作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2026, 52(4): 1035−1045 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.55067

油菜耐渍性快速鉴定及耐渍种质筛选

谭文清[1,2,3] 惠荣奎[1,2,3] 张凡丽[1,2,4] 覃 磊[1,2,3] 毛舒香[1,2,3] 邓力超[1,2,3]
郭一鸣[1,2,3] 曲 亮[1,2,3] 严明理[1,2,3,*]

[1] 湖南省农业科学院作物研究所, 湖南长沙 410125; [2] 岳麓山实验室, 湖南长沙 410128; [3] 湖南省杂交油菜工程技术研究中心, 湖南长沙 410125; [4] 湖南大学隆平农学院, 湖南长沙 410017

摘 要: 长江中下游是中国油菜主产区, 该区域湿润多雨易导致油菜渍害频发, 严重影响油菜的产量和品质, 因此, 建立快速鉴定油菜耐渍性的方法, 并筛选耐渍性强的油菜种质具有重要意义。本研究通过对萌发期油菜种子渍水 24 h 处理, 并根据恢复生长后的生长势、存活率、子叶和根系生长情况, 建立了一套基于分级评价的油菜耐渍性快速鉴定方法, 并基于该方法对 152 份油菜种质进行了快速鉴定, 筛选出 10 份强耐渍、34 份较耐渍、53 份一般耐渍和 55 份渍敏种质。为验证该方法的可靠性, 选取其中 32 份油菜种质, 根据《油菜耐渍性鉴定技术规程》以室内发芽期根长耐渍指数进行耐渍性验证, 结果表明, 耐渍性快速鉴定方法筛选到的强耐渍种质的根长耐渍指数极显著高于一般耐渍及渍敏种质。此外, 选取 54 份完成耐渍性快速鉴定的油菜种质进行田间耐渍性验证, 利用株高耐渍指数、一次有效分枝数耐渍指数、相对单株角果数耐渍指数和相对每角粒数耐渍指数 4 个指标, 通过主成分分析及隶属函数分析, 计算田间耐渍性综合评价 *D* 值进行耐渍性评价。结果表明, 不同种质田间耐渍性差异较大, 并发现耐渍性快速鉴定方法筛选的强耐渍种质的平均 *D* 值极显著高于一般耐渍和渍敏种质。以上结果表明, 本研究建立的油菜耐渍性快速鉴定方法具有较高的可信度, 可用于大批量种质耐渍性地快速鉴定, 并筛选强耐渍种质。最终, 结合 54 份种质耐渍性快速鉴定结果以及田间耐渍性综合评价 *D* 值, 筛选出 3 份强耐渍种质、10 份较耐渍种质以及 8 份渍敏种质, 以上结果将为今后油菜耐渍性遗传改良提供材料基础和参考依据。

关键词: 油菜; 种质; 耐渍性; 快速鉴定; 综合评价

Rapid identification of waterlogging tolerance and selection of high waterlogging tolerance germplasm resources of rapeseed (*Brassica napus* L.)

Tan Wen-Qing[1,2,3], Hui Rong-Kui[1,2,3], Zhang Fan-Li[1,2,4], Qin Lei[1,2,3], Mao Shu-Xiang[1,2,3], Deng Li-Chao[1,2,3], Guo Yi-Ming[1,2,3], Qu Liang[1,2,3], and Yan Ming-Li[1,2,3,*]

[1] Crop Research Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, Hunan, China; [2] Yuelushan Laboratory, Changsha 410128, Hunan, China; [3] Hunan Hybrid Rapeseed Engineering and Technology Research Center, Changsha 410125, Hunan, China; [4] Longping Agricultural College, Hunan University, Changsha 410017, Hunan, China

Abstract: The middle and lower reaches of the Yangtze River constitute the main rapeseed-producing region in China, characterized by a wet and rainy climate that frequently leads to waterlogging. This environmental stress severely affects both the yield and quality of rapeseed. Therefore, developing a rapid and reliable method for identifying waterlogging tolerance and screening

本研究由国家重点研发计划项目(2023YFD1201403), 湖南省农业科技创新资金项目(2024CX096), 岳麓山实验室种业专项项目(YLS-2025-ZY02016), 湖南省科技创新计划(2023RC1077)和湖南省科技人才托举工程项目(2023TJ-Z09)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFD1201403), the Agricultural Technology Innovation Fund Project of Hunan Province (2024CX096), the Yuelushan Laboratory Breeding Program (YLS-2025-ZY02016), the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2023RC1077), and the Hunan Provincial Science and Technology Talent Promotion Project (2023TJ-Z09).

* 通信作者(Corresponding author): 严明理, E-mail: mlyan@hunaas.cn

第一作者联系方式: E-mail: twq8391290618@163.com

Received (收稿日期): 2025-10-24; Accepted (接受日期): 2026-01-22; Published online (网络出版日期): 2026-02-05.

