

高青蕊,侯星宇,蔡红梅.长江中下游主栽水稻耐低温及铁锰毒害品种的筛选与鉴定[J].华中农业大学学报,2025,44(5):36-49.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.004

## 长江中下游主栽水稻耐低温及铁锰毒害品种的筛选与鉴定

高青蕊,侯星宇,蔡红梅

华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070

**摘要** 为筛选长江中下游冷浸田适应性品种,以该地区57份主栽水稻品种为试验材料,通过营养液培养试验进行低温及铁锰毒害筛选;以筛选获得的耐感品种为研究对象,分析两者在生长表型、根系构型、铁锰含量及抗氧化酶活性上的差异。结果显示,在对照条件下,无论是耐冷还是耐铁锰毒害品种,大多数生长指标和生理生化指标相较于敏感品种均没有显著差异;但在处理条件下,耐冷和耐铁锰毒害品种的生长指标和生理生化指标均优于敏感品种。在低温处理下,耐冷品种的存活率、地上部生物量、叶绿素b含量及POD活性均显著高于敏感品种,地上部MDA含量显著低于敏感品种。在 $++Fe^{2+}$ 处理下,耐亚铁毒害品种的株高、总根长、根系体积和表面积、根尖数、地上部干质量均显著高于亚铁毒害敏感品种,耐亚铁毒害品种根中铁含量显著低于亚铁毒害敏感品种,根和地上部SOD的活性及地上部POD的活性均显著高于亚铁毒害敏感品种。在 $++Mn^{2+}$ 处理下,耐锰毒害品种的株高、主根长、根系表面积、根和地上部干质量均显著高于锰毒害敏感品种,耐锰毒害品种根和地上部的锰含量显著低于锰毒害敏感品种,地上部SOD和POD的活性均显著高于锰毒害敏感品种。通过维恩图分析和复合逆境筛选获得了荃优丝苗(5#)、红香优丝苗(9#)、嘉丰优2号(19#)、全两优534(33#)、玮两优534(34#)、华两优2817(53#)等高产多抗品种,可作为冷浸田推广种植的候选品种。

**关键词** 水稻;低温;铁锰毒害;根系构型;铁锰含量;抗氧化酶活性

**中图分类号** S511.103.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0036-14

水稻是我国主要的粮食作物之一,我国约2/3的居民以稻米为口粮;我国水稻常年种植面积约3 000万 $hm^2$ ,占全国粮食种植面积的24%左右;稻谷总产量约2.1亿t,占粮食总产的30%左右<sup>[1-3]</sup>。因此,保障水稻高产稳产对我国粮食安全具有重要意义。冷浸田又称为冷浸性水稻土,是指山丘谷地受冷水、冷泉长期浸渍或湖区滩地受地下水长期浸渍的强还原性低产水稻田;广泛分布于我国南方山区丘陵谷地和冲积平原的低洼地带,是我国低产水稻田的主要类型之一。据统计,我国冷浸田面积约有346万 $hm^2$ ,占全国水稻种植面积的15%左右,约占低产水稻田面积的44%<sup>[4]</sup>。冷浸田土壤长期处于渍水还原状态,导致水温低、土壤冷、通透性差、结构不佳、还原性毒害物质含量高。土壤中大量亚铁离子( $Fe^{2+}$ )和锰离子( $Mn^{2+}$ )的积累容易导致水稻栽植后新根发

生慢、根系变黑变黄而腐败、僵苗、分蘖迟、有效穗数低,从而影响产量。冷浸田水稻的年产量只有3 000~4 500  $kg/hm^2$ ,严重制约着我国粮食产量的提高<sup>[5]</sup>。尽管通过耕作和栽培措施的改良可在一定程度上提高冷浸田的水稻产量,选用冷浸田适应性品种仍是一种高效快捷且长期有效的方法。

相关研究表明,不同水稻品种对低温、亚铁和锰毒害的抗性具有显著差异。张嘉伟<sup>[6]</sup>对61份水稻品种进行苗期耐低温筛选,获得耐冷品种湘糯1号和冷敏感品种湘早籼45号;蔡志欢<sup>[7]</sup>以存活率为指标从324份水稻品种中筛选获得19份耐低温材料;熊英等<sup>[8]</sup>以成苗率为指标从204份水稻品种中筛选出5份耐寒性突出的水稻材料;潘晓雪等<sup>[9]</sup>以发芽率为指标从106份水稻品种中筛选出4份耐寒品种。蔡慧姝等<sup>[10]</sup>通过营养液培养试验从19份水稻品种中筛选

收稿日期:2024-11-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1901203)

高青蕊,E-mail:1647943792@qq.com

通信作者:蔡红梅,E-mail:caihongmei@mail.hzau.edu.cn

出耐铁毒(200 mg/L  $\text{Fe}^{2+}$ )品种中优 9288;赵燕等<sup>[11]</sup>以根长、株高和生物量为指标筛选出耐亚铁胁迫品种 ITA245、IR20 和 IR52;Bresolin 等<sup>[12]</sup>以叶片古铜化症状的强弱为指标,筛选出耐亚铁毒害水稻基因型 Epagri108 和亚铁毒害敏感基因型 BRIR-GA 409。尽管国内外学者已筛选获得了若干耐冷、耐铁毒害的水稻品种,然而针对我国长江中下游地区主推高产水稻品种对低温和铁锰毒害的筛选仍有不足,目前仍少见适应冷浸田且高产的水稻品种。

本研究针对冷浸田“冷”和“毒”的主要障碍因子,以 57 份长江中下游地区主栽水稻品种为试验材料,通过营养液培养试验分别模拟低温和铁锰毒害,筛选抗性品种;并以筛选获得的耐感品种为研究对象,分析品种间生长表型、根系构型、铁锰含量及抗氧化酶活性的差异;进一步结合各品种籽粒产量、冷害幼苗死亡率和铁锰毒害指数,综合分析获得高产多抗品种,旨在为冷浸田适应性品种的推广种植提供材料和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用材料为来源于长江中下游地区的主栽水稻品种,共 57 份(表 1)。

### 1.2 田间种植试验

以表 1 中 57 份水稻品种为研究材料,于 2023 年在湖北省武汉市华中农业大学试验基地开展田间试验。土壤基础理化性质为:pH 值 6.4,有机质含量 14.75 g/kg,全氮含量 1.47 g/kg,有效磷含量 10.4 mg/kg,速效钾含量 102 mg/kg。设置 3 个重复,每个重复中各品种种植 6 行,每行 5 株,栽插密度为 25 cm × 20 cm,正常肥水管理。氮肥用量(N)为 160 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥用量( $\text{P}_2\text{O}_5$ )为 80 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥用量( $\text{K}_2\text{O}$ )为 120 kg/hm<sup>2</sup>。磷、钾肥均作基肥一次施用,氮肥按基肥穗肥比 6:4 施用。氮肥为尿素(含 N 46.4%),磷肥为过磷酸钙(含  $\text{P}_2\text{O}_5$  12%),钾肥为氯化钾(含  $\text{K}_2\text{O}$  60%)。水分管理采用深水返青、浅水分蘖、中期晒田、复水,之后保持浅水层直到抽穗,抽穗后干干湿湿,收割前 7 d 断水等管理措施,严格控制病虫害和杂草。成熟期收获后,考察籽粒产量。

### 1.3 种子萌发试验

将表 1 中 57 份水稻材料在室温下浸种 3 d 后,挑

选饱满并露白的种子各 50 粒,均匀放置于垫有湿润滤纸的培养皿中,分别于人工气候箱中进行常温(28℃)和低温处理(12℃)。每天光照 12 h(06:00—18:00),湿度 70%~80%,光照强度为 12 000 lx。设置 3 个重复,3 d 后统计常温处理的水稻发芽数,7 d 后统计低温处理的水稻发芽数,计算发芽率。

### 1.4 营养液培养试验

1)耐冷品种的筛选。将表 1 中 57 份水稻材料种子浸种、催芽后播于育苗板上。待幼苗长至 2 叶 1 心,移栽至营养液中培养,分别于人工气候箱中进行常温(28℃)和低温处理(12℃)。每天光照 12 h(06:00—18:00),湿度 70%~80%,光照强度为 12 000 lx。设置 3 个重复,每个重复每个品种种植 32 株。营养液配方参照国际水稻研究所水稻营养液配方<sup>[13]</sup>,每隔 3 d 更换 1 次营养液。处理 14 d 后常温恢复 3 d,统计幼苗死亡率。

2)耐铁、锰毒害品种的筛选。以表 1 中 57 份水稻品种为研究材料,于 2023 年在湖北省武汉市华中农业大学试验基地盆栽场开展营养液培养试验。种子经浸种、催芽后播于育苗板上。待幼苗长至 2 叶 1 心,移栽至营养液中预培养 5 d,之后分别转移至正常营养液(CK)、++ $\text{Fe}^{2+}$ (200 mg/L)和++ $\text{Mn}^{2+}$ (250 mg/L)的营养液中培养 14 d。设置 3 个重复,每个品种种植 6 株。营养液配方参照国际水稻所水稻营养液配方<sup>[13]</sup>,每隔 3 d 更换 1 次营养液。取样时分别用纯水、0.5 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液及超纯水冲洗 3 遍,植株经烘干、称质量后,计算铁、锰毒害指数。

3)复合抗性品种的筛选。将表 1 中 57 份水稻材料种子浸种、催芽后播于育苗板上。待幼苗长至 2 叶 1 心,移栽至营养液中预培养 5 d,之后转移至人工气候箱中进行正常处理(28℃+CK)及 12℃+200 mg/L  $\text{Fe}^{2+}$ +250 mg/L  $\text{Mn}^{2+}$ 的复合处理培养。每天光照 12 h(06:00—18:00),湿度 70%~80%,光照强度为 12 000 lx。设置 3 个重复,每个重复中每个品种种植 32 株。营养液配方参照国际水稻所水稻营养液配方<sup>[13]</sup>,每隔 3 d 更换 1 次营养液。14 d 后统计幼苗死亡率。

