

张泽东,李朝婵,黄先飞,等.喀斯特地区无籽刺梨种植基地土壤重金属风险评价[J].江苏农业科学,2018,46(22):310-314.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.22.072

喀斯特地区无籽刺梨种植基地土壤重金属风险评价

张泽东¹,李朝婵²,黄先飞²,胡继伟²,范明毅²,李婕玲¹,吴先亮²

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院,贵州贵阳 550001; 2. 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,贵州贵阳 550001)

摘要:为明确贵州省喀斯特地区无籽刺梨(*Rosa Sterilis* S. D. Shi)种植基地土壤重金属污染状况,促进无籽刺梨产业健康发展。通过对贵州省主要无籽刺梨种植基地土壤中铜(Cu)、砷(As)、铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)含量进行测定和分析,参照全国土壤环境质量标准与贵州省土壤重金属背景值,采用单因子污染指数法、尼梅罗综合污染指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数法,评价无籽刺梨种植基地土壤重金属污染水平和潜在生态风险。结果表明,基地土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As、Cu 含量呈正态分布,土壤受到重金属不同程度污染,地区差异较明显,基地土壤 Cd、Cu 与 Hg 平均含量超过贵州省土壤背景值。单因子污染指数法评价表明,基地土壤受到 Cd 的严重污染,一定程度的 Hg 和 Cu 污染,其他重金属元素污染不明显。尼梅罗综合指数法评价表明,基地土壤重金属污染达到重污染级。潜在生态风险指数法评价表明,大部分种植基地土壤 Hg 潜在生态风险参数高,生态风险程度严重,基地土壤 Cd 潜在生态风险参数高,具有严重潜在生态风险,基地土壤 Cu、As、Pb 潜在风险参数相对较低,生态风险程度低。潜在生态风险指数(RI)表明,10 个基地土壤中有 8 个基地存在严重潜在生态风险,2 个基地存在重度潜在生态风险。

关键词:无籽刺梨;土壤;重金属;风险评价

中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)22-0310-05

无籽刺梨(*Rosa sterilis* S. D. Shi)别称金刺梨,属蔷薇科蔷薇属多年生攀缘类果树,为贵州省特有种,集中分布于贵阳市、安顺市、黔西南、黔南州等地区^[1]。无籽刺梨在贵州喀斯特地区瘠薄的土壤条件下能很好地生长,其特有的生态适应性,抗旱、耐瘠、浅根系,是贵州喀斯特地区植被恢复的重要树种。无籽刺梨单株产量高,富含糖、维生素、氨基酸等,且还含有 10 余种对人体有益的微量元素^[2],市场前景广阔,在贵州各地被广泛引种栽种。随着人们生活质量的不断提高,人们对绿色无公害有机产品的需求也不断增大,有机农业种植已经成为人类获取安全食品和农民增产增收的主要种植方式^[3]。近年来,人们不断地追求农产品的产值大量施用化肥农药以及开采矿山,土壤重金属污染问题日益严重^[4-5]。一旦重金属的含量超标,会危及到农产品的品质、产量,并通过食物链的富集和生物的放大作用对生态环境和人体健康带来极大的危害^[6-7]。重金属是一种难于控制的污染物,具有强毒性,长期潜伏,能不断在食物链中富集等特点^[8-10],重金属污染很难被生物降解或通过土壤自净,所以土壤遭受重金属污染很难恢复^[11],如何有效减轻和修复重金属污染,缓解其对人体、生物和生态环境的危害是当今环境问题的难题之

一^[12]。喀斯特地区地貌类型复杂、山高坡陡、土层瘠薄而不连续,生态环境脆弱,土地承载负荷大,污染不易被修复^[3],加大了该地区土壤重金属的治理难度。目前,喀斯特地区土壤研究主要集中于喀斯特坡地石漠化治理以及水分变异规律^[13-14]、土地利用方式的研究^[15-16]、土壤重金属评价^[17]、土壤肥力评价^[18]、土壤有效养分^[19]以及土壤酶与养分关系等^[20-21],对无籽刺梨种植基地土壤重金属含量的分析及风险评价研究较少。

