

# 不同铁效率玉米品种苗期适应低铁胁迫的根系特征与铁积累差异

任云, 刘静, 李哲馨, 李会合, 李强\*

(重庆经济植物生物技术重点实验室/重庆市特种植物协调创新中心/特色植物研究院,  
园林与生命科学学院, 重庆文理学院, 重庆 402160)

**摘要:** 【目的】石灰性土壤高 pH 和高重碳酸盐含量严重影响土壤中有效铁含量, 导致作物缺铁黄化、减产, 铁高效玉米品种的推广应用是实现石灰性土壤玉米高产稳产的重要途径。本研究探讨不同铁效率玉米品种适应低铁胁迫的根系特征与铁积累差异, 旨在为铁高效玉米品种的推广应用提供科学依据。【方法】试验以铁高效玉米品种正红 2 号 (ZH2)、正大 619 (ZD619) 和铁低效玉米品种川单 418 (CD418)、先玉 508 (XY508) 为材料, 设置极低铁处理 (Fe0, Fe 浓度为 0  $\mu\text{mol/L}$ )、低铁处理 (Fe10, Fe 浓度为 10  $\mu\text{mol/L}$ ) 和正常供铁 (Fe100, Fe 浓度为 100  $\mu\text{mol/L}$ ) 3 个处理, 通过砂培试验, 研究不同铁效率玉米品种适应低铁胁迫的根系形态特征、干物质重、铁积累及铁吸收利用差异。【结果】低铁胁迫下, 玉米幼苗的根干重、单株干重、铁积累量、根系相对铁吸收效率均显著降低, 而根冠比与铁素生理效率均显著升高, 且随胁迫程度的增加变幅加大; 总根长、根表面积、根体积和根直径则表现出明显的品种差异, 与正常铁处理 (Fe100) 相比, 低铁处理下铁低效品种的总根长、根表面积和根体积显著降低, 根直径显著增加, 而铁高效品种的总根长和根表面积差异不显著, 根体积显著增加, 根直径在极低铁处理 (Fe0) 下显著降低, 低铁处理 (Fe10) 下差异不显著; 铁高效品种总根长、根表面积、根体积、根干重、单株干物重、铁积累量和根系铁吸收效率的降幅及根冠比的增幅均明显低于铁低效品种, 而铁生理效率的增幅高于铁低效品种。相关性分析结果表明, 玉米幼苗铁积累量与总根长、根表面积、根体积和根干重均呈显著正相关, 而与根冠比呈负相关, 其中与总根长 ( $R^2 = 0.8546$ ) 和根表面积 ( $R^2 = 0.8983$ ) 相关性最强。【结论】与铁低效玉米品种相比, 铁高效玉米品种低铁胁迫下具有较优的总根长、根表面积及较高的根系铁吸收效率与铁生理效率, 促进了其对铁的高效吸收与利用, 提高了其对低铁环境的适应能力。

**关键词:** 低铁胁迫; 玉米; 根系形态; 铁积累

## Root morphology and partitioning of Fe accumulation in maize cultivars under low iron stress condition at seedling stage

REN Yun, LIU Jing, LI Zhe-xin, LI Hui-he, LI Qiang\*

(Chongqing Key Laboratory of Economic Plant Biotechnology/Collaborative Innovation Center of Special Plant Industry in  
Chongqing/Institute of Special Plants, College of Landscape Architecture and Life Science, Chongqing University of  
Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

**Abstract:** 【Objectives】The high pH and bicarbonate content in calcareous soil seriously affect the availability of Fe to crops, resulting in Fe deficiency, chlorosis, and reduction of yield. Fe-efficient maize cultivars are thus used as an effective way against Fe deficiency in calcareous soil. The root morphology of different Fe-efficient maize cultivars to adapt to low Fe stress were assessed in this study. 【Methods】A hydroponic experiment was carried out using four maize cultivars, two Fe-efficient cultivars (ZH2 and ZD619) and two Fe-inefficient cultivars (XY508 and CD418). Fe levels of very low (No Fe added, Fe0), low (Fe 10  $\mu\text{mol/L}$ , Fe10, ) and normal (Fe 100  $\mu\text{mol/L}$ , Fe100) were setup in nutrient solution. Root morphological characteristics, dry matter accumulation and

收稿日期: 2020-08-13 接受日期: 2020-10-18

基金项目: 重庆文理学院科研项目 (2017RTZ18, 2017RTZ19, P2017TZ16)。

联系方式: 任云 E-mail: 821838738@qq.com; \* 通信作者 李强 E-mail: liqiangxj@163.com

Fe absorption and utilization by maize were measured at seedling stage. **【 Results 】** Under low-Fe stress, the dry weight of root and plant, the Fe accumulation and relative absorption efficiency of maize seedlings were drastically reduced, while the root to shoot ratio and the Fe physiological efficiency increased significantly. The total root length, root surface area and root volume of Fe-inefficient cultivars were reduced whereas the root diameter was significantly increased under low Fe stress. Even though, the total root length and surface area of the Fe-efficient cultivars were comparable, the root volume increased significantly but the root diameter decreased significantly under the extremely low iron (Fe0) treatment as it was under the low (Fe10) treatment. The reduction in total root length, root surface area, root volume, root dry weight, dry matter per plant, iron accumulation, and Fe absorption efficiency of roots and the increase in root to shoot ratio of Fe-efficient cultivars were notably lower than those of Fe-inefficient cultivars. Correlation analysis results revealed that the Fe accumulation of maize seedlings was positively and significantly correlated with total root length, root surface area, root volume and root dry weight, but negatively correlated with root-shoot ratio. Among them, the correlation with total root length ( $R^2 = 0.8546$ ) and root surface area ( $R^2 = 0.8983$ ) was the strongest. **【 Conclusions 】** Compared to the Fe-inefficient cultivars, Fe-efficient maize cultivars have larger total root length and root surface area at seedling stage, and higher root Fe absorption efficiency and physiological efficiency to adapt to low Fe stress, which could enhance absorption and utilization of Fe, thereby improve the adaptability to low-Fe environment.

**Key words:** low Fe stress; maize; root morphology; Fe accumulation

铁 (Fe) 作为影响作物生长发育及品质产量形成的关键微量营养元素, 具有重要的生物学功能<sup>[1]</sup>。铁参与叶绿素的合成, 影响叶绿体的构造, 是植株合成叶绿素及完成光合作用的必要条件, 缺铁将会导致细胞膜系统和胞内细胞器的畸变或破坏<sup>[2]</sup>。另外, 它还参与植物呼吸作用、生物固氮和细胞解毒等重要生物学过程<sup>[3]</sup>。土壤中可被植物直接利用的离子态铁含量很少, 特别是荒漠干旱内陆地区, 土壤钙质化严重, 盐分含量高, pH 高, 导致土壤有效铁含量更低, 作物缺铁黄化, 进而严重影响产量<sup>[4]</sup>。铁高效作物品种的推广应用是保障石灰性土壤作物高产稳产的重要途径。

