

朱海军,孙欣欣,赵 群,等.薄壳山核桃锌素营养研究进展[J].江苏农业科学,2021,49(24):40-44.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.24.006

薄壳山核桃锌素营养研究进展

朱海军¹,孙欣欣²,赵 群³,生静雅⁴

(1. 江苏省农业科学院果树研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室,江苏南京 210014;2. 南京大学金陵学院,江苏南京 210089;
3. 山东绿达建设发展集团有限公司,山东潍坊 261000;4. 江苏省农业科学院成果转化处,江苏南京 210014)

摘要:薄壳山核桃(*Carya illinoensis*)是我国大力发展的木本油料树种之一,其对锌需求量相对较高,对缺锌非常敏感,缺锌被认为是 20 世纪以来薄壳山核桃生产栽培上的主要问题。综述薄壳山核桃对缺锌的生理响应、需求量以及不同锌肥种类、施用方式等矫正方法,提出了未来的研究思路 and 方向,以期为我国薄壳山核桃养分管理提供借鉴。

关键词:薄壳山核桃;缺锌;锌素营养;锌含量;锌肥

中图分类号:S664.106 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)24-0040-05

薄壳山核桃(*Carya illinoensis*)别称美国山核桃,原产地为北美大陆的美国和墨西哥北部,是世界著名的坚果树种。近 20 年特别是 2010 年以来,我国薄壳山核桃的栽培面积迅速扩大,2017 年达 4 万 hm^2 ,且发展势头迅猛。一方面,我国是世界上最大的薄壳山核桃进口国,消费需求量大;另一方面,薄壳山核桃是近年来我国大力发展的木本油料

树种之一^[1]。

锌是植物必需元素之一,在植物生长中具有多种作用,参与膜完整性、酶活化、基因表达和调控、碳水化合物代谢、根系呼吸、蛋白合成等进程^[2]。锌是薄壳山核桃需求最多的微量元素,果仁的锌含量高达 $71 \mu\text{g/g}$ ^[3]。缺锌现象在碱性、钙质、有机质含量低的土壤中普遍存在,是果园生产力水平降低的主要原因之一^[4],是薄壳山核桃最常见的缺素症^[5],也是 20 世纪早期以来美国薄壳山核桃主要的栽培问题^[6]。我国开展薄壳山核桃研究起步晚、基础薄弱,与生产快速发展需求的矛盾突出,在树体养分管理方面缺少研究和经验,尚没有建立树体营养诊断的标准,尤其是对锌等微量元素的作用和应

用的研究少且集中于锌在树体组织器官中的分配及动态变化等方面^[7-10],不能为当前生产需要提供

收稿日期:2021-04-09

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目[编号:LYKJ(2020)25、XYLYKJ(2020)]。

作者简介:朱海军(1981—),男,山东临朐人,博士,副研究员,主要从事薄壳山核桃等木本油料育种与培育研究,E-mail:zhuhj81_@126.com;共同第一作者:孙欣欣(1983—),女,山东临沂人,博士,讲师,主要从事城市、风景园林规划设计研究,E-mail:sunxinnao@qq.com。

[89] Song L, Guanter L, Guan K, et al. Satellite sun-induced chlorophyll fluorescence detects early response of winter wheat to heat stress in the Indian Indo-Gangetic Plains[J]. Global Change Biology, 2018, 24(9): 4023-4037.

[90] Agati G. Response of the in vivo chlorophyll fluorescence spectrum to environmental factors and laser excitation wavelength[J]. Pure and Applied Optics, 1999, 7(4): 797.

[91] Pinto F, Celesti M, Acebron K, et al. Dynamics of sun-induced chlorophyll fluorescence and reflectance to detect stress-induced variations in canopy photosynthesis[J]. Plant, Cell & Environment, 2020, 43(7): 1637-1654.

[92] 瞿 瑛,刘素红,李小文. 重金属 Cu 胁迫下典型农作物叶片日光诱导荧光辐射特征提取研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1282-1286.

[93] 朱冰雪,陈圣波,周 超,等. Cu 胁迫下油菜叶片日光诱导荧光辐射特征[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(10): 1-5.

