

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2025.02.007

微量元素对烟草质量的影响及管理对策

陈涛¹, 廖睿¹, 吕大树¹, 韩严竞¹,
吴彦霖², 徐宸², 李瑜², 范业晨²,
卿龙豪³, 王智², 杨大庆¹

1. 贵州中烟工业有限责任公司原料供应中心, 贵阳 550001;

2. 中国烟草总公司重庆市公司石柱分公司, 重庆 400023;

3. 西南大学植物保护学院, 重庆 40071

摘要: 烟草的生长和品质形成过程中, 微量元素起着非常重要的作用。烟株长期缺乏或者过量摄入微量元素均可对烟叶的外观、化学成分比例、燃烧性和口感等产生显著影响。当前烟叶生产过程中仍存在过度依赖氮、磷、钾肥的现象, 忽视微肥补充, 同时与土壤酸化、耕作粗放等问题叠加, 加剧了大量元素与微量元素之间比例失衡的情况。制定合理的微量元素管理对策不仅有助于烟草生长, 还能显著改善其燃烧、烟气质量以及感官特性。文章根据前人研究综述了各类微量元素对烟草质量的具体影响, 并针对各微量元素提出了不同的管理措施, 以期为烟草生产提供科学依据。

关键词: 微量元素; 烟草; 生理机制

中图分类号: S572

文献标志码: A

文章编号: 2097-1354(2025)02-0059-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Trace Elements on Tobacco Quality and Management Strategies

CHEN Tao¹, LIAO Rui¹, LYU Dashu¹, HAN Yanjing¹,
WU Yanlin², XU Chen², LI Yu², FAN Yechen²,
QING Longhao³, WANG Zhi², YANG Daqing¹

1. Raw Materials Supply Center, China Tobacco Guizhou Industrial Co., Ltd., Guiyang 550001, China;

2. Shizhu Branch of Chongqing Tobacco Company, Chongqing 404600, China;

3. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China

收稿日期: 2025-03-11

基金项目: 贵州中烟工业有限责任公司科技项目(基于贵州中烟重庆石柱烟叶典型醇甜香风格特征挖掘, B20251NY1305); 中国烟草总公司重庆市公司重大科技项目(工业原料产质保障的烟田三维一体“营养、除草、控病”技术研究与应用, B20241NY1303)。

作者简介: 陈涛, 本科, 工程师, 主要从事烟草原料工作。

通信作者: 杨大庆, 工程师。

Abstract: Trace elements play a critical role in tobacco growth and quality formation. Long-term deficiency or excessive uptake of trace elements by tobacco plants can significantly affect leaf morphology, chemical composition ratios, combustion properties, and flavor characteristics. Current tobacco production is still excessive reliance on NPK fertilizers and neglect the micronutrients supplementation. At same time, combined with issues such as soil acidification and extensive farming practices, the imbalance between macronutrients and trace elements has been exacerbated. Establishing rational trace element management strategies not only better supports plant growth, but also significantly improves its combustion efficiency, smoke quality, and sensory attributes. Based on existing research, this paper systematically reviews the specific impacts of various trace elements on tobacco quality and proposes targeted management measures for individual elements, aiming to provide scientific guidance for tobacco production.

Key words: trace elements; tobacco; physiological mechanisms

微量元素相比于大量元素,含量虽少,但在植物生理过程中起至关重要的作用,是植物不可或缺的养分。烟草作为我国重要的经济作物,生产上长期受到农艺技术和环境因素的双重影响,尤其是生长环境中土壤微量元素的含量。烟草的生产过程中,微量元素是否平衡将直接影响到烟草的生长、质量和产量。高享坤^[1]在学位论文中提到,微量元素不仅是烟草的必需元素,也是土壤有益微生物定殖繁殖的重要元素。如果能合理调控土壤中的微量元素,不仅能够促进烟草的健康生长,改善土壤条件,还能在一定程度上改善烟草的品质特性,如外观、化学成分、燃烧性和口感等,从而提高烟草的整体经济价值。本文将详细讨论铁、锰、锌、铜、硼、钼、氯等微量元素在烟草中的作用机制,并提供合理的管理策略。

