



黄琪,孙泽琳,何友盛,卯丹,姚智,张伟,邹春琴. 洱海流域莴笋地上部微量元素累积特征及其影响因子[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(09): 186-195.
HUANG Qi, SUN Zelin, HE Yousheng, MAO Dan, YAO Zhi, ZHANG Wei, ZOU Chunqin. Accumulation characteristics of trace elements in the above-ground parts of asparagus lettuce and its influencing factors in the Erhai Lake Basin[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(09): 186-195.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.17

洱海流域莴笋地上部微量元素累积特征及其影响因子

黄琪¹ 孙泽琳² 何友盛³ 卯丹⁴ 姚智² 张伟⁴ 邹春琴^{1*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院/绿色农业发展研究院, 北京 100193;

2. 云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650500;

3. 云南大学 农学院, 昆明 650091;

4. 西南大学 资源与环境学院, 重庆 400715)

摘要 为探究莴笋微量元素累积特征、土壤肥力因素(土壤养分、有机质、pH等)及主要影响因子,以云南省大理市洱海以西的莴笋主要生产区为研究区域,采用调研取样的方法,分别采集50份成熟莴笋样品及其对应的耕层土壤样品,采用等离子体发射光谱法(ICP-OES)、钼锑抗比色法、重铬酸钾-外加热法及电位法分别测定莴笋各个部位微量元素含量及土壤有效铁、锰、铜、锌、土壤有效磷、土壤有机质的含量及土壤pH,进一步分析该地区莴笋微量元素含量的情况及其与土壤肥力指标的相关性。结果表明:1)莴笋的茎肉生物量所占比例最高,占莴笋地上部总生物量的43%。莴笋地上部铁、锰、铜、锌累积量分别为2.2、0.3、0.1、0.8 g/株。2)微量元素铁、锰主要累积在莴笋衰老叶中,分别占植株总铁、总锰的33%和30%;锌、铜主要累积在茎肉中,分别占植株总锌、总铜的33%和43%。3)皮尔逊相关性分析表明,土壤有效铜含量与莴笋地上部锌、铜和锰呈极显著正相关性;莴笋地上部铁与土壤有效磷含量呈显著负相关性,与土壤有效锌含量呈极显著负相关。综上,洱海流域莴笋生产区土壤微量元素含量高,且土壤微量元素有效性直接影响了莴笋地上部微量元素的累积。因此,在莴笋的生产中,将土壤有效磷调控在合理范围内(20~40 mg/kg)和增施微量元素肥料可提升莴笋地上部铁锌铜锰的累积。

关键词 土壤-植物系统; 洱海流域; 微量元素; 累积; 影响因素; 莴笋

中图分类号 S311

文章编号 1007-4333(2025)09-0186-10

文献标志码 A

Accumulation characteristics of trace elements in the above-ground parts of asparagus lettuce and its influencing factors in the Erhai Lake Basin

HUANG Qi¹, SUN Zelin², HE Yousheng³, MAO Dan⁴, YAO Zhi²,
ZHANG Wei⁴, ZOU Chunqin^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences/National Academy of Agriculture Green Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650500, China;

3. College of Agriculture, Yunnan University, Kunming 650091, China;

4. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract This study aimed to explore the accumulation characteristics of trace elements in asparagus lettuce

收稿日期: 2025-05-14

基金项目: 云南省重大科技专项(202202AE090034); 云南省张福锁院士工作站(202305AF150055)

第一作者: 黄琪(ORCID:0009-0009-1033-3240), 硕士研究生, E-mail: huangqi_hhh@163.com

通讯作者: 邹春琴(ORCID:0000-0002-0069-3658), 主要从事微量元素营养与人体健康、作物生理学研究, E-mail: zcq0206@cau.edu.cn

(*Lactuca sativa* L.), the influence of soil fertility factors (soil nutrients, organic matter, pH, etc.) on asparagus lettuce trace elements accumulation, and its main influencing factors in the main asparagus lettuce production area located in the west of Erhai Lake Basin of Dali City, Yunnan Province. Using a survey sampling method, a total of 50 mature asparagus lettuce samples and their corresponding topsoil samples were collected. The trace elements contents in different parts of asparagus lettuce, as well as soil available P, Fe, Mn, Cu, Zn, organic matter and pH were determined respectively by ICP-OES, vanadium molybdate blue colorimetric method, potassium dichromate heating method and potentiometry. The contents of trace elements in asparagus lettuce in this area and their correlations with soil fertility indicators were further analyzed. The results showed that: 1) The stem of asparagus lettuce had the highest biomass proportion, accounting for 43% of the total aboveground biomass. The accumulation of Fe, Mn, Cu and Zn in the above-ground part of asparagus lettuce was 2.2, 0.3, 0.1 and 0.8 g/plant, respectively. 2) Trace elements Fe and Mn are primarily accumulated in primary leaves, accounting for 33% and 30% of total plant content, respectively. Zn and Cu mainly accumulated in the stem, accounting for 33% and 43% of the total plant content, respectively. 3) Pearson correlation analysis indicated that the soil DTPA-Cu content was high-significantly and positively correlated with Zn, Cu and Mn accumulation in the asparagus lettuce above-ground parts. The Fe accumulation in the asparagus lettuce above-ground part displayed a significant negative correlation with the soil Olsen-P content and soil DTPA-Zn content. In conclusion, the contents of trace elements in the soil of the asparagus lettuce production area in the Erhai Lake Basin are high, and the availability of trace elements in the soil directly affects the accumulation of trace elements in the above-ground part of asparagus lettuce. Therefore, in asparagus lettuce production, maintaining soil Olsen-P content within an optimal range (20 to 40 mg/kg) and increasing the application of trace element fertilizers can enhance the accumulation of Fe, Zn, Cu, and Mn in the above-ground parts of asparagus lettuce.

