植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources
ISSN 1672-1810,CN 11-4996/S

《植物遗传资源学报》网络首发论文

题目：油菜萌发期耐渍性综合评价和种质筛选
作者：王才权，杨柳，刘婷婷，罗红森，肖黄宇杰，刘忠松
DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20250916004
收稿日期：2025-09-16
网络首发日期：2025-12-19
引用格式：王才权，杨柳，刘婷婷，罗红森，肖黄宇杰，刘忠松．油菜萌发期耐渍性综合评价和种质筛选[J/OL]．植物遗传资源学报．
https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250916004

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-12-19 17:28:57　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.4996.S.20251219.1015.002

植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources　DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.20250916004

油菜萌发期耐渍性综合评价和种质筛选

王才权[1,2]，杨柳[1,2]，刘婷婷[1,2]，罗红森[1,2]，肖黄宇杰[1,2]，刘忠松[1,2]

（[1]湖南农业大学农学院，长沙 410128；[2]岳麓山实验室，长沙 410128）

摘要：稻田冬油菜常会遭受渍害。本研究以353份油菜品种资源为材料，在萌发期进行12 h淹水处理，测定浸泡液的电导率，并在恢复培养7 d后测定根长、下胚轴长、根鲜重、根干重、地上部鲜重和地上部干重6个性状。通过隶属函数、主成分和聚类等分析，并结合单位电导率进行综合评价，以期筛选出萌发期耐渍油菜品种资源。结果表明油菜萌发期根受渍害的影响最显著，表现为淹水处理后根长、根鲜重、根干重显著降低，且相对根长、相对根鲜重、相对根干重3个根性状的平均值均明显小于地上部性状的平均值；相对根长、相对根鲜重和相对根干重可作为萌发期耐渍性评价指标， 单位电导率可作为辅助指标。根据综合评价值（*D*值）供试材料萌发期耐渍性可分为四类：极端耐渍（*D*≥ 0.75，58份）、耐渍（ 0.54≤*D*≤0.74,111份）、敏感（0.32≤*D*≤0.52,130份,）和极端敏感（*D*≤0.31，54份,），根据单位电导率（Uel）同样可分为4类，其中极端耐渍（Uel≤289 μS/(cm·g)，32份）、耐渍（290.42 μS/(cm·g)≤Uel≤411.67 μS/(cm·g)，146份）、敏感（411.90 μS/(cm·g)≤Uel≤513.20 μS/(cm·g)，110份）和极端敏感（Uel≥ 515.03 μS/(cm·g)，65份）。结合综合评价值（*D*≥0.95）和单位电导率（Uel≤204.48 μS/(cm·g)）鉴定到宁杂2009、川油83等6份耐渍品种资源。这些萌发期极端耐渍材料为耐渍油菜育种提供了种质资源，为开展苗期和花期耐渍性相关研究奠定了基础

关键词：油菜；萌发期；耐渍性；品种资源；综合评价

Comprehensive Evaluation and Screening of Germplasm for Waterlogging Tolerance in Rapeseed(*Brassica napus* L.) at the Germination Stage

WANG Caiquan[1,2],YANG Liu[1,2],LIU Tingting[1,2],LUO Hongsen[1,2],XIAO Huangyujie[1,2],
LIU Zhongsong[1,2]

（[1]*College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;* [2]*Yuelushan Laboratory, Changsha 410128*）

Abstract: Winter rapeseed (*Brassica napus* L.) frequently encounters waterlogging when grown in paddy fields. Three hundred and fifty-three rapeseed germplasm resources were subjected to a 12-h waterlogging treatment at the germination stage. The electrical conductivity of the soaking solution was immediately measured. Six growth traits, i.e., root length, shoot length, root fresh weight, shoot fresh weight, root dry weight, and shoot dry weight, were determined after a 7-day recovery. Membership function analysis, principal component analysis, and clustering were used together with unit electrical conductivity to evaluate

收稿日期：2025-09-16
第一作者研究方向为油菜遗传育种，E-mail :wcqyjs2023@163.com
通信作者：刘忠松，研究方向为油菜分子育种，E-mail : zsliu48@hunau.net
基金项目：国家自然科学基金（U23A20194）
Foundation project: National Natural Science Foundation of China（U23A20194）

waterlogging-tolerance of rapeseed germplasm and to identify waterlogging-tolerant resources at the germination stage. The results indicated that root growth, especially root length, root fresh weight, and root dry weight, was impaired most severely by waterlogging. The relative values (treatment/control) for these root traits were all significantly lower than those of the shoot traits. Relative root length, relative root fresh weight and relative root dry weight supplemented with unit electrical conductivity can be used for waterlogging tolerance evaluation of rapeseed at the germination stage. The rapeseed germplasm resources were classified into four distinct groups based on the comprehensive evaluation index (*D*-value): the extreme tolerant (*D*≥0.75 ， 58 accessions), tolerant (0.54≤*D*≤0.74, 111 accessions), sensitive (0.32≤*D*≤0.52, 130 accessions,), and the extreme sensitive (*D*≤0.31, accessions 54). The similar four groups were also classified according to unit electrical conductivity (Uel): the extreme tolerant (Uel≤289 μS/(cm •g), 32 accessions), tolerant (290.42 μS/(cm •g)≤Uel≤411.67 μS/(cm •g), 146 accessions), sensitive (411.90 μS/(cm •g)≤Uel≤513.20 μS/(cm •g), 110 accessions), and the extreme sensitive (Uel ≥515.03 μS/(cm •g)， 65 accessions，). Six most waterlogging-tolerant rapeseed germplasm resources at the germination stage, including ‘Ningza 2009’ and ‘Chuanyou 83’, were identified through integration of *D*-value（D≥0.95） and Uel（Uel≤204.48 μS/(cm • g)）. These resourcess lay a foundation not only for breeding waterlogging-tolerant varieties but also for deepening understanding of waterlogging tolerance in winter rapeseed.

