

不同铁利用效率大豆品种在石灰性土壤中抗氧化酶活性的差异

包悦琳¹ 陈 鸽¹ 王婷婷¹ 张伟^{2*} 金东淳^{1*}

(1. 延边大学 农学院, 吉林 延吉 133000;

2. 吉林省农业科学院 大豆研究所, 长春 130000)

摘 要 为探明不同铁利用效率大豆品种抗氧化酶活性的差异,以铁效率差异显著的铁高效品种(‘吉育 99’、‘吉育 75’、‘长农 15’、‘长农 20’)和铁低效品种(‘吉农 27’、‘吉育 87’、‘吉育 92’、‘吉育 93’)大豆为材料,采用盆栽方式,种植在石灰性土壤中,测定不同铁利用效率的大豆农艺性状、籽粒含铁量、不同发育时期的叶绿素含量(SPAD)和抗氧化酶活性等指标。结果表明,铁高效与铁低效大豆品种株高、单株荚重、单株粒重、单株生物量和籽粒含铁量均存在显著差异;在石灰性土壤中,在三叶期和四叶期时铁高效品种大豆叶片的 SPAD 和 SOD 活性显著高于铁低效品种;在一叶期、二叶期,铁高效大豆品种叶片中的 CAT 活性显著高于铁低效品种;而 POD 活性各时期(V₁~R₂)无显著差异。铁高效大豆品种(‘吉育 99’、‘吉育 75’、‘长农 15’、‘长农 20’)在缺铁条件下通过维持较高的抗氧化酶活性来避免膜质过氧化导致的光合能力下降。

关键词 铁效率; 大豆; 抗氧化酶; 酶活性; 石灰性土壤

中图分类号 S626

文章编号 1007-4333(2020)11-0048-06

文献标志码 A

Antioxidant enzyme activities of soybean varieties with different iron efficiency growing in calcareous soil

BAO Yuelin¹, CHEN Ge¹, WANG Tingting¹, ZHANG Wei^{2*}, JIN Dongchun^{1*}

(1. College of Agriculture, Yanbian University, Yanji 133000, China;

2. Soybean Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130000, China)

Abstract To illustrate the differences of different iron efficiency soybean varieties in antioxidant enzyme activity, iron efficient soybean varieties (‘jiyu 99’, ‘jiyu 75’, ‘changnong 15’, ‘changnong 20’) and iron inefficient (‘jinong 27’, ‘jiyu 87’, ‘jiyu 92’, ‘jiyu 93’) were taken as study material plants were grown in pots containing calcareous soil. The soybean agronomic traits and grain iron content and different development periods of chlorophyll content (SPAD) and antioxidant enzymes and other indicators were determined. The results showed that: There were significant differences in plant height, pod weight, grain weight, biomass and iron content in seeds between high and low efficiency soybean varieties. In calcareous soil, the SPAD and SOD activities in the leaves of soybean with high iron efficiency were significantly higher than those of soybean varieties with low iron efficiency the three-leaf stage and four-leaf stage. The CAT activity in the leaves of iron efficient soybean varieties was significantly higher than that of iron inefficient soybean varieties at the one-leaf and two-leaf stages. There was no significant difference in the POD activity at different stages (V₁ - R₂). In conclusion, the iron-efficient soybean varieties (‘jiyu 99’, ‘jiyu 75’, ‘changnong15’ and ‘Changnong 20’) can avoid the decrease of photosynthetic capacity caused by membrane peroxidation by maintaining high antioxidant enzyme activity under the condition of iron deficiency.

Keywords iron efficiency; soybean; antioxidant enzymes; enzyme activity; calcareous soil

收稿日期: 2020-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(31271647)

第一作者: 包悦琳, 硕士研究生, E-mail: 50801392@qq.com

通讯作者: 金东淳, 副教授, 主要从事大豆生理与栽培的研究, E-mail: jdc1200@ybu.edu.cn

张伟, 研究员, 主要从事大豆生理与栽培的研究, E-mail: zw.0431@163.com

铁是植物生长发育中所必需的微量营养元素。虽然土壤中铁的丰度很高,但其生物有效性非常低,特别是在碱性石灰性土壤中,其高 pH 和高重碳酸盐含量严重降低了土壤中铁的有效性。据报道,全世界大约 40% 的耕地面积潜在性缺铁^[1-3]。由于缺铁导致叶绿素生物合成受阻,造成植物缺铁黄化症(IDC),进而造成幼嫩叶片黄化、减少叶片面积、茎和根的干重^[4],最终造成作物的产量减少。