4)低温耐感品种的鉴定。以筛选获得的耐低温水稻品种红香优丝苗(9#)和低温敏感品种荟稻 1 号(16#)为研究材料,种子经浸种、催芽后播于育苗板上。待幼苗长至 2 叶 1 心,移栽至营养液中培养,分

表 1 本试验所用长江中下游主栽水稻品种

Table 1 Rice varieties mainly cultivated in the middle and lower reaches of the Yangtze River used in this experiment

编号 Number	品种名称 Varieties	编号 Number	品种名称 Varieties
1#	晶两优华占 Jingliangyouhuazhan	30#	富两优 508 Fuliangyou No. 508
2#	隆两优华占 Longliangyouhuazhan	31#	晶两优 534 Jingliangyou No. 534
3#	陵两优 268 Lingliangyou No. 268	32#	隆两优 534 Longliangyou No. 534
4#	C 两优华占 C Liangyouhuazhan	33#	全两优 534 Quanliangyou No. 534
5#	荃优丝苗 Quanyousimiao	34#	玮两优 534 Weiliangyou No. 534
6#	荃两优丝苗 Quanliangyousimiao	35#	全两优 681 Quanliangyou No. 681
7#	徽两优丝苗 Huiliangyousimiao	36#	垦两优 801 Kenliangyou No. 801
8#	五优晶丝苗 Wuyoujingsimiao	37#	荃优 822 Quanyou No. 822
9#	红香优丝苗 Hongxiangyousimiao	38#	荃两优 851 Quanlaingyou No. 851
10#	韵两优丝苗 Yunliangyousimiao	39#	荃优 879 Quanyou No. 879
11#	靓两优丝苗 Liangliangyousimiao	40#	徽两优 898 Huiliangyou No. 898
12#	荃优鄂丰丝苗 Quanyouefengsimiao	41#	Y 两优 900 Y Liangyou No. 900
13#	徽两优粤禾丝苗 Huiliangyouyuehesimiao	42#	丰两优 916 Fengliangyou No. 916
14#	兴安香占 Xinganxiangzhan	43#	徽两优 982 Huiliangyou No. 982
15#	悦两优美香新占 Yueliangyoumeixiangxinzhan	44#	隆两优 987 Longliangyou No. 987
16#	荟稻 1 号 Huidao No.1	45#	徽两优 996 Huiliangyou No. 996
17#	红糯优 1 号 Hongnuoyou No.1	46#	捷两优 1187 Jieliangyou No. 1187
18#	丰两优香一号 Fengliangyouxiang No.1	47#	荆两优 1189 Jingliangyou No. 1189
19#	嘉丰优 2 号 Jiafengyou No.2	48#	隆两优 1212 Longliangyou No. 1212
20#	红良优 5 号 Hongliangyou No. 5	49#	中谷优 1361 Zhongguyou No. 1361
21#	昌两优 8 号 Changliangyou No. 8	50#	晶两优 1377 Jingliangyou No. 1377
22#	六两优香 11 Liuliangyouxiang No. 11	51#	隆两优 1377 Longliangyou No. 1377
23#	香两优 16 Xiangliangyou No. 16	52#	Y 两优 1928 Y Liangyou No. 1928
24#	Y 两优 17 Y Laingyou No. 17	53#	华两优 2817 Hualiangyou No. 2817
25#	红香优 68 Hongxiangyou No. 68	54#	华两优 6516 Hualiangyou No. 6516
26#	早优 73 Hanyou No. 73	55#	辉两优华占 Huiliangyouhuazhan
27#	华浙优 261 Huazheyou No. 261	56#	龙两优 1137 Longliangyou No. 1137
28#	五优 308 Wuyou No. 308	57#	广两优 35 Guangliangyou No. 35
29#	A 两优 336 A Liangyou No. 336		

别于人工气候箱中进行常温 (28 ℃) 和低温处理 (12 ℃)。每天光照 12 h (06:00—18:00), 湿度 70%~80%, 光照强度为 12 000 lx。设置 3 个重复, 每个重复中每个品种种植 16 株。营养液配方参照国际水稻所水稻营养液配方<sup>[13]</sup>, 每隔 3 d 更换 1 次营养液。7 d 后收获根和地上部, 测定叶绿素和丙二醛含量、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性; 22 d 后统计幼苗死亡率, 测定地上部干质量。

5) 铁、锰毒害耐感品种的鉴定。以筛选获得的耐亚铁毒害品种玮两优 534(34#)和亚铁毒害敏感品

种荃优 822(37#), 耐锰毒害品种隆两优 534(32#)和锰毒害敏感品种徽两优丝苗(7#)为研究材料, 于 2023 年在湖北省武汉市华中农业大学试验基地盆栽场开展营养液培养试验。种子经浸种、催芽后播于育苗板上。待幼苗长至 2 叶 1 心, 移栽至营养液中预培养 5 d, 之后分别转移至正常营养液(CK)、++Fe<sup>2+</sup> (200 mg/L) 和 ++Mn<sup>2+</sup> (250 mg/L) 的营养液中培养 14 d。设置 3 个重复, 每个重复中每个品种种植 6 株。营养液配方参照国际水稻所水稻营养液配方<sup>[13]</sup>, 每隔 3 d 更换 1 次营养液。取样前测量株高、

根长,扫描根系构型;取样时分别用纯水、0.5 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液及超纯水冲洗3遍;收获根和地上部,测定铁、锰含量及SOD和POD活性。

### 1.5 分析测定方法

1)根系构型扫描。使用根系扫描仪(Epson Perfection V700 Photo)对水稻根系进行扫描分析。

2)铁锰含量的测定。参照文献[14]对烘干的样品进行消化,使用火焰原子吸收分光光度计测定铁和锰含量。

3)生理生化指标的测定。参照文献[15]分别测定样品中叶绿素和丙二醛的含量、SOD和POD的

活性。

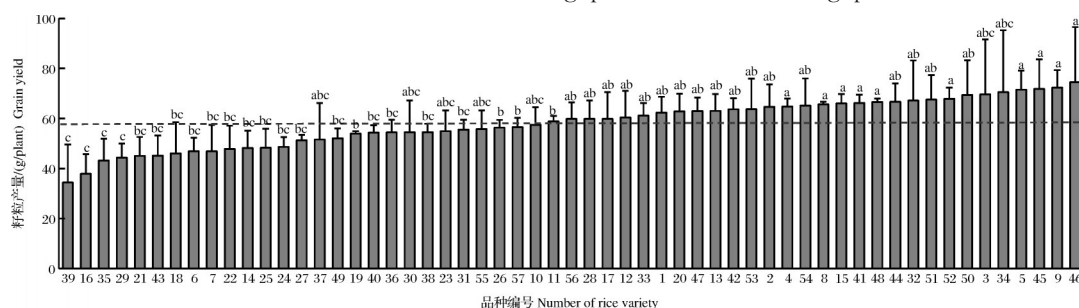
### 1.6 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019软件进行数据计算与制图,采用Statistical Product and Service Solutions 27 (SPSS PASW Statistics 27)进行数据统计和显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 各品种的产量

田间试验结果显示,各水稻品种间的籽粒产量差异显著,最小值为34.3 g/plant,最大值为74.5 g/plant,平均值为58.1 g/plant(图1)。



各编号对应品种见表1;虚线表示平均值,不同小写字母表示通过Tukey检验具有显著差异( $P < 0.05$ )。下同。The number of variety as detailed in table 1. The dashed line represents the average mean. Different letters indicate significant differences by Tukey's test ( $P < 0.05$ ). The same as follows.

图1 各供试水稻品种2023年的籽粒产量

Fig. 1 Grain yield of each rice variety

### 2.2 耐低温品种的筛选与鉴定

在常温(12℃)处理下,各品种的种子发芽率为96%~100%,幼苗死亡率均为0。低温(12℃)处理后,各品种间的种子发芽率和幼苗死亡率存在显著差异;种子发芽率在0~100%,平均25%;幼苗死亡率在0~100%,平均41%(图2)。分别将种子发芽率、幼苗死亡率与籽粒产量作四分图,可将之分为耐冷高产、耐冷低产、冷敏感高产、冷敏感低产4种类型(图2B、C)。为继续鉴定低温耐、感品种间的差异,从中选取耐冷高产品种红香优丝苗(9#)和冷敏感低产品种荃稻1号(16#)用于后续研究。

在低温(12℃)处理下,耐冷品种(9#)的幼苗死亡率为0%,冷敏感品种(16#)的幼苗死亡率为100%;耐冷品种的地上部干质量和叶片中叶绿素b的含量显著高于冷敏感品种,但是叶绿素a的含量在两者间没有显著差异(图3A~D)。在常温(28℃)条件下,耐冷品种根中丙二醛(MDA)的含量显著高于冷敏感品种;在低温(12℃)处理下,耐冷品种根和地上部过氧化物酶(POD)的活性显著高于冷敏感品

种,但是地上部超氧化物歧化酶(SOD)的活性和MDA的含量显著低于冷敏感品种(图3E~J)。与常温相比,低温处理后耐冷品种根中SOD和POD活性以及地上部SOD活性和MDA含量的变化幅度均小于冷敏感品种(图3E~J)。可见,耐冷品种对外界温度变化的感知和反应要比冷敏感品种更加迟缓,对低温具有更高的抗性。

### 2.3 耐亚铁毒害品种的筛选与鉴定

$++\text{Fe}^{2+}$ 处理后,各品种的生长受到显著抑制,其亚铁毒害指数具有显著差异;最小值为0.01,最大值为0.58,平均值为0.24(图4A、C)。将亚铁毒害指数与籽粒产量作四分图,可将之分为耐铁毒高产、耐铁毒低产、铁毒敏感高产、铁毒敏感低产4种类型(图4B)。为继续鉴定亚铁毒害耐、感品种间的差异,从中选取耐铁毒高产品种玮两优534(34#)和铁毒敏感低产品种荃优822(37#)用于后续研究。

