

膜下滴灌水稻基因型耐缺铁性评价

李言言, 白如霄, 张新疆, 杨玉珍, 黄致华, 侯建伟, 危常州*

(石河子大学农学院, 新疆石河子 832003)

摘要: 【目的】新疆生产建设兵团采用膜下滴灌技术后, 水稻缺铁黄化现象较为严重, 研究该条件下水稻对缺铁反应的基因型差异, 可为耐缺铁性水稻基因型的筛选和分类提供可靠的理论依据。【方法】以六个水稻基因型为研究材料, 采用膜下滴灌技术管理。在水稻幼苗期、分蘖期和成熟期随机采样, 测定不同基因型水稻的分蘖数、生物量、产量以及铁含量, 利用隶属函数分析和聚类分析研究了水稻在全生育期对缺铁胁迫反应的基因型差异。【结果】水稻在幼苗期、分蘖期和成熟期对缺铁的反应存在基因型差异。在幼苗期水稻基因型 T-04 和 T-05 的叶片活性铁含量显著低于其他基因型; T-201 在幼苗期叶片活性铁、地上部铁的分配, 分蘖期叶片铁含量和地上部干物质均较高; 在分蘖期 T-04 铁的转移能力最小, 但是 T-04 的分蘖数较高; 在成熟期 T-04 的有效分蘖与其他基因型差异不显著, T-04 的产量处于中等水平, 但是其籽粒铁的收获指数低于其他基因型水稻。聚类分析显示耐缺铁水稻基因型 T-43 的各指标高于其他基因型。【结论】在水稻的幼苗期和分蘖期叶片铁的有效利用和自身铁的转移保证了水稻的生长和较高有效穗数, 根据全生育期水稻铁营养效率和产量的基因型差异初步确定 T-43 耐缺铁能力较强, T-04 为对缺铁敏感的水稻基因型。

关键词: 水稻; 膜下滴灌; 基因型; 耐缺铁性

Evaluating of rice genotypes tolerant to Fe deficiency with drip irrigation under the film mulch

LI Yan-yan, BAI Ru-xiao, ZHANG Xin-jiang, YANG Yu-zhen, HUANG Zhi-hua, HOU Jian-wei, WEI Chang-zhou*
(College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: 【Objectives】Rice is grown on calcareous soil and managed using drip irrigation under the film mulch technology in the Xinjiang Uyghur Autonomous Region, where rice often suffers chlorosis caused by Fe deficiency. Evaluating the Fe-stress tolerance of different rice genotypes is of great importance for screening suitable rice cultivar. 【Methods】Six rice cultivars were selected and managed with drip irrigation under the film mulch method in this research. At seedling, tillering and mature stages of rice, the biomass, tillers, yield and Fe content were analyzed. Cluster analysis and subordinate function values analysis were used to identify the multiple parameters associated with iron deficiency tolerance. 【Results】The 6 tested rice cultivars showed significant differences in resistance to iron deficiency at the seedling, tillering and mature stages. The leaf active iron contents of T-04 and T-05 were significantly lower than those of the other genotypes at seedling stage. T-201 had higher leaf active iron and Fe distribution in shoot at the seedling stage and leaf iron content and dry weight in shoot at tillering stage, T-04 had the lowest distribution of Fe in shoot at the tillering stage, while T-04 had the biggest tiller number. There were no significant differences in effective tiller number between T-04 and other genotypes, and yield of T-04 was the medium level. Cluster analysis showed that T-43 had higher indexes than other genotypes. 【Conclusions】The effective use of leaf iron and the ability of iron transfer ensure rice growth and higher effective panicle number, comprehensively considering iron nutrition efficiency and yield at all growth

收稿日期: 2016-08-02 接受日期: 2016-11-07

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2011AA100508); 国家自然科学基金资助项目 (31471947) 资助。

作者简介: 李言言 (1989—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事膜下滴灌水稻苗期缺铁黄化机理研究。E-mail: lyy9085@126.com

* 通信作者 E-mail: czwei@shzu.edu.cn

stages with drip irrigation under the film mulch, the rice cultivar T-43 has the strongest tolerance to iron deficiency, and T-04 shows the lowest tolerance at all growth stages.

Key words: rice; drip irrigation under film mulch; genotype; iron deficiency tolerance

水稻是耗水较多的农作物之一, 超过 43% 的农业灌溉用水被用于水稻生产^[1], 而我国又是世界上水资源最短缺的国家之一^[2], 因此节水灌溉是我国稻作的理性选择, 灌溉技术的发展势在必行^[3]。近年来, 新疆建设兵团研发出水稻膜下滴灌技术, 与水稻传统种植方式相比, 该技术节水 60% 以上^[4-5]。

虽然膜下滴灌水稻种植技术是一项节水高产的水稻栽培模式, 但是在幼苗期经常出现“黄化失绿”现象, 严重时导致水稻幼苗死亡^[6-7]。石灰性土壤上含较高的 HCO_3^- , pH 值高, 氧化还原电位均是造成水稻黄化的原因^[8-10]。节水旱作时, 水稻缺铁黄化现象较为普遍^[11-12], 铁素营养失调已成为制约膜下滴灌水稻高产、稳产的限制因子。Brown^[13] 指出筛选适应土壤环境的植物较改变土壤环境去满足植物需求更实际可行。筛选和利用铁高效作物基因型是解决作物缺铁黄化有效途径之一。且筛选铁高效的作物品种已经在许多作物上实现^[14-17]。但关于膜下滴灌水稻对缺铁胁迫的基因型差异还没有相关研究。