植物缺铁失绿是一个普遍的植物营养失调问题^[5],不同作物对缺铁敏感程度存在差异。与水稻和小麦等禾谷类作物相比,大豆对缺铁反映特别敏感^[6-7],特别是在干旱和半干旱地区的石灰性土壤中。大豆在苗期对缺铁尤为敏感,缺铁条件下大豆地上部幼叶脉间失绿,叶脉正常,失绿均匀,无斑,无畸形,随着时间推移,病叶最后干枯;地下部根系发育较差,生长不良,根短而细少,根瘤数量较少,进而导致减产;严重时植株早期枯萎和死亡^[8]。

铁元素在植物生长中起着非常重要的作用,是很多抗氧化酶不可或缺的组成部分或辅助因子,如过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽还原酶(GR)和含铁超氧化物歧化酶(Fe-SOD)^[15]。缺铁或铁过量都会导致植株氧化胁迫,铁还是固氮酶中钼蛋白和铁蛋白的组成部分,是豆科植物固氮所必需的。在高等植物的光合作用中,铁氧还蛋白是光合电子传递链上的重要物质,也是植物体许多基本代谢过程中的电子传递体,是电子传递发生的重要代谢过程^[9-10]。研究植物铁吸收机理在提高植物铁吸收率和抗低铁胁迫能力进而提高作物产量方面具有重要意义。目前,对模式作物的铁吸收生理机制研究报道已经很多^[11-12],缺铁对抗氧化防御体系的影响已经得到广泛关注^[13-14,16],但是对于大豆缺铁胁迫的生理机制还不明确,特别是在缺铁条件下大豆抗氧化酶研究,很难反映其普遍性。

石灰性土壤中,喷施叶面肥能改良大豆缺铁黄化,但成本高。因而从基因型角度,选育铁高效大豆品种,是解决石灰性土壤中大豆缺铁的关键措施。目前,针对不同品种间对铁吸收机理的研究鲜有报道。本研究以多个铁高效与铁低效大豆品种为试验材料,分析生理指标与缺铁表型之间的关系,旨在探讨不同铁利用效率大豆品种的抗氧化酶活性的差异,以为选育抗缺铁大豆品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2019 年在延边大学温室内进行,试验采用盆栽方法,供试材料为已被确定的 4 个铁高效大豆品种(‘吉育 99’、‘吉育 75’、‘长农 15’、‘长农 20’)和 4 个铁低效品种(‘吉农 27’、‘吉育 87’、‘吉育 92’、‘吉育 93’)。分别在塑料桶(顶部直径为 33 cm,底部直径为 23 cm,高度为 30 cm 的塑料桶)中装 15 kg 供试土壤,每盆播种 1 穴,每穴 2 粒,3 次重复。盆内石灰性土壤施大豆复合肥,按着干土中施用纯氮 0.2 g/kg,共施 17.6 g/盆,其中含 N 2.992 g, P₂O₅ 2.992 g, K₂O 2.992 g。石灰性土壤为缺铁胁迫,铁含量为 3.34 mg/kg。喷施微量元素叶面肥(喷施硼酸 16.1 mmol/L,硫酸锰 13.2 mmol/L,硫酸铜 0.625 mmol/L,硫酸锌 3.1 mmol/L,钼酸铵 1.02 mmol/L)。

1.2 试验设计

供试大豆在苗期和生殖生长前期受缺铁影响较大,测定时期为一叶期(V₁)、二叶期(V₂)、三叶期(V₃)、四叶期(V₄)、始花期(R₁)和盛花期(R₂)。取相同部位的新鲜叶片测定各项目,重复 3 次取平均值,在植物生长期间定时、定量浇水,常规栽培管理。取相同部位的新鲜叶片测定其叶绿素含量(SPAD 值)和抗氧化酶活性^[17-18]。

