

水稻花药水分胁迫培养反应与植株水平抗旱性间的关系

张艳敏^{1,2,3}, 高润红^{1,2,*}, 李梁^{1,2,3}, 杜志钊^{1,2}, 郭桂梅^{1,2,3}, 陈志伟^{1,2}, 何婷^{1,2}, 陆瑞菊^{1,2}, 黄剑华^{1,2,**}

¹上海市农业科学院生物技术研究所, 上海201106; ²上海市农业遗传育种重点实验室, 上海201106; ³上海海洋大学水产与生命学院, 上海201306

摘要: 以4个抗旱性不同的水稻品种为材料, 研究水分胁迫对花药培养愈伤组织诱导、苗期生长量、成熟期单株产量, 以及苗期生理生化指标的影响。结果表明, 水分胁迫下, ‘沪早2B’和‘沪早3号’的花药愈伤组织诱导率、苗期生长量和单株籽粒产量的受抑程度低于‘日本晴’和‘大华香粳’; 苗期叶中的脯氨酸(Pro)含量以及过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性的受抑程度也是‘沪早2B’和‘沪早3号’低于‘日本晴’和‘大华香粳’。表明供试材料离体花药对水分胁迫的培养反应与植株水平的抗旱性存在相关性。

关键词: 水稻; 水分胁迫; 花药培养; 苗期; 成熟期

Relationship between Anther Culture Response and Plant Drought Tolerance of Rice (*Oryza sativa* L.) under Water Stress

ZHANG Yan-Min^{1,2,3}, GAO Run-Hong^{1,2,*}, LI Liang^{1,2,3}, DU Zhi-Zhao^{1,2}, GUO Gui-Mei^{1,2,3}, CHEN Zhi-Wei^{1,2}, HE Ting^{1,2}, LU Rui-Ju^{1,2}, HUANG Jian-Hua^{1,2,**}

¹Biotech Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201106, China; ²Shanghai Key Laboratory of Agricultural Genetics and Breeding, Shanghai 201106, China; ³College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: In order to investigate whether there exists a relationship between the anther culture response and plant drought tolerance under water stress, four rice (*Oryza sativa*) varieties with different drought tolerance were used as donor materials. The results showed that ‘Huhan No.2B’ and ‘Huhan No.3’ had the lower degree of inhibition than ‘Nipponbare’ and ‘Dahuaxiangjing’ on callus induction, seedling growth and grain yield per plant under water stress. Meanwhile, ‘Huhan No.2B’ and ‘Huhan No.3’ also had the lower degree of inhibition than ‘Nipponbare’ and ‘Dahuaxiangjing’ on the proline content and peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) activities in seedling leaves under water stress. The results suggest that the anther culture response under water stress is correlated with that in plant level.

Key words: rice; water stress; anther culture; seedling stage; maturity stage

水资源短缺已成为全球性危机, 干旱已成为世界性难题(Clarke 1991)。全世界约三分之二的人口以稻米为食, 其中我国是最大的稻米生产国和消费国, 而水稻是耗水量最多的农作物, 占农业用水的70%以上(程建平等2006; 薛金义等2002), 干旱造成水稻的减产可超过其他因素所造成减产的总和, 严重制约着水稻的产量, 给粮食安全带来威胁。干旱已成为影响我国水稻生产主要的非生物胁迫因素, 提高水稻抗旱能力是育种工作急需解决的关键问题之一。

在干旱胁迫下水稻的产量、产量构成因素的表现和稳产性是抗旱育种和抗旱性评价的最为重要的性状。但由于产量性状本身很复杂, 并且受

环境影响较大, 遗传力较低, 因此使用这些性状来进行抗旱性评价与筛选非常困难(Cisse和Doubbia 2004; Ceccarelli等1991)。水稻苗期的抗旱性相关性状研究已有很多, 水分胁迫条件下的生长量, 如株高、主根长、苗干重和根干重可以在一定程度上反映不同基因型苗期对干旱胁迫的敏感性(王贺正等2004; 蒋荷等1991)。研究发现, 不同基因型水稻苗期的抗旱性鉴定结果与成熟期的结果一致(张燕之等1996); 大麦小孢子水平与植株水平的耐低