[94] 赵 叶,竞 霞,黄文江,等. 日光诱导叶绿素荧光与反射率光谱数据监测小麦条锈病严重度的对比分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2739-2745.

[95] 陈思媛,竞 霞,董莹莹,等. 基于日光诱导叶绿素荧光与反射率光谱的小麦条锈病探测研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 511-520.

[96] 竞 霞,白宗璠,张 腾,等. 3FLD 和反射率荧光指数估测小麦条锈病病情严重度的对比分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 136-142.

[97] 竞 霞,吕小艳,张 超,等. 基于 SIF-PLS 模型的冬小麦条锈病早期光谱探测[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 191-197.

有效的支撑。本文综述薄壳山核桃对缺锌的生理响应、对锌元素的需求量、缺锌后矫正的方式和效果等,以期进一步凝练薄壳山核桃锌素营养的研究思路 and 方向,对我国的薄壳山核桃高效栽培管理具有重要指导意义。

1 缺锌对薄壳山核桃生理的影响

缺锌导致叶片叶绿素含量和光合能力下降,外部表现为叶脉间出现斑点到整个叶片失绿、坏死到边缘卷曲,严重情况下造成枝条顶端死亡^[11];内部表现为叶片结构的改变,锌主要分布在叶片栅栏组织中^[12],缺锌时叶片栅栏细胞变短减少、细胞间隙增大、叶片厚度和表面积减小^[13];同时伴随着内含物含量的变化:例如叶片中碳酸酐酶活性下降^[14],细胞质含量下降、液泡中积累酚类化合物、叶绿体中淀粉大量积累^[15];缺锌严重时,光合色素、叶片蛋白质含量达到最小值,氨基酸、非结构碳水化合物含量达到最大值^[16]。叶片锌含量与叶片叶绿素含量、气孔导度和净光合速率等光合指标呈正相关关系,当锌含量达到 14 $\mu\text{g/g}$ 时,光合指标趋于稳定^[11]。

缺锌还会导致薄壳山核桃营养和生殖生长的形态异常^[17],果实数量减少、枝条死亡率提高、果皮开裂延迟且时间不一致^[11]。

2 薄壳山核桃对锌的需求量

薄壳山核桃锌需求量研究多以叶片中的锌含量为判断标准,关于叶片锌临界值有很多观点,不同研究得到不同的锌临界值结果,分别为 20^[18]、60^[19]、50~150^[20]、50~100^[21]、35~36^[22]、50~100 $\mu\text{g/g}$ ^[5];在美国佐治亚州高产(产量超过 58 kg/株)果园中,叶片的平均锌含量为 126 $\mu\text{g/g}$ ^[23];墨西哥推荐的叶片锌临界值为 126 $\mu\text{g/g}$ ^[24];美国西南部产区推荐值为 174 $\mu\text{g/g}$ ^[25];美国东南部普遍接受的叶片锌临界水平是 50 $\mu\text{g/g}$ ^[26];其他研究认为叶片锌临界值应为 20~60 $\mu\text{g/g}$ ^[27]。

相关研究表明,薄壳山核桃叶片锌含量为 24~37 $\mu\text{g/g}$ 时出现轻微的缺锌症状^[28];低于 11~14 $\mu\text{g/g}$ 即出现严重的缺锌症状^[29]。正常、中度缺锌、严重缺锌、非常严重缺锌的临界值分别为 14.0、6.1、4.9、4.4 $\mu\text{g/g}$ ^[30];水培或沙培条件下,正常、叶片出现斑点、叶脉间坏死的锌临界值分别为 11.2、9.8、7.2 $\mu\text{g/g}$ ^[31]。正常、轻度缺锌、中度缺锌临界值分别为 44、11、9 $\mu\text{g/g}$ ^[27]。

3 薄壳山核桃缺锌的矫正

影响薄壳山核桃叶片锌含量的因素有锌肥种类、施锌方式、施锌浓度、土壤酸碱度等,研究表明,在碱性土壤中条施锌肥并没有持续影响叶片锌含量^[32];在 pH 值为 4.8~5.2 的土壤中条施 69 kg/hm² ZnSO₄ 并不能使叶片锌含量提高到 50 $\mu\text{g/g}$ 以上,仅 138 kg/hm² 的 ZnSO₄ 处理 6 年后叶片锌含量才达到临界值;通过滴灌对薄壳山核桃品种 Desirable 施用 63 kg/hm² 的 ZnSO₄,4 年后其叶片锌含量达到 50 $\mu\text{g/g}$ ^[26]。