URL: https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260205.0916.002

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

waterlogging-tolerant germplasm is of great importance. In this study, we established a fast and effective method to assess waterlogging tolerance during the germination stage by subjecting seeds to 24 hours of waterlogging, followed by a graded evaluation based on growth vigor, survival rate, and the development of cotyledons and root systems after recovery. Using this method, 152 rapeseed germplasms were evaluated, resulting in the identification of 10 highly tolerant, 34 moderately tolerant, 53 generally tolerant, and 55 sensitive germplasms. To validate the reliability of this approach, 32 germplasms previously classified by the rapid method were assessed using the root waterlogging tolerance index during indoor germination, following the "Code of Practice for Identification of Waterlogging Tolerance in Rapeseed". The results showed that highly tolerant germplasms identified by the rapid method exhibited significantly higher root waterlogging tolerance indices compared to generally tolerant and sensitive ones. Furthermore, 54 germplasms identified by the rapid method were subjected to field validation. A comprehensive field waterlogging tolerance index (*D* value) was calculated using principal component analysis (PCA) and membership function analysis based on four indices: plant height waterlogging tolerance index, number of primary effective branches waterlogging tolerance index, number of siliques per plant waterlogging tolerance index, and number of seeds per silique waterlogging tolerance index. The results revealed significant variation in field waterlogging tolerance among germplasms, with the *D* values of highly tolerant lines significantly exceeding those of the generally tolerant and sensitive ones. These findings indicate that the rapid identification method is highly reliable and enables large-scale, efficient screening of waterlogging-tolerant germplasm. Finally, by integrating results from both the rapid identification method and field evaluations, three highly tolerant, ten moderately tolerant, and eight sensitive germplasms were confirmed. These results provide a valuable genetic resource and practical reference for future breeding efforts aimed at improving waterlogging tolerance in rapeseed.

Keywords: rapeseed; germplasm; waterlogging tolerance; rapid identification; comprehensive evaluation

油菜(*Brassica napus* L.)是我国最重要的油料作物之一, 长江流域是我国油菜的主要种植区域, 该区域常年湿润多雨且实行水稻-油菜轮作制度, 土壤黏重、透气性差, 极易产生湿(渍)害, 影响油菜正常生长, 导致产量和品质下降[1]。因此, 快速鉴定和筛选耐渍性强的优异油菜种质具有重要意义。

油菜的耐渍性是一个十分复杂的数量性状, 不同种质耐渍性存在较大差异。在耐渍性评价方面, 以种子萌发期渍水处理、苗期淹水处理、以及田间渍水处理进行评价报道较多。范其新[2]对露白油菜种子进行水淹 24 h 处理, 根据其后续生长情况鉴定耐渍性, 发现渍水后其长势非常弱, 根长一般不超过 1 cm, 根毛很少甚至没有, 与对照相比差异十分明显。在此基础上, 陈洁等[3]、张学昆等[4]对其方法进行改良, 仍取发芽期露白种子进行淹水处理, 但以细砂床代替滤纸床固定幼苗, 且将淹水时间缩短为 12 h, 取得了良好效果。此后, 许晶等[5]对来自油菜产业体系的 270 份油菜资源在发芽期淹水处理 12 h, 根据相对成苗率进行耐渍性评价。陈雅慧[6]对 505 份甘蓝型自交系油菜群体在萌发期进行淹水处理 12 h, 通过测定表型与生理指标, 从而筛选出耐渍(淹)性强的种质资源。郭奕邑[7]利用 199 份甘蓝型油菜种质在发芽期进行渍水胁迫处理 12 h, 处理结束恢复生长 6 d 后, 测量相关性状(芽长、芽鲜重、根长和根鲜重), 以评价油菜发芽期的耐渍性, 并发现渍水胁迫对根长的影响最大。

李云等[8]在油菜幼苗子叶长至平展时全淹 6 d 以模拟渍害胁迫, 对 50 份油菜种质进行耐渍性鉴定, 将鉴定结果与已知耐渍系数的材料比较, 初步建立了一套油菜苗期耐渍性筛选的方法。在此基础上, 孙文韬等[9]以石英砂为生长介质, 于幼苗子叶平展时全淹 6 d, 并根据恢复生长后存活率、叶片生长情况进行耐渍性评价。

在油菜田间耐渍(湿)性评价方面, 陈娟妮和梁颖[10]通过田间渍水胁迫对 32 个长江流域主要甘蓝型油菜品种进行苗期耐渍性鉴定, 成功筛选出 6 个耐渍性强的品种、3 个耐渍性差的品种, 并分析认为根系活力、总干重、脯氨酸含量可以作为甘蓝型油菜苗期耐渍性鉴定的指标。此外, 李浩杰等[11]通过室内水淹和田间模拟湿害对 15 份甘蓝型油菜种质进行耐湿性鉴定, 发现室内耐湿指标、田间耐湿指标的隶属函数值与产量性状具有显著或极显著的相关关系, 表明甘蓝型油菜不同耐湿性鉴定方法鉴定结果是一致的。高建芹等[12]对适合长江下游种植的 60 份甘蓝型油菜种质进行露白期和子叶期耐渍性鉴定, 并根据鉴定结果, 选取 9 份不同耐渍类型材料于苗期(3 叶期)淹水 7 d 处理进行田间耐渍性评价, 结果表明, 苗期渍害处理后, 单株有效分枝数、有效角果数、每角粒数及产量下降, 千粒重增加, 其中, 3 份材料 P1、P39 和 P47 与露白期、子叶期的鉴定结果高度一致; 此外, 相关性分析结果表明, 种子露白期耐渍性指标相对成苗率、相对根长、相对茎长和相对鲜重及子叶期耐渍性指标相对成苗率、相对根长和相对茎长与苗期渍害处理后成熟期的株高、有效分枝数、单株有效角果数、每角粒数和单株产量等产量性状均呈显著或极显著正相关, 研究