Keywords soil-plant system; Erhai Lake Basin; trace elements; accumulation; influencing factors; asparagus lettuce

茼蒿含有人体所需的多种维生素和营养物质,广受消费者喜爱。铁、锰、铜、锌作为茼蒿生长所必需的微量营养元素,参与了其生长过程中的诸多生理生化过程,对产量和品质的形成发挥重要作用^[1]。当微量元素供应不足时,作物会呈现明显的缺素症状,并导致作物品质和产量下降^[2]。已有研究表明茼蒿中微量营养元素的积累不仅取决于不同部位(根、茎、叶)的营养分配,还受到土壤和气候环境的影响^[3]。

我国云南省洱海流域,属低纬高海拔地区,土壤肥沃,是传统农业生产区,自然条件适合蔬菜种植。该流域以露地蔬菜为主要种植方式,蔬菜产值以茼蒿最高,平均为23.55万元/hm²。同时茼蒿也是当地种植面积最广的蔬菜,作为当地重要的经济作物,对农民增收意义重大。然而,该地区菜田土壤氮素富集、磷素过量积累、土壤酸化等问题十分突出^[4]。作为土壤肥力形成的关键指标,有机质在土壤中的丰缺程度直接反映着土壤的营养供给能力^[5]。土壤有机质可通过抑制微量元素活性及吸附、络合、沉淀等作用,从而调控其在土壤中的迁移

与形态转化过程^[6-8]。夏凡等^[9]以茶园土壤为例,通过相关性分析发现,土壤有机质水平与有效态铁、锌元素的含量存在显著正相关关系,这揭示了有机质对微量元素生物有效性的促进作用。据本课题组前期对洱海流域蔬菜种植区调研发现,该区域蔬菜体系氮磷盈余均以茼蒿种植地为最高,超过200 kg/hm²(以P₂O₅计)。已有研究表明土壤有效磷会与土壤中的锌、铁等微量元素结合形成难溶性的磷酸盐,从而降低了土壤中微量元素的有效性,抑制作物对微量元素的吸收利用^[10-11]。Conversa等^[12]通过对意大利南部集约化种植区茼蒿分析发现,有机改良剂和磷肥是茼蒿微量元素积累的主要驱动因素,有机改良剂可能通过腐殖酸提升微量元素的生物有效性。Akca等^[13]试验发现,在高pH石灰性土壤中,同时施用铁锌肥可有效提升茼蒿中锌含量,且高磷(400 mg/kg)未显著抑制茼蒿对微量元素吸收。

目前,有关作物微量营养元素的研究主要集中在传统粮食作物如水稻、小麦和玉米上,对于周期短、能满足消费者微量元素营养迫切需求的蔬菜,

尤其是根茎类蔬菜如莴笋,其微量元素吸收与累积特性及其主要的土壤肥力影响因子方面的研究尚少。因此,为明确洱海流域莴笋地上部微量元素累积特征,探究土壤肥力因子对其累积的影响机制,本研究拟以洱海流域海西片区的莴笋地上部及对应的耕层土壤为研究对象,通过相关性分析揭示洱海流域土壤理化性质与莴笋地上部微量元素累积的互作机制,以期为洱海流域莴笋种植区土壤的养分优化管理及莴笋微量元素营养品质提升供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省大理州洱海以西的莴笋生产区(25°40′51″N,100°18′01″E),包括太和街道、大理镇、银桥镇和湾桥镇。该区域属于北亚热带低纬高原季风气候,年平均气温15.7℃,年均降雨量为1048mm,主要集中在6—10月^[14]。根据2021年大理镇蔬菜种植监测点土壤变化数据可知,洱海流域海西片区土壤基本理化性质:土壤pH为6.40,有机质含量为56.90g/kg,全氮含量为3.42g/kg,全磷含量为1.73g/kg,全钾含量为17.44g/kg,有效磷含量为84.5mg/kg,速效钾含量为229mg/kg,有效锌含量为6.5mg/kg。当地种植的莴笋品种主要为“东方红”、“红香妃”和“红贵族”,本研究采样莴笋品种为“东方红”。

1.2 样品采集及测定分析

在2023年4月莴笋收获期进行样品采集。采样区域的选择基于大理市莴笋主产区的分布特点及种植规模的差异性:湾桥镇和太和街道均为传统

蔬菜种植基地,莴笋种植面积所占比例大,分别采集样本21份和13份;银桥镇蔬菜种植面积较小且土壤类型相对均一,采集5份;大理镇兼顾城郊农业与蔬菜种植的多样性,采集11份。总计50份样本。

具体取样过程如下:从每块莴笋地里选择长势均匀莴笋4株,连根拔起,抖掉根系上的土壤,将样品分为茎肉、皮、新叶(顶端未展开叶)、功能叶(中部成熟叶)、衰老叶(基部黄化叶)五部分,洗净后装袋放入烘箱中,105℃杀青30min,75℃烘干至恒重,后称取干重,粉碎后用于养分含量测定;用HNO₃-H₂O₂微波消煮,等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定莴笋各部位铁、锰、铜、锌含量。样品插入GBW10020(GSB-11)柑橘叶-生物成分标准物质测定结果控制检测过程准确度。

同时,在采集植株样品的对应田块按“S”形方式用不锈钢土钻取0—20cm土壤样品,一次取5钻,并进行混合,在田块中心点使用GPS定位,记录取样点经纬度。土样除去石块、植物根系和凋落物,并登记编号后风干、磨细、过筛、混匀,用四分法取1kg土壤带回实验室测定养分含量。采用电位法(*m*(水):*m*(土)=2.5:1)测定土壤pH,重铬酸钾-外加热法测定有机质含量,0.5mol/LNaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量,DTPA浸提后用ICP-OES测定有效铁、锰、铜、锌含量。

