植物营养与肥料学报 2005,11(4):551-555
Plant Nutrition and Fertilizer Science

# 纳米氧化铁对花生生长发育及养分吸收影响的研究

刘秀梅，张夫道*，冯兆滨，张树清，何绪生，王茹芳，王玉军
(中国农业科学院土壤肥料研究所,北京 100081)

**摘要**：通过温室砂培试验研究了纳米氧化铁与有机肥、腐殖酸配合施用对花生生长发育和吸收铁肥的影响。结果表明,纳米氧化铁能够显著地促进花生的生长发育和光合作用。有机肥和纳米氧化铁配施(OM-Fe)处理,花生叶片叶绿素含量最高,为 2.89 mg/g,显著高于柠檬酸铁处理(CT-Fe)；纳米氧化铁和有机肥、腐殖酸配施可增强铁在植株体内的移动性,使铁向叶部转移,叶部的含铁量明显增加。纳米氧化铁与有机肥配施(OM-Fe)、纳米氧化铁(Nano-Fe)、纳米氧化铁与腐殖酸配施(HAs-Fe)处理,其植株叶部含铁量分别为 218.95 mg/kg、207.48 mg/kg、206.64 mg/kg,均大于柠檬酸铁处理(187.00 mg/kg),提高了铁的利用率。此外,纳米 $Fe_2O_3$ 还有利于促进花生对氮、磷、钾养分的吸收和利用。

**关键词**：纳米氧化铁；花生；养分吸收
**中图分类号**：S565.206　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2005)04-0551-05

# Effects of Nano-ferric oxide on the growth and nutrients absorption of peanut

LIU Xiu-mei, ZHANG Fu-dao*, FENG Zhao-bin, ZHANG Shu-qing, HE Xu-sheng, WANG Ru-fang, WANG Yu-jun
(*Institute of Soil and Fertilizer, Chinese Academy of Agriculture Science, Beijing 100081, China*)

**Abstract**: Iron is one of essential trace elements for plant growth. The uptake and utilization of iron was influenced by many kinds of factors, such as soil, climate *et al*, especially the means of fertilizer application which was close related to the biological availability of iron fertilizer and plant and development of plant. The effects of Nano-ferric oxide (Nano-$Fe_2O_3$) coordinated with organic fertilizer and humid acid (OM-Fe) on the growth and iron uptake of peanut were studied through a nutrient quartz-sand culture experiment in the greenhouse. The results showed that Nano-$Fe_2O_3$ could promote the growth and photosynthesis of peanut significantly. For OM-Fe, the chlorophyll content in peanut leaves was 2.89 mg/g, which was significant higher than that of Citric acid iron(CA-Fe). Nano- $Fe_2O_3$ coordinated with organic manures could improve the movability of iron in plant corpora, transferring iron into leaves that resulted in a significant increment of iron in leaves. For the treatments of Nano-Fe coordinated with organic fertilizer, Nano-Fe and Nano-Fe coordinated with humic acid(HAs-Fe), the iron content in leaves were 218.95 mg/kg, 207.48 mg/kg and 206.64 mg/kg, respectively. All of them were higher than that of CA-Fe (187.00 mg/kg). As the result, the efficiency of iron increased. Nano-Fe could promote the absorption and utilization of nutrients, such as nitrogen, phosphorus and potassium. Therefore, this study provided a mythology and scientific basis of Nano-$Fe_2O_3$ application for a practical purpose.

**Key words**: Nano- $Fe_2O_3$; peanut; nutrient absorption

铁是植物生长必须的微量元素,在植物体内参与光合作用、氧化还原反应和电子传递以及呼吸作用等众多生理过程[1]。在我国华北、西北地区的石灰性土壤中,尤其是干旱和半干旱地区的土壤中常有缺铁现象发生,特别是在果树上尤为明显。受害作物叶片黄化、植株生长受到抑制,影响产量和品

**收稿日期**：2004-04-05　　**修改稿收到日期**：2004-06-18
**基金项目**：国家 863 计划课题"纳米肥料关键技术研究"(2001AA218041)资助。
**作者简介**：刘秀梅(1974—),女,山东泰安人,博士,主要从事新型肥料和农用纳米材料的研究。* 通讯作者