目前, 通过基因工程培育耐缺铁性水稻基因型的研究已经取得成果^[18-20], 但是在田间耕作时, 水稻耐缺铁能力受土壤环境的综合影响, 推广起来存在困难。田间试验下选择适宜的、方便可靠的鉴定指标进行耐缺铁能力的评定依然是获得耐缺铁水稻基因型的主要手段^[21-23]。铁在植物体内的利用涉及多个生理生化过程, 从单个生育期或者单个指标分析植物铁营养状况存在局限性。大多数关于水稻耐缺铁能力的研究是在幼苗期进行。Zeng 等^[24] 研究发现, 水稻在盐胁迫下的分蘖数存在显著的基因型差异, 这种差异是造成水稻产量不一的重要原因。而关于缺铁胁迫下水稻分蘖数、籽粒收获指数和产量等农艺性状的基因型差异研究较少。虽然缺铁胁迫下水稻铁营养吸收、利用和转运能力存在显著差异, 但是其基因型差异与农业生产的实际没有很好的结合。在缺铁胁迫土壤上进行水稻全生育期培养, 将水稻田间农艺性状与铁的吸收、转移能力相结合评价水稻耐缺铁能力的基因型十分有必要。本研究通过田间试验, 利用隶属函数值、聚类分析方法进行聚类分析排名, 对膜下滴灌模式下种植的 6 个水稻品种进行铁营养和农艺性状评价, 筛选出适合膜下

滴灌种植的抗黄化品种, 从而为耐缺铁胁迫的机理研究及铁高效品种的选育提供基础材料。

1 材料与方法

1.1 土壤性质和供试品种

试验于 2015 年 4 月中旬至 9 月中旬在新疆天业农业研究所试验田进行。土壤类型为灰漠土, 土壤质地为轻壤土, 历年种植经验确认该试验地点水稻缺铁黄化现象比较严重。土壤有机质含量 29.6 g/kg, 全氮含量 2.47 g/kg, 碱解氮 61.72 mg/kg, Olsen-P 为 67.29 mg/kg, 速效钾 ($\text{NH}_4\text{OAc-K}$) 282 mg/kg, 有效铁 (Fe-DTPA) 为 4.15 mg/kg, pH 为 8.43 (土水比 1:2.5), CaCO_3 含量 35.9 g/kg。本试验采用的 6 个水稻基因型均取自新疆天业研究所, 是从 200 多个品种 (系) 筛选的, 且黄化差异较大的品种。

1.2 试验设计与田间管理

本试验为单因素试验, 3 次重复, 随机区组排列, 每个小区面积为 17 m², 共 18 个小区。4 月 29 日播种, 种子播深 2~3 cm, 干播湿出。每穴播种 10 粒, 亩穴数 1.9 万穴。全生育期灌水量为 10500 m³/hm², 肥料分别选用尿素、磷酸二铵和硫酸钾。各处理的氮、磷、钾施肥量相同, 分别为 N 300 kg/hm²、P₂O₅ 270 kg/hm²、K₂O 240 kg/hm²。施肥方法是将肥料溶于肥料罐中, 采用水—肥—水的方式通过滴灌带将肥料施于土壤中。分别在水稻幼苗期、分蘖期和成熟期随机采样, 测定叶片叶绿素含量, 叶片活性铁含量, 全铁含量, 干物质等指标。水稻成熟期完成测产和其他采样工作后, 用谷物联合收割机收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质 在水稻幼苗期 (出苗后 28 d)、分蘖期 (出苗后 53 d) 和成熟期 (出苗后 156 d) 进行取样。在幼苗期用不锈钢剪刀将植株分成地上部和根部, 分蘖期将植株分为根、茎和叶, 成熟期分为根、茎、叶和籽粒, 地上部各组织用 0.1 mol/L HCl 清洗 0.5 h, 再用蒸馏水清洗数次, 根部用饱和 CaSO_4 溶液浸泡 0.5 h, 再用蒸馏水清洗数次后分别装入牛皮纸袋中, 于 105℃ 下杀青 30 min, 75℃ 烘至恒重。测定

各器官干物质后, 粉碎待用。

1.3.2 叶片 SPAD 值 于出苗后第 28 天, 用 SPAD-205 叶绿素仪 (日本柯尼卡美能达公司) 测定完全展开新叶 SPAD 值, 每小区取连续 10 穴, 计算平均值作为该试验小区 SPAD 值。

1.3.3 植株活性铁和全铁含量 出苗后 28 天随机选取具有代表性的连续 5 穴水稻, 分离幼叶, 将幼叶用不锈钢剪刀剪成 2~3 mm 大小的碎片, 称取 2.0000 g 碎叶放于塑料瓶中, 加入 20 mL 1 mol/L 盐酸, 静置 24 h 后, 过滤, 滤液用 AAS 法测定叶片中活性铁含量。另外, 称取一定量粉碎后的各组织样品, 在 550℃ 马福炉干灰化 7~8 h, 灰分用 1:30 HNO₃ 溶解后, 用 AAS 法测定全铁含量。