Key words: *Brassica napus* L.; germination stage; waterlogging tolerance; germplasm resources; comprehensive evaluation

油菜 （*Brassica napus* L.）是全球主要油料作物。我国长江流域是冬油菜的主产区，其种植面积和产量均占全国 90%以上。然而由于长江流域油菜生长季湿润多雨，持续阴雨天可达 15 d 以上，稻油轮作模式下土壤黏重、透气性差排水困难、地下水位高，极易产生渍害，渍害面积常年达 1000~2000 万亩（666.67～1333.33hm^2），影响油菜正常生长，导致减产 17%～42.4%[1-2]。有研究表明，在其他条件不变的情况下，油菜生长期平均降水量每增加 10 mm 会导致油菜减产 1.64%~13.61%[3]。因此为促进我国油菜生产面积，提高油菜单产，增加效益，解决渍害问题尤为关键。

水分是植物生长的重要环境因素，在植物生长过程中起着至关重要的作用。但当水分超过植物所需的最大水量时，则会对植物造成严重的伤害。植物在受到渍水胁迫后，会处于缺氧状态，有氧呼吸受到抑制，将限制能量代谢，并进一步限制生长发育[4]。在涝渍期间，植物受到胁迫后，叶片的气孔会立即关闭，伴随叶绿素降解、叶片衰老和变黄，最终导致光合速率下降[5-6]。大多数作物在遭受渍害后产量和品质都会受到严重的影响。在植物生长发育过程中，萌发期对植物的生长发育影响显著[7]，因为作物的产量与植株出苗率和发芽率密切相关[8]。在淹水条件下，进入土壤中的 O_2 流量比空气中 O_2 流量少 32 万倍。植物由于缺少氧气，无氧呼吸生成有害的物质，造成种子萌发失败[9]。植物的耐渍性是一个复杂的

性状，由多基因控制，受多种因素影响，因此使用单一指标较难反应耐渍情况[4, 10]，可用多元分析的方法对多个指标进行综合评价，从而建立可靠的评价体系。罗礽兰等[11]在棉花种子萌发期模拟淹水胁迫，采用主成分分析、隶属函数法及聚类分析方法，分析了涝渍胁迫处理 6 份陆地棉材料的 6 个生长指标，结果表明，幼苗鲜物质质量、株高、主根长等可以作为棉花萌发期耐涝性鉴定的指标。王永强等[12]对 102 份大豆种质萌发期耐涝性进行鉴定，通过相关性分析和聚类分析可将 102 份种质分为感型、中间型、抗型。刘瑞等[13]以国内外的 363 份大麦种质资源为材料，在芽期进行淹水处理，测定其芽长、根长、芽鲜质量、根鲜质量和植株总鲜质量 5 个指标，根据隶属函数分析，筛选到芽期耐渍型大麦种质 43 份。陈雅慧[14]对 505 份油菜进行萌发期淹水处理，通过 9 个生长指标和电导率进行耐渍性评价，并以综合指标（MFVW，membership function evaluate waterlogging）和电导率共同筛选出极端种质。

本研究以 83 个主推油菜品种和 270 份油菜种质资源为材料，在萌发期淹水处理后考察生长指标和生理指标的变化，分析各生长指标间的相关性，结合综合评价值 *D* 值和单位电导率进行油菜萌发期耐渍性鉴定和评价，以期筛选出萌发期耐渍性强的油菜种质，为耐渍油菜育种和研究奠定基础。

1 材料和方法

1.1 供试材料和试验处理

供试油菜材料为 83 个主推品种和由湖南农业大学、华中农业大学、浙江大学以及湖南省作物研究所收集、提供的国内外 270 份种质资源（详见 https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250916004，附表 1）。选取饱满、无病虫害的种子，放入铺好滤纸的发芽盒中在 25℃下进行发芽，当胚根长度达到 2~5mm 时，取 50 粒种子，为一个重复，转入 10ml 离心管中，加入 8ml 蒸馏水进行淹水处理。淹水处理 12 h 后取出，用蒸馏水冲洗 3 次后，转入铺有 3 层滤纸的发芽盒中恢复培养 7 d。培养条件为光照 16 h/d，温度 25℃；黑暗 8 h/d，温度 19℃，光照强度为 8000 lx。淹水处理和对照（不淹水处理）均重复 3 次。

1.2 性状考察和测定方法

淹水处理前对种子进行称重，用于单位电导率的计算；淹水处理结束后取出种子，立即用电导率仪测量浸泡液的电导率，每个样液测量 3 次取平均值，每个样液测完后用去离子水冲洗电极 3 次，再继续测量下个样液。恢复培养 7 d 后从每个重复取长势一致的幼苗 10 株测定根长、下胚轴、根鲜、地上部鲜重、根干重和地上部干重，并计算单位电导率。指标相对值=某一指标胁迫处理值/某一指标对照值；单位电导率=测量电导率/对应种子重量。

1.3 数据处理及耐渍性评价

用 Microsoft Excel 进行数据统计分析。参照焦茹玉等[15]的方法进行油菜萌发期耐渍性综合评价，首先用 IBM SPSS Statistics 软件进行相关性分析和主成分分析，根据主成分分析结果计算萌发期耐渍性综

合评价值 *D* 值，根据 *D* 值用 R 语言软件进行聚类分析并作图。所用的计算公式如下。

$$\text{隶属函数值 } U(X_j)=(X_j-X_{min})/(X_{max}-X_{min}) \quad j=1,2,\cdots,n \qquad (1)$$

（1）式中 X_j 表示第 j 个主成分得分的原始值，X_{max}、X_{min} 表示在群体中第 j 个主成分得分的最大值和最小值。

$$\text{权重 } W_j=P_j/\sum_{j=1}^{n}P_j \quad j=1,2,\cdots,n \qquad (2)$$

（2）式中 W_j 表示第 j 个主成分的权重，P_j 表示被提取到的第 j 个主成分的方差贡献率。

$$\text{综合评价值 } D=\sum_{j=1}^{n}\left[U(X_j)\times W_j\right] \quad j=1,2,\cdots,n \qquad (3)$$

