植物营养与肥料学报 2002,8(3):344～348
Plant Nutrition and Fertilizer Science

石灰性土壤中铁肥的形态转化及其供铁机理研究

刘文科[1]，杜连凤[2]，刘东臣[2]
（1 中国农业大学资源与环境学院，北京 100094；2 河北农业大学资源与环境科学学院，河北保定 071001）

摘要：通过土培试验的方法，研究了复混铁肥、硫酸亚铁两种肥料在石灰性土壤中的形态转化、对土壤因子的调控作用及在有效性上的差异。结果表明，与硫酸亚铁相比，复混铁肥具有更强的调控土壤因子的能力，并提高了铁在有效和较有效形态中的分配，显著增加了有效铁的供给。结果也表明，交换态铁、碳酸盐结合态铁和氧化锰结合态铁是石灰性土壤中有效铁的主要供给形态。土壤 pH 值、有机质与土壤铁动态密切相关。

关键词：复混铁肥；石灰性土壤；铁形态；有效铁
中图分类号：S143.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2002)03-0344-05

Study on the transformation and iron provision mechanism of iron fertilizers in the calcareous soil

LIU Wen-ke[1], DU Lian-feng[2], LIU Dong-chen[2]
(*1 College of resource and envir. Sci., China Agric. Univ., Beijing 100094, China;*
2 College of resource and envir. Sci., Hebei Agric. Univ. Baoding 071001, China)

Abstract: The iron transformation, their effects on soil factors and iron availability of compound iron fertilizer (CF, self-made iron fertilizer) and sulphate iron($FeSO_4$) in calcareous soil were investigated by using soil incubation method. The results indicated that compound iron fertilizer could improved the distribution in available iron forms, having more powerful ability in regulating soil factors. Treatment with CF contained strikingly more available iron than $FeSO_4$. The results also pointed out that exchangeable iron, carbonate-bound iron and Mn-oxide-binding iron are the main provider of available iron in calcareous soil. In addition, soil organic matter and pH value related closely with the transformation of iron in calcareous soil.

Key words: compound iron fertilizer; calcareous soil; iron forms; available iron

植物缺铁是全球性的问题，分布范围极广。尤其在干旱和半干旱的石灰性土壤地区更为严重。我国西北、华北广大地区土壤缺铁相当普遍，对果树、蔬菜、豆类及大田作物均有危害，尤以果树受害最重。多年来，国内外对造成植物缺铁的原因及防治方法、对植物利用土壤铁的机理做了大量研究工作，取得了一些可喜的进展。但对适合石灰性土壤施用的铁肥品种的研制，对不同铁肥品种施入土壤后的有效性与土壤各相关因子的关系研究不够。因此，目前对造成植物缺铁的原因仍存在多种不同看法，而且至今尚无一种真正既经济又有效的防治措施[1]。其主要的原因之一是土壤中微量元素的有效化过程还未弄清[2]。故此，对土壤中微量元素的形态转化及其有效性研究就十分必要。为了解决华北地区石灰性土壤果树缺铁黄叶病问题，采用科学配方研制了果树专用肥(以下称复混铁肥)。通过苹果园施用试验，此复混铁肥对苹果缺铁黄叶病的矫治效果显著[3]。为揭示此铁肥在石灰性土壤中的形态转化及其有效性机制，了解其供铁的机理，采用土培方法模拟施肥点微区环境(克服了果园取样测定结果的可比性差的缺陷)，研究了该肥复混铁肥及

收稿日期：2001-10-23
基金项目：河北省自然科学基金项目(396109)资助。
作者简介：刘文科(1974—)，男，回族，河北孟村县人，博士研究生，主要从事植物菌根营养与根际营养研究。
本文为作者硕士学位论文的部分内容。

硫酸亚铁肥在土壤中的转化情况。这对研究开发适合石灰性土壤施用的高效经济铁肥品种，提高肥料利用率，具有重要的理论与实践意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用土取自河北农业大学标本园，为潮褐土，其有机质含量为 16.32g/kg，有效 N 77.00 mg/kg，有效 P 68.18 mg/kg，有效 K 102.20 mg/kg，HCO_3^- 456.00 mg/kg，DTPA-Fe 8.88 mg/kg，全 Fe 1.8%，碳酸盐 6.32%，pH 7.74。供试土壤的各形态铁含量(mg/kg)：交换态 Fe 2.02，碳酸盐结合态 Fe 3.12，氧化锰结合态 Fe 11.45，有机结合态 Fe 1.89，无定形氧化铁结合态 Fe 1082.28。土壤经风干、过筛、混匀处理后备用。