认为, 发芽种子的相对成苗率、相对根长、相对茎长和相对鲜重等耐湿性指标可以预测油菜品种田间耐渍性, 露白期和子叶期鉴定结果略有差异。

目前对油菜耐渍性鉴定多集中在某一生长时期, 且方法各异, 但发布的农业行业标准《油菜耐渍性鉴定技术规程》(NY/T-3067-2016) [13]建立了油菜室内萌发期、室内苗期、田间成熟期耐渍性鉴定技术规程。最近, 许梦然等[14]建立了一套油菜全生育期极端耐渍种质评价鉴定体系, 确定了室内萌发期、田间苗期(5~6 叶期)和田间花期(盛花期)的渍水处理时间分别为 24 h、21 d 和 21 d, 明确了相应耐渍指标, 对 8 份甘蓝型油菜种质在上述 3 个时期的耐渍性进行综合评价, 鉴定到 1 份在全生育期极端耐渍的油菜种质中双 9 号, 以上评价体系为油菜耐渍种质筛选提供了重要参考依据。然而目前已报道的油菜耐渍性鉴定方法普遍周期长、批量少, 尚未建立快速、高效的大规模评价体系。本研究通过对油菜种子萌发期渍水处理 24 h 并在其恢复生长 5~6 d 后进行多个性状的表型鉴定, 采用分等级策略建立了一种油菜耐渍性快速鉴定方法, 并结合《油菜耐渍性鉴定技术规程》(NY/T-3067-2016)和田间耐渍性鉴定进行验证, 结果均表明, 本研究建立的耐渍性快速鉴定方法具有较高的可信度, 可用于今后快速且大批量筛选强耐渍的优异油菜种质。

1　材料与方法

1.1　研究材料

本研究所用的 152 份油菜种质为湖南省作物研究所提供。

1.2　研究方法

1.2.1　*油菜耐渍性快速鉴定*　(1) 选取饱满的油菜种子 120~150 粒, 放入铺有双层湿润滤纸的培养皿中, 然后置于 25℃恒温培养箱中暗培养 36~48 h; (2) 选取 40 粒胚根长度一致(3~5 mm)的萌发种子置于 10 mL 加满水的离心管中, 于 25℃恒温培养箱中渍水处理 24 h (遮光); (3) 将渍水处理后的种子置于铺有双层滤纸的培养皿中, 放入恒温培养箱中(25℃, 光照 16 h /黑暗 8 h, 光照强度 18 μmol m^{-2} s^{-1})正常生长 5~6 d, 期间保持滤纸湿润; (4) 根据恢复生长情况, 采用分等级的策略对其耐渍性进行评价。

1.2.2　*室内耐渍性评价*　参照《油菜耐渍性鉴定技术规程》中室内发芽期耐渍性鉴定方法, 30 粒露白种子为一个重复, 处理和对照各 3 个重复, 以根长耐渍性指数(处理根长/对照根长)对其耐渍性进行评价。

1.2.3　*油菜田间耐渍性评价*　田间试验点位于株洲市农业科学研究所科研试验基地, 试验田前茬作物为中稻, 土壤类型为沙质黏壤土。每份种质处理组和对照组各设置 3 个重复, 每个重复种植 4 行, 行距为 33 cm, 每行定植 15 株。处理组分别进行苗期渍水和花期渍水处理, 对照组不做任何渍水处理, 按照正常田间管理进行。

苗期渍水: 在油菜生长至 60 d 左右时进行苗期渍水处理(白天日均气温 10℃左右), 渍水水位与土面保持一致。渍水时间持续 15 d, 渍水结束后及时排干积水, 田间水位恢复到渍水前的状态。

花期渍水: 于油菜盛花期渍水 10 d, 渍水水位与土面保持一致, 渍水结束后及时排干积水。

性状测定: 花期渍水结束后, 恢复生长一个月, 于荚果期调查株高、一次有效分枝数、单株角果数、每角粒数, 每个重复调查 6~8 个单株。

株高耐渍指数=处理组平均株高/对照组平均株高;

一次有效分枝数耐渍指数=处理组平均一次有效分枝数/对照组平均一次有效分枝数;

单株角果数耐渍指数=处理组平均单株角果数/对照组平均单株角果数;

每角粒数耐渍指数=处理组平均每角粒数/对照组平均每角粒数。

1.2.4　*数据分析*　采用 Microsoft Excel 进行数据的基础分析, IBM SPSS Statistics 21.0 [15]进行主成分分析。采用隶属函数等方法对不同种质的耐渍性进行综合评价。首先, 通过计算各项指标的耐渍指数, 利用主成分分析降维, 旨在提取累积贡献率超过 85%的主成分。这些主成分将替代原有的耐渍指数, 以更有效地评估甘蓝型油菜的耐渍性。隶属函数值计算公式:

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}),\ i = 1, 2, \ldots, n$$

式中 X_i 表示第 i 个综合指标测定值, $X_{\min}$、$X_{\max}$ 分别表示参试种质某一指标的最小值和最大值。

根据主成分的贡献率大小, 计算其权重:

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i},\ i = 1, 2, \ldots, n$$

式中 W_i 表示第 i 个综合指标的权重, V_i 则表示该指标的贡献率。

利用各种质在不同指标上的隶属函数值及其权

重, 计算 54 份种质的耐渍性综合评价值(*D* 值):

$$D=\sum_{i=1}^{n}\left[\mu\left(X_i\times W_i\right)\times W_i\right],\ i=1, 2, \ldots, n$$