$++\text{Fe}^{2+}$ 处理下,耐亚铁毒害品种(34#)的生长表型和根系构型均优于亚铁毒害敏感品种(37#)(图5)。CK条件下,耐亚铁毒害品种和亚铁毒害敏感品

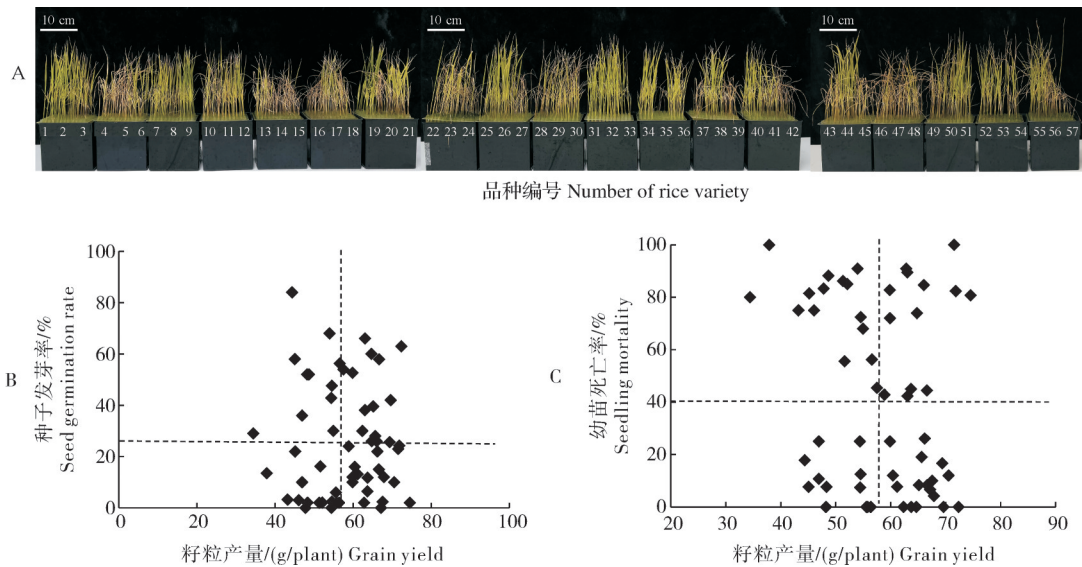
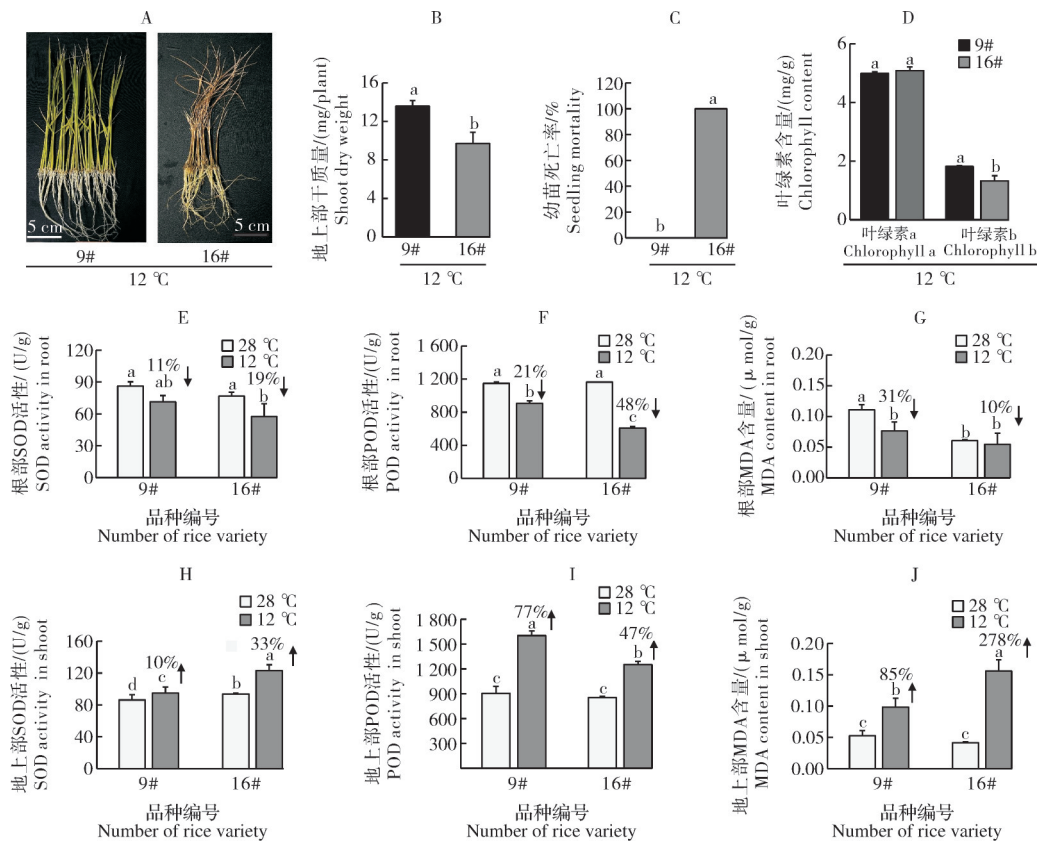


图2 低温(12℃)处理下,各品种的生长表型(A)及种子发芽率(B)、幼苗死亡率(C)与籽粒产量的四分图

Fig. 2 The growth phenotype(A), quadrant plot of seed germination rate(B), seedling mortality(C) and grain yield for each variety under low temperature (12℃) treatment



A:生长表型;B:地上部干质量;C:幼苗死亡率;D:叶绿素a和b的含量;E:根部SOD活性;F:根部POD活性;G:根部丙二醛含量;H:地上部SOD活性;I:地上部POD活性;J:地上部丙二醛含量。A: The growth phenotype; B: Shoot dry weight; C: Seedling mortality; D: The content of chlorophyll a and b; E: SOD activity in root; F: POD activity in root; G: MDA content in root; H: SOD activity in shoot; I: POD activity in shoot; J: MDA content in shoot.

图3 常温(28℃)及低温(12℃)处理下,耐冷品种(9#)和敏感品种(16#)的生长表型及生化指标

Fig. 3 Growth phenotype and biochemical parameters of cold-tolerant variety (9#) and cold-sensitive variety (16#) under 28℃ and 12℃ treatments

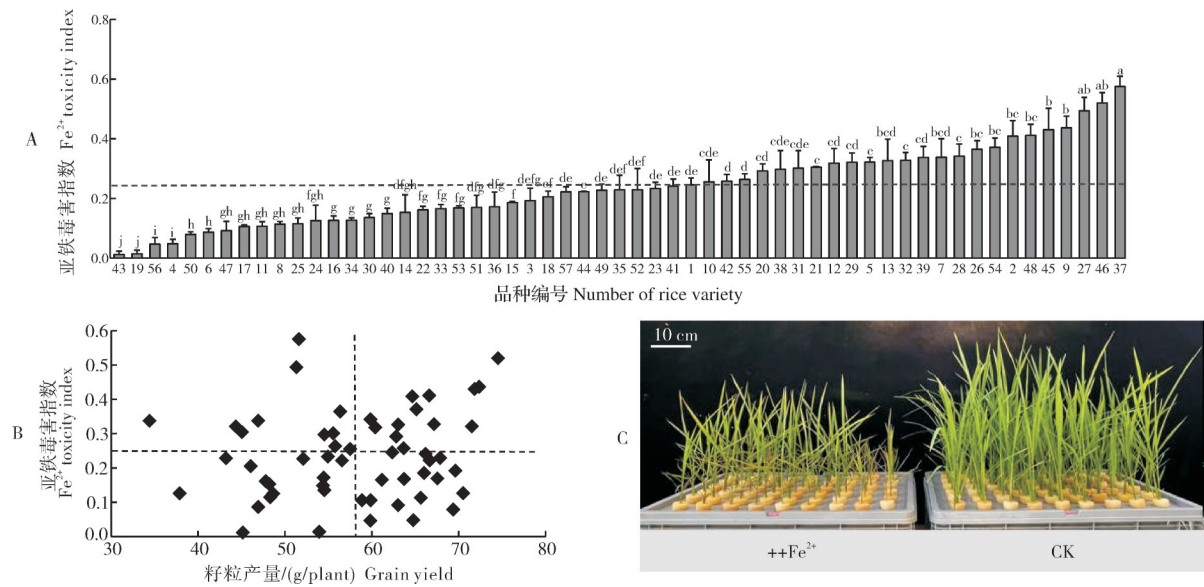
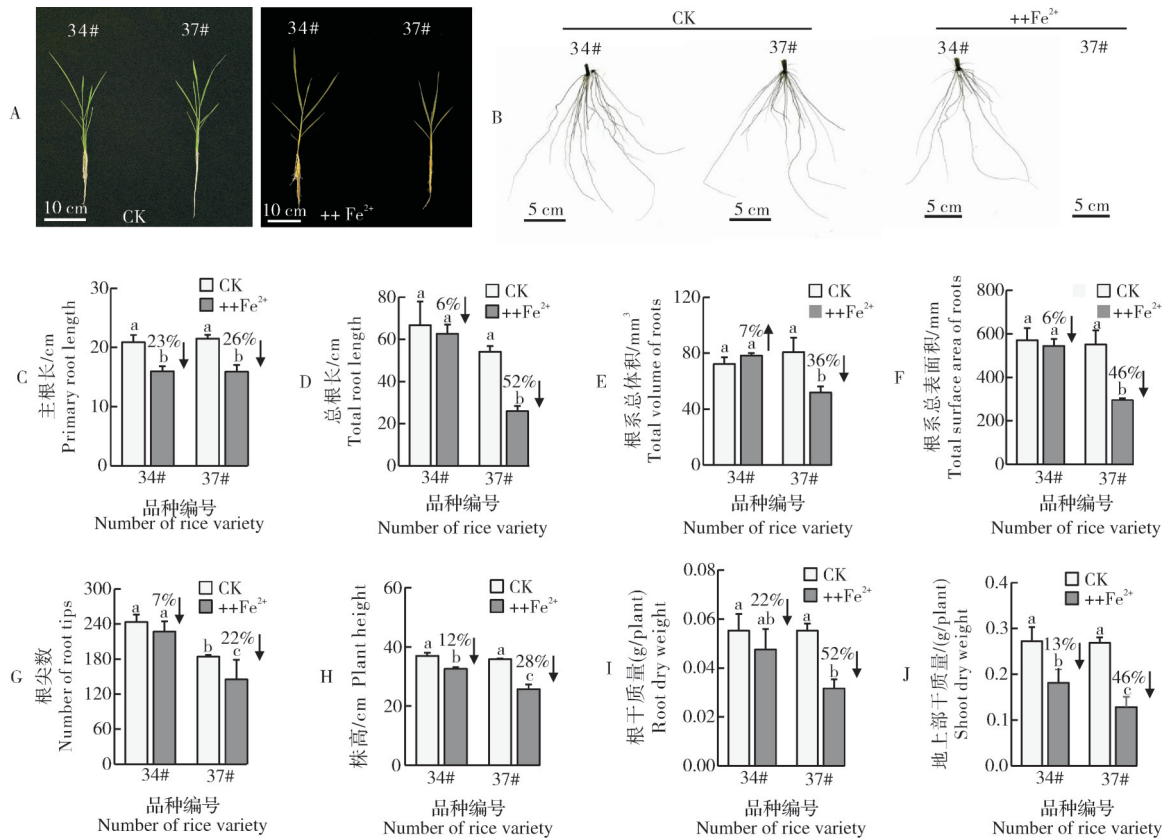


