

油菜胚根伸长期耐渍性鉴定及不同耐性品种质膜透性对渍水的反应

聂立璇, 姚璇, 汪吴凯, 贺江江, 李亦骁, 杨特武*

华中农业大学植物科学技术学院, 农村农业部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 武汉430070

*通信作者(yangtewu@mail.hzau.edu.cn)

摘要: 长江流域冬油菜播种期常发生田间渍水, 严重影响种子出苗成苗甚至造成出苗失败。深入研究种子萌发出苗期对渍水的反应并建立可靠的耐渍性鉴定方法, 对于油菜耐渍品种选育和抗渍栽培具有重要意义。本研究在前期探明胚根伸长期是油菜种子萌发出苗对渍水最敏感的阶段的基础上, 以23个在长江流域种植的冬油菜品种为材料, 采用3种方法对胚根伸长期耐渍性进行鉴定, 根据种子出苗情况评价其耐渍性。在此基础上, 比较了耐渍性不同品种出苗对渍水时间的反应, 以及浸种液氧化还原电位、溶解氧含量、钾钠离子浓度、种子电解质渗透率和丙二醛(MDA)含量的变化。结果表明: 不同品种耐渍性存在显著差异, 依据渍水后种子相对出苗率和相对出苗指数可将不同品种分为耐渍、中等耐渍和渍水敏感3类。耐渍品种渍水伤害的时间阈值为浸水36 h、中等耐渍品种为浸水32 h、渍水敏感品种则为浸水12 h。耐渍品种消耗溶解氧较少, 推测其可能采取“沉寂”策略适应渍水胁迫。耐渍品种浸种液 Na^+ 和 K^+ 相对浓度以及种子MDA相对含量较低, 说明其在渍水胁迫下具有较强的质膜稳定性。通过比较不同方法鉴定结果, 确定在室内对胚根伸长期种子进行浸水处理36 h, 依据种子相对出苗率评价不同品种的耐渍性, 可获得可靠的鉴定结果。

关键词: 甘蓝型油菜; 渍水; 鉴定方法; 生理响应; 种子出苗

Identification of waterlogging tolerance of *Brassica napus* at radicle elongation and the plasma membrane permeability of cultivars with different tolerances in response to waterlogging

NIE Lixuan, YAO Xuan, WANG Wukai, HE Jiangjiang, LI Yixiao, YANG Tewu*

Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

*Corresponding author (yangtewu@mail.hzau.edu.cn)

Abstract: Yangtze River Basin is prone to waterlogging during the sowing period of winter rapeseed, which often seriously affects the seedling emergence and establishment and even causes failure of emergence in the field. It is of great significance to study the response of seed germination and emergence to waterlogging and establish a reliable identification method of waterlogging tolerance for the rapeseed breeding

收稿 2021-02-22 修定 2021-08-10

资助 国家重点研发计划专项(2017YFD0301400)。

致谢 华中农业大学杨光圣教授和沈金雄教授、湖南省农业科学院涂义秋研究员、中国农业科学院油料作物研究所汪磊博士为本研究提供了实验材料。

and cultivation to combat waterlogging. Based on the previous finding that the radicle elongation was most sensitive to waterlogging during the seed germination and emergence of rapeseed, 3 methods were adopted to evaluate the tolerance of 23 cultivars to waterlogging that are planted in the Yangtze River Basin at the radicle elongation, using the seedling emergence as evaluation criterion, in this study. Meanwhile, the responses of seedling emergence to waterlogging duration were compared among cultivars with different tolerances. The changes in redox potential, dissolved oxygen content, Na^+ and K^+ concentrations in the seed soaking solutions, and the electrolyte leakage rate and malonaldehyde (MDA) content in waterlogged seeds of different cultivars during various waterlogging duration were also determined. The results showed that there was significant variance in waterlogging tolerance of different cultivars. The cultivars were classified into tolerant, moderately tolerant and sensitive types based on their relative emergence rate and relative emergence index after waterlogging. The injury threshold of waterlogging duration for the tolerant cultivar was inundating seed for 36 h, while that for the moderately tolerant and sensitive cultivars was 32 h and 12 h, respectively. Tolerant cultivar consumed less dissolved oxygen than sensitive cultivar during waterlogging, suggesting that the tolerant cultivars might be adapted to waterlogging stress by "quiescence" strategy. Moreover, the relative concentrations of Na^+ and K^+ in seed soaking solution and the relative content of MDA in the waterlogged seed of the tolerant cultivar were lower, indicating more stability of its plasma membrane under the stress. By comparing the results of different methods, the reliable results can be obtained by inundating seed for 36 h in lab at the radicle elongation and then evaluating the tolerance of cultivars by the relative emergence rate after waterlogging.

