

黔产刺梨不同部位重金属污染与分布特征

李琳莉, 江帆*, 丁小艳, 林婧, 袁振辉

(贵州师范大学 贵州省山地环境信息系统与生态保护重点实验室, 贵阳 550001)

[摘要] 目的:研究刺梨不同部位重金属污染与分布特征。方法:采用原子吸收光谱仪和原子荧光光谱仪测定刺梨不同部位重金属含量,采用富集系数法、污染指数法、相关性分析对重金属含量进行评价。结果:重金属标准曲线分别为 Pb: $Y = 373.54X - 2.1687$ ($0 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), As: $Y = 120.184X + 1.626$ ($0 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), Hg: $Y = 742.222X - 16.301$ ($0 \sim 2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), Cd: $Y = 0.0233X + 0.0179$ ($0 \sim 10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 相关系数均 > 0.999 。依据《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》(WM/T2-2004)中重金属限值,131批刺梨样品中(15批刺梨根,48批刺梨茎,48批刺梨叶,20批刺梨果),有25批样品存在重金属超标,包括Cd 16批,Hg 4批,Pb 4批,As 1批。各重金属的单因子污染指数为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{As}$,刺梨各部位的综合污染指数为 $\text{根} > \text{茎} > \text{叶} > \text{果}$,富集系数为 $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Pb} \approx \text{As}$ 。刺梨基地45批土壤样品重金属Pb,As,Hg,Cd平均值均低于国家土壤二级标准限定值,符合中药材种植规范基地土壤中重金属限量规定要求。结论:刺梨植株污染Cd主要来自土壤,Hg,Pb,As可能与大气沉降和农业活动有关。

[关键词] 刺梨; 重金属; 污染指数; 分布特征

[中图分类号] R284.1;R289;R22 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2018)18-0070-06

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20181518

[网络出版地址] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20180518.1917.003.html>

[网络出版时间] 2018-05-21 14:08

Pollution and Distribution Characteristics of Heavy Metals in Different Parts of *Rosa roxburghii* in Guizhou Province

LI Lin-li, JIANG Fan*, DING Xiao-yan, LIN Jing, YUAN Zhen-hui

(Guizhou Provincial Key Laboratory of Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

[Abstract] **Objective:** To investigate the pollution and distribution characteristics of heavy metals in different parts of *Rosa roxburghii*. **Method:** The contents of heavy metals in different parts of *R. roxburghii* were determined by atomic absorption spectroscopy and atomic fluorescence spectrometer. Then the contents of heavy metals were evaluated by using bioconcentration factors (BCF) method, pollution index method, and correlation analysis. **Result:** The standard curves of Pb, As, Hg and Cd (heavy metals) were $Y = 373.54X - 2.1687$ ($0-100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $Y = 120.184X + 1.626$ ($0-100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $Y = 742.222X - 16.301$ ($0-2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), and $Y = 0.0233X + 0.0179$ ($0-10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) respectively ($r \geq 0.999$). Among 131 samples of *R. roxburghii* (including 15 batches of root, 48 batches of stem, 48 batches of leaf, and 20 batches of fruit), 25 batches of samples exceeded the standard of heavy metals based on the limits of heavy metals in *Green Standards of Medicinal Plants and Preparations for Foreign Trade and Economy* (WM/T2-2004), including 16 batches of Cd, 4 batches

[收稿日期] 20180228(020)

[基金项目] 贵州省科技计划项目(黔科合[2013]6006-4);贵州省中药民族药质量标准研究(DBXDYC5207D);贵州师范大学研究生创新基金项目(研创2016(30))

[第一作者] 李琳莉,在读硕士,从事药用植物研究,E-mail:lllsmile@163.com

[通信作者] *江帆,硕士,研究员,主任药师,从事药品功能食品质量研究及开发,E-mail:1780867902@qq.com

of Hg, 4 batches of Pb and 1 batch of As. The single factor pollution index of heavy metals was Cd > Pb > Hg > As. The comprehensive pollution index in different parts of *R. roxburghii* was root > stem > leaf > fruit. The average BCF was Cd > Hg > Pb ≈ As. The average contents of heavy metals (Pb, As, Hg, and Cd) in 45 batches of soil samples in *R. roxburghii* base were all lower than the limit values in Grade II national standard for soils, complying with the requirements on the limit values of heavy metals in base soils for the cultivation of Chinese herbal medicines. **Conclusion:** The Cd pollution of *R. roxburghii* mainly comes from soil, while Hg, Pb, and As may be related to atmospheric deposition and agricultural activities.