1.2.1 大豆叶片叶绿素含量测定

叶绿素含量是用 SPAD-502 型手持叶绿素仪(日本柯尼卡美能达公司)测定相同部位完全展开的新鲜叶片的 SPAD 值,取 3 次读数的平均值供分析。

1.2.2 大豆抗氧化酶活性测定

在大豆不同发育时期,分别取 0.5 g 新鲜叶片测定抗氧化酶活性。超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性测定采用氮蓝四唑法(NBT)^[19];过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法^[20];过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性测定采用紫外分光光度计法^[21-22]。

1.2.3 农艺学性状测定

在成熟期,分别随机选取 3 株大豆植株,分析单株荚重、株高、生物量、百粒重和籽粒含铁量等产量性状。

1.2.4 数据分析

用 Excel 2007 整理试验数据,SPSS 17.0 软件

进行单因素方差分析,并进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同铁效率大豆品种主要农艺性状及籽粒含铁量差异

由表1可知,不同铁效率大豆在石灰性土壤中,受到缺铁胁迫,导致大豆生长过程中无法从环境中获取能被吸收利用的 Fe^{2+} ,进而阻碍大豆器官的形成,最终影响大豆产量,如单株粒重、籽粒含铁量、株高和单株荚重等。铁高效品种株高、生物量、籽粒含

铁量、百粒重、单株荚重和单株粒重显著高于铁低效品种。铁高效大豆品种铁含量高于铁低效品种,在缺铁的石灰性土壤中,对铁的利用率高。在本试验中,铁高效品种籽粒含铁量高于铁低效品种,籽粒含铁量可以作为石灰性土壤中不同铁效率大豆的划分依据。根据本试验不同铁效率大豆品种的农艺性状及籽粒含铁量,将供试大豆品种对铁的利用率由高到低排序为‘吉育75’>‘吉育99’>‘长农15’>‘长农20’>‘吉育93’>‘吉育92’>‘吉育87’>‘吉农27’。

表1 石灰性土壤中8个大豆品种农艺性状及籽粒含铁量差异

Table 1 Differences in agronomic characters and iron content in grains of 8 soybean cultivars in calcareous soil

品种 Variety	株高/cm Plant height	生物量/g Biomass	单株荚重/g Individual weight	百粒重/g Hundred grain weight	籽粒含铁量/ (mg/kg) Iron content of grain	单株粒重/g Grain weight per plant
吉农 27	50.4±0.46 eE	10.17±0.10 dC	6.2±0.21 dD	4.77±0.15 eE	15.35±0.13 hH	2.30±0.15 dD
吉育 87	45.3±0.44 gG	7.93±0.59 eD	8.1±1.16 cC	6.00±0.1 dD	17.16±0.29 gG	2.40±0.20 dD
吉育 92	48.3±0.35 fF	10.73±0.68 dC	7.4±0.85 cdCD	5.63±0.15 dDE	19.40±0.98 fF	2.50±0.26 dCD
吉育 93	61.3±0.26 cC	6.32±0.29 fD	6.7±0.36 dCD	4.60±0.30 eE	22.53±0.36 eE	3.00±0.10 cC
吉育 99	62.9±0.42 bB	18.8±0.56 aA	12.5±0.83 bAB	15.73±0.47 bB	45.27±0.31 bB	6.50±0.31 bB
吉育 75	63.3±0.31 bB	16.13±0.85 bB	11.4±0.61 bB	15.63±0.38 bB	47.30±0.21 aA	6.30±0.25 bB
长农 15	69.8±0.61 aA	19.6±0.12 aA	13.9±0.70 aA	16.83±0.55 aA	38.81±0.41 dD	8.20±0.21 aA
长农 20	59.4±0.38 dD	14.42±0.13 cB	11.4±0.31 bB	12.00±0.82 cC	42.50±0.34 cC	6.50±0.15 bB

注:同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),同列数据后的不同大写字母表示差异显著($P<0.01$)。下同。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences ($P<0.05$), and different uppercase letters after data in the same column indicate significant differences ($P<0.01$). The same below.