根据各种质 *D* 值大小进行田间耐渍性评价。

2 结果与分析

2.1 油菜耐渍性快速鉴定

为快速且准确鉴定油菜的耐渍性, 本研究前期对不同油菜种质在种子萌发期(根长 3~5 mm)进行了不同时长(12、18、24 和 36 h)的渍水处理, 发现不同种质在种子萌发期渍水处理 24 h, 恢复生长 5~6 d 后, 其生长势、存活率、能否长出子叶和根系等方面存在较大差异, 可采用分等级的策略对其进行快速鉴定(图 1)。其中, 一级(强耐渍)种质: 长势较好, 50%以上种子能存活并长出子叶和新的根系, 且 50%以上能直立生长; 二级(较耐渍)种质: 长势一般, 50%以上种子能存活且长出子叶和新的根系, 但直立生长的幼苗数不超过 50%; 三级(一般耐渍)种质: 长势较差, 长出子叶的幼苗数大于 20%, 但长出根系的幼苗数不超过 50%; 四级(渍敏)种质: 长势极差, 能长出子叶和根系的幼苗数均不超过 20%。采用该方法, 可对不同种质进行耐渍性快速鉴定, 其中, 强耐渍种质在生长势、存活率等方面明显强于一般耐渍种质及渍敏种质。

基于该方法, 对 152 份油菜种质进行了耐渍性快速鉴定, 筛选出一级(强耐渍)种质 10 份、二级(较耐渍)种质 34 份、三级(一般耐渍)种质 53 份和四级(渍敏)种质 55 份(表 1)。

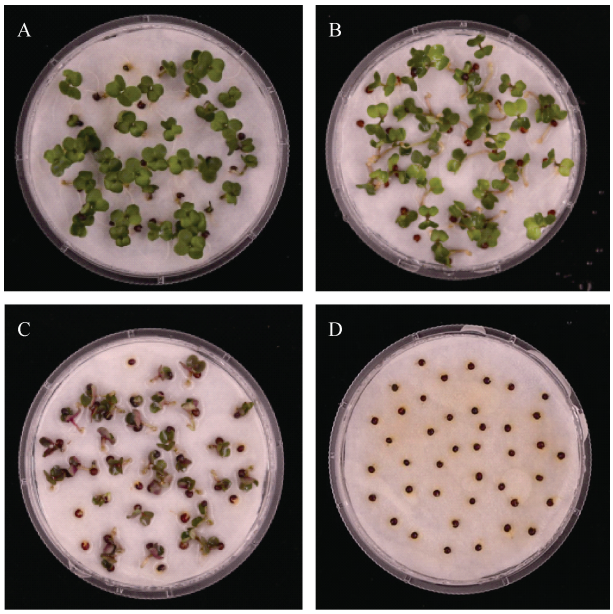


图 1 不同油菜种质萌发期耐渍性快速鉴定

Fig. 1 Rapid identification of waterlogging tolerance of different rapeseed germplasms at germination stage

A, 一级(强耐渍)种质; B, 二级(较耐渍)种质; C, 三级(一般耐渍)种质; D, 四级(渍敏)种质。

A, level 1 (high waterlogging tolerance) germplasm; B, level 2 (moderate waterlogging tolerance) germplasm; C, level 3 (general waterlogging tolerance) germplasm; D, level 4 (waterlogging sensitive) germplasm.

表 1 基于油菜耐渍性快速鉴定方法的 152 份油菜种质耐渍性鉴定结果

Table 1 The results of waterlogging tolerance identification of 152 rapeseed germplasms based on the rapid identification method

耐渍等级 Waterlogging tolerance grade	种质数量 Number of germplasms	种质名称 Germplasms name
一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	10	Y4, Y81, Y88, Y97, Y114, Y118, Y123, Y2B, YLS004, YLS019
二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	34	Y5, Y9, Y14, Y66, Y68, Y69, Y74, Y80, Y82, Y89, Y91, Y92, Y96, Y99, Y103, Y105, Y109, Y112, Y115, Y168, Y453, Y477, Y478, Y486, Y499, Y652, Y656, Y662, Y765, Y831, ZS11, X5B, YLS072, YLS277
三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	53	Y3, Y17, Y19, Y52, Y56, Y46, Y70, Y72, Y76, Y83, Y85, Y93, Y95, Y102, Y110, Y116, Y117, Y149, Y155, Y158, Y159, Y188, Y200, Y216, Y224, Y347, Y476, Y482, Y593, Y594, Y595, Y642, Y643, Y646, Y702, Y734, Y745, Y758, Y763, Y769, Y779, Y796, Y799, Y810, Y818, Y820, Y829, Y858, Y890, Y892, Y939, Y952, 20R
四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	55	Y10, Y33, Y67, Y71, Y75, Y77, Y79, Y84, Y86, Y87, Y90, Y94, Y106, Y111, Y119, Y121, Y122, Y124, Y128, Y129, Y139, Y141, Y160, Y161, Y170, Y172, Y180, Y190, Y196, Y217, Y253, Y308, Y546, Y588, Y591, Y606, Y637, Y639, Y663, Y670, Y684, Y690, Y691, Y724, Y738, Y748, Y764, Y767, Y788, Y789, Y800, Y805, Y951, T99, T927

2.2　油菜室内耐渍性评价

为验证通过本研究耐渍性快速鉴定方法筛选得到的油菜种质耐渍性差异的可信度, 选取已完成耐渍性快速鉴定的 32 份种质, 其中, 强耐渍、较耐渍、一般耐渍和渍敏种质各 8 份, 基于《油菜耐渍性鉴定技术规程》中室内发芽期耐渍性评价方法, 利用根长耐渍指数对其进行验证。结果表明, 基于油菜耐渍性快速鉴定方法筛选到的强耐渍种质平均根长耐渍指数均显著高于一般耐渍种质及渍敏种质(图 2 和表 2)。因此, 本研究建立的耐渍性快速评价方法具有较高的可信度。