1.3 土壤肥力等级划分

参照全国第二次土壤普查中规定的养分分级标准^[15]以及NY/T391—2021《绿色食品产地环境质量》^[16]规定菜地肥力分级标准,对采样土壤养分含量划分等级,洱海流域莴笋生产区土壤肥力分级标准见表1。

表1 土壤肥力分级标准
Table 1 Soil fertility grading standards

指标 Index	分级 Grading			指标 Index	分级 Grading		
	一级 First grade	二级 Second grade	三级 Third grade		一级 First grade	二级 Second grade	三级 Third grade
有机质含量/(g/kg) Organic matter	>30	20~30	<20	有效锌含量/(mg/kg) DTPA-Zn	>2.0	0.5~2.0	<0.5
有效磷含量/(mg/kg) Olsen-P	>40	20~40	<20	有效铜含量/(mg/kg) DTPA-Cu	>2	1~2	<1
有效铁含量/(mg/kg) DTPA-Fe	>10.0	4.5~10.0	<4.5	有效锰含量/(mg/kg) DTPA-Mn	>30	15~30	<15

1.4 数据统计及分析

采用 Origin 对数据进行描述性统计,并绘制直方图和箱线图。利用 SPSS 对土壤养分含量和茼蒿笋地上部养分累积量作 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量描述性统计

洱海流域茼蒿笋生产区土壤理化性质详见表 2。可见:洱海流域茼蒿笋生产区土壤 pH 为 4.64~7.66,

均值为 6.40,土壤整体呈中性偏酸水平;洱海流域茼蒿笋生产区土壤有机质含量均值为 49.62 g/kg,有效磷均值为 145.3 mg/kg,有效铁含量均值为 76.6 mg/kg,有效铜含量均值为 5.3 mg/kg,有效锌含量均值为 8.2 mg/kg,该区域有机质、有效磷、有效铁、有效铜及有效锌的平均含量均达到一级水平,养分供应充足;有效锰含量均值为 8.8 mg/kg,且变异系数(CV)最大达 83.1%,其平均含量达到三级水平,即养分供应适中。

表 2 土壤不同理化特点的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of different physical and chemical characteristics of soil

土壤肥力 Soil fertility	样本数 Sample size	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Variance coefficient
pH	50	4.64	7.66	6.40	0.7	10.9
有机质含量/(g/kg) Organic matter	50	19.67	79.60	49.62	11.9	24.0
有效磷含量/(mg/kg) Olsen-P	50	44.4	248.4	145.3	47.9	33.0
有效铁含量/(mg/kg) DTPA-Fe	50	32.7	222.0	76.6	36.2	47.3
有效锌含量/(mg/kg) DTPA-Zn	50	0.7	22.5	8.2	6.8	83.1
有效铜含量/(mg/kg) DTPA-Cu	50	2.6	17.4	5.3	2.7	50.6
有效锰含量/(mg/kg) DTPA-Mn	50	2.9	23.3	8.8	4.5	51.3

洱海流域茼蒿笋生产区土壤基础理化性质结果见图 1。可见:洱海流域茼蒿笋生产区土壤 pH 均值 6.40 接近分布中心,整体呈近似正态分布;有机质含量呈现典型正态分布,峰值集中在均值 49.62 g/kg 附近,其中高于 30 g/kg 的样本占总样本量的 96%,表明洱海流域茼蒿笋生产区有机质含量丰富;有效磷含量分布以均值 145.3 mg/kg 为中心呈正态分布;有效铁含量的直方图表现出明显左偏态分布,40~60 mg/kg 样本量最多,达 34%;有效锌含量的分布表现为强烈离散特征,直方图无明显单峰,处于一级水平的样本量最多,占总样本量的 68%;有效铜含量整体呈左偏态分布,分布相对集中;有效锰含量的分布相对集中,仅有 6% 的样本处于二级水平。

2.2 茼蒿笋各部分养分含量及分布

茼蒿笋地上各部位的生物量结果见表 3。可见:

茼蒿笋各部位生物量由大到小的排序为茎肉>衰老叶>功能叶>新叶>皮;茎肉生物量所占比例最高,达总干重的 43%,衰老叶、功能叶、新叶和皮的比例分别为 18%、17%、13% 和 9%。根据《茼蒿笋等级规格》^[17]对茼蒿笋规格的划分要求:研究区域有 46% 的茼蒿笋单茎重>500 g(以鲜重计),属于大规格茼蒿笋;14% 的茼蒿笋单茎重<350 g(以鲜重计),属于小规格茼蒿笋。因此,表明茎肉作为茼蒿笋生物量积累的核心部位,其发育状况直接影响单茎规格;同时,由于茎肉生物量在个体间差异较大(变异系数 28.8%),大规格茼蒿笋的高比例可能源于茎肉干物质的显著优势,说明洱海流域茼蒿笋具有较好的生长状况和较高的产量潜力,这对提升产量和商品价值具有关键意义。