2.2 石灰性土壤中不同铁效率大豆品种的叶绿素含量变化

由表2可知,在石灰性土壤中,通过6个时期的比较分析,铁高效品种叶片中叶绿素含量高于铁低效品种, $V_1\sim R_2$ 时期差异显著。随着生育时期的延长,不同铁效率大豆叶绿素含量呈现上升趋势, $V_1\sim V_4$ 时期铁高效品种叶绿素含量显著高于铁低效品种,在 R_1 时期,铁高效品种‘吉育99’与铁低效品种‘吉育92’叶绿素含量差异不显著($P>0.05$)。 R_2 时期,铁高效品种‘吉育75’,‘长农15’,‘长农20’与铁低效品种‘吉育92’叶绿素含量差异不显著($P>0.05$)。

2.3 石灰性土壤中不同铁效率大豆品种的抗氧化酶活性变化

由表3可知,在石灰性土壤中,不同铁效率大豆

叶片中SOD含量呈现先降低再升高的趋势,铁高效品种叶片中SOD酶活性显著高于铁低效品种。在 V_4 时期SOD酶活性最大,整体在 R_2 时期下降,但铁高效品种‘吉育75’酶活性上升,石灰性土壤苗期大豆植株SOD酶活性苗期反应一致,但进入生殖生长期(R_1 时期),铁高效品种‘长农20’、‘吉育99’和铁低效品种‘吉育87’、‘吉育93’、‘吉农27’、‘吉育93’呈现下降趋势。

由表4可知,在石灰性土壤中,铁高效大豆品种叶片的POD酶活性显著高于铁低效品种,随着生育时期的延长, V_2 、 R_1 时期呈现上升趋势,但铁高效品种‘吉育75’在 V_2 时期酶活性下降;在 R_1 时期,铁低效品种‘吉农27’与其他品种POD酶活性趋势不一致。通过6个时期的比较分析, R_1 时期POD酶活性呈上升趋势,含量最高,铁高效品种‘吉育75’

表 2 不同铁效率大豆品种不同发育时期叶绿素含量(SPAD)变化

Table 2 Changes of chlorophyll content (SPAD) in soybean varieties with different iron efficiency at different developmental stages

品种 Variety	一叶期 V ₁	二叶期 V ₂	三叶期 V ₃	四叶期 V ₄	始花期 R ₁	盛花期 R ₂
吉农 27	14.38 eD	12.56 eD	18.36 gG	25.81 efE	32.21 eD	33.12 cBC
吉育 87	12.84 fE	15.81 dC	21.37 fF	27.50 dD	28.15 fE	30.57 eD
吉育 92	16.10 dC	12.88 eD	25.30 dD	26.20 eE	33.60 cdC	35.30 aA
吉育 93	12.63 fE	13.39 eD	23.47 eE	25.27 fE	33.25 dCD	31.98 dC
吉育 99	19.20 cB	31.43 bcB	29.88 bBC	33.80 cC	34.28 cC	33.87 bcAB
吉育 75	20.45 bAB	34.44 aA	33.31 aA	37.75 aA	35.63 bB	34.65 abA
长农 15	20.93 abAB	30.99 cB	28.79 cC	38.36 aA	33.23 dCD	34.46 abAB
长农 20	21.52 aA	32.10 bB	30.09 bB	35.74 bB	37.98 aA	35.16 aA

表 3 不同铁效率大豆品种不同发育时期超氧化物歧化酶(SOD)活性变化

Table 3 Changes of superoxide dismutase (SOD) activity in soybean varieties with different iron efficiency at different developmental stages

品种 Variety	一叶期 V ₁	二叶期 V ₂	三叶期 V ₃	四叶期 V ₄	始花期 R ₁	盛花期 R ₂
吉农 27	274.72 eE	213.99 cB	269.76 dC	351.35 eEF	228.57 fF	485.91 eC
吉育 87	329.67 dD	210.08 cB	272.30 dC	365.59 eE	308.13 eE	401.51 gE
吉育 92	352.27 dC	228.30 cB	270.14 dC	343.19 efEF	305.08 eE	507.35 dC
吉育 93	264.36 eE	233.76 cB	283.72 dC	323.52 fF	317.46 eE	438.46 fD
吉育 99	432.09 cC	290.19 bA	357.14 bcB	491.52 dD	476.19 cC	731.54 aA
吉育 75	425.00 cC	302.42 abA	368.63 bB	594.44 cC	622.45 aA	721.85 abA
长农 15	493.67 bB	322.95 aA	343.87 cB	741.75 aA	412.69 dD	702.80 bA
长农 20	623.65 aA	318.99 aA	425.78 aA	646.73 bB	565.44 bB	657.71 cB

