

微量元素在林木中的应用研究进展

张恒, 陈锐帆, 林嘉蓓, 邓小梅*, 奚如春*

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广东省森林植物种质创新与利用重点实验室, 广东 广州 510642)

摘要:微量元素对林木生长发育至关重要,它们参与林木呼吸作用、光合作用、营养吸收及激素信号传导等多种生理生化过程。目前与林木生长有关的微量元素共有8种。微量元素与树体营养元素浓度、林木生长量及产量密切相关,是林木施肥与营养诊断的理论基础。笔者对微量元素在林木中的功能、微量元素与林木生长发育、林分类型、土壤和病虫害的关系及林木微量元素吸收转运分子机制、营养诊断等方面的研究现状进行综述,总结了现阶段存在的问题并对未来研究提出建议,认为我国林木可用的微肥品种和产量较少,与国外相关情况相比还有一定差距,且尚未组织微肥生产和制定质量标准,产品未达到多样化、定型化等;不同微量元素之间存在协同或拮抗作用。虽然在生产中尚未完全掌握土壤微量元素分布规律,导致林木施肥存在一定的盲目性,但我国生态农林业的发展已经起步。从我国林木的营养诊断技术、微肥研究利用、高效养分管理和速生丰产林的培育等方面开展深入研究,建议在林木施肥中应用微生物肥,以减缓土地营养衰退趋势,同时要要进行树种选优、改良土壤、加强管理来提高林木经营总体效益。

关键词:微量元素;林木生长发育;吸收转运;营养诊断;微肥研究

中图分类号:S606;S714

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2022)05-0229-11



A review on the application of microelements in forests

ZHANG Heng, CHEN Ruifan, LIN Jiabei, DENG Xiaomei*, XI Ruchun*

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangdong Key Laboratory for Innovative Development and Utilization of Forest Plant Germplasm, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Microelements are crucial for the growth and development of trees, and they are involved in various physiological and biochemical processes such as tree respiration, photosynthesis, nutrient absorption, and hormone signal transduction. At present, there are 16 element types related to the growth of trees, among which there are eight types of trace elements. Microelements are closely related to tree nutrient element concentration and tree growth and yield. This is also the theoretical basis for tree fertilization and nutritional diagnosis. The research status of the function of microelements in trees, the relationship between microelements and tree growth, stand types, soil, pests and diseases, the molecular mechanism of absorption and transport of microelements in trees, nutrition diagnosis and other aspects were reviewed, and recommendations were made on current problems and future research. There are few varieties and yields for micro-fertilizers available for trees in China and there is still a gap when compared with other countries. For example, micro-fertilizer production and quality standards have not been organized, and the products have not reached a level of diversification. There are synergistic or antagonistic effects among the different microelements. Although soil microelement distribution regulations are not fully understood in the context of current production and there is a lack of focus on tree fertilization, the development of ecological agriculture and forestry in China has already started. In-depth research was undertaken on the nutritional diagnosis technology of trees, the research and utilization of micro-fertilizers, efficient nutrient management, and the cultivation of fast-growing and high-yield forests in China. Microbial fertilizers can

收稿日期 Received: 2021-05-17

修回日期 Accepted: 2022-03-29

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD1001602);广东省重点领域研发计划(2020B020215003-03);广东省林业科技创新项目(2018KJCX008)。

第一作者:张恒(ginkgozh@163.com)。*通信作者:邓小梅(dxmei2006@scau.edu.cn),教授,负责论文选题指导;奚如春(xirc2006@scau.edu.cn),教授,负责论文修改。

引文格式:张恒,陈锐帆,林嘉蓓,等. 微量元素在林木中的应用研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 229-239. ZHANG H, CHEN R F, LIN J B, et al. A review on the application of microelements in forests[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(5): 229-239. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202105031.

be used in forest fertilization to slow down the trend in land nutrition decline. Meanwhile, it is important to carry out tree species selection, soil improvement, and strengthen management to improve the overall efficiency of forest management.

Keywords: microelement; tree growth and development; absorption and transfer; nutritional diagnosis; micro fertilizer research

植物体微量元素不仅参与酶、辅酶的构成,对叶绿素和蛋白质的合成及植物光合作用、代谢过程具有调节作用,还对大量元素的吸收和利用具有促进作用。如 Zn 能在 300 多种酶反应进程中起催化作用,并参与植物的呼吸和氧化过程、叶绿素和生长素的合成,以及碳水化合物的转化^[1-2]; Mn 除了能调节光合作用,还在许多酶中作为辅助因子发挥结构作用^[3]; Fe 参与植物体内呼吸作用、光合作用、DNA 合成、氮素同化和固定、激素合成、活性氧的形成与消除等重要的生理代谢过程^[4]; Cu 参与植物许多代谢过程,如线粒体呼吸、激素信号传导、光合电子传递,还是超氧化物歧化酶(SOD)的重要组分; Mo 是另外一种参与植物代谢功能的重要元素,包括植物激素生物合成、嘌呤代谢、亚硫酸盐解毒和硝酸盐同化^[5]; B 在植物中主要以 B-糖复合物的形式存在于细胞壁中^[6],参与半纤维素和细胞壁物质的合成,促进细胞伸长和细胞分化,促进生殖器官的建成和发育。因此,研究林木体内微量元素运输、分配和能量转化机制,并通过施肥手段为林木提供包含所需微量元素的养分,可以有效提高林木产量和改善林木品质^[7-8]。

微量元素的研究已广泛应用于营养诊断以及林业施肥等各个方面,尤其是在农作物、蔬菜、果树等相关领域都取得一定的成果^[9-12],但在林业领域的应用机制研究还有待加强。笔者基于近期有关林木微量元素的研究,从林木营养元素、微量元素与林木生长发育之间的关系及存在的问题等方面进行综述,并探讨其未来发展方向,以期对林木营养诊断及微量元素肥料的研究和利用提供科学依据。

1 林木施肥研究概况

德国在 19 世纪中叶最早重视林木对营养元素的需要和林地营养元素的循环研究,发现从林地收走枯枝落叶会导致森林生产力急剧下降,因此开始林木施肥试验^[13]。但从世界范围来看,林木施肥一直处于试验阶段和小规模生产性施肥,直到 20 世纪 50 年代才开始在多个国家进行大面积推广。我国从 20 世纪 70 年代末开始林木施肥的试验,80 年代以来研究了杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、桉树(*Eucalyptus robusta*)、毛竹(*Phyllostachys edu-*

lis)、青甘杨(*Populus przewalskii*)、火炬松(*Pinus taeda*)和泡桐(*Paulownia fortunei*)等主要速生树种的施肥效应,90 年代以来在杉木、桉树、欧美杨(*Populus × canadensis*)、毛竹、马尾松(*Pinus massoniana*)、山核桃(*Carya cathayensis*)等用材林和经济林适生地区,进行了更加广泛的施肥效应试验,提出了针对不同树种的多种优化施肥方案,为生产上的合理施肥提供参考^[14-15]。1991 年,世界银行贷款国家造林项目“主要树种丰产林施肥技术研究与推广”和我国“八五”国家重点科技攻关项目“短周期工业用材林定向培育与维持地力措施研究”专题相继启动,此后 10 多年,我国把林木施肥列入国家科技攻关专题,针对纸浆材林微生物应用与施肥技术等专题开展了研究,这对推动我国林木施肥研究起到了积极的作用,也加快了林木营养元素研究的进程^[16]。

2 林木微量元素分配及与林木各生长因子的关系

2.1 林木体内元素之间的关系

林木体内营养元素之间存在相互作用,即两种或两种以上元素之间能够产生促进或拮抗作用。国内外学者对元素之间的相互关联性做了大量研究,如在杨树体内, N、P 同时存在会对 Cu 的含量有限制作用, P、B 之间存在着拮抗作用^[17], 且 P 的含量过高时会引起微量元素(除 Mn 外)的紊乱和 Cu、Zn 的缺乏^[18],而在缺 Fe 条件下,叶片 Cu 含量会显著上升。在缺 P 条件下,枳根系 Cu 含量上升而 Fe 含量降低,地上部分 Zn 含量上升而 K 浓度降低^[19]。而对橄榄(*Canarium album*)的研究表明,缺 K 植株根系和地上部分 Cu 和 Zn 含量升高, K、Fe 含量下降;缺 Ca 条件下植株根系和地上部分 Fe、Zn 含量增加,根系 Cu 含量降低^[20]。因此,在研究营养元素与林木之间的关系时,需注意各种营养元素之间的相互关系。

