

石灰性土壤中复混铁肥的形态转化及其有效性研究

陈海宁¹, 胡兆平¹, 李新柱¹, 刘文龙¹, 高荣庆¹, 张民²

(1. 金正大生态工程集团股份有限公司, 复合肥料国家地方联合工程研究中心, 农业部植物营养与新型肥料创制重点实验室, 山东 临沂 276700; 2. 山东农业大学 资源与环境学院, 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018)

摘要:通过花生盆栽试验的方法,研究了复混肥中添加 EDDHA-Fe、柠檬酸铁和硫酸亚铁后对土壤 pH、铁的有效性和花生产量的影响,以及不同形态的铁在石灰性土壤中的形态转化,以期探讨不同形态的复混铁肥在石灰性土壤中的有效性。结果表明:在花生不同的生育期,添加柠檬酸铁、EDDHA-Fe 和硫酸亚铁 3 种铁肥处理其花生根际土壤的 pH 较对照分别下降了 0.18~0.30、0.06~0.15、0.04~0.07 个单位。土壤施入柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥后,土壤溶液有效铁浓度均显著高于添加硫酸亚铁的铁肥处理,分别提高了 120.40%~167.60%和 117.38%~159.38%。与硫酸亚铁复混铁肥相比,添加 EDDHA-Fe 和柠檬酸铁的复混肥能提高铁在有效形态中的分配,显著增加了土壤有效铁的供给,且其花生叶片中活性铁和全铁含量均显著高于硫酸亚铁复混铁肥处理,单株花生果仁质量分别是硫酸亚铁复混铁肥处理的 1.37 倍和 1.52 倍,差异显著。此外,柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理花生果仁中的全铁含量也显著高于硫酸亚铁复混铁肥处理,分别提高了 31.4%和 54.9%。综合分析花生的生长和土壤供铁特性,建议生产实践中复混肥添加柠檬酸铁即可达到增产、提质的效果。

关键词:石灰性土壤;花生;缺铁黄化;复混铁肥;有效性

中图分类号:S 143.7⁺2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)14-0175-05

铁作为植物生长发育所必需的矿质营养元素之一,在植物的光合作用、呼吸作用、氮的固定、蛋白质和核酸的合成等诸多生理代谢过程的电子传递链或酶促反应中发挥着极为重要的作用^[1]。在铁胁迫下,叶绿体形态结构异常,叶绿素含量减少,光合速率降低,呼吸强度减弱,使植物产量和产品品质下降。虽然铁在土壤中的丰度很高,但大多以生物有效性低的氧化态形式存在,特别是在石灰性土壤上,高 pH 和高重碳酸盐含量严重降低了土壤中铁的有效性^[2]。当土壤 pH>7.5 时,土壤 pH 每升高 1 个单位,土壤溶液中铁的活性就将降低 1 000 倍,而石灰性土壤 pH 通常维持在 7.5~8.5^[3]。据

统计,世界具有潜在性缺铁的土壤约占世界耕地面积的 40%,植物缺铁是世界各地农业生产所面临的一个普遍问题^[4],农业生产中缺铁对植物生长发育造成的影响可与缺氮和缺磷相并列^[5]。植物铁营养一直受到国内外营养学界的普遍关注,并在铁的生理功能、缺铁原因、植物铁胁迫适应机理及矫治缺铁途径等方面的研究取得了较大进展^[6-8]。STEWART 等^[9]于 1952 年首次成功地应用 EDTA 矫正了柑橘缺铁。薛进军等^[10]的研究表明,不同的施肥方式能有效改善植物铁营养状况。方从兵等^[11]以桃为试材研究了铁形态和 pH 对其吸收动力学参数的影响。左元梅等^[12]的研究表明,玉米花生间作、混作能有效改善花生铁营养状况。刘秀梅等^[13]的研究表明,有机肥和有机肥与纳米 Fe₂O₃ 配施(OM-Fe)能显著地促进花生生长。但是,对适合石灰性土壤施用的铁肥品种的研制,以及铁肥施入土壤后的有效性与土壤各相关因子的关系研究还不够。目前解决缺铁的方法有土壤改良、灌溉和叶面喷洒提供铁盐或铁的螯合物^[14-16]。但是这些方法成本较高,而有时并不能提高植物的铁营养^[17]。

