

浙江油茶产地土壤和果实金属元素含量特征

屈明华¹, 陈雄弟², 倪张林¹, 莫润宏¹, 韩素芳³, 汤富彬^{1*}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 国家林业和草原局经济林产品质量检验检测中心(杭州), 杭州 311400; 2. 青田县林业局, 浙江 丽水 323900; 3. 浙江省林业科学研究院, 杭州 310023)

摘要: 为探讨油茶(*Camellia oleifera*)产地土壤和油茶果实中金属元素分布和富集特征, 在油茶果实成熟期, 对浙江 5 个油茶产地土壤及油茶果实中金属元素进行污染分析和富集能力评价。结果表明, 浙江油茶产地土壤中 Pb、Cr、Cd、As、Hg、Ni、Cu 和 Zn 含量低于农用地土壤污染风险筛选值, 综合污染等级为安全。个别产区常山县土壤中 As、Ni、Cu 和江山土壤中 Pb、Cr、Fe 含量显著高于其他产地; 常山和建德土壤中 Cd 单因子污染指数分别为 0.93 和 0.81, 处于污染警戒线。Cr、Ni、Cu、Zn 主要分布在油茶籽中, Hg 主要分布在壳中, Pb、Cd、As、Fe 和 Mn 主要分布在青皮中。油茶籽中 Cu、Fe、Mn 的富集系数大于 0.4, 吸收能力强, Ni、Zn 的富集系数小于 0.4, 具有一定吸收能力, Pb、Cr、Cd、As 和 Hg 的富集系数小于 0.1, 吸收能力低; 壳中 Cu、Mn 的富集系数大于 0.4, 吸收能力强, Fe 的富集系数小于 0.4, 具有一定吸收能力, Pb、Cr、Cd、As、Hg、Ni、Zn 的富集系数小于 0.1, 吸收能力低; 青皮中 Cu、Fe、Mn 的富集系数大于 0.4, 吸收能力强, Pb、Cr、Cd、As、Hg、Ni、Zn 的富集系数小于 0.1, 吸收能力低。浙江油茶主产区土壤质量安全, 适合油茶种植。油茶果实对 Cu、Fe、Mn 有一定富集能力, 对 Pb、Cr、Cd、As 和 Hg 无富集能力。

关键词: 油茶; 金属元素; 土壤; 富集系数; 浙江

doi: 10.11926/jtsb.4285

Characteristics and Distributions of Metal Elements in *Camellia oleifera* Fruits and Soil in Production Areas of Zhejiang Province

QU Ming-hua¹, CHEN Xiong-di², NI Zhang-lin¹, MO Run-hong¹, HAN Su-fang³, TANG Fu-bin^{1*}

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Quality Testing Center for Edible Forest Products of State Forestry Administration (Hangzhou), Hangzhou 311400, China; 2. Forestry Department of Qingtian, Lishui 323900, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: To study the distribution and enrichment characteristics of metal elements in fruits of *Camellia oleifera* and planting soil, the assessment of eight heavy metals (Pb, Cr, Cd, As, Hg, Ni, Cu and Zn) and its enrichment capacity were studied in main production areas of Zhejiang province during the maturity period. The results showed that the contents of all measured metals in the soils were lower than the risk screening values of GB 15618-2018. The levels of As, Ni and Cu in soils of Changshan County, and the levels of Pb, Cr and Fe in soils of Jiangshan County were significantly higher than the values in other areas. The single-factor pollution index of Cd in Changshan and Jiande soils were 0.93 and 0.81 respectively, which were at the pollution cordon. Cr, Ni, Cu and Zn were mainly found in the seed, and Hg was mainly found in shell, and Pb, Cd, As, Fe and Mn were mainly found in the green peel. The enrichment coefficients of Cu, Fe and Mn in seed are greater than 0.4, indicating its

收稿日期: 2020-09-08 接受日期: 2020-12-17

基金项目: 浙江省基础公益研究项目(LGN18B070002); 浙江省农业(林业)新品种选育重大科技专项(2016C02056-6)资助

This work was supported by the Project for Nonprofit Research in Zhejiang Province (Grant No. LGN18B070002), and the Project for Major Science and Technology on Agricultural (Forestry) New Variety Breeding in Zhejiang (Grant No. 2016C02056-6).

作者简介: 屈明华(1978~), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事分析检测工作。E-mail: quminghua2002@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: tfb22@163.com

high absorption capacity of these metals, while enrichment coefficients of Ni, Zn less than 0.4, and enrichment coefficients of Pb, Cr, Cd, As, Hg, Ni, and Zn less than 0.1. The enrichment coefficients of Cu and Mn in shell are greater than 0.4, indicating its high absorption capacity of these metals, while enrichment coefficients of Fe less than 0.4, and enrichment coefficients of Pb, Cr, Cd, As, Hg, Ni, and Zn less than 0.1. The enrichment coefficients of Cu, Fe and Mn in the green peel were greater than 0.4, indicating its strong absorption capacity, while the enrichment coefficients of Pb, Cr, Cd, As, Hg, Ni and Zn were less than 0.1. The *camellia oleifera* fruit have middle enrichment ability of some transition metal (Cu, Fe, and Mn), and have week enrichment ability of Pb, Cr, Cd, As and Hg.

Key words: *Camellia oleifera*; Metal element; Soil; Enrichment coefficient; Zhejiang

油茶(*Camellia oleifera*)是我国特有木本油料树种,油茶籽中提取的茶油脂肪酸组成类似橄榄油,有“东方橄榄油”之称^[1]。茶油不饱和脂肪酸含量高达 90%,具较高含量的维生素 E、角鲨烯和黄酮类物质,能预防高血压和心脑血管疾病,延缓衰老,增强人体免疫力^[2]。联合国粮农组织(FAO)将茶油作为重点推广的健康型高级食用油,国务院对食用油发展极为重视,明确提出要大力推动油茶产业发展^[3]。

