

蔡娜,谢静,党华美,等. 贵州省主要猕猴桃果园土壤重金属安全评价[J]. 江苏农业科学,2019,47(1):255-260.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.01.060

贵州省主要猕猴桃果园土壤重金属安全评价

蔡娜¹, 谢静², 党华美³, 刘晗⁴, 高安勤⁵, 何腾兵¹

(1. 贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省农业资源环境管理站, 贵州贵阳 550001;

3. 河南省驻马店市城乡一体化示范区刘阁办事处, 河南驻马店 463000; 4. 广东省深圳市龙岗区香山里小学, 广东深圳 518053;

5. 贵州省六盘水市农业农村委员会, 贵州六盘水 553000)

摘要:探讨贵州省主要猕猴桃果园土壤中镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、铅(Pb)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)的重金属含量特征,采用单因子污染指数法和多因子污染指数法分析猕猴桃果园土壤环境质量。在猕猴桃果园中土壤重金属Cd、Hg、Pb、As和Zn的平均含量处于正常水平,但是Cr和Cu的含量偏高,分别达到了385.20 mg/kg和215.57 mg/kg;7种重金属中Cd和Cu存在单因子综合污染,Pb和Hg的单因子污染指数(P_i)均小于0.7,污染等级为安全。基于国家土壤环境质量二级标准的水城县的4个园区Pb、As和Hg的单因子污染指数都小于0.7,污染等级为安全,污染水平为清洁,而Cd的单因子污染指数都大于1,土壤重金属平均 P_i 大小排序为Cd > Cr > Cu > Zn > As > Hg > Pb;基于国家土壤环境质量二级标准的修文县2个乡(镇)的4个猕猴桃果园土壤中Zn、Pb和Hg单因子污染指数均未超过0.7,污染等级为安全,污染水平为清洁;基于国家土壤环境质量二级标准的Cd单因子污染指数除猕猴桃小于0.7外,其余果园都大于1,土壤重金属平均 P_i 排序为Cd > Cu > Cr > As > Hg > Zn > Pb;基于国家土壤环境质量二级标准的修文县和水城县猕猴桃果园土壤重金属综合污染指数分别为1.38、2.03,污染等级分别为轻度和中度。Cu、Cd、Cr和As在一些地方甚至达到了重度污染,各果园在进行土壤Cu和Cd治理的同时,需要对Cr和As进行密切监测,找出外在污染源。

关键词:土壤;重金属;安全评价;猕猴桃;果园

中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)01-0255-06

猕猴桃营养丰富,且适应性强,栽培种植容易,成本低,效益高,是重点打造的重要果品之一,贵州六盘水市(水城)和修文县都是典型的猕猴桃种植基地。重金属污染因具有毒性、易通过食物链在植物、动物和人体内累积,对生态环境和人体健康构成严重威胁,其污染导致的安全问题也成为全球

关注的环境问题之一。目前,我国大部分地区的土壤重金属污染问题比较突出,已经成为影响农产品产地环境质量,进而影响农产品质量安全的凸显问题。果园土壤重金属是构成猕猴桃产地环境监测的一项重要指标,土壤重金属含量被认为是影响农产品安全的重要因素,也是影响果品中重金属含量的主要因素之一^[1-2]。在果园土壤重金属风险评价方面,前人研究主要集中在火龙果^[3]、苹果^[4]、柑橘^[5]、梨^[6]、葡萄^[7]、樱桃^[8]等果园,对于猕猴桃的研究则主要是溃疡病、产业化、品质等方面,在猕猴桃果园方面,李晓彤等对陕西省眉县和周至县猕猴桃果园中土壤重金属进行了研究,发现陕西省眉县和周至县猕猴桃果园土壤属尚清洁水平,土壤环境质量合格^[9]。杨玉等研究湖南省54个猕猴桃果园,发现有31.5%

收稿日期:2018-04-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:U1612442);贵州省发展和改革委员会项目(编号:黔发改高技[2017]950号)。

作者简介:蔡娜(1992—),女,贵州思南人,硕士研究生,研究方向为土壤学。E-mail:2270618955@qq.com。

通信作者:何腾兵,教授,硕士生导师,主要从事土壤学、环境科学的教学与科研工作。E-mail:hetengbing@163.com。

[10] Sung H W, Sonaje K, Liao Z X, et al. pH-responsive nanoparticles shelled with chitosan for oral delivery of insulin: from mechanism to therapeutic applications[J]. Accounts of Chemical Research, 2012, 45(4): 619-629.