本研究以贵州省 10 个无籽刺梨种植基地为对象,选取铜(Cu)、砷(As)、铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)等 5 种重金属元素,通过单因子污染指数法、内梅罗综合指数法、Hakanson 潜在生态危害指数法对基地土壤重金属污染进行综合评价,研究 5 种重金属在各种种植基地土壤的污染状况及潜在生态风险,为基地土壤研究提供必要的技术支持与参考依据,对促进贵州喀斯特地区无籽刺梨基地土壤治理具有一定指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省黔西南州、贵阳市和安顺市,经纬度位置分别为 25°05′~26°29′N、104°53′~105°29′E;26°48′~27°22′N、106°45′~107°17′E;25°21′~26°38′N、105°13′~106°34′E;平均海拔分别为 1 430、1 165、1 398 m;年均温度分别为 15.2、12.9、14.1℃;年降雨量分别为 1 178、1 258、1 360 mm。气候类型为亚热带高原季风湿润性气候,在湿润气候的影响下,碳酸盐岩发育,土壤类型为亚热带常绿阔叶林红、黄壤。研究区位于全球著名的喀斯特发育地带,是一个典型的喀斯特地貌区,该区属于国家科技部划定的石漠化工程治理区域,近年来在石漠化的修复过程中,无籽刺梨的生态价值和经济价值得到发掘。共 10 个基地分别为 1 号:禾丰乡

收稿日期:2017-07-04

基金项目:贵州省农业科技攻关项目(编号:黔科合 NY 字[2015]3022-1);贵州省林业科技项目(编号:黔林科[2016]09);贵州省科技厅-贵州师范大学联合基金(编号:黔科合 LH 字[2016]7203)。

作者简介:张泽东(1979—),男,贵州铜仁人,硕士研究生,从事喀斯特生态建设与区域经济研究。E-mail:1269649440@qq.com。

通信作者:李朝婵,博士,副教授,硕士生导师,主要从事植物生理生态研究。E-mail:chaochanl@gznu.edu.cn。

(HF), 2 号: 回龙镇 (HL), 3 号: 雨樟镇 (YZ), 4 号: 石厂乡 (SC), 5 号: 宁谷镇 (NG), 6 号: 鸡场乡 (JC), 7 号: 龙宫镇 (LG), 8 号: 七眼桥镇 (QYQ), 9 号: 双堡镇 (SP), 10 号: 夏云镇 (XY)。采样点地理位置见图 1。

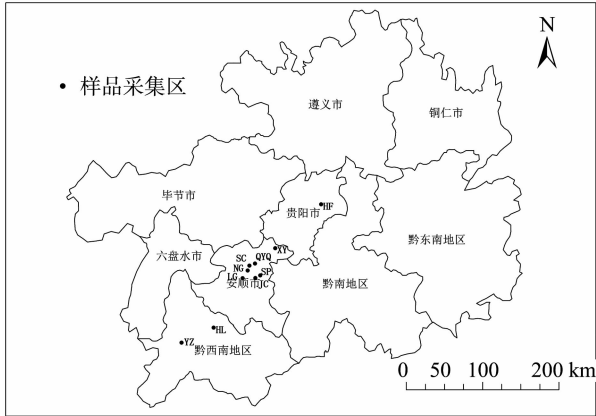


图1 贵州省无籽刺梨采样点位置及样品

1.2 样品采集

于 2015 年 10 月选定贵州省喀斯特地区 10 个无籽刺梨栽培基地, 覆盖贵阳市、黔西南州、安顺市 3 个市(州)。基于各基地种植面积大小与地理概况, 采用分层随机抽样布点法确定采样点数并编号, 每个基地分别随机采取 5~10 个土样, 采样深度为 0~30 cm, 混合均匀后按四分法各取 1 kg 带回实验室自然风干, 室内除石粒、植物根, 研磨, 过 100 目筛, 供测试分析用。

1.3 测定方法

土壤 Pb、Cu、Cd 含量的测定, 采用全消解方法进行处理^[22]; Hg 和 As 的测定采用王水消解^[23]; 土壤 pH 值的测定用水位浸提电位法, 水土比为 5:1, 测定参考 GB 1121—2006《土壤检测》; Pb、Cd、Cu 含量用德国耶拿 ZEE nit 700P 型石墨炉与火焰原子吸收光谱仪测定 (YY3 横向加热石墨管); As 和 Hg 含量采用 AF933 型原子荧光光谱仪测定 (北京吉天)。土壤试样的测定结果均以干质量计。