1.3.4 考种 每个小区选取 1 m² 的水稻进行测产考种, 分别记录水稻有效穗数、穗粒数、实粒数和千粒重。

1.4 数据处理

采用 SAS 8.0 统计软件包进行数据分析, 水稻基因型间差异显著性用 LSD 法检验 ($P < 0.05$)。采用 Excel 对各性状进行隶属函数度的计算。采用 SPSS 分析程序进行 Ward 法 Squared Euclidean distance (欧氏距离平方) 聚类分析。

隶属函数度的计算 $X(u) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 式中: X 为作物各基因型的某一指标测定值, X_{\max} 为所试基因型中某一指标测定值的最大值, X_{\min} 为该指标中最小值。

地上部铁的分配 = (地上部铁的含量 × 地上部生物量) / (根部铁的含量 × 根部生物量 + 地上部铁的含量 × 地上部生物量) × 100%。

2 结果与分析

2.1 幼苗期水稻耐缺铁性的基因型差异

由表 1 可知, 6 个基因型的叶片 SPAD 值变幅为 32.98~37.32, 新叶活性铁含量范围为 30.15~39.47 μg/g, 地上部铁的分配在 52.70%~74.61% 之间, 生物量变异系数为 17.2%, 水稻耐缺铁胁迫能力存在明显的基因型差异。

基因型 T-X 叶片 SPAD 值显著高于其他基因型。T-05 和 T-04 叶片 SPAD 值较低, 活性铁含量也最低, 与其他基因型水稻差异显著。但是 T-04 地上部铁分配比率较 T-X 高。T-69 的生物量较小, 其次为 T-04, 而 T-43 的各项指标都相对较高。可见, 筛选耐缺铁性的水稻品种应该综合考虑相关指标。

2.2 分蘖期水稻耐缺铁性的基因型差异

分蘖期水稻叶片铁含量、铁的转运和地上部干物质在基因型间存在差异显著 (表 2)。6 个水稻品种叶片铁含量最小值为 70.1 μg/g, 最大值为 126.5 μg/g; 地上部干物质变幅在 1269.1~3147.6 kg/hm² 之间, 地上部铁分配比率为 48.9%~74.6%, 各项指标变异系数在 13.4%~36.5% 之间。

水稻 T-201、T-X 和 T-43 地上部干物质较高, 与 T-69、T-05 和 T-04 差异显著, 后三者之间无显著差异, 表明缺铁胁迫下水稻在分蘖期的生长状况存在差异。水稻叶片铁含量 T-201 和 T-43 最高, 显著高于 T-X 和 T-04, T-04 叶片铁含量较低, 仅为 T-43 的 60.5%。不同基因型水稻地上部铁的分配率差异显著, T-43 和 T-X 铁的转运能力显著高于其他基因型水稻, 其中 T-04 铁的转运能力较小。与其他基因型相比, 在分蘖期 T-201 和 T-43 的耐缺铁胁迫能力较

表 1 水稻幼苗期叶片 SPAD 值、活性铁含量、生物量和地上部铁的分配

Table 1 SPAD value, plant leaf active iron content, dry biomass and Fe distribution in rice seedling shoot

基因型 Genotype	SPAD	活性铁含量 (μg/g, FW) Active Fe	生物量 (kg/hm ² , DW) Biomass	地上部铁比率 (%) Fe distribution
T-201	35.73 ± 0.71 b	35.20 ± 1.38 b	249.84 ± 21.96 ab	67.08 ± 1.80 b
T-43	34.54 ± 0.55 bc	34.70 ± 0.76 b	258.56 ± 22.28 a	62.43 ± 1.38 c
T-X	37.32 ± 0.57 a	34.91 ± 0.43 b	216.65 ± 4.13 b	52.70 ± 0.67 d
T-69	34.52 ± 1.26 bc	39.47 ± 0.80 a	166.90 ± 18.20 d	74.61 ± 2.52 a
T-05	33.22 ± 0.52 d	30.15 ± 0.96 c	211.61 ± 10.28 bc	65.46 ± 1.25 bc
T-04	32.98 ± 1.08 cd	31.10 ± 2.21 c	179.96 ± 4.63 cd	63.02 ± 1.42 c

注 (Note): 同列数据后不同字母表示基因型间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column are significantly different among different genotypes ($P < 0.05$).

表 2 水稻分蘖期叶片铁含量、地上部干物质量、地上部铁的分配率

Table 2 Leaf Fe content, shoot dry biomass, Fe distribution in shoot of selected rice plants at tillering stage

基因型 Genotype	铁含量 ($\mu\text{g/g}$, DW) Fe content	地上部干重 (kg/hm^2) Shoot dry biomass	铁分配率 (%) Fe distribution
T-201	126.46 \pm 10.88 a	3147.64 \pm 368.50 a	69.62 \pm 0.66 b
T-43	117.52 \pm 4.16 a	2453.90 \pm 115.29 b	74.59 \pm 3.07 a
T-X	70.12 \pm 5.76 c	2795.95 \pm 210.58 ab	71.61 \pm 0.57 ab
T-69	75.45 \pm 11.55 c	1520.28 \pm 181.82 c	65.54 \pm 0.99 c
T-05	95.80 \pm 1.81 b	1269.07 \pm 173.49 c	62.68 \pm 1.02 c
T-04	71.14 \pm 4.38 c	1435.03 \pm 29.46 c	48.89 \pm 2.66 d

注 (Note): 同列数据后不同字母表示基因型间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters are significantly different among different genotypes ($P < 0.05$).