3.1 锌肥种类

无机锌肥或者螯合态锌肥是薄壳山核桃施肥中最常用的^[33]。ZnSO₄ 具有相对较高的溶解性(1.67 g/mL)、非直接性的硫污染来源和使用简单等特点^[34];虽然有研究显示,ZnO 与 ZnSO₄ 的补锌效果相当^[26],Zn(NO₃)₂ 比 ZnSO₄ 更有效^[35],但 ZnSO₄ 一直是酸性土壤补锌的首要选择^[36],也是目前生产中应用最多的锌肥。

与无机锌肥相比,Zn-EDTA(乙二胺四乙酸)等螯合锌肥可以提高土壤中锌的移动性和有效性,提高生物活性水平,不易被土壤固定^[37];Zn-EDTA 比 ZnSO₄ 更能保持其在溶液中的效用^[38]。另有研究表明,Zn-DTPA(二乙烯三胺五乙酸)也具有很高的利用率,与 Zn-EDTA 均为主要推荐的螯合锌肥^[39]。

3.2 施肥方式

3.2.1 土壤施肥 土壤补锌可能是满足整个树体锌需求的最佳方式^[40],具有一次施用、满足树体几年需求量的优点^[29],还可以减少每年叶片喷施机械碾压次数和人工投入。该方法已经在美国东南部酸性土壤中取得成功^[22,26]。但土壤施锌也存在一定问题:一是碱性、钙质土壤中锌的利用率极低。美国西南部碱性土壤中,土壤补锌方式几乎不可能矫正小叶病^[21];虽然足够量的锌能起到补充作用,例如 126 kg/株 ZnSO₄ 使叶片锌含量提高到临界值^[19],但如此高的用量是生产中无法接受的。二是通过土壤补锌往往需要较长的时间才能消除缺锌症状(表 1)。土壤补锌的方式有撒施和条施,条施可操作性强,撒施肥料用量大,但撒施补充锌肥的速度更快,生产中采用撒施方式更多^[29]。美国东南部产区 ZnSO₄ 土壤施肥用量一般为 2.27~4.54 kg/株,但在最初的 2~3 年仍需要叶面喷施以保证树体对锌的需求。

表 1 美国东南部酸性土壤补锌效果

序号	施肥方式	肥料种类	用量	叶片锌含量 超过 50 μg/g 所需时间	参考文献
1	滴灌	ZnSO ₄ 或 ZnO	528 g/株	当年	[26]
2	撒施	ZnSO ₄ 或 ZnO	448 kg/hm ²	第 2 年	[29]
3	撒施	ZnSO ₄ 或 ZnO	160 kg/hm ²	第 2 年	[41]
4	滴灌	ZnSO ₄ 或 ZnO	2 112 g/株	第 2 年	[26]
5	滴灌	ZnSO ₄	35 kg/hm ²	第 4 至第 5 年	[42]
6	滴灌	Zn - EDTA	3.5 kg/hm ²		[42]
7	撒施	ZnSO ₄	112 ~ 224 kg/hm ²		[29]
8	条施	ZnSO ₄	391 kg/hm ²		[29]
9	滴灌	ZnSO ₄ 或 ZnO	132 g/株		[26]

3.2.2 叶面喷施 多数果园中补充锌肥的标准方法是叶面喷施,叶面喷施可以快速将叶片锌含量提高到临界值(50 μg/g)以上。叶片锌含量与生长素和赤霉素水平呈正相关^[31],在一定范围内,叶片锌含量高可促进果树的营养生长^[43]。通常情况下,美国东南部产区叶面每年喷施 2~4 次 ZnSO₄,西南部产区叶面每年喷施 4~6 次锌肥可满足树体对锌的需求。叶面喷施锌肥比土壤补充更能有效满足树体需要^[44]。但也存在以下问题:(1)流动性差、只能满足树体当年需要。叶面喷施后仅喷施到的叶片能吸收到锌,且大部分锌保留在叶片中,因而要求在生长季进行多次喷施^[43];秋季落叶前难以从叶片输送锌元素到储存组织满足第 2 年生长的需要^[34]。(2)随着叶龄增长利用率下降。随着叶龄增长,叶片表面的非极性化合物增加,从而减少了溶液向表皮细胞的移动,降低了锌的利用率,新叶对锌的吸收率为 1%,而老叶仅为 0.2%^[19];也有研究认为,叶龄并不影响锌的吸收率,只不过锌在新叶中的移动性更好^[45]。(3)人工、机械等成本较高。多次机械作业使果园土壤密实度提高,且须要避开灌溉时进行作业。