2.2 微量元素与林木生长的关系

2.2.1 林木体内微量元素的分配

针对性地对林木进行营养研究,确立施肥最佳方案,必须首先了解微量元素的分布格局,明晰植株各器官对相关元素的需求。有研究发现,在橄榄

胚胎发育阶段,除 P 和 Na 外,植株体内矿质元素 Mg、K、Ca、N、Mn、Fe 都处于最高水平,分化阶段的特征是 K、N、Mg、Ga、Mn、Fe 水平显著降低而 Na 元素显著增加,成熟期各元素水平均较低^[21];水青冈 (*Fagus longipetiolata*) 植株中 Fe、Zn、Al 含量随根龄增长而增多,其中 Zn 在根茎、叶中的关联性最显著^[22]。

营养元素在叶片中的含量大多高于其他部位的含量,说明叶片对元素的积累能力最强,且植物对这些微量元素的积累一般呈现 Mn>Fe>Zn>B>Cu>Mo 的顺序^[23],如栎树 (*Koelreuteria paniculata*) 人工林中,各器官微量元素含量大小顺序为叶>枝>细根>皮>粗根>大根>根头>干,各微量元素总含量顺序为 Mn>Fe>Zn>Pb>Cu>Cd>Ni>Mo^[24];油茶 (*Camellia oleifera*) 林中,微量元素由高到低排序依次为叶、干、根、枝、花、果,其中 Cu、Cd 和 Pb 元素在枝中含量最高,Fe 元素在根中含量最高^[25]。Hagen-Thorn 等^[26]对几种温带树种的微量元素含量进行比较,发现叶中的含量大于根、茎(除 Fe 外),Cu 的含量普遍最低,Mn 在树种间差异最大且最易受土壤 pH 影响,另外对光合作用、蒸腾作用能动性影响大的元素如 Fe、Mn 在叶中会高于其他部位;Kosiorek 等^[27]对欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*)、白桦 (*Betula platyphylla*) 和挪威槭 (*Acer platanoides*) 树叶和树皮中的微量元素含量进行测定发现,被检测树种的叶和树皮中其 Fe、Mn 和 Zn 含量明显高于其他元素。

2.2.2 微量元素对林木生长发育的影响

尽管植物对微量元素的需求量很少,但它们在植物代谢及生长发育中具有重要功能,缺乏任何一种微量元素都会影响植物的正常生长发育(表 1)。如缺 Zn 植物会出现黄化和坏死斑点的形成,不利于林木生长发育^[3, 28];缺 Mn 会引起缩果病并导致组织坏死和脉间黄化,阻碍植物生长^[29-31];缺 Fe 会导致植物叶片脉间失绿降低林木生产力,如果不治疗甚至可能导致树木死亡^[32-33];缺 Cu 主要影响生殖器官和幼叶,导致结实率降低,叶片顶端发白甚至顶梢枯死^[34]。缺 Mo 症状是植株矮小,生长缓慢,叶片失绿且有大小不一的黄色和橙黄色斑点,严重时叶缘萎蔫或扭曲呈杯状,老叶变厚、焦枯,以致死亡;另外,缺 Mo 多发生在酸性土壤中,且伴有 Mn 和 Al 的毒害,常在酸性土壤上以施用石灰防止缺 Mo 症。B 参与细胞分裂、细胞壁的合成及酚类化合物的变化等生理过程,此外 B 能促进花管萌发与其解毒作用密切相关,磷酸可与有毒物质黄碱素形成非活性物质使之失去毒性^[3, 35];缺 B 会影响植物的营养生长和生殖生长,抑制细胞扩增,降低植物的繁殖力,并导致分生组织死亡^[34]。Cl 参与细胞质酶活动,帮助稳定膜电位,并在光合作用中发挥辅助因子的作用;缺 Cl 会造成叶子生长量减少和叶片枯萎坏死,严重时甚至会导致根系发育不良和果实变小^[36-38]。Ni 在许多酶结构起着关键作用,包括乙醛酶、尿素酶、超氧化物分解酶等;缺 Ni 会导致尿素积累、叶片坏死病变^[39-41]。

表 1 微量元素在林木中的功能及其缺乏症状

Table 1 The function of micronutrient elements and their deficiency symptoms in forest

微量元素 micronutrient	功能 function	缺乏症状 deficiency symptom
B	激活某些脱氢酶,参与碳水化合物代谢、细胞壁的合成,对细胞分裂和细胞发育至关重要	芽尖和根尖的生长点死亡,影响花芽发育
Cu	许多重要氧化酶的组成成分,在光合作用、蛋白质和碳水化合物中很重要	幼叶黄化,叶端卷曲,顶梢枯死,生长受阻
Fe	在叶绿素形成、光合作用和电子转移发挥重要作用,并且是过氧化氢酶、过氧化物酶的重要组成部分	幼叶变黄,叶脉仍为绿色,严重时整个叶片枯黄或发白,叶缘枯死
Mn	激活脱羧酶、脱氢酶和氧化酶;参与光合作用;促进氮素代谢和氮素同化	叶脉和叶脉周围组织为浅绿色,晚期叶片组织坏死
Mo	硝酸盐还原酶和 N ₂ 固定酶的必需组成成分	幼叶有白斑,叶片泛白枯黄,有时顶端甚至死亡
Zn	某些脱氢酶、蛋白酶和肽酶的必需成分	叶片变小失绿,在叶中部有明显白色条纹
Cl	调节细胞质酶活动,稳定膜电位,并在光合作用中发挥辅助因子的作用	叶片枯萎,根系生长发育不良及果实变小
Ni	在尿素分解、维持细胞氧化还原状态及抗逆性发挥重要作用	叶片坏死病变

已有研究表明,适当施用微量元素能促进林木生长发育,如:施用 0.2% 和 0.3% 的 Zn 对杜仲 (*Eu-*

commia ulmoides) 地径的增加均有显著促进作用^[42];施用 B 肥能显著提高山核桃 (*Carya*

cathayensis) 花粉活力, 促进果实发育^[43]。Göransson^[44]研究在无污染的条件下 Fe、Mn、Zn 对垂枝桦(*Betula pendula*) 的生长反应, 结果显示, 林木净增长与 Fe、Mn、Zn 的含量呈线性相关, 在有 Fe、Zn 存在的条件下, 林木对营养的需求是正常的多倍, 但 Fe、Zn 超过一定含量时会维持在一定水平。

林木对不同微量元素及各元素间相互作用所产生的反应不同, 如湿地松(*Pinus elliottii*) 对微量元素反应的敏感度排序为 $B > Cu > Zn > Mn > Fe$, 在滨海平原对湿地松施用适量的 Cu、Zn、Mn 元素都会使芽质量增加, 但微肥过量会造成 Zn、Fe 最先表现出毒害症状^[17]; Hoyle^[45]研究了酸性土壤中生长的黄桦(*Betula alleghaniensis*) 对加入微量元素的反应, 结果表明 Cu、Zn、Mo 的增加对植株的高度和胸径均无显著影响, 但 Zn 对提高叶干质量有显著影响, Zn 和 Mn 对提高茎干质量也有显著影响, 而 Mo、Cu、Zn 对 Al 均有限制作用, 且依次提高。林木与微量元素之间关系较为复杂, 这可能与林木不同位置 and 不同生长发育阶段有关。Evans^[46]测定了石梓(*Gmelina chinensis*) 叶不同位置 and 不同叶龄的营养元素含量, 结果发现随着树冠的增大, Zn、B 含量降低而 Fe 含量增加, 树冠内部的养分含量波动比外部轻微, 叶龄的增加会导致 Fe、B、Mn 含量的增多。