质,甚至死亡。多年来,国内外学者对造成植物缺铁的原因及防治做了大量的研究[2-3],对植物利用土壤铁的机理也作了许多的探讨[4-5],但迄今尚缺少既经济又有效的施铁方法。国内外学者称铁为"难以捉摸的微量元素(elusory microelement)"[6]。本研究把纳米氧化铁作为铁肥使用到花生的栽培上,并通过不同的施用方法探讨了纳米氧化铁对花生生长发育及吸收养分的影响,为提高铁肥的生物有效性提供理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

纳米氧化铁(Nano-Fe)采用液相沉淀和高剪切(30000 r/min)工艺自行研制。$Fe_2O_3$ 粒径范围在 20~80nm 之间(图 1)。

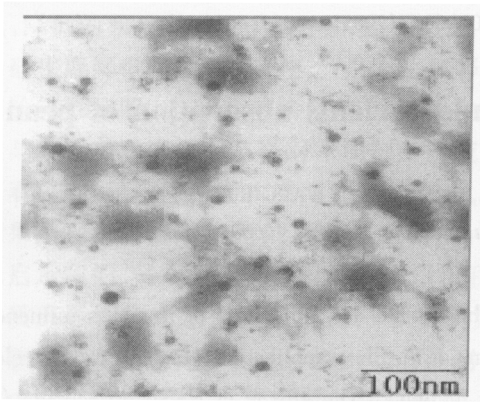


**图 1 纳米氧化铁的电镜照片**

**Fig. 1 Electric-microscope picture of Nano-$Fe_2O_3$**

风化煤采自辽宁阜新煤矿,总腐酸含量 63%,游离腐酸含量 58%。采用 $H_2SO_4$—丙酮法从风化煤中提取腐殖酸[7],该腐殖酸的主要元素组成为 C 66.09%,H 2.89%,N 0.78%,S 0.67%,主要功能团有酸基、羟基、羧基、酚羟基、甲氧基。

有机肥为鸡粪,风干样含全 N 30.41g/kg,全 P 10.13 g/kg,全 K 20.22 g/kg,C/N 为 17.7,粗纤维 84.5 g/kg,水溶物 16.9 g/kg。有机肥进行腐熟处理后使用。

供试花生品种为鲁花 12 号,属铁敏感品种,种子引自山东省花生研究所。

## 1.2 试验方法

砂培试验用盆为直径 20cm,高 15cm 的塑料盆,石英砂粒径为 1~2mm,去杂质,3%盐酸溶液浸泡 1 周,自来水洗净,蒸馏水漂洗至 pH 值为 7,风干后装盆,每盆 6.5kg。试验设 8 个处理,4 次重复,试验方案见表 1。各处理以液态形式施入。挑选大小一致无病害的花生种子,50℃温水消毒处理,放于培养箱中 25~26℃催芽,待幼苗根长至 2~4cm,移植于石英砂中,每盆 3 棵。浇霍格兰营养液。苗子长至 80d,从花生长势表现出明显差别时,测定花生叶片叶绿素含量和光合强度,收获植株后测定花生生育状况指标和养分含量。

**表 1 纳米铁肥试验设计**

**Table 1 Design of Nano-$Fe_2O_3$ experiment**

| 处理代码 Code | 施肥方案 Treatments |
|---|---|
| CK | 不施铁 without iron fertilizer |
| Nano-Fe | 17mg/L 纳米氧化铁 17mg/L Nano-$Fe_2O_3$ |
| CA-Fe | 24.5mg/L 柠檬酸铁 24.5mg/L Citric acid iron |
| EDTA-Fe | 74.6mg/L EDTA 和 17mg/L 纳米氧化铁配施 74.6mg/L EDTA and 17mg/L Nano- $Fe_2O_3$ |
| HAs-Fe | 1g/L 腐殖酸 和 17mg/L 纳米氧化铁配施 1g/L humic acids and 17mg/L Nano-$Fe_2O_3$ |
| OM-Fe | 8g/L 有机肥 和 17mg/L 纳米氧化铁配施 8g/Lorganic fertilizers and 17mg/L Nano-$Fe_2O_3$ |
| HAs | 1g/L 腐殖酸 1g/L humic acids |
| OM | 8g/L 有机肥 8g/L organic fertilizers |