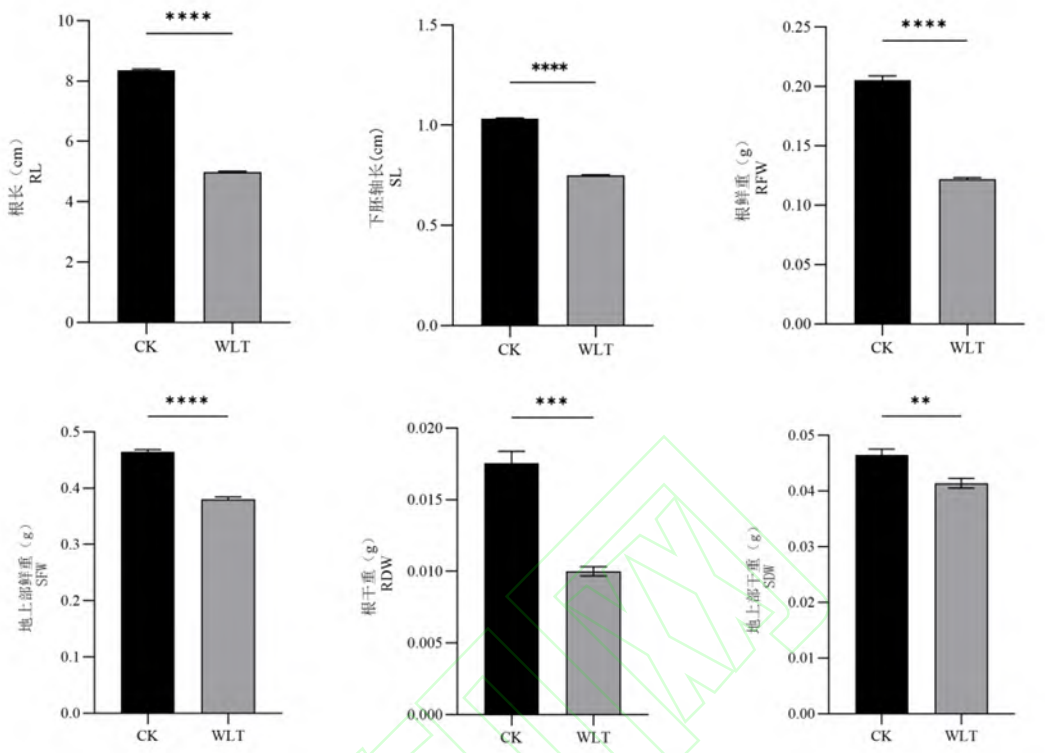
参照李继军等[16]的方法，分别取 D 值和单位电导率的极端材料的交集，作为稳定的极端耐渍或极端敏感材料。D 值大于交集材料的平均值+标准差和单位电导率小于平均值–标准差的品种资源被鉴定为极端耐渍材料,D 值小于平均值–标准差和单位电导率大于平均值+标准差的种质资源被鉴定为极端敏感材料。

2 结果与分析

2.1 油菜萌发期淹水处理对生长的影响

将 353 份油菜材料在萌发期进行淹水处理，结果表明淹水处理使油菜生长受到抑制，表现为淹水处理所有指标数值均低显著低于对照组（图 1），其中根长、根鲜重和地上部鲜重影响极显著。对渍水胁迫后各生长性状描述统计分析发现，淹水处理与对照组相对值的平均值在 0.57~0.98 之间，其中相对根长、相对根鲜重、相对根干重 3 个根性状的平均值均明显小于地上部性状的平均值（表 1），说明淹水处理对油菜幼苗根生长的影响更为显著。

相关性分析发现，大多数指标之间的相关性达到极显著正相关（图 2），相对根长与相对根干重的相关性最高，r=0.71；相对根长与相对根鲜重、相对根鲜重与相对根干重以及相对地上部鲜重与相对地上部干重间的相关性系数都在 0.60 以上，分别为 0.68、 0.68 和 0.63；相对根鲜重与相对地上部干重以及相对地上部干重与相对根干重的相关性最不显著，相关系数均为 0.03。以上结果再次说明淹水处理后根受影响最显著，同时也说明 6 项观测指标中大多数指标之间显著甚至极显著相关，可进一步通过主成分分析确定油菜萌发期耐渍性评价指标。



* *、***和****分别表示在 P<0.01、 P<0.001 和 P<0.0001 水平显著；RL：根长；SL：下胚轴长；RFW：根鲜重；SFW：地上部鲜重；RDW：根干重；SDW：地上部干；CK：对照组；WLT：处理组；下同

* *、, *** and****indicate difference at 1%, 1‰ and ‰ significant levels respectively; .RL：Root length; SL：Shoot length; RFW：Root fresh weight; SFW：Shoot fresh weight; RDW：Root dry weight; SDW：Shoot dry weight; CK：Control; WLT：Waterlogging treatment; The same as below

图 1 油菜品种资源萌发期淹水对生长的影响

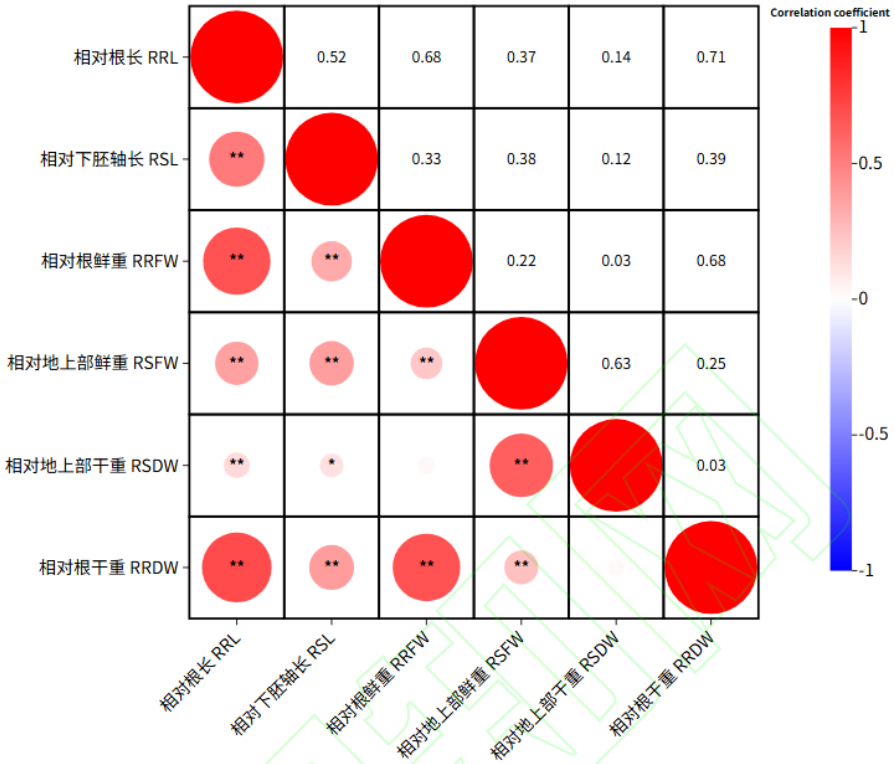
Fig. 1 Effect of waterlogging on the growth of rapeseed germplasm resources during at the germination stage

