

## 铁肥管道输液滴干对苹果铁营养的影响

薛进军<sup>1,2</sup>, 田自武<sup>1</sup>, 崔美香<sup>1</sup>, 刘贵巧<sup>1</sup>, 刘子英<sup>1</sup>, 赵志军<sup>1</sup>, 杨青琴<sup>1</sup>, 马幸幸<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup>河北工程大学, 河北邯郸 056000; <sup>2</sup>广西大学, 南宁 530004)

**摘要:**【目的】通过铁肥管道输液滴干, 探索防止苹果缺铁失绿症和提高果实铁含量的途径。【方法】将Fe-N通过管道、滴头直接插入苹果树干, 测定不同器官的全铁、活性铁含量, 叶片叶绿素相对含量(SPAD值), 百叶重、百叶厚、叶绿素荧光、SPAD与活性铁的相关性。【结果】 $16.4 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  N-Fe处理的叶片SPAD值(57.43)、百叶重(66.57 g)、百叶厚(5.90 cm)、全铁(788.9 mg·kg<sup>-1</sup>)及活性铁(526.5 mg·kg<sup>-1</sup>)含量显著高于对照, 光能转化率和不同器官的活性铁含量也以 $16.4 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理最高, 所有铁处理果实中的铁含量都显著高于对照。叶片SPAD值与活性铁含量显著正相关(相关系数0.899)。【结论】铁肥管道输液滴干可以防止苹果缺铁失绿症, 并显著提高果实铁含量, 提高叶片光合性能, 可以通过SPAD值折算叶片活性铁含量。

关键词: 苹果; 铁营养; 铁肥; 管道输液滴干; 叶片光合性能

中图分类号:S661.1

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2017)12-1537-08

## Effect of iron fertilization through pipe transfusion to trunk on iron nutrition in apple

XUE Jinjun<sup>1,2</sup>, TIAN Ziwu<sup>1</sup>, CUI Meixiang<sup>1</sup>, LIU Guiqiao<sup>1</sup>, LIU Ziying<sup>1</sup>, ZHAO Zhijun<sup>1</sup>, YANG Qingqin<sup>1</sup>, MA Xingxing<sup>2\*</sup>

(Hebei University of Engineering, Handan 056000, Hebei, China; <sup>2</sup>Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

**Abstract:**【Objective】Iron deficiency chlorosis is still causing huge losses to crop yield and quality in calcareous soils. The correction methods using iron fertilizer include soil application, spraying, injection and so on, but there are still some problems. Therefore, exploring new ways of the iron fertilization to improve apple iron nutrition is needed. 【Methods】The container for holding iron fertilizer solution was a tank made of bricks. The main pipe was a PVC pipe, and the branch pipes were made from PE. The soft capillary pipes had an internal diameter of 0.4 mm. One end of the capillary pipes was inserted into the branch pipe, and the other end connected to a dripper with a flow rate of  $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  that was inserted into the trunk, with one dripper per tree. The iron fertilizer used was Fe-N. The contents of the total iron and active iron in leaves, flowers, xylem and phloem of new shoots and fruits were measured; relative content of chlorophylls (SPAD value), leaf weight, leaf thickness, and chlorophyll fluorescence were determined; and the correlation between SPAD and active iron was analyzed.【Results】Leaf SPAD values increased significantly and the leaves showed no symptom of chlorosis after infusion with iron fertilizer. The leaf SPAD values, leaf weight, leaf thickness, and the contents of total iron and active iron in the treatment with  $16.4 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  N-Fe (T1) were significantly higher than those in control. The chlorophyll fluorescence parameters of the leaves were affected by drip transfusion with different concentrations of Fe-N solution. Among them, the relative rate of electron transfer (ETR),  $\Phi_{PSII}$ , the actual quantum yield (Yield), PS potential activity of ( $F_v/F_0$ ), maximal fluorescence yield ( $F_m$ ), the primary energy conversion efficiency of PS II ( $F_v/F_m$ )

收稿日期: 2017-06-26 接受日期: 2017-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(31572198)

作者简介: 薛进军, 男, 教授, 博士, 主要从事果树栽培与生理研究。Tel:13878100499, E-mail:xuejinjun@163.com

\*通信作者 Author for correspondence. Tel:13414901280, E-mail:xingangle@nwsuaf.edu.cn

were higher in T1 than in the control. The total iron content in the shoot xylem had no significant difference between treatment and control, but the active iron content in T1 was significantly higher than the other treatments. The active Fe contents in the phloem in T1 and T2 were significantly higher than that in the control. The contents of total iron and active iron in the flower were significantly increased by iron treatments at the three concentrations, and so were those in the fruit. The leaf SPAD value was positively correlated with active iron content. **【Conclusion】**Iron fertilization through the pipe infusion to the trunk not only prevents leaf chlorosis but also significantly increases the iron content in the fruit and improves fruit quality. This method of iron fertilization has significant advantages such as high utilization efficiency of iron fertilizer, simple operation, and labor saving, and is currently the best iron fertilizer application method. The active iron content in apple flowers and in the phloem can be used to predict chlorosis incidence caused by iron deficiency, thus iron fertilizer can be applied in time to prevent the disorder. The good correlation between leaf SPAD value and the content of active iron makes it possible to estimate the active iron content in leaves with SPAD value.