Key words: *Brassica napus*; waterlogging; identification method; physiological response; seedling emergence

长江流域是我国乃至世界上最大的油菜产区, 每年冬油菜种植面积约667万 hm^2 , 产量约占全国油菜总产量的90% (俞琦英等2010)。随着农村劳动力的短缺, 直播已成为我国油菜生产的主要种植方式(Li等2016)。然而, 长江流域在油菜播种期常常出现降雨集中的天气, 加上本地区油菜种植制度以“稻-油”或“稻-稻-油”为主, 稻田土壤粘重、透气性差、地下水位高, 极易对油菜出苗造成渍害(吕艳艳等2013), 严重降低出苗率甚至造成出苗失败(Li等2019)。Li等(2019)研究表明, 胚根伸长期是油菜在出苗和成苗阶段对渍水最敏感的时期, 此期渍水1 d即可导致种子出苗率降低50%以上, 渍水3 d则出苗率降低90%以上。因此, 深入研究油菜胚根伸长期耐渍机制, 对于油菜耐渍品种选育和抗渍栽培调控具有重要意义。

由于在田间自然条件下筛选耐渍品种存在周期长、误差大的缺陷, 研究者们探索了室内快速鉴定作物耐渍性的方法。Burgos等(2001)在小麦萌

发早期通过淹水处理, 依据胚芽鞘生长速率筛选耐渍品种, 并发现耐渍品种在淹水胁迫下细胞电解质渗漏率低, 出苗存活率高。陈洁等(2006)采用在10 mL离心管中对胚根伸长期油菜种子进行浸水12 h处理, 根据浸水后种子出苗率评价品种的耐渍性, 并认为浸种液电导率可作为耐渍材料早期高通量筛选指标。Zaman等(2018)在豌豆中研究也发现, 渍水敏感品种的种子浸泡液电导率显著高于耐渍品种。在渍水胁迫下细胞膜的完整性与品种的耐渍性密切相关, 而浸种液电导率可反映种子细胞的电解质渗漏状况及细胞膜的完整性(张树杰等2013)。本研究应用不同方法对部分长江流域种植的油菜品种进行胚根伸长期耐渍性鉴定, 通过比较不同方法的鉴定结果, 确定油菜胚根伸长期耐渍性的适宜鉴定方法; 在此基础上, 通过比较不同品种细胞膜透性对渍水的反应, 探讨油菜种子萌发出苗期的耐渍机制, 为油菜耐渍品种选育和抗渍栽培提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以23个长江流域种植的甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)品种为材料(表1)。

1.2 试验设计 & 方法

1.2.1 油菜品种耐渍性鉴定

设置3种渍水处理方法对不同品种进行鉴定, 5次重复, 完全随机排列。

方法1: 将吸胀种子在垫有双层湿润滤纸的培养皿中培养至胚根伸长期(胚根长约2~4 mm), 然后将种子转移至10 mL离心管中密闭浸水处理12 h (水深5 cm) (陈洁等2006)。每管处理50粒种子。

方法2: 按方法1将100粒胚根伸长期种子转移至100 mL烧杯中浸水处理36 h (水深2 cm) (周欣等2019)。

种子培养和浸水处理均在无光照培养箱(25°C/

20°C, 16 h/8 h)中进行。浸水处理完成后, 用清水快速漂洗种子3次, 然后播种于装有400 g过1 mm筛风干土的试验盆(上口径12 cm, 下口径6 cm, 高5 cm, 底部钻有5个0.5 cm直径的小孔并垫有双层滤纸)中, 每盆播种50粒, 上覆2 mm洗净的黄沙。将培养基质相对含水量调整为65%, 在培养室(22°C, 光照16 h/黑暗8 h)内培养至出苗稳定。以在相同条件下培养、未进行浸水处理的材料为对照。

方法3 (模拟田间土壤渍水): 按上述方法直接将吸胀种子播种于试验盆中, 在培养室内培养至胚根伸长期, 然后将试验盆放入水箱中加自来水至淹没土壤表面2 mm处理36 h。处理期间维持水位恒定。处理完成后, 将试验盆取出自然落干, 在培养室内培养至出苗稳定。以不进行渍水处理的培养材料为对照。培养期间基质相对含水量维持在65%左右。

表1 试验品种及基本信息

Table 1 Rapeseed cultivars used in this experiment and their critical information