1 植烟土壤微量元素的丰缺状况以及现存问题

1.1 植烟土壤微量元素的丰缺状况

烟株的干物质组成中,各元素含量具有显著差异,主要将其划分为大量元素、中量元素和微量元素。在烟株干重中占比低于0.01%的元素为微量元素,主要有铁(Fe)、硼(B)、锰(Mn)、锌(Zn)、铜(Cu)、钼(Mo)、氯(Cl)7种^[2]。尽管微量元素在烟草体内存在浓度极低,但其在调节生理代谢、促进酶活性和维持生长发育等方面具有不可替代的功能^[3]。植烟土壤中微量元素的丰缺状况受多种因素影响,这种影响会因为地域差异、土壤类型和管理实践的不同而变化。例如,铁、锰等元素在多数土壤中算不上匮乏,但植物利用微量元素的效率会因为土壤pH值高低等条件受到限制,使烟草难以充分吸收利用^[4]。彭月月等^[5]发现,部分元素在烟区的部分土壤中偏低,这与土壤有机质、土壤保水保肥能力、前茬作物类型有关,与坡度、坡向、海拔等地形因素相关性不大。氯元素易随降雨或灌溉水流失,但是当灌溉水中氯离子含量较高或施用含氯肥料不当时,反而导致土壤中氯元素累积过多。张仲文等^[6]发现云南陆良基地烟草出现燃烧性不良的问题,分析是灌溉水中氯含量超标以及肥料配比失衡所导致,从而影响烟叶的燃烧性和香气品质,对烟草品质构成潜在威胁。

1.2 微量元素管理现存问题

目前对植烟土壤微量元素的管理仍存在诸多不足,冯繁文等^[7]对巴东植烟土壤分析发现,各烟区土壤中微量元素分布不均,部分元素极度匮乏,导致烟草生长所需与土壤供应之间难以协调一致。在生产实践中,施肥多集中于氮、磷、钾等大量元素,对微量元素的关注和补充明

显不足,常出现施肥不合理和忽视微量元素需求的情况,这可能会导致叶片质量下降,易感病等情况发生,造成经济损失。另外,土壤环境的变化也会进一步加剧这一问题,Li等^[8]认为酸化会导致土壤养分失衡,微量元素利用率下降。加之长期耕作和轮作制度不够合理,土壤维持微量元素平衡的能力会逐渐下降。以上这些因素共同作用,不仅限制了烟草的生长发育,还可能通过影响叶片品质和化学成分,对产量及经济效益产生不利影响。现目前深入探究植烟土壤微量元素的现状并制定对应的科学管理策略,已成为烟草生产中亟需解决的重要课题。

2 微量元素对烟草质量的影响

微量元素对烟草的生长和品质具有系统性影响,其中铁、锰、锌、铜、硼、钼和氯等元素在不同生理环节中分别承担独特功能,又能够协同作用。有相关研究表明,土壤中微量元素对烟叶成分影响程度为:有效硼>有效钼>有效锰>有效锌>有效铁>有效铜^[9]。这六种微量元素在烟叶品质形成过程中起到至关重要的作用,相关的研究文章也较为全面,但缺乏一个系统性的论述。本节将结合前人研究详细概括每种元素在烟株中的具体作用,以及不同元素间的协同与制约效应。

2.1 铁

铁元素作为植物叶绿体发育的核心参与者,不仅主导着叶绿素分子的生物合成,还在光合作用的电子传递链中发挥桥梁作用^[10]。当铁元素供应不足时,烟草植株的幼嫩叶片会率先显现黄化症状,这种现象实质上是叶绿素合成路径受阻的直观表现,导致光合效率显著下降,并且铁元素在烟株体内不易流动,导致老叶中的铁无法向新叶流动^[11]。这些原因最终造成烟叶色泽暗淡、产量缩减。根据李玥等^[12]的研究,铁缺失对烤烟的影响程度最大,以K326品种为例,缺铁会导致烟株整体矮小,根系瘦弱,侧根数、总根长和根体积不同程度的下降,以根体积下降最为显著,为64.9%;以湘烟四号品种为例,缺铁时根系和地上部分生物量下降程度最大,为63.2%。