高, 而 T-05 和 T-04 的各项指标均较低, 所以膜下滴灌栽培模式种植水稻时要综合考虑。

2.3 不同基因型水稻茎蘖动态差异

图 1 表明, 在水稻分蘖盛期 (6 月 16 日和 6 月 22 日), 茎蘖的变异系数分别为 14.7% 和 15.1%。由

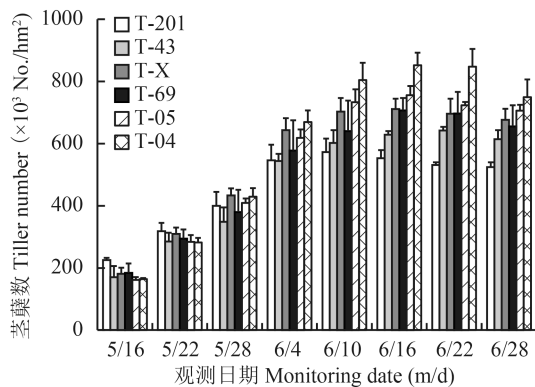


图 1 不同基因型水稻分蘖动态

Fig. 1 Number of tillers of different rice genotypes at investigation date

此可见水稻的分蘖数存在显著的基因型差异, 而分蘖数反映了水稻的生长状况, 且与产量密切相关, 评价水稻耐缺铁性时分蘖数被视为重要指标。

5 月 16 日 T-201 的分蘖数显著高于其他基因型水稻, 但是 6 月 4 日之后 T-201 的分蘖数均显著低于其他基因型水稻, 由此看出, T-201 的分蘖能力偏弱, T-04 的分蘖数却明显高于其他品种水稻。6 月 28 日, 各基因型水稻的分蘖数较前期均有下降, 但是 T-04 的分蘖数降低了 98×10^4 株/ hm^2 , 降低程度较其他基因型明显, 可见, T-04 受缺铁胁迫的影响, 其分蘖死亡率较高, 耐缺铁胁迫的能力较小。在 6 个基因型间, T-43 的分蘖数偏低, 为 615×10^4 株/ hm^2 。

2.4 水稻产量和产量构成因子的基因型差异

表 3 结果显示, T-201 有效穗数、结实率和千粒重均显著低于其他基因型水稻, 其他基因型水稻的有效穗数无显著差异, T-43 和 T-69 的结实率显著高于其他基因型水稻, T-201 和 T-04 的穗粒数较

表 3 各基因型水稻产量和产量构成

Table 3 Yields and yield components of the selected rice genotypes

基因型 Genotype	有效穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Productive ears	结实率 (%) Seed setting rate	穗粒数 Grains per spike	千粒重 (g) 1000-grain weight	产量 (kg/hm^2) Yield
T-201	333 \pm 18 c	73 \pm 4 c	145 \pm 2 a	20 \pm 1 c	6928 \pm 236 c
T-43	384 \pm 26 ab	94 \pm 1 a	111 \pm 11 cd	26 \pm 1 a	10842 \pm 456 a
T-X	350 \pm 5 abc	82 \pm 3 b	103 \pm 14 d	24 \pm 1 b	7520 \pm 120 c
T-69	354 \pm 9 ab	94 \pm 1 a	112 \pm 11 cd	24 \pm 1 b	8739 \pm 355 bc
T-05	379 \pm 17 ab	85 \pm 4 b	123 \pm 11 bc	22 \pm 11 b	9457 \pm 186 b
T-04	389 \pm 21 a	85 \pm 2 b	131 \pm 10 ab	19 \pm 1 c	8072 \pm 508 bc

注 (Note): 同列数据后不同字母表示基因型间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters are significantly different among different genotypes ($P < 0.05$).

高。T-201 的产量最低, 其次是 T-X, 而 T-43 的产量显著高于其他基因型水稻的产量。T-04 的有效穗数与 T-43、T-69 差异不显著, 但是其产量却低于二者的产量, 对 T-04 而言, 在育种工作中, 提高籽粒的结实率是提高 T-04 产量的途径之一。T-69 和 T-43 的结实率显著高于其他基因型, 但是二者的穗粒数较低, 提高二者的穗粒数是提高产量的主要途径。在所测 6 个基因型水稻中, T-05 产量构成因子和产量属于中等水平。缺铁胁迫下, 不同基因型水稻的产量受不同的产量因子的影响, 提高产量需要结合各基因型不同的特征, 其中提高 T-43 穗粒数可以进一步提高其产量。

除去 T-201 以外, T-04 的分蘖数显著高于其他品种 (图 1), 但有效穗数与其他基因型差异不显著 (表 3), 说明 T-04 的无效分蘖较多。T-43 的分蘖数

虽较其他基因型低 (图 1), 但其有效穗数较高 (表 3), 即有效分蘖率相对较高。

2.5 水稻籽粒收获指数和铁收获指数的基因型差异

图 2 表明, T-05 籽粒收获指数最高, 显著高于其他基因型水稻, 其次为 T-69 和 T-43, T-201 水稻籽粒收获指数最小, 仅为 33.0%, 并显著低于其他基因型水稻。T-69 和 T-43 水稻铁收获指数也较高, 分别为 25.7% 和 23.8%, T-04 铁收获指数最低, 仅为 12.4%。由此可见, 成熟期水稻组织器官的铁向籽粒的转运和干物质在籽粒的分配均存在显著的基因型差异。