## 1.3 测定项目和方法

花生叶面积用称重法测定[8];叶片叶绿素含量用 95%的乙醇浸提,分光光度计比色测定[9];光合强度的测定参照干重方法[8]。

植株样品用浓 $H_2SO_4$—$H_2O_2$ 消煮后,全氮用开氏半微量定氮法、全磷用钒钼黄比色法、全钾用火焰光度计、全铁含量用原子吸收分光光度计测定。

# 2 结果与分析

## 2.1 纳米氧化铁对花生花针期生育状况的影响

不同配施方法的铁处理对花生花针期生育状况的各项指标有显著影响。表 2 看出,有机肥和纳米氧化铁配施(OM-Fe)效果最好,能显著地促进花生的生育状况,其主茎高、有效果针数目、总分蘖数和干重均显著地高于单施有机肥(OM)和单施纳米氧化铁(Nano-Fe)的处理。单施纳米氧化铁(Nano-Fe)处理,花生根长、总分蘖数和叶面积显著地高于柠檬酸铁处理(CA-Fe),说明纳米氧化铁对花生生育状况的影响在某些方面优于柠檬酸铁。腐殖酸和纳米氧化铁配施(HAs-Fe),花生茎高、根长、有效果针数

表 2　纳米氧化铁对花生花针期生育状况的影响

Table 2　Effect of Nano-$Fe_2O_3$ on peanut growth and development in bloom and needle stage

| 处理 Treatments | 茎高 Stem height (cm) | 根长 Root length (cm) | 有效果针数目 Needles (No./plant) | 总分蘖数 Branches (No. /plant) | 叶面积 Leaf area ($cm^2$) | 干重 Dry weight (g/plant) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 19.79 cd | 40.27 b | 8.10 c | 9.00 bc | 3.47 bc | 5.97 b |
| Nano-Fe | 19.88 c | 46.90 a | 11.61 b | 10.17 ab | 3.61 bc | 6.35 ab |
| CA-Fe | 21.63 ab | 34.35 c | 12.84 ab | 8.51 c | 4.03 a | 6.29 ab |
| EDTA-Fe | 16.83 d | 23.12 d | 8.18 c | 6.34 d | 3.41 c | 5.91 bc |
| HAs-Fe | 22.01 ab | 35.35 c | 10.98 bc | 9.68 bc | 3.81 b | 5.88 c |
| OM-Fe | 23.77 a | 46.15 ab | 14.21 a | 10.92 a | 4.01 ab | 6.75 a |
| HAs | 22.02 ab | 40.00 bc | 8.56 c | 8.96 c | 2.84 d | 5.55 c |
| OM | 21.57 b | 36.64 c | 10.16 bc | 9.23 b | 3.14 c | 4.49 d |

注(Note)：在同一列中不同字母表示差异达 5% 显著水平，下同。Different letters in same column mean significant at 5% level, same as follows.

目和总分蘖数虽高于柠檬酸铁处理，但差异不显著。从总体来看，各处理对花生生育状况产生正效应的顺序是 OM-Fe > Nano-Fe > HAs-Fe > CA-Fe > OM > HAs > EDTA-Fe > CK。

## 2.2　纳米氧化铁对花生叶片叶绿素含量和光合强度的影响

花生叶片叶绿素含量是表征植株体内铁营养状况的重要指标，许多研究资料都证明，植物体内的铁含量与叶绿素的含量呈正相关。大多数植物中铁与叶绿素含量摩尔比是 1:4～10[10]；铁还与光合作用有密切关系，直接参与 $CO_2$ 的还原过程[11]。不同铁处理对花生叶片叶绿素含量和光合强度的影响(表 3)表明，有机肥和纳米氧化铁配施处理(OM-Fe)中，花生叶片叶绿素含量为 2.89 mg/g，显著高于柠檬酸铁处理(CA-Fe)，与单施纳米氧化铁(Nano-Fe)差异不显著。正常叶片的叶绿素 a/b 值一般为 3/1[12]，