需要注意的是,当铁元素过量存在于植烟土壤会对根系和微生物造成伤害,还有研究表明,大量的铁元素富集在烟叶中对人类健康存在潜在威胁^[11, 13]。

2.2 锰

锰元素对土壤pH十分敏感,在中碱性土壤中缺锰现象较为常见^[14]。当过量施用碱性肥时会阻碍烟草对锰元素的吸收。锰最重要的生理功能体现在植物光合作用过程,研究表明锰元素在光合系统II的水氧化反应中担任催化角色,促进光合作用,其缺乏会导致烟株矮化、叶片出现特征性的脉间黄斑,老叶出现灰绿色条纹,严重干扰光合同化产物的积累进程^[15],进而影响烟叶品质。

锰还是硝酸还原酶的辅助因子,适量锰有利于提高烟株的固氮作用,提高总氮含量^[16]。但有关研究表明,锰过量会影响植物根活力,降低植物对硝态氮的吸收^[17]。当锰元素过量蓄积时,还会破坏细胞内的氧化还原稳态^[18]。导致烟株体内氧化应激水平提高,引发叶缘焦枯症状,同时改变烟叶的质量。

2.3 锌

锌影响烤烟内化学物质组成和香气成分含量,胡蓉花等^[19]的研究中展示了不同施锌量对烤烟感官评吸的影响,结果表明烤烟质量随施锌量呈现先增后减的趋势。齐永杰等^[20]的研究表明,单施锌肥可有效促进上部烟叶香气成分的形成与积累。

除对香气成分影响外, 锌元素还作为多种脱氢酶和醛缩酶的活性中心组成部分, 在光合作用以及生长素前体物质如色氨酸的合成中具有不可替代性^[21-22]。有研究表明, 锌能够增加烟株对氮元素的吸收与转化, 提高总氮含量, 并且能够影响烟碱等有害物质形成^[23]。但胡蓉花等^[19]和廖伟等^[21]的研究中显示锌对烟碱形成具有促进作用, 因此锌元素与烟碱形成的关系还需要进一步讨论。

锌缺乏还会导致烟草出现“叶簇生”的典型症状, 降低可溶性蛋白的合成, 直接影响烟叶的香气和气味特征^[23]。但锌浓度过高会产生金属毒性, 干扰烟株对铁元素的吸收利用^[24-25]。

2.4 铜

适量的铜可以保持叶绿素的稳定, 使烟叶生长更加均匀, 增加叶片的成熟度^[26]。铜主要以络合态存在于烟株体内, 作为多种酶的辅助因子参与烟草各项生理功能, 其中包括植物氧化还原反应、呼吸作用和蛋白质代谢等过程。当烟草缺铜时, 会引发叶片畸形发育, 并降低烟叶中还原糖含量以及植株对病害的抵御能力^[27]。

然而, 当铜在土壤中过量富集时, 会造成生物毒性, 主要机理是导致植物细胞丙二醛(MDA)和活性氧(ROS)水平上升, 使细胞失去正常代谢能力^[28]。同理, 这些机制也适用于土壤微生物, 导致根际微生物群落平衡被破坏, 抑制有益菌群的代谢活动, 从而降低烟叶品质。

2.5 硼

大量研究表明, 合理施用硼肥能对烟叶质量带来显著提升。缺硼时木质素沉积异常会导致维管束发育受阻, 进而出现糖分运输受阻、烟草顶端生长点坏死、发育迟缓且呈现簇生现象, 缺硼还会导致光合色素合成受阻, 进而使同化物积累不足, 根系扩展受限、生育进程滞后, 显著降低叶片产量与品质稳定性^[29-31]。

在硼素富集条件下(土壤有效硼 ≥ 1.00 mg/kg), 植株矮缩伴随营养期缩短与生殖期早现, 叶片叶绿体结构异常, 过量硼离子引发细胞膜脂过氧化, 不仅抑制干物质积累, 还会破坏烟叶化学组分的协调性, 造成香气物质合成紊乱与感官评吸价值下降^[29]。此外还有研究表明, 硼过量会造成叶缘焦枯并抑制根系发育^[32]。

