

贵州主产区核桃种仁 4 种微量元素含量及其与土壤性状的关系

卢 香, 黄安香^①, 柏文恋, 杨守禄, 李 丹, 张智琦, 姬 宁

(贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 为明确贵州主产区核桃 (*Juglans regia* Linn.) 种仁微量元素 (Fe、Mn、Cu、Zn) 含量特征及其与土壤性状的关系, 对主产区 18 个县级行政区的 143 个核桃种仁样品及对应土壤样品进行了检测和分析, 并进行了 Spearman 相关性分析。结果表明: 核桃种仁中 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的均值分别为 21.70、39.13、12.33、17.25 mg · kg⁻¹, 生物富集系数的均值分别为 0.001 4、0.099 6、0.668 3 和 0.692 9。总体来看, 粉(砂)质黏壤土和黏壤土中核桃种仁的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量及生物富集系数较高。供试土壤样品中, 92.6% 的土壤介于微酸性至微碱性, 88.9% 的土壤有机质极为丰富, 且半数以上土壤的有效 Fe、Mn、Cu、Zn 含量达到中上及以上等级水平。粉(砂)质黏壤土的有机质含量及有效 Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量在 6 种质地类型土壤中均最高。相关性分析结果表明: 核桃种仁的 Fe、Mn、Cu 含量仅与少量土壤性状和个别颗粒含量呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 相关性。综合分析认为, 贵州主产区核桃种仁的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量相对较高; 粉(砂)质黏壤土和黏壤土更利于核桃种仁中微量元素的积累。通过调节土壤 pH 值、提高土壤微量元素有效态含量以及选择合适质地土壤, 可有效提高贵州地区核桃种仁的微量元素含量, 从而提升该地区核桃的营养价值。

关键词: 核桃; 微量元素; 土壤性状; 贵州主产区; 相关性分析

中图分类号: Q946.91⁺1; Q948.113; S664.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)04-0048-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.04.06

Contents of four trace elements in *Juglans regia* kernels from main producing areas of Guizhou Province and their correlations with soil properties LU Xiang, HUANG Anxiang^①, BAI Wenlian, YANG Shoulu, LI Dan, ZHANG Zhiqi, JI Ning (Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(4): 48-55

Abstract: To clarify the characteristics of contents of trace elements (Fe, Mn, Cu, and Zn) in *Juglans regia* Linn. kernels from main producing areas of Guizhou Province and their relationships with soil properties, 143 *J. regia* kernel samples and corresponding soil samples from 18 administrative areas at county level of main producing areas were detected and analyzed, and the Spearman correlation analysis was conducted. The results show that the mean contents of Fe, Mn, Cu, and Zn in walnut kernels are 21.70, 39.13, 12.33, and 17.25 mg · kg⁻¹, respectively, and the mean bioconcentration factors are 0.001 4, 0.099 6, 0.668 3, and 0.692 9, respectively. Overall, the contents and bioconcentration factors of Fe, Mn, Cu, and Zn of *J. regia* kernels from silt (sandy) clay loam and clay loam are relatively high. Among the test soil samples, 92.6% of soils are between slightly acidic and slightly alkaline, the organic matter in 88.9% of soils is extremely rich, and the available contents of Fe, Mn, Cu, and Zn in over half of soils reach upper middle and above grade levels. Among the soils of six texture

收稿日期: 2024-03-04

基金项目: 贵州省特色林业产业研究项目 (XHTC-FW-2024-1380); 贵州省高层次创新型人才 (黔科合平台人才-GCC[2023]066)

作者简介: 卢 香 (1992—), 女, 贵州遵义人, 硕士, 工程师, 主要从事食用林产品检验检测研究。

^①通信作者 E-mail: 10029.xiang@163.com

引用格式: 卢 香, 黄安香, 柏文恋, 等. 贵州主产区核桃种仁 4 种微量元素含量及其与土壤性状的关系 [J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(4): 48-55.

types, the organic matter content and available contents of Fe, Mn, Cu, and Zn are all the highest in silt (sandy) clay loam. The correlation analysis result reveals that contents of Fe, Mn, and Cu in *J. regia* kernels show significant ($P < 0.05$) or extremely significant ($P < 0.01$) correlations with only a few soil properties and specific particle contents. The comprehensive analysis suggests that the contents of Fe, Mn, Cu, and Zn in *J. regia* kernels from main producing areas of Guizhou Province are relatively high; silt (sandy) clay loam and clay loam are more conducive to trace element accumulation in *J. regia* kernels. By adjusting soil pH value, improving soil available trace element contents, and selecting suitable soil textures, the trace element contents in *J. regia* kernels from Guizhou Province can be effectively enhanced, thereby improving their nutritional value in this area.