2.6 不同基因型水稻各指标隶属函数值

由表 4 可知, 对于同一指标如叶片活性铁含量,

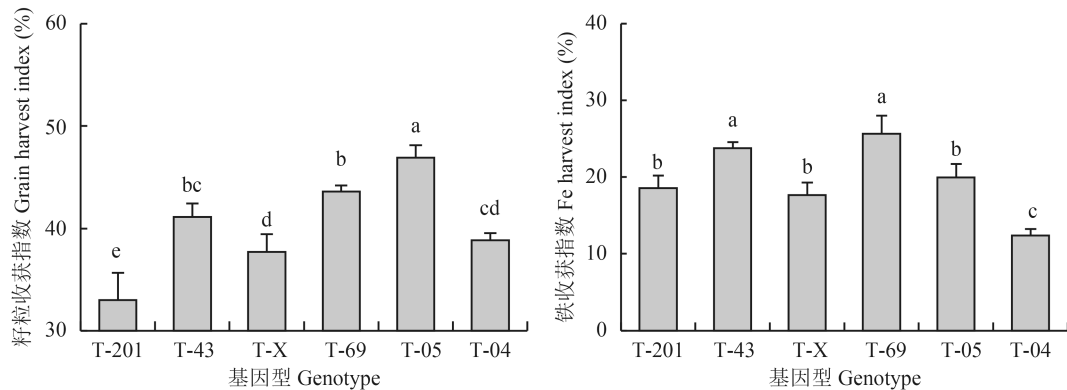


图 2 不同基因型水稻籽粒收获指数和铁收获指数

Fig. 2 Grain harvest indices and Fe harvest indices of different rice genotypes

[注 (Notes): 籽粒收获指数 = 籽粒产量 / (籽粒产量 + 秸秆干物质) × 100%; 铁收获指数 = 籽粒铁吸收量 / (籽粒铁吸收量 + 秸秆铁吸收量) × 100%. Grain harvest index = grain yield / (grain yield + straw dry weight) × 100%; Fe harvest index = grain Fe uptake / (grain Fe uptake + straw Fe uptake) × 100%.]

表 4 不同基因型水稻各指标的隶属函数值

Table 4 Subordinate function values of tolerating iron deficiency indexes in rice

基因型 Genotype	AFeC	SPAD	LFeC	生物量 Biomass			SFeA		GFC	FeHI	GHI	产量 Yield
				28 d	53 d	156 d	28 d	53 d				
T-201	0.54	0.63	1.00	0.90	1.00	0.90	0.66	0.81	1.00	0.46	0.00	0.00
T-43	0.49	0.36	0.84	1.00	0.63	1.00	0.44	1.00	0.27	0.86	0.58	1.00
T-X	0.51	1.00	0.00	0.54	0.81	0.13	0.00	0.88	0.63	0.39	0.34	0.15
T-69	1.00	0.35	0.09	0.00	0.13	0.74	1.00	0.65	0.93	1.00	0.76	0.46
T-05	0.00	0.06	0.46	0.49	0.00	0.68	0.58	0.54	0.00	0.57	1.00	0.65
T-04	0.10	0.00	0.02	0.14	0.09	0.00	0.47	0.00	0.04	0.00	0.42	0.29
CV(%)	9.63	5.09	25.84	17.15	36.54	10.82	10.66	13.35	13.77	23.53	11.75	15.83

注 (Note): AFeC—活性铁含量 Active Fe content; LFeC—叶片铁含量 Leaf Fe content; SFeA—地上部铁分配率 Shoot Fe allocation; GFC—籽粒 Fe 浓度 Grain Fe content; FeHI—Fe 收获指数 Fe harvest index; GHI—籽粒收获指数 Grain harvest index.

T-69 的隶属函数值最大, 为 1, 表明 T-69 在这一指标上表现为耐缺铁胁迫的能力最强; 而 T-05 最小, 为 0, 说明 T-05 表现为耐缺铁性小。其中 T-05 和 T-04 的多个耐缺铁指标的隶属函数值如活性铁、SPAD 值、156 d 生物量、籽粒中铁的含量和铁的收获指数等均最小, 表现为耐缺铁胁迫能力低, 而 T-43 在 28 d 和 156 d 生物量、53 d 时铁的分配和产量的隶属函数值均最大, 说明在这些指标上 T-43 耐缺铁能力较强。

各项指标变异系数在 5.1% 和 36.5% 之间波动, 水稻 53 d 的生物量、叶片铁含量和铁的收获指数变异系数较大, 分别为 36.5%、25.8% 和 23.5%, 说明这三个指标对缺铁胁迫反应较为敏感。

根据全生育期各指标的隶属函数值之和进行系统聚类分析 (表 5), 比如生物量是以 28 d、56 d 和 156 d 三个取样时期的隶属函数值之和进行聚类分析排名, 结果发现 T-04 的生物量聚类排名最靠后, 在生物量上表现为缺铁敏感型水稻, T-201 和 T-43 的聚类分析排名靠前。以幼苗期叶片活性铁含量、叶片 SPAD 值和分蘖期 (53 天) 叶片铁含量隶属函数值之和进行聚类分析排名发现, T-04 和 T-05 聚类分析排名得分最靠后。同样 T-04 铁的转运能力也低于其他基因型水稻。T-69 铁的收获指数的聚类排名得分明显高于其他基因型水稻, T-43、T-69 和 T-05 的产量和籽粒收获指数也明显高于其他基因型水稻。