[Key words] *Rosa roxburghii*; heavy metals; pollution index; distribution characteristics

中药材中污染物特别是重金属污染物已引起社会广泛关注。受重金属污染的中药材不仅影响其品质药效,阻碍进入国际药材市场,并可导致人类吸收累积可食用部位的微量重金属,从而产生潜在风险^[1]。SHEN 等^[2]研究表明芍药根对土壤中 Cd, Cu, Pb 等重金属具有吸附累积作用;Hajar 等^[3]发现甜叶菊在生长期遭到土壤和水体中 As, Cd, Cr 等重金属污染后,可能通过食物链对人类造成风险;Chuparina 等^[4]研究表明受重金属污染的黄百合对人体健康造成威胁;而国内对人参、丹参、三七等药材中重金属含量监测及健康风险评价表明,受重金属污染的中药材可致人体内蓄积过量重金属并造成急慢性中毒反应^[5-7]。因此,开展中药材重金属风险评价对于提高中药材质量安全,建立符合国家标准的专业化种植基地,保障民生药膳安全,促进中药材产业可持续发展具有现实意义。

刺梨系蔷薇科蔷薇属植物,广泛生长于西南地区,以贵州分布最广,其味苦、涩,性平,归胃、大肠经^[8],主要用于健胃消食、食积腹痛等,据文献报道刺梨根及果实在民间均有药用历史^[9],其主要成分为多酚、黄酮及三萜,在调节机体免疫、延年益寿、抗肿瘤防治癌症、清除体内自由基等方面具有明显药理活性^[10]。目前其果、叶、根收录于《贵州省中药材、民族药材质量标准(2003 年版)》^[8],其叶收录于《四川省中药材标准(2010 年版)》^[11]。刺梨作为贵州重点开发的特色资源,在喀斯特发育丰富的贵州省广泛引种培育,具有耐干旱、耐贫瘠、易繁殖、防治水土流失等优势^[12],同时具备药食两用经济价值,成为近年来生态环境改善、食品药品开发、质量提升等方面的研究热点。国内外对刺梨的研究集中在建立重金属测定方法及其含量超标与否^[13-15],而对刺梨不同部位重金属富集迁移、风险评价及来源分析却鲜有报道。鉴于此,本文对刺梨种植基地

刺梨中重金属 Pb, As, Hg, Cd 含量进行了调查,首次评价了刺梨不同部位重金属分布特征及污染风险,探讨了土壤-刺梨系统重金属富集迁移及污染来源,以期对刺梨药材的质量评价、用药安全及制定重金属限量标准提供参考依据。

1 材料

根据自然地理、社会经济等情况,在刺梨主要种植区遵义市遵义县三岔镇、黔南州龙里县谷脚镇、毕节市七星关区海子街镇和毕节市黔西县林泉镇于刺梨成熟采收期对刺梨根茎叶及表层土壤(0 ~ 20 cm)进行随机采样,每个混合土样均由刺梨根际表层土壤整合并按照四分法合并为一个土壤样品,每份植株样品均为相应混合土样的植株,共采集根际土 45 份、实验样品 131 批次(刺梨根 15 批次、刺梨茎和叶各 48 批次、刺梨果 20 批次),经贵阳医学院江维克教授鉴定为蔷薇科蔷薇属植物缙丝花 *Rosa roxburghii* 的根、茎、叶、果。土样风干后剔除杂物经研磨过 100 目筛,刺梨根茎叶果逐次用自来水、纯水、超纯水洗净,烘干,粉碎过药典 24 目筛,所有样品密封避光,备用。

ZEEnit700P 型原子吸收光谱仪(德国耶拿 analytikjena 分析仪器股份公司),AES-933 型原子荧光光谱仪(北京吉天仪器有限公司),压力消解罐(西安仪创仪器公司),干燥恒温烘箱(上海泰博实验设备有限公司),DB-3 型可调式电热板(北京莱伯泰科仪器股份有限公司)。