Key words: *Juglans regia* Linn.; trace element; soil property; main producing area of Guizhou Province; correlation analysis

微量元素是人类生命活动过程中不可或缺的营养素。大部分微量元素在人体内不能产生和合成,需要从食物中获取^[1]。植物是人类的一个重要食物来源,植物中的微量元素主要从土壤中吸收和积累。

核桃(*Juglans regia* Linn.),学名胡桃,其果实为世界“四大干果”之一,也是中国“四大木本油料”之一,在中国具有悠久的栽种和食用历史^[2-3]。核桃种仁不仅可以直接食用,还可以加工成核桃油、核桃乳、核桃蛋白等优质产品^[4-5]。目前,针对核桃种仁的研究除了加工工艺外,更多的是营养成分(包括脂肪酸、氨基酸等含量)测定分析及综合营养评价^[6-8]。研究发现,核桃种仁还含有丰富的微量元素^[9-10],其油粕中 Mn 含量较高^[11]。然而,不同核桃产地土壤养分状况差异较大^[12-13],且土壤养分状况与核桃产量和品质密切相关^[14-15]。其中,土壤 pH 值、可溶性总盐含量对核桃产量影响较大^[14],土壤速效 K、有效 Fe 和有效 Cu 含量可影响核桃品质^[15]。并且,施用配方型叶面微肥可提高核桃单株干果产量,减小核桃果外形,降低核桃果壳质量,增加出仁率^[16]。另外,土壤质地对核桃养分吸收与品质有较大影响^[17-18]。

贵州是中国核桃重要产区之一,2020年贵州省核桃林面积为 $25.26 \times 10^5 \text{ hm}^2$,核桃产量达 $8.79 \times 10^5 \text{ t}$,占全国核桃总产量的 2.07%^[19]。因此,探明贵州地区核桃种仁的微量元素含量特征及其与土壤性状之间的关系对于优化贵州地区核桃的种植管理和产业化发展具有重要价值。鉴于此,笔者对贵州主产区 18 个县级行政区的 143 份核桃种仁样品的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量以及相应土壤样品上述 4 种微量元素及其有效态的含量和相关指标进行了检测和分析,并对核桃种仁微量元素含量与土壤相关性状进行了 Spearman 相关性分析,以期明确贵州地区核桃种仁

微量元素含量特征,为该地区核桃增产和提质栽培管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

于 2022 年 8—11 月,在贵州省黔西南布依族苗族自治州、毕节市、遵义市、六盘水市和安顺市下辖的 18 个县级行政区采集核桃种仁和土壤样品。

1.2 主要仪器和试剂

主要仪器:A8054 格拉茨微波消解仪(奥地利 Anton Paar 公司);iCAP RQ 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(美国 Thermo Fisher Scientific 公司)。

主要试剂:硫酸亚铁(分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司);三乙醇胺(TEA)(分析纯,上海山浦化工有限公司);二乙烯三胺五乙酸(DTPA)(分析纯,天津市光复精细化工研究所);二水合氯化钙(分析纯)和重铬酸钾(分析纯)均为天津市永大化学试剂有限公司产品;Fe、Mn、Cu、Zn 标准溶液(质量浓度均为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)由国家有色金属及电子材料分析测试中心提供;锆(^{74}Ge)、铑(^{103}Rh)、铼(^{185}Re)内标标准溶液(质量浓度均为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)及土壤成分分析标准物质[编号 GBW(E)070305]均为钢研纳克检测技术股份有限公司产品;生物成分分析标准物质[编号 GBW10022(GSB-13 蒜粉)]由地球物理地球化学勘查研究所提供。

1.3 方法

1.3.1 样品采集与处理 参照 LY/T 2800—2017 进行核桃样品抽样。采用随机取样法,在核桃种植区内根据种植面积设置采样点。每个采样点选取 5~7 株核桃树,在植株的上、中、下、里、外等不同部位采集成

熟果实。不同核桃树的采样量基本相同,每个采样点核桃果实总质量约 3 kg,每个采样点为 1 份样品,共采集 143 份核桃果实样品。将采集的核桃果实带回实验室,取出种仁,使用中草药粉碎机粉碎后装入密封袋,置于-20 °C 条件下保存、备用。

参照 HJ/T 166—2004 采集土壤样品。在上述核桃树周围布设 5 个采样点,根据核桃树根系深度,采集 0~60 cm 土层的土壤。每个采样点各采集土壤样品约 200 g,同一核桃树 5 个采样点的土壤混匀,作为一个土壤样品,共采集 143 份土壤样品。土壤样品经过自然风干后,使用研钵研磨成粉状,过筛后密封保存、待测。其中,过孔径 0.149 mm 筛的样品用于土壤微量元素及其有效态含量测定,过孔径 1 mm 筛的样品用于土壤水分含量测定。

各采集地的样品数量见表 1。

表 1 贵州主产区核桃果实和土壤样品的采集地和数量
Table 1 Collection areas and numbers of *Juglans regia* Linn. fruit and soil samples from main producing areas of Guizhou Province