3.2.3 灌溉施肥 通过微喷灌方式施入 4.4 kg/hm² 的 Zn - EDTA 可使 5 年后叶片锌含量从 22 μg/g 提高到 35 μg/g,可见的缺锌症状消除、干径增加、产量提高^[46]。1974 年美国德克萨斯州一次果园展示中,研究人员每年将 0.8、1.6、2.5 kg/hm² 的 Zn - EDTA 通过滴灌系统施入果园,当年叶片锌含量分别为 39、53、68 μg/g,第 2 年叶片锌含量分别为 49、54、70 μg/g (文献未发表)。

3.2.4 树干注射 树干注射效率高且效果好,注射

后 1 h 就可到达树冠顶端,24 h 内就可分布到树叶、根系等整个树体,但主要集中在叶片和输导组织^[47]。研究表明,注射一定浓度的 ZnSO₄ 溶液(每 2.5 cm 胸径加入 1 g ZnSO₄)^[48]、1.57 L ZnSO₄ 溶液(含 39 g ZnSO₄)^[47]、7.57 L ZnSO₄ 溶液(每 2.5 cm 干周加入 1.13 g ZnSO₄)^[49]可以很快提高叶片锌含量;但也有研究显示,绕树干 1 周每 10 cm 注射 3 mL Zn - EDTA 并不能提高叶片锌含量^[19];且注射过量会导致落叶,例如,注射 2.3 kg ZnSO₄ 可使树体落叶,新叶中锌含量为 565~1 360 μg/g^[47],也会损伤形成层组织^[49]。

3.3 施肥时间

由于锌的移动性差,仅对喷施到的叶片起作用,因此喷施时间非常关键。研究表明,秋季喷施 0.1% 的 ZnSO₄ 对次年新梢中的锌含量没有影响,秋季喷施 14~28 kg/hm² 的 ZnSO₄ 并不能提高次年叶片锌含量^[34]。美国佐治亚州推荐叶面喷施在萌芽后 2 周开始,持续 6~7 周时间^[22];德克萨斯州则建议萌芽时开始喷施,此后 1、3、6、8 周持续喷施^[19,50]。

3.4 土壤酸碱度

由于可溶性的锌化合物容易与土壤中的氢氧化物和碳酸盐发生反应,转化为难以被植物利用的化合物^[51],因此,种植在碱性和石灰质土壤中的植株更容易缺锌^[52];缺锌是美国西南部、墨西哥北部有机质含量低的碱性、钙质土壤果园普遍存在的问题^[32];在美国西南部碱性土壤中通过土壤补锌几乎没有效果^[34]。但相对于菌根,土壤 pH 值对锌吸收的影响更大^[53]。

3.5 与其他元素的拮抗

由于锰与锌之间具有拮抗作用,施用 Zn - EDTA 会降低叶片锰含量^[54];也有研究表明,叶片锌含量低通常伴随着锰含量较高的情况^[31];将基质中的锰含量从 0 g/L 提高到 14.78 g/L 时,Desirable 叶片锌含量从 137.0 μg/g 降低到 43.5 μg/g,叶片锰含量从 187 μg/g 增加到 4 525 μg/g^[55]。对不添加镁的水培液中培养的薄壳山核桃 Curtis 叶面喷施 0~1% 的 MgSO₄,同样降低了叶片锌含量;对不添加磷的水培液中培养的 Curtis 叶面喷施磷肥,随着磷浓度的降低,叶片、树干和根系中的锌含量随之下降^[56],提高磷浓度也得到了相似的结果^[57]。