Pb, As, Hg, Cd 4 种重金属单元素对照溶液(质量浓度 0.1 g·L⁻¹,国家有色金属及电子材料分析测试中心,批号分别为 16C018-2, 16B039-1, 16C002-1, 16C012-1)。

生物成分分析标准物质柑橘叶(用于仪器校准用,与样品同步测定,购于中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所),30% 过氧化氢、硝酸、盐酸为优级纯(国药集团化学股份有限公司),水(市售娃哈哈纯净水)。

2 方法与结果

2.1 供试液的制备

2.1.1 重金属标准储备液制备 分别精密吸取 Pb, As, Hg, Cd 单元素对照溶液各 10 mL 于 100 mL 量瓶中,用 10% 盐酸稀释至刻度线,得各 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb, As, Hg, Cd 储备液。

2.1.2 刺梨各部位供试液制备^[16] 称取刺梨药材粉末 0.25 g 于消解内罐中,加入硝酸-30% 过氧化氢(2:1),放入 140 °C 的恒温干燥烘箱内消解 4 h,冷却后取出消解内罐,放在可调式电热板上 140 °C 加热,挥去红棕色气体,留消化液约 1 mL,将其转移并定容至 50 mL 量瓶中,混匀备用。同时做试剂空白试验。

2.2 仪器测量条件 刺梨样品中 Pb, As, Hg, Cd 含量测定参照 GB5009.12-2017, GB5009.11-2014, GB5009.17-2014, GB5009.15-2014^[17-18];土壤中 Pb, Cd 含量测定按 GB/T 171411-1997^[19], As, Hg 含量测定按 GB/T 22105-2008^[20]。

Pb, Cd 采用原子吸收光谱仪测定, As, Hg 采用原子荧光光谱仪测定,其中 Pb 波长 283.3 nm,狭缝宽度 0.5 nm,灯电流 12 mA,105 °C 干燥保持 45 s,750 °C 灰化保持 30 s,2 300 °C 原子化保持 5 s;Cd 波长 228.8 nm,狭缝 0.4 nm,灯电流 10 mA,105 °C 干燥保持 20 s,700 °C 灰化保持 40 s,2 300 °C 原子化保持 5 s;As 波长 213.8 nm, Hg 波长 253.7 nm,光电倍增管负高压 280 V,原子化器高度分别为 8,10 mm, A, B 道总灯电流均为 60 mA, A, B 道辅助灯电流均为 30 mA,载气流量 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,屏蔽气流量设定 $900 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2.3 标准曲线制备 Pb 供试液:精密吸取 Pb 储备液 0, 0.5, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 mL, 分别置于 100 mL 量瓶中,用 10% 盐酸稀释至刻度,得系列浓度的 Pb 对照溶液(质量浓度分别为 0, 5, 25, 50, 75, $100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 备用。

As 供试液:分别精密吸取 As 储备液 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 10.0 mL 置 100 mL 量瓶中,用 10% 盐酸稀释至刻度,得系列浓度的 As 对照溶液(质量浓度分别为 0, 10, 20, 40, 60, 80, $100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 备用。

Hg 供试液:精密吸取 Hg 储备液 2 mL 至 100 mL 量瓶中,用 10% 盐酸稀释至刻度,再分别精密吸取该液 0, 1, 2, 4, 8, 10 mL 置 100 mL 量瓶中,用 10% 盐酸稀释至刻度,得系列浓度的 Hg 对照溶液(质量浓度分别为 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6,

$2.0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 备用。

Cd 供试液:精密吸取 Cd 储备液 10 mL 置于 100 mL 量瓶中,用 10% 盐酸稀释至刻度,再分别精密吸取该液 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10 mL 置 100 mL 量瓶中,用 10% 盐酸稀释至刻度,得系列浓度的 Cd 对照溶液(质量浓度分别为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 备用。

取上述 4 种单重金属对照溶液适量,按 2.2 项下测量条件进行测定,以质量浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线。4 种单重金属溶液回归方程、相关系数、线性范围见表 1。结果表明,各元素的相关系数 r 均 > 0.999 , 线性关系良好。

表 1 4 种重金属元素浓度范围、相关系数、回归方程、线性范围
Table 1 Four kinds of heavy metal elements concentration range, correlation coefficient, regression equation, linear range