品种名称(代号)	品种类型	选育单位	发芽率/%	发芽指数	千粒重/g
‘华油杂28’ (‘H28’)	杂交种	华中农业大学	100	0.48	4.79
‘华油杂32’ (‘H32’)	杂交种	华中农业大学	99.3	0.44	4.26
‘华油杂188’ (‘H188’)	杂交种	华中农业大学	98.7	0.45	5.52
‘华油杂10号’ (‘H10’)	杂交种	华中农业大学	96.0	0.28	3.82
‘华油杂158’ (‘H158’)	杂交种	华中农业大学	100	0.46	3.34
‘华协油82’ (‘H82’)	杂交种	华中农业大学	90.7	0.35	2.86
‘华837’ (‘H837’)	杂交种	华中农业大学	100	0.47	3.75
‘Z159’	杂交种	华中农业大学	96.7	0.33	3.73
‘圣光128’ (‘S128’)	杂交种	华中农业大学	100	0.45	4.45
‘圣光168’ (‘S168’)	杂交种	华中农业大学	98.7	0.48	5.44
‘青杂2号’ (‘Q2’)	杂交种	青海省农林科学院	97.3	0.43	3.83
‘青杂4号’ (‘Q4’)	杂交种	青海省农林科学院	95.3	0.46	3.40
‘青杂5号’ (‘Q5’)	杂交种	青海省农林科学院	99.3	0.42	3.47
‘青杂6号’ (‘Q6’)	杂交种	青海省农林科学院	100	0.47	3.94
‘青杂11号’ (‘Q11’)	杂交种	青海省农林科学院	100	0.48	4.38
‘沔油520’ (‘F520’)	杂交种	湖南省农业科学院	98.7	0.46	3.34
‘丰油730’ (‘F730’)	杂交种	湖南省农业科学院	100	0.44	3.24
‘沔油958’ (‘F958’)	杂交种	湖南省农业科学院	100	0.45	3.42
‘沔油823’ (‘F823’)	杂交种	湖南省农业科学院	99.3	0.48	3.30
‘沔油792’ (‘F792’)	杂交种	湖南省农业科学院	98.7	0.49	4.04
‘沔油737’ (‘F737’)	杂交种	湖南省农业科学院	100	0.49	3.05
‘中双9号’ (‘Z9’)	常规种	中国农业科学院油料作物研究所	98.7	0.42	3.05
‘中双11号’ (‘Z11’)	常规种	中国农业科学院油料作物研究所	97.3	0.39	3.05

按周欣等(2019)方法计算各品种渍水处理的相对出苗率和相对出苗指数:

$$\text{相对出苗率} = \frac{\text{渍水处理出苗率}}{\text{对照出苗率}} \times 100\%$$

$$\text{相对出苗指数} = \frac{\text{渍水处理出苗指数}}{\text{对照出苗指数}}$$

1.2.2 不同耐渍性品种质膜透性对渍水的反应

以筛选出的耐渍性不同的品种‘H32’(耐渍)、‘Z11’(中等耐渍)和‘F958’(渍水敏感)为材料,按方法2用超纯水分别进行浸水处理4、8、12、16、20、24、28、32、36、40、44和48 h,每处理6次重复。每个浸水处理完成后,选其中3个重复的种子按方法2测定出苗率,其余3个重复用于测定浸种液氧化还原电位(Em)和温度(ORP氧化还原测试计,上海玖析科学仪器有限公司)、pH值(雷磁pH计,上海仪电科学仪器股份有限公司)、溶解氧含量(JPBJ-608型便携式溶解氧测定仪,上海仪电科学仪器股份有限公司)和电导率(新型DDS-12DW微机型电导率仪,上海仪电科学仪器股份有限公司),以及Na⁺和K⁺浓度(FD6410火焰光度计,上海仪电科学仪器股份有限公司)。然后,将种子与浸种液一起置于-20℃冰箱中冰冻48 h杀死种子,取出融冰后在室温下振荡8 h,静置5 min后测定总电导率和总Na⁺、K⁺浓度。同时测定超纯水电导率、Na⁺和K⁺浓度。按下式计算浸水处理相对电导率和相对Na⁺和K⁺浓度。

$$\text{相对电导率} = \frac{\text{浸种液电导率} - \text{超纯水电导率}}{\text{总电导率} - \text{超纯水电导率}} \times 100\%$$

$$\text{离子相对浓度} = \frac{\text{浸种液离子浓度} - \text{超纯水离子浓度}}{\text{总离子浓度} - \text{超纯水离子浓度}} \times 100\%$$

按于天仁和季国亮(2004)方法将浸种液氧化还原测试计读数(Em)转换成pH 7.0和30℃条件下的Eh值。

取各品种浸水处理12、24、36和48 h的种子样品及其同期未浸水对照种子样品,应用TBA法(李子芳和吴锡冬2016)测定MDA含量,计算相对MDA含量(=处理/对照×100%)。每处理重复测定3次。

1.3 数据处理

应用SPSS20.0统计软件进行方差分析,采用

Duncan’s多重比较检验不同处理间平均数差异显著性;以相对出苗率和相对出苗指数为指标,按最小距离法对不同品种的耐渍性进行聚类分析。数据以平均值±标准误表示。

2 实验结果

2.1 不同耐渍鉴定方法下油菜品种的出苗差异

表2显示,在3种渍水处理方法下不同品种的相对出苗率和相对出苗指数均存在极显著差异,23个品种的平均相对出苗率和相对出苗指数均以方法1最高,方法2最低,但方法2与方法3的差异远小于与方法1的差异。在方法1中,相对出苗率最高的为‘H188’,最低的为‘H82’;相对出苗指数最高的为‘H10’,最低的为‘Q11’。在方法2中,相对出苗率最高的为‘H28’,相对出苗指数最高的为‘F823’,相对出苗率和相对出苗指数最低的均为‘F958’。在方法3中,相对出苗率最高的为‘F792’,最低的为‘F958’;相对出苗指数最高的为‘F730’,最低的为‘F958’和‘Q5’(表2)。