1.4 质量控制

样品的处理及测试过程中可能带入杂质, 为保证测量的精密度, 样品测定时均做空白试验和 3 组平行试验。分析过程中所用容器均在 5% 硝酸中浸泡 48 h 以上, 用去离子水冲洗后烘干。测定结果的相对标准偏差均保证小于 10%, 满足定量测定的要求。

1.5 数据处理

采用 ArcGIS 软件制作无籽刺梨基地土壤位置分布图, 采用 Excel、SPSS 19.0 软件对试验数据进行处理和潜在生态风险分析等。

1.6 重金属污染评价方法

1.6.1 单因子评价 采用单因子指数法对土壤进行单一元素污染评价^[24], 公式为

$$P_i = C_i / C_0 \quad (1)$$

式中: P_i 为单向污染指数; C_i 为污染物实测平均含量 (mg/kg); C_0 为起始值; i 代表某种污物。贵州省土壤元素平均背景值见表 1。污染等级划分按丁桑岚所划的 4 个等级^[25]: I 未污染, 实测值 < 背景值 ($P_i < 1$); II 轻度污染级, 1

倍污染起始值 ≤ 实测值 < 2 倍污染起始值 ($1 \leq P_i < 2$); III 中度污染级, 2 倍污染起始值 ≤ 实测值 < 3 倍污染起始值 ($2 \leq P_i < 3$); IV 重度污染级, 实测值 ≥ 3 倍污染起始值 ($P_i \geq 3$)。

表 1 贵州省土壤重金属平均背景值及其毒性系数

重金属	贵州省土壤重金属平均背景值 (mg/kg)	毒性系数
As	20.00	10
Hg	0.11	40
Cd	0.66	30
Pb	35.20	5
Cu	32.00	5

注: 毒性系数源于文献[26]。

1.6.2 尼梅罗综合污染指数 采用尼梅罗 (N. L. Nemerow) 综合污染指数法全面反映污染物对土壤的作用 (表 2), 突出高浓度污染物对环境质量的影响, 公式为

$$P = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P 为尼梅罗综合指数; P_{ave} 为土壤中所有污染物单因子指数平均值; P_{max} 为土壤中所有污染物单因子指数最大值。

表 2 土壤污染分级标准

等级划分	P	污染等级	污染水平
1	$P \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	土壤轻污染, 作物开始受到污染
4	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染	土壤、作物开始受中度污染
5	$3.0 < P$	重度污染	土壤、作物均受污染, 已相当严重

1.6.3 潜在生态风险评价 采用 Hakanson 潜在生态危害指数法划分出潜在生态危害的程度^[26]。该指数反映特定环境中每种污染物产生的影响, 也反映了多种污染物之间的综合影响。污染土壤中污染物的潜在风险参数和潜在生态危害指数法按下式可表示为:

$$F_i = C_i / C_e \quad (3)$$

$$E_i = T_i \times F_i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

式中: F_i 为污染因子 (mg/kg); C_e 为某污染物参比值 (mg/kg); E_i 为单个重金属潜在生态风险指数, $E_i < 40$ 为低度潜在生态风险, $40 \leq E_i < 80$ 为中度潜在生态风险, $80 \leq E_i < 160$ 为较重潜在生态风险, $160 \leq E_i < 320$ 为重度潜在生态风险, $E_i \geq 320$ 为严重潜在生态风险; T_i 为单个污染物毒性响应参数, Cd、As、Cu、Hg 和 Pb 的毒性系数见表 1; RI 为多种重金属潜在生态危害指数, $RI < 150$ 为低度潜在生态风险, $150 \leq RI < 300$ 为中度潜在生态风险, $300 \leq RI < 600$ 为重度潜在生态风险, $RI \geq 600$ 为严重潜在生态风险。本研究中采用贵州省土壤元素平均背景值为参比值。