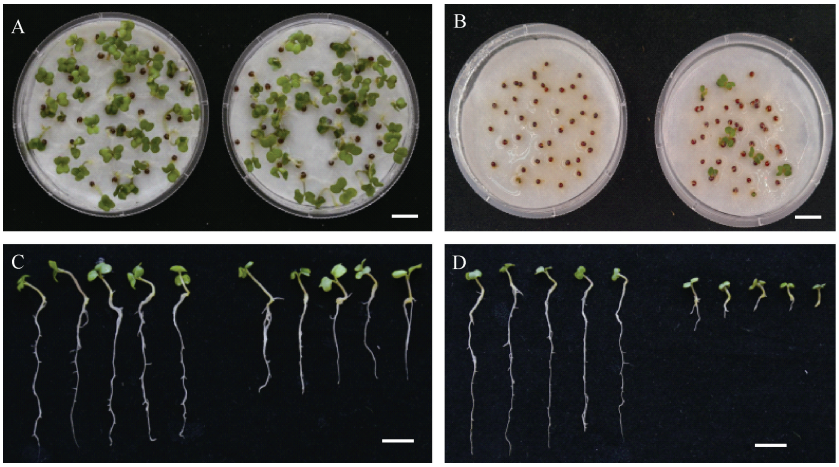


图 2　快速鉴定方法筛选的油菜种质耐渍性验证

Fig. 2　Validation of the waterlogging tolerance of rapeseed germplasm based on the rapid identification method

A, B: 基于耐渍性快速鉴定方法筛选到的强耐渍种质和渍敏种质; C, D: 基于《油菜耐渍性鉴定技术规程》对耐渍性快速鉴定方法筛选到的强耐渍种质和渍敏种质进行耐渍性验证; C, D 左边均为对照, 右边均为处理。标尺为 1 cm。

A, B: based on the rapid identification method of waterlogging resistance, strong waterlogging-tolerant germplasm and waterlogging sensitive germplasm were screened, respectively. C, D: based on the "code of practice for identification of waterlogging tolerance in rapeseed", the strong waterlogging-tolerant germplasm and waterlogging-sensitive germplasm screened by the rapid identification method of waterlogging tolerance were validated, respectively. Both C and D, the left side shows the control, and the right side shows the treatment. Scale bar: 1 cm.

表 2　已完成油菜耐渍性快速鉴定的 32 份油菜种质不同耐渍等级间平均根长耐渍指数差异

Table 2　Differences in the mean root length waterlogging tolerance index among different waterlogging tolerance grades of 32 rapeseed germplasms identified by the rapid identification method

耐渍性等级 Waterlogging tolerance grade	种质数 Number of germplasms	平均根长耐渍性指数 Average root length waterlogging tolerance index
一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	8	0.41 A
二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	8	0.30 AB
三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	8	0.20 B
四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	8	0.16 B

同一列中不同大写字母表示不同耐渍性等级间平均根长耐渍指数存在极显著差异($P < 0.01$)。

Different capital letters in a column indicate highly significant differences in the mean waterlogging tolerance index of average root length among different waterlogging tolerance grades ($P < 0.01$).

2.3　油菜耐渍性田间评价

为进一步确认基于油菜耐渍性快速鉴定方法筛选到的不同耐渍种质田间耐渍性差异, 通过对 54 份完成了耐渍性快速鉴定的油菜种质(其中, 一级(强耐渍)种质 8 份, 二级(较耐渍)种质 23 份, 三级(一般耐渍)种质 10 份, 四级(渍敏)种质 13 份)进行田间耐渍性鉴定, 结果表明其田间耐渍性差异较大, 株高耐渍指数变异范围为 0.68~0.99, 一次有效分枝数耐渍指数变异范围为 0.48~0.96, 单株角果数耐渍指数变异范围为 0.20~0.99, 每角粒数耐渍指数变异范围为 0.46~0.99, 并由此筛选出了一批田间强耐渍种质和渍敏种质(图 3)。



图 3 油菜田间耐渍性评价

Fig. 3 Field waterlogging tolerance evaluation of rapeseed

CK: 对照; T: 渍水处理。Y66、Y74 和 Y2B 为田间强耐渍或较耐渍种质; Y10、Y129 和 Y72 为田间渍敏种质。标尺为 1 cm。

CK: control; T: waterlogging treatment. Y66, Y74, and Y2B were the highly or moderately field waterlogging tolerant germplasms; Y10, Y129, and Y72 were waterlogging-sensitive germplasms. Scale bar: 1 cm.

为进一步对 54 份油菜种质田间耐渍性进行综合评价, 对上述 4 个指标进行主成分分析, 基于前 3 个主成分, 累计方差贡献率达 87.874%, 此时, 4 个指标的大部分信息被有效表征, 第 1 主成分的特征值为 2.133, 方差贡献率达到 53.313%; 第 2 主成分的特征值为 0.710, 方差贡献率为 17.758%; 第 3 主成分的特征值为 0.672, 方差贡献率达到 16.803%。基于主成分载荷矩阵, 其中, 第 1 主成分与相对株高、相对一次有效分枝数、相对单株角果数、相对每角粒数均呈高度正相关, 第 2 主成分主要与相对有效分枝数呈高度正相关, 第 3 主成分主要与相对每角粒数呈高度正相关。通过计算各主成分的贡献率比重, 相应地确定其权重, 主成分 1、主成分 2 和主成分 3 的权重分别为 0.607、0.202 和 0.191。基于权重以及不同油菜种质在隶属函数值上的表现, 得到 54 份种质的田间耐渍性综合评价 *D* 值。结果表明, 54 份种质的 *D* 值范围为 0.41~1.66 (表 3)。通过比较室内萌发期筛选的不同耐渍种质间 *D* 值差异, 发现室内萌发期筛选的强耐渍种质田间综合评价平均 *D* 值极显著高于一般耐渍和渍敏种质(表 4)。结果表明, 基于种子萌发期建立的油菜耐渍性快速鉴定方法筛选的强耐渍种质具有较强的田间耐渍性, 该方法具有较高的可信度。

