

半根供铁对杜梨幼苗叶片光合能力的影响

武心怡¹, 郭献平², 王苏珂³, 王东升^{2*}, 吴中营², 吕珍珍², 张中印⁴, 杜开书⁴

(¹安徽农业大学园艺学院, 合肥 230036; ²河南省农业科学院园艺研究所, 郑州 450002; ³中国农业科学院郑州果树研究所, 郑州 450009; ⁴河南科技学院资源与环境学院, 河南新乡 453003)

摘要:【目的】探究半根供铁条件下对杜梨幼苗叶片光合能力的影响。【方法】以1 a(年)生水培杜梨苗为材料, 测定缺铁、半根供铁、全根供铁3种处理杜梨叶片叶绿素含量、有效铁含量、叶绿素荧光参数的变化。【结果】半根供铁条件下杜梨叶片叶绿素含量比缺铁条件下提高55.5%, 有效铁含量提高98.5%。半根供铁杜梨叶片初始荧光(F_0)比缺铁条件下显著降低、原初光能转化效率(F_v/F_m)、最大光化学效率(Φ_{PSII})比缺铁条件下显著增高, 3个参数均与全根供铁无显著差异。【结论】半根供铁能使杜梨叶片保持正常的光合能力, 为减施成本高的螯合铁肥用量提供了理论依据。

关键词: 杜梨; 半根供铁; 叶绿素荧光

中图分类号: S661.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2018)Suppl.-125-06

Effect of iron-supply to the half root on chlorophyll fluorescence parameters of *Pyrus betulaefolia* seedlings

WU Xinyi¹, GUO Xianping², WANG Suke³, WANG Dongsheng^{2*}, WU Zhongying², LÜ Zhenzhen², ZHANG Zhongyin⁴, DU Kaishu⁴

(¹College of Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China; ²Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China, ³Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450009, Henan, China; ⁴College of Resources and Environment, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 45003, Henan, China)

Abstract: 【Objective】To explore the changes of chlorophyll content, active iron and chlorophyll fluorescence parameters of *Pyrus betulaefolia* seedlings under iron-supply to the half root system. 【Methods】The chlorophyll content, active iron content and chlorophyll fluorescence parameters were measured on the leaves of 1-year-old *Pyrus betulaefolia* seedlings treated with iron deficiency, iron supply to the half-root and iron supply to the whole root. 【Results】Compared with the iron deficiency condition, the chlorophyll content and active iron content in the leaves of *Pyrus betulaefolia* increased by 55.5% and 98.5%, respectively with the treatment of iron-supply to the half root. F_0 was significantly lower and F_v/F_m and Φ_{PSII} were significantly higher with iron-supply to the half root than those with iron deficiency. There were no significant differences in the three parameters between iron-supply to the half root and to the whole root. 【Conclusion】Under the condition of iron-supply to the half root, the normal photosynthetic capacity of *Pyrus betulaefolia* leaves can be maintained, which provides a theoretical basis for reducing the cost of applying chelated iron fertilizer.

Key words: *Pyrus betulaefolia*; Half root iron-supply; Chlorophyll fluorescence

梨(*Pyrus* spp.)属于蔷薇科(Rosaceae), 梨亚科(Pomoideae), 梨属(*Pyrus*)。梨水分充足, 富含多种维生素, 具有较高食用价值。我国是梨栽植大国, 据

统计, 我国2012年的梨树栽培占世界梨树栽培面积的70.0%^[1]。梨树通过嫁接繁育, 优良的砧木对于嫁接苗的生长有着极其重要的作用。梨树中杜梨属深

收稿日期: 2018-11-05

接受日期: 2018-12-18

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目(162300410147); 国家梨产业技术体系项目(CARS-28-38); 河南省农业科学院科研发展专项资金(20188106); 河南省科技攻关项目(182102110059); 河南省农业科学院自主创新专项基金(2018ZC28)