收稿 2011-09-26 修定 2011-11-25

资助 上海市科学技术委员会重大项目(2009DJ1400500)。

* 共同第一作者。

** 通讯作者(E-mail: sw1@saas.sh.cn; Tel: 021-62201032)。

氮、耐盐性也是一致的(陆瑞菊等2011a, b); 另外, 已在多种植物上证实离体培养的细胞组织对逆境胁迫的反应和在植株水平上的反应存在一致性(孙月芳等2007, 2005a, 2005b; 邵艳军等2000; 侯建华等1992)。这种一致性为利用细胞组织胁迫培养手段改良目标作物的相关性状提供了理论上的支持。如采用在离体培养过程中添加PEG胁迫的方法进行硬粒小麦抗旱性的评估(Bajji等2004)以及筛选抗旱性提高的高粱(Smith等1985), 在小麦上也有离体培养筛选抗旱性的报道(Sharma等2010)。本试验以4个抗旱性不同的水稻品种为材料, 分别从花药培养愈伤组织形成时期、苗期和成熟期对其进行水分胁迫耐受力的鉴定, 研究植株水平耐旱性与花药培养反应能力的相关性, 为采用花药培养手段进行抗旱性的离体鉴定和筛选从而提高选择效率提供依据。此外, 通过花药培养获得的愈伤组织和胚状体大多来源于单倍体小孢子, 再生植株经过染色体加倍, 即可获得所有等位基因一次性纯合的加倍单倍体植株, 因此, 更容易从大田鉴定中筛选出耐旱性稳定的株(品)系。

采用花药培养技术进行水稻遗传改良, 已创制了许多优良新种质, 育成了一批优良新品种, 但迄今为止, 尚未见到花药培养技术用于水稻抗旱性鉴定及筛选的研究报道。

材料与方法

1 试验材料

水稻(*Oryza sativa* L.)供试品种为‘沪早2B’、‘沪早3号’、‘大华香粳’和‘日本晴’, 由上海市农业生物基因中心提供。其中‘沪早2B’(http://www.lifesse.com/newsdetail.jsp?news_id=1821)和‘沪早3号’(http://www.shgsr.cn/newsdetail.jsp?news_id=270)是上海市农业生物基因中心培育的节水抗旱稻新种质/品种, ‘日本晴’为中抗材料(周小云2007; 程建峰等2005), ‘大华香粳’的抗旱性未见报道。

2 试验方法

2.1 花药培养

于水稻花粉细胞处于小孢子单核靠边期时(颖花浅绿色, 花药伸长至颖壳2/5~1/2)取穗, 保留上部两片叶子, 将稻穗用浸湿的纱布包好放入保鲜袋中, 把口扎紧, 减少水分蒸发, 置于4℃冰箱中

保存。挑选花药发育时期一致的穗子, 用10%次氯酸钠溶液消毒15 min, 无菌水冲洗4次。在超净台上挑出花药, 每瓶接种120枚花药, 置于(25±1)℃暗培养。愈伤组织形成后转入分化培养基, 在(26±1)℃、每天光照12 h和黑暗12 h的光周期下培养。

以N6+2,4-D 2 mg·L⁻¹+KT 1 mg·L⁻¹+NAA 0.5 mg·L⁻¹+CH 1 g·L⁻¹+谷氨酰胺 1 g·L⁻¹+麦芽糖50 g·L⁻¹为诱导培养基, 添加2 g·L⁻¹的琼脂粉(Sigma公司)固化, pH 5.8, 121℃高温、高压灭菌15 min。以添加5%、8%、10%、13% PEG的作为胁迫培养基, 以未添加PEG的培养基为对照。

2.2 苗期PEG胁迫处理

选取饱满、健康的种子置于40℃恒温箱内1 d, 用1%次氯酸钠消毒30 min后用自来水洗涤3~4次。于30℃下浸种2 d, 再将露白的种子均匀摆放到广口瓶的PCR板上, 每个广口瓶中装230 mL的蒸馏水, 置于30℃光照培养箱中, 12 h·d⁻¹光照培养, 光照强度54 μmol·m⁻²·s⁻¹。当苗长至三叶一心期, 用20% PEG 6000进行根际胁迫处理, 设不含PEG的蒸馏水处理为对照, 处理和对照各重复3次, 每个处理15棵苗。7 d后进行生长量指标和生理生化指标测定。