表 4 不同铁效率大豆品种不同发育时期过氧化物酶(POD)活性变化

Table 4 Changes of peroxidase (POD) activity in soybean varieties with different iron efficiency at different developmental stages

品种 Variety	一叶期 V ₁	二叶期 V ₂	三叶期 V ₃	四叶期 V ₄	始花期 R ₁	盛花期 R ₂
吉农 27	8.12 bcAB	8.90 abcA	8.6 abcAB	7.32 aA	7.18 dC	6.29 cA
吉育 87	6.37 cB	7.83 cA	6.8b cB	6.74 aA	10.02 cdBC	6.68 bcA
吉育 92	8.52 bcAB	9.11 abcA	9.09 abAB	7.44 aA	12.33 bcAB	8.19 abcA
吉育 93	8.18 bcAB	8.32 cA	6.12 cB	6.02 aA	9.54 cdBC	9.08 abcA
吉育 99	9.00 abcAB	9.94 abcA	8.63 abcAB	7.95 aA	11.49 bcBC	9.55 abA
吉育 75	10.35 abAB	8.67 bcA	7.72 bcAB	6.81 aA	16.04 aA	8.16 abcA
长农 15	10.53 abA	11.49 abA	8.55 abcAB	7.80 aA	11.73 bcAB	10.50 aA
长农 20	11.66 aA	11.72 aA	10.64 aA	7.80 aA	13.7 abAB	7.53 abcA

酶活性显著高于其他品种。

由表 5 可知,在石灰性土壤中,不同铁效率大豆 CAT 活性呈现先升高后下降的趋势,铁高效品种 CAT 酶活性显著高于铁低效品种;V₂ 时期铁低效品种 CAT 酶活性上升,铁高效品种‘长农 20’、‘长农 15’、‘吉育 75’的 CAT 酶活性下降,‘吉育 99’酶

活性上升;V₃ 时期,铁高效品种‘长农 15’酶活性下降,铁低效品种‘吉育 87’与‘吉农 27’酶活性下降,与其他大豆品种反应不一致;V₄、R₂ 时期 CAT 酶活性,呈现上升趋势,V₄ 时 CAT 酶活性高于其他生育时期,‘长农 15’在铁高效品种中 CAT 酶活性最高,‘吉育 93’在铁低效品种中 CAT 酶活性最高。

表 5 不同铁效率大豆品种不同发育时期过氧化氢酶(CAT)活性变化

Table 5 Change of catalase (CAT) activity in soybean varieties with different iron efficiency at different developmental stages

品种 Variety	一叶期 V ₁	二叶期 V ₂	三叶期 V ₃	四叶期 V ₄	始花期 R ₁	盛花期 R ₂
吉农 27	151.65 dD	186.71 dCD	169.07 dD	315.68 cdBCD	160.57 dC	167.35 bC
吉育 87	152.58 dD	185.74 dCD	174.09 dD	280.57 efDE	153.58 dC	160.3 bC
吉育 92	148.80 dD	173.21 dD	245.20 cC	259.10 fE	140.79 dC	153.51 bC
吉育 93	162.05 dD	179.18 dD	225.05 cC	291.21 deCDE	141.96 dC	150.66 bC
吉育 99	226.53 cC	261.90 bB	318.39 bB	351.36 bB	214.64 cB	173.03 bBC
吉育 75	261.00 bB	217.11 cC	399.97 aA	327.09 bcBC	244.06 bB	216.99 aA
长农 15	318.70 aA	298.87 aA	307.63 bB	415.15 aA	224.5 bcB	205.76 aAB
长农 20	320.59 aA	284.49 abAB	388.82 aA	339.48 bcB	324.17 aA	207.68 aAB