采集地 Collection area	<i>n</i> ¹⁾
黔东南布依族苗族自治州 Qianxinan Buyi and Miao Autonomous Prefecture	
册亨县坡妹镇 Pomei Town, Ceheng County	5
兴义市猪场坪镇 Zhuchangping Town, Xingyi City	5
普安县青山镇 Qingshan Town, Pu'an County	1
普安县新店镇 Xindian Town, Pu'an County	1
普安县地瓜镇 Digua Town, Pu'an County	1
普安县高棉乡 Gaomian Township, Pu'an County	2
安龙县笃山镇 Dushan Town, Anlong County	5
晴隆县光照镇 Guangzhao Town, Qinglong County	1
晴隆县中营镇 Zhongying Town, Qinglong County	1
晴隆县长流乡 Changliu Township, Qinglong County	2
晴隆县沙子镇 Shazi Town, Qinglong County	1
兴仁县大山镇 Dashan Town, Xingren County	1
兴仁县波阳镇 Boyang Town, Xingren County	4
六盘水市 Liupanshui City	
盘州市柏果镇 Baiguo Town, Panzhou City	5
盘州市保田镇 Baotian Town, Panzhou City	1
盘州市英武镇 Yingwu Town, Panzhou City	3
盘州市旧营乡 Jiuying Township, Panzhou City	1
水城区海坪街道 Haiping Sub-district, Shuicheng District	4
水城区杨梅乡 Yangmei Township, Shuicheng District	1
钟山区保华镇 Baohua Town, Zhongshan District	1
钟山区青林乡 Qinglin Township, Zhongshan District	7
六枝特区新场乡 Xinchang Township, Liuzhi Special District	5
遵义市 Zunyi City	
正安县格林镇 Gelin Town, Zheng'an County	10
仁怀市龙井镇 Longjing Town, Renhuai City	5
毕节市 Bijie City	
大方县理化乡 Lihua Township, Dafang County	1

续表 1 Table 1 (Continued)

采集地 Collection area	<i>n</i> ¹⁾
大方县星宿乡 Xingxiu Township, Dafang County	3
大方县羊场镇 Yangchang Town, Dafang County	3
大方县鼎新乡 Dingxin Township, Dafang County	3
威宁县岔河镇 Chahe Town, Weining County	4
威宁县海拉镇 Haila Town, Weining County	2
威宁县盐仓镇 Yancang Town, Weining County	3
威宁县哈喇河镇 Halahe Town, Weining County	3
威宁县麻乍镇 Mazha Town, Weining County	3
威宁县黑石头镇 Heishitou Town, Weining County	4
威宁县石门乡 Shimen Township, Weining County	1
金沙县石场乡 Shichang Township, Jinsha County	3
金沙县清池镇 Qingchi Town, Jinsha County	1
金沙县马路乡 Malu Township, Jinsha County	6
赫章县财神镇 Caishen Town, Hezhang County	3
赫章县六曲河镇 Liuquhe Town, Hezhang County	3
赫章县朱明镇 Zhuming Town, Hezhang County	3
赫章县可乐乡 Kele Township, Hezhang County	6
纳雍县羊场乡 Yangchang Township, Nayong County	10
安顺市 Anshun City	
镇宁县革利乡 Geli Township, Zhenning County	3
镇宁县募役镇 Muyi Town, Zhenning County	2
总计 Total	143

¹⁾ *n*: 样品数量 Number of samples.

1.3.2 核桃种仁及土壤微量元素含量测定 参照 GB 5009.268—2016,采用各指标检测中的第 1 种方法测定核桃种仁的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量。参照 HJ 803—2016 检测土壤的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量。参照 HJ 804—2016 检测土壤的有效 Fe、有效 Mn、有效 Cu、有效 Zn 含量,同时,参照 LY/T 1215—1999 检测土壤含水量。所有微量元素及有效态含量测定均采用 KED 模式和内标法,每个样品重复取样测定 3 次,结果取平均值。其中,核桃种仁微量元素含量测定采用生物成分分析标准物质进行全程质量控制;土壤样品微量元素及有效态含量测定采用土壤成分分析标准物质进行全程质量控制,并结合土壤含水量计算得出。

1.3.3 土壤 pH 值和有机质含量测定及质地分类 参照 LY/T 1239—1999,采用电位法测定土壤 pH 值;参照 LY/T 1237—1999,采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质含量;参照 LY/T 1225—1999,采用吸管法测定土壤中砂粒(0.050~2.000 mm)、粉(砂)粒(0.002~0.050 mm)及黏粒(小于 0.002 mm)的含量,并根据标准中的美国制土壤质地分类三角坐标图确定土壤质地类型。

1.4 数据统计分析

对土壤酸碱度、有机质含量及微量元素有效态含

量进行分级,具体标准如下:土壤酸碱度分为强酸性(小于 pH 4.5)、酸性(pH 4.5 至 pH 5.5)、微酸性(pH 5.5至 pH 6.5)、中性(pH 6.5 至 pH 7.5)、微碱性(pH 7.5至 pH 8.5)、强碱性(大于或等于 pH 8.5);土壤有机质含量(w)分为严重匮乏($w < 6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、较低($6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq w < 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中等($10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq w < 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、适宜($20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq w < 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、丰富($30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq w < 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、极丰富($w \geq 40$

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$);土壤的有效 Fe、有效 Mn、有效 Cu、有效 Zn 含量的分级标准详见表 2。使用生物富集系数(bioconcentration factor, BCF)表征核桃种仁对土壤中微量元素的富集能力,即核桃种仁微量元素含量与土壤对应微量元素含量的比值。采用 SPSS Statistics 22 软件进行数据统计和分析,并对核桃种仁 4 种微量元素含量与土壤性状及不同颗粒含量进行 Spearman 相关性分析。

表 2 土壤中 4 种微量元素有效态含量的分级标准
Table 2 Grading standard of available contents of four trace elements in soil