2 结果与分析

2.1 无籽刺梨基地土壤重金属的含量与分布

贵州省 10 个无籽刺梨基地土壤 Cu、As、Pb、Cd、Hg 含量及其变异系数见表 3。结果表明, 基地 Cu、Cd、Hg 平均含量均

表 3 贵州省不同基地无籽刺梨种植土壤重金属含量比较

采样地点	项目	Cu	As	Pb	Cd	Hg	pH 值
HF	平均值 (mg/kg)	39.33	1.26	16.47	1.31	1.35	5.62
	标准差 (mg/kg)	12.37	0.64	4.70	0.95	1.14	0.59
	变异系数 (%)	0.31	0.51	0.29	0.73	0.84	0.10
HL	平均值 (mg/kg)	89.05	1.10	16.10	22.78	0.13	6.43
	标准差 (mg/kg)	9.95	0.37	1.58	1.29	0.05	0.43
	变异系数 (%)	0.11	0.33	0.10	0.06	0.36	0.07
YZ	平均值 (mg/kg)	174.80	1.21	3.97	8.62	2.24	5.58
	标准差 (mg/kg)	5.87	0.01	0.08	0.04	0.03	0.04
	变异系数 (%)	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01
SC	平均值 (mg/kg)	53.43	1.89	56.48	6.26	0.97	7.26
	标准差 (mg/kg)	18.33	0.29	8.69	4.26	0.96	0.13
	变异系数 (%)	0.34	0.15	0.15	0.68	0.99	0.02
NG	平均值 (mg/kg)	89.49	1.20	23.84	9.08	0.21	7.33
	标准差 (mg/kg)	56.04	0.04	0.56	1.17	0.28	0.38
	变异系数 (%)	0.63	0.03	0.02	0.13	1.32	0.05
JC	平均值 (mg/kg)	43.45	1.63	27.17	47.69	0.58	5.64
	标准差 (mg/kg)	2.33	0.44	10.10	4.64	0.59	0.18
	变异系数 (%)	0.05	0.27	0.37	0.10	1.02	0.03
LG	平均值 (mg/kg)	86.93	1.08	17.33	11.32	1.37	5.96
	标准差 (mg/kg)	0.87	0.07	0.22	0.24	0.05	0.05
	变异系数 (%)	0.01	0.07	0.01	0.02	0.04	0.01
QYQ	平均值 (mg/kg)	112.79	1.51	22.15	19.35	0.12	6.07
	标准差 (mg/kg)	43.97	0.25	1.17	0.81	0.02	0.67
	变异系数 (%)	0.39	0.17	0.05	0.04	0.20	0.11
SP	平均值 (mg/kg)	47.68	0.60	16.81	27.18	0.17	5.04
	标准差 (mg/kg)	1.03	0.07	0.69	5.09	0.01	0.18
	变异系数 (%)	0.02	0.11	0.04	0.19	0.06	0.04
XY	平均值 (mg/kg)	55.20	0.88	56.91	62.34	0.79	6.11
	标准差 (mg/kg)	7.31	0.03	1.10	0.83	0.48	0.40
	变异系数 (%)	0.13	0.04	0.01	0.61	0.07	0.07
贵州省土壤重金属平均背景值		32.00	20.00	35.20	0.66	0.11	

超过贵州省土壤背景值,SC、XY 基地 Pb 平均含量超过贵州省土壤背景值,所有基地 As 平均含量低于贵州省土壤背景值。与《国家环境质量标准》^[27] 二级标准相比,所有基地土壤 As 和 Pb 平均含量均未超标,但基地土壤 Cu、Cd、Hg 超标率分别达 50%、100%、60%。

从各基地土壤重金属的空间变异程度分析,各基地土壤的变异系数差别很大,其中,整体以 Hg 的变异系数较大,如 NG 土壤基地 Hg 的变异系数为 1.32%,表明基地土壤中重金属的空间分布有一定差异,各基地重金属含量的最高值与最低值之比均大于 2 倍以上,这可能与受外界的干扰活动有关。通过基地土壤 pH 值和重金属含量频次分布图,用 Shapiro - Wilk 法对数据进行正态检验,得出 pH 值、As 含量属于正态分布,Cu、Pb、Cd 和 Hg 含量属于偏正态分布(图 2)。