复混铁肥为自制，其含有多种营养成分，并辅以酸性物质、有机酸、酸性有机物料及有机添加物。通过分类配制，低温造粒，烘干，按比例混配加工而成。基础肥料为尿素、重过磷酸钙、硫酸钾、硫酸亚铁，有机物料为豆粕，有机酸为黄腐酸和柠檬酸，酸性有机物为柠檬酸渣。其养分含量：$N+P_2O_5+K_2O \geqslant 25\%$，有机质含量≥25%，水分含量≤10%，pH=3.5～4.0，其它各项指标执行复合肥 GB15063－94 国标(含 N，P_2O_5，K_2O，及 Fe 分别为 14.0%，6.0%，5.0% 和 1.6%)。肥料中硫酸钾、硫酸亚铁为分析纯试剂。重过磷酸钙，尿素由市场购入。

1.2 试验设计

试验设：1)CK，2)$FeSO_4$，3)复混铁肥(CF)3 个处理。每处理 15 次重复。肥料与土壤混匀后，装于塑料盆(15cm×12cm×15cm)，每盆装土 1 kg。各处理含有等量的 N、P、K，处理 2、3 含有等量的 Fe；复混铁肥的施肥量为 5g/kg。用称重法浇灌去离子水，在自然条件下培养。培养从 4 月 15 日开始，分别于 4 月 21 日、4 月 27 日、5 月 7 日、5 月 27 日和 6 月 11 日分 5 次取土壤样品。每次每个处理随机取 3 盆，用于测定土壤 DTPA－Fe、有机质、pH、重碳酸盐和碳酸盐含量等指标，第 1 次和第 5 次土壤样品测定土壤各形态铁含量。

1.3 测定方法

土壤铁形态分级与测定采用蒋廷惠[4]改进的形态分级体系和连续浸提法进行：

交换态铁(Exch－Fe)：1mol/L $MgCl_2$(pH 7.0)提取 2h，土液比 1:4；

碳酸盐结合态铁(Carb－Fe)：1 mol/L NaOAC－HOAC(pH 5.0)提取 6h，土液比 1:5；

氧化锰结合态铁(MnOX－Fe)：0.1 mol/L NH_4OH·HCl(HNO_3 调至 pH 2.0)提取 30min，土液比 1:20；

有机结合态铁(OM-Fe)：H_2O_2(HNO_3 调至 pH2.0)于 85℃水浴上氧化，水土比 2:1 处理 2 次，近干勿干后用提取，步骤同交换态 Fe；

无定形氧化铁结合态铁(AOFe-Fe)：pH 3.25 的草酸－草酸铵避光提取 4h，土液比 1:20；

晶形氧化铁结合态铁(COFe-Fe)：0.04mol/L NH_4OH·HCl－25% HOAC 于 96～100 ℃水浴中加热提取 2 次，每次 3h，土液比 1:20；

残渣态铁(RES)：$HClO_4$-HF 消煮。

鉴于最后 2 种形态铁的生物有效性极低，本试验只测定了前 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常规分析法[5]进行。所有待测液 Fe 含量的测定均采用原子吸收分光光度计进行。

2 结果与分析

2.1 复混铁肥对土壤理化性质的影响及其有效化

2.1.1 有机质含量的动态变化　土培过程中，复混铁肥(CF)处理土壤有机质含量在 5 个测定时期均高于其它处理(表 1)。表 1 看出，CF 处理的有机质含量比 CK 和 $FeSO_4$ 处理分别增加了 0.36～0.76 和 0.31～0.81g/kg，增加幅度分别为 2.22%～4.47% 和 1.74%～4.78%。但其增加效应未达到显著水平。$FeSO_4$ 处理土壤有机质的含量在培养初期比 CK 降低 0.33g/kg，但随时间的推移其含量逐渐升高，至第 4 次测定其测定值与对照持平；第 5 次测定则比对照提高 0.33g/kg。分析认为，开始时的低出现象可能是因为肥料施入之初硫酸亚铁的活性较高，影响了有机质测定，使测定值偏低；后期随着亚铁离子在土壤中的氧化固定，其影响减弱。复混铁肥含有较高量的有机成分，含量大于等于 25%，这是它能增加土壤有机质含量的主要原因。