表 1 油菜品种资源在萌发期渍水胁迫下生长性状

Table1 Growth traits of rapeseed germplasm resources at the germination stage under waterlogging stress

性状 Traits	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 *SD*	变异系数（%） *CV*
相对根长 RRL	0.23	1.04	0.57	0.15	26.93
相对下胚轴长 RSL	0.34	1.01	0.72	0.13	17.50
相对根鲜重 RRFW	0.19	1.09	0.70	0.15	21.94
相对地上部鲜重 RSFW	0.52	1.21	0.87	0.12	13.54
相对地上部干重 RSDW	0.46	1.41	0.98	0.14	14.28
相对根干重 RRDW	0.34	1.04	0.71	0.14	19.84

RRL: Relative root length; RSL: Relative shoot length; RRFW: Relative root fresh weight; RSFW: Relative shoot fresh weight; RRDW: Relative root dry weight; RSDW: Relative shoot dry weight; The same as below



**表示在 *P*<0.01 水平显著相关

** Indicates significant correlation at probability levels of 1%

图 2 油菜品种资源萌发期淹水条件下生长性状之间的相关性分析

Fig. 2 Correlations **analysis** between the growth traits of rapeseed germplasm resources at the germination stage under waterlogging stress

2.2 油菜萌发期耐渍性评价

6 个生长性状相对值的主成分分析结果表明，前 2 个主成分的累积贡献率达到了 73.31%（表 2），可说明所有 6 个考察指标的大部分信息。第 1 主成分的特征值达到 2.94，贡献率占 48.93%，主要反映根的性状，说明根性状对第 1 主成分贡献大；第 2 主成分的特征值为 1.46，贡献率为 24.38%，主要反映地上部的性状。因此可将 6 个考察指标转化为 2 个综合指标，用于油菜萌发期耐渍性的综合评价值 *D* 值的计算。根据萌发期各单项指标的特征向量及隶属函数公式，计算 2 个综合指标的隶属函数值及权重，分别为 66.74%和 33.26%。进一步计算油菜品种资源萌发期的耐渍性综合评价 *D* 值。结果表明供试材料的 *D* 值变幅为 -0.09~1.00，平均为 0.53，变异系数为 39.23%（详见 https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250916004，附表 1）。根据 *D* 值做聚类分析，结果表明 353 份油菜品种资源萌发期耐渍性分为 4 类（图 3）。第I类是极端耐渍型，*D* 值范围为 0.75~1.00，包含 10-江棚 3、利油杂 501 和阳光 2009 等 58 份品种资源，占供试材料的 16.43%；其中 10-江棚 3 的 *D* 值最大，为 1.00，

说明 10-江棚 3 萌发期耐渍性最强。第II类是耐渍型，*D* 值范围为 0.54~0.74，包含皖油 20、广德 8104 和康油 399 等 111 份品种资源，占供试材料的 31.44%。第III类是敏感型，*D* 值范围为 0.32~0.52，包含贵州芥甘 6、10-江棚 2 和浙油杂 319 等 130 份品种资源，占供试材料的 36.83%。第IV类是极端敏感型，*D* 值范围为-0.09~0.31，包含 Baltia、21F78 和甘油 5 号等 54 份品种资源，占供试材料的 15.30%，其中 Baltia 的 *D* 值最小，为-0.09，说明其萌发期耐渍性最弱。

为了确定对耐渍性有显著影响的指标，把*D*值作为因变量、各生长性状作为自变量，逐步回归建立回归方程 ：y=0.415RRL+0.486RSFW+389RRDW+0.356RSL+0.350RRFW-0.907（R^2=0.993, P<0.001）。将筛选出的5个耐渍评价指标代入新建的回归方程，得到各材料的耐渍性预测值（*D′*）。预测值（*D′*）与综合评价*D*值的相关分析表明，两者之间的相关系数为 0.99, 达到极显著水平（P<0.01），说明该方程可用于油菜萌发期耐渍性的预测评价，相对根长、相对地上部鲜重、相对根干重、相对下胚轴长和相对根鲜重这5个指标可作为油菜萌发期耐渍型评价的可靠指标。通过分析各指标与*D*值的相关性表明，相对根长、相对根鲜重和相对根干重与*D*值的相关性均高于0.75（表3），因此在进行萌发期耐渍性综合评价时，应重点关注这3个指标。

表 2 油菜品种资源在萌发期渍水胁迫下各生长性状的主成分分析

Table 2 Principal component analysis of growth traits of rapeseed germplasm resources at the germination stage under waterlogging stress

性状 Traits	主成分 Principal component	
	1	2
相对根长 RRL	0.88	-0.18
相对下胚轴长 RSL	0.67	0.04
相对根鲜重 RRFW	0.78	-0.35
相对地上部鲜重 RSFW	0.59	0.69
相对地上部干重 RSDW	0.32	0.85
相对根干重 RRDW	0.81	-0.34
特征值 Eigenvalue	2.94	1.46
方差贡献率 (%) Contribution ratio	48.93	24.38
累计贡献率 (%)Cumulative contribution ratio	48.93	73.31
权重 (%)Weight	66.74	33.26