表 5 不同基因型水稻全生育期各指标聚类分析排名
Table 5 Ranking of selected rice genotypes for the tested items

项目 Item	T-201	T-43	T-X	T-69	T-05	T-04
生物量 Biomass	1	1	2	2	2	3
铁含量 Fe content	1	2	2	2	3	3
地上部铁分配 Shoot Fe allocation	1	1	2	1	2	3
铁的收获指数 Fe harvest index	2	2	2	1	2	3
籽粒收获指数 Grain harvest index	2	1	2	1	1	2

注 (Note): 表中数字为各指标聚类分析排名得分, 其中“1”为耐缺铁性水稻类型, “2”为中等耐缺铁性水稻类型, “3”为缺铁敏感性水稻。Digital in the table were scores calculated by the cluster analysis; Scores of 1, 2 and 3 represent the strongest, medium and weakest tolerance to iron deficiency, respectively.

3 讨论与结论

试验结果表明, 在相同的缺铁土壤环境和田间管理下, 膜下滴灌水稻在不同生育期对缺铁的反应存在基因型差异, 表现在叶片活性铁含量、铁的转运、分蘖数和产量等指标上, 这与不同种、属的植物以及同一种不同品种对缺铁的敏感程度和适应能力存在很大差异^[25-27]一致。高丽等^[28]研究结果也显示在低铁胁迫下花生叶绿素在品种间的变异系数显著高于供铁处理。基因型变异程度越大, 说明该性状指标越有利于基因型差异的显示^[29]。本研究中水稻分蘖期叶片铁含量、53 d 生物量、籽粒铁收获指数和产量的变异系数都超过 20%, 说明本实验水稻的性状指标反映了水稻耐缺铁能力的基因型差异, 可用于此缺铁胁迫下水稻耐缺铁能力的评价。

选择适宜的鉴定指标和适宜的生育期是评价植物耐缺铁性的重要基础, 如花生开花期叶片活性铁含量和叶绿素含量与产量高度相关^[30]; 结荚期叶绿素含量与花生单株果重呈二次抛物线关系^[31], 韩振海等^[32]研究指出离子吸收动力学参数可作为铁高效苹果基因型植物的筛选指标; 邹春琴等^[33]的研究表明活性铁含量是诊断植物铁营养状况的可行指标。本试验结果表明耐缺铁水稻 T-43 幼苗期叶片活性铁含量、分蘖期地上部铁的分配和收获期有效穗数均较高, 同时在聚类分析中耐缺铁水稻 T-43 全生育期地上部铁的分配, 生物量和籽粒收获指数的排名均为 1, 说明水稻根系中的铁向地上部的及时供应, 保证了水稻的正常生长和成熟期籽粒形成。

充足的有效穗数、穗粒数和穗型是水稻高产的特征^[34]。朱青等^[35]研究发现适量的亚铁可提高水稻分蘖期的株高和分蘖数, 李丽等^[36]研究发现膜下滴灌水稻在分蘖期根系活力存在基因型差异, 而根系活力是评价作物耐缺铁能力的指标之一^[17]。本研究发现, 缺铁胁迫下水稻的分蘖数存在显著的基因型差异, 缺铁敏感型水稻 T-04 的分蘖数高于 T-43, 但是其有效分蘖数与 T-43 无显著差异, 同时缺铁敏感型水稻 T-04 幼苗期地上部铁含量和分蘖期叶片铁含量也较低, 这说明水稻自身铁的有效利用可能影响着水稻分蘖的形成, 而水稻的分蘖数通常与产量呈正相关, 在水稻的分蘖期评价水稻的铁营养状况是必不可少的。在幼苗期和分蘖期, T-201 的多个指标, 如叶片活性铁含量、地上部铁含量, 地上部铁的分配均较高, 但是其产量却较低, T-201 幼苗期和分蘖期的铁营养效率与其丰产性没有表现一致, 说明 T-201

仅可以作为耐缺铁遗传材料, 而适宜种植的水稻基因型应兼有耐缺铁、丰产等性状。夏友霖等^[11]的研究也出现类似的花生品种, 由此体现在缺铁胁迫土壤上进行作物全生育期培养, 结合农艺性状和铁营养效率评价水稻耐缺铁能力的必要性。膜下滴灌种植模式下水稻籽粒中铁含量存在显著的基因型差异, Gregorio 等^[17]通过对不同来源的 1138 份水稻种质研究发现, 稻米铁含量为 6.3~24.4 mg/kg, 其中 IR68144 水稻子粒的铁浓度较高, 其遗传性状稳定, 不受土壤水分、酸碱度和氮肥使用量的影响, Fan 等研究发现旱作水稻籽粒铁的收获指数受缺铁胁迫的影响^[12], 水稻籽粒铁生物有效性主要受基因型控制^[38-39], 籽粒铁含量与人们的铁营养密切相关, 籽粒铁含量也应该作为培育耐缺铁水稻基因型的衡量指标之一, 本试验发现耐缺铁性水稻籽粒铁收获指数高于缺铁敏感型水稻。

