G. Don var. *parviflora*)幼苗气体交换特征与保护酶对干旱胁迫的响应[J].生态学报,2009,29(3):1330-1340.
- [24] 赵黎芳,张金政,张启翔,等.水分胁迫下扶芳藤幼苗保护酶活性和渗透调节物质的变化[J].植物研究,2003,23(4):438-442.
- [25] 时连辉,牟志美,姚健.不同桑树品种在土壤水分胁迫下膜伤害和保护酶活性变化[J].蚕业科学,2005,31(1):13-17.
- [26] 周小梅,赵运林,周朴华.匍匐剪股颖 L-93 抗旱变异体的离体筛选与鉴定[J].草业学报,2007,16(5):121-126.
- [27] 刘永财,孟林,毛培春,等.14 份新麦草种质材料苗期抗旱性差异[J].中国草地学报,2009,31(2):64-69.
- [28] 杨宏新,毛培春,孟林,等.19 份高燕麦草种质材料苗期抗旱性评价[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):5-14.