图4  $++\text{Fe}^{2+}$ 处理下,各品种亚铁毒害指数(A)及亚铁毒害指数与籽粒产量的四分图(B)和水稻生长表型(C)  
Fig. 4  $\text{Fe}^{2+}$  toxicity index(A), quadrant plot of  $\text{Fe}^{2+}$  toxicity index and grain yield for each variety(B) and growth phenotype(C) under  $++\text{Fe}^{2+}$  treatment



A:生长表型;B:根系表型;C:主根长;D:总根长;E:根系总体积;F:根系总表面积;G:根尖数;H:株高;I:根干质量;J:地上部干质量。  
A: The growth phenotype; B: Root phenotype; C: Primary root length; D: Total root length; E: Total volume of root; F: Total surface area of root; G: Number of root tips; H: Plant height; I: Root dry weight; J: Shoot dry weight.

图5 CK及 $++\text{Fe}^{2+}$ 处理下,耐亚铁毒害品种(34#)及敏感品种(37#)的生长表型及根系构型

Fig. 5 The growth phenotype and root architecture of  $\text{Fe}^{2+}$ -tolerant variety(34#) and  $\text{Fe}^{2+}$ -sensitive variety (37#) under CK and  $++\text{Fe}^{2+}$  treatment

种的株高、根长、根系体积和表面积、根尖数、根和地上部干质量均无明显差异;  $++\text{Fe}^{2+}$  处理下, 耐亚铁毒害品种的株高、总根长、根系体积和表面积、根尖数、地上部干质量均显著高于亚铁毒害敏感品种(图5C~J)。与CK相比,  $++\text{Fe}^{2+}$  处理后, 耐亚铁毒害品种根长、株高、根系体积和表面积、根尖数、根和地上部干质量的降幅均小于亚铁毒害敏感品种(图5C~J)。可见, 相较于亚铁毒害敏感品种, 外界高水平的亚铁对耐亚铁毒害品种根系和地上部生长的抑制程度较小。

CK条件下, 耐亚铁毒害品种(34#)和亚铁毒害

敏感品种(37#)根和地上部的铁含量、SOD和POD的活性均无显著差异;  $++\text{Fe}^{2+}$  处理下, 耐亚铁毒害品种根中铁含量显著低于亚铁毒害敏感品种, 根和地上部SOD的活性及地上部POD的活性均显著高于亚铁毒害敏感品种(图6)。与CK相比,  $++\text{Fe}^{2+}$  处理后, 耐亚铁毒害品种根和地上部铁含量分别提高了7.6倍和8.7倍, 而亚铁毒害敏感品种根和地上部铁含量分别提高了13.4倍和11.4倍(图6A、D)。可见, 相较于亚铁毒害敏感品种, 耐亚铁毒害品种对亚铁的吸收量更少, 且在外界高水平亚铁处理下可维持较高的抗氧化能力, 从而抵抗亚铁毒害。

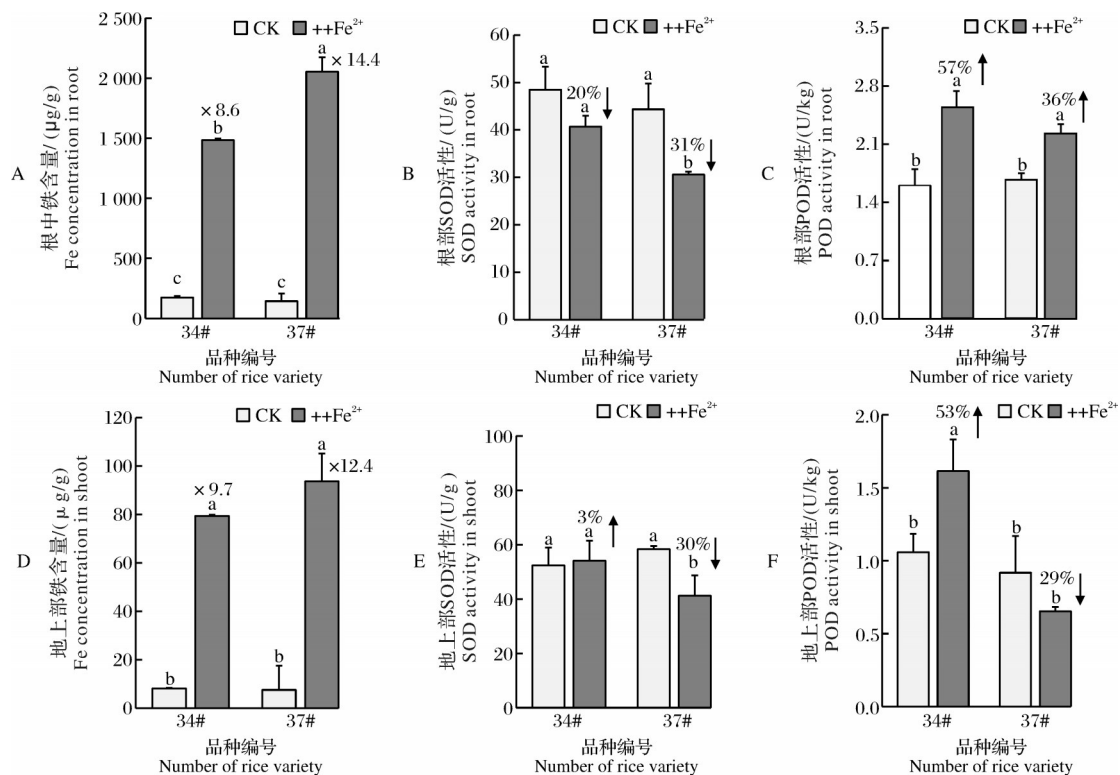


图6 CK及 $++\text{Fe}^{2+}$ 处理下, 耐亚铁毒害品种(34#)及敏感品种(37#)的生理生化指标  
A: 根部铁含量; B: 根部SOD活性; C: 根部POD活性; D: 地上部铁含量; E: 地上部SOD活性; F: 地上部POD活性。对照(CK)及 $++\text{Fe}^{2+}$ 处理下, 耐亚铁毒害品种(34#)及敏感品种(37#)根和地上部的铁含量。A: The content of Fe in root; B: SOD activity in root; C: POD activity in root; D: The content of Fe in shoot; E: SOD activity in shoot; F: POD activity in shoot.

图6 CK及 $++\text{Fe}^{2+}$ 处理下, 耐亚铁毒害品种(34#)及敏感品种(37#)的生理生化指标

Fig. 6 The biochemical parameters of  $\text{Fe}^{2+}$ -tolerant variety (34#) and  $\text{Fe}^{2+}$ -sensitive variety (37#) under CK and  $++\text{Fe}^{2+}$  treatment

## 2.4 耐锰毒害品种的筛选与鉴定

$++\text{Mn}^{2+}$  处理后, 各品种的生长受到显著抑制, 其锰毒害指数具有显著差异; 最小值为0.00, 最大值为0.64, 平均值为0.34(图7A、C)。将锰毒害指数与籽粒产量作四分图, 可将之分为耐锰毒高产、耐锰毒低产、锰毒敏感高产、锰毒敏感低产4种类型(图7B)。为继续鉴定锰毒害耐、感品种间的差异, 从中选取耐锰毒高产品种隆两优534(32#)和锰毒敏感低

产品种徽两优丝苗(7#)用于后续研究。

$++\text{Mn}^{2+}$  处理下, 耐锰毒害品种(32#)的生长表型和根系构型均优于锰毒害敏感品种(7#)(图8)。CK条件下, 耐锰毒害品种(32#)和锰毒害敏感品种(7#)的株高、根长、根系体积和表面积、根尖数、根和地上部干质量均无明显差异;  $++\text{Mn}^{2+}$  处理下, 耐锰毒害品种的株高、主根长、根系表面积、根和地上部干质量均显著高于锰毒害敏感品种(图8C~J)。与