微量元素有效态 Available trace element	不同等级的含量(w)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ¹⁾ Content (w) in different grades ¹⁾				
	低 Low	中下 Lower middle	中上 Upper middle	丰富 Rich	极丰富 Extremely rich
有效 Fe Available Fe	$w < 2.5$	$2.5 \leq w < 4.5$	$4.5 \leq w < 10.0$	$10.0 \leq w < 20.0$	$w \geq 20.0$
有效 Mn Available Mn	$w < 1$	$1 \leq w < 5$	$5 \leq w < 15$	$15 \leq w < 30$	$w \geq 30$
有效 Cu Available Cu	$w < 0.1$	$0.1 \leq w < 0.2$	$0.2 \leq w < 1.0$	$1.0 \leq w < 1.8$	$w \geq 1.8$
有效 Zn Available Zn	$w < 0.3$	$0.3 \leq w < 0.5$	$0.5 \leq w < 1.0$	$1.0 \leq w < 2.0$	$w \geq 2.0$

2 结果和分析

2.1 核桃种仁微量元素含量及生物富集系数分析

2.1.1 总体情况分析 贵州主产区核桃种仁中 Fe、Mn、Cu、Zn 4 种微量元素的含量和生物富集系数见表 3。由表 3 可知,核桃种仁的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量范围分别为 11.43 ~ 35.60、16.56 ~ 96.58、7.01 ~ 20.64、8.74 ~ 30.65 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值分别为 21.70、39.13、12.33 和 17.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据变异系数, Mn 含量变异幅度最大、Fe 含量次之、Zn 含量较小、Cu 含量最小。说明贵州主产区核桃种仁的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量变异较大,尤其是 Mn 含量。

由表 3 还可知,核桃种仁中 Fe、Mn、Cu、Zn 的生物富集系数均值分别为 0.001 4、0.099 6、0.668 3 和 0.692 9。比较来看,4 种微量元素生物富集系数的均

值、最小值、最大值、标准差从大到小均依次为 Zn、Cu、Mn、Fe,说明贵州核桃主产区核桃种仁的 Zn 富集能力最强、Cu 次之、Mn 较弱、Fe 最弱。4 种微量元素生物富集系数的变异系数均在 50% 以上,且表现为 Zn 最大、Mn 次之、Fe 较小、Cu 最小。

2.1.2 不同质地类型土壤间比较 根据检测结果,贵州主产区种植核桃的土壤共有 6 种质地类型,分别为粉(砂)壤土、粉(砂)质黏壤土、壤土、砂质壤土、黏壤土和黏土。对不同质地土壤中核桃种仁中 Fe、Mn、Cu、Zn 4 种微量元素的含量和生物富集系数进行统计分析,结果见表 4。由表 4 可知,核桃种仁中的 Fe 和 Zn 含量均在黏壤土中最高,且分别在粉(砂)壤土和黏土中最低;Mn 和 Cu 含量在粉(砂)质黏壤土中最高,且分别在砂质壤土和黏土中最低。核桃种仁中 Fe、Mn 和 Cu 的生物富集系数均在粉(砂)质黏壤土中最高,而 Zn 的生物富集系数在黏壤土中最高,表明

表 3 贵州主产区核桃种仁中 4 种微量元素的含量和生物富集系数¹⁾
Table 3 Content and bioconcentration factor of four trace elements in *Juglans regia* Linn. kernels from main producing areas of Guizhou Province¹⁾

微量元素 Trace element	含量 Content					生物富集系数 Bioconcentration factor				
	$\bar{X}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	Min/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	Max/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	SD	CV/%	\bar{X}	Min	Max	SD	CV/%
Fe	21.70	11.43	35.60	5.38	24.78	0.001 4	0.000 6	0.006 7	0.000 9	64.29
Mn	39.13	16.56	96.58	18.42	47.07	0.099 6	0.009 1	0.405 2	0.072 8	73.09
Cu	12.33	7.01	20.64	2.82	22.87	0.668 3	0.192 9	2.110 1	0.366 3	54.11
Zn	17.25	8.74	30.65	3.01	17.43	0.692 9	0.198 2	3.665 6	0.546 3	78.84

¹⁾ \bar{X} : 均值 Mean; Min: 最小值 Minimum; Max: 最大值 Maximum; SD 标准差 Standard deviation; CV: 变异系数 Coefficient of variation.

该地区核桃种仁中 Fe、Mn 和 Cu 的富集能力在粉(砂)质黏壤土中最强,而种仁中 Zn 的富集能力则在黏壤土中最强。

2.2 土壤性状分析

2.2.1 总体情况分析 统计结果(表5)显示:贵州核桃主产区土壤酸碱度介于 pH 4.72 至 pH 8.33 之间,均值为 pH 7.15。从 pH 值的变异系数看,贵州核桃主产区土壤酸碱度的变异幅度较小。土壤的有机质含量变化较大,介于 13.45~563.21 g·kg⁻¹之间,均值为 73.60 g·kg⁻¹。有机质含量的变异系数较高,说明土壤有机质含量的变异幅度较大。

由表5还可见:土壤 Fe 含量的均值为 17.28 g·kg⁻¹, Mn、Cu、Zn 含量的均值分别为 573.64、22.38、32.76 mg·kg⁻¹。4 种微量元素中, Mn 含量的变异系数最大,说明土壤 Mn 含量的变异幅度最大。有效 Fe、有效 Mn、有效 Cu、有效 Zn 含量的均值分别为 11.49、15.23、0.67、1.37 mg·kg⁻¹, 4 种微量元素有效态含量的变异系数均在 80% 以上,说明土壤中这