根系是植物从土壤中吸收养分的重要器官, 良好的根系构型和空间分布有利于提高植株对铁素的吸收与积累, 铁的供给水平同样影响植物根系的发育<sup>[5-6]</sup>。牛乐等<sup>[7]</sup>发现低铁胁迫下玉米苗期根系形态直接与铁效率相关, 良好的根系形态和生理活性是铁高效利用的重要特征。Ciaffi 等<sup>[8]</sup>和 Zamboni 等<sup>[9]</sup>指出低铁胁迫对小麦幼苗根的生长影响显著, 从而使其表现出植物缺铁的典型症状 (如叶绿素含量降低) 以及其他矿物营养的不均衡积累。Jia 等<sup>[10]</sup>发现苹果砧木对低铁胁迫存在明显的基因型差异, 且苹果砧木地上部生物量、总根长和侧根数与耐低铁能力呈显著正相关。龙文靖<sup>[11]</sup>发现低铁胁迫下玉米苗期干物质积累量显著下降, 同时根系活力和单株溶铁能力降

低, 导致地上、地下部铁含量和积累量也降低, 但铁素向地上部转移分配能力增强, 铁素的生理效率提高。作物的根系形态及铁积累特性与作物品种的铁利用效率密切相关。

玉米是世界第一大粮食作物, 占世界粮食总产量的 41%, 玉米生产对全球粮食安全起着举足轻重的作用<sup>[12]</sup>。西南地区是我国玉米主产区, 该区旱地以石灰性紫色土为主, 土壤有效铁含量低, 严重制约着该区玉米的高产稳产<sup>[13]</sup>。前人<sup>[14-15]</sup>研究表明, 玉米对铁的吸收利用存在明显的基因型差异, 不同玉米品种铁效率差异显著, 铁高效玉米品种的推广应用是保障石灰性土壤玉米高产稳产的重要途径。尽管已有大量研究证实作物对低铁胁迫的适应能力存在显著的品种差异, 但关于不同铁效率玉米品种适应低铁胁迫的根系形态与铁积累特征差异的报道还较鲜见。本研究采用室内砂培的方法, 以不同铁效率玉米品种为材料, 研究不同铁效率玉米品种适应低铁胁迫的根系形态特征, 铁与物质积累及铁吸收利用差异, 以丰富玉米铁素营养理论, 为铁高效玉米种质资源的挖掘利用提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为前期试验筛选的铁高效玉米品种正红 2 号 (ZH2, 四川农大正红种子有限公司)、正大

619 (ZD619, 襄樊正大农业开发有限公司) 和铁低效玉米品种川单 418 (CD418, 四川川单种业有限公司)、先玉 508 (XY508, 铁岭先锋科技有限公司)<sup>[16]</sup>。

## 1.2 试验设计

于 2018 年 10 月和 2019 年 5 月分两次在重庆文理学院温室大棚 (光温条件为自然环境) 内进行砂培试验, 采用两因素完全随机设计。因素 A 为不同铁效率玉米品种: 铁高效玉米品种正红 2 号 (ZH2)、正大 619 (ZD619) 和铁低效玉米品种川单 418 (CD418)、先玉 508 (XY508); 因素 B 为不同铁素水平: 极低铁处理 Fe0 (低铁 Hoagland 营养液, Fe 浓度为 0  $\mu\text{mol/L}$ )、低铁处理 Fe10 (低铁 Hoagland 营养液, Fe 浓度为 10  $\mu\text{mol/L}$ )、正常供铁 Fe100 (正常铁 Hoagland 完全营养液, Fe 浓度为 100  $\mu\text{mol/L}$ )。共 12 个处理, 每处理 6 盆, 共 72 盆。

砂培基质为石英砂 (1~2 mm), 10% 盐酸浸泡 4 h, 自来水冲洗后蒸馏水洗净, 装盆 (22 cm  $\times$  25 cm)。选取大小均匀、籽粒饱满的玉米种子用 70% 酒精消毒, 蒸馏水洗净, 置于铺有湿润纱布的发芽盘中 28 $^{\circ}\text{C}$  催芽, 出芽后转移到珍珠岩中。玉米幼苗 2 叶 1 心时选取长势一致的玉米幼苗, 去除胚乳后移栽至砂培基质定苗。定苗后每隔 2 天用各 Fe 浓度营养液 (每盆 1 L) 进行浇灌, 培养 14 天后进行取样测定。

## 1.3 样品采集与测定

处理后第 14 天, 每重复取 10 株, 每处理 3 次重复, 测定玉米根系形态、干物质积累及铁含量, 并计算根系铁吸收效率与生理效率。

根系形态指标: 利用根系扫描仪 (Epson Expression 1000xl, WinRHIZO) 测定根表面积、根体积、总根长、根直径。

干物质积累: 将幼苗分为根系和地上部分, 105 $^{\circ}\text{C}$  杀青 30 min, 80 $^{\circ}\text{C}$  烘至恒重, 称量干重。根冠比=根系干重/地上部干重, 单株干重=地上部干重+根系干重。

铁含量: 采用原子吸收法测定玉米幼苗地上部和根系铁含量<sup>[17]</sup>。称取 1.00 g 经烘干粉碎的玉米植株样品于塑料瓶中, 加入 25.0 mL Vc-HCl 溶液 (0.40 g 维生素 C 溶解后, 加入 166.0 mL 浓盐酸定容至 1 L), 置于 80 $^{\circ}\text{C}$  恒温振荡器上振荡 2 h, 用蒸馏水补至原重后过滤, 用原子吸收分光光度计测定浸提液中铁的含量。地上部铁积累量=铁含量  $\times$  地上部干重; 根系铁积累量=铁含量  $\times$  根系干重; 单株铁积累量=地上部铁积累量+根系铁积累量; 根冠铁分配比=根系

铁积累量/地上部铁积累量; 根系铁吸收效率=单株铁积累量/根系干重; 铁素生理效率=单株干重/铁积累量<sup>[15]</sup>。

## 1.4 数据统计分析

测定的数据用 Excel 2010 进行整理, 利用 SPSS 21.0 软件对整理好的数据进行统计分析, 并用 GraphPad Prism 5 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 低铁胁迫对不同铁效率玉米品种根系形态特征的影响

根系是玉米从土壤中吸收养分的重要器官, 良好的根系形态有利于提高玉米对铁素的吸收与积累。方差分析结果 (表 1) 显示, 除了年份  $\times$  铁、年份  $\times$  铁  $\times$  品种的互作对总根长的影响以及年份  $\times$  品种的互作对总根长、根直径和根体积的影响不显著外, 其余性状在年份、品种、铁、年份  $\times$  铁、年份  $\times$  品种、品种  $\times$  铁和年份  $\times$  铁  $\times$  品种的互作上均存在极显著差异。进一步分析发现, 低铁胁迫对玉米苗期总根长、根表面积等根系形态特征有重要影响, 且不同铁效率玉米品种根系形态特征差异明显。与 Fe100 正常供铁相比, 在极低铁和低铁 (Fe0 和 Fe10) 胁迫下, 铁低效玉米品种 (XY508 和 CD418) 总根长、根表面积和根体积均显著降低, 根直径显著增加, 而铁高效玉米品种 (ZH2 和 ZD619) 总根长和根表面积均有所增加, 根体积在极低铁和低铁处理下均显著增加, 根直径在极低铁 Fe0 处理下显著降低, 低铁 Fe10 处理下差异不显著。由此可见, 与铁低效玉米品种相比, 铁高效玉米品种在低铁胁迫下根系性状总根长、根表面积和根体积受影响较小, 对低铁环境具有较强的适应性。