在大力发展油茶产业背景下,为促进茶株生长,提高产量,有关良种选育^[4]、土壤养分与种仁含油率相关性^[2,5]、施肥对油茶生长的影响^[6]等方面的研究开展较多。然而随着城市化进程加剧,工业迅速发展,有的森林土壤已表现出明显重金属污染,广州市机场高速林带土壤中 As、Pb 和 Cd 超标,广深铁路林带土壤中 Cd 超标^[7];长沙市森林土壤重金属含量增加,Zn、Cu、Ni、Pb 和 As 为轻微危害程度,Cd、Hg 达中等危害程度以上^[8];浙江杨梅园土壤 Zn 污染指数处于警戒水平^[9]。油茶产业从粗放到规模化经营,种植面积扩大,人为干扰程度加剧。低产林改造是推动油茶产业发展的重要一步^[10],新型生物肥料、有机复合肥料量化投入油茶林地,在提高油茶籽产量上发挥了重要作用,但油茶林地和油茶籽金属元素变化和富集状况的研究报道较少。油茶属于金属富集型植物,对 Mn、Pb、Zn、Cd 和 Cu 元素的转移系数大于 1,油茶中金属元素 Mn、Pb 和 Cd 含量相对较高,主要分布在地上部分^[11];Cd 在油茶果仁中的富集系数最高^[12];油茶籽毛油中检出 Pb、Cd^[13];散装茶油中 Pb 含量 $[(0.105 \pm 0.005) \text{ mg/kg}]$ 在标准限量 $(\leq 0.1 \text{ mg/kg})$ 附近,且 Mn 含量特别高^[14]。通过压榨或浸提方式提取油茶籽油,籽肉和壳中的 Cd 会转移到茶油中,Cr 在压榨油中转移更明显,籽肉中的 Hg 也会转移

至茶油中^[1]。此外,油脂中微量金属离子是加速油脂氧化的催化剂^[15],Co、Mn、Pb、Cu 会大大提高植物油酸败速度^[16]。Cu、Fe 加入量为 0.12 和 9.00 mg/kg,油的催化氧化诱导时间减少一半,Cu 催化氧化油脂的效率显著高于 Fe^[17],也有研究表明 Fe 和 Sn 对植物油热稳定性具有负面影响^[18]。油茶籽中一旦富集较多有毒有害重金属会对油茶籽油造成质量安全风险,而较高的变价金属元素含量会影响油茶籽油贮存期限,易引发油脂酸败。

油茶属于金属富集型植物,且在茶油毛油和散装茶油中都有金属元素检出,其引入途径有可能来源于原料生产、压榨或浸出、精炼、储运等环节^[19]。本研究对浙江油茶主产区土壤和油茶果实中的金属元素分布和富集特征进行分析,探讨浙江油茶产地土壤金属元素分布状况和油茶果实金属元素富集特征,为油茶的安全种植和油茶籽油安全生产提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

根据浙江省油茶种植情况,在常山县、江山县、缙云县、青田县和建德县 5 个主产区采集油茶果实和土壤样品。常山样地的海拔 300 m,山地,油茶林龄 10 a,增施化肥;江山样地的海拔 450 m,山地,油茶林龄 20 a,不施肥;缙云样地的海拔 809 m,高山,油茶林龄 15 a,增施化肥;青田样地的海拔 658 m,高山,油茶林龄 15 a,不施肥;建德样地的海拔 208 m,山地,油茶林龄 30 a,不施肥。土壤基本性质见表 1。

1.2 布点和样品采集

采样时间为 2018 年 10 月油茶果实成熟期,每

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of experimental soil

产区 Producing area	pH	TN (g/kg)	TP (g/kg)	有机质 (g/kg) Organic matter	水解氮 (mg/kg) Hydrolyzable N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
常山 Changshan	5.61	2.40	1.01	36.38	195.67	33.59	135.10
江山 Jiangshan	4.68	1.34	0.23	27.56	113.90	2.56	64.51
缙云 Jinyun	4.56	1.94	0.66	38.65	150.85	58.97	208.06
青田 Qingtian	5.09	1.66	0.19	35.60	161.12	3.97	80.24
建德 Jiande	4.78	2.61	0.32	53.36	222.94	7.72	115.25

个主产区设 10 个采样点, 同步采集与土壤样品对应的油茶植株上成熟油茶果实样品。采用“S”形布点采样, 每个采样点采集 5 个 0~30 cm 深土样混合成 1 个样品, 带回实验室风干、研磨, 过筛^[20], 共 50 份土壤样品。每个采样点采集 5 株油茶, 在树冠顶部、内膛和树冠周围采集成熟果实 12 个, 共 60 个果实组成 1 个混合样品^[21], 共 50 份油茶果实样品。

1.3 样品测定

风干土样过 0.149 mm 土壤筛, Pb、Cd 含量按照 GB/T 17141-1997《土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》测定, Cr、Ni、Cu、Zn 含量按照 HJ 491-2019《土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》测定, As 和 Hg 含量按照 NY/T 1121.11-2006《土壤检测: 土壤总砷的测定》和 NY/T 1121.10-2006《土壤检测: 土壤总汞的测定》测定, Fe 和 Mn 含量按照 LY/T 3129-2019《森林土壤铜、锌、铁、锰全量的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》测定; 油茶果实分为籽、壳和青皮 3 部分, 105℃杀青 15 min, 80℃烘干后粉碎, 金属含量按照 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》测定。

1.4 金属元素污染评价

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对油茶产地土壤金属元素污染程度进行评价。

$P_i = C_i / S_i$; $P_{综合} = \sqrt{(P_{imax}^2 + P_{iave}^2) / 2}$, 式中 C_i 为金属元素 i 的实测含量, S_i 为金属元素 i 的风险筛选值, 以 GB 15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》中的农用地土壤污染风险筛选值为评价标准; P_{imax} 为单因子污染指数最大值, P_{iave} 为单因子污染指数平均值。单因子污染指数(P_i)用来评价样品中单一元素污染水平, 当 $P_i \leq 1$ 代表清洁

无污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示有轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示中度污染, $P_i \geq 3$ 为重污染; 综合污染指数($P_{综合}$)用来评价采样点样品的金属综合污染水平, 当 $P_{综合} \leq 0.7$ 时土壤环境质量为 1 级, 属安全级, 表示清洁; $0.7 < P_{综合} \leq 1$ 为 2 级, 处于警戒级, 表示尚清洁; $1 < P_{综合} \leq 2$ 为 3 级, 处于轻污染, 表示土壤污染物超过背景值; $2 < P_{综合} \leq 3$ 为 4 级, 属中污染, 土壤、作物均受到中度污染; $P_{综合} > 3$ 为 5 级, 处于重污染, 土壤、作物污染程度很严重^[22-23]。

富集系数 = 植物的金属富集量/土壤中金属含量, 木本植物的富集系数大于 0.4 被认定为吸收土壤金属能力强; 0.1~0.4 有一定吸收能力; 小于 0.1 为吸收能力低^[24]。

1.5 数据的统计分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理和分析, 采用 LSD 多重比较法进行差异显著性检验, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果和分析