2.6 钼

钼元素作为固氮酶和硝酸还原酶的重要成分, 对植物体内氮代谢具有积极作用, 能够增强烟叶油分, 减少上部叶挂灰现象^[33-34]。适量钼供给能优化氮代谢流, 改善烟叶的氮素平衡状态。

钼元素缺乏时不仅阻滞氮元素同化进程, 还阻碍糖分向叶片运输, 导致糖碱比失衡以及淀粉的过度积累, 严重影响烟叶品质^[35]。当钼元素过量存在时, 会与其他元素产生拮抗作用。齐永杰等^[20]的研究发现, 过量钼会干扰硫代谢稳态, 抑制棕色化反应中糠醛、呋喃类物质的形成, 并诱发膜脂过氧化, 破坏香气前体物质的稳定性。

2.7 氯

烟草是忌氯作物, 一般认为烟叶中氯含量为0.3%~0.7%较为理想。氯元素在烟草中起到调控光合系统Ⅱ的水裂解与渗透平衡的功能, 当缺少氯元素时, 会导致氧释放受阻及细胞膨压失衡, 烟叶油分减少、质地脆硬^[36]。

氯元素过量时则通过拮抗钾吸收破坏离子稳态, 抑制类胡萝卜素降解及苯丙烷代谢, 同时诱发膜脂过氧化, 导致香气物质(如糠醛、茄酮)合成受阻, 并显著降低燃烧性, 具体表现为灰分色泽加深、燃烧速率异常加快, 出现熄火现象, 同时引发烟气辛辣感^[36-37]。

2.8 不同微量元素间的协同与制约作用

不同元素之间既有相互促进的作用,也存在此消彼长的关系。陈春宏等^[38]发现铁和锰在吸收过程中会产生竞争,这种竞争关系直接影响叶绿体的正常发育。当锌和铜的比例失调时,会导致氧化酶活性出现波动。而适当补充硼元素则有助于维持钾和氯的代谢平衡^[32]。曾睿等^[16]发现锰、钼存在协调作用,可以有效调节烟株的碳、氮代谢,从而改善烟叶品质。以上研究表明,元素之间的相互作用繁多且复杂,这就要求我们在实际种植过程中建立完善的动态监测机制,既要及时补充短缺的养分,也要防止某些元素浓度超标,降低元素拮抗产生的影响,提高元素间的协同促进作用。通过科学配比和精细调节,让各种元素形成互补优势,最终使烟叶的组织结构、燃烧性能和香味特征都能达到理想状态。

3 微量元素管理对策

从各元素对烟草生长发育的影响以及不同烟区土壤条件来看,土壤环境条件、肥料类型、烟草品种和耕作制度等因素都会影响微量元素的有效性,进而影响烟叶质量。因此,制定科学合理的微量元素管理对策对当下烟叶生产具有重要意义。本节将结合现有研究背景列出具体的微量元素管理对策,以期为烟叶生产提供理论依据。

3.1 土壤微量元素含量检测

通过对土壤养分含量诊断,在种植前以及种植过程中对土壤进行系统采样与化学分析,可精确测定铁、硼、锰、锌、铜、钼、氯等微量元素的总量及其有效态含量,进而评估是否存在供应不足或过量累积的风险。但这一办法在实际操作中实现较为困难,例如随机采集的样本并不能很好地反映大面积烟田的整体微量元素水平,无法大面积推广应用。但随着科技农业的不断推广,遥感技术可能在未来能解决这一问题。唐菲等^[39]提出利用高光谱遥感技术和无人机搭载高光谱相机探测土壤微量元素分布情况,不同元素具有不同的吸收和反射特性,利用这一原理,可精准展示土壤微量元素分布特征,将数据可视化,为农业生产提供极大便利。

3.2 合理规划施肥方案

在土壤诊断的基础上,合理施肥是改善元素不平衡的办法之一,烟草生产中长期偏施氮、磷、钾等大量元素,忽视微量元素补充,这种施肥方式常诱发元素间的拮抗作用,导致供给的养分不协调,也必然会导致烟叶内部化学物质不协调,例如过量磷肥可能抑制植物对锌的吸收^[16, 40]。为应对这一问题,应依据不同烟区的土壤养分现状与烟草的营养需求,科学配比微量元素肥料,提高微量元素在土壤中的有效性,避免单一元素施用过量导致的失衡现象。