花生是我国北方地区主要的油料经济作物之一,在生产过程中同样面临着严重的缺铁黄化问题^[18],这已严重制约了花生的高产、稳产,造成了巨大的经济损失。

第一作者简介:陈海宁(1981-),女,山东潍坊人,博士,农艺师,现主要从事植物营养与新型肥料等研究工作。E-mail:chenhn@kingenta.com.

责任作者:张民(1958-),男,山东嘉祥人,博士,教授,现主要从事土壤肥料等研究工作。E-mail:minzhang-2002@163.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30871593);山东省自然科学基金资助项目(Y2008.D29);山东省科技攻关资助项目(2009GG10006002);国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2011BAD11B01)。

收稿日期:2016-02-14

为了改善北方地区石灰性土壤花生缺铁黄化问题,现采用科学配方研制了不同铁源的复混铁肥,通过花生盆栽试验,研究了不同的复混铁肥在石灰性土壤中的形态转化及有效机制,同时探讨了其对花生的增产效应,以期农业生产中筛选适宜推广应用的、经济、高效铁肥提供参考依据和有效途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自山东省德州市陵县城关镇东王架村,土壤类型为黄河冲积物发育的潮土,表层土壤为粉砂壤土,基本理化性质为有机质含量 $8.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 8.50, 全氮含量 $501 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷含量 $17.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 $50.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, HCO_3^- 含量 $452 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CO_3^{2-} 含量 6.33%, 有效铁含量 $8.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试花生品种为“鲁花 12”, 属铁敏感品种, 由山东省花生研究所提供。

供试肥料为分别加入 EDDHA-Fe、柠檬酸铁、硫酸亚铁的复混铁肥, 由山东农业大学肥料研究所研制生产。

1.2 试验方法

试验在山东农业大学试验基地进行, 设置 4 个处理 3 次重复的盆栽试验, 各处理设置分别为: 1) 对照处理: 不施铁肥 (CFFE0); 2) 含硫酸亚铁的复混铁肥处理 (CFFE1); 3) 含 EDDHA-Fe 的复混铁肥处理 (CFFE2);

表 1 土壤铁形态分级方法

Table 1 Methods of iron forms classification in soil

铁形态 Iron form	浸提液 Soil extract	操作条件 Operational condition
交换态 Exch-	$1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$, pH 7.0	土液比 1:4, 振荡 2 h
碳酸盐结合态 Carb-	$1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOAc-HOAc}$, pH 5.0,	土液比 1:15, 振荡 6 h
氧化锰结合态 MnOx-	$0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$, HNO_3 调至 pH 2.0	土液比 1:20, 振荡 30 min
有机结合态 OM-	A: 30% H_2O_2 , HNO_3 调至 pH 2.0; B: $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$, pH 7.0	土液比 1:2, 用 A 溶液 85°C 水浴上蒸至近干, 重复 1 次, 而后用 B 溶液 25°C 浸提 2 h
无定形铁结合态 AFeO-	草酸-草酸铵, pH 3.25	土液比 1:20, 避光振荡 4 h
晶形铁结合态 CFeO-	$0.04 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ -25% HOAc	土液比 1:20, $97\sim 100^\circ\text{C}$ 水浴中加热振荡 3 h, 重复 2 次
矿物态 RES	HClO_4 -HF	电热板加热消解

1.4 数据分析

试验数据采用 SAS 程序软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 复混铁肥对花生根际土壤 pH 的动态影响