2.2 重金属污染评价

2.2.1 喀斯特地区无籽刺梨种植基地土壤重金属污染综合评价与单因子评价 土壤重金属污染是众多指标综合作用产生的结果,在气候条件 and 生产技术水平相同的地理区域,往往受成土母质、人类活动影响^[27],喀斯特地区表现尤为明显。因此,选取 Cu、As、Pb、Cd、Hg 含量和 pH 值 6 个指标对喀斯特地区 10 个无籽刺梨种植基地土壤重金属污染进行定量化综合评价。从表 4 可以看出,喀斯特地区无籽刺梨种植基地土壤重金属综合污染指数变幅在 7.38 ~ 68.42。综合污染指数大于 3,均为重度污染级。

2.2.1.1 单一元素的影响 除 HF 刺梨基地土壤 Cd 轻度污染外,其他基地 Cd 为重度污染;As 在所有刺梨基地土壤中均未受污染;Cu 在 HF、SC、JC、SP、XY 基地为轻度污染,在 HL、LG 基地为中度污染,在 YZ、QYQ 基地为重度污染;Pb 在 XY、SC 基地土壤中为轻度污染,其他基地土壤均无污染;Hg 在 HF、YZ、SC、JC、LG、XY 基地为重度污染,在 HL、NG、QYQ、SP 基地为轻度污染。