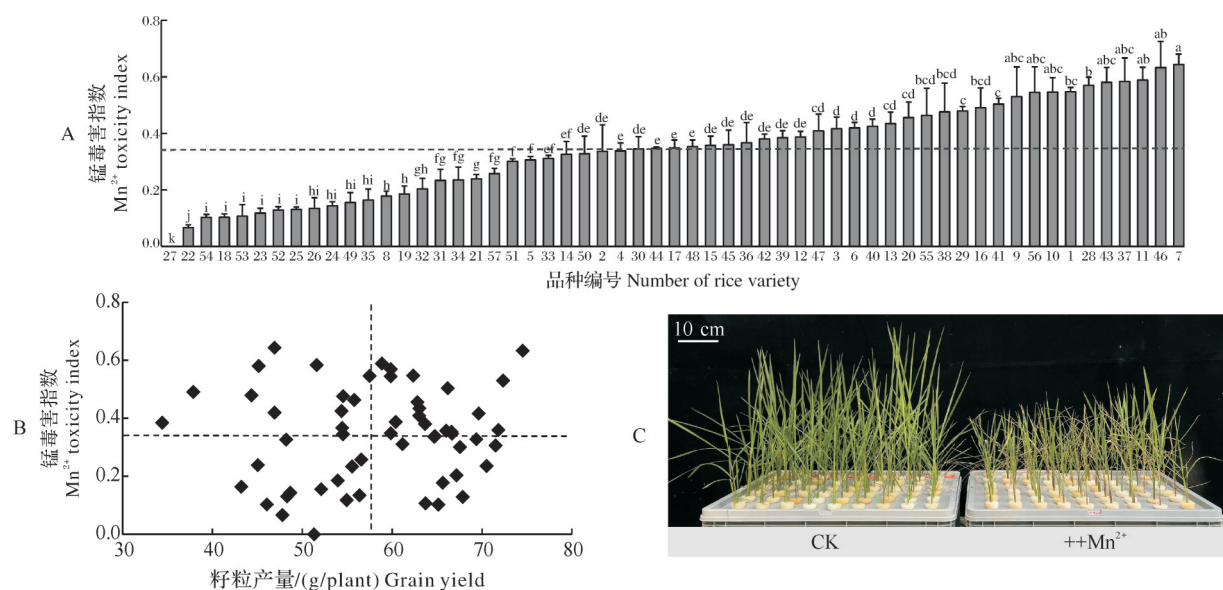


图7 ++Mn<sup>2+</sup>处理下,各品种锰毒害指数(A)及锰毒害指数与籽粒产量的四分图(B)与水稻生长表型(C)  
Fig. 7 ++Mn<sup>2+</sup> toxicity index(A), quadrant plot of Mn<sup>2+</sup> toxicity index and grain yield for each variety(B) and growth phenotype(C) under ++Mn<sup>2+</sup> treatment

CK相比,++Mn<sup>2+</sup>处理后,耐锰毒害品种根长、株高、根系体积和表面积、根尖数、根和地上部干质量的降幅均小于锰毒害敏感品种(图8C~J)。可见,相较于锰毒害敏感品种,外界高水平的锰对耐锰毒害品种根系和地上部生长的抑制程度较小。

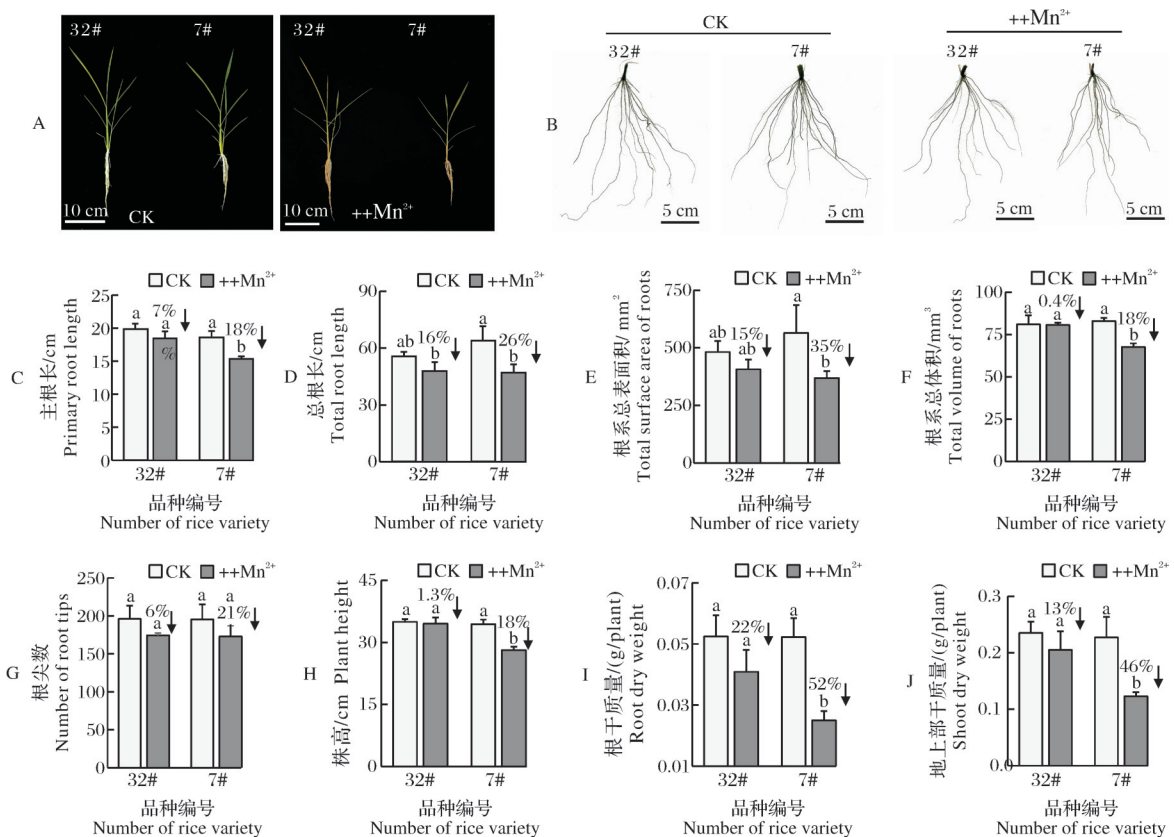
CK条件下,耐锰毒害品种(32#)和锰毒害敏感品种(7#)根和地上部的锰含量、根中SOD和POD的活性均无显著差异,耐锰毒害品种(32#)地上部POD的活性显著高于锰毒害敏感品种(7#),而地上部SOD的活性显著低于锰毒害敏感品种;++Mn<sup>2+</sup>处理下,耐锰毒害品种根和地上部的锰含量显著低于锰毒害敏感品种,地上部SOD和POD的活性均显著高于锰毒害敏感品种(图9)。与CK相比,++Mn<sup>2+</sup>处理后,耐锰毒害品种根和地上部锰含量分别提高了17.9倍和5.2倍,而锰毒害敏感品种根和地上部锰含量分别提高了12.6倍和22.3倍;耐锰毒害品种根和地上部SOD和POD活性的变幅均低于锰毒害敏感品种(图9)。可见,相较于锰毒害敏感品种,耐锰毒害品种对锰的吸收量更少,且在外界高水平锰处理下地上部可维持较高的抗氧化能力,从而抵抗锰毒害。

## 2.5 高产多抗品种分析

为了分析是否有品种兼具高产、耐冷、耐铁锰毒害特性,将籽粒产量最高的17个品种(前30%)、低温处理后幼苗死亡率最低的17个品种(前30%)、

++Fe<sup>2+</sup>处理后毒害指数最低的17个品种(前30%)以及++Mn<sup>2+</sup>处理后毒害指数最低的17个品种(前30%)作维恩图。结果显示,兼具高产和耐冷的品种有4个(3#、5#、9#、44#),兼具高产和耐亚铁毒害的品种有2个(4#、55#),兼具耐冷和耐亚铁毒害的品种有1个(33#),兼具耐冷和耐锰毒害的品种有2个(26#、53#),兼具耐亚铁毒害和耐锰毒害的品种有3个(18#、19#、24#),兼具高产、耐冷和耐锰毒害的品种有3个(32#、52#、54#),兼具高产、耐亚铁毒害和耐锰毒害的品种有2个(8#、34#),兼具耐冷、耐亚铁毒害和耐锰毒害的品种有1个(25#),没有找到兼具高产、耐冷、耐亚铁毒害和耐锰毒害的品种(图10)。

为了进一步确定低温及亚铁毒害和耐锰毒害复合抗性品种,通过营养液培养试验对各品种进行了复合逆境(12℃+Fe<sup>2+</sup>+Mn<sup>2+</sup>)处理。结果显示,正常处理下,各品种幼苗死亡率均为0;在复合处理下,各品种间的幼苗死亡率存在显著差异,幼苗死亡率在0~100%,平均值为30%(图11)。幼苗死亡率最低的17个品种(前30%)为:5#、6#、7#、9#、11#、12#、19#、31#、32#、33#、34#、37#、39#、4#、47#、4#、53#,死亡率在0~10.5%(图11)。其中,5#、9#、19#、33#、34#、53#这6个品种与维恩图中多抗品种重叠(图10~图11),这几个品种可作为冷浸田推广种植的候选品种。



A: 生长表型; B: 根系构型; C: 主根长; D: 总根长; E: 根系总表面积; F: 根系总体积; G: 根尖数; H: 株高; I: 根干质量; J: 地上部干质量。

A: The growth phenotype; B: Root architecture; C: Primary root length; D: Total root length; E: Total volume of root; F: Total surface area of root; G: Number of root tips; H: Plant height; I: Root dry weight; J: Shoot dry weight.