### 2.2 低铁胁迫对不同铁效率玉米品种干物质积累与分配的影响

低铁胁迫下玉米幼苗地上部干重和单株干重均显著降低, 而根冠比显著升高, 且随着胁迫程度的增加变幅增大, 两年试验结果一致 (表 2)。两年 4 品种平均, 与 Fe100 处理相比, 极低铁和低铁处理 (Fe0 和 Fe10) 下地上部干重分别降低了 34.75% 和 18.54%, 单株干重分别降低了 9.39% 和 14.44%, 而根冠比分别提高了 64.29% 和 31.82%。方差分析结果 (表 2) 显示, 除了年份  $\times$  品种的互作对根干重、根冠比的影响以及年份对根冠比的影响不显著外, 其余干物质积累与分配指标在年份、品种、铁、年份  $\times$

表 1 低铁胁迫对不同铁效率玉米品种根系形态特征的影响  
Table 1 Effects of low-Fe stress on root traits of maize varieties with different Fe efficiencies

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	总根长 (cm/plant) Total root length	根表面积 (cm <sup>2</sup> /plant) Root surface area	根直径 (mm) Root diameter	根体积 (cm <sup>3</sup> ) Root volume
2018	Fe0	XY508	2646.00 ± 34.21 f	575.24 ± 12.32 f	0.75 ± 0.03 a	9.69 ± 0.42 h
		CD418	2761.85 ± 33.04 f	561.75 ± 11.12 f	0.67 ± 0.01 bcd	10.04 ± 0.33 gh
		ZH2	3695.48 ± 38.00 bc	900.65 ± 13.58 a	0.71 ± 0.01 b	17.35 ± 0.62 a
		ZD619	3674.07 ± 82.06 bc	864.30 ± 5.44 b	0.64 ± 0.00 cde	13.45 ± 0.14 cd
	Fe10	XY508	2991.40 ± 43.99 e	622.69 ± 10.92 e	0.70 ± 0.03 bc	10.46 ± 0.21 fgh
		CD418	2982.31 ± 24.61 e	616.68 ± 11.94 e	0.65 ± 0.02 cd	10.92 ± 0.22 fg
		ZH2	3892.55 ± 43.65 ab	930.06 ± 10.59 a	0.72 ± 0.01 ab	17.76 ± 0.41 a
		ZD619	3716.69 ± 61.40 ab	863.04 ± 10.72 b	0.71 ± 0.01 b	14.20 ± 0.51 c
	Fe100	XY508	3427.37 ± 98.07 d	744.35 ± 4.66 d	0.62 ± 0.02 e	11.58 ± 0.65 ef
		CD418	3503.44 ± 92.03 cd	727.34 ± 12.08 d	0.62 ± 0.02 e	12.31 ± 0.23 de
		ZH2	3645.12 ± 74.99 bc	819.12 ± 13.73 c	0.75 ± 0.01 a	15.52 ± 0.36 b
		ZD619	3598.23 ± 102.87 bcd	793.14 ± 8.14 c	0.72 ± 0.00 ab	12.22 ± 0.39 e
2019	Fe0	XY508	3100.53 ± 64.92 g	828.18 ± 15.22 de	0.98 ± 0.01 a	17.48 ± 0.46 g
		CD418	3384.67 ± 105.05 f	724.28 ± 32.88 e	0.81 ± 0.02 f	16.85 ± 0.71 g
		ZH2	4372.69 ± 39.50 abc	1429.48 ± 26.07 a	0.80 ± 0.00 f	21.96 ± 1.01 abcd
		ZD619	4365.59 ± 57.68 abc	1393.58 ± 42.99 ab	0.81 ± 0.01 f	23.24 ± 0.90 abc
	Fe10	XY508	3624.66 ± 65.70 e	939.60 ± 10.42 d	0.94 ± 0.01 ab	17.97 ± 0.66 fg
		CD418	3741.78 ± 91.19 e	923.69 ± 25.83 d	0.80 ± 0.02 f	17.43 ± 0.51 g
		ZH2	4443.51 ± 51.69 ab	1330.56 ± 24.73 ab	0.87 ± 0.01 e	22.91 ± 0.57 ab
		ZD619	4527.96 ± 50.89 ab	1325.54 ± 23.98 ab	0.89 ± 0.01 de	23.72 ± 0.32 a
	Fe100	XY508	4267.88 ± 87.06 bcd	1288.05 ± 52.00 bc	0.88 ± 0.00 de	20.48 ± 0.72 de
		CD418	4197.85 ± 74.54 bcd	1251.37 ± 34.20 c	0.64 ± 0.02 g	19.63 ± 0.52 ef
		ZH2	4246.14 ± 61.79 bcd	1225.75 ± 35.38 c	0.90 ± 0.01 cde	21.08 ± 1.06 cde
		ZD619	4136.12 ± 54.10 bcd	1258.08 ± 25.78 c	0.93 ± 0.02 bcd	21.44 ± 0.76 bcde
F 值 F value	年份 Years (Y)		315.77**	1214.84**	488.32**	1067.34**
	铁 Iron (Fe)		135.21**	233.16**	37.22**	96.56**
	品种 Variety (V)		43.29**	86.58**	15.76**	32.51**
	年份 × 铁 Y × Fe		0.07 <sup>ns</sup>	10.63**	28.30**	14.79**
	年份 × 品种 Y × V		1.33 <sup>ns</sup>	14.45**	2.06 <sup>ns</sup>	1.43 <sup>ns</sup>
	铁 × 品种 Fe × V		15.65**	36.79**	18.40**	23.26**
	年份 × 铁 × 品种 Y × Fe × V		2.33 <sup>ns</sup>	4.10**	7.29**	3.74**

注 (Note): Fe0、Fe10 和 Fe100 分别代表培养液中铁为 0、10 和 100 μmol/L Fe0, Fe10 and Fe100 indicate the Fe contents of 0, 10 and 100 μmol/L in Hoagland's solution, respectively. 同一列中不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters within the same column are significantly different among treatments in the same year at 5% level. \*\*— $P < 0.01$ ; ns— $P > 0.05$ .