[11] 王建涛,潘晓晨,王淑芳. γ -聚谷氨酸/壳聚糖/纳米银复合水凝胶的制备和表征[J]. 离子交换与吸附, 2016, 32(4): 297-305.

[12] Riteau N, Sher A. Chitosan: an adjuvant with an unanticipated STING[J]. Immunity, 2016, 44(3): 522-524.

[13] Zargar V, Asghari M, Dashti A, et al. A review on chitin and chitosan polymers: structure, chemistry, solubility, derivatives, and applications[J]. ChemBioEng Reviews, 2015, 2(3): 204-226.

[14] Sarmiento B, Ferreira D, Veiga F, et al. Characterization of insulin -

loaded alginate nanoparticles produced by ionotropic pre-gelation through DSC and FTIR studies[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 66(1): 1-7.

[15] Pereira A E S, Sandoval-Herrera I E, Zavala-Betancourt S A, et al. γ -Polyglutamic acid/chitosan nanoparticles for the plant growth regulator gibberellic acid: characterization and evaluation of biological activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 1862-1873.

[16] 李继成,张富仓,孙亚联,等. 施肥条件下保水剂对土壤蒸发和土壤团聚性状的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 48-53, 89.

[17] 王丹,宋湛谦,商士斌,等. 高分子材料在化学固沙中的应用[J]. 生物质化学工程, 2006, 40(3): 44-47.

的土壤受到了不同程度污染^[7]。而涉及喀斯特地区的猕猴桃果园土壤重金属安全评价尚未有介绍^[10], 目前关于贵州等喀斯特地区猕猴桃果园的分析主要集中在果园土壤酸碱度和养分的调查和分析、土壤-猕猴桃系统重金属含量及其富集特征^[11-12]。此外, 刘晗发现贵州猕猴桃基地土壤重金属赋存形态主要为残渣态和有机结合态^[13]。目前尚未有涉及贵州猕猴桃果园土壤重金属安全评价的问题。据此, 笔者依据国家土壤环境质量二级标准和贵州省农业土壤背景值开展了贵州省不同地区猕猴桃果园土壤重金属环境质量评价, 为确保贵州猕猴桃果园土壤的长期安全提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州的土壤多由碳酸岩发育而来, 然而由碳酸岩发育的土壤中多存在镉(Cd)的地球化学高背景现象。修文县位于贵州省安顺地区东北部, 地处 106°22′~106°53′E, 26°45′~27°12′N, 北与息烽县接壤, 东及东北与开阳县相连, 南与贵阳

市毗邻, 西南与清镇县隔猫跳河相望, 西及西北与黔西县、金沙县以乌江为界。修文县属亚热带季风性湿润气候, 气候温和, 冬无严寒, 夏无酷暑, 水热同期。年降水量为 976.6~1 239.3 mm, 年平均气温为 13.2~15.0℃, 无霜期平均为 266 d。地形地貌较为复杂, 山地总面积为 572.80 km², 岩溶发育较好。修文县以猕猴桃为主的精品水果的种植面积达 1.87 万 hm², 猕猴桃种植面积为 1 万 hm², 种植面积占贵州省猕猴桃总种植面积的 55%。

水城县位于贵州省西部, 地处 104°33′57″~105°15′23″E, 26°02′56″~26°55′21″N 之间, 东邻六枝、纳雍, 西接宣威、威宁, 南抵普安、盘县, 北与赫章毗邻。水城县具有明显的季风气候特点, 雨水充沛, 雨热同季, 暖湿共节, 全县雨量充沛, 年平均降水量在 1 100~1 300 mm 之间, 平均气温在 11~17℃之间, 无霜期在 240 d 左右。贵州省六盘水市水城县猕猴桃种植基地作为全省综合排名第一的农业园区, 是贵州省委、省政府重点打造的“100 个现代高效农业示范园区”之一, 总规划面积达 4 384 hm²。贵州猕猴桃果园基本情况见表 1。