以相对出苗率和相对出苗指数为变量进行聚类分析,可将不同品种分为耐渍、中等耐渍及渍水敏感型3类(表3)。依据方法1鉴定结果,耐渍品种有11个,占47.8%;中等耐渍品种6个,占26.1%;渍水敏感品种6个,占26.1%。依据方法2和3鉴定结果的品种分类完全一致,耐渍品种有9个,占39.1%;中等耐渍品种10个,占43.5%;渍水敏感品种4个,占17.4%(表3)。依据不同鉴定方法计算出各类品种平均相对出苗率及平均相对出苗指数如表4所示,不同类型品种差异显著。在3种鉴定方法中,‘H188’‘H837’‘F737’‘F823’均被分为耐渍品种,‘H82’和‘Q4’均被分为渍水敏感品种;然而,‘H10’‘S168’‘Z9’‘Z11’在方法1中被分为耐渍品种,而在方法2和方法3中被分为中等耐渍品种。

2.2 不同浸水时间对耐渍性不同品种出苗的影响

依据方法2和方法3的鉴定结果,选择‘H32’(耐渍)、‘Z11’(中等耐渍)和‘F958’(渍水敏感)等3个品种进行不同浸水时间处理,图1显示,当浸水处理时间在12 h之内时3个品种的相对出苗率差异较小,在浸水时间超过12 h后不同品种的相对出苗率差异逐渐增大。随着浸水时间延长,‘H32’相对出苗

表2 不同鉴定方法下各品种渍水处理的种子相对出苗率和相对出苗指数
Table 2 Relative seedling emergence rate and index of various cultivars subjected to waterlogging by different methods

品种(代号)	相对出苗率/%			相对出苗指数		
	方法1	方法2	方法3	方法1	方法2	方法3
‘H28’	87.2	88.8	77.1	0.51	0.39	0.39
‘H32’	90.6	88.6	86.7	0.53	0.45	0.48
‘H188’	103.9	74.8	82.8	0.75	0.41	0.47
‘H10’	98.4	50.0	59.4	0.83	0.35	0.40
‘H158’	93.7	79.3	75.9	0.57	0.38	0.45
‘H82’	53.8	15.3	34.9	0.34	0.08	0.17
‘Q2’	65.2	22.0	51.4	0.34	0.11	0.26
‘Q4’	69.7	9.8	34.9	0.50	0.05	0.18
‘Q5’	97.9	11.6	31.2	0.62	0.07	0.16
‘Q6’	73.0	47.5	54.8	0.42	0.23	0.31
‘Q11’	59.4	35.7	53.3	0.31	0.15	0.29
‘H837’	97.2	86.8	87.0	0.63	0.43	0.50
‘Z159’	68.0	45.7	58.9	0.40	0.23	0.33
‘S128’	84.8	48.0	63.5	0.54	0.20	0.34
‘S168’	97.9	45.2	61.4	0.64	0.20	0.36
‘F520’	85.8	49.0	54.5	0.43	0.25	0.31
‘F730’	96.0	80.7	81.1	0.51	0.44	0.68
‘F958’	95.6	5.2	30.7	0.67	0.03	0.16
‘F823’	94.3	83.0	91.2	0.67	0.46	0.55
‘F792’	95.5	78.8	91.7	0.64	0.36	0.60
‘F737’	94.0	87.6	88.1	0.65	0.45	0.47
‘Z9’	93.4	42.4	56.8	0.66	0.23	0.37
‘Z11’	98.8	39.8	54.7	0.71	0.20	0.32
平均	86.7	52.8	63.9	0.55	0.26	0.37
方差分析结果						
<i>F</i>	92.44	173.33	84.14	45.94	74.25	47.02
<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

表3 不同鉴定方法的品种耐渍性分类
Table 3 Classification on the tolerance of various cultivars to waterlogging by different methods

鉴定方法	耐渍品种	中等耐渍品种	渍水敏感品种
方法1	‘H188’ ‘H10’ ‘H837’ ‘Q5’ ‘S168’ ‘F958’ ‘F823’ ‘F792’ ‘F737’ ‘Z9’ ‘Z11’	‘H28’ ‘H32’ ‘H158’ ‘S128’ ‘F520’ ‘F730’	‘H82’ ‘Q2’ ‘Q4’ ‘Q6’ ‘Q11’ ‘Z159’
方法2和3	‘H28’ ‘H32’ ‘H188’ ‘H158’ ‘H837’ ‘F730’ ‘F823’ ‘F792’ ‘F737’	‘H10’ ‘Q2’ ‘Q6’ ‘Q11’ ‘Z159’ ‘S128’ ‘S168’ ‘F520’ ‘Z9’ ‘Z11’	‘F958’ ‘H82’ ‘Q4’ ‘Q5’

表4 在3种鉴定方法下不同耐渍级别品种的平均相对出苗率和平均相对出苗指数
Table 4 Mean relative seedling emergence rate and index of different tolerance grade cultivars to waterlogging identified by 3 methods

耐渍性等级	相对出苗率/%			相对出苗指数		
	方法1	方法2	方法3	方法1	方法2	方法3
耐渍	97.0±0.9 ^a	83.1±1.6 ^a	77.9±2.9 ^a	0.68±0.00 ^a	0.42±0.00 ^a	0.51±0.00 ^a
中等耐渍	89.7±1.8 ^b	41.6±2.7 ^b	46.5±2.3 ^b	0.51±0.00 ^b	0.20±0.00 ^b	0.33±0.00 ^b
渍水敏感	64.8±2.6 ^c	10.5±1.8 ^c	21.8±2.7 ^c	0.39±0.00 ^c	0.06±0.00 ^c	0.17±0.00 ^c