铁、年份 × 品种、品种 × 铁和年份 × 铁 × 品种的交互上均存在极显著差异。进一步分析发现不同铁效率玉米品种上述指标对低铁胁迫的响应也存在明显

差异。两年平均, 与 Fe100 处理相比, 极低铁和低铁胁迫下 (Fe0 和 Fe10), 铁低效品种地上部干重降低幅度分别为 52.63% 和 28.95% (XY508)、51.43%

表 2 低铁胁迫对不同铁效率玉米品种干物质积累与分配的影响  
**Table 2 Effects of low-Fe stress on the dry matter accumulation and distribution of maize varieties with different Fe efficiencies**

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	地上部干重 (g/plant) Shoot dry weight	根干重 (g/plant) Root dry weight	单株干重 (g/plant) Whole plant dry weight	根冠比 Root to shoot ratio
2018	Fe0	XY508	0.50 ± 0.02 g	0.21 ± 0.01 cd	0.71 ± 0.02 f	0.43 ± 0.02 a
		CD418	0.54 ± 0.01 g	0.22 ± 0.01 cd	0.76 ± 0.00 f	0.41 ± 0.01 a
		ZH2	1.23 ± 0.04 c	0.29 ± 0.01 b	1.52 ± 0.03 b	0.23 ± 0.00 c
		ZD619	0.80 ± 0.01 f	0.17 ± 0.00 f	0.97 ± 0.01 e	0.22 ± 0.01 cd
	Fe10	XY508	0.80 ± 0.04 f	0.24 ± 0.02 c	1.04 ± 0.03 de	0.30 ± 0.01 b
		CD418	0.83 ± 0.03 ef	0.19 ± 0.00 def	1.03 ± 0.02 de	0.24 ± 0.00 c
		ZH2	1.50 ± 0.01 b	0.36 ± 0.02 a	1.85 ± 0.01 a	0.24 ± 0.01 c
		ZD619	0.89 ± 0.01 e	0.20 ± 0.00 def	1.09 ± 0.01 d	0.22 ± 0.01 cd
	Fe100	XY508	1.09 ± 0.04 d	0.21 ± 0.01 de	1.30 ± 0.03 e	0.19 ± 0.01 e
		CD418	1.10 ± 0.04 d	0.21 ± 0.01 cd	1.31 ± 0.03 c	0.20 ± 0.00 de
		ZH2	1.61 ± 0.05 a	0.29 ± 0.00 b	1.90 ± 0.05 a	0.18 ± 0.00 e
		ZD619	0.91 ± 0.02 e	0.18 ± 0.01 ef	1.09 ± 0.01 d	0.20 ± 0.01 de
2019	Fe0	XY508	0.76 ± 0.01 g	0.29 ± 0.01 e	1.05 ± 0.00 g	0.39 ± 0.01 a
		CD418	0.82 ± 0.01 g	0.31 ± 0.00 cde	1.13 ± 0.01 f	0.37 ± 0.00 b
		ZH2	1.47 ± 0.03 c	0.37 ± 0.01 a	1.85 ± 0.03 c	0.26 ± 0.00 e
		ZD619	1.38 ± 0.03 f	0.31 ± 0.01 cde	1.69 ± 0.02 d	0.22 ± 0.00 g
	Fe10	XY508	1.09 ± 0.01 f	0.33 ± 0.01 b	1.41 ± 0.01 e	0.30 ± 0.00 c
		CD418	1.13 ± 0.04 ef	0.32 ± 0.01 bc	1.45 ± 0.04 e	0.29 ± 0.00 d
		ZH2	1.63 ± 0.03 b	0.38 ± 0.00 a	2.01 ± 0.03 b	0.23 ± 0.00 f
		ZD619	1.53 ± 0.05 e	0.32 ± 0.01 bc	1.85 ± 0.05 c	0.21 ± 0.00 h
	Fe100	XY508	1.57 ± 0.03 d	0.30 ± 0.01 de	1.87 ± 0.02 c	0.19 ± 0.00 i
		CD418	1.70 ± 0.02 d	0.32 ± 0.00 bcd	2.02 ± 0.01 b	0.19 ± 0.00 i
		ZH2	1.82 ± 0.02 a	0.38 ± 0.00 a	2.20 ± 0.02 a	0.21 ± 0.00 h
		ZD619	1.71 ± 0.03 e	0.31 ± 0.00 bcd	2.02 ± 0.03 b	0.18 ± 0.00 i
F 值 F value	年份 Years (Y)		2003.83**	1127.86**	2623.29**	0.01 <sup>ns</sup>
	铁 Iron (Fe)		1039.32**	85.05**	1110.54**	637.07**
	品种 Variety (V)		80.05**	23.01**	91.28**	148.87**
	年份 × 铁 Y × Fe		69.82**	25.07**	96.24**	16.01**
	年份 × 品种 Y × V		32.71**	2.98 <sup>ns</sup>	38.03**	2.64 <sup>ns</sup>
	铁 × 品种 Fe × V		455.79**	95.47**	472.61**	163.85**
	年份 × 铁 × 品种 Y × Fe × V		40.35**	13.07**	63.36**	5.02**

注 (Note): Fe0、Fe10 和 Fe100 分别代表培养液中铁浓度为 0、10 和 100 μmol/L Fe0, Fe10 and Fe100 indicate Fe contents of 0, 10 and 100 μmol/L in Hoagland's solution, respectively. 同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters within the same column are significantly different among treatments in the same year at 5% level. \*\*— $P < 0.01$ ; ns— $P > 0.05$ .

和 30.00% (CD418), 单株干重分别降低 44.48% 和 22.71% (XY508)、43.24% 和 25.53% (CD418), 而铁高效品种地上部干重分别降低 21.28% 和 8.75%

(ZH2)、16.79% 和 7.63% (ZD619), 单株干重分别降低 17.80% 和 5.85% (ZH2)、14.47% 和 5.47% (ZD619), 降幅均低于铁低效品种; 铁低效品种

(XY508 和 CD418) 的根冠比分别提高 107.79% (Fe0) 和 46.75% (Fe10), 而铁高效品种 (ZH2 和 ZD619) 分别提高 20.78% (Fe0) 和 16.88% (Fe10)。由此可见, 与铁低效品种相比, 铁高效品种在低铁胁迫下地上部生长受到的影响小, 表明其对低铁环境具有更强的适应性。

### 2.3 低铁胁迫对不同铁效率玉米品种铁积累与分配的影响

低铁胁迫下, 玉米幼苗单株铁积累量显著降低, 且随胁迫程度增加降幅增大 (表 3)。两年 4 品种平均, 极低铁和低铁 (Fe0 和 Fe10) 处理下的单株铁积累量较 Fe100 分别降低了 38.73% 和 21.84%。方差分析结果 (表 3) 显示, 除了年份及年份 × 品种的互作对根冠铁分配比的影响不显著外, 其余铁积累与分配指标在年份、品种、铁、年份 × 铁、年份 × 品种、品种 × 铁和年份 × 铁 × 品种的互作上均存在极显著差异。进一步对比发现低铁胁迫对不同铁效率玉米品种铁积累量的影响程度存在明显差异。两年平均, 极低铁和低铁 (Fe0 和 Fe10) 处理下, 铁高效品种铁积累量较 Fe100 分别降低 25.42% 和 11.94%, 地上部铁分配比例较 Fe100 分别降低 5.98% 和 4.13%, 根系铁分配比例较 Fe100 分别提高 17.36% 和 11.96%; 而铁低效品种铁积累量较 Fe100 分别降低 53.77% 和 33.02%, 地上部铁分配比例较 Fe100 则分别降低 18.08% 和 10.24%, 根系铁分配比例较 Fe100 分别提高 53.97% 和 30.11%。极低铁和低铁处理下, 铁高效品种铁积累量的降幅、地上部铁分配比例的降幅与根系铁分配比例的增幅均明显低于铁低效品种, 且根冠铁分配比受的影响更小, 能更好地维持植株的正常生长, 提高其对低铁环境的适应性。