表 1 贵州猕猴桃果园基本情况

编号	果园地点	土壤类型	经度	纬度	海拔 (m)	采样深度 (cm)	土壤样品数 (个)
I	贵阳市修文县谷堡乡	黄壤	106°30′58.58″E	26°51′27.09″N	1 309.62	0~40	4
II	贵阳市修文县谷堡乡猕猴桃	黄壤	106°39′30.17″E	26°52′31.14″N	1 294.77	0~40	4
III	贵阳市修文县龙场镇马关村	黄壤	106°34′30.31″E	26°53′47.46″N	1 349.78	0~40	4
IV	贵阳市修文县龙场镇放马坪村	黄壤	106°34′30.31″E	26°50′33.33″N	1 253.99	0~40	4
V	六盘水市水城县发耳乡	黄壤	104°45′38.99″E	26°17′52.01″N	1 371.67	0~40	4
VI	六盘水市水城县都格乡	紫色土	104°42′0.77″E	26°21′43.40″N	1 111.67	0~40	4
VII	六盘水市水城县猴场乡	黄壤	105°07′33.88″E	26°13′57.65″N	1 106.19	0~40	6
VIII	六盘水市水城县顺场乡	黄壤	104°50′6.23″E	26°09′30.71″N	1 803.78	0~40	5

1.2 样品的采集与制备

在选取的具有典型代表性的猕猴桃种植基地及大面积种植区, 按对角线间隔进行取样。采样用竹削刀取 0~40 cm 土壤, 充分混合后用四分法取舍, 保留 1 kg 土壤装入布袋中, 标记并带回实验室。将取回土壤摊放在洁净牛皮纸上风干, 剔除石块、残根等杂物, 用木棍碾压, 过 1 mm 尼龙筛; 进一步用瓷钵研细, 过 0.25 mm 尼龙筛, 供分析测点。其中为防止采样人为因素影响, 样品混合、装袋、粉碎、研磨等处理过程应避免金属用具, 使用木头、塑料、搪瓷等用具。修文县采集 16 个样品, 水城县采集 19 个样品, 共 35 个土壤样品。

1.3 样品测定

pH 值: 采用水浸提-电位法(水、土质量比=2.5:1)测定。重金属铜(Cu)、锌(Zn)、铬(Cr)含量: 用硝酸-高氯酸-氢氟酸三酸消解, 采用火焰原子吸收分光光度法测定。镉(Cd)和铅(Pb)含量采用石墨炉原子吸收分光光度法测定; 砷(As)和汞(Hg)含量采用王水消解, 双道原子荧光光度计测定。为保证分析质量, 每一批样品设置 2 个空白, 样品消解以及上机过程中带有土壤标准物质[GSS-5、GBW(E)070043]进行质量控制。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2016、SPSS 19.0 进行统计分析。

1.5 土壤重金属污染评价方法

(1) 单因子污染指数:

$$P_i = C_i / S_i。$$

式中: P_i 为第 i 种污染物单因子污染指数; C_i 为第 i 种污染物实测浓度; S_i 为第 i 种污染物评价标准。单因子污染指数法是以土壤单项污染物的实测值与评价标准相比, 比值即为分指数, 用以表示土壤中该污染物的污染程度, 其原理简单, 易于操作, 被广泛应用, 可确定主要污染物及危害程度^[13]。

(2) 内梅罗综合污染指数:

$$P_{综} = \sqrt{\frac{(P_{imax})^2 + (P_{imean})^2}{2}}。$$

式中: $P_{综}$ 为综合污染指数; $P_{imax}^2 = (C_i / S_i)_{max}^2$ 为所有土壤的污染物中单项污染因子中最大值的平方; $P_{iave}^2 = (C_i / S_i)_{ave}^2$, 为所有土壤的污染物中单项污染因子中平均值的平方。