土壤的酸碱度与铁的有效性关系密切。为了深入了解铁肥施入后对土壤 pH 的影响, 进一步探讨肥料对改善土壤微域环境的机制, 测定了不同时期不同处理的花生根际土壤 pH。在花生的整个生育期内, 不同铁肥处理对土壤 pH 的影响明显不同。由表 2 可知, 添加柠檬酸铁、EDDHA-Fe 和硫酸亚铁的铁肥处理与对照相比, pH 均有下降, 分别下降了 0.18~0.30、0.06~0.15、0.04~0.07 个单位。添加柠檬酸

4) 含柠檬酸铁的复混铁肥处理 (CFFE3)。肥料与土壤混匀后, 装于塑料盆 ($33 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$), 每盆装土 6.5 kg。各处理含有等量的 N、P、K, 处理 2、3、4 含有等量的 $\text{Fe } 105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。挑选大小一致、无病害的花生种子, 50°C 温水消毒处理, 放于培养箱中 $25\sim 26^\circ\text{C}$ 催芽, 待幼苗根长至 2~4 cm, 移植于盆中, 每盆 4 棵。在整个生育期, 用称重法浇灌去离子水, 分别在花生苗期 (5 月 20 日)、开花下针期 (6 月 10 日)、结荚期 (7 月 20 日)、成熟期 (9 月 15 日) 取土壤样品和土壤真溶液。土壤样品自然风干后, 磨细过 1 mm 土筛, 用于测定不同形态铁, 部分土样再过 0.25 mm 筛, 用于测定全铁含量; 土壤真溶液用于测定 pH 和有效铁。

1.3 项目测定

土壤铁的形态分级与测定采用蒋廷惠等^[19]改进的形态分级体系和连续浸提法, 将土壤中的铁依次分为交换态、碳酸盐结合态、氧化锰结合态、有机结合态、无定形氧化铁结合态、晶形氧化铁结合态和残渣态等 7 种形态。具体操作步骤见表 1, 试验操作温度为 25°C 。鉴于最后 2 种形态铁的生物有效性极低, 该试验只测定前 5 种形态的铁含量。

DTPA-Fe 及其它土壤指标的测定按土壤农业化学分析方法^[20]进行。所有待测液中铁含量的测定均采用原子吸收分光光度计法进行。

铁的铁肥处理与其它 3 个处理相比, 4 个测定时期土壤 pH 下降均达差异显著水平。添加硫酸亚铁的铁肥处理与对照相比, 土壤 pH 虽也降低了 0.04~0.07 个单位, 但均未达差异显著水平。添加 EDDHA-Fe 的铁肥处理与对照相比, 结荚期与成熟期均达差异显著水平。添加柠檬酸铁的铁肥施入土壤后, 土壤 pH 呈下降趋势, 主要是因为柠檬酸铁的水溶液呈酸性, 其进入土壤后能降低土壤的 pH。结果表明柠檬酸铁作为铁源在降低土壤 pH 方面优于 EDDHA-Fe 和硫酸亚铁, 能够使土壤 pH 基本保持在一个相对较低水平, 这必将增加土壤铁的溶解度, 改善土壤的供铁状况。

表 2 花生不同生育期根际土壤 pH 的变化

Table 2 Change of rhizosphere soil pH at different growth stages of peanut

处理 Treatment	苗期 Seedling	开花下针期 Flowering	结荚期 Pod	成熟期 Mature
CFFe0	8.61a	8.56a	8.59a	8.62a
CFFe1	8.57a	8.50a	8.52ab	8.56a
CFFe2	8.53a	8.50a	8.44bc	8.47b
CFFe3	8.43b	8.37b	8.34c	8.32c

注:在同列数值后不同字母表示差异达 5%显著水平,下同。

Note: Values followed by different letters in the same column mean significant difference at 5% level, the same below.