元素	回归方程	r	线性范围 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
Pb	$Y = 373.54X - 2.1687$	0.9999	0 ~ 100
As	$Y = 120.184X + 1.626$	0.9996	0 ~ 100
Hg	$Y = 742.222X - 16.301$	0.9999	0 ~ 2
Cd	$Y = 0.0233X + 0.0179$	0.9991	0 ~ 10

2.4 仪器校准试验 取柑橘叶标准物质适量,按 2.1 项下方法制备柑橘叶标准物质供试液,按 2.2 项下测量条件进行测定,平行操作 3 份,4 种重金属元素测定结果见表 2。结果表明,质控样品校准率 96.47% ~ 110.00%, RSD $< 5\%$, 符合实验分析要求。

表 2 柑橘叶标准物质标准值、测定值、校准率及 RSD ($n = 3$)
Table 2 Standard value, measured value, calibration rate and relative standard deviation of heavy metals in Citrus leaf ($n = 3$)

元素	标准值($\bar{x} \pm s$) $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	测定均值 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	校准率 $\%$	RSD $\%$
Pb	9.7 ± 0.9	9.65	99.48	1.3
As	1.1 ± 0.2	1.23	110.00	3.3
Hg	0.15 ± 0.02	0.16	106.67	2.8
Cd	0.17 ± 0.02	0.16	96.47	3.4

2.5 数据处理 实验数据采用 Excel 2016 统计、使用 SPSS 20.0 进行相关性分析,采用 origin 9.1 作图。重金属元素的污染程度采用单因子污染指数法和综合污染指数法评价^[21]。植物对重金属的富集能力采用富集系数^[22]和相关系数评价。刺梨重金属含量参照《药用植物及制剂外经贸绿色行业标

准》(WM/T2-2004)(Pb, As, Hg, Cd 标准限值分别为 5, 2, 0.2, 0.3 mg·kg⁻¹)^[23]。

2.6 样品测定

2.6.1 刺梨样品测定 取不同部位刺梨供试液,按 2.2 项下测量条件测定,见表 3。结果表明,本次实验收集的 131 批次刺梨样品中,106 批样品符合标

准,按不同部位计,样品合格率分别为刺梨果 95%,刺梨叶 93.5%,刺梨根 80%,刺梨茎 60.5%;有 25 批样品存在重金属超标问题,其中 Cd 超标 16 批(刺梨茎 13 批、刺梨根 3 批),Hg 超标 4 批(茎 1 批、叶 3 批),Pb 超标 4 批(茎 3 批、果 1 批),As 超标 1 批(茎 1 批)。

表 3 刺梨各部位的重金属量

Table 3 Contents of heavy metals in the different parts of *Rosa roxburghii*

mg·kg⁻¹

部位	Pb		As		Hg		Cd	
	测定值	范围	测定值	范围	测定值	范围	测定值	范围
根(n=15)	1.49	0.24~4.04	0.31	0.16~0.58	0.06	0.03~0.12	0.24	0.01~0.71
茎(n=48)	2.81	0.19~7.9	0.51	0.08~2.08	0.04	0.01~0.20	0.16	0.01~0.677
叶(n=48)	2	0.59~4.58	0.39	0.16~0.71	0.07	0.001~0.28	0.03	0.004~0.12
果(n=20)	1.45	0.26~5.09	0.12	0.026~0.20	0.004	0~0.015	0.09	0.025~0.22

2.6.2 土壤样品测定^[19-20] 分别取 45 份刺梨土壤样品,制备土壤样品供试液,按 2.2 项下测量条件测定,见表 4。结果表明,刺梨土壤重金属 Pb, As, Hg, Cd 平均值均低于国家土壤二级标准限定值,显示土壤属清洁或尚清洁级,符合中药材种植规范基地土壤中重金属限量规定要求。

表 4 刺梨土壤中重金属含量(n=45)

Table 4 Contents of heavy metals in soil(n=45)

mg·kg⁻¹

元素	Pb	As	Hg	Cd
国家二级标准 ¹⁾	300	30	0.5	0.3
贵州背景值 ²⁾	35.2	20	0.11	0.66
测定均值	33.49	10.14	0.17	0.16