2.3 生长量测定

用木制直尺测量株高(地上到穗顶的高度和根长。分成地上部和地下部收获植株, 105℃下杀青30 min, 70℃下烘至恒重, 测定茎叶和根的干物质重量。

2.4 生理生化指标测定

脯氨酸(Pro)含量测定参照王守生(1995)的方法。过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定参照李合生等(2000)书中的方法。

2.5 单株产量测定

选稻田土过筛, 除去稻桩及杂物, 土壤中原本含有机质34.5 g·kg⁻¹、全氮2.42 g·kg⁻¹、速效氮37.35 mg·kg⁻¹, 以1:10的比例加入有机肥(含氮量40 g·kg⁻¹), 拌匀后装入35 cm×40 cm的盆钵中, 每盆装土20 kg, 播种前灌水浸泡, 沉淀2 d后播种。挑选大小均匀、籽粒饱满的种子, 每盆播种5粒, 三叶一心时定苗, 每盆4株。四叶一心时开始进行干旱胁迫处理。试验设2个处理, 3次重复。对照组每日灌水, 干旱胁迫处理每隔12 d周期性供水, 其他管

理措施一致。于成熟期收获,统计相关指标。

2.6 统计指标

愈伤组织诱导率: 形成愈伤组织数/接种花药数 $\times 100\%$; 单株有效穗数: 收获前调查每株穗数; 每穗着粒数: 平均每穗颖花数; 每穗实粒数: 平均每穗实结粒数; 结实率: 平均每穗实结粒数/平均每穗颖花数 $\times 100\%$; 单株产量(g): 平均单株籽粒重; 单株重(g): 植株自然风干后称量根基部以上的重量; 单穗重(g): 主穗茎节到穗颖尖的质量; 千粒重(g): 每株随机1 000粒饱满的谷粒质量。所有试验结果采用Excel数据处理系统进行统计分析 & 差异显著性比较。

实验结果

1 PEG胁迫对花药培养愈伤组织诱导率的影响

由表1可见,在不添加PEG的对照培养基上,所有供试品种均能形成愈伤组织并再生绿色植株(图1),愈伤组织诱导率从29.2%~80.0%不等;在添加5% PEG的培养基上,‘沪早2B’、‘沪早3号’和‘大

表1 诱导培养基中PEG浓度对水稻花药培养愈伤组织诱导率的影响

Table 1 Effect of PEG concentration in media on frequency of callus induction by anther culture of rice

PEG浓度/%	愈伤组织诱导率/%			
	‘沪早2B’	‘沪早3号’	‘日本晴’	‘大华香粳’
0(对照)	40.8	47.5	29.2	80.0
5	45.0	54.2	18.3	85.0
8	22.5	32.5	13.3	28.3
10	15.8	20.8	6.7	18.3
13	10.8	14.2	0	9.2

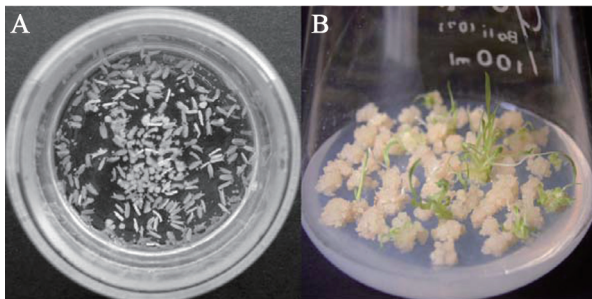


图1 水稻花药培养形成的愈伤组织(A)及植株再生(B)

Fig. 1 Callus induction (A) and plant regeneration (B) by anther culture of rice

华香粳’的愈伤组织诱导率均有不同程度的提高,只有‘日本晴’的愈伤组织诱导率下降特别明显,下降幅度达37.3%;在添加8% PEG的培养基上,所有供试品种的愈伤组织诱导率与对照相比降幅明显,‘日本晴’和‘大华香粳’诱导率的下降幅度达54.5%和64.6%,‘沪早2B’和‘沪早3号’的诱导率下降幅度为44.9%和31.6%;在添加10% PEG的培养基上,供试品种的愈伤组织诱导率继续下降,‘日本晴’和‘大华香粳’的下降幅度为77.1%,‘沪早2B’和‘沪早3号’的诱导率下降幅度为61.3%和56.2%;在添加13% PEG的培养基上,‘日本晴’的愈伤组织诱导率为0,‘大华香粳’的愈伤组织诱导率仅为9.2%,‘沪早2B’和‘沪早3号’的愈伤组织诱导率为10.8%和14.2%。由此可见,低浓度(5%)的PEG可以促进一些水稻品种愈伤组织诱导率,PEG浓度高于8%时所有供试品种愈伤组织的形成受到抑制,但在胁迫培养基上‘沪早2B’和‘沪早3号’愈伤组织诱导率的下降幅度总是低于‘日本晴’和‘大华香粳’,表明诱导培养基中添加不同浓度的PEG对水稻花药培养愈伤组织诱导率的影响因供试品种不同而有差异,也就是说,不同水稻品种的离体花药对水分胁迫培养的反应存在明显差异。