表 3　纳米氧化铁对花生叶片叶绿素含量和光合强度的影响

Table 3　Effect of Nano-$Fe_2O_3$ on chlorophyll and photosynthesis of the peanut leaves

| 处理 Treatment | Chl. (a+b) (mg/g, FW) | Chl. a/b (mg/g, FW) | 光合强度 Photosynthesis [mg/($dm^2$·h)] |
|---|---|---|---|
| CK | 2.25 c | 2.04 | 2.53 d |
| Nano-Fe | 2.79 ab | 2.94 | 7.66 bc |
| CA-Fe | 2.45 bc | 2.93 | 7.35 c |
| EDTA-Fe | 2.66 b | 3.08 | 9.84 ab |
| HAs-Fe | 2.80 ab | 3.31 | 10.76 a |
| OM-Fe | 2.89 a | 2.96 | 10.00 ab |
| HAs | 2.54 bc | 3.30 | 7.89 bc |
| OM | 2.40 bc | 2.91 | 9.40 ab |

在本试验中除去缺铁处理(CK)中叶绿素 a/b 为 2.04 外，其余处理的叶绿素 a/b 均在 3/1 左右，说明在本试验缺铁处理中花生叶片叶绿素 a 难以转化为叶绿素 b，而施用各种形态的纳米铁肥，其叶片中叶绿素 a 易于转化成 b，且比较稳定，对花生叶绿素的合成有不同程度的促进作用。

表 3 还看出，不同配施纳米氧化铁处理均能促进花生叶片的光合作用，以腐殖酸和纳米氧化铁配施(HAs-Fe)、有机肥和纳米氧化铁配施(OM-Fe)中光合强度均显著地高于柠檬酸铁处理(CA-Fe)。

## 2.3　纳米 $Fe_2O_3$ 对花生吸收铁肥的影响

本试验结果(表 4)表明，所有的处理中，花生吸收的铁主要累积在植株的根部，其次是叶或茎。腐殖酸与纳米氧化铁配施(HAs-Fe)处理根部含铁量最高，达 1130.58mg/kg，其次是 CA-Fe、Nano-Fe 和 OM-Fe 处理，分别为 980.01、955.31 和 880.07 mg/kg。在腐殖酸和有机肥与纳米氧化铁配施的(HAs-Fe 和 OM-Fe)处理中，植株叶部含铁量大于茎部含铁量，而 Nano-Fe、CA-Fe 和 EDTA-Fe 处理中，叶部含铁量均小于茎部含铁量。可见，纳米氧化铁与腐殖酸或有机肥配施不仅促进了花生根部对铁的吸收，而且还有助于铁从茎部转移到叶部。一般认为，$Fe^{2+}$ 是植物吸收的主要形式，螯合态铁也可以被吸收。当 $Fe^{2+}$ 被根吸收后，在大部分的根细胞中可氧化成 $Fe^{3+}$，并被柠檬酸螯合，通过木质部被运输到地上部。业已证明，铁从根部到茎部的运输是以柠檬酸螯合物的形式进行的，柠檬酸和铁离子有很强的亲和力[13-14]。而纳米氧化铁与腐殖酸或有机肥结合可被植物根系吸收，目前尚未见报道。纳米 $Fe_2O_3$ 的结合物被植株吸收后，在体内以何种形

式移动或转化，还有待进一步研究。

在所有的处理中，植株叶的含铁量差异比较大。有机肥与纳米氧化铁配施、纳米氧化铁、腐殖酸与纳米氧化铁配施的处理中，其植株叶部含铁量分别为218.95、207.48、206.64 mg/kg，均大于柠檬酸铁处理(187.00 mg/kg)，说明有机肥或腐殖酸与纳米 $Fe_2O_3$ 结合后使铁在植株体内的移动性增强，致使叶片中含铁量增加，从而提高铁的利用率，充分发挥铁在植株体内的有效性。纳米氧化铁具体以何种形式被根系吸收，又以何种形式在植株体内运输或移动，有待进一步研究。

有关铁在植株体内的运输与移动情况，根和茎或叶中铁含量的比值也是一个重要指标。结果看出，有机肥和纳米氧化铁配施处理中茎/根和叶/根含铁量比值分别为0.24、0.25，二者均高于其它处理中的茎/根和叶/根；其次是单施纳米氧化铁处理，茎/根和叶/根含铁量比值分别为0.23、0.22；而柠檬酸铁处理中茎/根和叶/根含铁量比值分别为0.23、0.19。可见，施用纳米氧化铁对铁吸收效果好于柠檬酸铁，并且纳米氧化铁促进了铁在植株体内由根部到地上部的移动，有助于新生叶片对铁的吸收和利用，以满足植株生长和发育的需要。