采用内梅罗指数法计算综合污染指数进行评价, 来确定土壤环境的总体质量, 根据内梅罗指数大小对土壤环境质量进行分级(表 2)。内梅罗指数法涵盖了单因子污染指数平均值和最高值, 可以突出污染较重的污染物, 给较严重的污染物赋予较大的权值, 能较全面地反映土壤环境的总体质量, 从而客观地对土壤环境质量进行评价^[14-15]。

贵州省农业土壤中 Cr、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg、As 含量的背景值分别为 95.900、26.000、82.000、0.659、35.200、0.110、20.000 mg/kg。部分土壤环境质量二级标准内容见表 3。

表 2 土壤污染分级标准

等级划分	单因子污染指数	综合污染指数	污染程度		污染水平
I	$P_i \leq 0.7$	$P_{\text{综}} < 0.7$	安全	清洁	
II	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒级	尚清洁	
III	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染	土壤污染超过背景值,视为轻度污染,作物开始污染	
IV	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染	土壤、作物均受到中度污染	
V	$P_i > 3.0$	$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染	土壤、作物受污染已相当严重	

表 3 土壤环境质量二级标准部分内容

pH 值	Cr		Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	As	
	水田	旱地						水田	旱地
<6.5	250	150	50	200	0.3	250	0.3	30	40
6.5~7.5	300	200	100	250	0.3	300	0.5	25	30
>7.5	350	250	100	300	0.6	350	1.0	20	25

2 结果与分析

2.1 猕猴桃果园土壤重金属含量状况

从表 4 可知,修文县猕猴桃果园土壤重金属中,Cr 含量最大值为(247.11±73.91) mg/kg,最小值为(108.47±86.97) mg/kg,平均值为(109.17±39.45) mg/kg,变异系数为 36.14%;Cd 含量的最大值为(1.08±0.25) mg/kg,最小值为(0.24±0.03) mg/kg,平均值为(0.32±0.33) mg/kg,变异系数为 103.13%;Hg 含量的最大值为(0.20±0.17) mg/kg,最小值为(0.08±0.02) mg/kg,平均值为(0.13±0.03) mg/kg,变异系数为 23.08%;As 含量的最大值为(76.12±44.94) mg/kg,最小值为(15.92±14.89) mg/kg,平均值为(27.51±6.51) mg/kg,变异系数为 23.67%;Pb 含量的最大值为(96.63±31.24) mg/kg,最小值为(22.35±18.13) mg/kg,平均值为(35.78±13.39) mg/kg,变异系数为 37.42%;Cu 含量的最大值为(155.93±10.55) mg/kg,最小值为(26.46±23.01) mg/kg,平均值为(50.26±23.89) mg/kg,变异系数为 47.53%;Zn 含量的最大值为(327.07±7.86) mg/kg,最小值为(71.54±28.87) mg/kg,平均值为(75.95±48.98) mg/kg,变异系数为 64.49%。其中,在 4 个园区中 Cr、Cd、Cu 含量最高的是谷堡,分别是 247.11、1.08、155.93 mg/kg,较低的为猕猴桃、放马坪,前者 Cr、Cd、

Cu 含量分别为 124.56、0.24、46.00 mg/kg,后者 Cr、Cu 含量分别为 108.47、26.46 mg/kg;As、Pb、Zn 含量最高的为猕猴桃,分别为 76.12、96.63、327.07 mg/kg;Hg 最高值和最低值为马关、放马坪,其值为 0.20、0.08 mg/kg。从总体上看,修文县谷堡猕猴桃果园土壤重金属 Cr、Cu、Cd 的含量要比马关、放马坪、猕猴桃的高。