2 PEG胁迫对水稻苗期生长量的影响

水稻幼苗经过20% PEG处理后,地上部分的生长受到严重抑制(图2)。从表2可以看出,与未经胁迫的对照相比,所有供试品种的植株高度和茎叶干重均降低,差异均达极显著水平。‘沪早2B’和‘沪早3号’株高的下降幅度分别为31.7%和29.4%,‘日本晴’和‘大华香粳’的下降幅度分别为40.8%和39.7%;‘沪早2B’和‘沪早3号’茎叶干重的下降幅度分别为18.3%和26.9%,‘日本晴’和‘大华香粳’的下降幅度分别为39.8%和33.3%。从表2还可以看出,PEG胁迫处理能促进根系的生长,主根长度和根干重明显增加,除‘日本晴’外,其他供试品种与对照相比差异达极显著或显著水平。‘沪早2B’和‘沪早3号’主根长度的上升幅度为7.1%和5.8%,‘日本晴’和‘大华香粳’的上升幅度为2.4%和4.9%;‘沪早2B’和‘沪早3号’根干重的上升幅度为37.2%和33.8%,‘日本晴’和‘大华香粳’根干重的上升幅度为15.2%和21.3%。

3 PEG胁迫对水稻苗期生理生化指标的影响

由表3可以看出,PEG胁迫下,不同品种苗期



图2 苗期20% PEG处理与对照的差异

Fig.2 Differences between water stress by 20% PEG treatment and control at seedling stage

表2 水分胁迫对植株高度、茎叶干重、主根长度和根干重的影响

Table 2 Effect of water stress on plant height, shoot dry weight, root length and root dry weight

供试品种	植株高度/cm		茎叶干重/g		主根长度/cm		根干重/g	
	对照	胁迫	对照	胁迫	对照	胁迫	对照	胁迫
'沪旱2B'	20.18±0.07	13.78±0.04**	0.164±0.005	0.134±0.002**	13.41±0.04	14.36±0.07**	0.078±0.002	0.107±0.005**
'沪旱3号'	25.59±0.29	18.07±0.05**	0.230±0.005	0.168±0.001**	12.02±0.09	12.72±0.07**	0.071±0.002	0.095±0.002*
'日本晴'	30.43±0.12	18.02±0.22**	0.236±0.001	0.142±0.001**	13.26±0.07	13.58±0.12*	0.079±0.002	0.091±0.003
'大华香粳'	25.84±0.25	15.57±0.05**	0.231±0.002	0.154±0.001**	10.90±0.02	11.44±0.02*	0.089±0.002	0.108±0.004*

*表示在5%水平上的差异,**表示在1%水平上的差异。表3和4同此。

的相关生理生化指标的变化存在明显差异。未受到胁迫的对照中Pro含量都很低,品种间差异并不明显;胁迫下,Pro含量急剧上升,'沪旱2B'和'沪旱3号'的Pro含量分别比对照提高了5.3和4.8倍,'日本晴'和'大华香粳'分别提高了3.0和1.9倍。胁迫下供试品种间的POD活性差异显著:'沪旱2B'的POD活性明显增强,增强幅度为21.8%;'沪旱3号'的POD活性与对照相比略有增强;而'日本晴'和'大华香粳'的POD活性却急剧下降,下降幅度达40.4%和27.4%。胁迫下SOD活性的变化情况与POD相似,'沪旱2B'上升了33.1%,'沪旱3号'没有提高,而'日本晴'和'大华香粳'与对照相比则明显下降。可见,PEG胁迫对水稻不同品种间Pro的积