2.2 复混铁肥对石灰性土壤溶液有效铁浓度的影响

土壤溶液不仅是多数土壤化学反应和土壤形成过程发生的场所,也是植物根系获取养分的源泉。土壤溶液中养分浓度是土壤养分的强度因素,它比土壤中有效养分的数量更能反映土壤养分的最新动态。

由表 3 可以看出,花生各个生育期,添加柠檬酸铁的复混铁肥处理其土壤溶液的有效铁浓度高于 EDDHA-Fe 铁肥处理,但差异不显著,上述 2 个处理的有效铁浓度均高于添加硫酸亚铁的铁肥处理,分别高出 13.16~16.71 mg·kg⁻¹ 和 12.83~15.89 mg·kg⁻¹,相对增幅分别为 120.40%~167.60% 和 117.38%~159.38%。不同时期添加硫酸亚铁的铁肥处理其有效铁浓度略高于对照,但尚未达差异显著水平。由此可见,EDDHA-Fe 和柠檬酸铁的供铁能力显著高于硫酸亚铁,且持续性较高,主要原因是硫酸亚铁施入土壤后,亚铁离子容易被氧化生成三价铁离子而失活,而 EDDHA-Fe 使铁以比较稳定的螯合铁形式存在,降低了铁的氧化失活,柠檬酸铁属于有机酸类的络合铁,对土壤环境因子有调节作用,使铁的有效性得到提高,但 EDDHA 与钙离子亲和性强,在高 pH 条件下,部分 EDDHA-Fe 转变为 EDDHA-Ca,故在石灰性土壤上 EDDHA 的螯合效应较差。其反应式

表 4

花生不同生育期土壤各形态铁的含量

Table 4

Content of different iron forms in the soil at different growth stages of peanut

mg·kg⁻¹

生育期 Growth stage	处理 Treatment	交换态 Exch-	碳酸盐结合态 Carb-	氧化锰结合态 MnOx-	有机结合态 OM-	无定形氧化铁结合态 AFeO-
苗期 Seedling	CFFe0	0.87c	2.88c	7.93d	1.39a	1 109.48a
	CFFe1	3.37b	3.57bc	10.76c	1.75a	1 235.43a
	CFFe2	5.64a	4.26ab	18.79a	1.81a	1 169.56a
	CFFe3	5.35a	4.62a	16.75b	1.77a	1 171.01a
	CFFe0	0.71b	3.17b	9.08b	1.45b	1 108.30a
成熟期 Mature	CFFe1	1.61b	3.54b	11.14b	1.73ab	1 257.13a
	CFFe2	5.25a	4.45a	16.30a	2.07a	1 291.02a
	CFFe3	5.24a	4.59a	15.59a	1.78ab	1 263.25a

2.4 复混铁肥对花生叶片活性铁和全铁含量的影响

叶片中活性铁的含量可以客观地反映花生的铁营养状况。系统分析花生叶片活性铁含量和全铁含量,对于更好地筛选有效铁肥提供了充分依据。由表 5 可知,在花生开花下针期和成熟期,施入柠檬酸铁和 EDDHA-

如下:

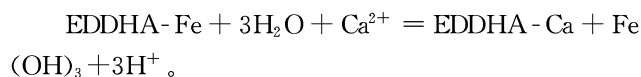


表 3 花生不同生育期土壤溶液有效铁浓度的变化

Table 3 Change of soil available iron concentration at

different growth stages of peanut

mg·kg⁻¹

处理 Treatment	苗期 Seedling	开花下针期 Flowering	结荚期 Pod	成熟期 Mature
CFFe0	11.23b	10.78b	9.93b	8.30b
CFFe1	12.49b	11.42b	9.97b	10.93b
CFFe2	27.56a	27.17a	25.86a	23.76a
CFFe3	28.45a	27.41a	26.68a	24.09a