表 4 为洱海流域茼蒿笋地上部微量元素累积量。可见:洱海流域茼蒿笋地上部铁、锰、铜、锌累积量的

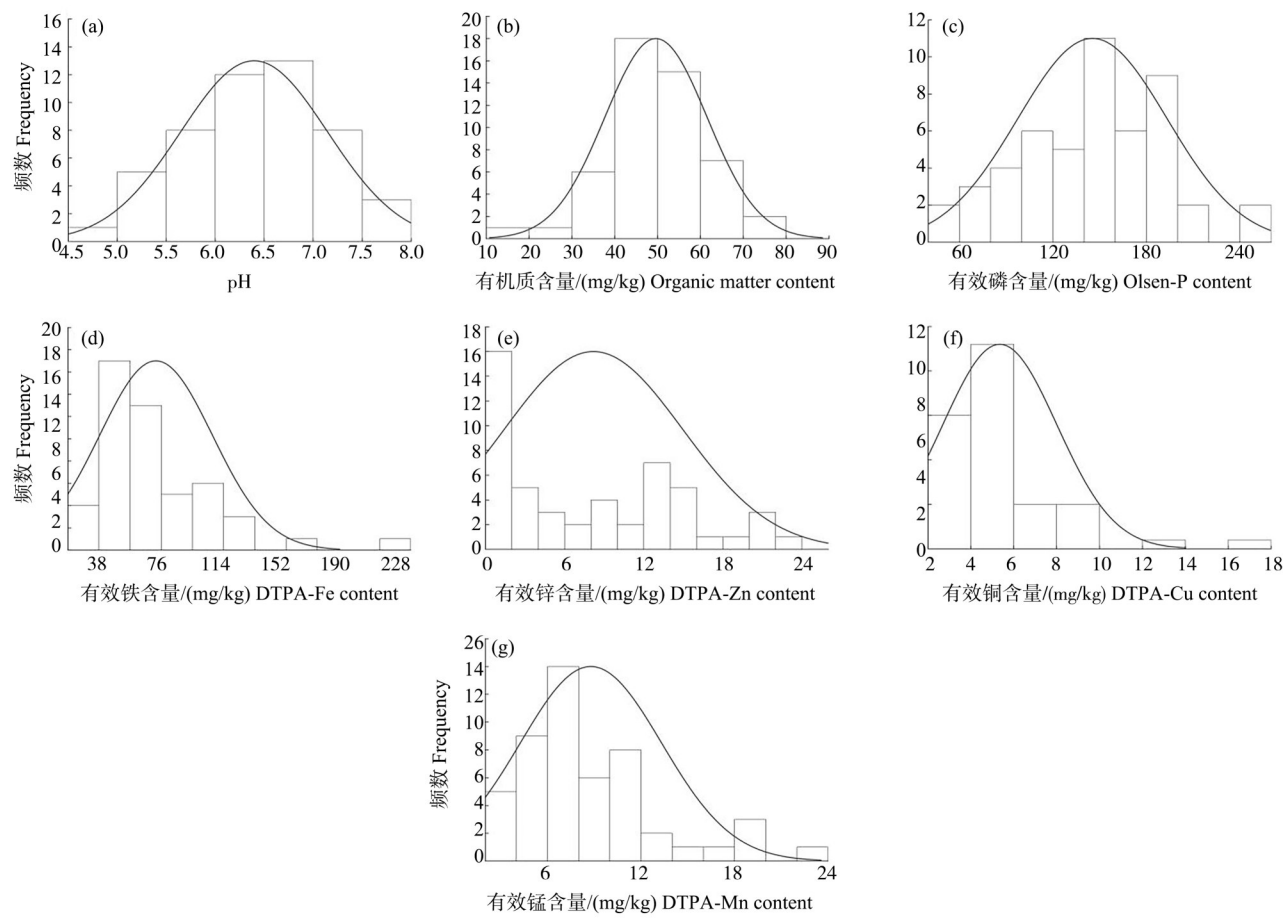


图1 土壤不同理化特性的分布特点

Fig. 1 Distribution characteristics of different physical and chemical properties of soil

表3 莴笋各部位生物量描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of biomass in different parts of asparagus lettuce

植物部位 Plant part	样本数 Sample size	最小值/ (g/株) Min	最大值/ (g/株) Max	平均值/ (g/株) Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
整株 Total plant	50	21.27	73.82	50.27	11.3	22.5
衰老叶 Primary leaf	50	4.95	12.77	9.13	1.9	21.1
功能叶 Functional leaf	50	3.81	12.65	8.62	2.1	24.3
新叶 Young leaf	50	2.34	10.88	6.35	1.9	29.7
茎肉 Stem	50	5.35	35.22	21.75	6.3	28.8
皮 Skin	50	2.50	10.68	4.42	1.3	30.0

变异系数均高于90%，均呈现高变异特征，尤其是铜(CV=296.2%)、锌(CV=126.7%)、锰(CV=114.2%)，反映出洱海流域莴笋生产中存在养分供应不均衡问题，也可能与土壤对应养分的空间分布不均密切相关。

图2为莴笋地上部各组织中铁、锌、铜、锰含量的

分布情况。可见：莴笋不同部位对微量元素的富集能力存在显著差异，且元素间分布模式各异。铁、锰在莴笋衰老叶中含量最高，分别为112.3、20.1 mg/kg；在茎肉中含量最低，分别为31.7、4.4 mg/kg。叶片作为光合和代谢活跃组织^[1]，因此是铁和锰富集的主要部位。锌在莴笋新叶中含量最高，为14.5 mg/kg，因

表 4 茼蒿笋地上部微量元素累积量描述性统计						
Table 4 Descriptive statistics of trace elements accumulation in the above-ground parts of asparagus lettuce						
微量元素 Trace element	样本数 Sample size	最小值/(g/株) Min	最大值/(g/株) Max	平均值/(g/株) Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
铁 Fe	50	2.2	77.0	20.3	18.8	92.6
锰 Mn	50	0.3	20.1	3.3	3.8	114.2
铜 Cu	50	0.1	14.9	0.7	2.1	296.2
锌 Zn	50	0.8	14.1	2.0	2.5	126.7