### 2.4 低铁胁迫对不同铁效率玉米品种铁吸收利用的影响

单位重量根系的铁吸收量 (单株铁积累量/根系干重) 可以反映根系的相对铁吸收能力。由图 1 可知, 玉米幼苗根系相对铁吸收能力 (根系铁吸收效率) 随低铁胁迫程度的增加而降低, 两年 4 品种平均, 在极低铁和低铁 (Fe0 和 Fe10) 处理下, 根系铁吸收效率较 Fe100 处理分别降低了 38.66% 和 26.52%。不同铁效率玉米品种根系铁吸收效率对低铁胁迫的响应差异明显, 两年平均, 在极低铁和低铁 (Fe0 和 Fe10) 处理下, 铁高效品种根系铁吸收效率分别较 Fe100 降低了 23.95% 和 18.19%, 铁低效品种分别降

低了 53.61% 和 34.98%。铁高效品种根系铁吸收效率降幅明显低于铁低效品种, 表明低铁胁迫下铁高效品种根系具有更强的铁吸收能力。

低铁胁迫下, 玉米幼苗铁生产能力 (铁素生理效率) 显著提高, 且随胁迫程度增加增幅加大 (图 2)。两年 4 品种平均, Fe0 和 Fe10 处理铁生理效率较 Fe100 处理分别提高 17.14% 和 9.78%。不同铁效率玉米品种铁生理效率对低铁胁迫的响应程度也有较大差异。两年平均, 在极低铁和低铁 (Fe0 和 Fe10) 处理下, 铁高效品种的铁生理效率较 Fe100 处理分别提高了 21.50% 和 12.72%, 而铁低效品种较 Fe100 处理分别提高了 12.69% 和 6.78%。低铁胁迫下, 铁高效品种铁生理效率增幅大于铁低效品种, 表明低铁胁迫下铁高效品种的铁利用效率更优。

### 2.5 根系性状与铁积累量的相关性分析

玉米幼苗根系性状与铁积累量的相关性分析结果表明, 玉米幼苗铁积累量与总根长、根表面积、根体积和根干重均呈显著正相关, 而与根冠比之间呈负相关 (图 3), 其中与总根长 ( $R^2 = 0.8546$ , 图 3A) 和根表面积 ( $R^2 = 0.8983$ , 图 3B) 相关性最强, 表明总根长和根表面积是影响玉米幼苗铁吸收积累最重要的根系性状。进一步分析表明, 两年平均, 铁高效品种平均较铁低效品种平均在正常铁 Fe100、低铁 Fe10 和极低铁 Fe0 处理下总根长分别高出 1.49%、24.29% 和 35.44%, 根表面积分别高 2.12%、43.40% 和 70.59%。与铁低效品种相比, 铁高效品种总根长和根表面积的增长优势均随胁迫程度的增加而增加, 表明保持较高的根长和根表面积是铁高效品种具有更强的低铁适应能力的重要根系特征。

## 3 讨论

铁是植物生长发育的重要营养元素, 缺铁胁迫对植物根系的形态指标和生物量均有重要影响<sup>[18-19]</sup>。龙文靖等<sup>[20]</sup>指出玉米幼苗根长、根体积、根系活力、干物质、铁含量、铁积累量、相对吸铁能力均随铁浓度的降低逐渐降低。牛乐等<sup>[7]</sup>研究发现, 低铁胁迫下, 玉米幼苗的单株干重、根干重、总根长、根体积和根表面积均降低, 但根冠比与平均根直径明显增加。本试验结果表明, 低铁胁迫导致铁低效玉米品种幼苗的总根长、根表面积、根体积、干物质重均显著或极显著降低, 所有玉米品种幼苗根冠比均显著增加, 这与前人<sup>[5, 14]</sup>的研究结果基本一致。但铁高效品种在低铁胁迫下总根长与根表面积未降低反

表 3 低铁胁迫下玉米不同部位铁积累量及根冠铁分配比

Table 3 Fe accumulation in different parts of maize and the distribution ratio of root to shoot under low Fe stress

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	地上部 ( $\mu\text{g}/\text{plant}$ ) Shoot	根系 ( $\mu\text{g}/\text{plant}$ ) Root	全株 ( $\mu\text{g}/\text{plant}$ ) Whole plant	根冠铁分配比 Fe distribution ratio of root to shoot
2018	Fe0	XY508	81.68 $\pm$ 1.41 h	56.32 $\pm$ 2.48 gh	137.99 $\pm$ 2.89 h	0.69 $\pm$ 0.02 a
		CD418	91.35 $\pm$ 1.53 h	47.48 $\pm$ 1.72 h	138.83 $\pm$ 2.77 h	0.52 $\pm$ 0.02 b
		ZH2	220.65 $\pm$ 1.25 cd	98.68 $\pm$ 1.32 c	319.33 $\pm$ 0.18 c	0.45 $\pm$ 0.01 c
		ZD619	145.85 $\pm$ 1.12 g	50.71 $\pm$ 1.75 h	196.56 $\pm$ 2.22 g	0.35 $\pm$ 0.01 ef
	Fe10	XY508	147.03 $\pm$ 6.67 g	74.65 $\pm$ 3.26 e	221.68 $\pm$ 3.47 f	0.51 $\pm$ 0.01 b
		CD418	142.39 $\pm$ 2.79 g	59.66 $\pm$ 0.34 fg	202.05 $\pm$ 2.45 g	0.42 $\pm$ 0.01 cd
		ZH2	296.96 $\pm$ 5.42 b	128.12 $\pm$ 5.56 a	425.09 $\pm$ 10.85 b	0.43 $\pm$ 0.03 cd
		ZD619	168.32 $\pm$ 0.83 f	65.91 $\pm$ 1.72 ef	234.24 $\pm$ 2.53 f	0.39 $\pm$ 0.01 de
	Fe100	XY508	225.87 $\pm$ 5.68 c	74.68 $\pm$ 2.73 e	300.55 $\pm$ 4.78 d	0.33 $\pm$ 0.01 f
		CD418	209.67 $\pm$ 5.36 d	84.98 $\pm$ 4.68 d	294.66 $\pm$ 3.56 d	0.41 $\pm$ 0.01 d
		ZH2	333.73 $\pm$ 9.67 a	113.83 $\pm$ 1.02 b	447.56 $\pm$ 9.47 a	0.34 $\pm$ 0.01 f
		ZD619	182.60 $\pm$ 1.30 e	70.79 $\pm$ 4.88 e	253.39 $\pm$ 3.93 e	0.39 $\pm$ 0.02 de
2019	Fe0	XY508	134.67 $\pm$ 1.45 i	93.67 $\pm$ 0.84 h	228.35 $\pm$ 2.28 h	0.70 $\pm$ 0.01 a
		CD418	145.22 $\pm$ 0.67 i	94.77 $\pm$ 0.84 h	239.98 $\pm$ 1.46 g	0.65 $\pm$ 0.00 b
		ZH2	311.37 $\pm$ 2.69 f	139.18 $\pm$ 1.07 c	450.55 $\pm$ 2.09 d	0.45 $\pm$ 0.01 e
		ZD619	279.28 $\pm$ 2.61 g	112.95 $\pm$ 2.58 fg	392.23 $\pm$ 4.06 e	0.40 $\pm$ 0.01 f
	Fe10	XY508	214.08 $\pm$ 1.45 h	115.41 $\pm$ 0.46 ef	329.49 $\pm$ 1.70 f	0.54 $\pm$ 0.00 c
		CD418	215.62 $\pm$ 4.85 h	110.14 $\pm$ 0.72 g	325.75 $\pm$ 4.49 f	0.51 $\pm$ 0.01 d
		ZH2	353.44 $\pm$ 4.93 d	144.70 $\pm$ 1.35 b	498.13 $\pm$ 4.52 c	0.41 $\pm$ 0.01 f
		ZD619	324.00 $\pm$ 9.02 e	122.84 $\pm$ 1.53 d	446.84 $\pm$ 8.19 d	0.38 $\pm$ 0.01 g
	Fe100	XY508	375.26 $\pm$ 1.06 c	117.93 $\pm$ 2.47 e	493.18 $\pm$ 1.41 c	0.31 $\pm$ 0.01 i
		CD418	398.11 $\pm$ 2.34 b	125.44 $\pm$ 1.26 d	523.55 $\pm$ 1.12 b	0.32 $\pm$ 0.00 i
		ZH2	436.89 $\pm$ 3.85 a	152.91 $\pm$ 0.77 a	589.79 $\pm$ 3.75 a	0.35 $\pm$ 0.00 h
		ZD619	407.44 $\pm$ 4.83 b	123.70 $\pm$ 0.79 d	531.13 $\pm$ 4.51 b	0.30 $\pm$ 0.00 i
F 值 F value	年份 Years (Y)		3614.14**	1704.51**	4890.78**	2.07 <sup>ns</sup>
	铁 Iron (Fe)		1394.20**	239.07**	1316.12**	331.39**
	品种 Variety (V)		106.46**	14.26**	104.50**	81.55**
	年份 $\times$ 铁 Y $\times$ Fe		167.08**	18.25**	136.72**	6.82**
	年份 $\times$ 品种 Y $\times$ V		37.05**	6.34**	41.18**	2.80 <sup>ns</sup>
	铁 $\times$ 品种 Fe $\times$ V		744.43**	154.65**	730.01**	111.80**
	年份 $\times$ 铁 $\times$ 品种 Y $\times$ Fe $\times$ V		73.77**	9.53**	52.40**	18.24**