表 3 耐渍性快速鉴定方法筛选的 54 份种质田间耐渍性综合评价 *D* 值

Table 3 Comprehensive evaluation of field waterlogging tolerance *D* value of 54 germplasms identified by rapid identification of waterlogging tolerance

种质编号 Germplasms name	耐渍性等级 Waterlogging tolerance grade	*D* 值 *D* value	排序(*D* 值从大到小) Rank (*D* value from large to small)
Y4	一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	1.36	19
Y5	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.34	21

(续表 3)

种质编号 Germplasms name	耐渍性等级 Waterlogging tolerance grade	*D* 值 *D* value	排序(*D* 值从大到小) Rank (*D* value from large to small)
Y9	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.01	43
Y10	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	0.41	54
Y14	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.13	37
Y66	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.66	2
Y67	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	1.24	30
Y69	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.28	27
Y70	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	1.03	41
Y71	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	1.39	18
Y72	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	0.69	49
Y74	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.45	14
Y76	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	0.60	52
Y79	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	1.32	24
Y80	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.51	7
Y81	一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	1.66	1
Y82	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.09	39
Y83	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	1.54	5
Y84	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	1.42	16
Y86	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	1.22	32
Y87	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	1.26	29
Y88	一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	1.57	4
Y89	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.42	17
Y91	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.18	36
Y92	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.22	33

(续表 3)

种质编号 Germplasms name	耐渍性等级 Waterlogging tolerance grade	*D* 值 *D* value	排序(*D* 值从大到小) Rank (*D* value from large to small)
Y93	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	1.30	25
Y94	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	1.50	9
Y95	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	1.28	26
Y96	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.27	28
Y97	一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	1.35	20
Y99	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	0.61	51
Y103	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	0.91	45
Y111	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	1.33	23
Y112	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.08	40
Y114	一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	1.45	12
Y115	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.18	35
Y116	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	1.10	38
Y117	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	1.24	31
Y118	一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	1.45	13
Y123	一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	1.46	11
Y129	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	0.58	53
Y168	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.47	10
Y478	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	0.97	44
Y486	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.54	6
Y499	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.02	42
Y594	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	1.20	34
Y637	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	0.65	50
Y652	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	0.84	46

(续表 3)

种质编号 Germplasms name	耐渍性等级 Waterlogging tolerance grade	*D* 值 *D* value	排序(*D* 值从大到小) Rank (*D* value from large to small)
T99	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	0.77	47
T927	四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	0.71	48
20R	三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	1.33	22
X5B	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.50	8
ZS11	二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	1.43	15
Y2B	一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	1.65	3

表 4　耐渍性快速鉴定方法筛选的 54 份种质不同耐渍等级间平均 *D* 值差异比较

Table 4　Comparison of field comprehensive waterlogging tolerance index *D* value of 54 germplasms identified based on rapid identification method

耐渍等级 Waterlogging tolerance grade	种质数 Number of germplasms	平均 *D* 值 Mean *D* value
一级(强耐渍) Level 1 (high waterlogging tolerance)	8	1.48 A
二级(较耐渍) Level 2 (moderate waterlogging tolerance)	23	1.23 AB
三级(一般耐渍) Level 3 (general waterlogging tolerance)	10	1.13 B
四级(渍敏) Level 4 (waterlogging sensitive)	13	1.06 B

同一列中不同大写字母表示不同耐渍等级均值间存在极显著差异($P < 0.01$)。

Different capital letters in a column indicate highly significant differences among means ($P < 0.01$).

结合 54 份油菜种质室内耐渍性快速鉴定结果及其田间耐渍性综合评价 *D* 值, 筛选出强耐渍种质(耐渍性快速鉴定等级为强耐渍且田间耐渍性综合评价 *D* 值排序(1~5)为前 10%) 3 份, 分别为 Y81、Y88 和 Y2B; 较耐渍种质(耐渍性快速鉴定等级为强耐渍或较耐渍且田间耐渍性综合评价 *D* 值排序(6~16)为 11%~30%) 10 份, 分别为 Y66、Y486、Y80、X5B、Y168、Y123、Y114、Y118、Y74 和 ZS11; 渍敏种质(耐渍性快速鉴定为一般耐渍或渍敏, 且田间耐渍性综合评价 *D* 值排序(39~54)为 71%~100%) 8 份, 分别为 Y10、Y129、Y76、Y637、Y72、T927、T99 和 Y70。以上种质将为今后培育强耐渍油菜品种及解析耐渍相关遗传机理提供重要的材料基础。

3　讨论

油菜在整个生育期(萌发出苗期、苗期、蕾薹期、花期、角果成熟期)均有发生渍害的风险[16], 同时渍害对油菜不同生长发育时期的影响也存在较大差异。研究表明, 油菜种子萌发期经过 12 h 的渍水处理后, 存活率和相对活力指数均呈降低趋势[4,7]; 经过 24 h 渍水处理后, 长势非常弱, 根长一般不超过 1 cm, 根毛很少甚至没有, 与对照相比差异十分明显, 耐渍种质和敏感种质可被有效区分; 经过 36 h 渍水处理后, 所有种质基本无法存活[2,13]。然而, 油菜苗期子叶平展时全淹 6 d 及以上才能有效筛选具有不同耐渍性的油菜种质[8-9]; 李继军等[17]在油菜 5~6 叶期模拟田间渍害(水面高出土面 2 cm)条件下, 将渍水 10 d 作为耐渍性鉴定的适宜处理时间。许梦然等[14]同样在田间 5~6 叶期进行渍水处理, 但将处理时长延至 21 d 用于筛选耐渍种质, 在油菜花期, 同样渍水 21 d 用于筛选耐渍种质。以上研究结果表明, 相对于油菜子叶平展期、苗期和花期, 在种子萌发期进行耐渍性鉴定可极大地缩短时间, 提高鉴定效率, 尤其是在进行大批量种质耐渍性鉴定方面, 优势十分明显。因此, 建立油菜种子萌发期耐渍性快速鉴定方法同时对其可信度进行验证十分必要。