为锌是多种酶的辅因子,参与叶片光合与代谢活动;且叶片中的锌含量显著高于茎肉,说明锌向茎肉的转运效率有限。铜在茼蒿笋茎肉和衰老叶中的含量较高,

而皮中含量最低,为 1.5 mg/kg。总体来看,铁、锌、铜、锰在植株部位间分配不均,茎肉养分含量低,且田间尺度变异极大。

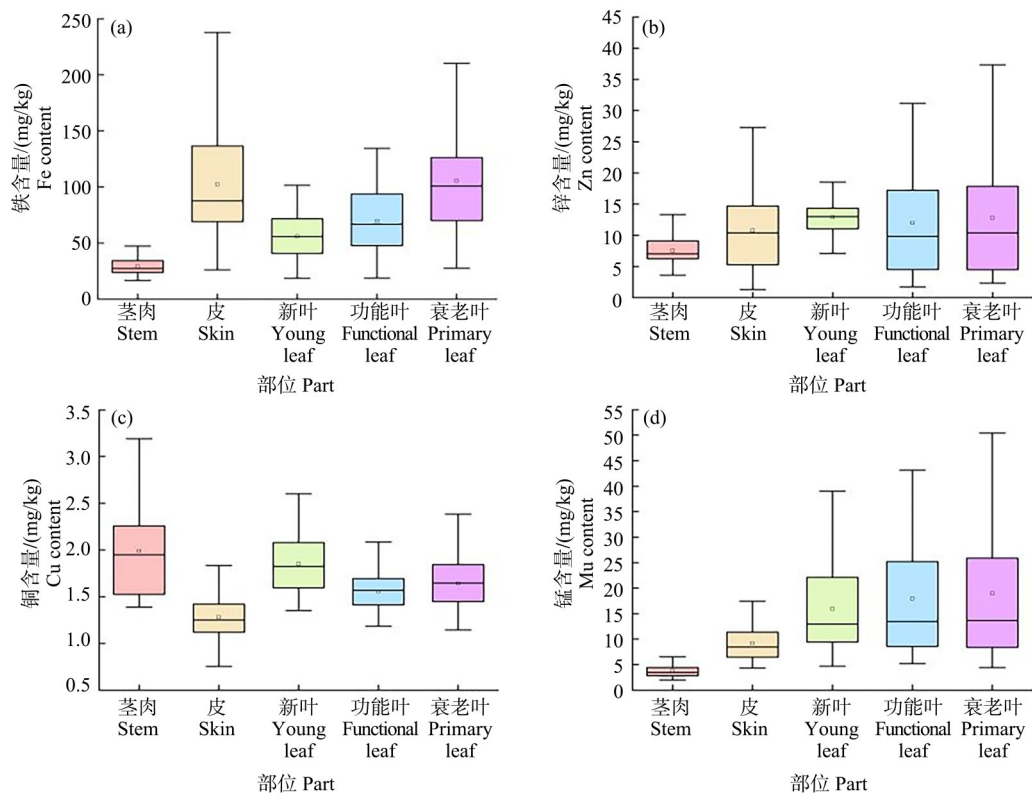


图 2 茼蒿笋各部位微量元素分布情况

Fig. 2 Distribution of trace elements in various parts of asparagus lettuce

图 3 为铁、锌、铜、锰在茼蒿笋地上部各组织的累积情况。可见:铁、锰累积情况与养分分配结果一致,主要富集在茼蒿笋的衰老叶中,其累积量分别占植株铁、锰的 33% 和 30%。而茼蒿笋茎肉因生物量优势成为锌和铜的主要累积部位,分别占总锌 33%、总铜 43%。综上,茼蒿笋各部位对微量元素的累积分布受生物量、元素含量及生理功能共同调控。

2.3 茼蒿笋地上部养分累积及土壤肥力参数的相关性分析

茼蒿笋地上部铁、锌、铜、锰累积量与主要土壤肥力参数之间的 Pearson 相关分析结果见表 5。可见:茼蒿笋地上部铁累积量与土壤有效磷含量之间存在显著的负相关关系($r=-0.321$),与土壤有效锌之间存在极显著负相关性($r=-0.0441$);茼蒿

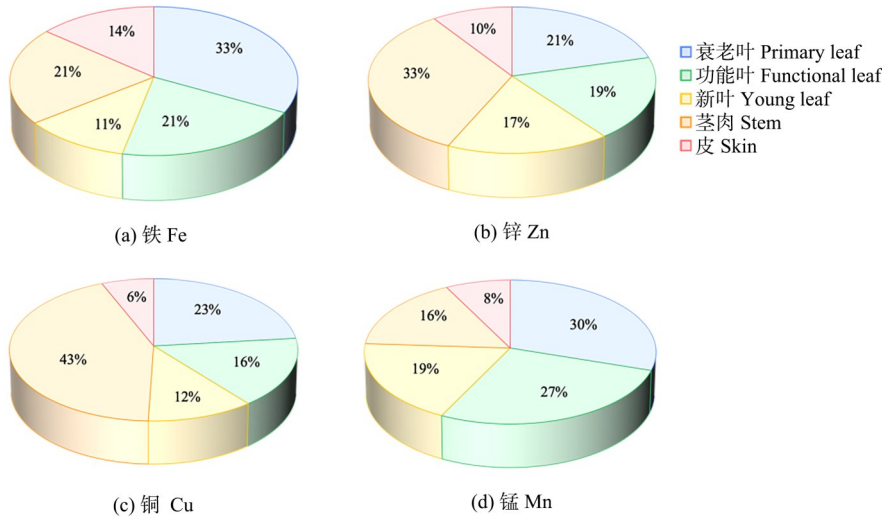


图3 4种主要微量元素在莴笋各部位的累积分布情况

Fig. 3 The accumulation and distribution of four main trace elements in different parts of asparagus lettuce

地上部锌累积与土壤有效锌之间存在显著正相关性($r=0.357$),与土壤有效铜含量之间呈极显著正相关关系($r=0.565$);莴笋地上部铜累积量与土壤有效铁含量之间存在显著正相关的关系($r=0.300$),与土壤有效铜含量之间存在极显著正相关性($r=0.646$);莴笋地上部锰累积量与土壤有效铜含量呈极显著正相关关系($r=0.423$)。该结果表明洱海流域莴笋地上部对不同微量元素的吸收累积与土壤有效态养分含量密切相关,且不同元素表现出特异性的相关性特征。