**Key words:** Apple; Fe nutrition; Fe fertilizer; Trunk transfusion; Leaf photosynthetic performance

盐渍土壤上的作物缺铁失绿症一直困扰着人类,我国盐渍土超过3 333.33万hm<sup>2</sup>,其中约666.67万hm<sup>2</sup>分布于农田,占全国耕地面积的7%左右。盐渍土泛指含盐量大于0.1%、或土壤pH值>8.0,钠盐化度(ESP)大于5%时一系列土壤类型的总称;包括盐土及碱土两个土类<sup>[1]</sup>。我国的盐渍土类型多,分布广,从滨海到内陆,从低地到高原,都有盐碱化土壤的分布。据统计,全世界具有潜在性缺铁的土壤占世界耕地面积的40%。世界上的主要果树,如苹果、柑橘、葡萄、梨、桃、香蕉等对缺铁都非常敏感。缺铁失绿导致苹果树大幅度减产,严重时超过90%,有的甚至整株死亡。铁是植物生长的必需元素,叶绿素的合成、呼吸作用以及植物体内的氧化还原反应和电子传递都需要铁的参与。在有效光合辐射内,正常植株幼叶的净同化率比缺铁处理植株高2~4倍<sup>[2]</sup>。自从1843年从葡萄上确定缺铁黄化以来<sup>[3]</sup>,人类为解决缺铁失绿症问题进行了一个多世纪的研

究,遗憾的是缺铁失绿症至今仍在石灰性土壤上给作物产量和品质造成巨大损失。盐渍土壤的高pH值和高HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量导致铁极易氧化为三价铁<sup>[4]</sup>,而果树、林木等双子叶植物的根系只能吸收土壤中的二价铁,因此这类植物最容易缺铁<sup>[5]</sup>。为了防止铁的氧化,在铁肥方面做了大量研究,包括各种螯合铁肥和有机铁肥<sup>[6~8]</sup>;在铁肥施用方法上主要思路是使铁肥直接进入树体,防止土施和喷施接触空气而被氧化。直接进入树体的方法有根系输液、强力高压注射(输液)、吊袋(瓶)输液等<sup>[9~11]</sup>。为了解决果树、林木缺铁失绿症,培育抗缺铁基因的砧木也做了大量研究<sup>[12~14]</sup>。从目前情况看,对于大量生长在盐渍土壤上的果树、林木,将铁肥直接输入树体是解决缺铁失绿症最有效途径。我们通过长期的研究证明,铁肥根系输液、强力高压注射、吊袋输液等虽然都取得了一定成果<sup>[15~17]</sup>(图1-A~C)。但是普遍存在操作难、工效低、铁肥进入树体后分布有局限性、铁肥进



A. 根系输液;B. 高压注射;C. 吊袋虹吸输液;D. 管道输液滴干。

A. Root transfusion; B. High press injection; C. Siphon infusion with hanging bag; D. Pipe transfusion and drip to trunk.

图1 不同方式的输液

Fig. 1 Different forms of infusion

入树体的量难控制等问题。因此,进一步开展了铁肥管道输液滴干在防止苹果缺失绿症和提高叶片光合性能的研究。

## 1 材料和方法

试验于2015—2017年在河北省邯郸县姚寨乡苹果园进行,土质为黄绵土,土壤pH值8.2,土壤有机质质量分数 $13.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,试验材料为6 a生‘中秋王’苹果品种,基砧八棱海棠,中间砧SH6,株行距 $2\text{ m}\times 4\text{ m}$ ,南北行向,试验树长势良好,栽培管理条件一致。

管道输液滴干于2015年9月中旬铺设,盛铁肥的容器为砖制水池,主管为PVC管,支管PE管,毛管是内径为0.4 mm的软管,毛管的一端插入支管,另一端连流速为 $2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的滴头,滴头插入树干,每株树1个滴头(图1-D)。

试验处理参照文献[17],设置以下浓度:(1) $16.4\times 10^{-3}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液,简称T1;(2) $8.22\times 10^{-3}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液,简称T2;(3) $5.22\times 10^{-3}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液,简称T3;(4)不做任何处理为对照,简称T4。每次每株输液滴干2 L,每处理100株树。各处理分别取5株作为试验树,单株区组,5次重复。

2016年3月15日进行第1次管道输液滴干,以后每10 d输液滴干1次。5月15日当对照叶片开始显现缺铁黄化时,测定不同处理叶绿素相对含量(用SPAD-502手持叶绿素速测仪测定)、百叶重、百叶厚;叶绿素荧光用德国生产的PAM-2100便携式荧光仪测定。

叶片全铁含量测定。于2016年3月15日(处理前)和5月15日分别进行采样,采样时按照东西南北中5个方位采集新梢的第5至8片叶,每株树采集15枚叶片,叶片采后立即用肥皂水洗净,再用蒸馏水冲洗,滤纸吸干表面水分,而后用硫酸纸包裹,放入干燥箱,105 °C杀青20 min,70 °C下烘72 h,经粉碎、碳化、灰化,用 $1.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸溶解,过滤后定容,用原子吸收分光光度计测定叶片全铁含量。

叶片活性铁含量测定。从3月15日和5月15日样品中分别称取1 g叶片鲜样,加入 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸浸提24 h,取1 mL浸提液,依次加入邻啡罗啉(0.15%)溶液、 $\text{NH}_4\text{F}(3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})$ 溶液和 $\text{NaAc}(1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})$ 缓冲液,显色30 min,紫外分光光度计于510 nm波长处测吸光度<sup>[6]</sup>。

SPAD与活性铁含量相关性测定。将叶片按黄

化等级分为一级:叶片正常;二级:叶片呈淡绿色;三级:叶肉呈淡黄色,叶脉呈淡绿色;四级:叶肉叶脉均呈黄色或灰白色,甚至有坏死斑点或穿孔。每一等级采集15个样品,每个样品含不同等级叶片5枚。分别测定不同样品叶片的SPAD值和二价铁含量,根据所测数据做回归方程。