2.3 复混铁肥对石灰性土壤各形态铁含量的影响

土壤中的铁以交换态铁、碳酸盐结合态铁、氧化锰结合态铁、有机结合态铁、无定形氧化铁结合态铁为有效或者较有效铁,所以上述 5 种形态铁的含量在一定程度上反映了土壤铁的有效程度。复混铁肥施入土壤后,土壤溶液中有效铁的含量升高,这与铁肥施入土壤后铁的形态转化有关。其中,土壤交换态铁对植物的有效性和活性最大。由表 4 可知,添加柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混肥处理的交换态铁、碳酸盐结合态铁和氧化锰结合态铁在花生的苗期和成熟期与对照相比差异显著,但添加柠檬酸铁复混肥处理和 EDDHA-Fe 复混肥处理之间无显著差异。以上结果表明,在土壤施入柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混肥后,均能有效的提高土壤中交换态铁、碳酸盐结合态铁和氧化锰结合态铁的含量。而添加硫酸亚铁的复混肥施入土壤后,对土壤中上述 3 种形态铁的含量影响不大。这与硫酸亚铁施入土壤后容易被氧化,导致铁的有效性降低有关。复混铁肥施入土壤后对土壤中有机结合态铁和无定型氧化铁结合态铁含量的影响不大。

Fe 复混铁肥的处理其花生叶片中活性铁的含量均显著高于硫酸亚铁复混肥处理和对照,柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理的活性铁含量分别较硫酸亚铁复混铁肥处理提高了 29.0% 和 33.9%;硫酸亚铁复混铁肥处理较对照提高了 10.5%,差异不显著。在 2 个生育期中,

EDDHA-Fe 复混铁肥处理的花生叶片活性铁含量略高于柠檬酸铁处理,但未达差异显著水平。以上说明有机态铁和螯合态铁在土壤中的有效性要显著高于硫酸亚铁。复混肥中添加柠檬酸铁或 EDDHA-Fe 均可有效的提高石灰性土壤中花生叶片的活性铁含量,可预防和矫正花生因缺铁引起的黄化病。

石灰性土壤施入不同类型的复混铁肥后,其花生叶片中全铁的含量也存在差异。在开花下针期,硫酸亚铁、EDDHA-Fe 复混铁肥和柠檬酸铁处理的花生叶片中全铁的含量均显著高于对照,分别较对照增加了 39.60、112.87、124.43 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理的花生叶片中全铁的含量均显著高于硫酸亚铁复混铁肥处理,分别增加了 84.83、73.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在成熟期,花生叶片中全铁含量的高低顺序为 EDDHA-Fe 复混铁肥>柠檬酸铁复混铁肥>硫酸亚铁复混铁肥>对照;柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理叶片全铁含量显著高于硫酸亚铁处理及对照。

表 5 花生不同生育期叶片活性铁及全铁含量

Table 5 Active iron and total iron content in leaves at different growth stages of peanut $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理 Treatment	活性铁 Active iron		全铁 Total iron	
	开花下针期 Flowering	成熟期 Mature	开花下针期 Flowering	成熟期 Mature
CFFe0	28.77b	28.40a	98.32c	131.5c
CFFe1	31.78b	29.40a	137.92b	159.68c
CFFe2	42.55a	44.52b	211.19a	243.76a
CFFe3	41.01a	40.53b	222.75a	198.55b

2.5 复混铁肥对花生单株果仁质量及其全铁含量的影响

从表 6 可以看出,柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理均可显著提高单株花生的果仁质量和果仁中全铁的含量,果仁质量分别是硫酸亚铁复混铁肥处理的 1.37 倍和 1.52 倍,达差异显著水平。EDDHA-Fe 复混铁肥处理的果仁质量最高,较柠檬酸铁复混铁肥处理提高了 11.4%,但差异不显著。硫酸亚铁复混铁肥处理的果仁质量较对照提高了 2.9%,差异不显著。就果仁中全铁含量而言,柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理果仁中全铁的含量较硫酸亚铁复混铁肥处理分别提高了 31.4%和 54.9%,差异显著。但硫酸亚铁复混铁肥处理与对照相比无显著性差异。以上表明,复混肥中加入了