3.3 适量补施有机肥

丁柏泉^[41]的研究结果表明,有机肥通过其丰富的有机质成分激活土壤微生物群落,增强代谢活性,促进腐殖酸与金属离子的螯合作用,从而降低铁、锌、铜等微量元素的土壤固定率,提高其生物有效性。有机质分解过程中释放的有机酸与还原性物质可溶解矿物态微量元素,促进其向有效态转化,并通过改善土壤团粒结构增强根系对养分的截获能力。在闫鼎等^[42]的研究中,有机-微量元素复合肥作为基肥配合氮、钾追肥,通过有机质提升土壤微生物活性与团粒结构,促进根系对养分的截获效率,同时,硼增强细胞壁韧性,镁参与叶绿素合成,锌调控酶活性,并协同优化碳、氮代谢。实验结果显示,该模式提高了烟叶质量,降低了烟草花叶病和脉斑病的发病率。

因此,在实际的烟田管理中,施用有机肥料,利用其分解产生的有机酸与腐殖质能够提升

微量元素的溶解度和有效性,促进土壤养分体系的完善。

3.4 及时补充叶面肥

当土壤养分难以满足烟草生长需求时,可以用叶面施肥作为营养补充方式,该技术尤其适用于团棵期、旺长期等关键生育阶段。当根系吸收受土壤温湿度限制时,通过叶面喷施可直接输送养分,例如锌缺乏时可选用硫酸锌溶液,硼元素不足时采用硼酸溶液,不仅能及时改善缺素症状,还可有效提升叶片叶绿素含量与光合效率,最终优化烟叶品质^[25, 32]。在实际操作中需精准控制溶液浓度与施用时段,防止灼伤叶片,降低养分利用率。

3.5 土壤 pH 值管理

需要注意的是,土壤 pH 值对微量元素的有效性具有重要影响。烟草适宜生长的土壤 pH 值为 5.5~6.5,在此范围内,铁、锰、锌等元素的活性状态最佳,pH 值低于适宜范围可能引发锰元素有效性降低,而过高则会导致铁、锌等元素形成难溶化合物^[43]。因此,应积极采取措施使土壤酸碱度保持平衡状态,酸性土壤适当施用石灰或钙镁磷肥,碱性土壤则适当使用磷肥或酸性有机肥,还需要结合土壤质地、缓冲性能及地域气候特征,确保微量元素处于高效利用状态。

3.6 选择适宜品种

李峰等^[44]发现不同烟草品种对微量元素的需求存在显著差异,实际管理中应有针对性地调整策略。例如,对需硼量大的品种可提高基肥硼比例并配合叶面追施,对氯敏感品种需严格控制灌溉水和肥料中的氯含量。这种精准管理能实现营养供给与品种特性的匹配,保障烟叶产量与品质的稳定性。

3.7 合理的耕作间作制度

耕作制度的优化对微量元素平衡具有长期效应,长期连作易造成特定元素耗竭,有研究表明,烟草可与豆科作物轮作或间作,利用其根系分泌物和固氮作用可改善土壤微量元素状况,减少氮肥大量施用,促进绿色农业^[45]。结合减少机械耕作强度、实施秸秆还田等措施,能有效提升土壤有机质含量,促进微量元素的自然循环与供给能力。

4 结语

合理的微量元素管理能够改善烟叶的燃烧性、香气浓度和口感协调性,同时增强植株的抗病能力和环境适应性,从而为烟草产业的可持续发展提供支持。前文提到的土壤测试为精准施肥奠定了基础,平衡施肥避免了养分间的拮抗效应,叶面补施则在关键时期弥补了根系吸收的不足,pH 调控则优化了微量元素的有效性,而品种选择和耕作优化则进一步提升了管理的针对性和持久性。但是当前微量元素管理仍面临一定挑战,例如土壤测试的普及程度不足、微肥施用技术的标准化程度较低,以及不同区域间管理经验的差异。这些问题需要在未来的研究和实践中进一步解决。