2.2.3 林木对微量元素吸收转运的分子机制

微量元素参与非常广泛的代谢过程, 包括从初级、次级代谢到细胞防御, 从信号传导到基因调节、能量代谢和激素感知^[47-49]。Fe、Zn 是植物生长发育所必需的微量元素, 在模式植物拟南芥(*Arabidopsis thaliana*) 中, Zn 调控转运蛋白家族(ZRT)及 Fe 调控转运蛋白家族(IRT)合称为锌铁转运蛋白(ZIP)。ZIP 家族转运蛋白共有 7 个成员, 分别为 ZIP1~4 和 IRT1~3, 其中 ZIP1~3 能在缺 Zn 的根中过表达, 而 ZIP4 在缺 Zn 植物的根和芽中表达^[50]。土壤中 Fe^{3+} 由于其溶解度较低而无法在正常生理条件下被植物吸收。在非禾本科植物中, Fe 的运输需要位于质膜的 AHA 分泌质子, 从而增加根际酸化和促进 Fe^{3+} 的溶解度, 随后 Fe^{3+} 通过还原酶基因 *FROs* 还原为 Fe^{2+} , 被铁调节转运体 *IRT1* 基因转运到根细胞^[51]。由于 Fe^{2+} 转运蛋白 IRT1 对底物选择性不强, 在转运 Fe^{2+} 的同时也会非特异性地转运 Zn^{2+} 和其他金属离子。NRAMP、ZIP 和 YSL 转运蛋白家族可以促进植物对 Mn 的吸收, 阳离子跨膜转运蛋白(CAX)、阳离

子/钙交换剂(CCX)、P 型 ATPase、液泡铁离子转运蛋白(VIT)和阳离子扩散促进剂/金属耐受蛋白(CDF/MTP)可提高植物对锰抵抗的耐受能力^[52-53], 但目前对植物中 Mn 吸收的某些转运蛋白家族成员仍知之甚少。有研究发现, 缺 B 条件下 AdNIP5-1 主要在猕猴桃(*Actinidia chinensis*) 根部表达强烈上调, 而在茎和叶中表达量较低, 这对研究缺 B 植物生长发育及所需的 B 吸收至关重要^[54]。枳缺 B 时, B 转运蛋白 PtrBOR3 可在根中表达量升高, Ptr-BOR4 在茎中表达量升高, 而 Ptr-BOR1、PtrBOR2 表达量在根、叶中均升高^[55]。关于 Cu 转运蛋白可分为 3 类, 即吸收型 Cu 转运蛋白(COPT、ZIP 和 YSL 蛋白家族)、排出型 Cu 转运蛋白(如 HMA、PAA 蛋白家族)和 Cu 伴侣蛋白(如 CCS、ATX1 和 CCH)。其中对 COPT 蛋白家族的研究较多, 植物转运蛋白 COPT 家族在橡胶树(*Hevea brasiliensis*) 有 9 个成员, 除 HbCOPT2 定位在线粒体膜内膜上, 可能介导 Cu^{2+} 由线粒体向胞质运输, 其余均定位在细胞质膜上, 推测它们可能负责吸收 Cu^{2+} , 而大多 HbCOPTs 在橡胶树根部均有较高表达^[56], 所以 COPT 家族对调节林木体内 Cu 稳态平衡过程中发挥重要作用。Mo 以各种形式存在土壤中, 但只有钼酸盐(溶解形式)才能被植物吸收^[57]。在模式植物拟南芥中, MOT1 是位于质膜或内膜上的高亲和力钼酸盐转运蛋白, 它可以帮助植物在土壤 Mo 含量很低的情况下吸收 Mo^[58-60]; 另一个拟南芥蛋白是液泡中的 MOT2, 在缺乏 MOT2 的植物中, 其在叶片中的积累、种子中的减少以及衰老叶片中 MOT2 活性的增加表明, MOT2 可能将钼酸盐从液泡中运输到细胞质中^[61], 这些研究表明钼酸盐转运蛋白能促进 Mu 的吸收和分配, 从而保证植物正常生长发育。已被报道参与 Cl^{-} 运输的转运体包括 SLAC、ALMT、ABC、CLC、CCC 和 NRT 等^[62]。对柑橘的研究表明, *NRT1* 基因在不含 Cl^{-} 的基因中恒定表达, 在 Cl^{-} 积累基因型中表达下调, 推测这可能与 Cl^{-} 浓度过高对硝酸盐吸收的影响有关^[63]。Ni 可以通过各种阳离子运输系统运输, 如 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} , 也可以通过螯合剂、金属硫蛋白(MT)、YSL 蛋白运输^[64-66]。

2.3 微量元素与土壤、林分类型及林木病虫害的关系

2.3.1 与土壤的关系

植物微量元素含量与土壤养分密切相关, 土壤中微量元素的有效性由母质、土壤的理化性质及生

物因素的影响决定,如酸碱度、氧化还原电位、与共存离子的相互作用、与土壤矿物质的反应、有机质和土壤微生物活性等^[67-69]。整地会改变土壤有效态微量元素(除有效 B 外)的剖面分布规律,使各土层中微量元素含量分布均匀^[70-71]。丁锐等^[72]研究发现各类土壤对 B 的吸附能力由大到小的顺序是砂岩类>花岗岩类>第四纪红壤类等>千枚岩类,对 Zn 的吸附能力由大到小的顺序是第四纪红壤类>千枚岩类>砂岩类>花岗岩类土壤,对 Cu 的吸附能力的差异较小。傅金和等^[73]对杉木叶片微量元素含量与土壤的相关性研究表明,杉木叶片和土壤中均呈现 Mn 高量,Fe、Zn、Cu 适量,B 低量的现象,其原因是整个红壤区土壤有效 B 少(<0.5 μg/g)导致杉木叶中 B 含量低(<15 μg/g),在林地适当施用 B 肥后,发现对杉木根系发育及果实、种子形成会起促进作用,同时也证实了杉木是富集 Mn 的植物。土壤中微量元素的供给状况对植物的生长发育有着密切的关系,不同土壤中微量元素的含量、形态和分布规律有很大差别,对其进行合理分析和评价,有助于正确施肥。

土壤 pH 是影响林木对微量元素吸收的一个重要因子,因为它会影响土壤中有效微量元素含

量。有研究发现,土壤有效 B 含量与土壤 pH 呈正相关,土壤有效 Fe、有效 Mn、有效 Zn 及有效 Cu 含量与土壤 pH 均呈负相关,而土壤中有有效 Mn 含量与土壤 pH 相关性最大,有效 Fe 含量与土壤 pH 的相关性最小^[74]。不同微量元素对土壤酸碱度的依赖性也不相同,如对蓝莓园的研究表明,Fe、Cu 对 pH 的依赖性高于 Zn、Mn,能被植物利用的有效 Cu、Fe 也高于 Zn、Mn^[75]。

土壤有机质与土壤微量元素有效态密切相关^[76]。土壤有机质通过降低微量元素的活性,吸附、络合或沉淀土壤中的微量元素如 Cu、Zn、Mn 等,影响它们在土壤环境中的迁移转化^[77]。曾曙才等^[78]对宁镇丘陵区几种主要森林类型土壤中 Fe、Mn、Cu、Zn、Mo、B 等 6 种微量元素全量和有效量以及影响微量元素有效性的主要土壤因子等进行了研究,结果表明受土壤有机质和速效 P 含量等因子影响,该地区有效态 B、Mo、Cu 含量很低,均处于临界含量水平以下,有效 Zn 含量稍高,有效 Fe、Mn 特别丰富,Fe/Mn 比例严重失调。含微量元素的土壤主要矿物质及 pH 对土壤和林木吸收微量元素的影响情况^[79-83]汇总见表 2。

表 2 土壤主要矿物质及 pH 对土壤和林木吸收微量元素的影响
Table 2 Effects of main soil minerals and soil pH on the absorption of trace elements by soil and trees