3.6 其他影响因素

一些有机物可以与锌形成络合物,减少沉积、

提高锌的利用率。在 ZnSO_4 施用方法一致的情况下,行间种植绦车轴草(*Trifolium incarnatum*)和施用酒糟的处理均提高了薄壳山核桃叶片锌的含量^[58]。

使用强酸可以提高薄壳山核桃对锌的吸收率^[4]。腐殖酸可以结合锌等金属元素,提高其在碱性土壤中的移动性和溶解性^[59]。Alben 等的研究表明,1 hm² 施用 800 kg 粪便、22 kg 硫、22 kg 硫酸锌可缓解严重缺锌的症状^[33]。

尿素硝铵溶液(UAN)可以提高叶片对锌的吸收率,添加 0.43% 的 UAN 可提高 ZnSO_4 和 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 的吸收率^[50];添加 UAN 的 0.24% ZnSO_4 与无 UAN 添加的 0.36% $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 效果相当;0.18% $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 与添加 UAN 的 0.09% $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 分别喷施 5 次的效果相当,维持叶片锌含量在 50 $\mu\text{g/g}$ 以上^[60]。

4 对策与建议

我国薄壳山核桃锌素营养的研究应在前人研究的基础上,在对树体锌营养测定的基础上,针对不同地区的土壤性质、立地条件等的差异,因地制宜地筛选优化锌矫正的方式方法,并重点开展以下工作。

4.1 培育筛选锌利用率高的品种或砧木

不同品种对锌的利用效率有差异,通过体细胞胚发生、实生选育等途径培育筛选锌利用率高的品种或砧木。

4.2 建立薄壳山核桃锌营养管理体系

调查薄壳山核桃分布区的土壤性质和树体锌水平,研究其对果实产量、质量的影响。因地制宜地提出合理的锌营养管理措施。

4.3 研究开发提高锌利用率新技术

通过根径处使用缓释锌肥、研究提高锌利用率和其在植株体内移动性的助剂。

参考文献:

- [1] Zhu H J. Challenges for the expanding pecan industry in China[J]. Pecan South, 2018, 51(9): 16–23.
- [2] Marschner H. Mineral nutrition and yield response [M]. Amsterdam; Elsevier, 1995.
- [3] Sparks D. Concentration and content of 14 elements of fruit of pecan [J]. HortScience, 1975, 10: 517–519.
- [4] Fenn L B, Malstrom H L, Riley T, et al. Acidification of calcareous soils improves zinc absorption of pecan trees [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1990, 115(5): 741–744.
- [5] Sparks D, Madden G D. Effect of genotype on the elemental concentration of pecan leaves[J]. HortScience, 1977, 12(3): 251–252.
- [6] Sparks D. Threshold leaf levels of zinc that influence nut yield and vegetative growth in pecan [J]. HortScience, 1993, 28(11): 1100–1102.
- [7] 尚杨娟, 谭鹏鹏, 范平桦, 等. 薄壳山核桃叶面喷锌效果的评价 [J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(6): 1071–1079.
- [8] 朱海军, 刘广勤, 曹福亮, 等. 施锌对薄壳山核桃幼苗生长及体内锌分配的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 75–78.
- [9] 黄瑞敏, 李健, 袁紫倩, 等. 长山核桃马汉中锌元素含量的动态变化 [J]. 果树学报, 2016, 33(5): 570–577.
- [10] 黄瑞敏. 锌对薄壳山核桃生长和果实品质的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.
- [11] Hu H N, Sparks D. Zinc deficiency inhibits chlorophyll synthesis and gas exchange in ‘Stuart’ pecan [J]. HortScience, 1991, 26(3): 267–268.
- [12] Ojeda – Barrios D, Abadía J, Lombardini L, et al. Zinc deficiency in field – grown pecan trees: changes in leaf nutrient concentrations and structure [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(8): 1672–1678.
- [13] Kim T, Wetzstein H Y. Cytological and ultrastructural evaluations of zinc deficiency in leaves [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2003, 128(2): 171–175.
- [14] Snir I. Carbonic anhydrase activity as an indicator of zinc deficiency in pecan leaves [J]. Plant and Soil, 1983, 74(2): 287–289.
- [15] Kim T. Nutritional and developmental studies in pecan: studies on zinc, nitrogen, and seasonal fluctuation of carbohydrate and nutrients [D]. Athens: University of Georgia, 2000.
- [16] Acevedo – Barrera A A, Sánchez E, Yáñez – Muñoz R M, et al. Role of the zinc nutritional status on main physiological bioindicators of the pecan tree [J]. Agricultural Sciences, 2017, 8(12): 1327–1336.
- [17] Hu H, Sparks D. Zinc deficiency inhibits reproductive development in ‘Stuart’ pecan [J]. HortScience, 1990, 25(11): 1392–1396.
- [18] Lane R, Perkins H F, Johnstone J F E. Studies on the relationship of calcium, zinc, and pH in pecan production [C]//Proc SE Pecan Growers Assoc, 1965, 58: 21–24.
- [19] Núñez – Moreno H. Nutritional studies on pecans [Carya illinoensis (Wangenh.) C. Koch] growing in irrigated alkaline soils [D]. Tucson: University of Arizona, 2016.
- [20] O’Barr R D, McBride J M, Hanson K. Pecan leaf sampling reveals shortages of fertilizer nutrients [J]. Louisiana Agriculture, 1978, 21: 6–7.
- [21] Smith M W, Rohla C T, Goff W D. Pecan leaf elemental sufficiency ranges and fertilizer recommendations [J]. HortTechnology, 2012, 22(5): 594–599.
- [22] Sparks D. Zinc nutrition and the pecan: a review [J]. Pecan South, 1976, 3: 304–334.
- [23] Beverly R B, Worley R E. Preliminary DRIS diagnostic norms for pecan [J]. HortScience, 1992, 27(3): 271.