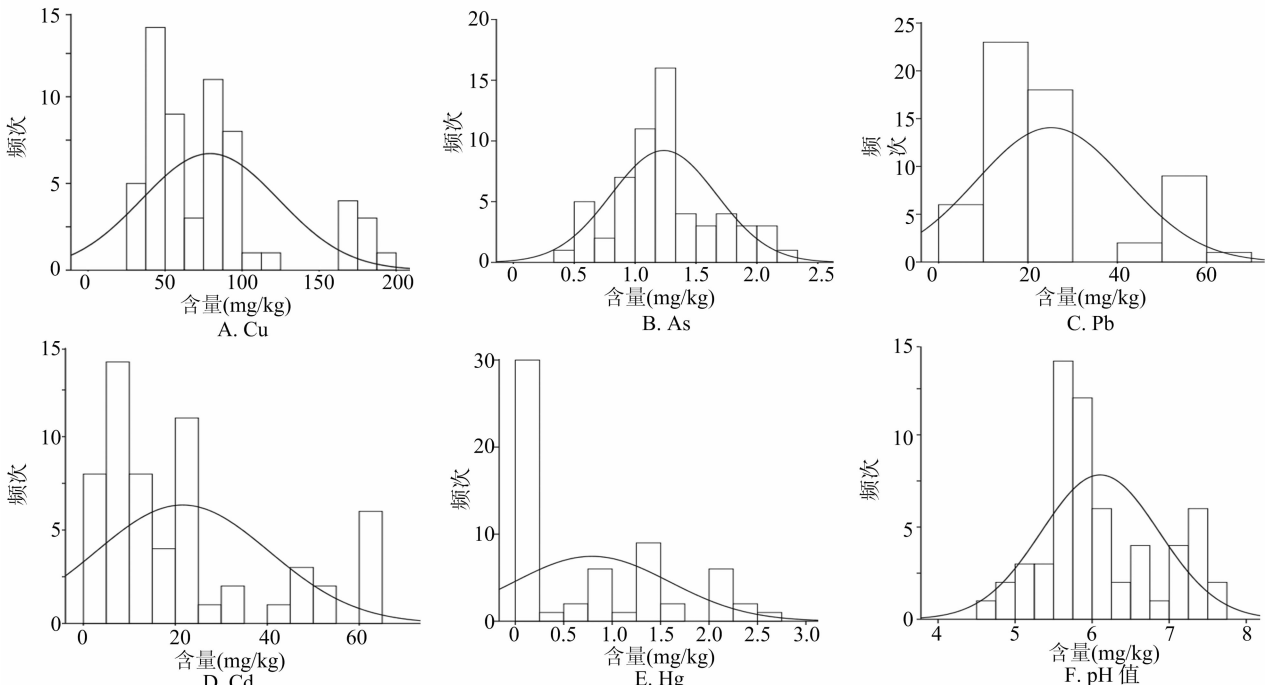


图2 无籽刺梨基地土壤重金属含量和 pH 值频率分布

表 4 贵州省无籽刺梨种植不同基地土壤重金属的污染评价指数

采样地点	Cu		As		Pb		Cd		Hg		综合污染指数	程度
	污染指数	程度	污染指数	程度	污染指数	程度	污染指数	程度	污染指数	程度		
HF	1.23	轻	0.06	未	0.47	未	1.98	轻	12.23	重	8.94	重
HL	2.78	中	0.06	未	0.46	未	34.52	重	1.21	轻	25.03	重
YZ	5.46	重	0.06	未	0.11	未	13.06	重	20.35	重	15.41	重
SC	1.67	轻	0.10	未	1.61	轻	9.49	重	8.78	重	7.38	重
NG	2.80	中	0.06	未	0.68	未	13.76	重	1.93	轻	10.10	重
JC	1.36	轻	0.08	未	0.77	未	72.27	重	5.28	重	52.33	重
LG	2.72	中	0.05	未	0.49	未	17.15	重	12.40	重	12.98	重
QYQ	3.52	重	0.08	未	0.63	未	29.32	重	1.05	轻	21.30	重
SP	1.49	轻	0.03	未	0.48	未	41.18	重	1.51	轻	29.80	重
XY	1.73	轻	0.04	未	1.61	轻	94.46	重	7.19	重	68.42	重

注:轻表示轻度污染;中表示中度污染;重表示重度污染;未表示未污染。

2.2.1.2 单一基地的影响 不同重金属元素对无籽刺梨土壤的影响不同, HF 基地土壤中 Hg 是重度污染因子, 土壤受 Cd、Cu 轻度污染, 土壤未受 As、Pb 污染; HL 基地土壤 Cd 是重度污染因子, 土壤受 Cu 中度污染和 Hg 轻度污染, 未受 As、Pb 污染; YZ 基地土壤 Cu、Cd、Hg 是重度污染因子, 未受 As、Pb 污染; SC 基地土壤 Hg、Cd 为重度污染因子, 土壤受 Cu、Pb 轻度污染, 未受 As 污染; NG 基地土壤中 Cd 是重度污染因子, 土壤受 Cu 中度污染和 Hg 轻度污染, 未受 As 和 Pb 污染; JC 基地土壤中 Cd、Hg 是重度污染因子, 土壤受 Cu 轻度污染,

未受 As、Pb 污染; LG 基地土壤 Cd、Hg 是重度污染因子, 土壤受 Cu 中度污染, 未受 As、Pb 污染; QYQ 刺梨基地土壤的重度污染因子是 Cu 和 Cd, 土壤受 Hg 轻度污染, 未受 As、Pb 污染; SP 基地土壤 Cd 为重度污染因子, 土壤受 Cu、Hg 轻度污染, 未受 As、Pb 污染; XY 刺梨基地土壤 Cd、Hg 是重度污染因子, 土壤受 Cu、Pb 轻度污染, 未受 As 污染。

2.2.2 潜在生态风险评价 从表 5 可以看出, 10 个无籽刺梨基地土壤中, 除 HF、NG 基地重金属为重度潜在风险, 其他基地土壤为严重潜在风险。

表 5 无籽刺梨不同基地土壤重金属的潜在生态风险评价结果

采样地点	潜在生态风险参数					潜在生态风险指数	潜在生态风险程度
	Cu	As	Pb	Cd	Hg		
HF	6.15	0.63	2.34	59.39	489.24	557.75	重度
HL	13.91	0.55	2.29	1 035.63	48.22	1 100.59	严重
YZ	27.31	0.60	0.56	391.91	813.96	1 234.35	严重
SC	8.35	0.95	8.02	284.67	351.06	653.05	严重
NG	13.98	0.60	3.39	412.65	77.09	507.71	重度
JC	6.79	0.82	3.86	2 167.94	211.06	2 390.46	严重
LG	13.58	0.54	2.46	514.39	496.87	1 027.84	严重
QYQ	17.62	0.77	3.15	879.46	41.82	942.80	严重
SP	7.45	0.30	2.39	1 235.44	60.22	1 305.80	严重
XY	8.63	0.44	8.08	2 833.73	287.64	3 138.52	严重