作者简介: 武心怡, 女, 在读硕士研究生, 主要从事梨树栽培生理与分子生物学研究。Tel: 18055425507, E-mail: 853077694@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: wdse66@126.com

根性树种,在贫瘠干旱地区表现优异,因而我国华北、西北及华东等地区的梨树生产常用杜梨作为砧木^[2]。

在园艺生产中铁元素是一种重要的微量营养元素,与果树的生长发育密切相关^[3],通常植物缺铁时叶片中的叶绿素含量下降,叶片黄化,同时缺铁对果实品质也有影响^[4]。通常北方的石灰性土壤、盐碱性土壤易发生缺铁现象^[5-7],许多果树特别是梨树,经常会出现缺铁和黄化,树势弱,抗逆性差,死亡早,这给梨产业带来重大经济损失^[8]。从植物对铁元素利用的分子角度出发,目前植物对铁元素的吸收机制已有了相关文献记载。Rasmheld等^[9]1986年提出了高等植物在长期适应缺铁胁迫过程中所形成的2种适应性机制。机制I中,植物在进行铁吸收时,首先通过质膜上的 H^+ -ATPase向根际分泌 H^+ ,酸化根际土壤,增加土壤中 Fe^{3+} 的溶解性。在铁进入根系细胞之前,植物会先通过铁氧还原酶(FRO)将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,之后再通过细胞膜上的铁转运蛋白IRT进入细胞。机制II中,植物铁吸收的关键物质是麦根酸类植物铁载体MAs。这类植物发生缺铁胁迫时会分泌MAs,其对 Fe^{3+} 亲和力强,能形成稳定的三价铁螯合物 Fe^{3+} -MAs,然后被运入植物体内^[10]。果树利用铁元素属于机制I型植物,因而杜梨根部是植株吸收铁元素的主要部位,由于铁元素在植物体内不易移动,故缺铁常在幼嫩部位表现黄化,这与生产上出现的梨树幼叶黄化的缺铁情况一致。

为保证梨树正常的生长发育,防止缺铁黄化影响生产,在实际的栽培过程中常施用铁肥以满足梨

树对铁元素的吸收,过去常施用无机铁肥,但施用盐碱地的无机铁肥不是经过溶淋,就是与土壤中的物质结合变成不易被利用的铁元素^[11]。近些年,开始施用螯合铁肥以供梨树铁元素的吸收利用,但市面上各种螯合铁肥的价格普遍较昂贵,故未能大规模施用^[12]。

在实际生产中叶绿素荧光参数对植物的缺铁反应非常灵敏,是衡量叶片光合作用能力的一个重要指标,在生产实践中具有一定的参考意义。笔者以1 a(年)生水培杜梨苗为材料,通过缺铁、半根供铁、全根供铁3种处理,研究杜梨叶片叶绿素含量、有效铁含量、叶绿素荧光参数的变化。探究半根供铁对杜梨叶片光合能力的影响,为石灰性土壤梨树减施螯合铁肥用量提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

于2017年2月份准备一批充实饱满且大小一致的杜梨种子进行层积处理,2017年3月份种子层积完成后,播种至河南现代农业研究开发基地梨示范园温室营养钵内。

1.2 试验设计与处理方法

杜梨苗生长至6~8枚真叶时,选择高度均一的幼苗15株,分成缺铁(-Fe)、半根供铁(1/2+Fe)和全根供铁CK(+Fe)3个处理,每个处理5个重复。首先将每株幼苗根系进行修剪,分成相等两份骑跨在塑料板隔开的不透光塑料培养池中(图1),向6个池子中加入Hoagland全营养液(表1),营养液初始pH值



从左至右:缺铁、半根供铁、全根供铁。

From the left to the right: iron deficiency, half-root iron supply and total root iron supply.