元素 element	矿物质类型 mineral type	对浓度/吸收的影响 effect on concentration/absorption
B	硼酸盐:Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O、Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O、Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O、NaCaB ₃ O ₉ ·4H ₂ O	土壤 pH 的增加有利于 B 的吸附;在 pH>6.0 时,B 的有效性和摄入量急剧下降
Cu	碳酸盐:Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃ 、Cu ₃ (OH) ₂ (CO ₃) ₂ 。氧化物:Cu ₂ O、CuO。 硫化物:Cu ₂ S、CuS、CuFeS ₂ 、Cu ₃ FeS ₄ 、Cu ₉ S ₅ 、Cu ₃ AsS ₄ 、Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	Cu ²⁺ 的溶解度与土壤 pH 密切相关,pH 每增加 1 个单位,Cu ²⁺ 溶解度会降低 100 倍,植物对该元素的吸收也会减少
Fe	碳酸盐:FeCO ₃ 。氧化物:Fe ₂ O ₃ 、Fe ₃ O ₄ 、FeOOH。硫化物:FeS ₂ 。 硫酸盐:KFe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₄	土壤中的 Fe ³⁺ 和 Fe ²⁺ 的活性每降低一个单位,土壤 pH 就会分别降低 1 000 倍和 100 倍;林木对土壤中 Fe 的吸收也会减少
Mn	碳酸盐:MnCO ₃ 。氧化物:MnO ₂ 、Mn ₃ O ₄ 、MnOOH、(Mn, Si) ₂ O ₃ 、BaMg ₉ O ₁₈ ·2H ₂ O。硅酸盐:MnSiO ₃	土壤 pH 每增加 1 个单位,其浓度就会降低 100 倍;在极端酸性土壤中,Mn ²⁺ 的溶解度变大,从而对林木产生毒害作用
Mo	氧化物:Mo ₃ O ₈ ·8H ₂ O。钼酸盐:PbMoO ₄ 、CaMoO ₄ 、Fe ₂ (MoO ₄)·8H ₂ O	MoO ₄ ²⁻ 浓度随土壤 pH 增加而增大,林木吸收也会增加
Zn	碳酸盐:ZnCO ₃ 。硫化物:ZnS。硅酸盐:Zn ₄ (OH) ₂ Si ₂ O ₇ ·H ₂ O	pH 每增加一个单位,Zn 的溶解度就会降低 100 倍,林木吸收量降低
Cl	钾盐:KCl。钾盐镁矾:KCl·MgSO ₄ ·3H ₂ O。无水钾镁矾:K ₂ SO ₄ ·2MgSO ₄	土壤 pH 升高,林木对 Cl 的吸收增强
Ni	硫镍铁矿:(Fe, Ni) ₉ S ₈ 。铁镍矿:Ni ₃ Fe。陨碳铁:(Fe, Ni) ₃ C。镍:Ni	在酸性土壤中 Ni 的可用性比碱性土壤高

2.3.2 与林分类型的关系

植物对营养元素的吸收和积累在不同林分中有一定区别。有研究表明,各混交树种营养元素含

量存在较大差别,但营养元素含量比值变异系数较小^[84],说明这些元素具有互补性,对树种生长具有协同作用,这种差别和互补性使种间关系向着协调

方向发展,有利于林分生长。不同林分中,微量元素有效性综合指数大小为针阔混交林>灌木林>针叶林>阔叶林^[85]。除混交外,轮作会影响林木元素水平,且 Cu、Fe、Mn 含量在轮作过程中含量变化最大^[86]。混交和轮作能够提高林地营养元素的有效利用率,栽培 2~3 代桉树后接着栽培一代厚荚相思(*Acacia crassicarpa*),能有效改良桉树林地土壤,恢复并提高土壤肥力^[87]。林分密度也是制约微量元素有效含量的重要因素,如马尾松针叶凋落前,针叶中的 Mn 含量随林分密度增大而提高;凋落后,针叶中 Fe 转移率随林分密度增大而降低^[88],这可能是由于针叶凋落前马尾松对 Mn 元素需求较多,而凋落后对 Fe 元素需求量较少。

通过了解林木在不同林分下的元素积累能力可以择优种植,提高效益。彭龙福^[89]对不同立地条件下闽楠(*Phoebe bournei*)人工林的乔木层、下木层、草本层、凋落物及分解物、土壤层进行取样检测,证实各营养元素的平均含量及其积累量均随林分立地质量下降而明显下降,营养元素在各层中积累量大小的总体趋势为乔木层>草本层>灌木层,所以改善林木类型可明显加快林地地力恢复和林木生长。

2.3.3 与其他环境条件的关系

林木生长的环境条件如病害、气候、物候期、化学物质等也常常会影响植株体内元素的含量,从而对林木生长发育产生影响。如对桑树(*Morus alba*)粗皮病与缺 B 情况的研究表明,干旱使 B 的有效性降低、固定作用增强,湿润多雨地区常由于强烈的淋洗作用而导致 B 的损失,且轻质土壤更加显著^[90]。有时候砧木也会是树木缺素产生病症的因素之一,如苹果树(*Malus pumila*)嫁接用山丁子(*Malus baccata*)做砧木易发生黄化,而以海棠(*Malus spectabilis*)、楸子(*Malus prunifolia*)做砧木则黄化相对较轻^[91]。化学物质丹宁酸也会影响植株营养元素含量,丹宁酸含量较低时,营养元素释放多,且土壤表层 5 cm 处的含量比表层的要多,大量元素释放量比微量元素的高^[92]。在板栗(*Castanea mollissima*)韧皮组织的营养变化和植物害虫的易感性研究中发现,与健康植株相比,染病植株中的 N、K、Fe 含量较高, Ca、N 含量比值(记为 Ca/N)较低,而健康植株中 Ca/N 不同时期有显著变化, Ca、Mg、K 含量较高^[93];对生长不良和健康生长的杧果(*Mangifera indica*)树中营养元素的分布格局进行比较发现,在叶和嫩枝中,健康植株的 Fe、Cu、Mn 含量较低,生长畸形的植株叶和枝中

Zn、B 含量较高,花中微量元素含量普遍较低,新芽中较高^[94]。

2.4 林木营养诊断及施肥方法的应用

2.4.1 功能性肥料研究与应用

为了提高肥料使用效率并最大限度地减少其对环境的不利影响,功能性肥料成为当前研究热点。功能性肥料是一种将营养物质与限制植物生长发育的因素相结合的具有针对性的新型肥料,主要是改善土壤理化性质、提高植物抗病虫害和抗逆性等能力的肥料。程文林等^[95]对苹果喷施磁化复合肥发现叶片的 Mn、Zn、Cu、Fe 含量平均提高 5.15%、10.80%、21.59%、20.51%;幼果的 Mn、Zn、Cu、Fe 含量平均提高 27.18%、53.32%、19.73%、38.53%。王婷等^[96]研究保水剂与外源物质复合配方对苗木蒸腾速率和叶水势的影响,筛选出山杏(*Prunus sibirica*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)的最佳配方分别为保水剂(SAP)10 g+吡啶乙酸(IAA)0.25%+萘乙酸(NAA)0.50%+聚天门冬氨酸(PASP)10 g 和保水剂(SAP)15 g+IAA 0.25%+NAA 0.50%+PASP 1 g,这对于干旱地区的苗木培育具有指导意义。广东省农业科学院从海洋生物、天然植物中提取了活性寡糖与多种微量元素复合而成的纯天然植物营养素应用于茶树(*Camellia sinensis*),结果表明,它对茶树生长有促进作用,增产可达 7.9%~22.0%,且虫害减少,能促进茶叶品质的提高^[97]。

2.4.2 微量元素施肥方法的应用

高效、节能地应用肥料已是一个重要的课题,多种功能性新型肥料在农林业发达国家已经广泛应用,发展中国家也在试图找出解决土壤缺素和作物生产力下降而又兼顾环境的施肥方法^[98]。林木尤其是果树在正常生长过程中,对微量元素的需求量不多但极其重要。施用有机肥可使微量元素处于可利用状态并缓解其产生的毒性,大量元素的满足会促使微量元素的效应增加,因此要根据植物类型、各器官元素分布及土壤条件针对性地施用微量元素^[99],还要根据土壤中微量元素含量、作物的营养特性、营养元素平衡及互作效应来选择合适的施肥方式^[100]。

施肥时间和方法的合理结合也是提高肥效的重要途径,如在沙棘(*Hippophae rhamnoides*)园施肥要早施且少施氮,适时适量施用磷钾肥,多施有机堆肥,并注意施用中微量元素肥和微生物肥^[101]。对柑橘的研究表明,喷施 B 肥后,叶的吸收量很少,仅 0.3%,而且越老的部位营养积累量越

少^[102]。针对杧果缺B的习性,有研究指出在高降雨量地区,硼酸和农场厩肥结合施用效果理想,低降雨量区硼砂与农场厩肥混施效果佳^[103]。微量元素既可通过土壤施肥,也可通过叶面施肥或种肥、底肥来调节,在颗粒状(或液态)大量元素中添加微量元素,可以使微量元素均匀分布,达到营养全面^[104]。酸性土壤缺B可使用含B肥料如硼酸和四硼酸钠($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)来矫正;B肥可以与N肥和P肥混合使用,也可以单独施用,但要注意避免局部浓度过高产生毒害;浸种可用硼砂或硼酸溶液,根外追肥可用0.01%硼砂或硼酸溶液喷雾。对于多年生经济林,如苹果树、桑树等应推广叶面施B^[90]。