2.1 油茶产地土壤环境质量分析

浙江油茶主产区常山县土壤中 Cd、As、Hg、Ni 和 Cu 含量高于其余产地, As、Ni 和 Cu 含量与其余产地的差异显著, 与浙江省土壤金属元素背景值^[25]比较, Cr、Cd、As、Ni、Cu 和 Zn 分别提高了 10%、64%、256%、50%、40%和 14%, Pb、Hg、Fe 和 Mn 含量低于背景值。江山县土壤中 Pb、Cr、Zn 和 Fe 含量高于其余产地, Pb、Cr 和 Fe 含量与其余产地的差异显著, 与背景值比较, Pb、Cr、As、Ni、Zn 和 Fe 分别提高了 14%、45%、7%、23%、14%和 37%, Cd、Hg、Cu 和 Mn 含量低于背景值。缙云县土壤 As 含量较背景值提高了 13%、Zn 提高了 4%; 建德县土壤 Cd 含量较背景值提高了 44%、As 提高了 3%; 缙云县、建

德县和青田县土壤中其余金属元素含量均低于背景值。浙江油茶主产区土壤中 Pb、Cr、Cd、As、Hg、Ni、Cu 和 Zn 含量分别为 27.72~40.74、32.38~81.24、0.06~0.28、4.72~24.53、0.04~0.10、15.54~35.79、13.95~31.66 和 64.88~94.75 mg/kg, 均在土

壤污染风险管控范围内。Pb、Cr、Cd、As、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 32.16、52.93、0.17、10.30、18.90 和 83.53 mg/kg, 与浙江台州油茶基地^[26]土壤的相近, 说明浙江油茶主产区土壤金属元素本底大致相同(表 2)。

表 2 油茶产地土壤金属元素含量(mg/kg)和单因子污染指数(P_i)

Table 2 Contents of metal elements (mg/kg) in soil and single-factor pollution index (P_i)

元素 Element	产区 Producing area					平均 Mean	浙江省背景值 Background value in Zhejiang	风险值 Risk value
	常山 Changshan	江山 Jiangshan	缙云 Jinyun	青田 Qingtian	建德 Jiande			
Pb	28.79 ±5.72bc	40.74 ±1.81a	30.09 ±2.06bc	27.72 ±3.57c	33.46 ±4.55b	32.16	35.70	70
P_i	0.41	0.58	0.43	0.40	0.48	0.46		
Cr	61.62 ±6.53b	81.24 ±2.34a	49.67 ±2.45c	32.38 ±2.40e	39.72 ±7.55d	52.93	55.99	150
P_i	0.41	0.54	0.33	0.22	0.27	0.35		
Cd	0.28 ±0.05a	0.13 ±0.03b	0.06 ±0.02c	0.15 ±0.04b	0.24 ±0.03a	0.17	0.17	0.3
P_i	0.93	0.43	0.20	0.50	0.81	0.58		
As	24.53 ±8.44a	7.38 ±1.28b	7.77 ±0.45b	4.72 ±1.96b	7.11 ±3.93b	10.3	6.88	40
P_i	0.61	0.19	0.19	0.12	0.18	0.26		
Hg	0.10 ±0.03a	0.05 ±0.02b	0.06 ±0.02b	0.04 ±0.02b	0.09 ±0.01a	0.07	0.17	1.3
P_i	0.08	0.04	0.04	0.03	0.07	0.05		
Ni	35.79 ±4.66a	29.53 ±3.02b	21.13 ±1.07c	15.54 ±1.36d	18.16 ±4.82cd	24.03	23.93	60
P_i	0.60	0.49	0.35	0.26	0.3	0.40		
Cu	31.66 ±3.36a	18.58 ±1.25b	13.95 ±1.36c	15.06 ±2.03c	15.24 ±2.37c	18.90	22.63	50
P_i	0.63	0.37	0.28	0.30	0.3	0.38		
Zn	94.53 ±33.39a	94.75 ±9.46a	86.50 ±12.31ab	64.88 ±3.01b	77.01 ±8.20ab	83.53	83.06	200
P_i	0.47	0.47	0.43	0.33	0.39	0.42		
Fe	25.15 ±4.23b	39.12 ±0.48a	24.96 ±0.42b	23.16 ±1.59bc	19.98 ±3.41c	26.47	28.56	
Mn	144.71 ±41.61b	481.31 ±211.47a	464.84 ±146.66a	530.18 ±219.75a	543.00 ±265.30a	432.81	620.51	

同行数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Data followed different letters in the same line indicate significant difference at 0.05 level.

油茶产地金属元素的平均单因子污染指数为 $Cd > Pb > Zn > Ni > Cu > Cr > As > Hg$, 常山土壤中 Cd、As、Ni 和 Cu 单因子污染指数分别为 0.93、0.61、0.60 和 0.63, 江山土壤中 Pb 和 Cr 单因子污染指数分别为 0.58 和 0.54, 建德土壤中 Cd 单因子污染指数为 0.81, 常山和建德土壤中 Cd 处于污染警戒线($P_i > 0.70$ ^[9]); 其余金属元素单因子污染指数均小于 0.5, 油茶产地土壤中 Pb、Cr、Cd、As、Hg、Ni、Cu 和 Zn 含量均小于农用地土壤污染风险筛选值, 单因子污染等级为清洁; 综合污染指数 $P_{综合} = 0.48 < 0.7$, 综合污染等级为安全, 浙江油茶主产区土壤质量整体状况为清洁安全。

2.2 油茶果实金属元素的分布特征

有毒有害重金属 Pb、Cr、Cd、As 和 Hg 在油茶籽、壳和青皮中含量均低于 1 mg/kg, 变价金属元素 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量较高。油茶籽中 Cr、

Ni、Cu 和 Zn 含量(分别为 0.805、4.370、15.502 和 15.702 mg/kg)均高于壳(分别为 0.463、0.682、13.703 和 4.923 mg/kg)和青皮(分别为 0.411、1.602、8.971 和 7.461 mg/kg); 青皮中 Pb (0.313 mg/kg)略高于籽 (0.277 mg/kg)和壳(0.184 mg/kg); Cd、As 和 Hg 在籽、壳和青皮中的含量接近检出限。Mn 在油茶果实中含量最高, 籽、壳和青皮中分别为 282.013、260.325 和 790.652 mg/kg (表 3)。

重金属元素含量在采样点间的变异系数能够反映元素受到人为因素干扰的程度和空间分布情况, 变异系数越大, 表明受到的干扰因素越多, 空间分布越不均匀^[27]。常山和江山油茶果实中 Pb 含量较高, 缙云、青田和建德油茶果实中未检出或较低, Pb 含量的变异系数为 2.32, 说明不同产地油茶果实对 Pb 吸收的差异性较大。江山土壤 Pb 含量高于背景值并显著高于其余产地(表 2), 土壤环境不同,