3 讨论与结论

活性氧在植物体内的清除由保护酶和抗氧化物质来完成。保护酶主要是超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)等。植物在缺铁胁迫时,植物通过一系列生理过程变化和植株形态变化来躲避或减轻胁迫对自身的伤害。本研究结果表明,石灰性土壤中,大豆植株遭受低铁胁迫,也受到高 pH 的协同作用,石灰性土壤中低铁大豆株高、生物量、单株荚重和百粒重显著低于铁高效品种。Iturbe 等^[23]研究发现,豌豆品种在低铁胁迫下,导致体内活性氧增加,叶片的叶绿素含量下降。本研究发现,在 V₂ 与 V₃ 时期,铁高效与铁低效大豆品种叶片叶绿素含量差异显著,铁低效品种呈上升趋势;铁高效品种在 V₁~R₂ 时期叶片叶绿素含量显著高于铁低效品种,说明在石灰性土壤中,铁高效大豆品种耐受低铁胁迫的能力强于铁低效品种。

在本研究中,铁高效大豆品种叶片的氧化酶活性和叶绿素含量显著高于铁低效品种,由此推测在石灰性土壤中,铁低效大豆由于不能激活铁吸收机

制,将遭受更严重的氧化损伤;而铁高效大豆品种由于可产生一系列抗氧化生理反应,使 Fe³⁺ 转化为 Fe²⁺ 可被吸收利用,能适当激活 ROS 清除酶,导致氧化应激反应降低。袁庆华等^[23] 研究表明,缺铁胁迫下,紫花苜蓿叶片 SOD 先升高再降低;Yadavalli 等^[25] 研究表明,在缺铁胁迫下,水稻叶片 SOD 活性显著增加。石灰性土壤中由于缺铁胁迫,不同铁效率大豆品种叶片的 SOD 酶活性均先降低后上升,随着生育时期的延长,铁高效大豆植株中 SOD 酶活性增加,原因可能是由于不同作物对缺铁反应的不同。徐根娣等^[26] 研究发现,铁胁迫条件下大豆 POD 酶活性增加,与本试验研究结果一致。在石灰性土壤中,缺铁胁迫使大豆植株的抗氧化酶活性增强,使细胞免受外界损伤;不同铁效率大豆品种间,变化趋势不一致,说明在缺铁的石灰性土壤中,铁高效品种耐受性强于铁低效品种,在缺铁的石灰性土壤中高铁的高效利用率也就意味着高产。