为建立种子萌发期耐渍性快速鉴定方法, 本研究通过对萌发期的种子进行 24 h 渍水处理, 采用分等级策略对不同种质进行了快速鉴定, 与已报道的耐渍性鉴定方法[3-4,6-7]相比, 省去了测定根长、茎长、鲜重、干重等指标, 从而极大地缩短了鉴定时间, 尤其是对强耐渍种质和渍敏种质能实现“秒”定级、

“秒”区分, 可同时对大批量种质进行耐渍性鉴定。按照《油菜耐渍性鉴定技术规程》中发芽期耐渍性鉴定方法, 平均每人每天约完成 30~50 份材料的耐渍性鉴定, 而按照本研究耐渍性快速鉴定方法, 平均每人每天可完成 500~1000 份材料的耐渍性鉴定, 鉴定效率至少提高 10 倍。同时, 由于不同种质在种子萌发后未进行渍水处理情况下, 5~6 d 的生长势和存活率几乎没有差异, 因此, 在种子量不足的情况下对某些重要种质的耐渍性鉴定, 由于可省去对照, 因此只需 80~100 粒种子即可进行耐渍性快速鉴定。此外, 基于《油菜耐渍性鉴定技术规程》的室内发芽期耐渍性验证结果及田间耐渍性鉴定结果也表明, 本研究筛选的耐渍种质可信度较高。然而《油菜耐渍性鉴定技术规程》室内发芽期耐渍性评价方法中根长耐渍指数≥ 0.5 的种质被定义为强耐渍种质, 而基于耐渍性快速鉴定方法筛选的 8 份用于耐渍性验证的强耐渍种质(表 2)平均根长耐渍指数为 0.41, 可能是二者所使用的材料不一致导致筛选的强耐渍种质根长耐渍指数存在差异, 同时表明不同方法筛选出的耐渍种质的耐渍性具有一定的相对性。总之, 本研究基于种子萌发期渍水处理 24 h 建立的耐渍性快速鉴定方法可用于今后大规模鉴定和筛选耐渍种质, 将为今后油菜耐渍性遗传改良奠定基础。

此外, 在本研究中发现部分种质在种子萌发期鉴定的耐渍性与田间耐渍性鉴定结果也并没有完全一致, 例如, Y14 在种子萌发期耐渍性快速鉴定结果为二级(较耐渍), 田间耐渍性综合评价 *D* 值为 1.13, 排在第 37 位; 然而, Y94 种子萌发期耐渍性快速鉴定结果为四级(渍敏), 田间耐渍性综合评价 *D* 值为 1.50, 排在第 9 位。Y94 的田间耐渍性要强于 Y14, 与萌发期快速鉴定结果并不一致, 其可能的原因有: 一方面, 耐渍性快速鉴定以及田间耐渍性鉴定仍存在一定误差, 需要反复多次试验验证以提高准确性; 另一方面, 油菜在不同生长发育阶段响应渍水胁迫的机制及关键基因可能并不完全一致, 因此, 有关油菜全生育期耐渍性的遗传机制还需要进一步深入研究。

4 结论

本研究通过对萌发期种子渍水处理 24 h, 根据恢复生长后的生长势、存活率、子叶和根系生长情况, 采用分等级策略建立了一种油菜耐渍性快速鉴定的方法。通过《油菜耐渍性鉴定技术规程》的室内发芽期耐渍性鉴定以及田间耐渍性鉴定对油菜耐渍性快速鉴定方法的可靠性进行了验证, 表明基于该方法筛选到的强耐渍种质具有较高的可信度。该方法在快速且大批量筛选强耐渍种质方面具有较大的优势, 可用于快速筛选强耐渍种质, 为今后油菜耐渍性遗传改良提供了重要参考依据。

References

[1] 周香玉, 徐劲松, 谢伶俐, 等. 甘蓝型油菜苗期响应渍害胁迫的生理调控机制. 作物学报, 2024, 50: 1015–1029.
Zhou X Y, Xu J S, Xie L L, et al. Physiological mechanisms in response to waterlogging during seedling stage of *Brassica napus* L. Acta Agron Sin, 2024, 50: 1015–1029 (in Chinese with English abstract).

[2] 范其新. 甘蓝型油菜耐湿品种资源筛选及耐湿机理研究. 西南农业大学硕士学位论文, 重庆, 2005.
Fan Q X. Identification of *Brassica napus* L. of High Tolerance to Waterlogging and Research on Physiological Adaptability Mechanism to Anaerobiosis. MS Thesis of Southwest Agricultural University, Chongqing, China, 2005 (in Chinese with English abstract).

[3] 陈洁, 张学昆, 谌利, 等. 甘蓝型油菜耐湿种质资源的快速筛选. 中国油料作物学报, 2006, 28: 138–143.
Chen J, Zhang X K, Chen L, et al. Evaluation of waterlogging tolerance germplasm in rapeseed (*Brassica napus* L.) with germinated seeds with anoxic stress. Chin J Oil Crop Sci, 2006, 28: 138–143 (in Chinese with English abstract).