造成果实对 Pb 富集程度不同, 从而造成较大变异系数。油茶籽、青皮的 Cd、As 含量变异系数超过 2.00, 个别产地样品未检出和低含量造成变异系数偏大。油茶籽、壳、青皮中相对较高的 Ni、Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量在不同产地间的变异系数小于 1, 说明油茶产地这些金属元素性质稳定, 来源单一, 油茶果实对其吸收在不同产地的差异性较小。

油茶籽中有害金属元素检出率为 Cr>Pb>Cd=As>Hg,Cr 在 5 个主产区油茶籽中检出率为 100%,

Pb 为 52%, Cd、As 为 8%, Hg 为 0。Cr 在 5 个主产区壳中检出率为 100%, Pb 为 88%, Hg 为 76%, Cd和As为0。Pb和Cr在青皮中检出率为100%, Cd、As 和 Hg 检出率分别为 24%、44%和 64%。Pb 在油茶籽中有一定分布, Cr 在油茶籽、壳和青皮中普遍分布, Cd、As 和 Hg 在油茶籽中分布最低, 这 5 种金属元素在青皮中普遍分布, 而壳分布略低。油茶籽、壳和青皮对 Ni、Cu、Zn、Fe 和 Mn 具有普遍分布特征, 检出率为 100%。

表 3 油茶果实中的金属元素含量(mg/kg)
Table 3 Contents of metal elements (mg/kg) in *Camellia* fruits

元素 Element	部位 Part	平均 Mean	变异系数 Coefficient of variation	检出率 /% Detection rate	元素 Element	部位 Part	平均 Mean	变异系数 Coefficient of variation	检出率 /% Detection rate
Pb	籽 Seed	0.277	2.32	52	Ni	籽 Seed	4.370	0.36	100
	壳 Shell	0.184	1.39	88		壳 Shell	0.682	0.50	100
	青皮 Pell	0.313	0.61	100		青皮 Pell	1.602	0.35	100
Cr	籽 Seed	0.805	1.06	100	Cu	籽 Seed	15.502	0.87	100
	壳 Shell	0.463	1.10	100		壳 Shell	13.703	0.50	100
	青皮 Pell	0.411	0.54	100		青皮 Pell	8.971	0.68	100
Cd	籽 Seed	0.001	3.47	8	Zn	籽 Seed	15.702	0.43	100
	壳 Shell	ND	0.00	0		壳 Shell	4.923	0.66	100
	青皮 Pell	0.012	2.18	24		青皮 Pell	7.461	0.45	100
As	籽 Seed	0.002	3.00	8	Fe	籽 Seed	14.112	0.33	100
	壳 Shell	ND	0.00	0		壳 Shell	6.552	0.36	100
	青皮 Pell	0.008	3.60	44		青皮 Pell	15.803	0.75	100
Hg	籽 Seed	ND	0.00	0	Mn	籽 Seed	282.013	0.62	100
	壳 Shell	0.002	1.25	76		壳 Shell	260.325	0.45	100
	青皮 Pell	0.001	0.93	64		青皮 Pell	790.652	0.52	100

ND: 未检出; Pb、Cd、As 和 Hg 的检出限分别为 0.002、0.001、0.001 和 0.001 mg/kg。
ND: Not detected. The detection limits of Pb, Cd, As and Hg are 0.002, 0.001, 0.001 and 0.001 mg/kg, respectively.

2.3 油茶果实对金属元素的富集能力

富集系数反映了植物对土壤金属元素累积能力, 富集系数越大, 植物对金属元素累积能力越强, 富集系数越小, 植物对金属元素累积能力越弱, 抗土壤金属污染能力越强^[28]。油茶籽对金属元素的富集系数为Cu>Mn>Fe>Ni>Zn>Cr>Cd>Pb>Hg>As, Cu 和 Mn 的富集系数为 0.88 和 0.82, 与其余元素间差异显著, Fe 的富集系数为 0.53, 油茶籽对 Cu、Mn 和 Fe 的吸收能力强; Ni、Zn 的富集系数为 0.21 和 0.20, 油茶籽对这 2 种元素具有一定的吸收能力; Pb、Cr、Cd、As 和 Hg 的富集系数小于 0.02, 油茶籽对这 5 种重金属元素吸收能力低(图 1: A)。油茶壳对金属元素的富集系数为 Cu>Mn>Fe>Zn>Ni>Hg>Cr>Cd>Pb>As, Cu 和 Mn 的富集系数为 0.79

和 0.77, 与其余元素的差异显著, 油茶壳对 Cu 和 Mn 的吸收能力强; Fe 的富集系数为 0.26, 油茶壳对其具有一定吸收能力; 另外 7 种金属元素的富集系数均小于 0.1, 油茶壳对这 7 种金属元素吸收能力低, 其中 Pb、Cr、Cd、As 间, Zn 和 Ni 及 Ni 和 Hg 间的差异不显著(图 1: B)。油茶青皮对金属元素富集系数为 Mn>Fe>Cu>Zn>Ni>Cd>Hg>Pb>Cr>As, Mn 的富集系数为 2.26, 与其余元素间差异显著, 油茶青皮对 Mn 具有超富集能力; Fe 和 Cu 的富集系数为 0.65 和 0.47, 油茶青皮对这 2 种金属元素吸收能力强; 油茶青皮对 Pb、Cr、Cd、As、Hg、Ni 和 Zn 金属元素吸收能力低, 其中 Pb、Cr、As 间, Zn 和 Ni 及 Ni、Cd 和 Hg 间的差异不显著(图 1: C)。油茶籽、壳、青皮对 Cu、Fe 和 Mn 的富集系数均

远大于有毒有害重金属元素 Pb、Cr、Cd、As 和 Hg。油茶籽对 Cr、Ni、Cu、Zn 的富集系数均大于壳和青皮，Ni、Zn 的富集系数显著高于壳和青皮；油茶壳和青皮中 Hg 的富集系数显著高于籽，其余金属元素的富集系数介于籽和青皮之间；油茶青皮中

Pb、Cd、As、Fe 和 Mn 的富集系数大于籽和壳，青皮中 Mn、Cd 的富集系数显著高于籽和壳。油茶果实对 Cu 的富集系数表现为籽>壳>青皮，这与刘懿瑶^[27]的研究结果(种仁>种皮>果皮)一致(图 1: D)。