参考文献 References

[1] Froelich D M, Fehr W R. Agronomic performance of

- soybeans with differing levels of iron deficiency chlorosis on calcareous soil[J]. *Crop Science*, 1981, 21(3): 438-441
- [2] Aksoy, Emre, Maqbool, Amir, Tindas, lknur, Caliskan, Sevgi. Soybean: A new frontier in understanding the iron deficiency tolerance mechanisms in plants[J]. *Plant and Soil*, 2017, 141(1): 333-346
- [3] Vose P B, Roriz M, Carvalho S M. Iron nutrition in plants: A world overview[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1982, 5(4-7): 233-249
- [4] Roriz M, Carvalho S M P, Vasconcelos M W. High relative air humidity influences mineral accumulation and growth in iron deficient soybean plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5(5): 726
- [5] Vasconcelos M W, Grusak M A. Morpho-physiological parameters affecting iron deficiency chlorosis in soybean (*Glycine max* L)[J]. *Plant & Soil*, 2013, 18(2): 215-222
- [6] 张国平, 马国瑞. 大豆铁营养的遗传和铁高效品种的选育[J]. *大豆科学*, 1996(2): 159-163
- [7] Zhang G P, MA G R. Genetics of iron nutrition in soybean and Breeding of iron efficient varieties[J]. *Soybean Science*, 1996(2): 159-163.
- [8] Davis J M, Auten R L. Maturation of the antioxidant system and the effects on preterm birth[J]. *Semin Fetal Neonatal Med*, 2010, 15(4): 191-195
- [9] 郭朝阳. 大豆缺铁症的预防与转化措施[J]. *小康生活*, 2002, 7(7): 15-15
Guo C Y. Prevention and transformation of iron deficiency in soybean[J]. *Xiaokang Life*, 2002, 7(7): 15-15 (in Chinese)
- [10] Cianzio S R D, Fehr W R, Anderson I C. Genotypic evaluation for iron deficiency chlorosis in soybeans by visual scores and chlorophyll concentration[J]. *Crop Science*, 1979, 19(5): 644-646
- [11] 李利敏, 吴良欢, 马国瑞. 植物吸收铁机理及其相关基因研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, 6(4): 994-999
Li L M, Wu L H, Ma G R. Research progress on iron absorption mechanism and related genes in plants[J]. *Soil Bulletin*, 2010, 6(4): 994-999 (in Chinese)
- [12] 张进, 吴良欢, 孔向军. 铁锌混合肥喷施对豌豆子粒铁、锌、可溶性糖和维生素 C 含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 245-249
Zhang J, Wu L H, Kong X J. Effects of Fe and Zn on iron, Zn, soluble sugar and Vitamin C content in pea seed sprays[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2006, 12(2): 245-249 (in Chinese)
- [13] Nozoye T, Nagasaka S, Kobayashi T. Phytosiderophore efflux transporters are crucial for iron acquisition in graminaceous plants[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2011, 286(7): 5446-5454
- [14] Bashir K, Inoue H, Nagasaka S. Cloning and characterization of deoxymugineic acidsynthase genes from graminaceous plants[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2006, 281(43): 32395
- [15] Curie C, Panaviene Z, Loulergue C. Maize yellow stripe1 encodes a membrane protein directly involved in Fe(III) uptake[J]. *Nature*, 2001, 409(6818): 346-349
- [16] Weiss M G. Inheritance and physiology of efficiency in iron utilization in soybeans[J]. *Genetics*, 1943, 28(3): 253-268
- [17] Cianzio S R, Fehr W R. Genetic control of iron deficiency chlorosis in soybeans[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1980, 54(22): 142-151
- [18] 张伟, 邱强, 赵婧, 韩喜国, 张伟龙, 徐长洪, 张鸣浩, 闫晓艳. 基于大豆叶绿素含量和生物产量积累的不同铁效率品种鉴定[J]. *东北农业科学*, 2016, 4(4): 8-13
Zhang W, Qiu Q, Zhao J, Han X G, Zhang W L, Xu C H, Zhang M H, Yan X Y. Identification of different iron efficiency varieties based on chlorophyll content and biological yield accumulation of soybean [J]. *Northeast Agricultural Science*, 2016, 4(4): 8-13 (in Chinese)
- [19] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999
Tang Z C. *Experimental Guide of Modern Plant Physiology* [M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [20] 张宪政. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994
Zhang Z X. *Experimental Techniques in Plant Physiology* [M]. Shenyang: Liaoning Science And Technology Press, 1994 (in Chinese)
- [21] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 北京农业出版社, 2000
Zou Q. *Experimental Guidance of Plant Physiology* [M]. Beijing: Beijing Agricultural Press, 2000 (in Chinese)
- [22] 汤绍虎, 罗冲. 植物生理学教程[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2012
Tang S H, Luo C. *Course of Plant Physiology* [M]. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2012 (in Chinese)
- [23] Iturbe O I, Moran J F, Arrese I C, Gogorcena Y, Klucas R V, Becana M. Activated oxygen and antioxidant defences in iron-deficient pea plants[J]. *Plant Cell and Environment*, 1995, 18(4): 421-429
- [24] 袁庆华, 桂枝, 张文淑. 苜蓿抗感褐斑病品种内超氧化物歧化酶、过氧化物酶和多酚氧化酶活性的比较[J]. *草业学报*, 2020, 11(2): 100-104
Yuan Q H, Gui Z, Zhang W S. Comparison of the activities of SOD, POD and PPO within alfalfa cultivars resistant and susceptible to alfalfa common leaf [J]. *Acta Pratacultural Science*, 2002, 11(2): 100-104 (in Chinese)
- [25] Yadavalli V, Neelam S, Rao A S V C. Differential degradation of photosystem I subunits under iron deficiency in rice[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(8): 753-759
- [26] 徐根娣, 刘鹏, 杨维丰. 铁胁迫对大豆 POD 和 EST 同工酶的影响[J]. *浙江农业学报*, 2008, 6(6): 457-460
Xu G D, Liu P, Yang W F. Effects of iron stress on POD and EST isoenzymes of soybean [J]. *Journal of Zhejiang Agriculture*, 2008, 6(6): 457-460 (in Chinese)