表5 莴笋地上部微量元素累积量与土壤肥力参数间的相关性

Table 5 Correlation between trace elements accumulation in the above-ground parts of asparagus lettuce and soil fertility parameters

微量元素 Trace element	pH	有机质 Organic matter	有效磷 Olsen-P	有效铁 DTPA-Fe	有效锌 DTPA-Zn	有效铜 DTPA-Cu	有效锰 DTPA-Mn
铁 Fe	0.244	−0.248	−0.321*	−0.167	−0.441**	0.084	−0.202
锌 Zn	−0.245	0.212	0.049	0.251	0.357*	0.565**	0.272
铜 Cu	−0.084	0.063	−0.126	0.300*	0.108	0.646**	0.183
锰 Mn	−0.151	0.152	−0.100	0.191	0.181	0.423**	0.244

注:*表示显著相关($P<0.05$);**表示极显著相关($P<0.01$)。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 莴笋养分含量及累积分布特征

本研究通过细分植物部位,系统解析微量元素在“源-库”关系中的分配规律。Truc等^[18]研究发现铁、锌、锰在蔬菜体内按以下顺序积累并转移到不同部位:叶>根>茎,说明微量营养元素主要在叶片中积累。而在本研究中莴笋体内铁、锰累积量排序为:叶>茎>皮,锌、铜累积量则表现为:

茎>叶>皮。铁、锰在莴笋衰老叶中的高累积可能与二者在植物体内的低移动性有关。已有研究表明铁作为叶绿素合成的关键因子,在衰老过程中因降解滞留在叶片;锰则通过参与光系统II的氧化还原反应,在光合组织富集^[1]。此外,本研究结果发现锌、铜在莴笋茎肉中的高比例,可能与其在细胞壁结合和酶活性调节中的功能相关,茎部作为养分运输通道,更易积累与代谢密切相关的元素^[1]。本研究发现该研究区域莴笋茎肉中的铁含量也远低于

其他部位,仅占11%,而衰老叶铁含量占33%,这是因为植物体内铁移动性差^[1],因此衰老叶中累积较多。Gupta等^[19]在锌积累的研究中表明,植物器官的生物量也是需要考虑的重要因素;在生物量较低条件下,锌浓度较高的组织可能具有较低的积累量。在本研究中,茼蒿笋各部位锌含量无明显差异,茎肉中锌含量最低,但由于茎肉生物量最高,因此锌的累积量最高。研究区域茼蒿笋叶片中锰含量远高于茎肉,这是由于锰是光合作用和叶绿素产生的辅助因子,因此在植物的叶部分积累更多^[20]。铜在不同器官中的分配比例不同,一般情况下老叶中的铜含量较新叶多,茎部的含量则为中等^[21]。本研究中,茼蒿笋各部位铜含量高低排序为:衰老叶>茎肉>功能叶>新叶>皮,与前人研究结果一致。

3.2 影响茼蒿笋微量元素含量的主要因子

美国农业部营养数据库数据显示,每100 g茼蒿笋茎肉(以鲜重计)约为62%,含铁0.4 mg、锌0.3 mg、铜0.038 mg、锰0.177 mg^[22]。本研究结果发现,云南省洱海流域茼蒿笋养分含量较高,茼蒿笋茎肉(以鲜重计)铁含量平均为1.4 mg/kg,锌含量平均为0.4 mg/kg,铜含量平均为0.1 mg/kg,锰含量平均为0.2 mg/kg。其含量均较高,这可能与该研究区域的茼蒿笋品种、区域气候特点、管理措施以及土壤肥力水平高均有关。洱海流域年均温15.7℃,昼夜温差显著(白天20℃左右,夜间5~8℃),年降水量1 048 mm且干湿季分明^[14]。这种气候条件下,菜田pH(均值6.40)整体呈中性偏酸水平、有机质含量高、全氮、速效钾和有效磷丰富、土壤铁锌有效性高的特点。

洱海流域茼蒿笋生产区土壤整体呈弱酸性,在酸性土壤中,铁、锰、锌和铜的有效性更高^[23]。土壤有机质由于其巨大的反应界面,在微量元素的吸附作用、化学吸附作用过程中,会与其他土壤基质组分或配体产生强烈的竞争效应^[24]。洱海流域菜地土壤有机质含量>30 g/kg为一级水平^[16],研究区域96%土壤有机质含量达到该标准。洱海流域耕地土壤有机质含量丰富,但较高的地下水位导致有机质矿化分解较慢,难以及时转化为活性有机质和释放出农作物生长所需的各种营养元素,从而影响了农作物的吸收利用^[3]。

Wang等^[25]评估菜地的磷阈值平均为30.04 mg/kg;本研究结果发现洱海流域茼蒿笋生产

区的土壤有效磷含量均高于该阈值,表明洱海流域茼蒿笋生产区土壤磷素已显著超出环境安全承载水平,存在较高的淋溶流失风险,需针对性优化磷肥施用策略。结合洱海流域茼蒿笋生产区土壤肥力分级标准,应将土壤有效磷控制在20~40 mg/kg,以满足茼蒿笋生长需求。Yang等^[26]表明磷和铁容易在土壤中形成不溶性的Fe-P复合物,特别是在酸性土壤中,这会降低两者在土壤中的生物有效性,进而影响作物的养分吸收效率。本研究发现在洱海区域,土壤有效磷含量与茼蒿笋地上部铁累积呈显著负相关关系($P<0.05$),产生拮抗作用,与上述研究结果一致。在酸性土壤上,施磷量<400 kg/hm²(以P₂O₅计)时,作物地上部锌积累随着施磷量的增加而增加^[27]。但在本研究发现,土壤有效磷含量与茼蒿笋地上部锌吸收累积无相关性,土壤中丰富的锌(有效锌平均含量为8.8 mg/kg)供应弥补了由于磷较高而引起的锌吸收能力的下降。