注:标准限值来源参考:¹⁾《GB15618-1995 土壤环境质量标准》^[24];²⁾《中国土壤元素背景值(1990 年版)》^[25]。

2.7 刺梨不同部位重金属污染评价 采用单因子污染指数法和综合污染指数法评价^[21]。计算式如下,单因子污染指数 P_i = 植物中重金属元素的含量/标准限定值;综合污染指数 $P = \sqrt{\frac{(P_i)_{\max}^2 + (P_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$,计算结果见图 1。污染判定标准,单因子污染指数 $P_i \leq 1$ 未受到 i 种重金属污染;综合污染指数 $P \leq 0.7$ 安全等级, $0.7 < P \leq 1.0$ 警戒限, $1.0 < P \leq 2.0$ 轻度污染, $2.0 < P \leq 3.0$ 中度污染, $P > 3.0$ 重度污染。从图 1 可知,各重金属对刺梨的单因子污染指数 P_i 总体 Cd > Pb > Hg > As,所有 P_i 低于 1;各重金属对刺梨各部位的综合污染指数 P 依次为根 > 茎 > 叶 > 果, P 均 < 0.7。说明刺梨

各部位重金属处于安全等级。

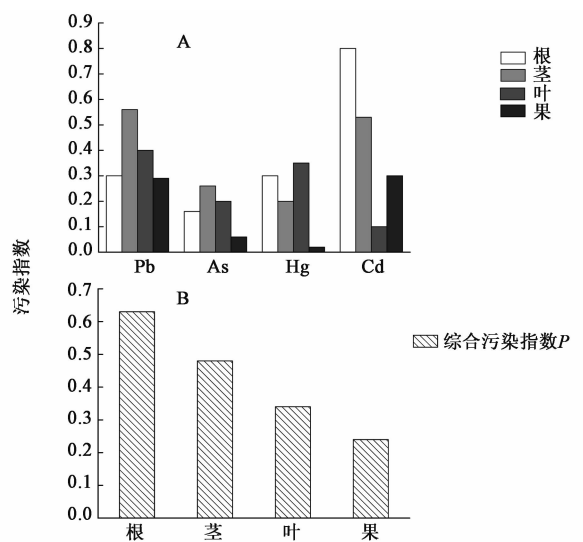


图 1 刺梨各部位中四种重金属单因子污染指数(A)和综合污染指数(B)

Fig.1 Four heavy metal single factor pollution index (A) and comprehensive pollution index (B) in different parts of *R. roxburghii*

2.8 刺梨各部位重金属富集特征 富集系数 BCF = 植物体内某种重金属含量/土壤中对对应重金属含量^[22]。刺梨各部位重金属富集系数见表 5。

从表 5 可知,刺梨各部位对不同重金属的富集能力不一样,其富集系数呈现出 Cd > Hg > Pb ≈ As 的变化趋势,说明刺梨对 Cd 的富集能力最强,对 Hg 的富集能力次之,对 Pb, As 富集能力最弱,这与文献^[22,26-28]中贵州地区的大多数中药材、蔬菜情况一致,这与重金属 Cd 活性较强,较易为植物吸收有关^[29]。

表 5 刺梨各部位重金属的平均富集系数

Table 5 Average BCF of heavy metals in different parts of *R. roxburghii*

部位	Pb	As	Hg	Cd
根	0.04	0.03	0.33	1.45
茎	0.08	0.05	0.23	0.97
叶	0.06	0.04	0.38	0.19
果	0.04	0.01	0.02	0.55

本研究显示,刺梨对 Cd 的富集能力表现为根 > 茎 > 果 > 叶,且这个趋势与刺梨各部位 Cd 总量一致,这可能与各个重金属在土壤与植物系统中的迁移转化特性决定的^[30],因此减少土壤中可交换态 Cd,进入植物体内的 Cd 会随之降低。

不同元素在同一部位中的富集能力差异较大,Pb,As 富集能力最弱,说明富集系数较小的 Pb,As 不易从土壤中向刺梨各部位转移。据陈志良等^[31]研究,植物中 Pb,As 污染来源包括土壤、大气沉降、农业活动等。笔者观察到,本研究收集刺梨基地个别采样点距道路近,易受汽车尾气污染,且农家户多用含 As,Pb 农药、氮肥、有机肥,因此中药材基地不仅需远离公路,还需重视农业活动的管理。