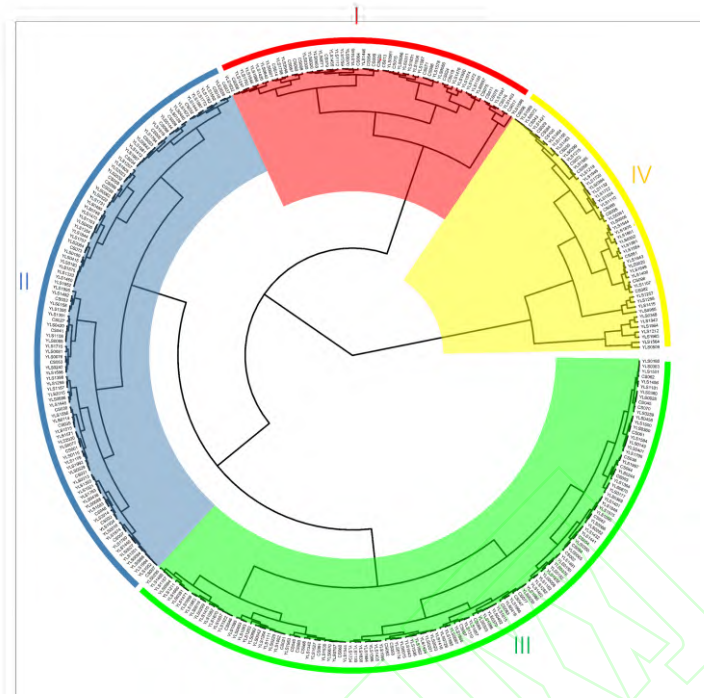


图 3 353 份油菜品种资源萌发期渍害胁迫条件下 D 值聚类分析

Fig. 3 The D-value-based Clustering of D-values for 353 rapeseed germplasm resources at the germination stage under waterlogging

表 3 油菜 6 个生长性状与 *D* 值间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between six growth traits and *D*-value of rapeseed

性状 Traits	相关性系数 Correction coefficient
相对根长RRL	0.88**
相对下胚轴长RSL	0.67**
相对根鲜重RRFW	0.78**
相对地上部鲜重RSFW	0.59**
相对地上部干重RSDW	0.32**
相对根干重RRDW	0.81**

2.3 油菜萌发期淹水条件下单位电导率的变化

353 份油菜品种资源浸泡液电导率测定结果表明，单位电导率变幅为 182.86~ 684.34 μS/(cm • g)，川油 83 最小，Baltia 最大，平均为 422.404 μS/(cm • g)，变异系数为 23.30%（详见 https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250916004，附表 1）。根据单位电导率进行聚类分析，353 份材料可分为 4 个类型（图 4）。第 1 类是极端耐渍型，单位电导率 182.86 μS/(cm • g)~289 μS/(cm • g)，包括川油 83、阳光 131 等 32 份品种资源，占供试材料的 9.07%。第 2 类是耐渍型，单位电导率范围为 290.42 μS/(cm • g)~411.67 μS/(cm • g)，包含 10-崇 29、赣油杂 8 号等 146 份品种资源，占供试材料的 41.36%；第 3 类是敏感型，单位电导率为 411.90 μS/(cm • g)~513.20 μS/(cm • g)，包含皖油 5 号、贵州芥甘 1 等 110 份品种资源，

占供试材料的 31.16%； 第 4 类是极端敏感型，单位电导率 515.03 μS/(cm • g)~684.34 μS/(cm • g)，包含甘油 5 号、Baltia 等 65 份品种资源，占供试材料的 18.41%。

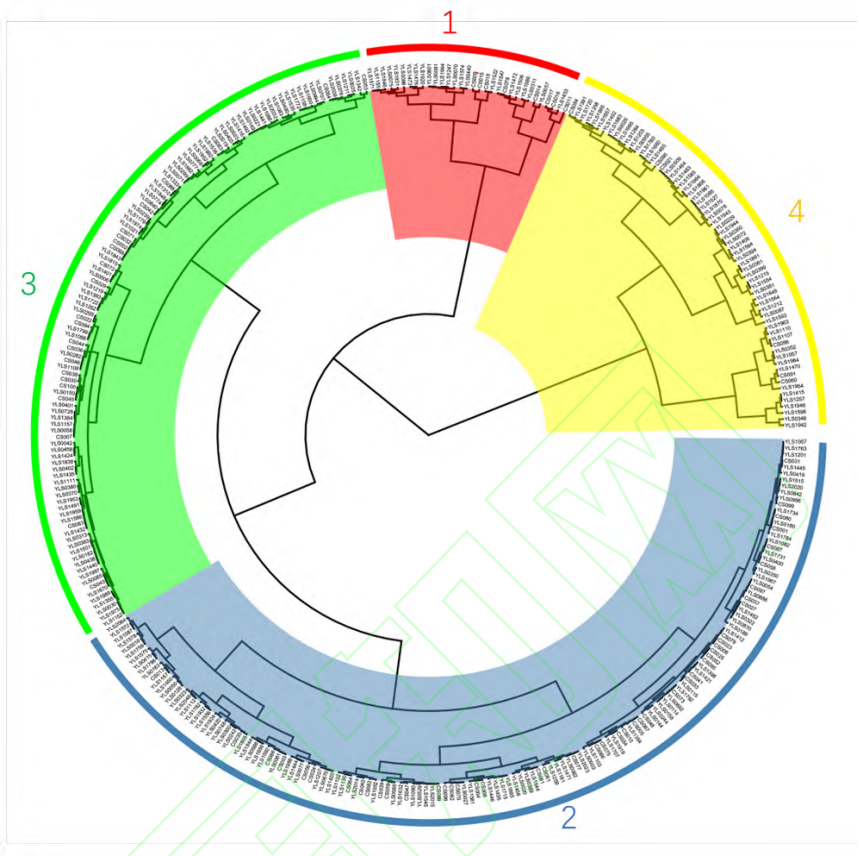


图 4 353 份油菜品种资源萌发期渍害胁迫条件下单位电导率聚类分析

Fig. 4 Unit electrical conductivity-based clustering of 353 rapeseed germplasm resources at the germination stage under waterlogging

2.4 油菜萌发期极端耐渍材料筛选

通过对综合评价指标 *D* 值和单位电导率进行相关性分析发现，两者间表现为极显著负相关，相关性系数为-0.75（图 5），即同一品种资源的 *D* 值越大，单位电导率则越小，说明可用单位电导率进行油菜萌发期耐渍性评价。根据聚类分析结果，*D* 值表现为极端耐渍型的品种资源有 58 份，表现为极端敏感的品种资源有 54 份。单位电导率表现为极端耐渍型的品种资源有 32 份，极端敏感型的品种资源有 65 份。分别取 *D* 值和单位电导率的极端材料的交集，作为稳定的极端耐渍、极端敏感材料。极端耐渍品种资源有阳光 131、川油 83、10-江棚 3 等 25 份品种资源，极端敏感品种资源有 Baltia 、Belinda 、21F78 等 23 份。进一步计算 25 份材料的平均值、标准差，最后取两种方法极端材料的交集作为最终的极端品种资源。其中 *D* 值大于平均值+标准差的品种资源有 7 份被鉴定为极端耐渍材料，*D* 值小于平均值－标准差的品种资源有 7 份被鉴定为极端敏感材料；单位电导率小于平均值－标准差的品种资源有 6 份被鉴定为极端耐渍材料，单位电导率大于平均值+标准差的品种资源有 8 份被鉴定为极端敏感材料。通过此方法