表中同列不同小写字母代表*P*<0.05水平上的差异显著性。

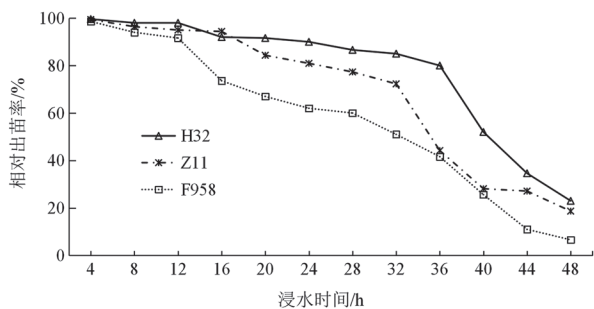


图1 在不同浸水时间下耐渍性不同品种的相对出苗率变化
Fig. 1 Changes in relative seedling emergence rates of rapeseed cultivars with different tolerances under various waterlogging duration

率曲线在浸水36 h时出现一个大的折点, 在浸水48 h时降至23%; ‘Z11’相对出苗率在浸水32 h时出现大的折点, 在浸水48 h时降至18.7%; ‘F958’相对出苗率在浸水12 h时出现一个大的折点, 在浸水36 h时出现一个小的折点, 在浸水48 h时降至6.6% (图1)。
2.3 不同浸水时间对耐渍性不同品种浸种液氧化还原电位和溶解氧含量的影响

图2-A显示, 随着浸水时间延长, 3品种浸种液 Eh值不断下降, 其中‘Z11’和‘F958’浸种液下降更快, 在浸种4 h时即降至300 mV以下, 而‘H32’浸种液 Eh值在浸水8 h时降至300 mV以下, 且在浸水时间短于16 h时一直处于3品种的最高水平。在浸水48 h时不同品种浸种液 Eh, ‘H32’降至-165 mV, ‘Z11’降至-148 mV, 而‘F958’降至-199 mV (图2-A)。随着浸水时间延长, 不同品种浸种液溶解氧含量变化趋势与 Eh 相似(图2-B)。在浸水时间短于44 h

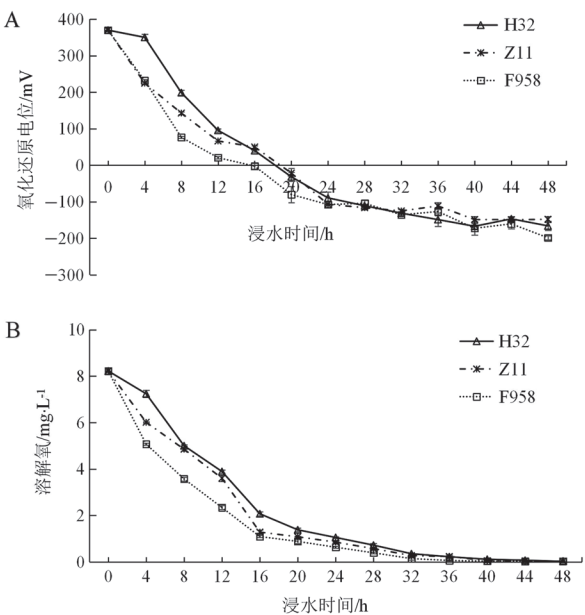


图2 不同浸水时间下耐渍性不同品种浸种液氧化还原电位(A)和溶解氧含量(B)变化
Fig. 2 Changes of redox potential (A) and dissolved oxygen content (B) in the seed soaking solutions of rapeseed cultivars with different tolerances under various waterlogging duration

时, ‘H32’浸种液溶解氧含量始终高于另2个品种。‘H32’浸种液溶解氧含量在浸水44 h时趋于0, 而‘Z11’和‘F958’浸种液溶解氧含量分别在浸水40 h和36 h时趋于0。

2.4 不同浸水时间对耐渍性不同品种种子细胞膜透性影响

2.4.1 电解质渗漏率

随着浸水时间延长, 三品种浸种液的相对电

导率不断升高(图3-A)。其中,‘H32’在浸水36~40 h, ‘Z11’分别在浸水12~16 h和36~44 h, ‘F958’分别在浸水8~12 h、20~24 h和44~48 h, 浸种液相对电导率升高较快。

2.4.2 钾钠离子渗漏率

图3-B和C显示, 随着浸水时间延长, 浸种液 Na^+ 、 K^+ 相对浓度呈升高趋势, 但均以‘H32’浸种液

最低。不同品种浸种液 Na^+ 相对浓度, ‘H32’在浸水40~44 h快速升高, ‘Z11’分别在浸水4~12 h和20~24 h快速升高, 而‘F958’分别在浸水8~12 h、20~28 h和40~44 h快速升高。‘F958’浸种液 Na^+ 相对浓度在浸水时间 ≤ 24 h 时小于‘Z11’浸种液, 但二者间差异不大, 当浸水时间长于24 h时超过‘Z11’浸种液(图3-B)。 K^+ 相对浓度与‘F958’浸种液差异较大, 但在浸水时间 ≤ 36 h 时与‘H32’差异较小(图3-C)。 K^+ 相对浓度在浸水时间 ≤ 32 h 时升高较快, 但浸水时间超过32 h后变化平缓; ‘Z11’和‘F958’浸种液相对 K^+ 浓度在浸水28~44 h 变化较缓, 但在其他时段升高较快(图3-C)。