2.9 土壤与刺梨重金属相关性分析 重金属在土壤与刺梨各部位的相关性分析结果见图 2。

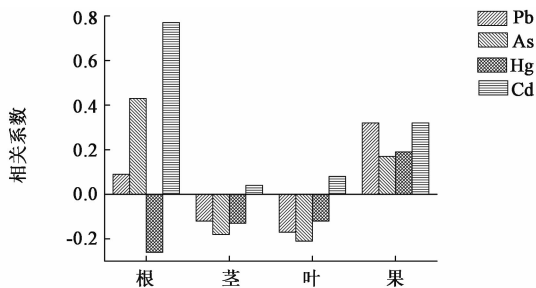


图 2 刺梨各部位与土壤间重金属元素的相关系数

Fig. 2 Relationship of heavy metals in different part of *R. roxburghii* and soil

结果显示,刺梨根、果中 Pb 含量分别与土壤 Pb 含量呈正相关,而刺梨茎、叶中 Pb 含量与土壤 Pb 含量呈负相关,As 元素相关性情况与 Pb 一致。刺梨各部位 Cd 含量与土壤 Cd 含量均呈正相关,其中刺梨根中 Cd 含量与土壤 Cd 含量存在显著相关。刺梨各部位的 Hg 与土壤的 Hg 呈负相关或相关性较低。

3 讨论与结论

结合超标率、污染指数和富集系数来看,刺梨受

Cd 污染最严重,在贵州省土壤 Cd 背景值较高的情况下,Cd²⁺与根部皮层细胞的有机物络合形成大分子或难溶的络合物,沉积在根部细胞,大部分 Cd 不能向地上部分进一步输送,导致根部 Cd 含量高于地上部分^[32],因此刺梨根比其他部位更容易累积 Cd。这可推断出刺梨 Cd 污染主要来源土壤。除 Cd 污染外,刺梨还受到 Pb,As,Hg 污染,这 3 种重金属的污染指数、富集系数较 Cd 的污染指数、富集系数低,且这 3 种重金属与土壤中重金属相关性不大,据考察,基地个别采样点距道路近,易受汽车尾气污染,且农家户多用含 As,Pb 农药、氮肥、有机肥,这可推测出这三者的污染来源可能来自外界环境,如农业活动、大气沉降等。因此,建立中药材种植基地应当考察当地土壤重金属含量状况,选择合适的品种,减少中药材对土壤中重金属的富集,从而保障中药材安全。

刺梨入药部位主要是刺梨根、刺梨叶和刺梨果,在本实验中,这三者的重金属合格率达到 91.57%,其中 Cd 超标 3 批(刺梨根 3 批),Hg 超标 3 批(叶 3 批),Pb 超标 1 批(果 1 批),超标情况虽少,但仍需警惕刺梨入药部位 Cd,Hg,Pb 重金属污染。

本文在调查黔产刺梨基地土壤和刺梨根、茎、叶、果中重金属 Pb,As,Hg,Cd 含量的前提下,首次评价了刺梨不同部位重金属分布特征及安全风险,探讨了刺梨各部位重金属富集迁移及污染来源。下一步将对重金属的有效价态进行研究与讨论,并结合土壤环境数据,进一步阐述各重金属在刺梨各部位的迁移机制及污染。

铜(Cu)作为《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》(WM/T2-2004)规定的重金属测定元素,经测定,86 批刺梨茎(9.53 mg·kg⁻¹),叶(9.53 mg·kg⁻¹),果(3.57 mg·kg⁻¹)中 Cu 均符合限量标准,因未获得刺梨根 Cu 数据,故未纳入此文中。

[参考文献]

[1] Asgari L B, Ghorbanpour M, Nikabadi S. Heavy metals in contaminated environment: destiny of secondary metabolite biosynthesis, oxidative status and phytoextraction in medicinal plants [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2017, 145: 377.

[2] SHEN Z J, XU D C, CHEN Y S, et al. Heavy metals translocation and accumulation from the rhizosphere soils to the edible parts of the medicinal plant Fengdan (*Paeonia ostii*) grown on a metal mining area, China [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2017, 143: 19-27.