- [24] Medina – Morales M C. Normas DRIS preliminares para nogal pecanero[J]. Terra Latinoamericana,2004,22(4):445 – 450.
- [25] Pond A P, Walworth J L, Kilby M W, et al. Leaf nutrient levels for pecans[J]. HortScience,2006,41(5):1339 – 1341.
- [26] Wood B W. Correction of zinc deficiency in pecan by soil banding [J]. HortScience,2007,42(7):1554 – 1558.
- [27] Wells M L. Nutritional, environmental, and cultural disorders of pecan [M]// Southeastern Pecan Growers' handbook. Tifton: University of Georgia,2007:193 – 201.
- [28] Sparks D. Nutrient concentrations of pecan leaves associated with deficiency symptoms and normal growth[J]. HortScience,1978,13:256 – 257.
- [29] Payne J A, Sparks D. Effect of broadcast and band application on zinc uptake by pecan trees[J]. Pecan South,1982,9:35 – 37.
- [30] Sparks D. Pecan nutrition;a review[C]//Proc SE Pecan Growers Assoc. 1989,82:101 – 122.
- [31] Kim T, Mills H A, Wetzstein H Y. Studies on the effect of zinc supply on growth and nutrient uptake in pecan[J]. Journal of Plant Nutrition,2002,25(9):1987 – 2000.
- [32] Núñez – Moreno H, Walworth J L, Pond A P, et al. Soil zinc fertilization of ‘Wichita’ pecan trees growing under alkaline soil conditions[J]. HortScience,2009,44(6):1736 – 1740.
- [33] Alben A O, Hammer H E. The effect of pecan rosette from applications of zinc sulfate, manure, sulfur on heavy textured alkaline soils[J]. Proc Amer Soc Hort Sci,1944,45:27 – 32.
- [34] Walworth J L, Pond A P, Sower G J, et al. Fall – applied foliar zinc for pecans[J]. HortScience,2006,41(1):275 – 276.
- [35] Smith M W, Storey J B, Westfall P N. The influence of two methods of foliar application of zinc and adjuvant solutions on leaflet zinc concentration of pecan trees[J]. HortScience,1979,14:718 – 719.
- [36] Herrera E A. Pecan growing in the western United States[J]. HortTechnology,1995,5(3):200 – 201.
- [37] Alvarez J M, Rico M I, Obrador A. Leachability and distribution of zinc applied to an acid soil as controlled – release zinc chelates[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,1997,28(17/18):1579 – 1590.
- [38] Naik S K, Das D K. Evaluation of various zinc extractants in lowland rice soil under the influence of zinc sulfate and chelated zinc[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2010,41(1):122 – 134.
- [39] Gangloff W J, Westfall D G, Peterson G A, et al. Mobility of organic and inorganic zinc fertilizers in soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2006,37(1/2):199 – 209.
- [40] Swietlik D. Zinc nutrition in horticultural crops[M]. Oxford:John Wiley & Sons,2010.
- [41] Wood B W, Payne J A. Comparison of ZnO and ZnSO₄ for correcting severe foliar zinc deficiency in pecan[J]. HortScience,1997,32(1):53 – 56.
- [42] Worley R E, Carter R L, Harmon S A. Effect of zinc sources and methods of application on yield and leaf mineral concentration of pecan, *Carya illinoensis*, Koch[J]. J Amer Soc Hort Sci,1972,97(3):364.