图 1 不同供铁处理

Fig. 1 Different iron supply treatments

用 HCl 或 NaOH 调至 6.3, 每个池子每隔 45 min 通 15 min 氧气, 营养液每周更换 1 次预培养 1 个月。

1 个月后将开始进行缺铁、半根供铁和全根供铁处理, 缺铁处理在池子加不含 Fe-EDTA Hoagland 营

表 1 Hoagland 营养液
Table 1 Hoagland nutrient solution

化合物 Compounds	相对分子质量 Relative molecular mass	储备液浓度 Stock solution concentration/(mmol·L ⁻¹)	储备液质量浓度 Stock solution concentration/(g·L ⁻¹)	每升最终溶液中储备液体积 The volume of stock solution per liter of final solution/mL	试剂的最终浓度 The final concentration of the reagent/(mol·L ⁻¹)
KNO ₃	101.10	1 000	101.100	6.0	6.0×10 ⁻³
Ca(NO ₃) ₂ ·H ₂ O	236.16	1 000	236.160	4.0	4.0×10 ⁻³
NH ₄ H ₂ PO ₄	115.08	1 000	115.080	2.0	2.0×10 ⁻³
MgSO ₄ ·7H ₂ O	246.16	1 000	246.160	1.0	1.0×10 ⁻³
KCl	74.55	25	1.864	1.0	5.0×10 ⁻⁵
H ₂ BO ₃	61.83	12.5	0.773	1.0	2.5×10 ⁻⁵
MnSO ₄ ·H ₂ O	169.01	1.0	0.169	1.0	2.0×10 ⁻⁶
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	287.54	1.0	0.288	2.0	2.0×10 ⁻⁶
CuSO ₄ ·5H ₂ O	249.68	0.25	0.062	2.0	5.0×10 ⁻⁷
H ₂ MoO ₄ (85%)	161.97	0.25	0.040	2.0	5.0×10 ⁻⁷
MoO ₃	367.15	100	36.715	1.0	1.0×10 ⁻⁴
Fe-EDTA	421.10	100	42.110	1.0	1.0×10 ⁻⁴

养液, 半根供铁处理在一侧池子加全营养液, 一侧加不含 Fe-EDTA 的 Hoagland 营养液, 全根供铁两侧均加全营养液, 处理 49 d, 营养液每 7 d 更换 1 次。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶绿素含量测定 选择处理后长出的成熟叶片, 利用 SPAD-520 叶绿素仪测定叶绿素含量。

1.3.2 有效铁含量测定 选择处理后长出的成熟叶片, 采用酸消解-ICP 法测定有效铁含量^[13]。

1.3.3 叶绿素荧光参数测定 每个处理选择与叶绿素含量平均值接近的 6 枚叶片进行标记, 利用 FMS-1 荧光仪(英国 Hansatech 公司)测定荧光参数。包括初始荧光产量(F_0)、最大荧光产量(F_m)、稳态荧光产量(F_s)、光适应下最大荧光产量(F_m')、光适应下最小荧光产量(F_0')。计算光系统 II (PS II) 最大光化学效率(F_v/F_m): $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$, 实际光化学效率($\Phi_{PS II}$): $\Phi_{PS II} = (F_m' - F_s)/F_m'$, 非光化学猝灭系数(NPQ): $NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$, PS II 吸收光能用于光化学反应的相对份额(P): $P = F_v'/F_m' \times qP$ [qP 为光化学猝灭系数, $qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_0')$], 用于天线热耗散的相对份额(D): $D = 1 - F_v'/F_m'$, 用于反应中心(P680)耗散的相对份额(Ex): $Ex = F_v'/F_m' \times (1 - qP)$, 以及光系统 I (PS I) 激发能分配系数(α): $\alpha = f/(1+f)$, f 为 PS II 反应中心开放程度, $f = (F_m - F_s)/(F_m - F_0)$, PS II 激发能分配系数(β): $\beta = 1/(1+f)$, PS I 与 PS II 间激发能分配不平衡性($\beta/\alpha - 1$): $\beta/\alpha - 1 = (1 - f)/f$ ^[14]。