花、新梢全铁含量及活性铁含量测定。2016年4月20日,按照东西南北中方向采集每株树冠外围中部花约50朵、新梢测定全铁及活性铁,测定方法同叶片。

果实铁含量测定。2016年9月10日,按照东西南北中方向采集外围中部有代表性的果实,每一方向采集3个果实,每株采集15个果实,果实全铁含量测定同叶片。

用邓肯氏新复极差法对试验数据进行显著性测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对叶片SPAD、百叶重及百叶厚的影响

从表1可以看出,在管道输液滴干铁肥后叶片SPAD值较对照均有明显增加,没有表现黄化症状。其中,SPAD值最高的是T1,为57.43,其次是T2,为46.53,不做任何处理的叶片SPAD值最小,为20.28,黄化明显。由此说明,铁肥输液滴干显著提高了叶片的叶绿素水平,其中以 $16.4\times 10^{-3}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理效果最好。就百叶重、百叶厚而言,铁肥输液滴干处理明显提高了叶片的百叶重和百叶厚水平,其中T1的百叶重增加明显,为66.57 g,这可能是因为处理提高了叶片的光合能力,使有机物贮存增加。

表1 不同处理对叶片SPAD、百叶重及百叶厚的影响

Table 1 The influence of iron treatments on SPAD value, hecto-leaf weight and thickness

Treatment	SPAD	百叶重 Hecto-leaf weight/g	百叶厚 Hecto-leaf thickness/cm
T1	57.43 a	66.57 a	5.90 a
T2	46.53 b	54.29 b	5.85 a
T3	35.95 c	43.49 c	5.80 a
T4	20.28 d	35.28 d	5.40 b

注:同列数字后的小写英文字母不同表示在0.05水平上达到显著性差异。下同。

Note: The different small letters following the means in the same column represent significant difference at 0.05 level. The same below.

### 2.2 不同处理对叶片叶绿素荧光参数的影响

铁元素的含量与光合效率的高低密切相关。而

叶绿素荧光参数的变化可直接和间接反映植物光合作用的具体状态,探测植物体的各种信息<sup>[16,18]</sup>。

从表2可看出,输液滴干不同浓度Fe-N溶液对叶片的叶绿素荧光参数均产生了影响。其中,T1的相对电子传递速率(ETR)、PS II实际光量子产量(Yield)、PS II潜在活性( $F/F_0$ )、最大荧光产量( $F_m$ )、PS II原初光能转化效率( $F/F_m$ )均高于对照,分别为46.61、0.290 0、36.17、855.7和0.972 5。

相对电子传递速率(ETR)反映了光合电子的传递速率,其中T1的电子传递速率最大,说明 $16.4 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup>处理极大地提高了植物的电子传递速率;光化学淬灭系数(qP)反映了PS II反应中心的开放程度及光合活性的高低,而非光化学淬灭系数(NPQ)则反映了植物转换过剩光能为热能的能力,输液滴干铁肥处理的光化学淬灭系数和其他处理无显著性差异,而其非光化学淬灭系数低于对照,说明输液滴干铁肥处理的PS II的反应中心对强光的保护能力及活性相比对照提高明显;PS II实际光量子产量反映了PS II反应中心在有部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率,其中,T1和T2的实际光量子产量最高,且和其他处理间存在显著性差异;PS II潜在活性( $F/F_0$ )表示PS II潜在光化学活性,输液滴干铁肥处理的PS II潜在活性显著高于无管道输液的处理,且以T1最显著,因此,输液滴干铁肥处理提高了叶片的潜在光化学活性;最大荧光产量( $F_m$ )表示PS II反应中心在完全关闭状态时的荧光产量,反映了通过PS II的电子传递情况,输液滴干铁肥处理的最大荧光产量显著高于对照,且T1的最大荧光产量

表2 不同处理对叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 2 The influence of iron treatments on chlorophyll fluorescence parameters in apple leaves

	T1	T2	T3	T4
相对电子传递速率 ETR	46.61 a	43.1 b	39.28 c	20.18 d
光化学淬灭系数 qP	0.729 0 a	0.701 9 a	0.677 6 a	0.684 0 a
非光化学淬灭系数 NPQ	1.721 a	1.732 a	1.788 a	1.344 b
PS II实际光量子产量 Yield	0.290 0 a	0.291 0 a	0.274 1 b	0.192 0 d
PS II潜在活性 $F/F_0$	36.17 a	13.024 b	10.92 c	0.994 1 d
最大荧光产量 $F_m$	855.7 a	744.4 b	741.1 b	168.5 d
PS II原初光能转化效率 $F/F_m$	0.972 5 a	0.928 7 b	0.916 1 c	0.518 5 d

最高,说明了输液滴干铁肥处理的电子传递情况优于对照,且以T1效果最好;PS II原初光能转化效率( $F/F_m$ )反映了PS II的最大光能转化效率,其中,输液滴干铁肥处理的最大光能转化效率显著高于对照,且T1的最大光能转化效率最高。

### 2.3 不同处理对叶片铁含量的影响

二价铁通常被认为是活性铁,从表3可看出,铁肥输液滴干后的叶片全铁及活性铁含量较对照均有明显增加,提高叶片的活性铁含量的原因可能是部分亚铁通过管道输液滴干被叶片直接吸收后,仍以活性铁的形式存在。全铁含量和活性铁含量均以 $16.4 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup> N-Fe 处理最高,其全铁和活性铁含量较处理前分别增加158.0%和277.4%;其次为 $8.22 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup> N-Fe 处理和 $5.22 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup> N-Fe 处理;对照叶片的全铁和活性铁含量最低,且其含量前后变化不明显。