本研究发现,土壤有效铜含量与茼蒿笋地上部锌、铜和锰累积存在极显著正相关性,这与褚宏欣等^[28]研究结果基本一致。铜与锌在植物吸收过程中存在协同作用。因为在高铜土壤中,高浓度铜会抑制土壤颗粒对锌的吸附,增加其有效性,从而促进作物锌累积^[29]。Adamczyk-Szabela等^[30]试验发现,土壤中添加硝酸铜会使罗勒地上部锰含量增加。Ondo等^[31]研究发现,土壤中添加铜对玫瑰茄叶组织中锰的吸收具有协同作用。

4 结 论

为明确洱海流域茼蒿笋地上部微量元素累积特征,探究土壤肥力因子对其累积的影响机制,以云南省大理州洱海流域茼蒿笋生产区为研究区域,通过调研取样,探究洱海流域茼蒿笋地上部微量元素累积特征及其与土壤肥力因子的相关性。主要结论如下:

1)洱海流域茼蒿笋生产区土壤整体呈中性偏酸水平,有机质、有效磷、有效铁、有效铜及有效锌的平均含量均达到一级水平,养分供应充足;有效锰含量平均达到三级水平,养分供应适中。其中,有效锌含量变异系数最大,土壤养分空间分布不均特征明显;

2)茼蒿笋茎肉是生物量积累核心部位。不同部位对微量元素富集能力差异显著,铁、锰主要富集在衰老叶,锌在新叶中含量最高,铜在茎肉和衰老叶中含量较高;茎肉因生物量优势成为锌和铜的主要累积部

位,各部位累积分布受生物量、元素含量及生理功能共同调控。莴笋地上部铁、锰、铜、锌累积量均呈现高变异特征,生产中存在养分供应不均衡问题;

3)洱海流域莴笋微量元素的累积受土壤磷素抑制效应较弱,而元素间交互作用更为显著。铁累积量与土壤有效磷、有效锌含量显著负相关;锌累积量与土壤有效磷、有效铜含量显著正相关;铜累积量与土壤有效铁、有效铜含量显著正相关;锰累积量与土壤有效铜含量极显著正相关;

4)结合洱海流域莴笋生产区土壤肥力分级标准以及菜地磷阈值指标,建议通过测土配方施肥,将当地土壤有效磷调控在20~40 mg/kg,平衡磷肥与微量元素肥料的投入,既可减少磷素过量引发的环境风险,又能提升莴笋矿质营养品质。

参考文献 References

- [1] 陆景陵, 胡霭堂. 植物营养学[M]. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003
Lu J L, Hu A T. *Plant Nutrition*[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2003 (in Chinese)
- [2] Lilay G H, Thiébaud N, du Mee D, G. L. Assunção A, Schjoerring J K, Husted S, Persson D P. Linking the key physiological functions of essential micronutrients to their deficiency symptoms in plants[J]. *New Phytologist*, 2024, 242(3): 881-902
- [3] Pinto E, Almeida A, Aguiar A, Ferreira I. M. P. L. V. O. Changes in macrominerals, trace elements and pigments content during lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth: Influence of soil composition[J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 603-611
- [4] 赖进红, 罗兴华, 苏玉柱, 马驰. 洱海流域耕地土壤养分分析与管理[J]. 农业与技术, 2018, 38(12): 10, 12
Lai J H, Luo X H, Su Y Z, Ma C. Analysis and management of soil nutrients in cultivated land in the Erhai Basin[J]. *Agriculture and Technology*, 2018, 38(12): 10, 12 (in Chinese)
- [5] 于文睿南, 潘畅, 郭佳欢, 冯会丽, 陈杰, 俞元春. 杉木人工林表土有机质含量及其对土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(11): 1931-1939
Yu W R N, Pan C, Guo J H, Feng H L, Chen J, Yu Y C. Topsoil organic matter and its effect on the soil nutrients contents of *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(11): 1931-1939 (in Chinese)
- [6] Kaschl A, Römhild V, Chen Y. Cadmium binding by fractions of dissolved organic matter and humic substances from municipal solid waste compost[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6): 1885
- [7] Dumat C, Quenea K, Bermond A, Toinena S, Benedetti M F. Study of the trace metal ion influence on the turnover of soil organic matter in cultivated contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(3): 521-529
- [8] Ren Z L, Tella M, Bravin M N, Comans R N J, Dai J, Garnier J M, Sivry Y, Doelsch E, Straathof A, Benedetti M F. Effect of dissolved organic matter composition on metal speciation in soil solutions [J]. *Chemical Geology*, 2015, 398: 61-69
- [9] 夏凡, 王永东, 郑子成, 李廷轩, 廖桂堂, 刘涛, 张锡洲. 小尺度下茶园土壤有效态微量元素空间变异特征及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1047-1054
Xia F, Wang Y D, Zheng Z C, Li T X, Liao G T, Liu T, Zhang X Z. Spatial variability of soil microelements in a small scale tea garden and the influencing factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(6): 1047-1054 (in Chinese)
- [10] Hirsch J, Marin E, Floriani M, Chiarenza S, Richaud P, Nussaume L, Thibaud M C. Phosphate deficiency promotes modification of iron distribution in *Arabidopsis* plants[J]. *Biochimie*, 2006, 88: 1767-1771
- [11] Ward J T, Lahner B, Yakubova E, Salt D E, Raghothama K G. The effect of iron on the primary root elongation of *Arabidopsis* during phosphate deficiency[J]. *Plant Physiology*, 2008, 147: 1181-1191
- [12] Conversa G, Miedico O, Chiaravalle A. E, Elia A. Heavy metal contents in green spears of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) grown in Southern Italy: Variability among farms, genotypes and effect of soil mycorrhizal inoculation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256: 108559
- [13] Akca H, Taskin M B, Gunes A, Inal A. The effect of phosphorus fertilizer under the influence of iron and zinc treatments on nutrient content and lettuce yield[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2024, 47(5): 750-761
- [14] 黄燕, 陈国坤, 唐伯惠, 段兴武, 温庆可, 刘宇呈, 王颖. 洱海流域常用非同源 LULC 产品一致性分析和精度评估[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 235-247
Huang Y, Chen G K, Tang B H, Duan X W, Wen Q K, Liu Z C, Wang Y. Consistency analysis and accuracy evaluation of commonly-used non-homologous LULC products in Erhai Lake Basin of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(23): 235-247 (in Chinese)
- [15] 江永成, 胡家琴, 张琼, 罗玉红, 张珍明. 云贵高原茶园土壤养分状况及其对茶叶品质的影响[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(5): 1451-1458
Jiang Y C, Hu J Q, Zhang Q, Luo Y H, Zhang Z M. Soil nutrient status in tea gardens on the Yunnan-Guizhou Plateau and their effects on tea quality [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(5): 1451-1458 (in Chinese)
- [16] NY/T 391-2021, 绿色食品产地环境质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
NY/T 391-2021, Environmental Quality of Green Food Production Areas [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021 (in Chinese)
- [17] NY/T 942-2006, 莴苣莴苣等级规格[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
NY/T 942-2006, Grade and specifications of lettuce[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006 (in Chinese)
- [18] Truc H P, Ngoc V B, Ngoc B T, Truong L T H. Accumulation and distribution of nutrients, radionuclides and metals by roots, stems and leaves of plants[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2023, 55(7): 2650-2655
- [19] Gupta N, Ram H, Kumar B. Mechanism of zinc absorption in plants: Uptake, transport, translocation and accumulation [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2016, 15(1): 89-109
- [20] Asikin A Z, Hoon L L, Faizah M. Comparative assessment of the heavy metal phytoextraction potential of vegetables from agricultural soils: A field experiment[J]. *Heliyon*, 2023, 9(2): e13547
- [21] 王小丽. 小麦对 Fe、Zn、Pb、Cu 吸收分配特性的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2009
Wang X L. Fe, Zn, Pb, Cu absorption and distribution in wheat [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009 (in Chinese)
- [22] U. S. department of agriculture, Agricultural Research Service. "Food Nutrient Data for [celtuce, leaf, red, raw]." FoodData Central[DB/OL]. [2025-05-12]. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/2346390/nutrients>
- [23] Subramani M, Duraiaj J, Thiagarajan C, Muthumani J. Synthesis of iron