[4] 张学昆, 陈洁, 王汉中, 等. 甘蓝型油菜耐湿性的遗传差异鉴定. 中国油料作物学报, 2007, 29: 204–208.
Zhang X K, Chen J, Wang H Z, et al. Genetic difference of waterlogging tolarance in rapeseed (*Brassica napus* L.). Chin J Oil Crop Sci, 2007, 29: 204–208 (in Chinese with English abstract).

[5] 许晶, 曾柳, 徐明月, 等. 油菜耐渍性种质资源筛选与评价. 中国油料作物学报, 2014, 36: 748–754.
Xu J, Zeng L, Xu M Y, et al. Screening and evaluation of waterlogging tolerance in *Brassica* germplasm resources. Chin J Oil Crop Sci, 2014, 36: 748–754 (in Chinese with English abstract).

[6] 陈雅慧. 油菜萌发期耐淹性种质资源筛选与遗传机制解析. 华中农业大学硕士学位论文, 湖北武汉, 2019.
Chen Y H. Germplasm Screening and Genetic Mechanism Analysis of Submergence Tolerance during Rapeseed Germination. MS Thesis of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2019 (in Chinese with English abstract).

[7] 郭奕邑. 甘蓝型油菜发芽期耐渍基因型差异及候选基因鉴定. 浙江大学硕士学位论文, 浙江杭州, 2021.
Guo Y Y. Genotypic Differences of Waterlogging Tolerance at Germination Stage and Identification of the Candidate Genes in *Brassica napus*. MS Thesis of Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, 2021 (in Chinese with English abstract).

[8] 李云, 付三雄, 戚存扣. 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, 2012, 34: 256–261.
Li Y, Fu S X, Qi C K. Screening method on waterlogging tolerance of rapeseed seedling through morphology and physiology verification. Chin J Oil Crop Sci, 2012, 34: 256–261 (in Chinese

with English abstract).

[9] 孙文韬, 张志浩, 张古月, 等. 耐渍甘蓝型油菜(*Brassica napus*)种质筛选与评价. 西北农业学报, 2023, 32: 855–865.
Sun W T, Zhang Z H, Zhang G Y, et al. Screening and evaluation of waterlogging tolerance in rapeseed (*Brassica napus*) cultivars. Acta Agric Boreali Occidentalis Sin, 2023, 32: 855–865 (in Chinese with English abstract).

[10] 陈娟妮, 梁颖. 长江流域主要甘蓝型油菜品种苗期耐湿性鉴定. 中国生态农业学报, 2011, 19: 626–630.
Chen J N, Liang Y. Determining rapeseed tolerance to waterlogging at seedling stage in the Yangtze River basin. Chin J Eco-Agric, 2011, 19: 626–630 (in Chinese with English abstract).

[11] 李浩杰, 柴靓, 蒲晓斌, 等. 室内水淹和田间模拟湿害对甘蓝型油菜耐湿性鉴定. 西南农业学报, 2016, 29: 1250–1256.
Li H J, Chai L, Pu X B, et al. Genetic difference of waterlogging tolerance in *Brassica napus* L. after submerging seeds in room and plants in field. Southwest China J Agric Sci, 2016, 29: 1250–1256 (in Chinese with English abstract).

[12] 高建芹, 陈锋, 龙卫华, 等. 长江下游甘蓝型油菜种质耐湿性鉴定. 江苏农业科学, 2023, 51(6): 79–86.
Gao J Q, Chen F, Long W H, et al. Identification of wet tolerance of *Brassica napus* germplasm in the lower reaches of the Yangtze River. Jiangsu Agric Sci, 2023, 51(6): 79–86 (in Chinese with English abstract).

[13] 中华人民共和国农业部. 油菜耐渍性鉴定技术规程: NY/T 3067-2016. 北京: 中国农业出版社, 2016.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Code of Practice for Identification of Waterlogging Tolerance in Rapeseed: NY/T 3067-2016. Beijing: China Agricultural Press, 2016 (in Chinese).

[14] 许梦然, 代文君, 许磊, 等. 甘蓝型油菜全生育期极端耐渍种质评价鉴定体系的构建. 植物遗传资源学报, 2025, 26: 1982–1994.
Xu M R, Dai W J, Xu L, et al. Construction of a comprehensive extreme waterlogging-tolerant germplasm evaluation and identification system for the whole growth stage of *Brassica napus* L. J Plant Genet Resour, 2025, 26: 1982–1994 (in Chinese with English abstract).

[15] Hinton P R, McMurray I, Brownlow C. SPSS Explained, 2nd edn. London: Routledge, 2014. pp 338–350.

[16] 杨海云, 艾雪莹, Batool Maria, 等. 油菜响应水分胁迫的生理机制及栽培调控措施研究进展. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 6–16.
Yang H Y, Ai X Y, Maria B, et al. Progress on physiological mechanisms of response to water stress and measures of cultivation controlling in rapeseed. J Huazhong Agric Univ, 2021, 40(2): 6–16 (in Chinese with English abstract).

[17] 李继军, 陈雅慧, 王艺瑾, 等. 甘蓝型油菜种质资源田间耐渍性评价和耐渍种质资源筛选. 作物学报, 2023, 49: 3162–3175.
Li J J, Chen Y H, Wang Y J, et al. Evaluation of field waterlogging tolerance and selection of waterlogging-resistant germplasm resources of *Brassica napus* L. Acta Agron Sin, 2023, 49: 3162–3175 (in Chinese with English abstract).