参考文献:

- [1] 高亨坤. 微量元素与微生物复合菌肥对烤烟产量品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [2] 杨苏, 戴林建, 周田, 等. 烟草微量营养元素研究现状 [J]. 作物研究, 2015, 29(4): 453-456.
- [3] 刘崇盛, 张丽娜, 许利平, 等. 微量元素对烟叶品质的影响研究进展 [J]. 农产品加工, 2020(11): 72-74.
- [4] SUDA A, MAKINO T. Functional Effects of Manganese and Iron Oxides on the Dynamics of Trace Elements in

- Soils with a Special Focus on Arsenic and Cadmium: a Review [J]. *Geoderma*, 2016, 270: 68-75.
- [5] 彭月月, 余雪莲, 李启权, 等. 川西南高海拔烟区土壤微量元素空间分布特征及影响因素 [J]. *中国烟草科学*, 2018, 39(3): 39-47.
- [6] 张仲文, 张汉波, 陈强, 等. 影响陆良基地烟叶燃烧性的原因分析 [J]. *中国农学通报*, 2017, 33(7): 81-85.
- [7] 冯繁文, 王宇奎, 陈高航, 等. 巴东植烟土壤中微量元素分布特点及现状分析 [J]. *湖南农业科学*, 2017(10): 39-43.
- [8] LI Y, HAN M Q, LIN F, et al. Soil Chemical Properties, 'Guanximiyu' Pummelo Leaf Mineral Nutrient Status and Fruit Quality in the Southern Region of Fujian Province, China [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 15(3): 615-628.
- [9] 刘文龙, 宁尚辉, 曹明锋, 等. 桃源县植烟土壤微量元素与烟叶常规化学成分相关性分析 [J]. *作物杂志*, 2021(5): 176-180.
- [10] NAM H I, SHAHZAD Z, DORONE Y, et al. Interdependent Iron and Phosphorus Availability Controls Photosynthesis through Retrograde Signaling [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 7211.
- [11] 王智, 杨胜刚, 范业晨, 等. 重庆市石柱县烟田土壤养分空间异质性分布及评价 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(11): 42-52.
- [12] 李玥, 赖勇林, 王军, 等. 不同养分缺乏对烤烟根系形态及营养生长的影响 [J]. *中国烟草科学*, 2015, 36(2): 60-65.
- [13] 向欢, 王俊, 钟秋, 等. 四川地方晾晒烟4种金属元素含量分析 [J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(6): 1177-1180.
- [14] 施益华, 刘鹏. 锰在植物体内生理功能研究进展 [J]. *江西林业科技*, 2003, 31(2): 26-28, 31.
- [15] CHERNEV P, FISCHER S, HOFFMANN J, et al. Light-Driven Formation of Manganese Oxide by Today's Photosystem II Supports Evolutionarily Ancient Manganese-Oxidizing Photosynthesis [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 6110.
- [16] 曾睿, 张果, 何忠俊, 等. 土壤锰素营养及锰在烟草上的应用研究进展 [J]. *江西农业学报*, 2009, 21(9): 105-109.
- [17] 吕思琪, 张迪, 张婉婷, 等. 锰胁迫对不同基因型玉米幼苗氮素转化的影响 [J]. *玉米科学*, 2020, 28(2): 84-89, 95.
- [18] SKÓRKA M, SIEPRAWKA A, TELK A. The Implication of Manganese Surplus on Plant Cell Homeostasis: a Review [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(3): 1327-1341.
- [19] 胡蓉花, 王俊, 沈雪婷, 等. 增施锌肥对烤烟品质的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(11): 76-82.
- [20] 齐永杰, 徐茂华, 潘武宁, 等. 硼锌钼肥及其配施对烤烟上部叶香气物质含量的影响 [J]. *天津农业科学*, 2015, 21(6): 116-119.
- [21] 廖伟, 舒芳靖, 倪毅, 等. 烤烟锌营养研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(23): 9-10, 13.
- [22] 白羽祥, 杨焕文, 徐照丽, 等. 不同锌肥水平对烤烟光合特性和产量及质量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017(2): 102-106.
- [23] 姚倩, 范艺宽, 许自成, 等. 施锌对烟草含氮化合物积累的影响 [J]. *植物生理学报*, 2017, 53(6): 1023-1029.
- [24] 崔激, 吴兆明. 锌在植物中的生理作用 [J]. *植物生理学通讯*, 1964(1): 23-33.
- [25] 尼金玉, 胡蓉花, 王俊, 等. 增施中、微量元素对烤烟品质及主要经济性状的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(11): 65-71.
- [26] 王林, 周红审, 王昊, 等. 烟叶中微量元素差异及其与外观品质关联分析 [J]. *烟草科技*, 2021, 54(3): 9-16.
- [27] 刘炳清, 李琦, 蔡凤梅, 等. 烟草铜素营养研究进展 [J]. *江西农业学报*, 2014, 26(3): 76-79.
- [28] 张艳英, 刘鹏, 徐根娣, 等. 铜胁迫对烟草幼苗生长和生理特征的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(3): 32-35.
- [29] 张玲, 李琦, 朱金峰, 等. 烟草硼素营养研究进展 [J]. *江西农业学报*, 2013, 25(12): 89-92.