表3 不同处理对叶片铁含量的影响

Table 3 The effect of different treatments on iron contents in leaves

Treatment 处理	$\omega/(mg \cdot kg^{-1})$				增值 Add/%	
	处理前 Before treatment		处理后 After treatment		全铁 Total iron	活性铁 Active iron
	全铁 Total iron	活性铁 Active iron	全铁 Total iron	活性铁 Active iron		
T1	305.8 a	139.5 a	788.9 a	526.5 a	158.0 a	277.40 a
T2	323.4 a	128.6 a	494.8 b	322.0 b	53.00 b	150.40 b
T3	272.6 a	123.9 a	324.0 c	216.5 c	18.86 c	74.74 c
T4	257.8 a	112.8 a	289.0 d	106.4 d	12.10 d	-5.674 d

### 2.4 不同黄化等级叶片SPAD值与活性铁含量的关系

图2显示了SPAD与活性铁的相关性。用苹果不同黄化等级叶片活性铁含量与叶片SPAD值进行相关性分析,结果表明,叶片活性铁含量与叶片SPAD值呈现良好的线性关系,相关系数达0.899。叶片SPAD值与叶片活性铁含量呈现良好的相关性,表明叶片黄化主要是活性铁含量低所致,同时也说明用叶片SPAD值作为苹果缺铁诊断具有一定的可靠性,根据回归方程,可以通过SPAD值测定活性铁。

### 2.5 铁在花和新梢中的含量

Karagiannidis等<sup>[19]</sup>发现,根据桃花和韧皮部中铁含量可以提前预测缺铁失绿症的程度,从而及早采

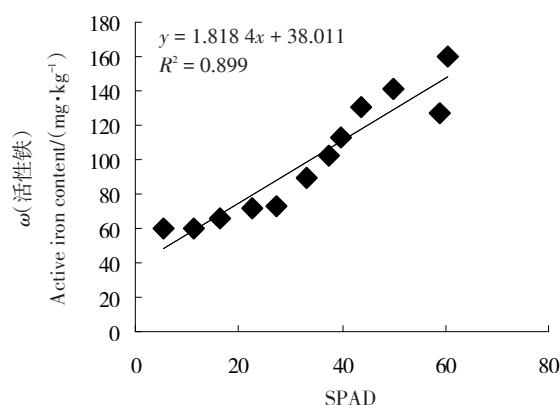


图2 叶片SPAD值与活性铁含量的关系

Fig. 2 The relationship between SPAD and active iron content in leaves

取措施进行矫正。我们的试验表明,3个铁浓度处理花中的全铁和活性铁都显著高于对照(表4),说明苹果花中的铁含量也可以预测叶片的失绿症。新梢木质部全铁含量处理和对照没有明显差异,活性铁含量T1显著高于其他处理,其他3个处理没有测到。韧皮部活性铁含量T1、T2处理明显高于对照,全铁含量与对照差异不显著(表4),说明韧皮部活性铁含量可以预测缺铁失绿症。

表4 铁在不同器官中的含量

Table 4 The contents of iron in different organs  
(mg·kg⁻¹)

器官 Organ	T1	T2	T3	T4
花全铁 Total iron of flower	188.0±30 a	161.3±60 a	170.0±45 a	98.7±56 b
花活性铁 Active iron of flower	62.8±68 a	54.9±49 a	61.7±50 a	28.8±22 b
木质部全铁 Total iron of xylem	186.6±32 a	185.3±16 a	184.0±23 a	166.9±8 a
木质部活性铁 Active iron of xylem	2.4±1.1 a	0±0 b	0±0 b	0±0 b
韧皮部全铁 Total iron of phloem	35.3±23 a	26.5±29 a	32.0±16 a	22.0±27 a
韧皮部活性铁 Active iron of phloem	15.3±43 a	13.7±24 ab	17.0±26 b	14.0±16 b

## 2.6 铁在果实不同部位的含量

Nadala等<sup>[20]</sup>认为,通过植物食物为人类供铁被认为是解决全球缺铁贫血的最好办法。管道输液滴干给苹果定时输铁,不仅防止了叶片缺铁失绿症,而且显著增加了苹果果实的含铁量。从表5可以看出,铁肥输液滴干显著增加了果实不同部位铁的含量,果皮增加最多,其次为果肉,果心增加最少。我

表5 不同处理苹果果实器官全铁含量

Table 5 Total iron contents in apple fruit tissues under different treatments (mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	果皮全铁 Total iron of peel	果肉全铁 Total iron of sarcocarp	果心全铁 Total iron of core
T1	43.55±1.27 a	29.95±0.52 a	16.64±0.85 a
T2	45.91±0.85 a	26.77±0.99 a	17.05±0.82 a
T3	43.64±0.58 a	23.59±0.91 a	15.51±0.99 a
T4	21.88±0.49 b	11.40±0.95 b	10.26±0.82 b

们用邻菲罗林根系输液示踪表明,铁肥是从维管束进入果实,说明通过了韧皮部和木质部,而输液滴干和根系输液一样,通过叶片蒸腾拉力向上运输的铁也是通过靠近形成层的木质部向上运输到各个器官<sup>[16]</sup>,不同的是输液滴干的铁肥大部分进入根系被吸收,被根系吸收的铁主要通过韧皮部进入果实,这可能是果皮铁含量增加最多的原因。