注 (Note): Fe0、Fe10 和 Fe100 分别代表培养液中铁浓度为 0、10 和 100  $\mu\text{mol}/\text{L}$  Fe0, Fe10 and Fe100 indicate Fe contents of 0, 10 and 100  $\mu\text{mol}/\text{L}$  in Hoagland's solution respectively. 同一列中不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters within the same column are significantly different among treatments in the same year at 5% level. \*\*— $P < 0.01$ ; ns— $P > 0.05$ .

而有所增加, 且根体积与干物质重的降幅及根冠比的增幅均明显低于铁低效品种, 这与章爱群等<sup>[14]</sup>和徐健钦等<sup>[21]</sup>指出的适当低铁对玉米幼苗根系生长具有促

进作用的结果一致。龙文靖等<sup>[15]</sup>研究指出, 玉米铁高效品种根长、根体积及根系干物质均高于铁低效品种, 根系发达是铁高效品种铁积累量显著高于铁低

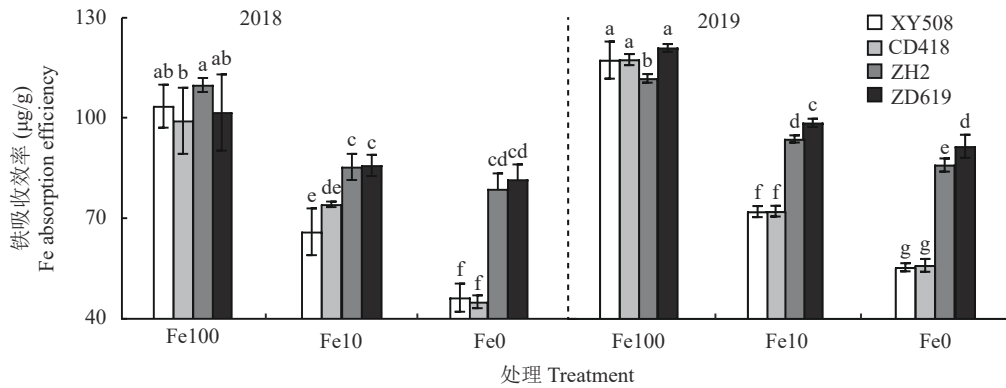


图 1 低铁胁迫对不同铁效率玉米品种根系铁吸收效率的影响

Fig. 1 Effects of low-Fe stress on the root Fe absorption capacity of maize varieties with different Fe efficiencies

[注 (Note): Fe0、Fe10 和 Fe100 分别代表培养液中铁添加浓度为 0、10 和 100 µmol/L Fe0, Fe10 and Fe100 indicate Fe content of 0, 10 and 100 µmol/L in Hoagland's solution respectively. 柱上不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达 5% 显著水平 Different small letters above the bars are significantly different among treatments in the same year at 5% level.]

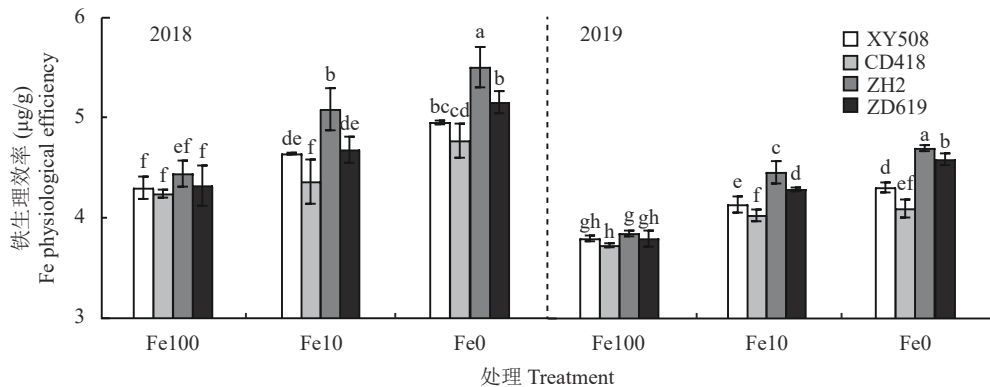


图 2 低铁胁迫对不同铁效率玉米品种铁素生理效率的影响

Fig. 2 Effects of low-Fe stress on Fe physiological efficiency of maize varieties with different Fe efficiencies

[注 (Note): Fe0、Fe10 和 Fe100 分别代表培养液中铁添加浓度为 0、10 和 100 µmol/L Fe0, Fe10 and Fe100 indicate Fe content of 0, 10 and 100 µmol/L in Hoagland's solution respectively. 柱上不同小写字母表示用一年份不同处理间差异达 5% 显著水平 Different small letters above the bars are significantly different among treatments in the same year at 5% level.]