本实验结果表明, 膜下滴灌节水栽培模式下, 在不同的生育期结合水稻的农艺性状和铁吸收、转移和利用评价水稻耐缺铁能力是可行的。不同铁敏感型水稻在不同生育期对缺铁的反应存在显著差异, 初步确定 T-04 属于对缺铁敏感的水稻基因型, T-43 是耐缺铁的基因型, 其他品种的水稻属于中等耐性的基因型。在幼苗期和分蘖期缺铁胁迫下铁敏感型水稻的生长、铁的吸收和转移能力弱, 在生理成熟期其无效分蘖增加, 培育耐缺铁性水稻是提高水稻产量的经济措施, 但是膜下滴灌水稻缺铁胁迫机理还需要深入研究。

参 考 文 献:

- [1] Bouman B A M, Humphreys E, Tuong T P and Barker R. Rice and water[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 92(4): 187-237.
- [2] 张正斌, 徐萍. 中国水资源和粮食安全问题的探讨[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1305-1310.
Zhang Z B, Xu P. Water and food security in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1305-1310.
- [3] 薛全义, 荆宇, 华玉凡. 略论我国旱稻的生产及发展[J]. *中国稻米*, 2002, 4(4): 5-7.
Xue Q Y, Jing Y, Hua Y F. Reflection on studies of upland rice production and development in China[J]. *China Rice*, 2002, 4(4): 5-7.
- [4] Lu X H, Wu L H, Pang L J, *et al.* Effects of plastic film mulching cultivation under non-flooded condition on rice quality[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2007, 87(2): 334-339.
- [5] 郭庆人, 陈林. 水稻膜下滴灌栽培技术在我国发展的优势及前景分析[J]. *中国稻米*, 2012, 18(4): 36-39.
Guo Q R, Chen L. The advantages and prospects of rice cultivation techniques under-mulch-drip irrigation[J]. *China Rice*, 2012, 18(4): 36-39.
- [6] Zhang X J, Zhang S J, Zhao H H, *et al.* Effect of HCO_3^- on rice growth and iron uptake under flood irrigation and drip irrigation with plastic film mulch[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(6): 944-952.
- [7] 张书捷, 张新疆, 王娟, 等. 施用土壤酸化剂和调整播期防治膜下滴灌水稻苗期缺铁黄化的效果研究[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(5): 519-527.
Zhang S J, Zhang X J, Wang J, *et al.* Applying soil acidification agents and adjusting sowing date to deal with rice chlorosis in seedling stage caused by iron deficiency under drip irrigation with plastic film mulching[J]. *China Rice Science*, 2015, 29(5): 519-527.
- [8] Ishimaru Y, Kim S, Tsukamoto T, *et al.* Mutational reconstructed ferric chelate reductase confers enhanced tolerance in rice to iron deficiency in calcareous soil[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(18): 7373-7378.
- [9] Cao X, Chen Y, Wang X, Deng X. Effects of redox potential and pH value on the release of rare earth elements from soil[J]. *Chemosphere*, 2001, 44(4): 655-661.
- [10] Hasegawa H, Rahman M M, Kadohashi K, *et al.* Significance of the concentration of chelating ligands on Fe^{3+} -solubility, bioavailability, and uptake in rice plant[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 58: 205-211.
- [11] Matsuo N, Mochizuki T. Growth and yield of six rice cultivars under three water-saving cultivations[J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(4): 514-525.
- [12] Fan X, Karim M R, Chen X, *et al.* Growth and iron uptake of lowland and aerobic rice genotypes under flooded and aerobic cultivation[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2012, 43(13): 1811-1822.
- [13] Brown J C, Amblar J E, Chaney R L, Foy C D. Differential responses of plant genotypes to micronutrients [A]. Mortvedt J, Giordano P M, Lindsay W L. *Micronutrients in agriculture* [M]. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America. 389-418.
- [14] Gao L, Shi Y. Genetic differences in resistance to iron deficiency chlorosis in peanut[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2007, 30(1): 37-52.
- [15] Van Egmond F, Aktaş M. Iron-nutritional aspects of the ionic balance of plants[J]. *Plant and Soil*, 1977, 48(3): 685-703.
- [16] 张福锁, 刘书娟, 毛达如, 韩振海. 苹果抗缺铁基因型差异的生理生化指标研究[J]. *园艺学报*, 1995, (1): 1-6.
Zhang F S, Liu S J, Mao D R, Han Z H. Genotypic differences in iron-deficiency stress responses in *Malus*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1995, (1): 1-6.
- [17] 王永章, 张玉娜, 徐坤. 供铁水平对不同苹果基因型生长及根系特性的影响[J]. *莱阳农学院学报*, 2000, 17(3): 161-165.
Wang Y Z, Zhang Y N, Xu K. Effects of iron levels on seedling growth and root characteristics of iron-efficient or-inefficient species in *Malus*[J]. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 2000, 17(3): 161-165.
- [18] Itai R N, Ogo Y, Kobayashi T, *et al.* Rice genes involved in phytosiderophore biosynthesis are synchronously regulated during the early stages of iron deficiency in roots[J]. *Rice*, 2013, 6(1): 16.