## 3 讨论

### 3.1 纠正缺铁失绿症途径

尽管铁肥施到土壤中以后容易受到各种因素的影响而被固定,但没有影响土施铁肥作为一条纠正缺铁失绿症的途径,人工合成的螯合铁成为纠正缺铁失绿症的选择<sup>[21]</sup>。最常用的螯合物是EDTA和EDDHA,EDTA铁肥在酸性至近中性土壤上效果更好,EDDHA铁肥在pH 4~9有效<sup>[22]</sup>。当螯合铁肥施入土壤时,根际铁含量迅速由50 μmol·L⁻¹升至10 mmol·L⁻¹,这种根际高铁量情况可持续几天甚至几周<sup>[23]</sup>。西班牙10 a生桃树用EDDAH/Fe<sup>3+</sup>、HBED/Fe<sup>3+</sup>和HJB/Fe<sup>3+</sup>分别注射到地下5 cm(滴灌滴头正下方)获得了较好的效果<sup>[20]</sup>。种植在石灰性土壤上缺铁失绿严重的16~25 a生温州蜜柑4月份每株施4.8 g EDDAH/Fe<sup>3+</sup>显著改善了铁营养状况,但是造成锌、镁、磷、锰降低<sup>[24]</sup>。因为螯合铁是水溶性的,容易被淋溶,还可能吸附重金属造成土壤污染,而且螯合铁成本高,所以限制了其使用<sup>[23]</sup>。研究者探索了很多提高树冠喷施纠正缺铁失绿症效果的措施。给向日葵缺铁黄化的叶喷柠檬酸使质外体pH值降至5~5.5,获得了显著复绿效果,但是叶面喷铁不能增加根中铁含量<sup>[26]</sup>。Kastori等<sup>[27]</sup>报道,苹果缺铁黄化树落花期开始喷螯合铁,每15 d喷1次,共3~4次,能有效地纠正缺铁失绿。Grewal<sup>[28]</sup>报道,桃品种‘Flordasun’于4月末、刚开始出现缺铁失绿症时,喷0.8% ZnSO<sub>4</sub>+0.8% FeSO<sub>4</sub>+0.4%生石灰,喷量以药液下滴为

止,其复绿效果高于叶喷0.2% EDTA-Fe,叶片中铁、锌含量分别达到了 $204\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。西班牙的Alcántara等<sup>[12]</sup>认为土施或叶面喷施铁肥成本昂贵而且不能从根本上改善植物铁营养。

对果树进行输液(注射)由于避免了铁在土壤或空气中的被固定,矫正缺铁失绿症效果较好<sup>[29-30]</sup>,在落叶树和常绿树上都有应用。输液(注射)包括根系输液、树干强力高压注射、树干输液等。范明<sup>[31]</sup>用埋瓶吸铁法矫治柑橘缺铁黄化病获得了较好的效果。李凤岭<sup>[32]</sup>报道,若树的一侧发病,则需要在树的对侧埋瓶。邻二氮杂菲铁根系输液示踪表明,铁肥沿插入铁液的根向上运输,并不是在发病枝的对侧“埋瓶”,而是要在发病枝的同侧进行根系输液<sup>[17]</sup>。采用根系输液的方法向缺铁黄化树体内供铁,叶片的蒸腾作用是其运输的主要动力,因此输入的铁主要运往叶片中。根系输液的铁肥在分配上具有一定的局限性,适当增加铁液输根的数量和所输根的粗度有助于解决这一问题。根系输液虽然由来已久,矫正缺铁黄化效果也较好,最大的缺点是刨根比较费工。

树干强力高压注射国内外试验报道比较多。巴梨品种注入蒸馏水或 $0.1\%(\rho)\text{FeSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ ,根据树干直径确定输入量,其回归方程为 $V=2.503-0.607D+4.187D^2$ [V:输入量(mL),D:树干直径(cm)],适应范围:干径<8.5 cm],所得V再加15 mL(注射损耗)。用SPAD-502叶绿素测定仪测定叶子的绿色,注铁处理的叶片绿色平均数为34.7,注水的为27.3<sup>[33]</sup>。严重缺铁失绿的6 a生秋白梨主干强力高压注射1%硫酸亚铁(6 g)效果最好,注射后10 d开始复绿,43 d失绿完全消失,且持续到落叶,对叶片结构显著修复<sup>[34]</sup>。Espada<sup>[35]</sup>对土壤pH值7.85条件下缺铁失绿桃树进行以下处理:(1)用硫酸亚铁+柠檬酸在2或4月注射树干;(2)4月用EDTA-Fe溶液注射树干;(3)土施螯合铁(每株60 L,螯合铁质量浓度为: $2\text{ kg 融合铁}\cdot\text{L}^{-1}$ 水)。处理(1)和(2)到9月份分别有83.33%和66.66%的树无失绿症,而处理(3)为33.33%,处理(1)中2月施用的引起严重落叶。树干输液与根系输液和强力高压注射相比优点在于简单易行、省工。吊袋输液在大树移栽、乙烯利吊袋促进橡胶树流胶量等方面已有应用。虹吸输液是我们的一个专利<sup>[36]</sup>,比吊袋输液成本低很多,输液容器种类和大小根据需要灵活制定,输液内容物自行调配。铁肥运输途径与根系输液一样,靠近形成层的木质