表 6 花生单株果仁质量和果仁全铁含量

Table 6 Peanut kernel weight and total iron content in kernel

处理 Treatment	干质量 Dry weight/(g·株 ⁻¹)	全铁含量 Total iron content/(mg·kg ⁻¹)
CFFe0	9.00b	13.03b
CFFe1	9.26b	17.31b
CFFe2	14.12a	26.82a
CFFe3	12.68a	22.75a

花生生长所必需的微量元素-铁,不仅使花生叶片中活性铁的含量增加,而且还促进了花生荚果的生长发育,最终达到提高荚果产量和果仁中全铁含量的目的。

3 结论

花生盆栽试验表明,土壤施入复混铁肥后,对花生根际土壤 pH 产生一定的影响。在花生不同的生育期,与对照相比,添加柠檬酸铁、EDDHA-Fe 和硫酸亚铁的铁肥处理其花生根际土壤的 pH 分别下降了 0.18~0.30、0.06~0.15、0.04~0.07 个单位,且添加柠檬酸铁的铁肥处理花生根际土壤的 pH 显著低于施用硫酸亚铁复混铁肥处理。

在花生不同生育期,添加柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 的复混铁肥处理其土壤溶液有效铁浓度均高于添加硫酸亚铁的铁肥处理,分别提高了 120.40%~167.60%和 117.38%~159.38%,但上述二者之间差异不显著。在花生苗期和成熟期,添加柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混肥处理的交换态铁、碳酸盐结合态铁和氧化锰结合态铁含量高于硫酸亚铁复混铁肥处理,但添加柠檬酸铁复混肥处理和 EDDHA-Fe 复混肥处理之间无显著差异。在花生开花下针期和成熟期,施入柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥的处理其花生叶片中活性铁的含量分别较硫酸亚铁复混铁肥处理提高了 29.0%和 33.9%,差异显著;硫酸亚铁复混铁肥处理略高于对照,但差异不显著。同时,柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理的花生叶片中全铁的含量显著高于硫酸亚铁处理。

柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理的单株花生果仁质量显著高于硫酸亚铁复混铁肥处理,分别达 1.37 倍和 1.52 倍。以 EDDHA-Fe 复混铁肥处理的单株果仁质量最高,较柠檬酸铁复混铁肥处理提高了 11.4%,但无显著差异。硫酸亚铁复混铁肥处理的果仁质量较对照略有增加,差异不显著。柠檬酸铁和 EDDHA-Fe 复混铁肥处理也显著提高了花生果仁中的全铁含量,显著高于硫酸亚铁复混铁肥处理,分别提高了 31.4%和 54.9%。硫酸亚铁复混肥处理的果仁全铁含量与对照相比略有增加。

综合分析花生对铁的吸收、产量和土壤特性,结合生产实践中的成本因素,建议复混肥中添加柠檬酸铁即可达到增产和预防石灰性土壤中花生发生缺铁现象。

参考文献

- [1] 张进,吴良欢,孔向军,等. 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.
- [2] SCHMIDT W. Iron solutions; acquisition strategies and signaling pathways in plants[J]. Trends in Plant Science,2003,8(4):188-193.
- [3] 段路路,张民,杨超越,等. 波尔多液营养保护剂对石灰性土壤铜、铁有效性及花生产量的影响研究[J]. 水土保持学报,2006,20(3):47-50.
- [4] ZHANG J, WU L H, WANG M Y. Iron and zinc biofortification in

polished rice and accumulation in rice plant (*Oryza sativa* L.) as affected by nitrogen fertilization[J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science, 2008, 58(3): 267-272.

[5] 安华明,樊卫国. 果树铁营养研究进展[J]. 西南农业学报, 2001, 14(3): 83-89.

[6] 都韶婷. 不同供磷水平对饭豆体内铁有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 247-251.

[7] 查仁明. 植物抗缺铁机理研究进展[J]. 渝西学院学报, 2002, 1(3): 39-44.

[8] 翟丙年,刘海轮,尚浩博,等. 植物吸收利用铁的机理[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 184-189.