- [3] Hajar E W I, Sulaiman A Z B, Sakinah A M M. Assessment of heavy metals tolerance in leaves, stems and flowers of *Stevia Rebaudiana*, plant [J]. *Procedia Environ Sci*, 2014, 20(20) : 386-393.
- [4] Chuparina E V, Aisueva T S. Determination of heavy metal levels in medicinal plant *Hemerocallis minor*, Miller by X-ray fluorescence spectrometry [J]. *Environ Chem Lett*, 2011, 9(1) : 19-23.
- [5] 梁尧,姜晓莉,李刚,等. 吉林省非林地栽参基地土壤和人参根部重金属元素含量分析及风险评价[J]. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(3) : 68-76.
- [6] 颜慧,冯会,黄玮,等. 丹参主要产地的土壤及药材重金属污染评价[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(4) : 288-293.
- [7] 阎秀兰,廖晓勇,于冰冰,等. 药用植物三七对土壤中砷的累积特征及其健康风险[J]. *环境科学*, 2011, 32(3) : 880-885.
- [8] 贵州省药品监督管理局. 贵州省中药材、民族药材质量标准[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2003 : 230-232.
- [9] 刘丹,江帆,丁小艳,等. 黔产刺梨果中总多酚的含量测定及其干燥方式考察[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2016, 22(23) : 20-23.
- [10] 代甜甜,杨小生. 刺梨化学成分及药理活性研究进展[J]. *贵阳中医学院学报*, 2015, 37(4) : 93-97.
- [11] 四川省食品药品监督管理局. 四川省中药材标准[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2011 : 343.
- [12] 李婕羚,李朝婵,胡继伟,等. 典型喀斯特山区无籽刺梨基地土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1) : 54-60.
- [13] 李慧娟,张松,江帆,等. 原子荧光法测定黔产刺梨中砷的含量[J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(3) : 141-143.
- [14] 张源和,何敬愉,马娜,等. ICP-MS法测定刺梨和无籽刺梨果实中有害重金属元素[J]. *食品工业*, 2017, 38(3) : 283-286.
- [15] WANG Y, DING X Y, YANG H, et al. A study on heavy metals pollution in soil and fruits of *Rosa roxburghii* Tratt from the planting bases located in the Karst areas of Guizhou province [J]. *Adv Materials Res*, 2014, 3384(1010) : 88-95.
- [16] 范明毅,杨皓,黄先飞,等. 喀斯特山区燃煤电厂土壤重金属污染评价[J]. *化工环保*, 2016, 36(3) : 338-344.
- [17] 国家卫生和计划生育委员会. GB5009-2014, 食品安全国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会. GB5009-2017, 食品安全国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] 国家环境保护局. GB/T 171411-1997, 土壤质量铅、镉的测定—石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 22105-2008, 土壤质量总汞、总砷的测定—原子荧光法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 李如忠,潘成荣,徐晶晶,等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, 34(3) : 1076-1085.
- [22] 张家春,林绍霞,张清海,等. 贵州草海湿地周边耕地土壤与农作物重金属污染特征[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3) : 273-278.
- [23] 中华人民共和国商务部. WM/T 2-2004, 中华人民共和国外贸行业标准: 药用植物及制剂外贸绿色行业标准[S]. 北京: 中华人民共和国商务部, 2004.
- [24] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB15618-1995, 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [25] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990 : 331-379.
- [26] 秦双双,黄静雯,袁媛,等. 中药材重金属元素及其与指标性成分相关性分析[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2018, 24(6) : 66-70.
- [27] 郑琪,南铁贵,袁媛,等. 9种市售药材中重金属含量调查[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2015, 21(3) : 14-17.
- [28] 颜秋晓,何腾兵,高安勤,等. 不同种植年限下山银花产地土壤及花蕾重金属污染特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1) : 310-315, 328.
- [29] 彭锐,谭均,孙年喜,等. 重庆市中药材重金属富集特性研究[J]. *中药材*, 2017, 40(6) : 1290-1294.
- [30] 邹素敏,杜瑞英,文典,等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(4) : 714-720.
- [31] 陈志良,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.
- [32] 李舒琦,高卓,臧飞,等. 外源Cd在施污黄土-小麦系统中的富集迁移规律[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(12) : 123-128.

[责任编辑 顾雪竹]