表 1　不同处理土壤有机质的含量 (g/kg)

Table 1　Contents of organic matter of different treatments

处理 Treat.	21 Apr	27 Apr	7 May	27 May	11 Jun
CK	16.18 a	17.01 a	17.05 a	16.77 a	17.18 a
$FeSO_4$	15.85 a	16.96 a	17.05 a	17.08 a	17.51 a
CF	16.54 a	17.77 a	17.51 a	17.46 a	17.82 a

注：表中数据为 3 个重复的平均值，相同字母表示差异不显著，下同。

Note: Data in table is average of 3 replications, different letter means significant at 5% level, same as follows.

2.1.2 土壤 pH 的动态变化　土壤的酸碱度与铁的有效性关系密切。石灰性土壤重碳酸盐含量较高，使土壤具有很强的缓冲能力，造成土壤高 pH 值环境，这是导致植物缺铁的一个很重要的因素。为了解不同肥料施入后对土壤 pH 值的影响，并进一

步探索肥料对改善土壤微区环境的机制，研究中测定了不同处理不同时期土壤 pH 值的变化。表 2 表明，CF 处理与 $FeSO_4$ 和 CK 处理，pH 值均有下降，分别下降了 0.04～0.18 和 0.05～0.22 个单位，相对下降幅度分别为 0.51%～2.28% 和 0.64%～3.03%。CF 处理和 CK 相比，5 个测定时期土壤 pH 值下降均达显著水平，与 $FeSO_4$ 处理相比，只有 3 个时期 PH 值下降达到显著水平。$FeSO_4$ 处理与 CK 相比，土壤 pH 值虽也降低了 0.01～0.12 个单位，但只有 3 个时期达到了显著水平。复混铁肥在降低土壤 pH 值方面优于单施硫酸亚铁肥料，在处理后的时间内，土壤 pH 值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。复混铁肥含有柠檬酸、黄腐酸和柠檬酸渣等多种酸性物质，这是其降低土壤 pH 值的内在原因。这些有机酸物质不仅酸化能力强、成本低，而且均能与铁形成螯合铁，促进土壤铁的生物活性，增加有效铁的供给强度。

表 2 不同处理的 pH 值变化

Table 2 Change of pH value in different treatments

处理 Treat.	21 Apr	27 Apr	7 May	27 May	11 Jun
CK	7.89 a	7.85 a	7.78 a	7.77 a	7.76 a
$FeSO_4$	7.85 a	7.73 b	7.72 b	7.76 a	7.71 ab
CF	7.67 b	7.69 b	7.73 b	7.69 b	7.65 b

2.1.3 土壤碳酸盐含量的变化

在碳酸盐地区缺铁失绿症是由重碳酸盐所造成的。碳酸盐不是诱导植物缺铁的直接土壤因子，但它的含量直接影响土壤重碳酸盐含量。因此了解复混铁肥对土壤碳酸盐含量的影响意义重大。土培过程中，复混铁肥对土壤中碳酸盐含量的影响见表 3。由表 3 可知，复混铁肥对土壤碳酸盐含量有一定的调控作用，但未达显著水平。从 4 月 21 日到 5 月 27 日这段时间内，CF 处理土壤碳酸盐含量较 $FeSO_4$ 和 CK 均有所降低，比 CK 和 $FeSO_4$ 处理最大降低幅度分别达 0.16 和 0.11 个百分点。但调控作用随时间的延长而逐渐降低，到第 5 测定时期，CF 处理和 CK 处理土壤碳酸盐含量已持平；$FeSO_4$ 处理除在第 1 测定时期碳酸盐含量较 CK 下降了 0.08 个单位外，其它几个时期无明显变化。