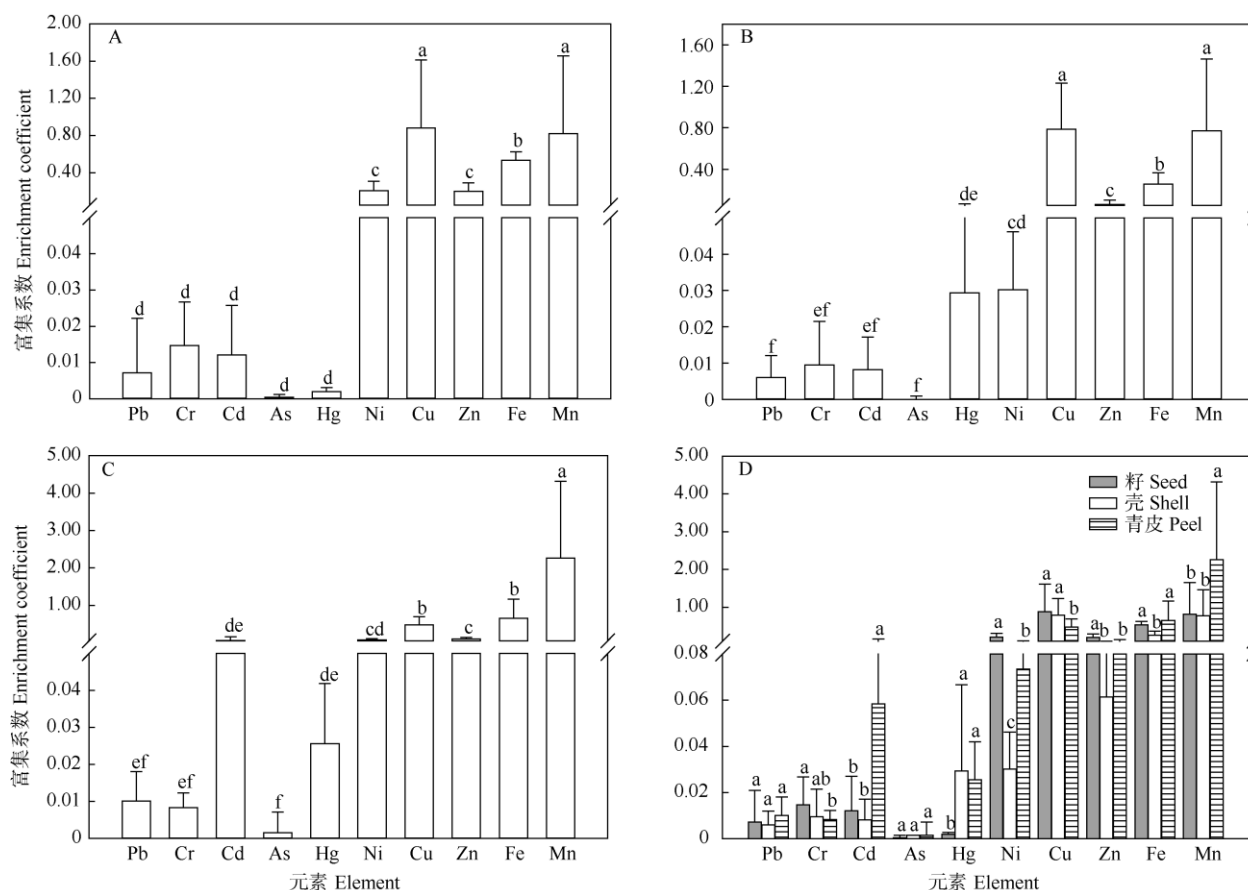


图 1 油茶果实金属元素富集系数。A: 籽; B: 壳; C: 青皮; D: 果实。柱上不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 1 Enrichment coefficient of metal elements in *Camellia oleifera* fruits. A: Seed; B: Shell; C: Peel; D: Fruit. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level.

3 结论和讨论

油茶是喜酸植物^[29]，浙江油茶主产区土壤呈酸性(pH 4.56~5.61)，金属元素 Pb、Cr、Cd、As、Hg、Ni、Cu 和 Zn 含量均在污染风险筛选值范围内，土壤质量清洁无污染，适宜油茶种植。然而个别产区，如常山土壤 Cd、As、Ni、Cu 和 Zn 含量较背景值提高，Cd 和 As 超过背景值的 50%，Cd、As、Ni 和 Cu 单因子污染指数大于 0.5，Cd 处于污染警戒线，具有污染风险；江山土壤的 Pb、Cr、As、Ni、Zn 和 Fe 含量超过背景值，Cr 和 Fe 含量超过背景值约 40%，Pb 和 Cr 单因子污染指数大于 0.5；建德

土壤的 Cd 和 As 较背景值提高，Cd 单因子污染指数处于污染警戒线，具有污染风险；缙云和青田土壤的金属元素含量接近或低于背景值。不同油茶林地具有污染风险的金属元素不同，贵州望谟县石屯镇油茶基地土壤个别采样点有轻微 Cd 污染^[30]，广东云浮市油茶土壤 Cu 污染程度最高^[31]，而浙江油茶个别产区土壤有 Cd 污染风险。尽管油茶属于金属富集型植物，但油茶籽中金属元素污染水平与其产地土壤金属元素的相关性研究鲜有报道，油茶品种、代谢能力、土壤性质、油茶籽成熟度等因素都有可能影响油茶籽对金属元素累积，土壤金属元素具有污染风险，油茶籽有可能无污染风险，而土壤

中没有污染风险的金属元素有可能易于在油茶籽中累积, 因此, 油茶果实金属元素与产地土壤金属元素相关性需深入研究。

Cr、Ni、Cu 和 Zn 主要分布于油茶籽中, Pb、Cd、As、Fe 和 Mn 主要分布于青皮中, Pb、Cd、As、Ni、Zn、Fe 和 Mn 在壳中分布最少, 这与曹永庆等^[32]的研究结果一致: 茶籽中 Cu、Zn 和 Fe 含量均高于壳。说明金属元素被油茶植株吸收后, 主要分布于种仁和青皮中, 而壳作为保护和养分转运组织, 金属元素分布较少。油料作物山核桃(*Carya cathayensis*)果仁中 Cu 含量显著高于 Pb、Cd 和 Hg^[33], Cr、Ni、Cu 和 Zn 含量远大于 Pb、Cd、As 和 Hg^[34], 与油茶籽中金属元素分布特征一致。唐瑞丽等^[35]的研究表明, 低浓度 Zn、Fe 能够加速大豆油氧化, 提高 *p*-茴香胺值, 增加挥发性醛类物质, 使油脂氧化酸败程度加深。油茶对 Pb、Cd、Cu、Zn^[36]和 Mn^[37]具有一定富集作用, 本研究表明油茶籽对 Cu、Fe 和 Mn 有强吸收能力, 对 Zn 有一定吸收能力, 油茶籽富集的变价金属元素在制取茶油过程中一旦迁移至茶油中, 易引起油脂酸败, 影响茶油品质安全。