累、POD和SOD活性的影响是不同的,这可能意味着不同水稻品种在胁迫下生理生化的代谢活性上存在某种差异。

4 水分胁迫对单株产量性状的影响

干旱胁迫严重影响水稻植株的生长(图3),胁迫下所有性状的测量值均低于对照,其中,株高、每穗着粒数、每穗实粒数、结实率、单株产量、单株重均明显降低,与对照相比,差异达极显著水平,且不同品种对干旱胁迫的响应也不同。胁迫下除单株有效穗数和千粒重外,'沪旱2B'和'沪旱3号'单株性状的相对值均高于'日本晴'和'大华香粳',特别是在每穗实粒数、单株产量、单株重方面,前者性状的相对值与后者相比,差异达到18%

表3 水分胁迫对水稻各项生理生化指标的影响

Table 3 Effect of water stress on physiological and biochemical indexes in rice

供试品种	Pro含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)		POD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)		SOD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	
	对照	胁迫	对照	胁迫	对照	胁迫
'沪旱2B'	75.1±11.9	476.8±18.4**	67460.2±1061.0	82153.3±5166.7**	72.2±14.8	96.1±3.3*
'沪旱3号'	73.4±5.10	423.3±14.8**	114320.1±7386.7	114746.7±1526.7	106.5±8.9	106.5±5.8
'日本晴'	63.9±5.37	253.6±17.9**	92493.9±4993.3	55100.4±2486.7**	127.3±8.0	107.8±13.5*
'大华香粳'	57.5±10.9	168.7±7.9*	77847.5±5693.3	56546.7±1600.0**	169.1±5.8	122.9±8.2**

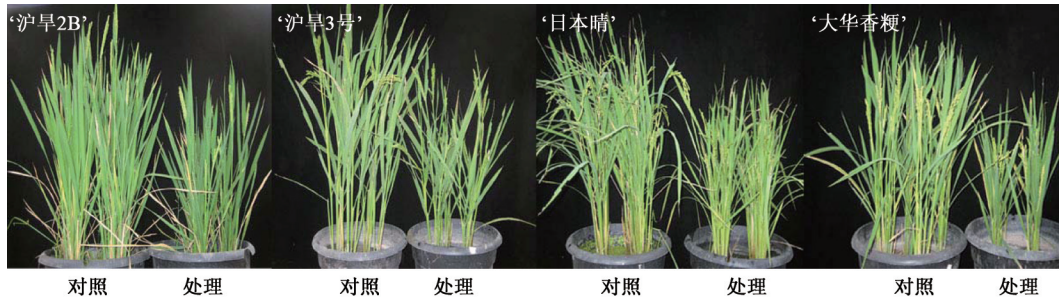


图3 成熟期干旱胁迫下对照与处理的差异

Fig.3 Differences between control and treatment under drought stress at maturity stage

以上(表4)。结果表明‘日本晴’和‘大华香粳’在单株产量性状上受干旱胁迫的影响比‘沪早2B’和‘沪早3号’的大。

讨 论

我们通过培养基的优化提高了水稻花药培养反应(张艳敏等2011),在此基础上进行了水分胁迫下离体花药培养的研究,结果表明,诱导培养基中加入PEG模拟干旱胁迫,水稻花药愈伤组织诱导率与诱导培养基中PEG含量密切相关,胁迫强度越高,愈伤组织诱导率越低。不难看出,水分胁迫对供试材料单倍体细胞的成活及脱分化的过程皆有明显的抑制作用,抑制程度在不同品种间存在明显的差异,‘日本晴’和‘大华香粳’的受抑程度大于‘沪早2B’和‘沪早3号’。刘桂茹等(2001)在小麦花药水分胁迫培养上的研究结果也是如此。

在水稻生长苗期进行干旱胁迫,导致植株生长速度减缓,不同品种对水分胁迫的反应不同,抗旱性强的品种各指标的下降幅度明显低于抗旱性弱的品种(王贺正等2007)。我们在培养箱中采用