2.5 不同浸水时间对耐渍性不同品种种子MDA含量的影响

图4显示, 随着浸水时间延长, 三品种种子MDA相对含量均呈上升趋势, 但在浸水时间为12 h和24 h时品种间差异不显著; ‘H32’种子MDA相对含量在浸水36 h时显著低于‘F958’种子, 在浸水48 h时显著低于‘Z11’种子, 而‘Z11’种子MDA相对含量在浸水36 h和48 h时与‘F958’差异不显著。

3 讨论

本研究显示, 不同品种胚根伸长期耐渍性存在较大差异, 进一步验证了油菜在耐渍性上存在丰富的遗传变异(范其新等2005; 张学昆等2007; 李云等2012), 为油菜耐渍性品种改良提供了条件。可靠的鉴定方法是耐渍品种筛选和培育的基础。本研究采用3种方法对不同品种的耐渍性进行鉴定, 但鉴定结果并不完全一致, 其中方法2与方法3的结果接近, 但与方法1即陈洁等(2006)的方法的结果差异较大。本研究有2个品种(‘H10’和‘Z9’)与陈洁等(2006)的研究相同, 按照方法1鉴定得出的结论也与陈洁等(2006)的一致, 即均被鉴定为耐渍品种。然而, 按方法2和方法3该2品种均被鉴定为中等耐渍品种。陈洁等(2006)的鉴定方法是采用浸水12 h处理。本研究显示, 只有在浸水时间超过12 h时不同品种的相对出苗率才能拉开差距; 同时, 渍水敏感品种‘F958’只有在浸水时间长于12 h时相对出苗率才出现大的折点。另外, 按方法1鉴定, ‘H188’的相对出苗率达到103.9%, 说明浸水12

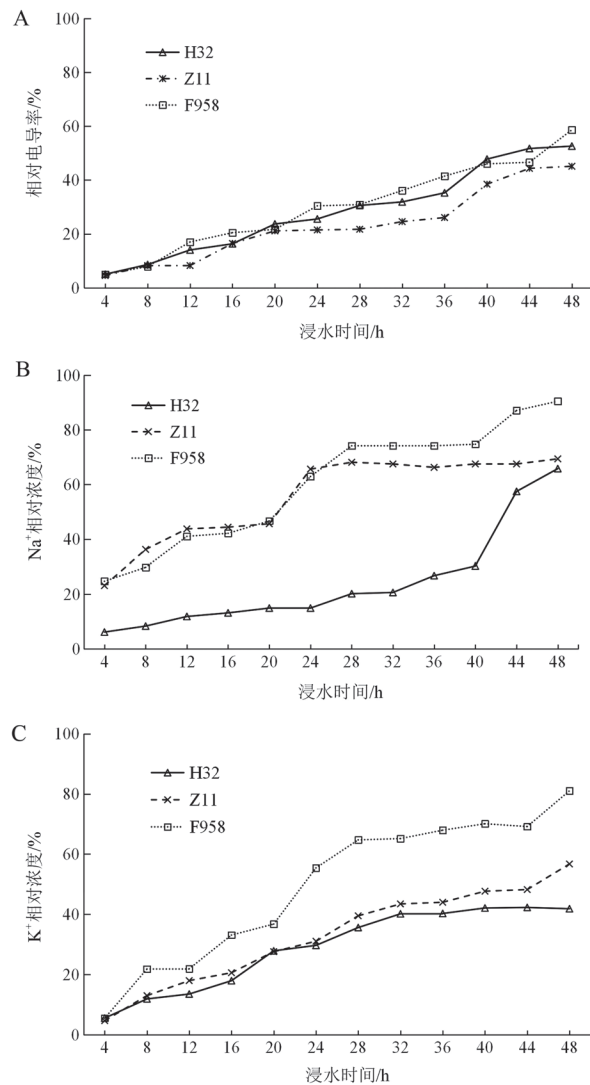


图3 不同浸水时间下耐渍性不同品种种子细胞膜透性变化

Fig. 3 Changes in plasma membrane permeability of the waterlogged seeds of rapeseed cultivars with different tolerances under various waterlogging duration