油茶产地土壤质量清洁无污染, 但油茶果实对不同金属元素具有不同程度的富集: Cu、Fe 和 Mn 在油茶果实中为强富集, Ni 和 Zn 为一定富集, Pb、Cr、Cd、As 和 Hg 为低富集。植物对元素吸收和富集除取决于自身遗传学和生物学特征外, 气候、土壤养分丰富度和植物种类等因子也影响元素吸收, 元素间的相互作用也影响其吸收和富集。果实中金属元素间有可能具有协同作用, 土壤中无金属元素污染, 但金属元素有可能会随其他元素协同进入植物体, 进而在果实中富集。枸杞(*Lycium bararum*)果实产地土壤 Cd 含量未超过风险筛选值, 但枸杞果实中 Cd 含量与土壤中 Pb、La 含量呈极显著正相关, 与土壤中 Li 含量呈显著正相关, 果实中 Cd 含量会随着土壤中 Pb、La 和 Li 含量的增加而增加^[38]。中药材半夏(*Rhizoma pinelliae*)中 Zn 和 Se、Fe 和 Ni、Fe 和 Ca 具有协同吸收特点^[39]。油茶果实对 Cu、Fe 和 Mn 具有强富集性, 土壤 Cu 含量较 Fe 和 Mn 含量低, 而油茶果实对 Cu 的较强富集特性是否与元素协同吸收有关, 需进一步验证。常山、江山产地土壤 Pb 含量未超过风险筛选值, 但油茶果实 Pb 含量普遍偏高, 果实对 Pb 的富集是否与其他元素具有协同作用也需深入研究。

油茶籽不能直接食用, 通过压榨或浸提方式制取茶油, 这个过程中金属元素从茶籽到茶油的迁移程度需要深入探讨。湖南山茶油毛油中 Cd 含量为 0.012 mg/kg; 浙江衢州茶油毛油 Pb、Cr、Cd、As 和 Cu 含量分别为 0.034、0.040、0.009、0.019 和 0.092 mg/kg^[40-41], 本研究油茶籽中 Pb、Cr 和 Cu 含量分别为 0.277、0.805 和 15.502 mg/kg, 有可能这 3 种金属元素易于由油茶籽迁移至茶油中, 油茶籽中 Cd、As 含量接近 0.001 mg/kg, 而湖南和衢州茶油中 Cd、As 含量均超过了茶籽中的含量^[40-41], 是否提取茶油的过程造成金属元素的迁移富集? 油茶籽易于富集金属元素 Fe 和 Mn, 这 2 种元素是否也易于迁移至茶油中, 从而对茶油造成质量安全或贮存风险, 还有待深入研究。

参考文献

- [1] JIANG B Y, CHAI Z L, ZHOU K K, et al. Relation of heavy metal migration between *Camellia* oil and *Camellia* oil under different process of making [J]. J Chin Cereal Oil Assoc, 2019, 34(6): 81–85, 91. 蒋步云, 柴振林, 周侃侃, 等. 不同制取工艺下油茶籽与油茶籽油中重金属迁移关系的研究 [J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 81–85, 91.
- [2] LIU J, WU L C, CHEN D, et al. Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China [J]. Appl Soil Ecol, 2017, 113: 29–35. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.01.010.
- [3] State Forestry Administration. National development plan of *Camellia oleifera* Abel. industry (2009–2020) [Z]. 2009. 国家林业局. 全国油茶产业发展规划(2009–2020 年) [Z]. 2009.
- [4] XI R C, DENG X M, GONG C, et al. Studies on selecting and breeding of high linoleic acid content and high oil yield oiltea camellia clones [J]. For Res, 2006, 19(2): 158–164. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2006.02.006. 奚如春, 邓小梅, 龚春, 等. 高亚油酸含量油茶优良无性系的选育 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 158–164. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2006.02.006.
- [5] LIU W, CHEN S P, CHEN H, et al. Study on corelation between soil nutrient and yield and oil content of *Camellia oleifera* [J]. J CS Univ For Technol, 2015, 35(3): 59–63. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.03.012. 刘伟, 陈世品, 陈辉, 等. 土壤养分与油茶产量与种仁含油率的相关性研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(3): 59–63. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.03.012.
- [6] CAO Y Q, YAO X H, TENG J H, et al. Effects of fertilization on