3 林木施用微量元素存在的问题与展望

虽然我国存在林木可用的微肥品种和产量不多等问题,与国外相关情况相比还有一定差距,如尚未组织微肥生产和制定质量标准,产品未达到多样化、定型化等;同时,不同微量元素之间存在协同或拮抗作用,而目前生产中尚未掌握完整的土壤微量元素分布规律,林木施肥存在一定的盲目性。随着我国生态农林业的发展,微生物肥料是目前研究热点,它具有无污染、更高效的优点。因此在林木施肥中采用微生物肥,可以减缓土地营养衰退趋势,同时通过树种选优、改良土壤、加强管理来提高总体效益。

1)考虑客观条件进行试验。根据以上的总结,有关微量元素的实验很多是在无病毒、不受干扰或标准立地条件下完成的,其结果和实际情况有一定的差距,因此生产中需要大田试验才可推广。另外,由于物候期的不同,试验时要提前多次观察标记并保证植株健康,且各试验目标处在同一水平上。处于幼龄期的林分,由于没有和生长状况紧密结合,其中很多因子还未呈现出规律性,再加上土壤营养元素含量积累量、林下植被、理化性质的变化需要进一步研究。因此,肥料的实施和分配,在实际环境下应根据不同条件不同对待。

2)充分运用地被物的养分循环。很多研究过程都涉及凋落物的营养元素诊断,作为营养元素生物循环的主要归还者,凋落物可以促成土壤腐殖质的合成和分解,加快和补充林地养分的循环和积累,改善土壤物理性质,提高林分水源涵养功能。如杉木林净生产力(5.298 t/hm^2)是活地被物(1.356 t/hm^2)的4倍多,但它们的微量元素年净积累量相差无几,杉木为 $2.274 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 、活地

地被物为 $2.145 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,由此看来,活地被物对营养元素的吸收能力较强,故可以每年在成林里对活地被物进行刈割,置于林地以加速林木的养分循环,并可缓解活地被物与林木竞争养分^[73]。

3)定向培育。根据微量元素在林木不同器官的含量和各元素之间的相互作用,可以针对性地实施对所需部位生长有利的施肥方法提高林木经济效益。我国在人工林经营上笼统地强调“速生丰产”,没有具体的生产目标,盲目造林和盲目施肥会造成人力、物力、财力上的极大浪费。施肥在增加林木生长、提高木材产量的同时,也会影响林木抗霜冻能力、抗病虫能力,以及木材的材质、材性和木浆质量等,因此作为不同培育目标的同一树种施肥技术应是不相同的。另外,植物叶片缺素临界值和土壤有效元素临界值的测定十分必要,植物的缺素症状并非都能表现出来,有些未表现的潜在缺素症状可能占据更大的比例^[105],要针对性地观察和试验才能确定林木对元素的具体需要。施肥作为林木培育的一种基础技术措施,应该在不同的培育目标下进行分类研究。

4)诊断技术的系统化与程序化。林木营养诊断标准是搞好林分营养管理的一个有效工具,除养分元素本身的影响外,还受环境因子和林木生长,以及人为因素如研究区域、采样数量、分析方法和研究手段等的影响。林木种类不同及生长发育阶段不同对营养元素的需求也不尽相同,我国现有的一些营养诊断标准只是一种局部的结果,因此可对这方面养分需求规律进行研究。另外,可将营养诊断技术与计算机技术融合来指导林木的合理施肥。

5)利用生物技术提高林木对微量元素的利用率。虽然目前一些关于肥料的研究成果已经应用于实践,但是就国内来说各方面还比较欠缺。如对微量元素研究的分子机制多为模式植物拟南芥,针对林木的研究较少。因此运用先进的生物技术更加深入地了解树木养分代谢机理、营养吸收特性及需肥规律极为重要,如通过分子生物学探究林木体内对微量元素吸收或耐受的基因,还可以利用微生物学,如菌根真菌、细菌等提高林木在逆境下(微量元素浓度过高或过低)的适应性并在实际中应用。

参考文献(reference):

- [1] FOX T C, GUERINOT M L. Molecular biology of cation transport in plants[J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1998, 49:

- 669-696. DOI: 10.1146/annurev.arplant.49.1.669.
- [2] MORADI S, JAHANBAN L. Salinity stress alleviation by Zn as soil and foliar applications in two rice cultivars [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2018, 49(20): 2517-2526. DOI: 10.1080/00103624.2018.1526941.
- [3] VATANSEVER R, OZYIGIT I I, FILIZ E. Essential and beneficial trace elements in plants, and their transport in roots; a review [J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2017, 181(1): 464-482. DOI: 10.1007/s12010-016-2224-3.
- [4] 申红芸, 熊宏春, 郭笑彤, 等. 植物吸收和转运铁的分子生理机制研究进展 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1522-1530. SHEN H Y, XIONG H C, GUO X T, et al. Progress of molecular and physiological mechanism of iron uptake and translocation in plants [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2011, 17(6): 1522-1530. DOI: 10.11674/zwyf.2011.1057.
- [5] MENDEL R R, LEIMKÜHLER S. The biosynthesis of the molybdenum cofactors [J]. *J Biol Inorg Chem*, 2015, 20(2): 337-347. DOI: 10.1007/s00775-014-1173-y.
- [6] SHAND C, BARKER, PILBEAM A V, et al. Handbook of plant nutrition [J]. *Exp Agric*, 2008, 44(2): 274. DOI: 10.1017/S001447970800625X
- [7] 左继林, 周文才, 孙颖, 等. 水肥综合措施对油茶经济性状与产量的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(12): 89-95. ZUO J L, ZHOU W C, SUN Y, et al. Effect on yield and economic characters of *Camellia oleifera* fruit by water and fertilizer comprehensive measures [J]. *J Central South Univ For Technol*, 2018, 38(12): 89-95. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.12.012
- [8] 马闪闪, 程礼泽, 丁立忠, 等. 硼锌铜微肥配施对山核桃生长和产量的影响 [J]. *浙江林业科技*, 2016, 36(2): 31-36. MA S S, CHENG L Z, DING L Z, et al. Application of B, Zn and Cu fertilizer on growth and yield of *Carya cathayensis* [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2016, 36(2): 31-36. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3776.2016.02.006.
- [9] 林宝刚, 任韵, 柳寒, 等. 不同生态区对油菜薹营养品质的影响及摘薹后产量表现 [J]. *核农学报*, 2020, 34(9): 2071-2079. LIN B G, REN Y, LIU H, et al. Effects of ecological sites on the nutritional quality of young stem of rapeseed and yield performance after post-harvesting [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2020, 34(9): 2071-2079. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2020.09.2071.
- [10] 王卫平, 薛智勇, 朱凤香, 等. 豇豆对营养元素的吸收积累与分配规律研究 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 158-161, 171. WANG W P, XUE Z Y, ZHU F X, et al. Study on characteristics of accumulation and distribution of nutritional elements' uptake of *Asparagus bean* [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, 27(6): 158-161, 171. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2013.06.046.
- [11] 朱涵毅, 陈益军, 劳佳丽, 等. 外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 603-609. ZHU H Y, CHEN Y J, LAO J L, et al. The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(2): 603-609. DOI: 10.5846/stxb201111251802.
- [12] 李欢, 李建贵. 果园微气候及土壤养分对灰枣果实矿物元素含量的影响 [J]. *经济林研究*, 2016, 34(3): 8-15. LI H, LI J G. Effects of orchard microclimate and soil nutrients on mineral elements contents in gray jujube fruits [J]. *Nonwood For Res*, 2016, 34(3): 8-15. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2016.03.002.
- [13] 刘辉强. 林木施肥研究综述 [J]. *安徽农学通报*, 2010, 16(10): 139-141. LIU H Q. Review of forest fertilization research [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2010, 16(10): 139-141. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7731.2010.10.083.
- [14] 李贻铨, 杨承栋. 中国林木施肥与营养诊断研究现状 [J]. *世界林业研究*, 1998, 11(3): 58-65. LI Y Q, YANG C D. Status of the research in fertilization and nutrient diagnosis of forest soil in China [J]. *World For Res*, 1998, 11(3): 58-65.
- [15] 吴立潮, 胡曰利. 林木计量施肥研究动态 [J]. *中南林学院学报*, 1998, 18(2): 56-61. WU L C, HU Y L. Advances in research on theories and methods of forest calculated fertilization [J]. *J Central South For Univ*, 1998, 18(2): 56-61.
- [16] 于彬, 郭彦青, 陈金林. 杨树配方施肥技术研究进展 [J]. *西南林学院学报*, 2007, 27(2): 85-90. YU B, GUO Y Q, CHEN J L. Research advances of prescribed fertilization for *Populus* plantation [J]. *J Southwest For Coll*, 2007, 27(2): 85-90. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1914.2007.02.021.
- [17] VAN LEAR D H, SMITH W H. Relationships between macro and micronutrient nutrition of slash pine on three coastal plain soils [J]. *Plant Soil*, 1972, 36(1): 331-347. DOI: 10.1007/BF01373488.
- [18] TENG Y X, TIMMER V R. Phosphorus-induced micronutrient disorders in hybrid poplar [J]. *Plant Soil*, 1990, 126(1): 19-29. DOI: 10.1007/BF00041365.
- [19] WATERS B M, ARMBRUST L C. Optimal copper supply is required for normal plant iron deficiency responses [J]. *Plant Signal Behav*, 2013, 8(12): e26611. DOI: 10.4161/psb.26611.
- [20] 曹秀, 夏仁学, 杨环宇, 等. 沙培条件下磷、钾、钙亏缺对枳 (*Poncirus trifoliata*) 幼苗根系形态及营养吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 981-988. CAO X, XIA R X, YANG H Y, et al. Effects of P, K and Ca deficiency on the root morphology and nutrient absorption of *Poncirus trifoliata* seedlings [J]. *J Plant Nutr Fertil*, 2014, 20(4): 981-988. DOI: 10.11674/zwyf.2014.0421.
- [21] MAALEJ M, CHAARI-RKHISS A, DRIRA N. Contribution to the improvement of olive tree somatic embryogenesis by mineral and organic analysis of zygotic embryos [J]. *Euphytica*, 2006, 151(1): 31-37. DOI: 10.1007/s10681-006-9110-y.
- [22] LUWE M W F. Distribution of nutrients and phytotoxic metal ions in the soil and in two forest floor plant species of a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand [J]. *Plant Soil*, 1995, 168(1): 195-202. DOI: 10.1007/BF00029329.
- [23] FAGERIA N K, BALIGAR V C, CLARK R B. Micronutrients in crop production [J]. *Adv Agron*, 2002, 77: 185-268. DOI: 10.1016/S0065-2113(02)77015-6.
- [24] 罗赵慧, 田大伦, 田红灯, 等. 湘潭锰矿废弃地栎树人工林微量元素生物循环 [J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6517-6525. LUO Z H, TIAN D L, TIAN H D, et al. Biological cycling of *Koeleria paniculata* plantation microelements in Xiangtan Manganese Mine wasteland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(20): 6517-6525. DOI: 10.5846/stxb201304280866.
- [25] 罗佳, 陈永忠, 周小玲, 等. 油茶林果实成熟期养分分配特征 [J]. *经济林研究*, 2017, 35(3): 102-108. LUO J, CHEN Y Z, ZHOU X L, et al. Nutrient distribution in *Camellia oleifera* forest at fruit maturation period [J]. *Nonwood For Res*, 2017, 35(3): 102-108. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2017.03.014.
- [26] HAGEN-THORN A, STJERNQUIST I. Micronutrient levels in some temperate European tree species: a comparative field study