- [30] 徐照丽, 杨宇虹, 段玉琪, 等. 硼肥对不同烤烟品种生长发育及产质量的影响 [J]. 华北农学报, 2013, 28(S1): 342-346.
- [31] 陈鱼跃, 肖丽娜, 周建云, 等. 硼素营养对烤烟生长发育的影响 [J]. 耕作与栽培, 2011, 31(3): 3-4.
- [32] 穆童, 许自成, 李渊博, 等. 硼对烟草生理特性及品质影响的研究进展 [J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 757-761.
- [33] 刘晓迪. 漯河烤烟香味质量与根外追施营养物质效应研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [34] 王东胜, 何宽信, 王能如, 等. 江西植烟土壤及烟叶钼含量调查分析 [J]. 江西农业学报, 2010, 22(8): 71-74.
- [35] 曾宇, 李小勇, 韩助君, 等. 增施钼肥对烤烟叶片矿质元素含量及常规化学成分的影响 [J]. 浙江农业科学, 2021, 62(11): 2226-2228.
- [36] 王亚宁, 张翔, 范艺宽, 等. 烟草氯素营养研究进展与展望 [J]. 中国农学通报, 2017, 33(27): 66-70.
- [37] 李湘伟, 杨继周, 陆俊平, 等. 玉溪烟区烟叶氯离子分布特征及影响因素研究 [J]. 湖北农业科学, 2022, 61(S1): 265-269, 274.
- [38] 陈春宏, 张耀栋, 张春兰, 等. 铁、锰相互作用及其对植物生理生化的影响 [J]. 土壤肥料, 1992(6): 9-12.
- [39] 唐菲, 梁春, 李洪波, 等. 基于高光谱遥感数据的土壤微量元素监测应用研究 [J]. 科技视界, 2024(31): 112-115.
- [40] 黎晔. 无机肥料的拮抗作用与互助作用 [J]. 土壤肥料, 1985(3): 38.
- [41] 丁柏泉. 有机肥与中微量元素水溶肥联合施用对作物产量的影响研究 [J]. 乡村科技, 2024, 15(14): 87-90.
- [42] 闫鼎, 蔡宪杰, 宋明健, 等. 昭阳烟区不同配方的肥料减施技术对烤烟的影响 [J]. 贵州农业科学, 2021, 49(9): 53-58.
- [43] 尹忠春, 施河丽, 向必坤, 等. 湖北宣恩烟区植烟土壤 pH 状况及与其他土壤指标的关系 [J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S2): 129-135, 139.
- [44] 李峰, 贺鹏霖, 朱先志, 等. 四个烤烟品种中微量元素吸收特性比较 [J]. 南方农业, 2024, 18(13): 85-89.
- [45] 高英志, 任健. 植物根瘤共生固氮研究进展与展望 [J]. 中国科学: 生命科学, 2025, 55(1): 131-145.

责任编辑 杨光明