1.4 数据分析

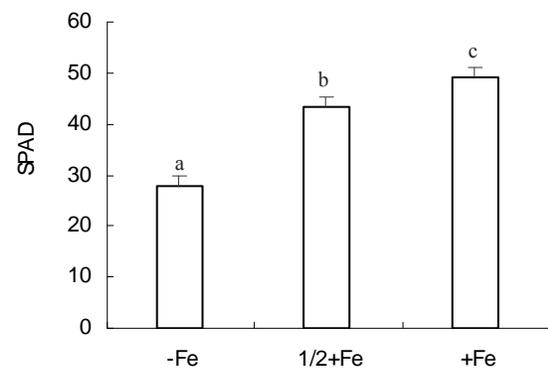
用 Origin 8.5 软件绘图, 采用 SPSS13.0 统计软

件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同供铁条件对杜梨苗叶绿素含量的影响

处理 7 周后, 随着杜梨苗根系与铁元素接触量的增加, 杜梨叶片叶绿素含量呈增加趋势, 且不同供铁条件相互间差异显著(图 2)。对照中叶绿素含量比半根供铁处理增加了 13.6%, 比缺铁处理增加了 49%。半根供铁处理杜梨苗叶片叶绿素含量比缺铁处理增加了 55.5%, 测定后期缺铁处理与半根供铁处理长出的杜梨苗叶片都存在黄化现象, 缺铁处理



不同小写字母表示不同处理间差异显著($\alpha = 0.05$), 下同。

Different small letters indicated significant difference at $\alpha = 0.05$. The same below.

图 2 不同供铁条件对杜梨苗叶绿素相对含量(SPAD)的影响

Fig.2 The chlorophyll relative content of the leaves of *Pyrus betulaefolia* under different iron supply treatments

杜梨苗叶片黄化较严重,此时杜梨光合机构受到严重的破坏,不能进行光合作用。叶绿素含量下降可能是缺铁影响叶绿体功能的一个重要原因,而半根供铁相比对照也会造成叶片叶绿素含量显著下降。

2.2 半根条件下不同铁处理对杜梨苗叶片有效铁含量的影响

采用酸消解-ICP法测定杜梨苗叶片有效铁含量,结果如图3所示,随着杜梨苗根系与铁元素接触量的增加,杜梨苗叶片有效铁含量随之增加,且不同铁处理间差异显著。对照叶片中有效铁含量相比半根供铁处理增加41.6%,对照叶片中有效铁含量相比缺铁处理增加99.40%。半根供铁处理叶片中有效铁含量相比缺铁处理增加98.5%。半根供铁处理相比缺铁处理其叶片有效铁含量显著增加,说明缺铁可导致叶片中的有效铁显著减少,半根供铁仍然能够显著减少叶片中的有效铁含量。

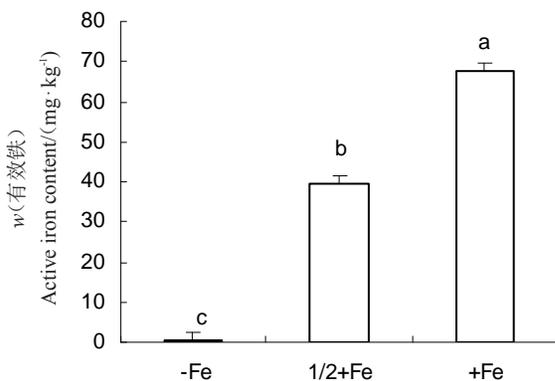


图3 不同供铁条件下杜梨苗叶片有效铁含量的影响

Fig. 3 The active iron content of the leaves of *Pyrus betulaefolia* under different iron supply treatments

2.3 不同供铁条件对杜梨苗叶绿素荧光参数的影响

随着杜梨苗根系与铁元素接触量的增加, F_o' 、 F_m' 、 F_s 逐渐减小,但不同处理间无显著差异。 F_o 随着杜梨根系与铁元素接触量的增加而减少,对照与半根供铁处理无显著差异,缺铁条件下与其他2种处理 F_o 的值差异显著。对照与半根供铁 F_m 值高于缺铁处理但无显著差异。 $\Phi PS II$ 、 F_v/F_m 、 qP 、 P 、 f 、 α 的值随着杜梨根系与铁元素接触量的增加而增加,对照与半根供铁间无显著差异,缺铁与对照和半根供铁间的值差异显著。 NPQ 在半根供铁处理中最高,对照次之,缺铁中最低,且相互间无显著差异。 Ex 、 β 、