通过潜在生态风险参数和潜在生态风险指数分析, Cd、Hg、Cu 是整个研究区受到污染的元素, 由于 Cd、Hg 毒性系数高, 使无籽刺梨基地土壤潜在风险程度高, Cu 的毒性系数相对小, 基地土壤 Cu 虽然受到污染, 但对风险贡献率不大。所以, 无籽刺梨基地土壤的潜在危害风险主要来自于 Cd、Hg。

3 讨论与结论

基于喀斯特山区无籽刺梨基地土壤重金属含量分析研究、土壤污染定量化综合分析、单因子与潜在风险分析, 发现基地土壤中重金属含量差异较大, 不同基地的污染、风险程度不同。其中, 基地土壤 Cd 元素全部超出 GB 15618—1995《土壤环境质量》二级标准, 此研究与廖银芳等的研究结果一致, 贵州省土壤 Cd 污染尤为严重, 全省大部分地区遭受 Cd 污染^[28-29], 主要与土壤的基质有关, 可能与燃煤及矿产开采有关^[30]。6 个基地土壤 Hg 超过 GB 15618—1995《土壤环境标

准》二级标准, 可能与自然原因有关, 贵州省位于汞矿化带, 自然释放的汞污染物进入大气环境, 通过大气沉降到达土壤^[31]。也与人为原因有关, 由于 Hg 的特殊理化性质, 人们对 Hg 的需求越来越大, 而贵州省境内分布着大量的汞矿床, 汞矿大量开采造成土壤污染^[32]。5 个基地土壤 Cu 超过《土壤环境质量》二级标准, 这可能与土壤的成土母质、土壤施肥和含硫酸铜杀虫剂等有关^[33]。

在地质上喀斯特山区是重要的成矿富集带, 已成为我国重要的矿产产区, 由于该地区生态环境脆弱^[34], 碳酸盐岩母质发育土壤中 Pb、Cd、Hg、As、Cu 等重金属元素背景值通常也高于非喀斯特地区成土母质发育的土壤^[35]; 重金属污染物在土壤环境中长期潜伏, 很难被植物和土壤降解, 它不仅影响农作物产量和生长, 可能还使土壤结构和功能发生变化, 对喀斯特山区影响尤为严重^[36]。土壤污染具有隐蔽性、滞后性、累积性、不可逆转性等特点, 而喀斯特山区裂隙构造发育过程中

通过大气降水的淋溶作用,下渗到深层土壤,对深层土壤造成污染,须引起足够重视。

贵州省 10 个无籽刺梨种植基地土壤 Hg、Cd、Cu 元素均呈现不同程度的超标现象,Pb、As 含量符合无公害产地环境要求。其中,基地土壤中 Hg 的超标率达 60%,Cu 的超标率达 50%,Cd 的超标率达 100%。

尼梅罗综合污染指数法显示,所有基地土壤重金属污染为重污染级;单因子指数法评价显示,所有的无籽刺梨基地土壤受到不同程度的重金属污染,Cd 污染较严重,9 个种植基地土壤受到 Cd 的严重污染,6 个基地土壤受到 Hg 的重度污染。

潜在生态风险参数显示,大部分基地土壤 Hg、Cd 的潜在风险参数很高,7 个基地土壤 Hg、Cd 的潜在生态风险处于中度潜在生态风险以上;*RI* 显示 8 个基地土壤重金属处于严重潜在生态风险程度。

参考文献:

- [1] 李捷玲,胡继伟,李朝婵. 贵州不同种植地区无籽刺梨果实品质评价[J]. 果树学报,2016,33(10):1259-1268.
- [2] 安明态,杨文章. 贵州野生攀缘植物资源及开发利用[J]. 林业资产管理,2007(5):92-96.
- [3] 伍应德. 基于生态环境的贵州喀斯特山区现代农业发展模式探讨[J]. 贵州农业科学,2013,41(8):246-249.
- [4] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, et al. Uptake of heavy metals by vegetables irrigated using wastewater and the subsequent risks in Harare, Zimbabwe[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2007,32(15):1399-1405.
- [5] 刘清,王子健. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展[J]. 环境科学,1996,17(1):89-92.
- [6] Zhang W G, Feng H, Chang J N, et al. Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: an assessment from different indexes[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5):1533-1543.
- [7] Zarcinas B A, Pongsakul P, McLaughlin M J, et al. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. 2. Thailand[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004,26(4):359-371.
- [8] 黄先飞,秦樊鑫,胡继伟. 重金属污染与化学形态研究进展[J]. 微量元素与健康研究,2008,25(1):48-51.
- [9] 雷国建,陈志良,刘千钧,等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. 中国环境科学,2013,33(增刊1):49-53.
- [10] 谢小进,康建成,闫国东,等. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析[J]. 中国环境科学,2010,30(8):1110-1117.
- [11] 海米提·依米提,祖皮艳木·买买提,李建涛,等. 焉耆盆地土壤重金属的污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学,2014,34(6):1523-1530.
- [12] 梅凡民,徐朝友. 西安市大气降尘中 Cu、Pb、Zn、Ni 的化学形态及生物有效性——以燃煤电厂、生活垃圾电厂、产业开发区和建材商业区为例[J]. 安全与环境学报,2012,12(1):130-134.
- [13] 周梦维,王世杰,李阳兵,等. 石漠化景观生态优化途径初探:以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 中国岩溶,2007,26(6):91-97.
- [14] 段正峰,傅瓦利,甄晓君,等. 岩溶区土地利用方式对土壤有机碳组分及其分布特征的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(2):

109-114.

- [15] 杨皓,胡继伟,黄先飞,等. 喀斯特山区金刺梨种植基地土壤有效养分含量状况研究[J]. 河南农业科学,2015,44(7):53-56.
- [16] 张志才,陈喜,石鹏,等. 贵州喀斯特峰丛山体土壤水分分布特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(5):803-807.
- [17] 刘涛泽,刘丛强,张伟,等. 喀斯特地区坡地土壤可溶性有机碳的分布特征[J]. 中国环境科学,2009,29(3):248-253.
- [18] 李新爱,肖和艾,吴金水,等. 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(10):1827-1831.
- [19] 杨珊,何寻阳,苏以荣,等. 岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1591-1602.
- [20] Yang H, Hu J W, Huang X F, et al. Risk assessment of heavy metals pollution for *Rosa sterilis* and soil from planting bases located in karst areas of Guizhou Province[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014,700:475-481.
- [21] 杨皓,胡继伟,黄先飞,等. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):50-55.
- [22] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [23] 罗国兵. 冷原子吸收光谱法测定污水中总汞的两种消解方法比较[J]. 理化检验-化学分册,2005,41(3):167-168.
- [24] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [25] 丁桑岚. 环境评价概论[M]. 北京:化学工业出版社,2001:140-143.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [27] 陈海生,魏跃伟,刘国顺,等. 河南省烤烟种植区土壤综合肥力评价[J]. 水土保持研究,2011,18(3):131-136.
- [28] 廖银芳,张方军,柴嘉琳. 贵州典型汞污染问题综述[J]. 环保科技,2016,22(3):48-50.
- [29] 张莉,周康. 贵州省土壤重金属污染现状与对策[J]. 贵州农业科学,2005,33(5):114-115.
- [30] 王济,王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2005,23(2):113-120.
- [31] 冯新斌,陈业材,朱卫国. 土壤挥发性汞释放通量研究[J]. 环境科学,1996,17(2):20-25.
- [32] 廖银芳,柴嘉琳,张军方. 贵州典型汞污染问题综述[J]. 环保科技,2016(3):48-51.
- [33] 杨皓. 贵州喀斯特地区无籽刺梨基地土壤、果实及其抗氧化物质的提取研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2016.
- [34] 兰安军,张百平,熊康宁,等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J]. 地理研究,2003,22(6):733-741.
- [35] 杨皓,范明毅,黄先飞,等. 喀斯特山区燃煤型电厂周边农业土壤中重金属的污染特征及评价[J]. 生态环境学报,2016,25(5):893-902.
- [36] 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.