A: 相对电导率; B: Na^+ 相对浓度; C: K^+ 相对浓度。

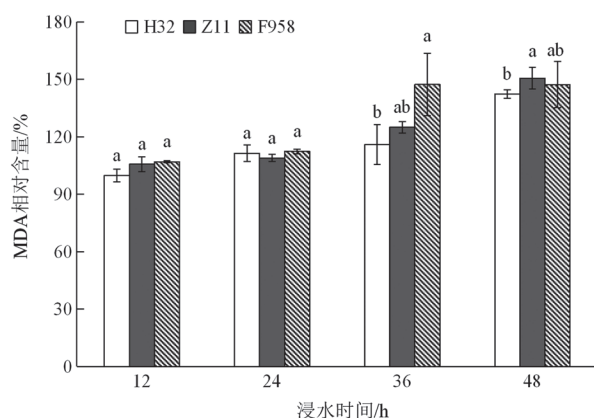


图4 不同浸水时间下耐渍性不同品种种子MDA相对含量变化

Fig. 4 Changes of relative MDA content in the waterlogged seeds of rapeseed cultivars with different tolerances under varying inundating duration

相同浸水时间的不同小写字母表示不同品种在 $P<0.05$ 水平上的差异显著性。

h并未对其造成胁迫伤害。以上说明,在室内通过浸水处理12 h的鉴定方法尚不能准确区分不同品种的耐渍性。本研究中方法3为在土壤基质中对萌发种子进行渍水处理,比较接近田间渍水情况,而应用方法2对不同品种耐渍性进行分类的结果与方法3完全一致。因此,在陈洁等(2006)的鉴定方法基础上延长浸水处理时间对于准确鉴定油菜品种的耐渍性是必要的。本研究还显示,耐渍、中等耐渍和渍水敏感品种分别在浸水处理36、32和12 h后出现相对出苗率急速下降的现象,因此只有浸水处理时间达到36 h时才能对不同品种的耐渍性进行较好地区分。

氧化还原电位(Eh)和溶解氧含量可综合反映培养介质的通气状况,其中Eh为300 mV被认为是缺氧的阈值(于天仁和季国亮2004)。在本研究中,在浸水达到8 h时不同耐性品种的浸种液Eh均低于300 mV,但种子相对出苗率仍维持在90%以上,说明油菜种子对缺氧存在一定的耐性。随着浸水时间的延长,不同品种浸种液Eh和溶解氧含量不断下降,但‘H32’浸种液溶解氧含量在浸水时间短于44 h时处于3品种的最高水平,说明其种子在渍水条件下对氧气的消耗相对较少。在模式植物中研

究表明,植物存在“沉寂”和“逃逸”两种适应低氧或缺氧环境的策略,前者主要通过暂时性抑制能量代谢,而后者主要通过形态变化(如茎、节间和叶柄快速伸长,使器官突出水面以获取生存所需的氧气)以适应逆境胁迫(Bailey-Serres等2012; Zaman等2018)。由本研究结果推测,耐渍油菜品种可能通过“沉寂”策略适应渍水胁迫,但具体机制尚需从物质和能量代谢上进一步探讨。

在本研究中,浸种液相对电导率及 Na^+ 、 K^+ 相对浓度均随着浸水时间的延长而上升。组织浸泡液电导率可在一定程度上反映质膜的受损程度(丁飞2017)。植物在逆境胁迫下体内积累过量的活性氧(ROS),加剧膜脂过氧化作用,导致膜脂过氧化产物MDA增多和质膜透性加大,甚至造成膜系统不可逆损伤(陈红琳等2017)。ROS还可激活质膜离子通道,导致 Na^+ 、 K^+ 外渗,破坏细胞离子平衡,并引发程序性细胞死亡(Apel和Hirt 2004)。在本研究中大多数情况下,‘F958’浸种液的相对电导率及 Na^+ 、 K^+ 相对浓度均处于三品种的最高水平,尤其是在浸水时间超过24 h后其浸种液 Na^+ 、 K^+ 相对浓度显著高于另2个品种,且在浸水时间达到36 h时其种子MDA相对含量也处于三品种的最高水平,说明当渍水胁迫达到一定强度时‘F958’种子的膜脂过氧化程度和质膜受损程度明显高于另2个品种。在相同胁迫强度下,‘H32’浸种液 Na^+ 、 K^+ 相对浓度始终处于3品种的最低水平,且在浸水时间 ≥ 36 h时种子MDA相对含量也处于最低水平,说明‘H32’种子在渍水胁迫下可能具有较高的膜稳定性,具体机制还需从膜结构和膜脂代谢上加以验证。

参考文献(References)

- Apel K, Hirt H (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu Rev Plant Biol*, 55: 373–399
- Bailey-Serres J, Fukao T, Gibbs DJ, et al (2012). Making sense of low oxygen sensing. *Trends Plant Sci*, 17: 129–138
- Burgos MS, Messmer MM, Stamp P, et al (2001). Flooding tolerance of spelt (*Triticum spelta* L.) compared to wheat (*Triticum aestivum* L.)—A physiological and genetic approach. *Euphytica*, 122: 287–295
- Chen HL, Chen SH, Zheng SH, et al (2017). Effects of in-