$\beta/\alpha-1$ 的值随着杜梨根系与铁元素接触量的增加而减少,半根缺铁处理与对照间无显著差异,缺铁与对照和半根供铁处理间存在显著差异。 D 在半根供铁处理中最高,对照中次之,缺铁处理中最小,且相互间无显著差异(表2)。

表2 不同供铁条件下杜梨苗叶片叶绿素荧光参数

Table 2 The chlorophyll fluorescence parameters of the leaves of *Pyrus betulaefolia* under different iron supply treatments

参数 Parameter	-Fe	1/2+Fe	+Fe
F_o'	260.0 a	255.3 a	250.4 a
F_m'	889.9 a	822.3 a	819.6 a
F_s	631.0 a	490.0 b	451.0 b
F_o	273.2 b	240.5 a	224.8 a
F_m	1544.6 a	1637.2 a	1626.0 a
$\Phi PS II$	0.291 b	0.408 a	0.449 a
F_v/F_m	0.822 b	0.853 a	0.861 a
NPQ	0.754 a	1.047 a	0.989 a
qP	0.415 b	0.600 a	0.648 a
P	0.291 b	0.409 a	0.449 a
D	0.296 a	0.314 a	0.306 a
Ex	0.413 a	0.277 b	0.245 b
f	0.718 b	0.820 a	0.838 a
α	0.417 b	0.450 a	0.456 a
β	0.583 a	0.550 b	0.544 b
$\beta/\alpha-1$	0.403 a	0.234 b	0.193 b

3 讨 论

研究结果表明,当杜梨根系在减少接触铁元素时,杜梨叶片叶绿素含量与有效铁含量随之下降,且相互间差异显著,叶片叶绿素含量与有效铁含量具有一定的相关性^[15],铁元素是植物生长发育过程中不可或缺的元素,影响着植物叶片内的叶绿素合成,而叶绿素作为光合色素则直接影响着植物的光合作用。铁元素在果树光化学反应中起着重要作用,果树体内占90%以上的铁存在于光合细胞器—叶绿体中^[16],叶绿体是制造光合产物的最主要单位,光系统 I (PSI)是其对外界环境变化最敏感的部位之一,缺铁影响叶绿体结构的合成,造成电子传递结构破坏。此外缺铁会引起叶片铁含量显著降低,因而有效铁含量高的叶片具有较好的光合能力,故生产上常以叶片叶绿素含量与有效铁含量作为衡量叶片光合能力的指标。相比缺铁处理,半根供铁处理下的叶绿素含量和有效铁含量相比缺铁处理显著增加。