筛选出 12 份极端品种资源（表 4），极端耐渍材料 6 份，极端敏感材料 6 份(图 6)。对筛选出的极端材料进行分析发现，极端耐渍品种的 *D* 值均在 0.95 以上，单位电导率均在 200 μS/(cm • g) 左右，关键指标的相对值均在 0.8 以上，且多属于半冬性油菜。而极端敏感材料的 *D* 值大部分都小于 0，单位电导率在 600 μS/(cm • g) 左右，关键指标的相对值均在 0.45 以下，包含了冬性、半冬性。从图 7 中淹水处理后极端材料的表现来看，淹水处理后对极端耐渍品种的根系的影响较小，根长几乎没有变化。综上所述，筛选出的极端材料较为可靠。

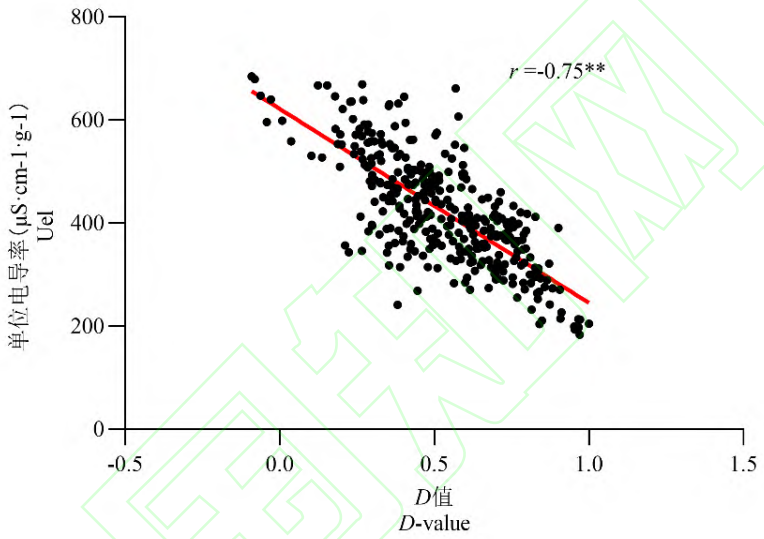


图 5 353 份油菜品种资源萌发期渍害胁迫条件下综合评价值与单位电导率的相关性

Fig. 5 The correlation between comprehensive evaluation index and unit electrical conductivity of 353 rapeseed germplasm resources at the germination stage under waterlogging

表 4 油菜品种资源萌发期极端耐渍和极端敏感材料的表现

Table 4 Performance of extreme rapeseed germplasm resources at germination stage under waterlogging

类型 Type	名称 Name	*D* 值 *D*-value	单位电导率（ μS/(cm •g)） unit electrical conductivity	相对根长 RRL	相对根鲜重 RRFW	相对根干重 RRDW	冬性类型 Winterness form
极端耐渍	10-江棚 3	1.00	204.48	0.91	0.98	0.98	半冬性
Extreme resistant	川油 83	0.97	182.86	0.85	0.90	0.99	半冬性
	阳光 2009	0.97	203.40	0.82	0.99	0.96	半冬性
	阳光 131	0.97	196.71	0.87	0.92	1.03	半冬性
	宁杂 2009	0.95	198.76	0.94	0.90	0.94	未知
	牛角油菜	0.95	193.24	0.91	0.91	0.96	半冬性
极端敏感	Baltia	-0.09	684.34	0.27	0.32	0.49	冬性
Extreme sensitive	15-6-3565-1	-0.08	679.15	0.31	0.39	0.40	半冬性
	21F78	-0.06	647.33	0.28	0.42	0.44	未知
	Sl 524	-0.04	595.67	0.27	0.35	0.36	冬性

	21F76	-0.03	639.42	0.30	0.41	0.44	未知
	Belinda	0.01	598.16	0.30	0.34	0.38	冬性

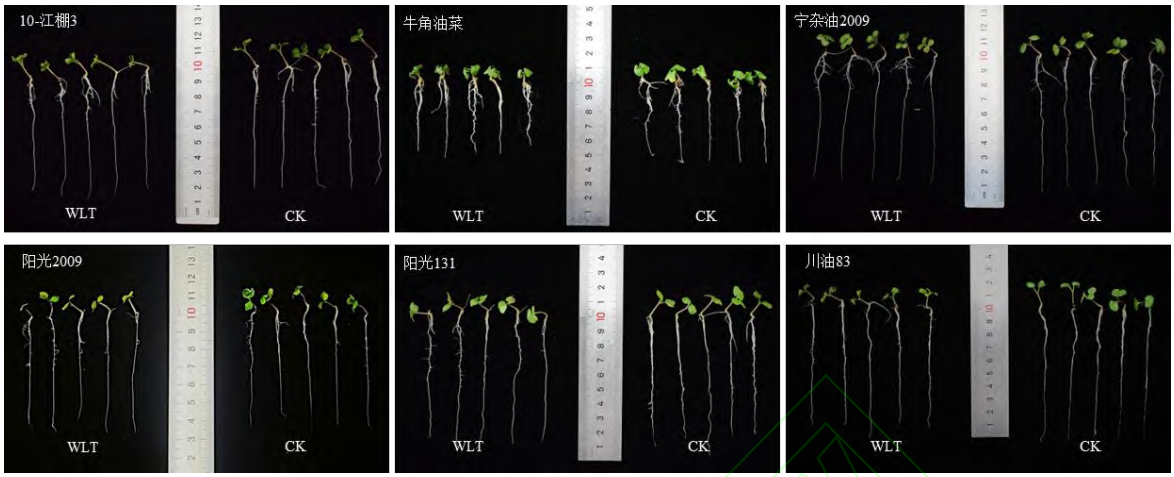


图 6 油菜萌发期极端耐渍品种资源的表现

Fig. 6 Performance of the extremetolerant rapeseed germplasm resources at the germination stage under waterlogging