4 种微量元素有效态含量的变异幅度较大。

对不同土壤样品性状进行进一步分析,结果显示:强酸性土壤占比 0.0%, 酸性土壤占比 7.4%, 微酸性土壤占比 13.0%, 中性土壤占比 27.8%, 微碱性土壤占比 51.8%, 说明贵州核桃主产区 92.6% 土壤呈现微酸性至微碱性。有机质含量达到中等水平的土壤占比 3.7%, 达到适宜水平的土壤占比 0.0%, 达到丰富水平的土壤占比 7.4%, 达到极丰富水平的土壤占比 88.9%, 说明贵州核桃主产区大部分土壤有机质含量极丰富。有效 Fe、有效 Mn、有效 Cu、有效 Zn 含量达到中上及以上等级水平的占比分别为 51.9%、77.8%、85.3% 和 74.2% (表6)。

2.2.2 不同质地类型土壤间比较 对贵州核桃主产区不同质地类型土壤性状进行比较,结果(表7)显示:不同质地类型土壤的 pH 值无明显差异;有机质含量在粉(砂)质黏壤土中最高;Fe、Cu 和 Zn 含量在黏土中最高, Mn 含量在壤土中最高;有效 Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量均在粉(砂)质黏壤土中最高。

表4 贵州主产区不同质地类型土壤中核桃种仁4种微量元素的含量和生物富集系数($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Content and bioconcentration factor of four trace elements in *Juglans regia* Linn. kernels from soils of different texture types in main producing areas of Guizhou Province ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

STT	不同微量元素的含量/(mg·kg ⁻¹) Content of different trace elements				不同微量元素的生物富集系数 Bioconcentration factor of different trace elements				
	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn	
S1	18.53±0.35b	33.18±12.25a	12.46±1.56b	15.52±0.94c	0.000 9±0.000 1b	0.093 6±0.040 3a	0.605 6±0.190 5ab	0.485 8±0.091 1a	
S2	24.92±5.37a	49.41±10.03a	17.27±4.03a	20.61±4.13b	0.001 9±0.000 3a	0.167 5±0.042 6a	1.063 0±0.406 7a	0.677 8±0.341 1a	
S3	23.16±5.38b	32.27±8.57a	11.45±2.70b	16.91±3.09bc	0.001 6±0.000 6a	0.101 6±0.093 5a	0.709 7±0.609 3ab	0.578 4±0.275 0a	
S4	20.10±5.30b	31.40±14.14a	11.59±1.71b	15.75±3.97bc	0.001 2±0.000 1b	0.081 4±0.037 7a	0.510 2±0.151 6ab	0.689 7±0.405 2a	
S5	31.92±3.18a	46.68±1.86a	16.67±0.23a	29.12±1.64a	0.001 6±0.000 2a	0.072 9±0.006 2a	0.688 9±0.161 4ab	0.971 6±0.344 9a	
S6	20.95±3.40b	38.72±13.50a	8.94±0.68b	14.53±1.06c	0.001 0±0.000 6b	0.110 1±0.050 2a	0.338 2±0.126 2b	0.503 5±0.268 0a	

¹⁾ STT: 土壤质地类型 Soil texture type. S1: 粉(砂)壤土 Silt (sand) loam; S2: 粉(砂)质黏壤土 Silt (sandy) clay loam; S3: 壤土 Loam; S4: 砂质壤土 Sandy loam; S5: 黏壤土 Clay loam; S6: 黏土 Clay. 同列中不同的小写字母表示在不同质地类型土壤间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between soils of different texture types.

表5 贵州核桃主产区的土壤性状¹⁾

Table 5 Soil properties of main producing areas of *Juglans regia* Linn. in Guizhou Province¹⁾

统计量 Statistic	pH 值 pH value	有机质含量/ (g·kg ⁻¹) Organic matter content	不同微量元素及其有效态的含量 Content of different trace elements and their available forms							
			Fe/ (g·kg ⁻¹)	Mn/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	有效 Fe/ (mg·kg ⁻¹) Available Fe	有效 Mn/ (mg·kg ⁻¹) Available Mn	有效 Cu/ (mg·kg ⁻¹) Available Cu	有效 Zn/ (mg·kg ⁻¹) Available Zn
\bar{X}	7.15	73.60	17.28	573.64	22.38	32.76	11.49	15.23	0.67	1.37
Min	4.72	13.45	3.93	86.74	6.46	4.59	0.68	0.07	0.00	0.11
Max	8.33	563.21	32.58	3 981.56	44.28	68.85	182.50	73.67	2.75	7.66
SD	0.87	72.16	5.16	584.41	9.48	15.02	26.58	13.95	0.55	1.59
CV/%	12.16	98.04	29.86	101.74	42.35	45.85	231.33	91.59	82.09	116.06

¹⁾ \bar{X} : 均值 Mean; Min: 最小值 Minimum; Max: 最大值 Maximum; SD: 标准差 Standard deviation; CV: 变异系数 Coefficient of variation.