- [19] Bashir K, Hanada K, Shimizu M, *et al.* Transcriptomic analysis of rice in response to iron deficiency and excess[J]. *Rice*, 2014, 7(1): 18.
- [20] Kobayashi T, Itai R N, Nishizawa N K. Iron deficiency responses in rice roots[J]. *Rice*, 2014, 7(1): 27.
- [21] Mori S, Nishizawa N, Hayashi H, *et al.* Why are young rice plants highly susceptible to iron deficiency?[J]. *Plant and Soil*, 1991, 130(1): 143–156.
- [22] Dos Santos L S, De Oliveira A C. Rice iron metabolism: from source to solution[J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2007, 10(2): 64–72.
- [23] Bashir K, Ishimaru Y, Nishizawa N K. Iron uptake and loading into rice grains[J]. *Rice*, 2010, 3(2–3): 122–130.
- [24] Zeng L, Shannon M C, Grieve C M. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by multiple agronomic parameters[J]. *Euphytica*, 2002, 127(2): 235–245.
- [25] Kannan S. Cultivar differences for tolerance to Fe and Zn deficiency: A comparison of two maize hybrids and their parents[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1983, 6(4): 323–337.
- [26] 石荣丽, 张福锁, 邹春琴. 不同基因型小麦铁营养效率差异及其可能机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1306–1311.
- Shi R L, Zhang F S, Zou C Q. Iron efficiency of different wheat genotypes and its main contributed factors[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer science*, 2010, 16(6): 1306–1311.
- [27] 郝红梅, 邹春琴, 张福锁. 不同旱稻品种(系)间铁营养状况的比较[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(5): 79–82.
- Hao H M, Zou C Q, Zhang F S. Difference in iron nutritional status of different aerobic rice varieties (lines)[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(5): 79–82.
- [28] 高丽, 周健民, 史衍玺. 石灰性土壤上花生耐低铁品种的筛选[J]. *中国油料作物学报*, 2008, 30(2): 168–173.
- Gao L, Zhou J M, Shi Y X. Tolerance screening of peanut varieties to iron deficiency chlorosis on calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2008, 30(2): 168–173.
- [29] 韩璐, 张薇. 棉花苗期氮营养高效品种筛选[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(1): 84–88.
- Han L, Zhang W. Screening of cotton varieties with high nitrogen efficiency at seedling stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(1): 84–88.
- [30] 高丽, 史衍玺, 周健民. 花生缺铁黄化的敏感时期及耐低铁品种的筛选指标[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 917–922.
- Gao L, Shi Y X, Zhou J M. Study on the sensitive period and screening index for iron deficiency chlorosis in peanut[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 917–922.
- [31] 夏友霖, 廖伯寿, 毛金雄, 等. 四川丘陵紫色土花生品种耐缺铁性鉴定与评价[J]. *中国油料作物学报*, 2013, 35(3): 326–330.
- Xia Y L, Liao B S, Mao J X, *et al.* Evaluation of lime induced iron-deficiency chlorosis tolerance of peanut on calcareous and purplish soil in Sichuan[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2013, 35(3): 326–330.
- [32] 韩振海, 王永章, 孙文彬. 铁高效及低效苹果基因型的铁离子吸收动力学研究[J]. *园艺学报*, 1995, 22(4): 313–317.
- Han Z H, Wang Y Z, Sun W B. Iron absorption kinetics for Fe-efficient vs-inefficient species in *Malus*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1995, 22(4): 313–317.
- [33] 邹春琴, 陈新平, 张福锁, 毛达如. 活性铁作为植物铁营养状况诊断指标的相关研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(4): 399–406.
- Zou C Q, Chen X P, Zhang F S, Mao D R. Study on the correlation between the active Fe and Fe nutritional status of plants[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(4): 399–406.
- [34] 赵双玲, 李向春, 陈林, 等. 膜下滴灌水稻品种产量、品质和农艺性状的相关性分析[J]. *北方水稻*, 2015, 3(3): 6–9, 13.
- Zhao S L, Li X C, Chen L, *et al.* Correlation analysis among yield, quality and agronomic trait in rice with drip irrigation under mulch film[J]. *Journal of North Rice*, 2015, 3(3): 6–9, 13.
- [35] 朱青, 卢松, 陈正刚, 等. 亚铁对水稻分蘖期生长发育的影响[J]. *耕作与栽培*, 2012, (6): 1–2.
- Zhu Q, Lu S, Chen Z G, *et al.* The effect of ferrous on rice growth at tillering stage[J]. *Tillage and Cultivation*, 2012, (6): 1–2.
- [36] 李丽, 陈林, 张婷婷, 等. 膜下滴灌对水稻根系形态及生理性状的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(6): 536–540.
- Li L, Chen L, Zhang T T, *et al.* Effects of mulch drip irrigation on the form of rice root and physiological characteristics[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33(6): 536–540.
- [37] Gregorio G B, Senadhira D, Htut T, *et al.* Improving iron and zinc value of rice for human nutrition[J]. *Agriculture et Development*, 1999, 23(9): 77–81.
- [38] 孙明茂, 洪夏铁, 李圭星, 等. 水稻籽粒微量元素含量的遗传研究进展[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(10): 1947–1955.
- Sun M M, Hong X T, Li G X, *et al.* Progress of genetic research on trace minerals content in rice seed[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(10): 1947–1955.
- [39] 何万领. 水稻品种籽粒中铁生物有效性差异及机制[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2009.
- He W L. Difference and mechanism of iron bioavailability in grain of different rice genotypes[D]. Hangzhou: PhD Dissertation of Zhejiang University, 2009.