由表 5 可以看出,水城县猕猴桃果园土壤重金属中,Cr 含量最大值为(426.79±355.06) mg/kg,最小值为(112.56±88.95) mg/kg,平均值为(216.76±44.70) mg/kg,变异系数为 20.62%;Cd 含量的最大值为(5.74±0.39) mg/kg,最小值为(0.46±0.34) mg/kg,平均值为(1.15±0.65) mg/kg,变异系数为 56.52%;Hg 含量的最大值为(0.16±0.03) mg/kg,最小值为(0.03±0.01) mg/kg,平均值为(0.07±0.03) mg/kg,变异系数为 42.86%;As 含量的最大值为(37.97±5.62) mg/kg,最小值为(3.02±1.93) mg/kg,平均值为(11.22±6.43) mg/kg,变异系数为 57.31%;Pb 含量的最大值为(55.90±13.63) mg/kg,最小值为(18.26±12.96) mg/kg,平均值为(24.25±7.58) mg/kg,变异系数为 31.26%;Cu 含量的最大值为(301.02±162.03) mg/kg,最小值为(162.21±138.12) mg/kg,平均值为(172.94±47.80) mg/kg,变异系数为 27.64%;Zn 含量的最大值为(241.59±155.06) mg/kg,最小值为(77.97±69.42) mg/kg,平均值为(160.54±16.11) mg/kg,变异系数为 10.03%。Cr 含量最高是都格,为 426.79 mg/kg;As、Cu、Hg 含量最高都为顺场,分别为 37.97、301.02、0.16 mg/kg;Pb、Zn 含量最高的均为猴场,分别为 55.90、241.59 mg/kg;Cd 含量的最高、最低值分别出现在猴场、发耳,分别为 5.74、0.46 mg/kg;Pb、Hg 含量最低的均为都格,分别为 18.26、0.03 mg/kg。

表 4 修文县猕猴桃果园土壤重金属含量

重金属	不同果园测定值(mg/kg)				平均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)
	I	II	III	IV			
Cr	247.11±73.91	124.56±51.97	129.42±72.38	108.47±86.97	109.17	39.45	36.14
Cd	1.08±0.25	0.24±0.03	0.59±0.13	1.08±0.01	0.32	0.33	103.13
Hg	0.19±0.10	0.08±0.02	0.20±0.17	0.17±0.08	0.13	0.03	23.08
As	16.69±10.71	76.12±44.94	15.92±14.89	22.69±9.37	27.51	6.51	23.67
Pb	37.78±16.39	96.63±31.24	22.35±18.13	41.77±20.41	35.78	13.39	37.42
Cu	155.93±10.55	46.00±17.56	70.84±51.56	26.46±23.01	50.26	23.89	47.53
Zn	71.54±28.87	327.07±7.86	91.45±69.02	91.55±60.26	75.95	48.98	64.49

2.2 猕猴桃果园土壤重金属分布特征

变异系数反映了各果园土壤中各重金属元素分布的均匀性。由表 6 可知,除 Hg、As 外,其余 5 种元素水城县的变异系数要小于修文县,表明其在水城县分布得要均匀些,Hg、As 在修文县分布较均匀,其中 Cd 在修文县的变异系数超过 100%,分布极不均匀。7 种重金属的平均变异程度中,修文县猕猴桃果园中 As 的变异系数最小,在修文县的 4 个园区中

分布最均匀;Cd 在谷堡、放马坪、猕猴桃分布较不均匀;Zn 的分布除了在猕猴桃的分布极不均匀,变异系数甚至达到了 139.61%,其余 3 个园区分布较为均匀。在水城县 4 个果园中,Zn 的变异系数最小,分布最为均匀;Hg 在发耳、都格、顺场分布较为不均匀;Cd 在猴场分布极不均匀,变异系数甚至达到了 101.77%。以变异系数大小为标准对土壤重金属差异性进行粗略分级:变异系数<10%,土壤重金属含量表现为

表 5 水城县猕猴桃果园土壤重金属含量

重金属	不同果园测定值(mg/kg)				平均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)
	V	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ			
Cr	112.56±88.95	426.79±355.06	341.87±93.45	176.51±90.49	216.76	44.70	20.62
Cd	0.46±0.34	0.98±0.59	5.74±0.39	1.72±0.95	1.15	0.65	56.52
Hg	0.12±0.07	0.03±0.01	0.11±0.02	0.16±0.03	0.07	0.03	42.86
As	10.69±8.76	3.02±1.93	30.92±3.57	37.97±5.62	11.22	6.43	57.31
Pb	30.96±27.66	18.26±12.96	55.90±13.63	32.26±15.00	24.25	7.58	31.26
Cu	162.21±138.12	269.95±126.21	222.64±75.04	301.02±162.03	172.94	47.80	27.64
Zn	77.97±69.42	196.63±180.27	241.59±155.06	216.86±174.56	160.54	16.11	10.03