表 6 贵州核桃主产区土壤中 4 种微量元素有效态含量的等级分析

Table 6 Grade analysis of content of four available trace elements in soil from main producing areas of *Juglans regia* Linn. in Guizhou Province

微量元素有效态 Available trace element	不同等级的占比/% Proportion of different grades				
	低 Low	中下 Lower middle	中上 Upper middle	丰富 Rich	极丰富 Extremely rich
有效 Fe Available Fe	22.2	25.9	27.8	14.8	9.3
有效 Mn Available Mn	3.7	18.5	38.9	27.8	11.1
有效 Cu Available Cu	5.6	9.3	70.4	9.3	5.6
有效 Zn Available Zn	11.1	14.8	48.2	16.7	9.3

表 7 贵州核桃主产区不同质地类型土壤性状分析 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 7 Analysis of soil properties of different texture types from main producing areas of *Juglans regia* Linn. in Guizhou Province ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

土壤质地类型 Soil texture type	pH 值 pH value	有机质含量/(g · kg ⁻¹) Organic matter content	不同微量元素及其有效态的含量 Content of different trace elements and their available forms		
			Fe/(g · kg ⁻¹)	Mn/(mg · kg ⁻¹)	Cu/(mg · kg ⁻¹)
粉(砂)壤土 Silt (sand) loam	7.80±0.20a	61.41±21.19b	20.59±2.18a	387.30±188.16a	21.40±4.04a
粉(砂)质黏壤土 Silt (sandy) clay loam	7.51±0.06a	104.77±22.86a	12.90±0.73b	302.66±63.49a	16.90±2.67a
壤土 Loam	7.22±0.76a	57.66±25.81b	15.47±4.72ab	819.65±120.56a	23.54±12.02a
砂质壤土 Sandy loam	7.63±0.58a	54.68±3.51b	17.56±4.08ab	426.44±176.09a	25.03±10.23a
黏壤土 Clay loam	7.51±0.60a	80.89±41.10ab	20.29±1.73ab	644.66±76.23a	25.08±5.65a
黏土 Clay	6.96±0.87a	51.67±8.76b	22.70±8.83a	363.56±70.73a	29.04±10.83a

土壤质地类型 Soil texture type	不同微量元素及其有效态的含量 Content of different trace elements and their available forms				
	Zn(mg · kg ⁻¹)	有效 Fe/(mg · kg ⁻¹) Available Fe	有效 Mn/(mg · kg ⁻¹) Available Mn	有效 Cu/(mg · kg ⁻¹) Available Cu	有效 Zn/(mg · kg ⁻¹) Available Zn
粉(砂)壤土 Silt (sand) loam	32.54±5.00a	4.06±2.24b	17.43±9.09b	0.49±0.06bc	1.31±0.57b
粉(砂)质黏壤土 Silt (sandy) clay loam	33.25±8.47a	41.57±33.39a	45.55±35.01a	1.50±1.18a	4.35±3.29a
壤土 Loam	34.91±15.47a	6.64±5.91b	15.38±11.57b	0.58±0.30bc	0.77±0.60b
砂质壤土 Sandy loam	27.36±10.87a	8.87±5.27b	9.08±4.28b	0.94±0.30ab	1.44±1.29b
黏壤土 Clay loam	32.67±11.58a	7.05±3.31b	22.59±13.41b	0.52±0.12bc	0.60±0.37b
黏土 Clay	34.98±17.56a	1.29±0.53b	3.13±2.02b	0.13±0.04c	3.90±5.35b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在不同质地类型土壤间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between soils of different texture types.

2.3 核桃种仁微量元素含量与土壤性状的关系

对核桃种仁微量元素含量与土壤性状进行 Spearman 相关性分析, 结果(表 8)表明: 核桃种仁的 Fe、Mn、Cu 含量仅与少量土壤性状和个别颗粒含量呈显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 相关性。其中, 核桃种仁 Fe 含量与土壤 pH 值呈显著负相关, 与土

壤有效 Fe 含量和黏粒含量呈显著正相关; 核桃种仁 Mn 含量与土壤 Mn 含量和黏粒含量呈显著正相关, 与土壤 Zn 含量和有效 Mn 含量呈极显著正相关; 核桃种仁 Cu 含量与土壤有效 Fe 含量和有效 Cu 含量呈显著正相关。核桃种仁的 Zn 含量与土壤性状和颗粒含量的相关性均不显著。

表 8 贵州主产区核桃种仁微量元素含量与土壤性状的相关性分析¹⁾

Table 8 Correlation analysis of trace element contents of *Juglans regia* Linn. kernels with soil properties from main producing areas of Guizhou Province¹⁾

微量元素含量 Trace element content	与土壤性状的相关系数 Correlation coefficient with soil properties						
	pH 值 pH value	有机质含量 Organic matter content	Fe 含量 Fe content	Mn 含量 Mn content	Cu 含量 Cu content	Zn 含量 Zn content	有效 Fe 含量 Available Fe content
Fe	-0.286 *	0.131	0.052	-0.198	0.198	-0.050	0.277 *
Mn	0.007	0.184	0.023	0.342 *	0.019	0.424 **	0.175
Cu	0.112	0.046	0.106	0.044	0.170	0.200	0.283 *
Zn	-0.046	0.233	0.015	0.002	0.123	0.120	0.231

续表8 Table 8 (Continued)