2.1.5 土培过程中 DTPA－Fe 的动态变化 复混铁肥能提高土壤有机质含量，减少碳酸盐含量，显著降低土壤 pH 值，调节土壤重碳酸盐含量，这些调节作用必创造一个不同于土体的施肥点微域环境，有利于土壤有效铁的供给。在土培过程中不同处理表现出的供铁能力差异显著(表 4)。不同时期 $FeSO_4$ 处理的 DTPA－Fe 含量略高于 CK，但未达显著水平。CF 处理的 DTPA－Fe 含量在 5 个测定时期都显著高于 CK 和 $FeSO_4$ 处理，分别高出 25.00%～196.98 %和 105.36%～154.33 %；增值范围 13.54～17.10 和 13.16～15.13 mg/kg 。由此可见，复混铁肥能显著提高土壤的供铁效能，并显著高于硫酸亚铁，具有较高的持续性。复混铁肥的高供铁性能，除了得益于它对土壤因子的调控作用外，其自含螯合态铁的高生物活性是更为重要的原因。

表 3 不同处理土壤碳酸盐含量的变化

Table 3 Change of carbonate content during incubation in soil with different treatments

处理 Treat.	21 Apr	27 Apr	7 May	27 May	11 Jun
CK	7.13 a	7.05 a	7.01 a	6.89 a	6.74 a
$FeSO_4$	7.05 a	7.09 a	7.05 a	6.83 a	6.73 a
CF	6.97 a	6.98 a	7.04 a	6.79 a	6.74 a

表 4 不同处理土壤 DTPA－Fe 的含量

Table 4 The content of DTPA－Fe of soil with different treatments

处理 Treat.	21 Apr	27 Apr	7 May	27 May	11 Jun
CK	11.40 b	9.69 b	10.67 b	9.35 b	8.48 b
$FeSO_4$	12.49 b	11.46 b	10.78 b	10.53 b	11.44 b
CF	25.65 a	26.59 a	24.21 a	23.78 a	25.18 a

2.2 土培过程中各形态铁的动态变化

复混铁肥显著增加了土壤有效铁的供给，这种变化必然将反映在铁的形态转化上。为了了解复混铁肥在石灰性土壤中的形态转化特征，试验中测定了第 1 和第 5 次土壤样品的各形态铁的含量。由表 5 可知，$FeSO_4$ 和 CF 处理的交换态铁、碳酸盐结合态铁和氧化锰结合态铁在 2 个时期处理间差异显著，以 CF 处理最高。这表明在施肥初期，硫酸亚铁和复混铁肥均能显著提高土壤交换态铁、碳酸盐结合态铁、氧化锰结合态铁的含量。但经过 51d 的培养，到 6 月 11 日，处理间差异虽仍显著，可 $FeSO_4$ 处理土壤铁在此 3 种铁形态上的分配量较 4 月 21 日测定值显著降低，而 CF 处理却保持了施入初期的

水平。这主要原因是硫酸亚铁施入土壤后极易被氧化失活,而复混铁肥内含有机包蔽体和螯合剂,使铁以较稳定的螯合铁形式存在,加之对土壤环境因子的调节作用,降低了铁的氧化失活。在此3种铁形态中,氧化锰结合态铁的含量最高。在第1测定时期,复混铁肥处理土壤有机结合态铁的影响不大,但略有增加;第2测定时期,CF处理的有机结合态铁含量显著高于CK,且CF处理显著高于$FeSO_4$处理。这主要是因为有机结合态铁的形成需较长时间,需腐殖质的形成与存在。复混铁肥加入的有机质在短期内难以对有机结合态铁数量的增加作出较大贡献。

表5　不同处理各形态铁的变化(mg/kg)

Table 5　Change of various Fe forms in soil with different treatments

测定日期(日/月) Date(d/mon)	处理 Treatment	交换态 Exch-Fe	碳酸盐结合态 Carb-Fe	氧化锰结合态 Mnox-Fe	有机结合态 OM-Fe	无定形氧化铁结合态 AOFe-Fe
21/4	CK	0.82 c	2.59 c	8.07 c	1.49 a	1111.15 b
	$FeSO_4$	3.50 b	3.18 b	11.39 b	1.54 a	1141.40 a
	CF	3.86 a	3.30 a	15.50 a	1.56 a	1122.80 b
11/6	CK	0.78 c	3.06 c	9.27 c	1.55 c	1104.50 b
	$FeSO_4$	1.86 b	3.17 b	11.73 b	1.68 b	1146.00 a
	CF	3.34 a	3.58 a	15.22 a	1.84 a	1142.60 a