- growth of spring shoots and mineral element contents in leaves of *Camellia oleifera* [J]. Nonwood For Res, 2017, 35(2): 166–170. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2017.02.028.
- 曹永庆, 姚小华, 滕建华, 等. 施肥对油茶春梢生长及叶片矿质元素含量的影响 [J]. 经济林研究, 2017, 35(2): 166–170. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2017.02.028.
- [7] PAN Y J, CHEN B F, XIAO Y H, et al. Heavy metal pollution status and evaluation of urban forest soils in Guangzhou [J]. Ecol Environ, 2008, 17(1): 210–215. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2008.01.041.
- 潘勇军, 陈步峰, 肖以华, 等. 广州市城市森林土壤重金属污染状况及其评价 [J]. 生态环境, 2008, 17(1): 210–215. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2008.01.041.
- [8] FANG X, TANG Z J, TIAN D L, et al. Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(23): 7595–7606. doi: 10.5846/stxb201201130073.
- 方晰, 唐志娟, 田大伦, 等. 长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险 [J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7595–7606. doi: 10.5846/stxb201201130073.
- [9] LÜ H H, LIANG S M, LIU Y X, et al. Heavy metals in soils and assessment of environmental risk in *Myrica rubra* plantations in Zhejiang Province [J]. J Fruit Sci, 2017, 34(4): 473–481. doi: 10.13925/j.cnki.gsxb.20160180.
- 吕豪豪, 梁森苗, 刘玉学, 等. 浙江地区杨梅园土壤重金属含量变异特征与污染风险评价 [J]. 果树学报, 2017, 34(4): 473–481. doi: 10.13925/j.cnki.gsxb.20160180.
- [10] CUI L, LI Z Q, WEN X, et al. Studies on correlation of *Camellia* oil quality and soil nutrient from different areas [J]. J Sichuan Univ (Nat Sci), 2013, 50(4): 869–874. doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2013.04.037.
- 崔龙, 李志强, 文旭, 等. 不同产地茶油品质与土壤养分关系研究 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2013, 50(4): 869–874. doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2013.04.037.
- [11] YANG S X, TIAN Q J, LIANG S C, et al. Bioaccumulation of heavy metals by the dominant plants growing in Huayuan Manganese and Lead/zinc Mineland, Xiangxi [J]. Environ Sci, 2012, 33(6): 2038–2045. doi: 10.13227/j.hjkk.2012.06.008.
- 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 等. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 [J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2038–2045. doi: 10.13227/j.hjkk.2012.06.008.
- [12] TAN X F, CAI H L, YUAN D Y, et al. Studies on accumulation capability of *Camellia oleifera* to five heavy metals [J]. J CS Univ For Technol, 2011, 31(3): 8–11. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2011.03.001.
- 谭晓风, 蔡海丽, 袁德义, 等. 重金属在油茶林地及树体中的富集特性研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(3): 8–11. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2011.03.001.
- [13] NI Z L, TANG F B, QU M H. Determination of heavy metals content in vegetable oils with different preprocessing methods [J]. China Oils Fats, 2012, 37(7): 85–87. doi: 10.3969/j.issn.1003-7969.2012.07.022.
- 倪张林, 汤富彬, 屈明华. 不同前处理方法测定植物油中重金属的研究 [J]. 中国油脂, 2012, 37(7): 85–87. doi: 10.3969/j.issn.1003-7969.2012.07.022.
- [14] GUO L. Analysis of metal and organic compound residues in edible vegetable oils to influence product quality or edible safety [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007: 46.
- 郭岚. 食用植物油中影响产品质量或食用安全的金属元素及有机物残留分析 [D]. 南昌: 南昌大学, 2007: 46.
- [15] LIU J H, REN H L. Changes of trace components in plant oil processing [J]. China oils Fats, 2000, 25(4): 49–52. doi: 10.3321/j.issn:1003-7969.2000.04.017.
- 刘军海, 任惠兰. 植物油加工过程中微量成分的变化 [J]. 中国油脂, 2000, 25(4): 49–52. doi: 10.3321/j.issn:1003-7969.2000.04.017.
- [16] SU M. How to save edible plant oil [J]. N Hort, 1989(5): 39.
- 苏明. 怎样保存食用植物油 [J]. 北方园艺, 1989(5): 39.
- [17] DE LEONARDIS A, MACCIOLA V. Catalytic effect of the Cu(II)- and Fe(III)-cyclo-hexanebutyrate on olive oil oxidation measured by Rancimat [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2002, 104(3): 156–160. doi: 10.1002/1438-9312(200203)104:3<156::AID-EJLT156>3.0.CO;2-7.
- [18] PAZ I, MOLERO M. Catalytic effect of solid metals on thermal stability of olive oils [J]. J Amer Oil Chem Soc, 2000, 77(2): 127–130. doi: 10.1007/s11746-000-0021-9.
- [19] QIU H D, ZHAO B, ZHANG H, et al. Analysis of heavy metal in edible vegetable oils and its health risk assessment [J]. China Oils Fats, 2017, 42(3): 91–94. doi: 10.3969/j.issn.1003-7969.2017.03.019.
- 邱会东, 赵波, 张红, 等. 食用植物油中重金属分析及健康风险评价 [J]. 中国油脂, 2017, 42(3): 91–94. doi: 10.3969/j.issn.1003-7969.2017.03.019.
- [20] Agricultural Industry Standards of People's Republic of China. NY/T 1121.1–2006 Soil testing: Soil sampling, processing and reposition [S]. 2006.
- 中华人民共和国农业行业标准. NY/T 1121.1–2006 土壤检测: 土壤样品的采集、处理和贮存 [S]. 2006.
- [21] HUANG Y, LI D G, LIU G D, et al. Researching of characters of citrus accumulation heavy metal to soil in the Three Gorges Reservoir Region [J]. Environ Monit China, 2005, 21(1): 12–15. doi: 10.19316/j.issn.1002-6002.2005.01.004.