表 6 猕猴桃果园土壤重金属含量变异系数

果园 地点	编号	重金属含量变异系数(%)						
		Cr	Cd	Hg	As	Pb	Cu	Zn
修文县	I	58.61	78.66	30.90	23.15	43.42	86.89	48.63
	Ⅱ	34.84	77.80	50.47	25.50	47.03	36.91	139.61
	Ⅲ	28.00	75.51	19.64	3.63	10.49	16.00	14.02
	Ⅳ	10.56	188.98	29.17	35.72	30.85	6.06	19.51
水城县	V	13.01	15.13	24.41	11.38	5.64	8.07	5.82
	Ⅵ	9.66	24.77	36.26	21.93	16.91	35.62	4.58
	Ⅶ	36.17	101.77	51.64	76.44	62.79	43.66	18.17
	Ⅷ	28.10	20.27	67.39	70.72	31.24	24.54	8.99

弱变异性;10%≤变异系数<100%,土壤重金属含量表现为中等变异性;变异系数≥100%,土壤重金属含量表现为强变异性。在修文县的4个地方中,除Zn、Cd、As、Cu外,其余土壤重金属都为中等变异性;在水城县的4个地方中,除Cd在猴场为强变异性外,其余元素在各个地区均为弱变异性或中等变异性。

2.3 猕猴桃果园土壤重金属污染评价

2.3.1 基于国家土壤环境质量二级标准的内梅罗综合污染指数法评价结果 由表7可以看出,修文县的4个猕猴桃果园中Zn、Pb和Hg单因子污染指数均未超过0.7,污染等级为

安全,污染水平为清洁;Cd单因子污染指数除猕猴桃园小于0.7外,其余都大于1,土壤重金属平均 P_i 值为Cd>Cu>Cr>As>Hg>Zn>Pb,因此土壤中Cd的含量要严格控制。修文县猕猴桃果园土壤综合污染指数平均值为1.38,污染等级为轻度污染。由表8可知,水城县的4个园区Pb、As和Hg的单因子污染指数都小于0.7,污染等级为安全,污染水平为清洁,Cd的 P_i 都大于1,土壤重金属平均 P_i 值排序为Cd>Cr>Cu>Zn>As>Hg>Pb。其综合污染指数平均值为2.03,污染等级为中度污染。

表 7 基于国家土壤环境质量二级标准的修文县猕猴桃果园土壤重金属污染评价结果

编号	单因子污染指数(P_i)							综合污染指数 ($P_{综}$)	污染程度
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg		
I	1.7	0.2	1.9	0.1	1.0	0.3	0.5	2.1	中
Ⅱ	0.6	0.5	0.4	0.3	0.6	1.6	0.2	1.4	轻
Ⅲ	1.2	0.4	1.1	0.1	0.7	0.4	0.7	0.9	警戒
Ⅳ	0.5	0.4	1.0	0.1	0.6	0.5	0.4	1.1	轻
平均值	1.00	0.38	1.10	0.15	0.73	0.70	0.45	1.38	轻
标准差	0.56	0.13	0.62	0.10	0.19	0.61	0.21	0.53	

表 8 基于国家土壤环境质量二级标准的水城县猕猴桃果园土壤重金属污染评价结果

编号	单因子污染指数(P_i)							综合污染指数 ($P_{综}$)	污染程度
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg		
V	1.0	0.4	1.3	0.1	0.7	0.2	0.2	2.2	中
Ⅵ	1.2	0.9	2.7	0.1	2.6	0.1	0.1	1.9	轻
Ⅶ	0.7	1.0	2.7	0.1	1.7	0.4	0.3	2.0	轻
Ⅷ	1.3	1.0	2.7	0.1	0.8	0.4	0.3	2.0	轻
平均值	1.05	0.83	2.35	0.10	1.45	0.28	0.23	2.03	中
标准差	0.26	0.29	0.70	0.00	0.89	0.15	0.10	0.13	