- [J]. Trees, 2005, 19(5): 572–579. DOI: 10.1007/s00468-005-0416-5.
- [27] KOSIOREK M, MODRZEWSKA B, WYSZKOWSKI M. Levels of selected trace elements in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* L.), and Norway maple (*Acer platanoides* L.) in an urbanized environment [J]. Environ Monit Assess, 2016, 188(10): 598. DOI: 10.1007/s10661-016-5600-0.
- [28] SADEGHZADEH B, RENDEL Z. Zinc in soils and crop nutrition [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [29] MARSCHNER H. Marschner's mineral nutrition of higher plants [M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2012.
- [30] YIN C M, ZHAO W X, ZHENG L S, et al. High-level expression of a Manganese superoxide dismutase (PoMn-SOD) from *Pleurotus ostreatus* in *Pichia pastoris* [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2014, 174(1): 259–269. DOI: 10.1007/s12010-014-1057-1.
- [31] 张宣, 宋韬亮, 刘平, 等. 枣缩果病发生与矿质元素含量的关系 [J]. 林业科学, 2019, 55(2): 109–117. ZHANG X, SONG T L, LIU P, et al. Relationships between fruit shrinking disease and mineral element contents in *Ziziphus jujuba* [J]. Sci Silvae Sin, 2019, 55(2): 109–117. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20190211.
- [32] LÓPEZ-MILLÁN A F, GRUSAK M A, ABADÍA A, et al. Iron deficiency in plants: an insight from proteomic approaches [J]. Front Plant Sci, 2013, 4: 254. DOI: 10.3389/fpls.2013.00254.
- [33] TAVSAN Z, KAYALI H A. The effect of iron and copper as an essential nutrient on mitochondrial electron transport system and lipid peroxidation in *Trichoderma harzianum* [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2013, 170(7): 1665–1675. DOI: 10.1007/s12010-013-0273-4.
- [34] MARSCHNER H. Functions of mineral nutrients; Macronutrients [M]//Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Amsterdam: Elsevier, 2002: 229–312. DOI: 10.1016/b978-0-08-057187-4.50014-x.
- [35] 张正仁, 宋长铨. 微量元素在植物生命活动中的作用 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 1991, 27(3): 530–539. ZHANG Z R, SONG C X. The action of micronutrients played in plant life [J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 1991, 27(3): 530–539.
- [36] BAETZ U, EISENACH C, TOHGE T, et al. Vacuolar chloride fluxes impact ion content and distribution during early salinity stress [J]. Plant Physiol, 2016, 172(2): 1167–1181. DOI: 10.1104/pp.16.00183.
- [37] XU G H, MAGEN H, TARCHITZKY J, et al. Advances in chloride nutrition of plants [J]. Adv Agron, 1999, 68: 97–150. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60844-5.
- [38] WHITE P J, BROADLEY M R. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: a review [J]. Ann Bot, 2001, 88(6): 967–988. DOI: 10.1006/anbo.2001.1540.
- [39] FABIANO C C, TEZOTTO T, FAVARIN J L, et al. Essentiality of nickel in plants: a role in plant stresses [J]. Front Plant Sci, 2015, 6: 754. DOI: 10.3389/fpls.2015.00754.
- [40] POLACCO J C, MAZZAFERA P, TEZOTTO T. Opinion: nickel and urease in plants: still many knowledge gaps [J]. Plant Sci, 2013, 199/200: 79–90. DOI: 10.1016/j.plantsci.2012.10.010.
- [41] KÜPPER H, KRONECK P M H. Nickel in the environment and its role in the metabolism of plants and cyanobacteria [M]//Nickel and Its Surprising Impact in Nature. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007: 31–62. DOI: 10.1002/9780470028131.ch2.
- [42] 曹瑞致. 不同生长调节剂和微量元素处理对杜仲生长及次生代谢物含量的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. CAO R Z. The effect of different growth regulators and micro nutrient on the content of secondary metabolites in *Eucommia ulmoides* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [43] 程礼泽. 微量元素营养对山核桃生长和产量的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015. CHENG L Z. Effect of trace elements on plant growth and nut yield of *Carya cathayensis* [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2015.
- [44] GÖRANSSON A. Growth and nutrition of small *Betula pendula* plants at different relative addition rates of iron [J]. Trees, 1993, 8(1): 31–38. DOI: 10.1007/BF00240979.
- [45] HOYLE M C. Response of yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britton) in acid subsoil to micronutrient additions [J]. Plant Soil, 1979, 51(3): 453–455. DOI: 10.1007/BF02197794.
- [46] EVANS J. The effects of leaf position and leaf age in foliar analysis of *Gmelina arborea* [J]. Plant Soil, 1979, 52(4): 547–552. DOI: 10.1007/BF02277950.
- [47] BARKER A V, PILBEAM D J. Handbook of plant nutrition [M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [48] MAATHUIS F J M. Plant mineral nutrients: methods and protocols [M]. New York: Humana Press, 2013.
- [49] MENGEL K, KIRKBY E A, KOSEGARTEN H, et al. Principles of plant nutrition [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. DOI: 10.1007/978-94-010-1009-2.
- [50] GROTZ N, FOX T, CONNOLLY E, et al. Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency [J]. PNAS, 1998, 95(12): 7220–7224. DOI: 10.1073/pnas.95.12.7220.
- [51] ZHANG X X, ZHANG D, SUN W, et al. The adaptive mechanism of plants to iron deficiency via iron uptake, transport, and homeostasis [J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(10): 2424. DOI: 10.3390/ijms20102424.
- [52] SOCHA A L, GUERINOT M L. Mn-euvering manganese: the role of transporter gene family members in manganese uptake and mobilization in plants [J]. Front Plant Sci, 2014, 5: 106. DOI: 10.3389/fpls.2014.00106.
- [53] 袁连玉, 陈应娟, 魏旭, 等. 茶树金属耐受蛋白基因 *CsMTP11* 的克隆及功能分析 [J]. 作物学报, 2017, 43(5): 708–717. YUAN L Y, CHEN Y J, WEI X, et al. Cloning and function analysis of metal tolerance gene (*CsMTP11*) in tea plant (*Camellia sinensis* L. O. Kuntze) [J]. Acta Agron Sin, 2017, 43(5): 708–717. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2017.00708.
- [54] 罗轩, 陈庆红, 张蕾, 等. 猕猴桃 *NIP5-1* 基因的克隆及缺硼胁迫表达分析 [J]. 分子植物育种, 2017, 15(6): 2094–2099. LUO X, CHEN Q H, ZHANG L, et al. Cloning and expression analysis under boron deficiency of *NIP5-1* gene in *Actinidia deliciosa* [J]. Mol Plant Breed, 2017, 15(6): 2094–2099. DOI: 10.13271/j.mpb.015.002094.
- [55] 颜廷帅, 罗庆, 彭抒昂. 5 个枳 *BOR* 基因的克隆与缺硼胁迫下的表达分析 [J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(5): 9–17. YAN T S, LUO Q, PENG S A. Cloning five *BOR* genes of *Poncirus trifoliata* (L.). Raf. and analyzing their expression under boron deficiency [J]. J Huazhong Agric Univ, 2016, 35(5): 9–17. DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2016.05.002.
- [56] 王聪, 校现周, 魏芳, 等. 橡胶树铜转运蛋白 HbCOPT 基因克隆与表达分析 [J]. 植物生理学报, 2016, 52(9): 1389–1396. WANG C, XIAO X Z, WEI F, et al. Cloning and expression analysis of copper transporter genes in rubber tree (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) [J]. Plant Physiol J, 2016, 52(9): 1389–