图8 CK及++Mn<sup>2+</sup>处理下,耐锰毒害品种(32#)及敏感品种(7#)的生长表型及根系构型

Fig. 8 The growth phenotype and root architecture of Mn<sup>2+</sup>-tolerant variety (32#) and Mn<sup>2+</sup>-sensitive variety (7#) under CK and ++Mn<sup>2+</sup> treatment

### 3 讨论

冷浸田是我国中低产稻田的主要类型之一,其水温低、土壤冷、还原性毒害物质含量高是限制水稻产量的主要障碍因子。针对冷浸田“冷”和“毒”的主要特征,本研究以57份长江中下游地区主栽水稻品种为试验材料,通过模拟试验筛选获得了低温和铁锰毒害抗性品种;并以筛选获得的耐感品种为材料,分析了抗性品种的表型及生理生化特征。结果显示,在低温和铁锰毒害条件下,抗性品种的生长表型和根系构型均优于敏感品种;与对照相比,低温和铁锰毒害处理后,抗性品种的表型指标和生理生化指标的变化幅度均小于敏感品种;表明相较于敏感品种,抗性品种对外界逆境的响应较迟缓,更加有利于其生长发育。此外,本研究综合考量抗逆性和籽粒产量,筛选出高产高抗品种,可为冷浸田适应性品种的推广种植提供重要材料和参考依据。

水温、土温低是冷浸田中水稻幼苗生长的重要

障碍因子,低温会阻碍叶绿素合成及叶绿体形成,从而影响光合速率<sup>[7, 16-17]</sup>。本研究结果显示,在低温条件下,冷敏感品种(16#)叶绿素b的含量仅为耐冷品种(9#)的72.22%,而叶绿素a的含量在两者之间没有显著差异。潘孝武等<sup>[18]</sup>的研究结果也显示,冷敏感水稻品种在冷处理第5天时,叶绿素含量就出现明显下降。低温胁迫下,植物体内易产生大量的活性氧自由基,导致膜脂过氧化,造成膜系统氧化损伤。植物体内存在一系列酶促反应以及非酶类的抗氧化剂以清除活性氧自由基,保护植物细胞免受活性氧的伤害,维持膜系统的稳定性,以增强植株的抗寒力。SOD和POD是清除活性氧过程中最主要的抗氧化酶,有研究表明,低温条件下,水稻幼苗中SOD和POD的活性均会显著上升,这表明植物可通过增强抗氧化酶的活性来减轻低温带来的氧化损伤<sup>[19-24]</sup>。本研究结果也显示,低温处理下,耐冷品种(9#)根中SOD活性、根和地上部POD活性分别为冷

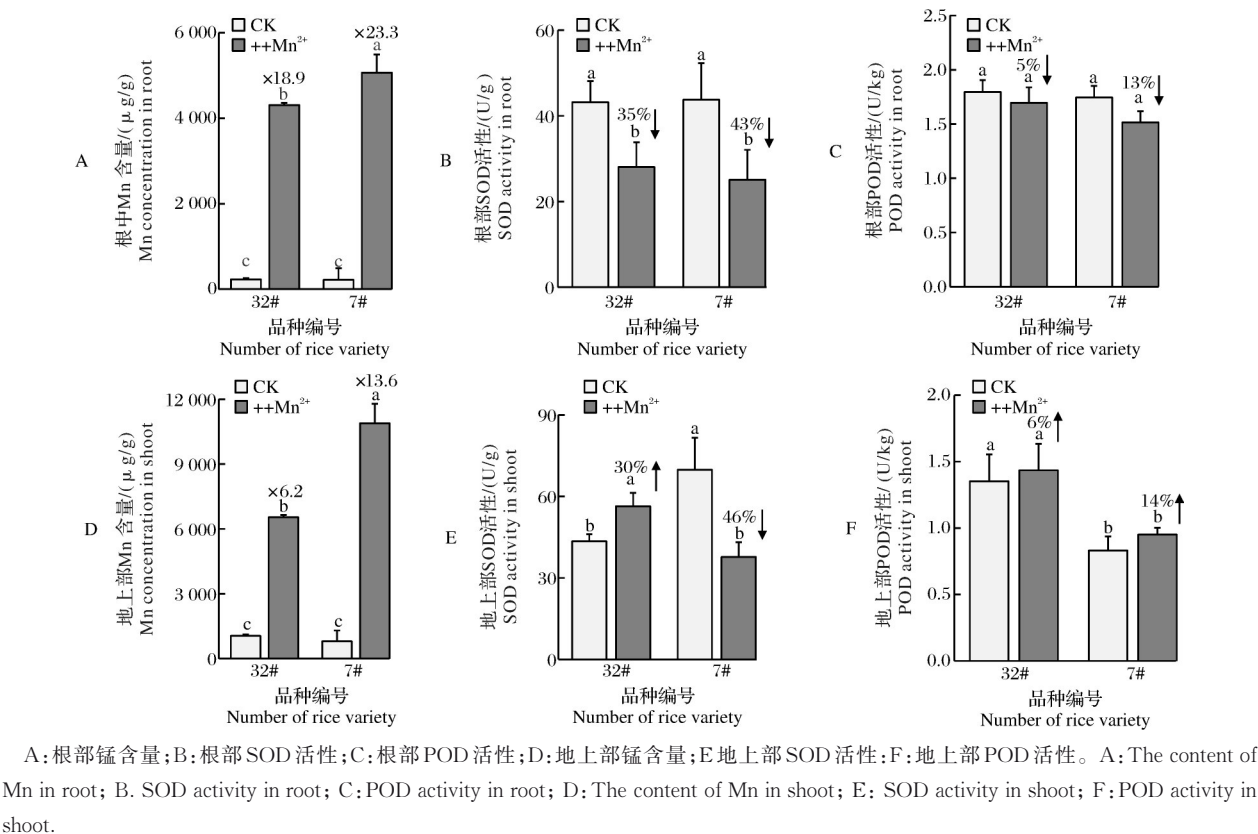


图 9 CK 及 ++Mn<sup>2+</sup> 处理下,耐锰毒害品种(32#)及敏感品种(7#)的生理生化指标

Fig. 9 The biochemical parameters of Mn<sup>2+</sup>-tolerant variety (32#) and Mn<sup>2+</sup>-sensitive variety (7#) under CK and ++Mn<sup>2+</sup> treatment

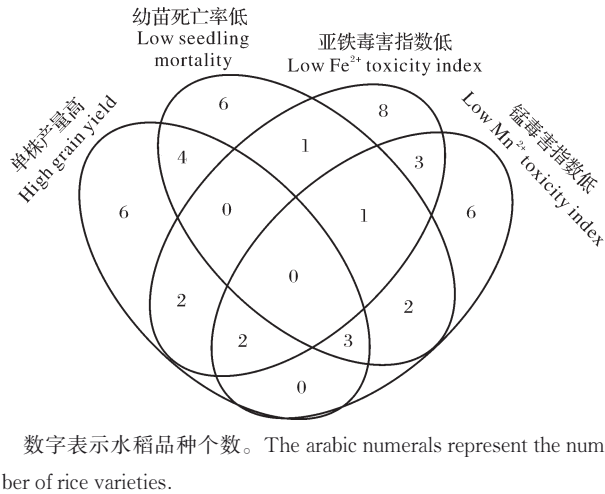
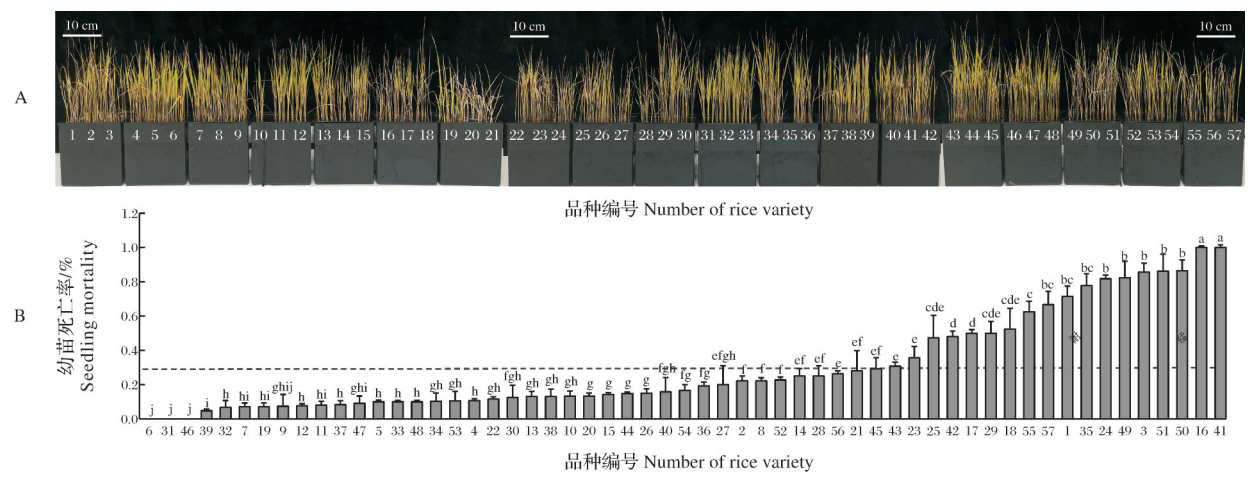


图 10 籽粒产量高、幼苗死亡率低、亚铁毒害指数低、锰毒害指数低的品种维恩图

Fig. 10 Venn diagram of varieties with high grain yield, low seedling mortality, low Fe<sup>2+</sup> toxicity index, and low Mn<sup>2+</sup> toxicity index

敏感品种(16#)的 1.24、1.49 和 1.28 倍,可见耐冷品种中较高水平的抗氧化酶活性可有效降低体内活性氧的水平,缓解低温对植株的伤害。

MDA 是细胞脂质过氧化的主要产物之一,MDA 含量的高低可用于评价膜系统的氧化程度,是一个评估植物对逆境胁迫响应程度的有效指标。一般而言,MDA 的积累与植物的耐寒能力呈负相关性。低温胁迫后,水稻幼苗根系的 MDA 含量会不断增加,冷敏感品种中 MDA 的含量迅速增加,而耐冷品种中 MDA 含量的增幅较小<sup>[6, 20, 23-24]</sup>。本研究结果也显示,低温处理后,耐冷品种(9#)地上部的 MDA 含量仅为冷敏感品种(16#)的 62.82%,且 MDA 含量的增幅也显著低于敏感品种,耐冷品种(9#)地上部的 MDA 含量增加了 85%,而冷敏感品种(16#)地上部的 MDA 含量增加了 278%。低温处理后,耐冷品种(9#)根中的 MDA 含量显著下降,其降幅显著高于敏感品种,耐冷品种(9#)根中 MDA 的含量降低了 31%,而冷敏感品种(16#)根中 MDA 的含量仅降低了 10%,耐冷品种体现出了更高的抗逆性。虽然多数研究结果表明,低温下植物由于受到胁迫,体内的 MDA 含量会显著升高<sup>[20-23]</sup>;然而也有研究表明,低温下植株体内的 MDA 含量会显著降低<sup>[25]</sup>。例如,王树刚等<sup>[25]</sup>对 15 个不同小麦品种在低温胁迫条



A: 各水稻品种的生长表型, 数字表示水稻品种的编号; B: 低温及铁锰毒害复合处理下, 各水稻品种的幼苗死亡率, 虚线表示平均值。  
A: The growth phenotype of each rice variety; The arabic numerals represent the serial number of each rice variety. B: The seedling mortality of each rice variety. The dashed line represents the average mean.