3 讨论

对于油菜萌发期耐渍性的评价和耐渍品种资源的筛选，目前主要从耐渍性评价指标的确定和评价体系的构建来开展。在评价指标方面，许晶等[17]以存活率为评价指标来进行油菜萌发期耐渍性评价和种质资源筛选[。陈洁等[18]分析了油菜萌发期的相对根长、相对存活率、相对活力指数、相对茎长、相对鲜重，通过相关性分析，最终确定相对活力指数可用于筛选耐渍品种资源。Naseeb 等[19]选择对根系构型进行分析，最后确定总根长、总根表面积、总根体积、总根尖数和总根分支数是筛选耐涝材料的可靠性状。本研究则选择最直观的相对根长、相对下胚轴长、相对根鲜重、相对地上部鲜重、相对根干重和相对地上部干重 6 个表型指标作为主要评价指标，这些指标能够较直观地反映萌发期油菜幼苗的生长状况。结果表明，淹水处理 12 h 后，所有指标均变现为极显著下降，其中与根相关的指标下降最为严重，说明淹水处理对根生长的影响严重，这与陈洁等的研究结果一致。

研究人员最初主要是通过相关性分析，以与淹水处理相关性最强的某一指标作为评价标准来筛选耐渍材料，如上诉的许晶等[17]。陈雅慧[14]通过计算 9 个指标的隶属函数，然后求 9 个指标隶属函数值（MFVW，membership function evaluate waterlogging）的平均值作为评价标准，MFVW 越大则说明耐渍性越强，然后再结合电导率筛选到 12 份极端材料。Naseeb 等[19]同样是采用 MFVW 作为综合评价指标，并根据 MFVW 的平均值和标准差，将油菜的耐湿性分为 5 个等级。本研究为筛选油菜萌发期耐渍品种资源，参考了前人的方法并做了部分修改，选择对油菜萌发期的 6 个主要的生长指标进行分析，运用相关性分析、隶属函数分析法、主成分分析法和聚类分析法来对油菜的耐渍性做综合评价，并评价其耐渍级别[20-21]。主成分分析发现，6 个考察指标可提取出 2 个主成分，分别体现根的生长状况和地上部生物

量；根据提取的主成分计算耐渍性综合值（*D* 值），并对 *D* 值进行聚类分析，结果显示可分为极端耐渍、耐渍、敏感和极端敏感 4 种耐渍类型。为使评价指标更加丰富和全面，本研究还加入了单位电导率这一生理指标，并根据单位电导率进行聚类分析，结果表明同样可将 353 份品种资源分为上述 4 种类型。通过对单位电导率的分布发现，在 353 份品种资源中，所有极端耐渍品种资源的单位电导率均小于 300 μS/(cm • g)，而极端敏感品种资源的单位电导率均大于 500 μS/(cm • g)。将 *D* 值和单位电导率进行相关性分析发现，两者间的相关系数为-0.75，表现为极显著负相关，这与范其新等的研究结果一致[22]，说明单位电导率可作为辅助评价指标来对油菜萌发期耐渍性鉴定和耐渍品种资源筛选。最终本研究结合 *D* 值和单位电导率对 353 份品种资源进行进一步筛选，共筛选到 6 份极端耐渍品种资源和 6 份极端敏感品种资源，其中极端耐渍品种中有 5 份半冬性，敏感品种中包含了冬性和半冬性品种，这与李继军[16]等的研究结果一致。这些品种资源可为后期油菜耐渍机制的研究和耐渍品种的改良提供材料基础。

从以往的研究中可知，同一物种在不同的时期可能会表现出不同的抗逆性，油菜的耐渍性也同样如此，仅从某一时期来评价其耐渍性显然不够全面，这也是本研究的不足之一。因此本研究筛选出的油菜萌发期耐渍极端材料，将会对其苗期以及全生育期的耐渍性进行评价，以期筛选出各生育期均表现强耐渍性的油菜品种资源。

参考文献

[1]张学昆，陈洁，王汉中，李加纳，邹崇顺. 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(2): 204-208

Zhang X K, Chen J, Wang H Z, Li J N, Zou C S. Genetic difference of waterlogging tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) .Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(2): 204–208

[2]李真，蒲圆圆，高长斌，周广生，涂金星，傅廷栋. 甘蓝型油菜 DH 群体苗期耐湿性的评价. 中国农业科学, 2010, 43 (2): 286-292

Li Z, Pu Y Y, Gao C B, Zhou G S, Tu J X, Fu T D. Evaluation of waterlogging tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) DH lines at seedling stage. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43（2）: 286–292

[3]吴丽丽，李谷成，尹朝静. 生长期气候变化对我国油菜单产的影响研究——基于 1985-2011 年中国省域面板数据的实证分析 . 干旱区资源与环境, 2015, 29 (12): 198-203

Wu L L Li G C, Yin C J. Impact of climate change in rapeseed′s growing seasons on rapeseed production in China: An empirical analysis based on China’s provincial panel data from 1985 to 2011 . Journal of Arid Land resourcess and Environment, 2015, 29(12): 198-203

[4]Pan J W, Sharif R, Xu X W, Chen X H. Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: Research progress and prospects. Frontiers in Plant Science, 2021, 11：627331

[5]Kuai J, Liu Z W, Wang Y H, Meng Y L, Chen B L, Zhao W Q, Zhou Z G, Oosterhuis D M. Waterlogging during flowering and boll forming stages affects sucrose metabolism in the leaves subtending the cotton boll and its relationship with boll weight. Plant Science, 2014, 223 79-98

[6]Yan K, Zhao S J, Cui M X, Han G X, Wen P Vulnerability of photosynthesis and photosystem I in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) exposed to waterlogging. Plant Physiology and Biochemistry, 2018,125, 239–246

[7]Wang F X, Xu Y G, Wang S, Shi W W, Liu R R, Feng G, Song J. Salinity affects production and salt tolerance of dimorphic seeds of *Suae da salsa*. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, 95 41-48