**表4 纳米氧化铁对花针期花生养分含量的影响**

**Table 4 Effect of Nano－$Fe_2O_3$ on the nutrient contents of peanut**

| 处理 Treat. | 器官 Organ | N(%) | P(%) | K(%) | N:P:K | Fe(mg/kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 茎 stem | 1.29 | 0.20 | 1.42 | 6.5:1.0:7.0 | 108.01 |
| | 叶 leaf | 2.13 | 0.28 | 1.26 | 7.6:1.0:4.5 | 188.23 |
| | 根 root | 1.78 | 0.19 | 1.30 | 9.4:1.0:6.8 | 667.68 |
| Nano-Fe | 茎 stem | 2.05 | 0.24 | 1.80 | 8.5:1.0:3.3 | 223.33 |
| | 叶 leaf | 2.69 | 0.29 | 1.04 | 9.3:1.0:3.6 | 207.48 |
| | 根 root | 1.54 | 0.28 | 1.76 | 5.5:1.0:2.7 | 955.31 |
| CA-Fe | 茎 stem | 2.08 | 0.27 | 2.13 | 7.7:1.0:7.9 | 224.46 |
| | 叶 leaf | 2.84 | 0.28 | 1.64 | 10.0:1.0:5.8 | 187.00 |
| | 根 root | 1.98 | 0.28 | 1.32 | 7.0:1.0:4.7 | 980.01 |
| EDTA-Fe | 茎 stem | 1.97 | 0.28 | 1.96 | 7.0:1.0:7.0 | 228.28 |
| | 叶 leaf | 2.31 | 0.21 | 1.48 | 11.0:1.0:7.0 | 162.13 |
| | 根 root | 1.76 | 0.23 | 1.80 | 7.6:1.0:7.8 | 720.08 |
| HAs-Fe | 茎 stem | 2.72 | 0.27 | 2.84 | 10.0:1.0:10.5 | 204.42 |
| | 叶 leaf | 3.12 | 0.36 | 2.45 | 8.7:1.0:6.8 | 206.64 |
| | 根 root | 2.29 | 0.27 | 2.28 | 8.5:1.0:8.4 | 1130.58 |
| OM-Fe | 茎 stem | 3.07 | 0.29 | 2.72 | 10.6:1.0:9.4 | 210.09 |
| | 叶 leaf | 3.73 | 0.38 | 1.98 | 9.8:1.0:5.2 | 218.95 |
| | 根 root | 2.73 | 0.31 | 1.84 | 8.8:1.0:5.9 | 880.07 |
| HAs | 茎 stem | 2.54 | 0.23 | 2.76 | 11.0:1.0:12.0 | 123.56 |
| | 叶 leaf | 2.72 | 0.35 | 2.09 | 6.8:1.0:5.2 | 143.31 |
| | 根 root | 1.94 | 0.26 | 1.76 | 7.5:1.0:6.7 | 840.22 |
| OM | 茎 stem | 2.10 | 0.20 | 1.88 | 10.5:1.0:9.4 | 166.70 |
| | 叶 leaf | 2.46 | 0.31 | 2.80 | 8.0:1.0:9.0 | 182.55 |
| | 根 root | 1.76 | 0.25 | 1.81 | 7.0:1.0:7.3 | 814.38 |

### 2.4 纳米 $Fe_2O_3$ 对花生吸收氮磷钾及其分布的影响

花生对各种养分的吸收高峰在开花下针期。在该生育期间对氮磷钾的吸收量比苗期增加8～10倍。对氮的吸收量是全生育期需氮量的42%，磷占50%，钾为60%[13]。表4看出，花针期花生吸收的氮和磷主要累积在叶中，其次是茎和根部，而钾主要在茎，其次是叶和根部。不同的处理下，花生的各器官氮磷钾的积累量不同。有机肥和纳米氧化铁配施(OM-Fe)处理，植株的茎和叶含氮量最高，分别是3.07%和3.73%；其次是腐殖酸和纳米氧化铁配施(HAs-Fe)处理，花生茎和叶的含氮量分别是2.72%和3.12%，均高于柠檬酸铁(CA-Fe)处理中相应部位的含氮量；花生叶含磷量最高的是OM-Fe处理，