部运输,复绿快,但是持效期没有强力高压注射长。树干输液的问题是不同树种吸收量差异大,比如龙眼的吸收量明显大于荔枝,荔枝的吸收量明显大于杧果。另一个问题是即便是相同树种的相同品种,树与树单株之间吸收量差异明显,吸收量不一致在生产上应用受限。

为了克服输液不能人为控制进入树体量的问题,我们发明了输液滴干技术<sup>[37]</sup>。该技术的主要特点是通过滴头控制流量,滴头插入树干,一部分铁肥通过输液的方式进入树体,另外一部分通过树皮进入根系,铁肥通过叶片、木质部、韧皮部和根系四个器官吸收。输液滴干解决了输液不能控制流量的问题,同时由于铁肥进入了4个器官,有利于铁贮存在树体内。输液滴干分虹吸输液滴干和管道输液滴干2种,2种滴干方式互为补充,虹吸输液滴干方便试验研究配方,管道输液滴干方便大面积应用。

### 3.2 缺铁指标的测定

目前一般是通过测定叶片内的铁含量确定是否缺铁,叶片内的铁有3种形态,分别是二价铁、三价铁、全铁,测定的通常是活性铁和全铁,一般认为活性铁主要是二价铁。用1 mol HCl从叶片中提取的铁是活性铁,全铁用干灰化法测定。叶片中全铁含量与叶片的叶绿素含量没有很好的相关性<sup>[38]</sup>。很多情况下,植物缺铁失绿叶片中具有较高的全铁含量<sup>[39]</sup>,但是叶绿素含量与用低浓度HCl浸提的活性铁呈现良好的相关性<sup>[40]</sup>。黄宏文<sup>[41]</sup>通过测定苹果、梨、柑橘、猕猴桃等4种果树叶片全铁、活性铁与叶绿素含量之间的相关性证实了这一点。这种现象已引起研究者的高度重视,德国著名植物营养学家Romheld<sup>[42]</sup>称它为“黄化的自相矛盾”(Chlorosis Paradox)现象。

正常植物中全铁与活性铁之间存在动态平衡的关系,并且缺铁情况下可以诱导非活性铁向活性铁之间的转化。如董慕新等<sup>[43]</sup>发现,果树正常绿叶中全铁量和盐酸提取的活性铁之间存在着一定的数量平衡,桃绿叶中2者的比例稳定在2.1左右,黄叶中2者的比例显著增大。Zhang等<sup>[44]</sup>试验结果表明,菜豆初生成龄叶遮荫可使总铁转化为活性铁而外运到梢尖。邹春琴<sup>[45]</sup>报道,菜豆老叶遮荫明显减轻了新叶的黄化程度。

由于黄化叶片中维管束里面的质外体铁(不可利用铁)导致黄化叶片中铁含量并不低,因此,近年

多用SPAD值评估铁营养状况。研究发现,叶片叶绿素含量和铁含量都与SPAD值呈线性相关<sup>[46]</sup>。由于可以简便、连续、无损测定叶片的SPAD值,为评估果树铁营养状况开辟了新途径。

### 3.3 植物铁营养与人类铁营养

植物缺铁不仅是世界各地农业生产所面临的一个普遍问题,而且直接影响到人类的铁营养状况。全世界70多亿人口中约有37亿人口因缺铁而营养不良,我国严重缺铁的人口将近3.7亿。世界卫生组织将缺铁贫血列为世界迫切解决的第三大重要问题。国务院2014年1月28日发布的“中国食物与营养发展纲要(2014—2020年)”要求:“到2020年,全国人群贫血率控制在10%以下,其中,孕产妇贫血率控制在17%以下,老年人贫血率控制在15%以下,5岁以下儿童贫血率控制在12%以下”。通过植物食物为人类供铁被认为是全球解决办法。因此,提高果实中铁含量,对于人类健康也具有重大意义。

## 4 结 论

与铁肥常用的施用方法土施、喷施、输液(注射)相比,铁肥管道输液滴干具有利用率高,简单易行,极为省工的显著优点,不仅能够防止苹果缺铁失绿症,而且显著提高果实铁含量,提高果实品质,有利于人类健康,是目前铁肥最好的施用方法,为解决果树缺铁失绿症这一世纪性的世界性难题奠定了坚实的基础。苹果花和韧皮部的活性铁含量低可以预测之后的缺铁失绿症,可以及早施用铁肥防止缺铁黄化。初步试验证明,叶片SPAD值与叶片活性铁含量有良好的相关性,可以通过SPAD值测算叶片活性铁含量。