2.3.2 基于贵州省土壤背景值的内梅罗综合污染指数法评价结果 根据贵州省土壤背景值,计算单因子和多因子综合污染指数。从单因子污染指数来看,在修文县的4个园区中Cu、As和Cr的单因子综合污染指数都≥0.7,Cu和As在贵

州省土壤背景值下分别在谷堡和猕猴桃表现出重度污染,其余4种元素的 P_i 都在2以下。7种重金属元素的评价 P_i 值排序为Cu>As>Hg>Cr>Pb>Zn>Cd,修文县土壤重金属元素Cd在贵州省土壤背景值下其平均 P_i 值最小,在贵州省

土壤背景值下 Cd 的含量是国家土壤环境质量二级标准中含量的 2 倍以上。其综合污染指数都大于 1.0,平均综合污染指数为 2.20,污染等级为中度污染,详见表 9。

由表 10 可知,在贵州省土壤背景值下水城县的 4 个果园

中,Pb、As、Hg 的单因子污染指数都小于 1,Cu 和 Cr 的单因子污染指数均≥1.0,其中 Cr 在都格的单因子污染指数大于 3,达到了重度污染。平均单因子污染指数排序为 Cr > Cd > Cu > Zn > Pb > Hg > As,土壤中的 Cr 要严格控制。平均综合

表 9 基于贵州省土壤背景值的修文县猕猴桃果园土壤重金属污染评价结果

编号	单因子污染指数(P_i)							综合污染指数($P_{综}$)	污染程度
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg		
I	3.2	0.6	0.9	0.7	1.6	0.7	1.3	2.9	中
II	1.2	1.3	0.2	1.9	0.9	3.2	0.5	2.7	中
III	2.3	1.0	0.5	0.6	1.1	0.8	1.7	2.1	中
IV	1.0	0.9	0.4	0.9	1.0	0.8	1.3	1.1	轻
平均值	1.93	0.95	0.50	1.03	1.15	1.38	1.20	2.20	中
标准差	1.02	0.29	0.29	0.60	0.31	1.22	0.50	0.81	

表 10 基于贵州省土壤背景值的水城县猕猴桃果园土壤重金属污染评价结果

编号	单因子污染指数(P_i)							综合污染指数($P_{综}$)	污染程度
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	Hg		
V	1.6	0.7	0.6	0.8	1.0	0.5	0.8	1.3	轻
VI	1.9	1.9	1.2	0.5	3.9	0.1	0.2	2.9	中
VII	1.3	1.9	3.1	0.9	2.7	0.7	0.7	2.5	中
VIII	2.2	1.9	2.1	0.6	1.1	0.9	0.8	1.8	轻
平均值	1.75	1.60	1.75	0.70	2.18	0.55	0.63	2.13	中
标准差	0.39	0.60	1.09	0.18	1.39	0.34	0.29	0.71	

污染指数为 2.13,污染等级为中度。

2.4 猕猴桃果园土壤重金属含量相关性分析

由表 11 可知,修文县猕猴桃果园土壤中的 7 种元素中,Cr 和 Cu 的含量有着极显著的正相关,As 和 Pb、Zn 的含量有着极显著的正相关,Pb 和 Zn 的含量呈显著正相关,表明它们之间的同源性很强。Hg 和 As、Pb、Zn 的含量有极显著负相

关。由表 12 可以看出,在水城县猕猴桃果园土壤中的 7 种元素中,Pb 和 Cd 的含量呈显著正相关,由于土壤重金属污染不仅仅是重金属元素单独作用的结果,而是由多种重金属元素协同造成的。各个地区重金属元素相关性分析结果显示,各园区土壤重金属元素间存在不同的显著或极显著相关性,表明各地区土壤重金属来自不同类型的复合污染源。