叶绿素荧光参数是评估植物光合器官是否受损的良好指标,而 F_v/F_m 被认为是反映光抑制程度的可靠指标,它们分别表示光反应中心 PSI 的潜在活性

和原初光能转化效率。在叶绿素荧光参数中 F_0 为固定荧光,初始荧光,也称基础荧光,0水平荧光。是光系统II(PS II)反应中心处于完全开放时的荧光产量,它与叶片叶绿素浓度有关,增加时表明PS II反应中心受到一定程度的破坏^[7]。本次研究结果中半根供铁与对照(全根供铁)相比,叶绿素荧光参数 F_0 无显著差异,故PS II反应中心没有受到破坏,此时叶绿体结构完整。叶绿素荧光参数 F_v/F_m 为PS II最大光化学量子产量,反映PS II反应中心光能转换效率或最大PS II的光能转换效率。非胁迫条件下该参数的变化极小,不受物种和生长条件的影响,胁迫条件下该参数明显下降。缺铁条件下会造成光合色素含量下降直接影响着叶绿体对光能的吸收、传递及在PS I、PS II之间的分配,进而使三磷酸腺苷(ATP)和还原辅酶II(NADPH)的生成量减少。因此,严重缺铁导致小麦叶片的叶绿素荧光参数 $\Phi_{PS II}$, qP 与 F_v/F_m 降低^[18]。半根供铁条件下, F_v/F_m 该参数的变化不显著,杜梨植株叶片内铁含量满足基本生理生化过程,PS II反应中心没有受到胁迫,不影响其叶片光合能力。此外光系统II反应中心的开放程度在某种程度上由光化学猝灭(qP)来显示,使光系统II反应中心处于“开放”状态就要保持高效的荧光猝灭^[9]。本研究中杜梨根系与铁元素接触量越大其 $\Phi_{PS II}$, qP 与 F_v/F_m 值越大,即当杜梨根系表面接触的铁元素越多其PSII的光化学活性及能量转化率越高,且全根供铁和半根供铁处理的杜梨苗叶片的叶绿素 $\Phi_{PS II}$, qP 与 F_v/F_m 值无显著差异。综上所述,半根供铁与全根供铁杜梨苗的叶片叶绿素荧光值差异不显著,半根供铁处理未影响其光合能力。

4 结 论

全根供铁条件下杜梨叶片叶绿素含量比缺铁条件下提高35.7%,有效铁含量提高99.4%,存在显著差异;与全根供铁相比,半根供铁杜梨叶片叶绿素含量低12%、有效铁含量低41.6%,存在显著差异。半根供铁杜梨叶片初始荧光(F_0)比缺铁条件下显著降低、原初光能转化效率(F_v/F_m)、最大光化学效率($\Phi_{PS II}$)比缺铁条件下显著增高,3个参数均与全根供铁无显著差异。因此,半根供铁能使杜梨叶片保持正常的光合能力,为在石灰性土壤中减施成本高的螯合铁肥用量提供了理论依据。

参考文献 References:

- [1] 李志霞,聂继云,李静,李海飞,徐国锋,闫震,毋永龙,匡立学. 梨产业发展分析与建议[J]. 中国南方果树, 2014, 43(5):144-147.
LI Zhixia, NIE Jiyun, LI Jing, LI Haifei, XU Guofeng, YAN Zhen, WU Yonglong, KUANG Lixue. Analysis and suggestions on pear industry development[J]. Fruit Tree of South China, 2014, 43(5):144-147.
- [2] 张绍铃. 梨学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013:170-171.
ZHANG Shaoling. Pear learning [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2013:170-171.
- [3] 章镇,韩振海. 果树分子生物学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012: 153.
ZHANG Zhen, HAN Zhenhai. Molecular biology of fruit trees [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2012: 153.
- [4] 王爱斌. 杜梨缺铁胁迫的生理响应及耐缺铁性资源筛选[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2015.
WANG Aibin. Physiological response to iron deficiency stress and screening of iron deficiency tolerance resources in duli[D]. Shijiazhuang: Hebei agricultural university, 2015.
- [5] 张朝红,王跃进. 缺铁黄化梨树根际土壤特性的研究[J]. 西北农业学报, 2001, 10(4): 96-99.
ZHANG Zhaohong, WANG Yuejin. Study on rhizosphere soil characteristics of pear trees with iron deficiency and yellowing [J]. Journal of Northwest Agriculture, 2001, 10(4): 96-99.
- [6] 周厚基,全月澳. 苹果树缺铁失绿研究的进展 II:铁逆时树体形态及生理生化作用的影响[J]. 中国农业科学, 1987, 21(4): 46-50.
ZHOU Houji, TONG Yue'ao. Full month Australian research progress of green apple tree iron deficiency II: iron time-inverse tree morphological and physiological and biochemical effects [J]. Chinese Agricultural Science, 1987, 21(4):46-50.
- [7] 张朝红,王跃进,李琰,周子富. 缺铁和矫治缺铁对梨斜叶片结构的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(6): 1489-1493.
ZHANG Zhaohong, WANG Yuejin, LI Yan, ZHOU Zifu. Effects of iron deficiency and its correction on the structure of oblique pear leaves [J]. Acta Botanica Boreali-occidental, 2002, 22(6): 1489-1493.
- [8] 刘泽军,何天明. 库尔勒香梨在南疆钙质土壤上叶片黄化的生理机制研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
LIU Zejun, HE Tianming. Physiological mechanism and mechanism of leaf yellowing of Korla fragrant pear on calcareous soil in southern xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.
- [9] RSMHELD V, MARSCHNER H. Evidence for a specific uptake system for iron phytosiderophores in roots of grasses[J]. Plant Physiology, 1986, 80(1): 175-180.
- [10] 郭献平,吴中营,王东升,张四普,牛佳佳. 杜梨根系铁吸收关