效品种的重要原因。本试验中铁高效品种总根长、根表面积、根体积和根干重也均明显高于铁低效品种。同时, 本研究还发现玉米幼苗铁积累量与总根长、根表面积、根体积和根干重均呈显著正相关, 而与根冠比之间呈负相关, 且玉米幼苗铁积累量与总根长 ( $R^2 = 0.8546$ ) 和根表面积 ( $R^2 = 0.8983$ ) 相关性最高。与正常铁 Fe100 处理相比, 低铁处理下铁低效品种的总根长、根表面积和根体积显著降低, 而铁高效品种的总根长和根表面积差异不显著, 因此较高的总根长和根表面积可能是铁高效品种对低铁胁迫具有更强适应性的重要根系性状。

植株对铁的吸收利用是一个复杂的过程, 低铁胁迫下植物根系特性与铁高效品种的铁素吸收能力密切相关<sup>[22-23]</sup>。陈旭蕾等<sup>[24]</sup>发现低铁胁迫下, 各基因

型玉米的根冠比与铁吸收效率呈显著的负相关。本研究也得出类似的结果, 低铁胁迫下玉米幼苗的根冠比显著增加而根系相对铁吸收效率显著降低, 呈明显的负相关; 此外, 本研究还发现低铁胁迫下玉米幼苗铁素生理效率显著增加, 可能是作物适应低铁胁迫的重要生理机制, 与前人<sup>[15, 25]</sup>研究结果一致。石荣丽等<sup>[26]</sup>研究小麦铁营养效率发现基因型铁吸收差异与根表面积差异密切相关。赵婧等<sup>[27]</sup>研究表明, 低铁胁迫下铁高效大豆品种根系的铁平均积累速率高于铁低效品种, 以此来抵抗低铁对生长所造成的伤害。本试验结果表明, 低铁胁迫下由于铁供应受限使玉米幼苗根系铁吸收效率显著下降, 但铁高效品种的降幅明显低于铁低效品种, 使得铁高效品种的根系铁吸收效率显著高于铁低效品种, 这与前人<sup>[25-27]</sup>



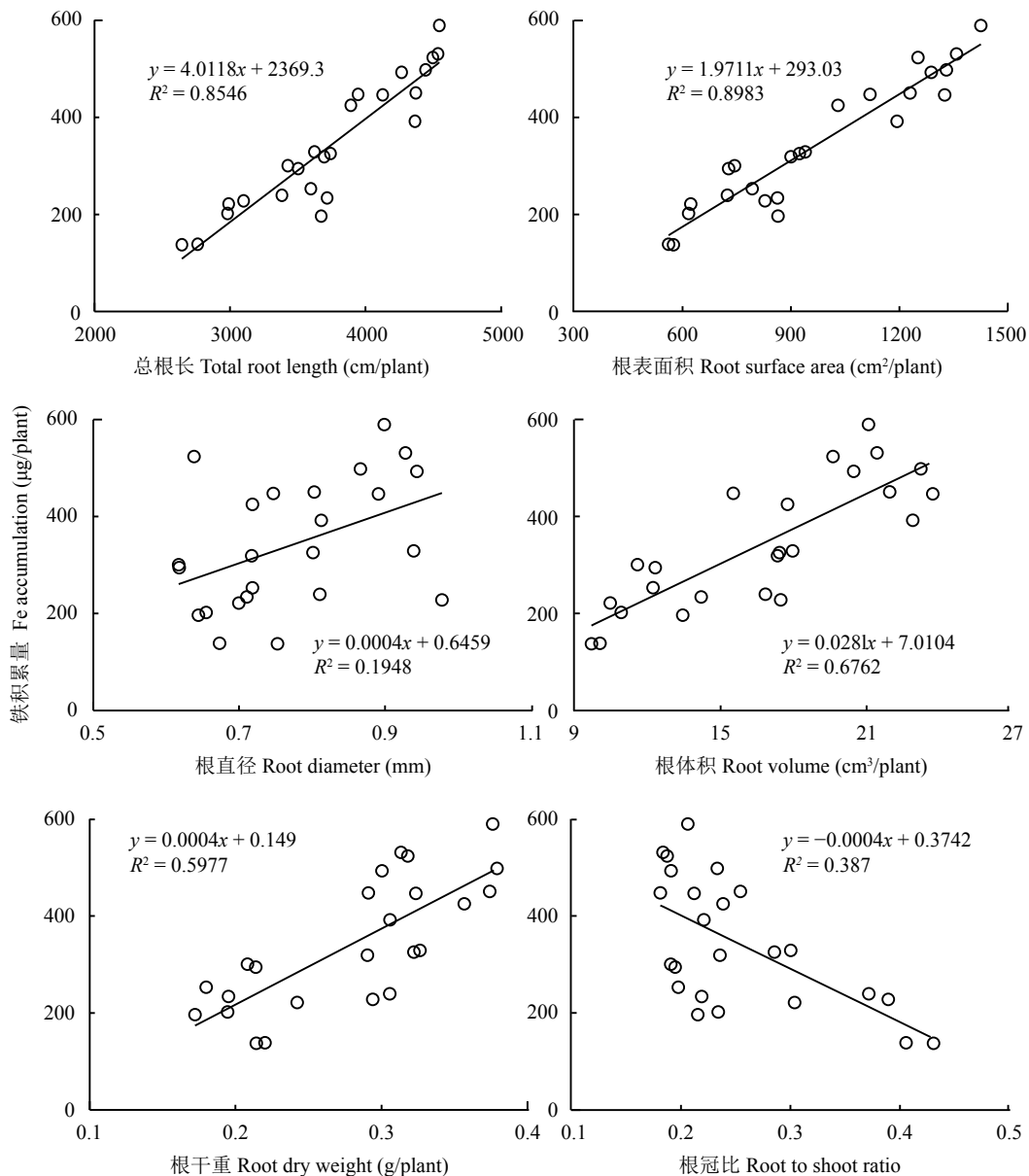


图3 玉米幼苗根系性状与铁积累的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of root traits and iron accumulation in maize seedlings

的研究结果基本一致。同时，玉米幼苗为了适应低铁环境，铁生理效率显著升高，但铁高效品种的增幅明显高于铁低效品种。因此，较高的根系铁吸收效率和铁生理效率是铁高效品种较铁低效品种对低铁胁迫具有更强适应性的重要生理特征。

#### 4 结论

低铁胁迫下，不同铁效率玉米品种幼苗的根干重、单株干重、铁积累量、根系相对铁吸收效率均显著降低，而根冠比与铁素生理效率均显著升高，且随胁迫程度的增加变幅加大，铁高效品种各指标

的变幅均明显低于铁低效品种；铁低效品种根体积、总根长和根表面积均显著降低，而铁高效品种均有所增加。玉米幼苗铁积累量与总根长、根表面积、根体积和根干重均呈显著正相关，与根冠比呈负相关，但与总根长和根表面积相关性最高。与铁低效玉米品种相比，铁高效玉米品种低铁胁迫下具有较大的总根长与根表面积及较高的根系铁吸收效率与铁生理效率，促进其对铁素的高效吸收和利用，提高了其对低铁环境的适应性。