### 参考文献 References:

- [1] 洪庆文,黄不凡.农业生产中的若干土壤学与植物营养学问题[M].北京:科学出版社,1994.  
HONG Qingwen,HUANG Bufan.A number of soil science and plant nutrition problems in agricultural production[M]. Beijing: Science Press,1994.
- [2] MARTIN M, COLMAN M J R, CASATI D F G. Nitric oxide accumulation is required to protect against iron-mediated oxidative stress in frataxin-deficient *Arabidopsis* plants[J]. FEBS Letters, 2009, 583(3,4):542-548.
- [3] GRIS E. Nouvelles expériences Sur l'action de compose's ferrugineux soluble applique a la vegetation et specialement en traitement de la chlorose et de la débilité des plants[J]. Compt Rend Acad Science, 1844, 19:1118-1119.
- [4] OCKERT P J, STANDER G H, BARRY P J R. Fruit-load-induced starch accumulation causes leaf chlorosis in "off" 'Nadorcott' mandarin trees[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 222 (19): 62-68.
- [5] PRASAD P, DJANAGUIRAMAN M. Iron chlorosis[J]. Plant Sciences, 2017(1):246-255.
- [6] NI L L , HOU Z Q, FENG S D, WU Chenyang, LU Xiaolong, WEI Jun. Application of improved NH<sub>4</sub>F masking method in determination of ferrous iron in Plant tissues[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8):1347-1349.
- [7] EL-JENDOUBI H, MELGAR J C, ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ A, SANZ M, ABADÍA A. Setting good practices to assess the efficiency of iron fertilizers[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2011, 49:483-488.
- [8] SORRENTI G, TOSELLI M, MARANGONI B. Use of compost to manage Fe nutrition of pear trees grown in calcareous soil[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 136:87-94.
- [9] BARNEY D R, WALSER S D, NELSON C F. Control of iron chlorosis in apple trees with injections of ferrous sulfate and ferric citrate and with soil-applied iron-sulf[J]. Journal of Plant Nutrition, 1984, 7(1-5):313-317.
- [10] BANIK B C, SEN S K, BOSE T K. Effect of zinc, iron and boron in combination with urea on growth, flowering, fruiting and fruit quantity of mango 'Fazli'[J]. Environment and Ecology, 1997, 15 (1):122-125.
- [11] CERCETARI M P. Research on chlorosis control in the vineyards of the Iasi Viticultural Research Station[J]. Agronomie in Moldova, 1997, 30(3):149-152.
- [12] ALCÁNTARA E, MONTILLA I, RAMÍREZ P, GARCÍA-MOLINA P, ROMERA F J. Evaluation of quince clones for tolerance to iron chlorosis on calcareous soil under field conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 138:50-54.
- [13] MARY R M C, ANA Q, M. ÁNGELES F G. Screening of 'King' mandarin (*Citrus nobilis* Lour.) × *Poncirus trifoliata* (L.) Raf. hybrids as citrus rootstocks tolerants to iron chlorosis[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 198:61-69.
- [14] OZGE S, AYDIN G, MEHMET B T, ALI I. Investigation of responses of some apple (*Mallus × domestica* Borkh.) cultivars grafted on MM106 and M9 rootstocks to lime-induced chlorosis and oxidative stress[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 219(17):79-89.
- [15] 崔美香,薛进军,王秀茹,台社珍,张福锁,李绍华.树干高压注射铁肥矫正苹果失绿症及其机理[J].植物营养与肥料学报, 2005, 11(1):133-136.  
CUI Meixiang, XUE Jinjun, WANG Xiuru, TAI Shazhen, ZHANG Fusuo, LI Shaohua. Application of iron fertilizer by use high-pressure trunk-injection to remedy the iron deficiency chlorosis in apple trees and its mechanism[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 133-136.
- [16] 薛进军,刘贵巧,刘子英,崔美香,杨青芹,赵风平,田自武.铁肥吸取液方法对矫正苹果缺铁失绿症的影响[J].果树学报, 2013, 30(3):412-415.  
XUE Jinjun, LIU Guiqiao, LIU Ziying, CUI Meixiang, YANG Qingqin, ZHAO Fengping, TIAN Ziwu. Siphon transfusion on correcting iron deficiency chlorosis of apple trees[J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(3):412-415.
- [17] 薛进军,余德才,田自武,李绍华,张福锁,施肥方式对苹果吸收、运输铁的影响[J].果树科学, 1999, 16(1):1-3.  
XUE Jinjun, YU Decai, TIAN Ziwu, LI Shaohua, ZHANG Fusuo. Effect of Different Fertilizing Methods on the Absorption and