- 键基因生物信息学分析及缺铁胁迫对其表达的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(8):96-101.
- GUO Xianping, WU Zhongying, WANG Dongsheng, ZHANG Sipu, NIU Jiajia. *Pyrus betulaefolia* Bioinformatics analysis of key genes for iron uptake in roots and the effect of iron deficiency stress on their expression [J]. Henan Agricultural Science, 2017, 46(8):96-101.
- [11] Л.М.Державич, 任胜云. 无机肥料的施用与环境污染[J]. 土壤学进展, 1985 (2):42-46.
- Л.М.Державич, REN Shengyun. Application of inorganic fertilizers and environmental pollution [J]. Progress in Soil Science, 1985 (2):42-46.
- [12] 何绍兰, 邓烈, 黄明亨, 郑佳兵, 张志良. EDDHA-fe 矫治柑桔缺铁黄化试验[J]. 中国南方果树, 1999, 28:3-6.
- HE Shaolan, DENG Lie, HUANG Mingheng, ZHENG Jiabing, ZHANG Zhiliang. EDDHA-fe correction of iron deficiency yellowing of citrus[J]. Fruit Trees in South China, 1999, 28:3-6.
- [13] 邹春琴, 陈新平. 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, 5(4): 399-406.
- ZOU Chunqin CHEN Xinping. Related studies on the diagnostic index of active iron as plant iron nutrition status [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 1998, 5(4): 399-406.
- [14] 米国全, 程志芳, 王晋华, 李小红, 韩永平, 李继淑. 利用叶绿素荧光参数评价番茄耐低温弱光能力的研究[J]. 河南农业科学, 2015, 44(1):94-97.
- MI Guoquan, CHENG Zhifang, WANG Jinhua, LI Xiaohong, HAN Yongping, LI Jishu. Evaluation of low-temperature and low-light resistance of tomatoes by chlorophyll fluorescence parameters [J]. Henan Agricultural Science, 2015, 44(1):94-97
- [15] SHERIF A F E, OSMAN A Z, SADIK M K, SHATA S M. Determination of ferrous and ferric iron in spinach plants and their relation to iron application[J]. Journal of Plant Nutrition, 1984, 7 (1-5):767-776.
- [16] 王新超, 陈亚军, 陈亮. 茶树谷氨酸合酶的提取与活性测定[J]. 中国茶叶, 2004, 26(5):10-11.
- WANG Xinchao, CHEN Yajun, CHEN Liang. Extraction and activity determination of glutamate synthase from camellia sinensis [J]. Chinese Tea, 2004, 26(5):10-11.
- [17] BARBARA D, OLLE B. Comparison of the effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and photon yield of O₂ evolution in leaves of higher plants[J]. Planta, 1987, 171:171-184.
- [18] DOROTHEE S. Chemical range for iron acquisition in plants [J]. Angewandte Chemie, 2012(41): 2259-2264.
- [19] GENTY B, BRIANTAIS J M, BAKER N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. Biochimica Biophysica Acta, 1989, 900: 87-92.