1396. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2016.0260.
- [57] IDE Y, KUSANO M, OIKAWA A, et al. Effects of molybdenum deficiency and defects in molybdate transporter MOT1 on transcript accumulation and nitrogen/sulphur metabolism in *Arabidopsis thaliana* [J]. J Exp Bot, 2010, 62(4): 1483–1497. DOI: 10.1093/jxb/erq345.
- [58] HAWKESFORD M J. Transporter gene families in plants: the sulphate transporter gene family—redundancy or specialization? [J]. Physiol Plant, 2003, 117(2): 155–163. DOI: 10.1034/j.1399–3054.2003.00034.x.
- [59] BAXTER I, MUTHUKUMAR B, PARK H C, et al. Variation in molybdenum content across broadly distributed populations of *Arabidopsis thaliana* is controlled by a mitochondrial molybdenum transporter (MOT1) [J]. PLoS Genet, 2008, 4(2): e1000004. DOI: 10.1371/journal.pgen.1000004.
- [60] TOMATSU H, TAKANO J, TAKAHASHI H, et al. An *Arabidopsis thaliana* high-affinity molybdate transporter required for efficient uptake of molybdate from soil [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104(47): 18807–18812. DOI: 10.1073/pnas.0706373104.
- [61] BITTNER F. Molybdenum metabolism in plants and crosstalk to iron [J]. Front Plant Sci, 2014, 5: 28. DOI: 10.3389/fpls.2014.00028.
- [62] TEAKLE N L, TYERMAN S D. Mechanisms of Cl^- transport contributing to salt tolerance [J]. Plant Cell Environ, 2010, 33(4): 566–589. DOI: 10.1111/j.1365–3040.2009.02060.x.
- [63] BRUMÓS J, COLMENERO-FLORES J M, CONESA A, et al. Membrane transporters and carbon metabolism implicated in chloride homeostasis differentiate salt stress responses in tolerant and sensitive *Citrus* rootstocks [J]. Funct Integr Genomics, 2009, 9(3): 293. DOI: 10.1007/s10142–008–0107–6.
- [64] TRAN T A, POPOVA L P. Functions and toxicity of cadmium in plants: recent advances and future prospects [J]. Turkish J Bot, 2013, 37(1): 1–13.
- [65] GAJEWSKA E, WIELANEK M, BERGIER K, et al. Nickel-induced depression of nitrogen assimilation in wheat roots [J]. Acta Physiol Plant, 2009, 31(6): 1291. DOI: 10.1007/s11738–009–0370–8.
- [66] NISHIDA S, TSUZUKI C, KATO A, et al. AtIRT1, the primary iron uptake transporter in the root, mediates excess nickel accumulation in *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant Cell Physiol, 2011, 52(8): 1433–1442. DOI: 10.1093/pcp/pcr089.
- [67] 汪家育, 于南子, 刘增芝. 西双版纳自然保护区森林土壤的微量元素 [J]. 云南林业调查规划, 1986, 11(4): 6–12. WANG J Y, YU N Z, LIU Z Z. Trace elements in forest soil of Xishuangbanna nature reserve [J]. For Invent Plan, 1986, 11(4): 6–12.
- [68] AFIF-KHOURI E, ÁLVAREZ-ÁLVAREZ P, FERNÁNDEZ-LÓPEZ M J, et al. Influence of climate, edaphic factors and tree nutrition on site index of chestnut coppice stands in north-west Spain [J]. Forestry (Lond), 2011, 84(4): 385–396. DOI: 10.1093/forestry/cpr025.
- [69] MASUNAGA T, MARQUES FONG J D. Strategies for increasing micronutrient availability in soil for plant uptake [M]//Plant Micronutrient Use Efficiency. Amsterdam: Elsevier, 2018: 195–208. DOI: 10.1016/b978–0–12–812104–7.00013–7.
- [70] 华颖, 王子芳, 高明, 等. 土地整理对土壤有效态微量元素的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 253–257, 274. HUA Y, WANG Z F, GAO M, et al. Impact of land consolidation on soil available microelements [J]. J Soil Water Conserv, 2014, 28(5): 253–257, 274. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2014.05.044.
- [71] 李荣华. 适量添加微量元素, 促进科学合理施肥 [J]. 中国农资, 2009(3): 64–65. LI R H. Adding trace elements to promote scientific and rational fertilization [J]. China Agric Means Prod, 2009(3): 64–65.
- [72] 丁锐, 邓小梅, 奚如春, 等. 广东省油茶林地不同母岩红壤养分限制因子研究 [J]. 经济林研究, 2012, 30(2): 61–67. DING R, DENG X M, XI R C, et al. Nutrient limiting factors in red soil from different parent rocks at oil-tea forest land of Guangdong Province [J]. Nonwood For Res, 2012, 30(2): 61–67. DOI: 10.14067/j.cnki.1003–8981.2012.02.005.
- [73] 傅金和, 潘维伟. 杉木人工林中微量元素营养元素的含量、积累和生物循环 [J]. 林业科学研究, 1990, 3(3): 280–285. FU J H, PAN W C. Contents, accumulations and biocycles of micronutrients in a Chinese fir plantation [J]. For Res, 1990, 3(3): 280–285.
- [74] 金媛, 陈良超, 冉隆贵, 等. 陕南茶园土壤微量元素有效性评价研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 153–161. JIN Y, CHEN L C, RAN L G, et al. Evaluation of available trace elements in soil of tea garden in southern Shaanxi [J]. J Northwest A F Univ (Nat Sci Ed), 2015, 43(3): 153–161. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwf.2015.03.014.
- [75] HAYNES R J, SWIFT R S. Effects of soil acidification on the chemical extractability of Fe, Mn, Zn and Cu and the growth and micronutrient uptake of highbush blueberry plants [J]. Plant Soil, 1985, 84(2): 201–212. DOI: 10.1007/BF02143184.
- [76] 王凌云, 喻荣岗, 万佳蕾, 等. 马尾松纯林与枫香木荷混交林土壤微生态环境差异分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(12): 82–86. WANG L Y, YU R G, WAN J L, et al. Variation analysis on soil micro-eco-environment of *Pinus massoniana* pure forest and *Liquidambar formosana* + *Schima superba* mixed forest [J]. J Central South Univ For Technol, 2015, 35(12): 82–86. DOI: 10.14067/j.cnki.1673–923x.2015.12.015.
- [77] 穆桂珍, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东揭西县土壤微量元素与有机质和 pH 的关系分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(10): 208–215. MU G Z, LUO J, CAI L M, et al. Relationship between soil trace elements with organic matter and pH in Jiexi County, Guangdong Province [J]. Chin J Agric Resour Reg Plan, 2019, 40(10): 208–215. DOI: 10.7621/cjarrp.1005–9121.20191027.
- [78] 曾曙才, 俞元春. 宁镇丘陵主要森林类型林下土壤中的微量元素初步研究 [J]. 林业科学研究, 1998, 11(1): 63–69. ZENG S C, YU Y C. Studies on microelements in forest soil of Nanjing Zhenjiang hilly regions [J]. For Res, 1998, 11(1): 63–69.
- [79] CHESWORTH W. Geochemistry of micronutrients [M]//Micronutrients in Agriculture. Madison, WI: Soil Science Society of America, 2018: 1–30. DOI: 10.2136/sssabookser4.2ed.c1.
- [80] KALPANA P, KRISHNAPURA S S. Bioavailability of micronutrients from plant food: an uptake [J]. 2016, 56(10): 1608–19. DOI: 10.1080/10408398.2013.781011.
- [81] ADRIANO D C. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2001.
- [82] FAGERIA N K, BALIGAR V C, JONES C A. Growth and mineral nutrition of field crops [M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [83] TISDALE S L, NELSON W L. Soil fertility and fertilizers [J]. Soil Sci, 1957, 83(4): 334. DOI: 10.1097/00010694–195704000–00019.
- [84] 黄瑞春, 曾琴, 朱宁华. 湘西建群树种营养元素特征分析 [J]. 北方园艺, 2014(11): 65–68. HUANG R C, ZENG Q, ZHU N H.