短时期的PEG胁迫也获得了相似的结果,省时、省力且同时可以处理大批材料,重复性好。

利用PEG模拟干旱研究水分胁迫对作物生长及生理生化的影响早有报道(戴高兴等2007;蒋明义1992)。Pro是植物在水分胁迫下最为有效的渗透调节物质,但水分胁迫下的Pro累积和植物抗旱性的关系以及是否可以作为抗旱指标存在争论,有学者认为Pro含量可作为抗旱的指标(Hanson等1979, 1977)或者是伤害程度的指标(戴高兴等2006; Cakmak和Horst 1991),也有学者认为Pro含量应该作为胁迫敏感指标(刘娥娥等2000)。本文结果表明,干旱胁迫下水稻叶内Pro迅速累积,抗旱性好的‘沪早2B’和‘沪早3号’的Pro含量相对值大于‘日本晴’和‘大华香粳’;与高吉寅等(1984)的研究结果相一致。POD和SOD与植物的抗逆境能力密切相关,所以水分胁迫条件下POD和SOD活性变化幅度常常作为品种间抗旱能力判断的生物化学指标(王贺正等2009;熊正英等1995)。本文结果表明,尽管苗期不是POD和SOD活性最高的时期,但‘沪早2B’和‘沪早3号’在PEG胁迫下POD和SOD活性相对值还

表4 两种供水条件下不同水稻相关性状的基因型差异

Table 4 Genotypic differences of rice traits under two water-supply levels

供试品种	处理	株高/cm	单株有效穗数/个	每穗着粒数/个	每穗实粒数/个	结实率/%	单株产量/g	单株重/g	单穗重/g	千粒重/g
‘沪早2B’	对照	75.6±2.33	8.7±0.95	114.2±4.47	90.3±4.47	79.1±2.88	18.9±1.53	21.0±2.52	2.2±0.16	22.7±0.60
	胁迫	62.7±2.58*	5.4±0.84**	91.7±3.27**	62.6±2.32**	68.3±1.83**	8.5±0.87**	13.1±1.88**	1.4±0.11**	22.1±0.75
‘沪早3号’	对照	84.3±3.15	5.7±0.48	111.5±5.21	89.2±5.71	80.0±3.07	17.1±1.08	22.9±1.33	2.8±0.23	30.2±0.56
	胁迫	68.6±3.31*	3.3±0.48	90.5±3.63**	60.7±3.30**	67.1±1.81**	7.8±0.73**	12.4±1.49**	2.0±0.12	28.9±0.54
‘日本晴’	对照	69.4±7.35	10.2±1.14	111.3±4.72	88.7±4.57	79.7±1.71	22.2±1.32	26.7±1.32	2.1±0.09	23.0±0.44
	胁迫	55.6±4.25**	8.7±1.83	78.3±5.49**	44.4±5.08**	56.7±4.67**	5.7±0.63**	9.5±0.87**	1.0±0.09**	22.8±0.79
‘大华香粳’	对照	67.8±2.82	9.6±1.27	120.4±5.30	93.1±4.93	77.3±2.59	21.9±1.83	26.4±1.19	2.2±0.09	22.2±0.62
	胁迫	48.6±3.19**	4.7±1.16**	80.1±4.65**	46.5±3.67**	58.1±3.22**	5.3±0.58**	9.1±0.82**	1.1±0.11**	21.8±0.62

是大于‘日本晴’和‘大华香粳’。

本研究结果还表明, 无论是花药培养愈伤组织形成时期还是成熟期, ‘沪早2B’和‘沪早3号’对水分胁迫的敏感程度都低于‘日本晴’和‘大华香粳’, 且同一品种在花药培养的愈伤组织形成和植株水平的种子萌发期、苗期或成熟期对水分胁迫的反应存在一致性(图4)。综合本研究结果可以看出, 供试品种植株水平对水分胁迫的耐受力存在明显差异, 并且这种差异可以影响离体花药水分胁迫培养的反应能力。也就是说, 在水分胁迫下, 植株水平耐受力强的材料, 它的花药培养形成愈伤组织的耐受能力也强。花药培养形成的愈伤组织大多来源于小孢子, 这在很大程度上反映了供试品种单倍体细胞对水分胁迫培养的一种反应力。这种品种间植株水平与花药水平对水分胁迫反应的相关性, 一方面揭示了单倍体细胞对水分胁迫的培养反应与供试品种植株水平抗旱能力存在联系, 很有可能植株水平表达抗旱性的相关基因在高度分化型小孢子的水分胁迫培养过程中也发挥作用; 另一方面, 水分胁迫下水稻花药培养反应能力与植株水平耐受力呈一致性的结果, 为研制水稻花药/小孢子水分胁迫筛选方法提供了理论上的支持, 同时为评估水稻抗旱性提供了一种新的方法, 并且利用该方法鉴定筛选获得的抗旱再生植株, 经染色体加倍后, 包括其抗旱性状在内的