- 黄昀, 李道光, 刘光德, 等. 三峡库区柑橘对土壤重金属吸收富集特征研究 [J]. 中国环境监测, 2005, 21(1): 12–15. doi: 10.19316/j.issn.1002-6002.2005.01.004.
- [22] DING S L. Introduction to Environmental Assessment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 25–35.
- 丁桑岚. 环境评价概论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 25–35.
- [23] CHEN Z L, HUANG L, ZHOU C Y, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou [J]. Environ Sci, 2017, 38(1): 389–398. doi: 10.13227/j.hjlx.201606138.
- 陈至良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 [J]. 环境科学, 2017, 38(1): 389–398. doi: 10.13227/j.hjlx.201606138.
- [24] WANG G L, ZHANG J C, ZHUANG J Y, et al. Accumulation research of 31 species of ornamental plants on heavy metal [J]. J W Anhui Univ, 2011, 27(5): 83–87. doi: 10.3969/j.issn.1009-9735.2011.05.023.
- 王广林, 张金池, 庄家尧, 等. 31 种园林植物对重金属的富集研究 [J]. 皖西学院学报, 2011, 27(5): 83–87. doi: 10.3969/j.issn.1009-9735.2011.05.023.
- [25] FAN Y H, WANG Y Q. Background characteristics of soil elements in four plains of Zhejiang Province [J]. Geophy Geochem Explor, 2009, 33(2): 132–134. doi: cnki:sun:wtyh.0.2009-02-006
- 范允慧, 王艳青. 浙江省四大平原区土壤元素背景值特征 [J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 132–134. doi: cnki:sun:wtyh.0.2009-02-006.
- [26] QIU Z M, SHANG S W, LIN X F. Concentration levels of heavy metals of soil in *Camellia oleifera* base in Taizhou City in Zhejiang Province & its evaluation [J]. Prot For Sci Technol, 2013(8): 1–2. doi: 10.3969/j.issn.1005-5215.2013.08.001.
- 邱智敏, 尚素微, 林雪锋. 浙江省台州市油茶基地土壤重金属含量水平及其评价 [J]. 防护林科技, 2013(8): 1–2. doi: 10.3969/j.issn.1005-5215.2013.08.001.
- [27] ZHAO B, ZHU S X, YANG X Q, et al. Characteristics of heavy metals pollution and ecological risk assessment of the surface soils in the vegetable fields around Caohai in Guizhou [J]. Ecol Environ Sci, 2018, 27(4): 776–784. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.04.025.
- 赵斌, 朱四喜, 杨秀琴, 等. 贵州草海菜地表层土壤重金属污染特征及生态风险评价 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(4): 776–784. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.04.025.
- [28] SONG B, CHEN T B, ZHENG Y M, et al. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health [J]. Acta Sci Circumst, 2006, 26(8): 1343–1353. doi: 10.3321/j.issn:0253-2468.2006.08.020.
- 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1343–1353. doi: 10.3321/j.issn:0253-2468.2006.08.020.
- [29] FAN G H, LIU C, LI Y, et al. Changes of soil physical and chemical properties of *Camellia oleifera* forest at different ages [J]. J NE For Univ, 2019, 47(4): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2019.04.008.
- 凡国华, 刘超, 李洋, 等. 不同林龄油茶林土壤理化性质的变化 [J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(4): 38–42. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.2019.04.008.
- [30] ZHANG C, HE T B, MOU L, et al. Comprehensive evaluation of soil quality in oil tea base at Shitun Town, Wangmo County, Guizhou Province [J]. J Moun Agric Biol, 2017, 36(3): 37–43. doi: 10.15958/j.cnki.sdnyswx.2017.03.007.
- 张弛, 何腾兵, 牟力, 等. 望谟县石屯镇油茶基地土壤质量综合评价 [J]. 山地农业生物学报, 2017, 36(3): 37–43. doi: 10.15958/j.cnki.sdnyswx.2017.03.007.
- [31] XIE Y N, YE L H, LI X C, et al. Variation analysis of soil heavy metal content and its pollution evaluation in Yunfu City of habitat area of *Camellia oleifera* [J]. For Environ Sci, 2017, 33(6): 84–90. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2017.06.017.
- 解懿妮, 叶龙华, 李小川, 等. 云浮市油茶适生地区土壤重金属含量变异分析及污染评价 [J]. 林业与环境科学, 2017, 33(6): 84–90. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2017.06.017.
- [32] CAO Y Q, YAO X H, WANG K L, et al. Changes in absorption and accumulation of copper, zinc, iron in *Camellia oleifera* [J]. J Trop Subtrop Bot, 2016, 24(3): 302–307. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.03.009.
- 曹永庆, 姚小华, 王开良, 等. 油茶微量元素铜铁锌吸收和积累特征 [J]. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(3): 302–307. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.03.009.
- [33] DING L Z, SHANG S W, CHAI Z L. Heavy metal content and quality safety assessment of hickory nut in Zhejiang Province [J]. Acta Agric Jiangxi, 2011, 23(8): 151–152. doi: 10.3969/j.issn.1001-8581.2011.08.050.
- 丁立忠, 尚素微, 柴振林. 浙江省山核桃中重金属含量及质量安全评价 [J]. 江西农业学报, 2011, 23(8): 151–152. doi: 10.3969/j.issn.1001-8581.2011.08.050.
- [34] LIU D R, ZHENG J Z, ZHAN X, et al. Ecological risk evaluation of heavy metals in soils of *Carya cathayensis* plantations, Lin'an [J]. Geophy Geochem Explor, 2019, 43(6): 1382–1388. doi: 10.11720/wtyht.2019.0287.
- 刘道荣, 郑基滋, 占玄, 等. 临安市核桃主产区林地土壤重金属生态风险评价 [J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1382–1388. doi: 10.11720/wtyht.2019.0287.
- [35] TANG R L, GAO Y L, YUAN H S. The effect of metal elements on

- crude soybean oil storage stability [J]. *Grain Storage*, 2019, 48(5): 35–41. doi: 10.3969/j.issn.1000-6958.2019.05.009.
- 唐瑞丽, 高瑀琰, 袁华山. 金属元素对大豆原油储藏稳定性影响 [J]. *粮食储藏*, 2019, 48(5): 35–41. doi: 10.3969/j.issn.1000-6958.2019.05.009.
- [36] ZHAO Y S, JIANG H, GAN G D, et al. Heavy metal pollution evaluation and enrichment research of dominant plant in the mining areas of Huayuang and Suxian in Hunan [J]. *J Guizhou Univ Eng Sci*, 2015, 33(5): 146–155. doi: 10.3969/j.issn.1673-7059.2015.05.025.
- 赵英松, 江洪, 甘国东, 等. 湖南花垣和苏仙矿区重金属污染评价及优势植物富集研究 [J]. *贵州工程应用技术学院学报*, 2015, 33(5): 146–155. doi: 10.3969/j.issn.1673-7059.2015.05.025.
- [37] YU F M, LIU K H, YE P H, et al. Manganese tolerance and accumulation characteristics of a woody accumulator *Camellia oleifera* [J]. *Environ Sci Pol Res*, 2019, 26(21): 21329–21339. doi: 10.1007/s11356-019-05459-6.
- [38] QI G L, ZHENG G Q, ZHANG L, et al. Comparative study on heavy metal elements in soil and fruit of *Lycium barbarum* L. in different regions [J]. *N Hort*, 2014, 38(15): 161–164.
- 齐国亮, 郑国琦, 张磊, 等. 不同产地宁夏枸杞土壤和果实中重金属含量比较研究 [J]. *北方园艺*, 2014, 38(15): 161–164.
- [39] ZHANG J Y. Analysis of inorganic element content in *Pinellia ternate* from different areas [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2010, 22(9): 129–131. doi: 10.3969/j.issn.1001-8581.2010.09.040.
- 张君毅. 不同地区半夏无机元素含量分析 [J]. *江西农业学报*, 2010, 22(9): 129–131. doi: 10.3969/j.issn.1001-8581.2010.09.040.
- [40] NI Z L, TANG F B, QU M H, et al. Determination of cadmium in Tea: *Camellia* seed oil by wet digestion-graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. *Chin J Inorg Anal Chem*, 2011, 1(3): 66–68. doi: 10.3969/j.issn.2095-1035.2011.03.0016.
- 倪张林, 汤富彬, 屈明华, 等. 湿法消解-石墨炉原子吸收光谱法测定山茶油中的镉 [J]. *中国无机分析化学*, 2011, 1(3): 66–68. doi: 10.3969/j.issn.2095-1035.2011.03.0016.
- [41] NI Z L, TANG F B, QU M H, et al. Determination of five heavy metals in *Camellia* seed oil by microwave digestion-ICP-MS [J]. *Food Sci*, 2013, 34(4): 165–167.
- 倪张林, 汤富彬, 屈明华, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定油茶籽油中的 5 种重金属元素 [J]. *食品科学*, 2013, 34(4): 165–167.