第1测定时期CF处理土壤无定形氧化铁结合态铁含量略高于CK,而显著低于$FeSO_4$处理;第5测定时期,CK处理降低到了第1时期的99.7%;而$FeSO_4$和CF处理却有增加,含量显著高于CK。由此可知,与硫酸亚铁相比,复混铁肥自身铁分配在直接有效或较有效的铁形态中的比例较高,而在无定形氧化铁结合态铁中的分配较低,可见土壤铁的无效化过程被延迟。$FeSO_4$处理中施入的外源铁在第1测定时期有大部分转移分配在无效和较无效态铁中,第5测定时期,在前4种形态变化不大的情况下此形态铁含量增加,表明复混铁肥对土壤因子的调控作用产生了影响。研究表明,交换态铁、碳酸盐结合态铁、氧化锰结合态铁、有机结合态铁和无定形氧化铁结合态铁是土壤铁的有效或较有效形态[6~9]。复混铁肥与硫酸亚铁相比,最终提高土壤上述5种形态铁中前4种形态铁的含量,这必对铁的有效性产生积极的影响。

2.3　土壤DTPA-Fe与各形态铁、土壤理化性质间的相关性分析

土壤DTPA-Fe含量与土壤的理化性质关系密切,尤其是与土壤的pH值、氧化还原电位、有机质含量。把在试验中所得的DTPA-Fe含量分别与土壤pH值、有机质和碳酸盐含量进行相关性分析。结果表明,土壤DTPA-Fe与pH值达到显著负相关($r = -0.6585^*$),表明土壤pH对土壤DTPA-Fe有较强的制约作用,对铁的有效性影响巨大。土壤DTPA-Fe与有机质和碳酸盐之间均未达到显著相关($r = 0.4385$和-0.1204)。

DTPA-Fe与氧化锰结合态铁之间有显著相关性($r = 0.9149^*$),表明这种含量较高的铁形态(与交换态铁、碳酸盐结合态铁比较)是土壤DTPA-Fe的主要供给形态;DTPA-Fe与交换态铁、碳酸盐结合态铁和有机结合态铁间的相关性虽未达到显著水平,但相关系数较高($r = 0.7733$、0.6836和0.5228)。表明土壤DTPA-Fe是由多种形态的铁来供给的,其中以交换态铁、碳酸盐结合态铁、氧化锰结合态铁、有机结合态铁为主。土壤DTPA-Fe供应的强度取决于这些形态铁的多寡。这结论与前人的许多研究结论一致。交换态铁是土壤有效态铁已为人们所公认,试验中它与DTPA-Fe之间未达到显著相关,可能是因为土壤样品在风干过程中,交换态铁发生了变化,使风干土测定值不能真实地反应田间条件下的状况。这与吕世华[10]、蒋廷惠[8]所得结论一致。

2.4　土壤各形态铁间的相关性分析

土壤各形态铁处于动态平衡之中,相互影响。对土壤各形态铁进行相关性分析结果看出,氧化锰结合态铁与交换态铁、碳酸盐结合态铁间存在显著相关性($r = 0.8668^*$、0.8781^*),说明在土壤铁形态的动态平衡中,此3种铁形态间的转化密切相关,存在着互动作用。氧化锰结合态铁有利于DTPA-Fe的形成,是其主要的供给形态,对DTPA-Fe有一定的贡献。复混铁肥处理土壤中氧化锰结合态铁、交换态铁和碳酸盐结合态铁的高含量,表明了其

供铁能力高于硫酸亚铁。

2.5 土壤各形态铁与土壤理化性质间的相关性分析

土壤各铁形态分级是建立在铁与土壤不同固相组分结合方式的差异上,故土壤理化性质对铁形态的存在有重大的影响。对各形态铁含量分别与土壤pH值、有机质和碳酸盐含量进行相关性分析结果表明,土壤氧化锰结合态铁、碳酸盐结合态铁与pH值呈负相关($r = -0.8301^*$、-0.7335),有机结合态铁与土壤有机质含量显著正相关($r = 0.8273^*$)。表明土壤pH和有机质对土壤铁形态转化影响巨大,因此通过调控土壤理化性状,改善土壤环境可改变铁在各形态铁中的分配,提高土壤铁的有效性,增加土壤DTPA-Fe含量。复混铁肥能显著降低土壤pH值,增加土壤有机质含量,使土壤营造了有利于铁活化的微域环境,增加了有效铁的供给。除施肥以外,调控土壤pH和有机质含量是最为有效的途径。通过施用酸化剂和增施有机肥是目前大田增加铁素有效性的主要农艺措施。