- chelates for remediation of iron deficiency in an alkaline and calcareous soil [J]. *Journal of Applied & Natural Science*, 2021, 13: 149-155
- [24] Ondrasek G, Rengel Z. The role of soil organic matter in trace element bioavailability and toxicity [J]. *Abiotic Stress Responses in Plants*, 2012, 403-423
- [25] Wang Y, Cui Y T, Wang K X, He X Y, Dong Y H, Li S J, Wang Y X, Chen H Y, Yang X P, Zhang W. The agronomic and environmental assessment of soil phosphorus levels for crop production: A meta-analysis [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(2): 35
- [26] Yang X Q, Liu C, Liang C Y, Wang T Q, Tian J. The phosphorus-iron nexus: Decoding the nutrients interaction in soil and plant [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(13): 6992
- [27] Chen X X, Zhang W, Yu Q W, Liu Y M, Liu D Y, Zou C Q. Zinc nutrition of wheat in response to application of phosphorus to a calcareous soil and an acid soil [J]. *Plant and Soil*, 2019, 434(1/2): 139-150
- [28] 褚宏欣, 党海燕, 王涛, 孙蕊卿, 侯赛宾, 黄倩楠, 李小涵, 王朝辉, 黄婷苗. 我国主要麦区土壤有效铁锰铜锌丰缺状况评价及影响因素 [J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 129-139
- Chu H X, Dang H Y, Wang T, Sun R Q, Hou S B, Huang Q N, Li X H, Wang Z H, Huang T M. Evaluations and influencing factors of soil available Fe, Mn, Cu and Zn concentrations in major wheat production regions of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 129-139 (in Chinese)
- [29] Abou Seeda M A, Abou El-Nour E A A, Yassen A A, Gad Mervat M, Sahar M Z. Interaction of copper, zinc, and their importance in plant physiology: review, acquisition and transport [J]. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 2020, 10(3): 407-434
- [30] Adamczyk-Szabela D, Wolf W M. The influence of copper and zinc on photosynthesis and phenolic levels in Basil (*Ocimum basilicum* L.), Borage (*Borago officinalis* L.), Common Nettle (*Urtica dioica* L.) and Peppermint (*Mentha piperita* L.) [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(7): 3612
- [31] Ondo J, Prudent P, Menye Biyogo R, Domeizel M, Vassalo L, Eba F. Effects of Cu and Zn supplementation on metal uptake by Hibiscus sabdariffa [J]. *Research Journal of Chemical Sciences*, 2012, 2(11): 45-50
- 责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 黄琪, 中国农业大学资源与环境学院资源利用与植物保护专业硕士研究生。2022—2023 学年获得中国农业大学硕士二等学业奖学金。硕士研究生期间参与云南省重大科技专项 (202202AE090034)、国家自然科学基金 (32360792) 等项目。



通讯作者简介: 邹春琴, 中国农业大学资源与环境学院教授, 博士生导师。主要从事微量元素营养与人体健康、作物生理学研究。先后主持国家自然科学基金项目 8 项; 参与国家重点研发计划、科技部 973 项目及省部级课题 10 余项。在 *New Phytologist*、*Global Food Security* 等期刊发表论文 90 余篇。