微量元素含量 Trace element content	与土壤性状的相关系数 Correlation coefficient with soil properties					
	有效 Mn 含量 Available Mn content	有效 Cu 含量 Available Cu content	有效 Zn 含量 Available Zn content	砂粒含量 Sand content	粉(砂)粒含量 Silt (sand) content	黏粒含量 Clay content
Fe	-0.001	0.087	-0.029	-0.133	-0.138	0.422 *
Mn	0.461 **	0.052	-0.183	-0.304	0.035	0.427 *
Cu	0.189	0.281 *	0.063	-0.011	-0.050	0.068
Zn	0.132	0.079	0.143	-0.101	-0.050	0.215

¹⁾ * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

3 讨 论

3.1 贵州主产区核桃种仁的微量元素含量特征

检测及统计结果显示:贵州核桃主产区核桃种仁中4种微量元素的含量从高到低依次为 Mn、Fe、Zn、Cu,富集能力从大到小依次为 Zn、Cu、Mn、Fe。比较来看,贵州主产区核桃种仁的 Fe 含量 ($21.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 低于新疆 ($43.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[10] 和重庆 ($27.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^{[20]40}, 但高于云南 ($14.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[11]; Mn 含量 ($39.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 低于新疆 ($48.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[10] 和云南 ($114.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[11], 但高于重庆 ($13.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^{[20]42}; Cu 含量 ($12.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 低于新疆 ($19.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[10], 但高于云南 ($6.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[11] 和重庆 ($9.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^{[20]48}; Zn 含量 ($17.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 低于新疆 ($29.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[10], 但高于重庆 ($13.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^{[20]45} 和云南 ($0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[11]。可见,贵州核桃种仁的 Mn、Fe、Zn 和 Cu 含量总体上低于新疆,但高于重庆和云南。以上结果表明:不同产地核桃种仁的微量元素含量差异较大,且贵州产核桃种仁的微量元素含量相对较高。

3.2 贵州主产区核桃种仁微量元素含量的影响因子

土壤是植物果实微量元素的重要来源。植物利用根系从土壤中吸收微量元素,并通过木质部将微量元素运输到叶片中,最终将叶片中的微量元素输送到果实(尤其是种仁)中^{[20]7}。相关性分析结果表明:贵州核桃主产区的土壤 pH 值、部分微量元素及其有效态的含量和土壤质地(即不同颗粒含量)对该地区核桃种仁微量元素含量有一定的影响。

贵州核桃主产区 92.6% 的土壤为微酸性至微碱性,表明该地区大部分土壤酸碱度适宜核桃树生长^[21]。相关性分析结果显示:贵州主产区核桃种仁

Fe 含量与土壤 pH 值呈显著 ($P < 0.05$) 负相关,这可能是因为随着土壤 pH 值增大,土壤中的 OH^- 增多,致使土壤中的有效 Fe 容易形成难溶的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ^[22-24], 从而降低土壤的有效 Fe 含量,在一定程度上阻碍了核桃根系对 Fe 的吸收。

土壤中部分微量元素及其有效态含量是影响贵州核桃主产区核桃种仁微量元素含量的重要因子。核桃种仁的 Fe、Mn、Cu 含量分别与土壤有效 Fe、Mn、Cu 含量呈显著或极显著正相关,说明核桃种仁的微量元素主要来源于土壤中相应微量元素的有效态。比较来看,贵州核桃主产区土壤中有有效 Fe、Mn、Cu、Zn 的含量均值大小顺序与核桃种仁中对应微量元素含量均值的大小顺序完全一致,即微量元素及其有效态含量从大到小分别为 Mn(有效 Mn)、Fe(有效 Fe)、Zn(有效 Zn)、Cu(有效 Cu)。核桃种仁 Mn 含量与土壤 Zn 含量以及核桃种仁 Cu 含量与土壤有效态 Fe 含量分别呈极显著和显著正相关,这可能是因为随着土壤中 Zn 的不断增多,在一定氧化还原条件下, Zn^{2+} 可以置换出矿物晶格中的 Mn^{2+} ^[25-26], 使土壤中的有效 Mn 增多,从而被核桃根系吸收并累积到种仁中。此外,在还原条件下,大量 Fe^{3+} 被还原为可溶性更强的 Fe^{2+} ^[27], 此时,铁锰氧化物表面吸附的 Cu^{2+} 被释放出来,形成可溶的 Cu^{2+} 。因此,土壤中的 Zn 与 Mn 以及 Fe 与 Cu 之间存在协同作用。

土壤质地是影响贵州主产区核桃种仁微量元素含量的另一个重要因子。相关性分析结果显示:核桃种仁的 Fe、Mn 含量与土壤的黏粒含量均呈显著正相关。这是由于黏粒具有较大的比表面积,并带有负电荷,可以与土壤中的金属离子形成“离子桥”并吸附环境中的有机质,从而形成稳定的有机-矿物态结合物^[28-29]。随着吸附的有机质不断增多,土壤中的有机酸和腐殖质越来越多,使得土壤呈现酸性,促使土壤中的矿质成分溶解成游离态,进而被根系吸收。由

于土壤中的黏粒对微量元素具有累积效应^[30],同时贵州核桃主产区土壤中的Fe和Mn含量远大于Cu和Zn含量,推测随着黏粒含量的增加,土壤中的Fe和Mn优先溶解成游离状态(即有效态),从而在核桃种仁中不断富集。另外,土壤有机质含量和4种微量元素的有效态含量均在粉(砂)质黏壤土中最高,核桃种仁的Fe和Zn含量在黏壤土中最高,Mn和Cu含量在粉(砂)质黏壤土中最高,而粉(砂)质黏壤土和黏壤土中黏粒的占比均较大,进一步说明核桃种仁微量元素含量与土壤质地密切相关,并且与土壤黏粒的相关性尤为显著。