[8]Hatzig S V, Frisch M, Breuer F, Nesi N, Ducournau S, Wagner M H, Leckband G, Abbadi A, Snowdon R J. Genome-wide association mapping unravels the genetic control of seed germination and vigor in *Brassica napus*. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 221

[9]Zaman M S U, Malik A I, Erskine W, Kaur P. Changes in gene expression during germination reveal pea genotypes with either "quiescence" or "escape" mechanisms of waterlogging tolerance . Plant, Cell & Environment, 2019, 42 (1): 245-258

[10]尹冬梅, 管志勇, 陈素梅, 陈发棣. 菊花及其近缘种属植物耐涝评价体系建立及耐涝性鉴定. 植物遗传资源学报, 2009, 10(3): 24-26

Yin D M, Guan Z Y, Chen S M, Chen F D. Establishment of waterlogging tolerance evaluation system and identification of waterlogging tolerance in chrysanthemum and its related species. Journal of Plant Genetic resourcess, 2009, 10(3): 24-26

[11]罗礽兰，胡道武，王静静，潘兆娥，贾银华，何守朴，王立如，庞保印，陈全家，杜雄明. 基于主成分分析和隶属函数的棉花种子萌发期耐涝性鉴定评价. 中国棉花, 2023, 50 (3): 1-5

Luo R N, Hu D W, Wang J J, Pan Z E, Jia Y H, He S P, Wang L R, Pang B Y, Chen Q J, Du X M. Identification and evaluation of waterlogging tolerance in cotton seed germination stage based on principal component analysis and membership function. China Cotton, 2023, 50(3): 1-5

[12]王永强，姚梦楠，周恩强，薛冬，赵娜，魏立斌，周瑶，李波，汪凯华，缪亚梅，王学军. 萌发期大豆种质耐涝性鉴定. 江苏农业科学, 2022, 50 (18): 169-174

Wang Y Q, Yao M N, Zhou E Q, Xue D, Zhao N, Wei L B, Zhou Y, Li B, Wang K H, Miao Y M, Wang X J. Identification of waterlogging tolerance in germination stage of soybean germplasm. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(18): 169-174

[13]刘瑞，曾源，加央，许甫超，徐晴，彭严春，董国清，董静，秦丹丹. 大麦种质资源芽期耐渍性遗传多样性分析及耐渍种质筛选 . 大麦与谷类科学, 2023, 40 (3): 1-10

Lui R, Zeng Y, Jia Y, Xu F C, Xu Q, Peng Y C, Dong G Q, Dong J, Qin D D. Genetic diversity analysis and screening of waterlogging-tolerant germplasms in barley during germination stage. Barley and Cereal Sciences, 2023, 40(3): 1-10

[14]陈雅慧. 油菜萌发期耐淹性种质资源筛选与遗传机制解析. 武汉：华中农业大学, 2019

Chen Y H. Germplasm Screening and genetic mechanism analysis of waterlogging tolerance in rapeseed *(Brassica napus* L.) during germination stage. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019

[15]焦茹玉，朱羿霖，谢其均，谭文清，曲亮，刘新红，邓力超，刘丽莉，严明理. 186 份甘蓝型油菜种子萌发期耐盐性鉴定 . 植物遗传资源学报, 2024, 25 (12): 2081-2093

Jiao R Y, Zhu Y L, Xie Q J, Tan W Q, Qu L, Liu X H, Deng L C, Liu L L, Yan M L. Identification of salt-tolerant during seed germination periodin 186 accession of *Brassica napus*. Journal of Plant Genetic resourcess, 2024, 25 (12): 2081-2093

[16]李继军，陈雅慧，王艺瑾，周志华，郭子越，张建，涂金星，姚璇，郭亮. 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(12):3162-3175

Li J J, Chen Y H, Wang Y J, Zhou Z H, Guo Z Y, Zhang J, Tu J X, Yao X, Guo L. Field evaluation of waterlogging tolerance and screening of waterlogging-tolerant germplasm in rapeseed (*Brassica napus L.*) . Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(12): 3162-3175

[17]许晶，曾柳，徐明月，程勇，张学昆，邹锡玲. 油菜耐渍性种质资源筛选与评价 . 中国油料作物学，2014, 36（6）:748-754

Xu J, Zeng L, Xu M Y, Cheng Y, Zhang X K, Zou X L. Screening and evaluation of waterlogging-tolerant germplasm resourcess in rapeseed (*Brassica napus*). Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(6): 748-754

[18]陈洁，张学昆，谌利，晁国红，李加纳. 甘蓝型油菜耐湿种质资源的快速评价与筛选. 中国油料作物学报，2006，28（2） ：138-143

Cen J, Zhang X K, Chen L, Chao G H, Li J N. Rapid evaluation and screening of waterlogging-tolerant germplasm resourcess in *Brassica napus*. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2006, 28(2): 138-143

[19]Naseeb U, Qian F, Geng R d, Xue Y J, Guan W J, Ji G X, Li H, Huang Q, Cai G X, Yan G X, Wu X M. Root system architecture change in response to waterlogging stress in a 448 global collection of rapeseeds (*Brassica napus L.*). Planta, 2024, 259 (5): 95-95

[20]江伟，张晓，刘大同，高德荣，张勇,李曼，寿路路，陆成彬. 小麦品质性状相关性及主成分分析. 江苏农业科学，2023，51(16)：43-48

Jiang W, Zhang X, Liu D T, Gao D R, Zhang Y, Li M, Shou L L, Lu C B. Correlation and principal component analysis of quality traits in wheat (*Triticum aestivum* L.). Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(16): 43-48

[21]曹禹,阿勒合斯·加尔得木拉提，玛力帕提·努尔太，陈建伟，彭云承，周大伟. 基于主成分分析的谷子种质资源主要农艺性状综合评价. 黑龙江农业科学，2023，(3)：1-7

Cao Y, Alehasi J E D M L T, Malipati N E T, Chen J W, Peng Y C, Zou D W. Comprehensive evaluation of major agronomic traits in foxtail millet （*Setaria italica*） germplasm resourcess based on principal component analysis. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023 (3): 1-7

[22]范其新,张学昆,谌利,李加纳. 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，2005，27(3):84-87

Fan Q X, Zhang X K, Chen L, Li J N. Effects of hypoxia on germination of yellow-seeded and black-seeded rapeseed (*Brassica napus L.*) . Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2005, 27(3): 84-87