- creasing nitrogen application on physiological characteristics and yield of winter rapeseed under waterlogging at seedling stage. *Soils*, 49 (3): 519–526 (in Chinese with English abstract) [陈红琳, 陈尚洪, 郑盛华等(2017). 增施氮素对苗期渍水胁迫冬油菜生理特性及产量的调控效应. *土壤*, 49 (3): 519–526]
- Chen J, Zhang XK, Chen L, et al (2006). Evaluation of waterlogging tolerance germplasm in rapeseed (*Brassica napus* L.) with germinated seeds with anoxic stress. *Chin J Oil Crop Sci*, 28 (2): 138–143 (in Chinese with English abstract) [陈洁, 张学昆, 谌利等(2006). 甘蓝型油菜耐湿种质资源的快速筛选. *中国油料作物学报*, 28 (2): 138–143]
- Ding F (2017). Mechanisms of melatonin alleviating low temperature stress and water stress in tomato plants (dissertation). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University (in Chinese with English abstract) [丁飞(2017). 褪黑素缓解番茄低温与水分胁迫机理研究(学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学]
- Fan QX, Zhang XK, Chen L, et al (2005). Effects of anoxic condition on germination of the yellow and black-seeded lines in *Brassica napus* L. *Chin J Oil Crop Sci*, 27 (3): 84–87 (in Chinese with English abstract) [范其新, 张学昆, 谌利等(2005). 缺氧对甘蓝型黄籽与黑籽油菜发芽的影响. *中国油料作物学报*, 27 (3): 84–87]
- Li X, Li Q, Yang T, et al (2016). Responses of plant development, biomass and seed production of direct sown oilseed rape (*Brassica napus* L.) to nitrogen application at different stages in Yangtze River Basin. *Field Crops Res*, 194: 12–20
- Li X, Zhou X, Wang G, et al (2019). Identification of growth stages sensitive to waterlogging during seedling emergence and establishment for winter oilseed rape (*Brassica napus*). *Intl J Agric Biol*, 22: 1513–1523
- Li Y, Fu SX, Qi CK (2012). Screening method on waterlogging tolerance of rapeseed seedling through morphology and physiology verification. *Chin J Oil Crop Sci*, 34 (3): 256–261 (in Chinese with English abstract) [李云, 付三雄, 戚存扣(2012). 油菜苗期耐淹性快速筛选方法的建立及验证. *中国油料作物学报*, 34 (3): 256–261]
- Li ZF, Wu XD (2016). Experimental design scheme for the effect of drought stress on content of malondialdehyde of indoor ornamental plants. *Tianjin Agric Sci*, 22 (9): 49–51 (in Chinese with English abstract) [李子芳, 吴锡冬(2016). 植物丙二醛含量测定试验设计方案. *天津农业科学*, 22 (9): 49–51]
- Lü YY, Jin Y, Fu SX, et al (2013). Physiological differences of different waterlogging-resistant *Brassica napus* L. under waterlogging stress. *Plant Physiol J*, 49 (9): 959–967 (in Chinese with English abstract) [吕艳艳, 金岩, 付三雄等(2013). 不同耐淹油菜品种的耐淹性生理差异. *植物生理学报*, 49 (9): 959–967]
- Yu QY, Liu FL, Zhang DQ (2010). The evolution analysis of quality and yield characters of new rapeseed lines tested in national winter rapeseed regional experiment in recent decade in China. *Chin Agric Sci Bull*, 26 (16): 119–123 (in Chinese with English abstract) [俞琦英, 刘凤兰, 张冬青(2010). 2000–2009年中国冬油菜区试品种品质及产量性状的演变. *中国农学通报*, 26 (16): 119–123]
- Yu TR, Ji GL (2004). Soil electrochemistry-known and unknown. Soil Science Society of China. Proceedings of the 10th National Member Congress of Soil Science Society of China and the 5th Cross-strait Soil and Fertilizer Academic Exchange Seminar (A review of Soil Science for Agriculture and Environment). Shenyang, 2004 (in Chinese) [于天仁, 季国亮(2004). 土壤电化学—已知的和未知的. 中国土壤学会. 中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集(面向农业与环境的土壤科学综述篇). 沈阳, 2004]
- Zaman MSU, Malik AI, Erskine W, et al (2018). Changes in gene expression during germination reveal pea genotypes with either “quiescence” or “escape” mechanisms of waterlogging tolerance. *Plant Cell Environ*, 42: 245–258
- Zhang SJ, Liao X, Hu XJ, et al (2013). Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape. *Acta Ecol Sin*, 33 (23): 7382–7389 (in Chinese with English abstract) [张树杰, 廖星, 胡小加等(2013). 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响. *生态学报*, 33 (23): 7382–7389]
- Zhang XK, Chen J, Wang HZ, et al (2007). Genetic difference of waterlogging tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Chin J Oil Crop Sci*, 29 (2): 98–102 (in Chinese with English abstract) [张学昆, 陈洁, 王汉中等(2007). 甘蓝型油菜耐湿性的遗传差异鉴定. *中国油料作物学报*, 29 (2): 98–102]
- Zhou X, Yao X, Nie LX, et al (2019). Effects of several plant regulators on waterlogging tolerance of *Brassica napus* during radicle growth. *Chin J Oil Crop Sci*, 41 (6): 1–7 (in Chinese with English abstract) [周欣, 姚璇, 聂立璇等(2019). 植物生长调节剂处理对油菜胚根伸长期耐渍性的影响. *中国油料作物学报*, 41 (6): 1–7]