- [43] Wadsworth G L. Absorption and translocation of zinc in pecan trees [*Carya illinoensis* (Wang.) K. Koch][D]. College Station:Texas A&M University,1970.
- [44] Ojeda – Barrios D, Perea – Portillo E, Hernández – Rodríguez O, et al. Foliar fertilization with zinc in pecan trees[J]. HortScience,2014,49(5):562 – 566.
- [45] Grauke L J, Storey J B, Emino E R, et al. The influence of leaf surface, leaf age, and humidity on the foliar absorption of zinc from 2 zinc sources by pecan[J]. HortScience,1982,17:474.
- [46] Walworth J L, White S A, Comeau M J, et al. Soil – applied ZnEDTA: vegetative growth, nut production, and nutrient acquisition of immature pecan trees grown in an alkaline, calcareous soil[J]. HortScience,2017,52(2):301 – 305.
- [47] Worley R E, Littrell R H, Polles S G. Pressure trunk injection promising for pecan and other trees[J]. HortScience,1976,11:590 – 591.
- [48] McCune J. Nitrogen and phosphorus response in pecan [D]. Tucson: The University of Arizona,2016.
- [49] Worley R E, Litrell R H, Dutcher J D. A comparison of zinc injection and implantation of zinc capsules for correction of zinc deficiency in pecan trees[J]. J Arboric,1980,6:253 – 257.
- [50] Sistrunk L A. An improved method of DRIS for determining the nutrient status of pecan [*Carya illinoensis* (Wang) K. Koch] with foliar diagnosis[D]. College Station:Texas A&M University,1982.
- [51] Sadiq M. Solubility and speciation of zinc in calcareous soils[J]. Water, Air, and Soil Pollution,1991,57(1):411 – 421.
- [52] Malstrom H L, Fenn L B. Uptake of zinc from calcareous soils by pecan (*Carya illinoensis*) trees[J]. HortScience,1981,16:414.
- [53] Sharpe R R, Marx D H. Influence of soil pH and *Pisolithus tinctorius* ectomycorrhizae on growth and nutrient uptake of pecan seedlings[J]. HortScience,1986,21(6):1388 – 1390.
- [54] Sale P. Principles of plant nutrition [J]. Soil Biology and Biochemistry,2003,35(8):1159 – 1160.
- [55] Sherman J, Heerema R J, VanLeeuwen D, et al. Optimal manganese nutrition increases photosynthesis of immature pecan trees [J]. HortScience,2017,52(4):634 – 640.
- [56] Smith M W, Cheary B S. Response of pecan to annual soil band applications of phosphorus and potassium[J]. HortScience,2013,48(11):1411 – 1415.
- [57] Sparks D. Growth and nutritional status of pecan in response of phosphorus[J]. J Am Soc Hort Sci,1988,113(6):850 – 859.
- [58] Wells M L. Pecan tree productivity, fruit quality, and nutrient element status using clover and poultry litter as alternative nitrogen fertilizer sources[J]. HortScience,2012,47(7):927 – 931.
- [59] Ozkutlu F, Torun B, Cakmak I. Effect of zinc humate on growth of soybean and wheat in zinc – deficient calcareous soil [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2006,37(15/16/17/18/19/20):2769 – 2778.
- [60] Storey J B, Smith M, Westfall P N. Zinc nitrate opens new frontiers of rosette control[J]. The Pecan Quarterly,1974(8):9 – 10.