图 11 低温及铁锰毒害复合处理下, 各品种的生长表型和幼苗死亡率  
Fig. 11 The growth phenotype and seedling mortality of each variety under the combined treatment of low temperature,  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$

件下的抗冻性进行了评价, 结果显示, 各小麦品种中 SOD 和 POD 活性均有上升趋势, 但 MDA 的含量均显著下降。在本研究中, 低温处理后, 耐冷品种和冷敏感品种的根和地上部 SOD 和 POD 活性以及 MDA 含量表现出不同的变化趋势, 我们推测, 植株根和地上部可能通过不同的抗氧化途径来抵抗低温胁迫带来的氧化损伤。一方面, 植株地上部通过增强抗氧化酶的活性来减轻低温带来的氧化损伤; 另一方面, 植株根系可能通过非酶类抗氧化剂来清除活性氧, 降低膜脂损伤程度, 保障自身在胁迫条件下维持生存和生长。

铁和锰是植物生长发育必不可少的微量营养元素, 然而过量的铁和锰对水稻具有毒害作用, 抑制其生长。本研究通过筛选分别获得了铁锰毒害耐感水稻品种, 研究结果显示, 在对照条件下, 耐铁锰毒害品种根系构型、生物量、根和地上部铁锰含量及抗氧化酶的活性与铁锰敏感品种间并没有显著差异; 但在  $++\text{Fe}^{2+}$  和  $++\text{Mn}^{2+}$  处理下, 耐铁锰毒害品种的根系构型、生物量、抗氧化酶的活性均要显著高于铁锰敏感品种, 同时根和地上部的铁锰含量均显著低于敏感品种。  $++\text{Fe}^{2+}$  处理下, 耐亚铁毒害品种 (34#) 根和地上部的铁含量仅为亚铁毒害敏感品种 (37#) 的 72.20% 和 84.04%;  $++\text{Mn}^{2+}$  处理下, 耐锰毒害品种 (32#) 根和地上部的锰含量仅为锰毒害敏感品种 (7#) 的 85.07% 和 60.04%。可见, 虽然耐铁锰毒害品种的根系构型指标要大于铁锰敏感品种,

但其对铁锰的吸收能力要低于敏感品种, 降低了体内铁锰的含量, 从而缓解了毒害作用。前人的研究结果也表明, 在水稻抵抗铁锰毒害的过程中, 根系对铁锰较小的吸收能力或者说较高的拒铁能力具有十分重要的作用<sup>[26]</sup>。Stein 等<sup>[27]</sup>发现, 在高浓度铁处理下, 铁敏感品种根和地上部铁含量的上升幅度显著高于耐铁品种, 敏感品种地上部的铁含量上升了 7 倍, 而耐铁品种仅上升了 4 倍。同时, 也有研究者依据地上部锰含量的高低来区分锰毒害耐受品种和敏感品种<sup>[28]</sup>。可见, 植株中铁锰含量的高低直接决定了该品种对铁锰的耐受性。水稻对铁锰毒害的抗性具有一定的遗传特性, 其抗性机制涉及多个基因的调控。在铁锰毒害条件下, 一方面参与铁锰吸收转运的基因 (*OsIRT1/2*、*OsNRAMP1/3/5*、*OsMTP9*、*OsYSL2/6/15* 等) 会显著下调表达, 从而降低根系对铁锰的吸收及向地上部的转运; 另一方面参与铁锰外排及向液泡、叶绿体和线粒体等细胞器运输的基因 (*OsVIT1/2*、*OsMTP8.1*、*OsNRAMP6*、*OsMIT* 等) 会显著上调, 将胞质中过量的铁锰进行区隔化, 缓解毒害作用<sup>[29-30]</sup>。因此, 后期进一步对铁锰抗性品种中上述基因表达水平进行分析, 可从遗传和分子生物学角度进一步解析其抗性机制。

此外, 植物在应对过量铁锰诱导的氧化应激反应中, 抗氧化酶的活性发挥着至关重要的作用<sup>[28]</sup>。相关研究显示, 高浓度的锰可显著增加豇豆叶片中 POD 的蛋白量及其活性; 黑麦草对高水平锰的耐受

性与抗氧化酶的活性呈正相关性,相较于敏感品种,耐锰品种具有更高的SOD活性<sup>[31-32]</sup>。王思潮等<sup>[33]</sup>研究发现,冷浸田适应性水稻品种叶片中SOD和根中POD的活性显著高于敏感品种。本研究结果也显示,在 $++Fe^{2+}$ 和 $++Mn^{2+}$ 处理下,耐铁锰毒害品种中SOD和POD的活性要显著高于铁锰敏感品种。 $++Fe^{2+}$ 处理下,耐亚铁毒害品种根中SOD和POD的活性分别是亚铁毒害敏感品种的1.33和1.13倍,地上部SOD和POD的活性分别是亚铁毒害敏感品种的1.31和2.48倍; $++Mn^{2+}$ 处理下,耐锰毒害品种根中SOD和POD的活性分别是锰毒害敏感品种的1.12和1.13倍,地上部SOD和POD的活性分别是锰毒害敏感品种的1.50和1.51倍。可见,耐铁锰毒害品种还可通过提高体内抗氧化酶的活性来抵抗高浓度铁锰对细胞产生的毒害作用。

由于冷浸田对水稻生长发育的影响是由多个障碍因子导致的结果,本研究通过维恩图分析了高产多抗品种,从中找到若干抗逆品种;同时,通过模拟复合逆境进行筛选,也获得了复合抗性品种。结果表明,荃优丝苗(5#)、红香优丝苗(9#)、嘉丰优2号(19#)、全两优534(33#)、玮两优534(34#)、华两优2817(53#)等品种对复合逆境的抗性相对稳定,可作为冷浸田推广种植的候选品种。然而,这些品种均是从模拟试验中筛选而得,后续仍有必要对其进行田间试验验证。

## 参考文献References

- [1] 严如玉,甘国渝,赵希梅,等.我国水稻优势产区生产格局及施肥现状研究[J].中国稻米,2023,29(3):1-8.YAN R Y, GAN G Y, ZHAO X M, et al. Study on the production pattern and fertilization status of rice dominant production areas in China[J]. China rice, 2023, 29(3): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [2] 梁玉刚,李静怡,周晶,等.中国水稻栽培技术的演变与展望[J].作物研究,2022,36(2):180-188.LIANG Y G, LI J Y, ZHOU J, et al. Evolution and prospect of rice cultivation technology in China[J]. Crop research, 2022, 36(2): 180-188 (in Chinese with English abstract).
- [3] 赵凌,赵春芳,周丽慧,等.中国水稻生产现状与发展趋势[J].江苏农业科学,2015,43(10):105-107.ZHAO L, ZHAO C F, ZHOU L H, et al. Current situation and development trend of rice production in China[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2015, 43(10): 105-107 (in Chinese).
- [4] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1998.National Soil Census Office. China soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998(in Chinese).
- [5] 李庆奎.中国水稻土[M].北京:科学出版社,1992.LI Q K. Chinese paddy soil[M]. Beijing: Science Press, 1992 (in Chinese).
- [6] 张嘉伟.水稻芽期耐低温种质资源及抗寒剂筛选[D].长沙:湖南农业大学,2022.ZHANG J W. Selection of low temperature resistant germplasm resources at bud stage and cold resistance agents of rice [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [7] 蔡志欢.水稻苗期低温种质资源筛选及低温调控[D].长沙:湖南农业大学,2018.CAI Z H. Screening and low temperature regulation of low temperature germplasm resources in rice seedling stage [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018(in Chinese with English abstract).
- [8] 熊英,欧阳杰,何永歆,等.芽期耐低温淹水的水稻种质的评价与筛选[J].杂交水稻,2015,30(4):54-58.XIONG Y, OUYANG J, HE Y X, et al. Evaluation and screening of rice genetic resources with tolerance to low temperature and submergence in germinating stage [J]. Hybrid rice, 2015, 30(4): 54-58 (in Chinese with English abstract).
- [9] 潘晓雪,胡明瑜,王忠伟,等.不同水稻种质资源重要农艺性状与发芽期耐寒性鉴定研究[J].作物杂志,2021(1):47-53.PAN X X, HU M Y, WANG Z W, et al. Evaluation of agronomic traits and cold tolerance at germination stage in rice (*Oryza sativa* L.) germplasms[J]. Crops, 2021(1): 47-53 (in Chinese with English abstract).
- [10] 蔡慧姝,喻毅涛,刘鹏,等.水稻耐铁毒基因型筛选及边缘细胞对铁毒的反应特性[J].广东微量元素科学,2007,11:16-22.CAI H S, YU Y T, LIU P, et al. Screening for iron toxicity tolerant rice genotype and response of root border cells to excessive  $Fe^{2+}$  [J]. Guangdong trace elements science, 2007, 11: 16-22 (in Chinese with English abstract).
- [11] 赵燕,项华,熊娜,等.亚铁胁迫对水稻生长及矿质元素积累的影响[J].中国稻米,2018,24(3):30-38.ZHAO Y, XIANG H, XIONG N, et al. Effects of ferrous toxicity on growth of rice and accumulation of some mineral elements in rice plants [J]. China rice, 2018, 24(3): 30-38 (in Chinese with English abstract).
- [12] BRESOLIN A P S, DOS SANTOS R S, WOLTER R C D, et al. Iron tolerance in rice: an efficient method for performing quick early genotype screening [J/OL]. BMC research notes, 2019, 12(1): 361 [2024-11-19]. <https://doi.org/10.1186/s13104-019-4362-5>.
- [13] YOSHIDA S, FORNO D A, COCK J H, et al. Laboratory manual for physiological studies of rice [M]. Manila: International Rice Research Institute, 1976.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.BAO S. Soil agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000 (in Chinese).
- [15] 王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].北京:

- 高等教育出版社, 2015. WANG X K, HUANG J L. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015 (in Chinese).
- [16] SHAEMA P, SHARMA N, DESWAL R. The molecular biology of the low-temperature response in plants [J]. *Bioassays*, 2005, 27(10): 1048-1059.
- [17] KIM S I, ANDAYA V C, TAI T H. Cold sensitivity in rice (*Oryza sativa* L.) is strongly correlated with a naturally occurring I99V mutation in the multifunctional glutathione transferase isoenzyme GSTZ2 [J]. *Biochemical journal*, 2011, 435(2): 373-380.
- [18] 潘孝武, 李小湘, 黎用朝, 等. 湖南早籼稻品种芽期和苗期耐冷性初步研究[J]. *杂交水稻*, 2015, 30(5): 59-64. PAN X W, LI X X, LI Y C, et al. Preliminary studies on cold tolerance at germination stage and seedling stage of early *Indica* rice in Hunan [J]. *Hybrid rice*, 2015, 30(5): 59-64 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李海林, 殷绪明, 龙小军. 低温胁迫对水稻幼苗抗寒性生理生化指标的影响[J]. *安徽农学通报*, 2006, 10(11): 50-53. LI H L, YIN X M, LONG X J. Effects of chilling stress on physiological and biochemical indexes of chill-resistance in rice seedlings [J]. *Anhui agricultural science bulletin*, 2006, 10(11): 50-53 (in Chinese with English abstract).
- [20] 孙擎, 杨再强, 高丽娜, 等. 低温对早稻幼穗分化期叶片生理特性的影响及其与产量的关系[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(11): 1326-1333. SUN Q, YANG Z Q, GAO L N, et al. Effect of low temperature stress on physiological characteristics of flag leaf and its relationship with grain yield during panicle primordium differentiation stage of early rice [J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2014, 22(11): 1326-1333 (in Chinese with English abstract).
- [21] 赵杨, 魏颖娟, 邹应斌. 低温胁迫下早稻幼苗叶片和根系的生理指标变化及其品种间差异[J]. *核农学报*, 2015, 29(4): 792-798. ZHAO Y, WEI Y J, ZOU Y B. Physiological index variation and its cultivar differences of seedling leaves and roots of early cropping rice under lower temperature stress [J]. *Journal of nuclear agricultural sciences*, 2015, 29(4): 792-798 (in Chinese with English abstract).
- [22] 任红茹. 孕穗期低温冷害对水稻产量形成、生理特性和稻米品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2018. REN H R. Effects of low-temperature cold damage at booting stage on yield formation, physiological characteristics and rice quality of rice [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [23] 傅泰露. 水稻不同生育期的耐冷性及鉴定指标的筛选[D]. 成都: 四川农业大学, 2008. FU T L. The cold tolerance and screening of cold tolerance identification indexes in rice varieties during different stages [D]. Chengdu: Sichuan Agriculture University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [24] SATVIR K, MEENAKSHI A, ANIL K G, et al. Exploration of biochemical and molecular diversity in chickpea seeds to categorize cold stress-tolerant and susceptible genotypes [J]. *Acta physiology plant*, 2012, 34(2): 569-580.
- [25] 王树刚, 王振林, 王平等. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J]. *生态学报*, 2011, 31(4): 1064-1072. WANG S G, WANG Z L, WANG P, et al. Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress [J]. *Acta ecologica sinica*, 2011, 31(4): 1064-1072 (in Chinese with English abstract).
- [26] 彭新湘, 山内稔. 植物对铁毒的抗性机理[J]. *植物生理学通讯*, 1996, 32(6): 465-469. PENG X X, YAMAUCHI M. The resistant mechanisms for plants to iron toxicity [J]. *Plant physiology communications*, 1996, 32(6): 465-469 (in Chinese).
- [27] STEIN R J, DUARTE G L, SCHEUNEMANN L, et al. Genotype variation in rice (*Oryza sativa* L.) tolerance to Fe toxicity might be linked to root cell wall lignification [J/OL]. *Frontiers in plant science*, 2019, 10: 746 [2024-11-19]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00746>.
- [28] SHENG H, ZENG J, LIU Y, et al. Sulfur mediated alleviation of Mn toxicity in polish wheat relates to regulating Mn allocation and improving antioxidant system [J/OL]. *Frontier in plant science*, 2016, 7: 1382 [2024-11-19]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01382>.
- [29] ONAGA G, DRANE K N, ISMAIL A M. Understanding the regulation of iron nutrition: can it contribute to improving iron toxicity in rice ? [J]. *Functional plant biology*, 2016, 43: 709-726.
- [30] SHAO J, YAMAJI N, SHEN R F, et al. The key to Mn homeostasis in plants: regulation of Mn transporters [J]. *Trends in plant science*, 2017, 22(3): 215-224.
- [31] FECHT-CHRISTOFFERS M M, BRAUN H P, LEMAITRE-GUILLIER C, et al. Effect of manganese toxicity on the proteome of the leaf apoplast in cowpea [J]. *Plant physiology*, 2003, 133: 1935-1946.
- [32] RIBERA-FONSECA A, INOSTROZA-BLANCHETEAU C, CARTES P, et al. Early induction of Fe-SOD gene expression is involved in tolerance to Mn toxicity in perennial ryegrass [J]. *Plant physiology and biochemistry*, 2013, 73: 77-82.
- [33] 王思潮, 曹湊贵, 李成芳, 等. 鄂东南冷浸田不同中稻品种产量及生理研究[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(16): 3736-3740. WANG S C, CAO C G, LI C F, et al. Yield and physiology of middle-season rice in cold-waterlogged paddy field at the Southeastern of Hubei Province [J]. *Hubei agricultural sciences*, 2014, 53(16): 3736-3740 (in Chinese with English abstract).

## Screening and identifying rice varieties with tolerance of low temperature and toxicity of iron and manganese in middle and lower reaches of Yangtze River

GAO Qingrui, HOU Xingyu, CAI Hongmei

*College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

**Abstract** 57 main rice varieties planted in the middle and lower reaches of the Yangtze River were used to conduct hydroponic culture experiment under the low temperature and the toxicity of iron ( $\text{Fe}^{2+}$ ) and manganese ( $\text{Mn}^{2+}$ ) to screen the adaptive rice varieties in cold-waterlogged paddy fields in this area. The selected tolerant and sensitive varieties were used to analyze the differences in the growth phenotype, root architecture, content of iron and manganese, and the activity of antioxidant enzyme. The results showed that there were no significant differences in most growth indexes and physiological and biochemical indexes in cold tolerant or toxicity of iron and manganese tolerant varieties compared to that in sensitive varieties under control conditions. The growth indexes and physiological and biochemical indexes in cold tolerant or toxicity of iron and manganese tolerant varieties were better than those in sensitive varieties under treatment. The survival rate, aboveground biomass, content of chlorophyll b, and activity of POD in cold tolerant varieties was significantly higher than that in cold sensitive varieties under low temperature treatment, while the content of MDA aboveground in cold tolerant varieties was significantly lower than that in cold sensitive varieties. The plant height, total root length, root volume and surface area, root tip number, and aboveground dry weight of  $\text{Fe}^{2+}$  tolerant varieties was significantly higher than that of  $++\text{Fe}^{2+}$  sensitive varieties under  $++\text{Fe}^{2+}$  treatment. The content of iron in the root of  $++\text{Fe}^{2+}$  tolerant varieties was significantly lower than that of  $++\text{Fe}^{2+}$  sensitive varieties, and the activity of SOD and POD in the root and aboveground parts of  $++\text{Fe}^{2+}$  tolerant varieties was significantly higher than that of  $++\text{Fe}^{2+}$  sensitive varieties. The plant height, primary root length, root surface area, root and shoot dry weight in  $\text{Mn}^{2+}$  tolerant varieties were higher than that in  $++\text{Mn}^{2+}$  sensitive varieties under  $++\text{Mn}^{2+}$  treatment. The content of  $\text{Mn}^{2+}$  in root and shoot of  $++\text{Mn}^{2+}$  tolerant varieties was significantly lower than that of  $++\text{Mn}^{2+}$  sensitive varieties, while the activity of SOD and POD in the shoot of  $++\text{Mn}^{2+}$  tolerant varieties was higher than that of  $++\text{Mn}^{2+}$  sensitive varieties. Several varieties such as Quanyousimiao (5#), Hongxiangyousimiao (9#), Jiafengyou No.2 (19#), Quanliangyou No. 534 (33#), Weiliangyou No. 534 (34#) and Hualiangyou No. 2817 (53#) with high-yield and multi-resistance were obtained through Venn diagram analysis and composite stress screening, which can be used as candidate varieties for popularizing and planting in cold-waterlogged paddy fields.

**Keywords** rice; low temperature; toxicity of iron ( $\text{Fe}^{2+}$ ) and manganese ( $\text{Mn}^{2+}$ ); root architecture; content of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$ ; activity of antioxidant enzyme

(责任编辑: 张志钰)