- Translocation of Iron in Apple Trees[J]. Journal of Fruit Science, 1999, 16(1):1-3.
- [18] 徐德聪,吕芳德,潘晓杰. 叶绿素荧光分析技术在果树研究中的应用[J]. 经济林研究,2003,21(3):88-91.
- XU Decong, LÜ Fangde, PAN Xiaojie. Application of chlorophyll fluorescence analysis technique to research of fruit trees [J]. Nonwood Forest Research, 2003, 21(3):88-91.
- [19] KARAGIANNIDIS N , THOMIDIS T , ZAKINTHINOS G , TSIPOURIDIS C. Prognosis and correction of iron chlorosis in peach trees and relationship between iron concentration and Brown Rot[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 118:212-217.
- [20] NADALA P, SANDRA LÓ, RAYOA P, LUCENAJ J. Efficacy of HBED/Fe<sup>3+</sup> at supplying iron to *Prunus persica* in calcareous soil [J]. European Journal of Agronomy , 2013, 45: 105-113.
- [21] ALCALÁ I S, BELLÓN F, CAMPILLO M C D, BARRÓN V , TORRENT J. Application of synthetic siderite (FeCO<sub>3</sub>) to the soil is capable of alleviating iron chlorosis in olive trees[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 138:17-23.
- [22] ANA Á F, SONIA G M, LUCENA J J. Evaluation of synthetic iron (III)-chelates (EDDHA/Fe<sup>3+</sup>, EDDHMA/Fe<sup>3+</sup> and the novel ED-DHSA/Fe<sup>3+</sup> ) to correct iron chlorosis[J]. European Journal of Agronomy, 2005, 22:119-130.
- [23] ABADÍA J, VÁZQUEZ S, RELLÁN-ÁLVAREZ R, ..., LÓPEZ-MILLÁN A F. Towards a knowledge-based correction of iron chlorosis[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2011, 49:471-482.
- [24] TORRISI B, TRINCHERA A, EEAB E, ...INTRIGLIOLI F. Effects of organo-mineral glass-matrix based fertilizers on citrus Fe chlorosis[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 44:32-37.
- [25] TAGLIAVINI M, ROMBOLA A D. Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 15: 71-92.
- [26] PESTANA M, GAMA F, SAAVEDRA T, VARENNE A D, CORREIA P J. The root ferric-chelate reductase of *Ceratonia siliqua*(L.) and *Poncirus trifoliata* (L.) Raf. responds differently to a low level of iron[J]. Scientia Horticulturae , 2012, 135: 65-67.
- [27] KASTORI R, UBAVIC M, PETROVIC N. The efficacy of different treatments for overcoming iron chlorosis in apple trees[J]. Jugoslovensko Vocarstvo, 1988, 22(4): 409-416.
- [28] GREWAL G P S. Foliar feeding of Zn and Fe in peach[C]// In Horticulture-new technologies and applications. Proceedings of the International Seminar on New Frontiers in Horticulture November , 1993: 25-28.
- [29] PARISH C L, RAESE J T. Stress-alleviating injections for pome fruit trees.[C]// Proceedings of the international congress of plant physiology. New Delhi, India, 1988: 15-20.
- [30] 袁铸,李胜女. 苹果缺铁失绿症的矫治技术[J]. 中国果树, 1997, 73(3):51.
- YUAN Zhu, LI Shengnv. Correction techniques for iron deficiency chlorosis in apples[J]. China Fruits, 1997, 73(3):51.
- [31] 范明. 埋瓶吸铁法矫治柑橘缺铁黄化病[J]. 山西果树, 1988, 31 (1):48.
- FAN Ming. Buried suction bottle for Tiefa citrus chlorosis[J]. Shanxi Fruits, 1988, 31(1):48.
- [32] 李凤岭. 埋瓶输液防治苹果黄叶病[N]. 河北农民报, 1997-04-14.
- LI Fengling. Prevention of apple yellow leaf disease by bottle infusion[N]. Hebei Farmers Daily, 1997-04-14.
- [33] PERYEÀ F J, KAMMERECK R. Use of minolta SPAD-502 chlorophyll meter to quantify the effectiveness of mid-summer trunk injection of iron on chlorotic pear trees[J]. Journal of Plant Nutrition, 1997, 20(11): 1457-1463.
- [34] 魏良稠,周厚基,缺铁失绿秋白梨树强力树干注射铁效初报[J]. 中国农业科学,1990,23(5): 45-48
- WEI Liangchou, ZHOU Houji. Preliminary report on iron effect of strong trunk injection in autumn pear tree[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1990, 23(5):45-48.
- [35] ESPADA J L. Test of correcting iron deficiency chlorosis in peach trees[J]. Informacion Tecnica Economica Agraria , 1982, 13 (47): 55-59.
- [36] 薛进军, 吕鸣群, 果树、林木虹吸输液套具[P]. 专利号 : 200920140525.X 200920140525.X
- XUE Jinjun, LÜ Mingqun. Fruit tree and forest of siphon infusion set[P]. Patent number :200920140525.X
- [37] 薛进军,张鹤华,陈千付,高效低耗水的果园灌溉技术[P]. 专利号:201410082678.
- XUE Jinjun, ZHANG Hehua, CHEN Qianfu. Irrigation technique of orchard with high efficiency and low water consumption[P]. Patent Number :201410082678.
- [38] MENGEL K, BUBL W, SCHERER H W. a.Iron distribution in vine leaves with HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> induced chlorosis[J]. Journal of Plant Nutrition, 1984, 7: 715-724.
- [39] MOHAMMAD M J, NAJIM H, KHRESAT S. Nitric acid - and O-phenanthroline-extractable iron for diagnosis of iron chlorosis in citrus trees[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1998, 29 (7-8): 1035-1043.
- [40] KOSEOGLU A T. Effect of iron chlorosis on mineral composition of peach trees[J]. Journal of Plant Nutrition, 1995, 18 (4):765-776.
- [41] 黄宏文. 果树缺铁失绿症的叶片诊断研究[J]. 中国果树, 1986, 27(1):5-8.
- HUANG Hongwen. Leaf diagnosis of iron deficiency chlorosis in fruit trees[J]. China Fruits, 1986, 27(1) ;5-8.
- [42] ROMHELD V. The chlorosis paradox:Fe inactivation in leaves as a secondary event in Fe deficiency chlorosis[C]//In: 9<sup>th</sup> international symposium on iron nutrition and interactions in plants. Hohenheim Stuttgart, Germany, 1997: 10.
- [43] 董慕新,张辉,果树叶片盐酸提取铁与失绿关系的研究[J]. 中国农业科学,1988,21(5):85-89.
- DONG Moxin, ZHANG Hui. Study on the relationship between iron extracted from hydrochloric acid and chlorosis of fruit leaves [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1988, 21(5):85-89.
- [44] ZHANG C D, ROMHELD V, MARSCHNER H. Remobilization of iron from primary leaves of bean plants grown at various iron level [J].Journal of Plant Nutrition, 1996, 19(7):1017-1028.
- [45] 邹春琴. 提高玉米和菜豆铁营养效率的途径及其机理[D]. 北京:北京农业大学,1995: 45-46.
- ZHOU Chunqin. Ways and mechanisms of improving iron nutrition efficiency in maize and bean[D]. Beijing: Beijing Agriculture University, 1995: 45-46.
- [46] PESTANA M, DOMINGOS I, GAMA F, ..., CORREIA P J. Strawberry recovers from iron chlorosis after foliar application of a grass-clipping extract[J]. Journal of Plant Nutrition, 2011, 174: 473-479.