[9] STEWARD I, LEONARD C D. Chelates as sources of iron for plants growing in field[J]. Science, 1952, 116: 564-566.

[10] 薛进军,王秀茹,台社珍,等. 铁肥品种和施肥方式对黄化苹果树复绿和铁含量的影响[J]. 果树科学, 1999, 16(4): 246-249.

[11] 方从兵,孙俊. 桃铁离子吸收动力学研究[J]. 中国农学通报, 2001, 17(1): 4-6.

[12] 左元梅,张福锁. 不同间作组合和间作方式对花生铁营养状况的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(3): 300-306.

[13] 刘秀梅,张夫道,冯兆滨,等. 纳米氧化铁对花生生长发育及养分吸

收影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 551-555.

[14] LUCENA J J. Fe chelates for remediation of Fe chlorosis in strategy I plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 2003(26): 1969-1984.

[15] KOSEGARTEN H, HOFFMANN B, MENGEL K. The paramount influence of nitrate in increasing apoplastic pH of young sunflower leaves to induce Fe deficiency chlorosis, and the regreening effect brought about by acidic foliar sprays[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2001, 164: 155-163.

[16] YUNTA F, SIERRA M A, GÓMEZ-GALLEGU M, et al. Methodology to screen new iron chelates: prediction of their behavior in nutrient solution and soil conditions[J]. Journal of Plant Nutrition, 2003, 26: 1955-1968.

[17] TAGLIAVINI M, ROMBOLA A D. Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 15(2): 71-92.

[18] 高丽,史衍玺,周健民. 不同耐低铁基因型花生铁营养特性的差异[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1393-1397.

[19] 蒋廷惠,胡霭堂,秦怀英. 土壤锌、铜、铁、锰形态区分方法的选择[J]. 环境科学学报, 1990, 10(3): 280-286.

[20] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

Transformation and Availability of Compound Iron Fertilizers in Calcareous Soil

CHEN Haining¹, HU Zhaoping¹, LI Xinzhu¹, LIU Wenlong¹, GAO Rongqing¹, ZHANG Min²

(1. Kingenta Ecological Engineering Group Co. Ltd./National Engineering Research Center of Compound Fertilizer/Key Laboratory of Plant Nutrition and New Fertilizer R&D, Ministry of Agriculture, P. R. China, Linshu, Shandong 276700; 2. College of Resource and Environment/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In order to evaluate the availability of EDDHA-Fe, ferric citrate and ferrous sulfate adding to the compound fertilizers, peanut pot experiment was carried to study the soil pH, iron availability and peanut yield after fertilization. The results showed that the pH of peanut rhizosphere were decreased by 0.18—0.30, 0.06—0.15 and 0.04—0.07 respectively when applied compound EDDHA-Fe, ferric citrate and ferrous sulfate fertilizers. After applying of compound ferric citrate and EDDHA-Fe fertilizer, available iron concentration of the soil solution was significantly higher than compound ferrous sulfate added, where were increased by 120.40%—167.60% and 117.38%—159.38%, respectively. Compared to compound ferrous sulfate fertilizer, applying compound EDDHA-Fe and ferric citrate fertilizer could improve the concentration of available iron in the form of distribution, significantly increase the supply of soil available iron. And active iron and total iron content of peanut leaves were significantly higher than that of compound ferrous sulfate fertilizer treatment. Peanut kernels weights of per plant were 1.37 and 1.52 times of compound ferrous sulfate fertilizer treatment, and the difference was significant. In addition, total iron contents of peanut kernels were significantly higher than that of the compound ferrous sulfate fertilizer treatment, which were increased by 31.4% and 54.9%, respectively. In a word, adding ferric citrate to the compound fertilizer during the process of factory production could reach high yield, good quality of peanut in calcareous soil depending on the peanut growth and properties of iron in soil in this experiment.

Keywords: calcareous soil; peanut; iron chlorosis; compound iron fertilizer; availability