3 讨论

3.1 土壤环境是决定土壤铁(含肥料铁)赋存形态、转化和生物有效性的主要因素之一。故此,通过肥料的施用来调控土壤因子,以提高土壤铁的生物有效性是一条可行的并具有实践意义的途径。有报道,土壤有机质、pH值与土壤铁的有效性密切相关,是控制土壤有效铁含量的主要土壤因子[11]。本文试验结果表明,土壤有效铁、碳酸盐结合态铁、氧化锰结合态铁与土壤pH值间呈显著负相关,有机结合态铁与土壤有机质含量间呈显著正相关。复混铁肥与硫酸亚铁肥均有调控土壤因子的能力,前者在调控力度上显著高于后者,且时效性强。复混铁肥组分中含有的有机酸、酸性物质、酸性有机物料是调控土壤因子的主要物质,也是此肥在调控能力上显著高于硫酸亚铁肥的内在原因。除了能调控土壤因子,复混铁肥中的部分铁素可在肥料的配制或施入土壤后转化为有机螯合铁,提高了铁的稳定性和有效性。上述两机制是复混铁肥高效供铁的主要机理所在。此外,复混铁肥中含有的有机物质、有机酸、矿物元素等可能为土壤微生物提供了较好的生态环境,加速了土壤生物化学过程,对土壤铁的形态转化势必产生影响;为提高复混铁肥的有效性,其各种组分尤其是有机组分的最优配比,有待于进一步深入研究,为最终研制出适宜于石灰性土壤施用的低成本、高效的铁肥品种提供依据。

3.2 土壤有效铁与氧化锰结合态铁间呈显著正相关,交换态铁、碳酸盐结合态铁与氧化锰结合态铁间呈显著正相关,此3种形态铁是土壤有效铁的主要提供形态。与硫酸亚铁相比,复混铁肥显著提高了交换态铁、碳酸盐结合态铁、氧化锰结合态铁和有机结合态铁的含量,表明此肥能把肥料铁优先分配到有效或较有效的铁形态中,此土壤过程的形态特征,是其有效铁显著高于硫酸亚铁的化学形态基础。如何更有效地利用土壤因子、土壤铁形态转化及铁的有效性间的互动关系,并施用适量的高效铁肥,是提高石灰性土壤铁的有效供给,防治植物铁营养缺乏所造成的失绿症的实践途径。

参考文献:

[1] 李银国,伊克宁,王树良. 果树缺铁黄化的研究进展[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997,6(2): 129-133.

[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.

[3] 刘东臣, 刘藏珍,谭俊璞,等. 根际操作施肥矫正苹果缺铁黄叶病的研究[J]. 河北农业大学学报,1999,22(4):19-22.

[4] 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.

[5] 中国土壤学会土壤农业化学委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版社, 1983.

[6] 高明,车福才,魏朝福,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.

[7] 杨永岗,翟海,胡霭堂. 泥炭和牛粪对土壤中微量元素活性的影响[J]. 土壤通报,1999,30(50):214-216.

[8] 蒋廷惠,胡霭堂. 土壤中Zn, Cu, Fe, Mn的形态及有效性的关系[J]. 土壤通报,1989,20(5): 228-231.

[9] Marschner H, Romheld V. Strategies of plants for acqisition of iron [A]. *In*: Abadia J (ed.). Iron nutrition in soils and plants[M]. Kluwer academic publishers, the Netherlands. 1991. 375-388.

[10] 吕世华,刘本洪,胡思农. 不同耕作方式下石灰性土壤锰、铁形态的研究[J]. 土壤通报,1995,26(2):70-72.

[11] 刘文科,王国英,杜连凤,等. 果树专用肥供铁机理的研究[J]. 土壤肥料,2001,4:29-31.