#### 参考文献:

- [1] Rajniak J, Giehl R F, Chang E, *et al.* Biosynthesis of redox-active

- metabolites in response to iron deficiency in plants[J]. *Nature Chemical Biology*, 2018, 14(5): 442–450.
- [2] 樊庆琦, 黄承彦, 解树斌, 等. 缺铁胁迫对小麦苗期叶绿素含量的影响及SPAD值的GWAS分析[J]. *山东农业科学*, 2018, 50(8): 12–18. Fan Q Q, Huang C Y, Xie S B, *et al.* Effects of iron deficiency stress on chlorophyll content and GWAS analysis of SPAD value in wheat seedling stage[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(8): 12–18.
- [3] 李丽娅. 铁(III)螯合物还原酶在植物铁代谢中的作用研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨师范大学博士学位论文, 2011. Li L Y. The function of iron chelate reductase in iron metabolism of plants[D]. Heilongjiang: PhD Dissertation of Harbin Normal University, 2011.
- [4] Sotomayor C, Ruiz R, Castro J. Growth, yield and iron deficiency tolerance level of six peach rootstocks grown on calcareous soil[J]. *Ciencia E Investigación Agraria*, 2014, 41(3): 403–409.
- [5] 李秀芳. 水肥互作对夏玉米生长与养分吸收及根系活性的影响[D]. 河北保定: 河北农业大学硕士学位论文, 2011. Li X F. Effects of water and fertilizer cooperation on the growth and nutrient absorption and root activity of summer maize[D]. Baoding, Hebei: MS Thesis of Hebei Agricultural University, 2011.
- [6] Zha Q, Wang Y, Zhang X Z, Han Z H. Both immanently high active iron contents and increased root ferrous uptake in response to low iron stress contribute to the iron deficiency tolerance in *Malus xiaojinensis*[J]. *Plant Science*, 2014, 214(1): 47–56.
- [7] 牛乐, 位晶, 唐宏亮. 不同氮效率基因型玉米根系对低铁胁迫的响应[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(3): 128–132. Niu L, Wei J, Tang H L. Responses of the roots of different maize genotypes of nitrogen efficiency to iron deficiency[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2019, 47(3): 128–132.
- [8] Ciaffi M, Paolacci A R, Celletti S, *et al.* Transcriptional and physiological changes in the S assimilation pathway due to single or combined S and Fe deprivation in durum wheat (*Triticum durum* L.) seedlings[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(6): 1663–1675.
- [9] Zamboni A, Celletti S, Zenoni S, *et al.* Root physiological and transcriptional response to single and combined S and Fe deficiency in durum wheat[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2017, 143: 172–184.
- [10] Jia X M, Zhu Y F, Hu Y, *et al.* Tolerance to iron-deficiency stress of three apple rootstock species in hydroponic system[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2018, 19(3): 21–30.
- [11] 龙文靖. 玉米苗期耐低铁品种筛选及其机理研究[D]. 成都: 四川农业大学硕士学位论文, 2015. Long W J. Reserch on scenening of maize resistance variety to low iron and physiological mechanism[D]. Chengdu: MS Thesis of Sichuan Agricultural University, 2015.
- [12] 王树圆. 玉米在我国畜牧业中的地位和作用[J]. *中国农业信息*, 2014, (4S): 252. Wang S Y. The position and function of corn in animal husbandry in my country[J]. *China Agriculture Information*, 2014, (4S): 252.
- [13] Tang L, Yuan L, Yang H, *et al.* Discussion abiotic stress tolerance and corresponding strategies for maize breeding in southwest region of China[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(11): 2037–2044.
- [14] 章爱群, 斯琴朝克图, 刘牛, 贺立源. 低铁胁迫对不同耐低磷玉米生长及磷、铁养分吸收的影响[J]. *作物杂志*, 2014, (6): 111–115. Zhang A Q, Siqin C K T, Liu N, He L Y. Effects of Fe-deficiency on plant growth and uptake of P and Fe in different P-genotype maize[J]. *Crops*, 2014, (6): 111–115.
- [15] 龙文靖, 辜涛, 万年鑫, 等. 低铁胁迫对玉米苗期根系生长和铁素吸收利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(8): 1163–1172. Long W J, Gu T, Wan N X, *et al.* Effect of low iron stress on root growth and iron uptake and utilization of different maize cultivars at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(8): 1163–1172.
- [16] 龙文靖, 万年鑫, 辜涛, 等. 玉米苗期耐低铁能力的综合评价及其预测[J]. *植物遗传资源学报*, 2015, 16(4): 734–742. Long W J, Wan N X, Gu T, *et al.* Comprehensive evaluation and forecast of low iron tolerant ability in maize seedling stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(4): 734–742.
- [17] 张茂林, 夏河山, 闫素清. 盐酸浸取火焰原子吸收光谱法测定小麦和玉米中的锌、铁含量[J]. *郑州工程学院学报*, 2004, 25(4): 72–73. Zhang M L, Xia H S, Yan S Q. Determination of zinc and iron in wheat and corn by flame atomic absorption spectrometry with hydrochloric acid leaching[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Technology*, 2004, 25(4): 72–73.
- [18] Tripathi D K, Shweta S, Shweta G, *et al.* Acquisition and homeostasis of iron in higher plants and their probable role in abiotic stress tolerance[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 5: 86.
- [19] Long T A, Tsukagoshi H, Busch W, *et al.* The bHLH transcription factor popeye regulates response to iron deficiency in *Arabidopsis* roots[J]. *The Plant Cell Online*, 2010, 22(7): 2219–2236.
- [20] 龙文靖, 万年鑫, 朱从桦, 等. 不同供Fe<sup>3+</sup>水平对玉米苗期生长的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 23(4): 78–83, 91. Long W J, Wan N X, Zhu C H, *et al.* Effect of different Fe<sup>3+</sup> levels on growth of maize seedlings[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4): 78–83, 91.
- [21] 徐健钦, 陈旭蕾, 于福同. 不同铵硝配比条件下BPDS-Fe(II)对玉米幼苗耐低铁胁迫差异的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(7): 1223–1233. Xu J Q, Chen X L, Yu F T. Effects of BPDS-Fe(II) on the difference in tolerance to iron deficiency of maize seedlings under different ammonium/nitrate ratios[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(7): 1223–1233.
- [22] Hell R, Stephan U W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants[J]. *Planta*, 2003, 216(4): 541–551.
- [23] Zhou C, Guo J, Zhu L, *et al.* *Paenibacillus polymyxa* BFKC01 enhances plant iron absorption via improved root systems and

- activated iron acquisition mechanisms[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2016, 105: 162–173.
- [24] 陈旭蕾, 徐健钦, 于福同. 不同玉米自交系苗期铁效率差异研究[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(11): 49–57.  
Chen X L, Xu J Q, Yu F T. Study on the iron efficiency of different maize inbred lines at seedling stage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(11): 49–57.
- [25] 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.
- [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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(6): 1306–1311.
- [27] 赵婧, 邱强, 张鸣浩, 等. 低铁胁迫与大豆品种铁效率间的关系[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(30): 49–55.  
Zhao J, Qiu Q, Zhang M H, *et al.* Relationship between Fe deficiency stress and Fe efficiency of soybean cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(30): 49–55.