4 结 论

总体来看,贵州地区核桃主产区的核桃种仁中Fe、Mn、Cu、Zn含量相对较高。主产区土壤总体介于弱酸性至弱碱性之间,土壤有机质极丰富,微量元素有效态含量相对较高,适宜核桃生长发育。粉(砂)质黏壤土或黏壤土更利于核桃种仁中Fe、Mn、Cu、Zn的积累。综上所述,通过调节土壤pH值、提高土壤微量元素有效态含量以及选择适宜质地土壤,可以有效提高贵州地区核桃种仁的微量元素含量,进而提升该地区核桃的营养价值。

参考文献:

[1] 战楠,焦杏春. 微量元素与健康[J]. 地球, 2024(1): 27-30.

[2] 张翰生,昌泰湘,康建忠,等. 核桃的营养价值及其开发利用研究进展[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 905-919.

[3] 王树芝. 中国核桃的历史渊源、文化及发展[J]. 农业考古, 2022(6): 14-23.

[4] 徐影影,苗永军,赵文革,等. 核桃油加工及抗氧化技术研究进展[J]. 中国油脂, 2025, 50(3): 14-21.

[5] 王芷静,张碟,方媛,等. 外源硒强化核桃乳饮料的制备及功能特性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 74-81.

[6] 耿树香,宁德鲁,陈海云,等. 我国不同主产区核桃品质综合评价分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(4): 97-101.

[7] 耿树香,宁德鲁,陈海云,等. 云南主栽核桃品种功能成分综合评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 209-215.

[8] 于沛沛,于萌萌,姜启兴,等. 不同产地核桃仁的成分分析及营养评价[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(18): 296-299.

[9] 耿树香,宁德鲁,李勇杰,等. 不同品种核桃仁中钙、铁、锌微量元素的检测分析[J]. 西部林业科学, 2019, 48(3): 28-33.

[10] 努尔买买提·阿布地热木,焦灰敏,周小魏,等. 新疆核桃及后代坚果矿物质营养成分分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 186-192.

[11] 韦承珊,毕佳俊,李云仙,等. 野生核桃仁营养成分及其油脂脂肪酸组成、热特性分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(2): 137-141.

[12] 王小辉,王玉书,魏立本,等. 重庆核桃主要产区土壤养分状况及肥力评价[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(1): 88-93, 105.

[13] 宋斌,刘茂桥,张文娥,等. 贵州核桃主产区核桃园土壤养分丰缺状况[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 65-74.

[14] 李青军,耿庆龙,赖宁,等. 核桃土壤养分评价及其与核桃产量的相关性分析[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(5): 826-833.

[15] 陈鑫悦,姚晓琴,王宝庆,等. 砾石戈壁区核桃园土壤理化性质及其对核桃产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2025, 53(2): 73-82.

[16] 陈伟,卓仁发,夏玲玉,等. 配方型叶面微肥铃丹对核桃产果的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(7): 38-40.

[17] 黄闽敏,张强,王国安,等. 土壤质地和树龄对早实核桃园土壤交换性钙镁的影响[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 132-137.

[18] 孙琳娜. 长期施肥对核桃园土壤团聚体及核桃果实品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024: 39-49.

[19] 曾宪浩,刘永翔,李俊,等. 贵州核桃产业现状与发展战略分析[J]. 贵州农业科学, 2022, 50(12): 114-121.

[20] 吴耀鹏. 重庆核桃矿质营养动态特征研究[D]. 重庆:西南大学, 2022.

[21] 宫峥嵘,王一峰,王瀚,等. 核桃矿质营养研究进展[J]. 林业科学, 2021, 57(1): 178-190.

[22] 谢珊,陈祖拥,舒英格,等. 贵州典型茶园土壤酸化及其养分变化特征[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(19): 8025-8035.

[23] 邹庆鹏,金开美,曹成,等. 信阳茶区土壤有效态微量元素含量状况[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(3): 975-980.

[24] 地里拜尔·苏里坦,艾尼瓦尔·买买提,蔺娟. 土壤中铁锰的形态分布及其有效性研究[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2): 155-160.

[25] 姜勇,张玉革,梁文举,等. 耕地土壤中交换态钙镁铁锰铜锌相关关系研究[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 160-163.

[26] 颜明娟,陈贤玉,曹榕彬,等. 福建典型白茶产区茶园土壤锰锌形态特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 885-895.

[27] 姚远,余光辉,滕辉. 土壤铁氧化物-亚铁的相互作用及其环境影响研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(4): 718-728.

[28] 石碧婉,高文静,杨志颖,等. 土壤质地和有机碳分子组成对土壤有机碳的矿化和微生物碳积累效率的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(2): 365-377.

[29] 赵明松,张甘霖,王德彩,等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 1-11.

[30] 张弦鸣. 重庆地区沉积岩及其风化土壤中粘粒的微量元素特征[D]. 重庆:西南大学, 2024: 1-3.

(责任编辑:佟金凤)