其次是 HAs-Fe 处理；茎中含钾量最高的是 HAs-Fe 处理；Nano-Fe 与 CA-Fe 处理花针期花生各部位氮、磷、钾和铁的含量相差不大。可见，纳米氧化铁能不同程度地促进植株对氮、磷、钾的吸收。

## 3 结论

本研究发现，纳米氧化铁配施有机肥或腐殖酸可以被植物吸收，而且在植株体内的移动性优于柠檬酸铁。结合物被植株吸收后，在体内以何种形式移动或转化，还有待进一步研究。

有机肥和纳米 $Fe_2O_3$ 配施（OM-Fe）能显著地促进花生生长；纳米氧化铁对花生生育状况的影响在某些方面优于柠檬酸铁。总体来看，各处理对花生生育状况产生正效应的优先顺序是 OM-Fe > Nano-Fe > HAs-Fe > CA-Fe > OM > HAs > EDTA-Fe > CK。供试的各种纳米 $Fe_2O_3$ 配施组合均能促进花生植株的正常生长，并且对叶片叶绿素的合成也有不同程度的促进作用。

施用纳米氧化铁能不同程度地促进植株对氮、磷、钾的吸收。在纳米氧化铁与腐殖酸、有机肥配施处理中，花生体内的氮、磷、钾含量均高于腐殖酸、有机肥或纳米氧化铁单施处理。

**参 考 文 献：**


[1] 陆景陵．植物营养学（上册）[M]．北京：北京农业大学出版社，1994．56-60.
Lu J L. Plant nutrition (First volume)[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994. 56-60.

[2] 施卫明．石灰性土壤中铁的生物有效性及其影响因素[J]．土壤学进展，1990，18(2)：75-82.
Shi W M. Bio-validity and effecting factors of iron in calcareous soils [J]. Progress in Soil Science, 1990, 18(2): 75-82.

[3] Guerinot M L, Yi Y. Iron: Nutrition, noxious and not really available [J]. Plant Physiol., 1994, 104: 815-820.

[4] Hara G W, Dilworth M J, Boonkerd N. Iron-deficiency specifically limits nodule development in peanut inoculated with *Bradyrhizobium sp*. [J]. New Phtol., 1988, 108: 51-57.

[5] 高明，车福才，魏朝富，等．长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J]．植物营养与肥料学报，2000，6(1)：11-17.
Gao M, Che F C, Wei C F. Effect of long-form application of manures on forms of Fe, Mn, Cu and Zn in purple paddy soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(1): 11-17.

[6] Nooden L D, Kahanak G M, Okatan Y. Iron nutrition of plants in calcareous soils [J]. Fertilizer Solutions, 1977, 21(1): 26-36.

[7] 郑平和．煤炭腐殖酸的生产与应用[M]．北京：化学工业出版社，1991．300-308.
Zheng P H. Production and application of coal-humic acids[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991. 300-308.

[8] 山东省花生研究所．花生栽培生理[M]．上海：上海科学技术出版社，1990．240-242.
Institute of Peanut, Shandong Province. Planting physiology of peanut [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990, 240-242.

[9] 张志良．植物生理学实验指导（第二版）[M]．北京：高等教育出版社，1990．88-91.
Zhang Z L. Direction of plant-physiology experiment(2nd editon)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990, 88-91.

[10] Han Z H, Shen T, Wu F R. Some growth and physiological response of iron-efficient and inefficient species of malus to iron deficiency[J]. Acta. Horticulturae, 1995, 403: 198-204.

[11] 潘瑞炽，王小菁，李娘辉．植物生理学（第四版）[M]．北京：高等教育出版社，2001．30-31.
Pan R Z, Wang X Q, Li N H. Plant botany(4th edition)[M]. Beijing: Higher Education Pres, 2001. 30-31.

[12] Fairbanks D J. Development of genetic resistance to iron-deficiency chlorosis in soybean [J]. J. Plant Nutr., 2000, 23: 1903-1913.

[13] 封海胜，徐宜民，万书波．花生育种与栽培[M]．北京：农业出版社，1993．300-304.
Feng H S, Xu Y M, Wan S B. Breeding and planting of peanut [M]. Beijing: Agricultural Press, 1993. 300-304.

[14] Lin S F, Grant D, Cianzio S. Molecular characterization of iron deficiency chlorosis in soybean [J]. J. Plant Nutr., 2000, 23: 1929-1939.