- Characteristics analysis of nutrient elements of domination species in Xiangxi of Hunan Province [J]. North Hortic, 2014 (11): 65-68.
- [85] 赵串串,王媛,高瑞梅.青海省黄土丘陵区主要林分土壤微量元素丰缺状况研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(3): 130-135.ZHAO C C, WANG Y, GAO R M. Soil trace element abundance in different forest types at the Loess hilly region of Qinghai Province [J]. J Arid Land Resour Environ, 2017, 31(3): 130-135. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2017.090.
- [86] SINGH B, SHARMA K N. Tree growth and nutrient status of soil in a poplar (*Populus deltoides* Bartr.)-based agroforestry system in Punjab, India [J]. Agroforest Syst, 2007, 70(2): 125-134. DOI: 10.1007/s10457-007-9048-7.
- [87] 覃世赢. 厚壳相思人工幼林生物量与生产力和养分循环的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006. QIN S Y. The biomass, productivity and nutrient cycling of young *Acacia crassicaarpa* plantation [D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [88] 郭峰,周运超.不同密度马尾松林针叶养分含量及其转移特征[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 93-96. GUO F, ZHOU Y C. Foliar nutrient contents and translocation features in different density of *Pinus massoniana* plantations [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2010, 34(4): 93-96. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2010.04.021.
- [89] 彭龙福.不同立地条件楠木人工林养分研究[J].福建林业科技, 2008, 35(2): 10-15. PENG L F. Study on nutrient elements of *Phoebe bournei* plantation in the different site conditions [J]. J Fujian For Sci Technol, 2008, 35(2): 10-15. DOI: 10.13428/j.cnki.fjlk.2008.02.029.
- [90] 尹同福.微量营养元素硼与桑树粗皮病[J].蚕桑通报, 1986, 17(4): 8-11. YIN T F. Trace element boron and mulberry rough skin disease [J]. Bull Seric, 1986, 17(4): 8-11.
- [91] 贺尔华.苹果树缺铁诊断及矫治技术[J].山西果树, 1996(1): 55. HE E H. Diagnosis and correction of iron deficiency in apple trees [J]. J Fruit Resour, 1996(1): 55.
- [92] KALBURTI K L, MOSJIDIS J A, MAMOLOS A P. Litter dynamics of low and high tannin sericea lespedeza plants under field conditions [J]. Plant Soil, 1999, 208(2): 271-281. DOI: 10.1023/A:1004577624435.
- [93] PORTELA E. Seasonal nutrient variation in the phloem tissue of chestnut and its susceptibility to blight [M]//Plant Nutrition. Dordrecht Netherlands: Springer, 2001: 364-365. DOI: 10.1007/0-306-47624-x_176.
- [94] SINGH Z, SINGH L, DHILLON B. Micro-nutrient levels in malformed and healthy tissues of mango [J]. Indian J Hortic, 1994, 51(4): 367-371.
- [95] 程文林,杨佩芳,陈晓春,等.叶面喷施磁化复合肥对新红星(Starkrimson)苹果树微量营养元素含量影响的研究[J].山西农业大学学报, 1994, 14(3): 239-241. CHENG W L, YANG P F, CHEN X C, et al. Studies on the effect of the foliage sprayed with magnetized compound fertilizer on the micro nutritional elements content of Starkrimson apple trees [J]. J Shanxi Agric Univ, 1994, 14(3): 239-241.
- [96] 王婷,王百田,王红,等.保水剂与外源物质复合配方对苗木蒸腾速率和叶水势的影响[J].安徽农业科学, 2011, 39(2): 692-696. WANG T, WANG B T, WANG H, et al. Effect of transpiration rate and leaf water potential based on the composite formulations of super absorbent polymer and exogenous substance [J]. J Anhui Agric Sci, 2011, 39(2): 692-696. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2011.02.072.
- [97] 林强.天然茶树营养素在茶树上的应用试验[J].茶世界, 2008(4): 66-69. LIN Q. Application experiment of natural tea nutrients on tea plant [J]. Chin Tea World, 2008(4): 66-69.
- [98] LONERAGAN J F. Plant nutrition in the 20th and perspectives for the 21st Century [M]//Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment. Dordrecht Netherlands: Springer, 1997: 3-14. DOI: 10.1007/978-94-009-0047-9_1.
- [99] 柏凤山,颜杜娟.微量元素肥料施用技术关键[J].民营科技, 2008(7): 106. BAI F S, YAN D J. Key technology of trace element fertilizer application [J]. Private Science and Technology, 2008(7): 106.
- [100] 曹榕彬.耕地土壤中微量元素含量空间分布及施肥对策[J].土壤通报, 2018, 49(3): 646-652. CAO R B. Spatial distribution and fertilization of medium and trace elements in cultivated land [J]. Chin J Soil Sci, 2018, 49(3): 646-652. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2018.03.21.
- [101] 李成义.沙棘园林的施肥技术[J].沙棘, 2005, 18(2): 18-19. LI C Y. Fertilizer application in seabuckthorn gardens [J]. Hippophae, 2005, 18(2): 18-19.
- [102] BOARETTO R M, MURAOKA T, GINÉ M F, et al. Boron nutrition and boron application in crops [M]//Advances in Plant and Animal Boron Nutrition. Dordrecht Netherlands: Springer, 2007: 125-131. DOI: 10.1007/978-1-4020-5382-5_11.
- [103] RAJA M E. Screening B sources for suitability under different rain fall and soil condition for mango in India [M]//Advances in Plant and Animal Boron Nutrition. Dordrecht Netherlands: Springer, 2007: 355-364. DOI: 10.1007/978-1-4020-5382-5_34.
- [104] 罗淑华.茶树矿质营养元素的含量、缺乏症状及调节措施[J].福建茶叶, 1997, 19(4): 21-23. LUO S H. Contents, deficiency symptoms and adjustment measures of mineral nutrients in tea plants [J]. Tea Fujian, 1997, 19(4): 21-23.
- [105] ALLOWAY B J. Micronutrients and crop production: an introduction [M]//Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production. Dordrecht Netherlands: Springer, 2008: 1-39. DOI: 10.1007/978-1-4020-6860-7_1.

(责任编辑 郑琰燚 孟苗婧)