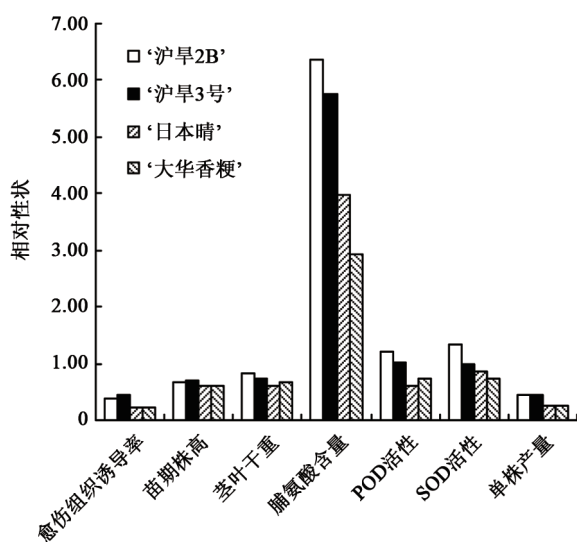


图4 水分胁迫下统计指标的相对值

Fig.4 The relative values of statistical indicators under water stress

所有性状一次性纯合, 从而加快抗旱种质的创新效率。

参考文献

- 程建峰, 潘晓云, 刘宜柏, 戴廷波, 曹卫星(2005). 水稻抗旱性鉴定的形态指标. 生态学报, 25 (11): 3117~3125
- 程建平, 曹湊贵, 蔡明历, 汪金平, 原保忠, 王建漳, 郑传举(2006). 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响. 应用生态学报, 17 (10): 1859~1865
- 戴高兴, 彭克勤, 邓国富, 萧浪涛, 张雪芹(2007). 聚乙二醇模拟干旱对耐低钾水稻幼苗的根系生长及某些生理特性的影响. 植物生理学通讯, 43 (5): 865~868
- 戴高兴, 彭克勤, 萧浪涛, 邓国富(2006). 聚乙二醇模拟干旱对耐低钾水稻幼苗丙二醛、脯氨酸含量和超氧化物歧化酶活性的影响. 中国水稻科学, 20 (5): 557~559
- 高吉寅, 胡荣海, 路漳, 杨国良(1984). 水稻等品种苗期抗旱生理指标的探讨. 中国农业科学, (4): 41~45
- 侯建华, 耿庆汉, 胡荣海(1992). 水分胁迫对冬小麦愈伤组织的影响. 华北农学报, 7 (4): 52~56
- 蒋荷, 蒋国龙, 王根来, 吴竞嵩, 何正岳, 沈锦根(1991). 水稻品种资源抗旱性鉴定. 江苏农业科学, (1): 10~12
- 蒋明义(1992). 研究水稻种子萌发特性和抗旱性关系的高渗溶液法. 植物生理学通讯, 28 (6): 441~444
- 李合生, 孙群, 赵世杰, 章文华(2000). 植物生理生化试验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 164~169
- 刘娥娥, 宗会, 郭振飞, 黎用朝(2000). 干旱、盐和低温胁迫对水稻幼苗脯氨酸含量的影响. 热带亚热带植物学报, 8 (3): 235~238
- 刘桂茹, 葛淑俊, 王静华, 郭晓丽(2001). PEG对小麦花药出愈率的影响. 河北农业大学学报, 24 (4): 25~27
- 陆瑞菊, 陈志伟, 何婷, 王亦菲, 杜志钊, 高润红, 邹磊, 黄剑华, 陈佩度(2011a). 两份大麦品种单倍体细胞与植株水平耐盐性的关系. 核农学报, 25 (2): 226~230
- 陆瑞菊, 陈志伟, 何婷, 王亦菲, 杜志钊, 高润红, 邹磊, 黄剑华, 陈佩度(2011b). 大麦单倍体细胞水平与植株水平耐低氮性的关系. 麦类作物学报, 31 (2): 292~296
- 邵艳军, 李广敏, 辛春艳(2000). 水分胁迫对不同抗旱性冬小麦愈伤组织的影响. 华北农学报, 15 (1): 47~52
- 孙月芳, 陆瑞菊, 王亦菲, 周润梅, 黄剑华(2005a). 大麦花药离体诱变及铝胁迫下的培养反应. 核农学报, 19 (2): 95~98
- 孙月芳, 陆瑞菊, 王亦菲, 周润梅, 黄剑华(2005b). 不同基因型大麦离体培养花药对赤霉菌粗毒素的反应. 核农学报, 19 (3): 172~174
- 孙月芳, 陆瑞菊, 王亦菲, 单丽丽, 黄剑华(2007). 不同基因型大麦离体培养的花药及小孢子对低温和NaCl预处理的反应. 中国农学通报, 23 (4): 46~48
- 王贺正, 李艳, 马均, 张荣萍, 李旭毅, 汪仁全(2007). 水稻苗期抗旱性指标的筛选. 作物学报, 33 (9): 1523~1529
- 王贺正, 马均, 李旭毅, 张荣萍(2009). 水稻苗期生理生化特性与品种抗旱性的关系. 华北农学报, 24 (4): 174~178
- 王贺正, 马均, 李旭毅, 张荣萍, 李艳(2004). 水稻种质芽期抗旱性和

- 抗旱性鉴定指标的筛选研究. 西南农业学报, 17 (5): 594~599
- 王守生(1995). 茶树游离脯氨酸含量及水分胁迫对其影响. 茶叶, 21 (1): 22~25
- 熊正英, 张志勤, 王致远, 拉元来, 唐峰波(1995). POD活性与水稻抗旱性的关系. 陕西师大学报(自然科学版), 23 (4): 63~66
- 薛金义, 荆宇, 华玉凡(2002). 略论我国旱稻的生产及发展. 中国稻米, (4): 5~7
- 张艳敏, 高润红, 郭桂梅, 杜志钊, 李梁, 何婷, 黄剑华(2011). 不同优质粳稻花药对低温和激素处理的培养响应. 上海农业学报, 27 (2): 121~124
- 张燕之, 周毓珩, 邹吉承, 金奎文, 曹炳晨, 刘宛(1996). 水稻抗旱性鉴定方法与指标研究. II. 旱作时稻的主要农艺性状与其抗旱性指标. 辽宁农业科学, (2): 6~8
- 周小云(2007). 水稻叶表皮蜡质发育及蜡质相关转录因子基因*OsWTF1*和*OsWTF2*的克隆与鉴定[学位论文]. 长沙: 湖南农业大学
- Bajji M, Bertin P, Lutts S, Kinet J-M (2004). Evaluation of drought resistance-related traits in durum wheat somaclonal lines selected *in vitro*. Aust J Exp Agr, 44: 27~35
- Cakmak I, Horst WJ (1991). Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxide activities in root tips of soybean (*Glycine max*). Physiol Plant, 83 (3): 463~468
- Ceccarelli S, Acevedo E, Grando S (1991). Breeding for yield for yield stability in unpredictable environments: single traits, interaction between traits, and architecture of genotypes. Euphytica, 56: 169~185
- Cisse F, Doumbia Y (2004). Screening for drought resistance in *Oryza glaberrima* varieties under floating and lowland conditions in Mali. In: Poland D, Sawkins M, Ribaut J-M, Hoisington D (eds). Resilient Crops for Water Limited Environments: Proceedings of a Workshop Held at Cuernavaca, Mexico, 24~28 May 2004. Mexico D.F.: CIMMYT, 91
- Clarke R (1991). Water: The International Crisis. London: Earthscan Publications Ltd, 3~40
- Hanson AD, Nelson CE, Everson EH (1977). Evaluation of free proline accumulation as an index of drought resistance using two contrasting barley cultivars. Crop Sci, 17: 720~726
- Hanson AD, Nelson CE, Pederson AR, Everson EH (1979). Capacity for proline accumulation during water stress in barley and its implication for breeding for drought resistance. Crop Sci, 19: 489~493
- Sharma S, Chaudhary HK, Sethi GS (2010). *In vitro* and *in vivo* screening for drought tolerance in winter × spring wheat doubled haploids derived through chromosome elimination. Acta Agr Hung, 58 (3): 301~312
- Smith RH, Bhaskaran S, Miller FR (1985). Screening for drought tolerance in sorghum using cell cultures. In Vitro Cell Dev Biol, 21: 541~545