表 11 修文县猕猴桃果园土壤中各重金属之间的相关性分析

重金属元素	相关系数						
	Cr	Cd	Hg	As	Pb	Cu	Zn
Cr	1.00	0.44	0.35	-0.34	-0.24	0.98 **	-0.36
Cd		1.00	0.71	-0.79	-0.66	0.37	-0.85
Hg			1.00	-0.99 **	-0.99 **	0.44	-0.97 **
As				1.00	0.98 **	-0.4	0.99 **
Pb					1.00	-0.33	0.96 *
Cu						1.00	-0.40
Zn							1.00

注:“*”表示相关性达显著水平($P<0.05$),“**”表示相关性达极显著水平($P<0.01$)。表 13 同。

表 12 水城县猕猴桃果园土壤中各重金属之间的相关性分析

重金属元素	相关系数						
	Cr	Cd	Hg	As	Pb	Cu	Zn
Cr	1.00	0.37	-0.80	-0.29	-0.04	0.38	0.62
Cd		1.00	0.14	0.56	0.91 *	0.02	0.68
Hg			1.00	0.81	0.45	-0.01	-0.04
As				1.00	0.65	0.38	0.56
Pb					1.00	-0.25	0.39
Cu						1.00	0.73
Zn							1.00

3 讨论

3.1 贵州主要猕猴桃果园土壤重金属基本特征

从土壤重金属含量特征上分析可知,8 个猕猴桃果园中 Cr、Cu、Zn 含量均显著高于贵州省的土壤背景值,影响果园土

壤中 Cr、Cu 含量的主要因素是成土母质^[4,16-17],而 Zn 含量偏高可能与 Zn 肥、含 Zn 农药及畜禽粪便等有机肥的使用有关^[18-19]。As 的平均含量除在猕猴桃园和放马坪存在一定的超标情况外,其余地方的平均含量均低于贵州省土壤背景值,王济等认为土壤中 As 的主要输入途径是农药的使用,如砷酸

钙、砷酸铅^[20-21]。猕猴桃土壤重金属除 Hg 有一点超标外,其余各重金属元素平均含量均在背景值之下。

从土壤重金属分布特征上看,Cd 和 Hg 在各园区里分布基本上都存在较大差异,而 Cr、Cu、Pb、As 和 Hg 分布要稍微均匀些,在发耳,重金属 Cu、Zn 和 Pb 为弱变异,分布最为均匀。整体上看,除 Zn、Cd 在马关、猕猴桃园和猴场分布极不均匀外,其他地区土壤重金属含量的变异系数均为中等变异性。这表明各地区土壤重金属含量分布存在极为显著的差异,这可能与果园地形、周边环境等有一定的关系,从未来土壤环境改善和治理的角度来看,Zn、Cd 在修文县治理难度较大,由于分布的差异性较大,大范围的治理方法无法大规模地开展,而从水城的情况初步来看,可采用大范围的预防和治理措施。

3.2 贵州主要猕猴桃果园土壤重金属污染防治措施

综合 2 种评价结果,Cu 和 Cd 是各地区土壤重金属污染的主要因子,此结果与杨玉等的研究结果^[21-26]一致,猕猴桃果园土壤重金属以 Cd 污染为主,Cd 参照国家土壤二级标准表现出轻度污染,但在贵州省土壤背景值下污染等级为安全,因为贵州省为 Cd 元素地球化学异常区,各地区中 Zn、Pb、As 和 Hg 虽未在国家土壤二级标准上表现出污染性,但由于其在外来污染源的作用下,表现出相对贵州省土壤背景值的污染,其中 Zn、Pb 和 Hg 存在中度或轻度污染,而 Cu、Cd、Cr 和 As 在一些地方甚至达到了重度污染。修文县和水城县猕猴桃果园土壤重金属综合污染指数分别为 1.38、2.03,污染等级分别为轻度和中度污染。结果表明,各地区在进行土壤 Cu 和 Cd 的治理的同时,需要对 Cr 和 As 进行密切监测,找出外在污染源。

4 结论

在猕猴桃果园中,土壤重金属 Cd、Hg、Pb、As 和 Zn 的平均含量处于正常水平,但是 Cr 和 Cu 的含量偏高,分别达到了 385.20 mg/kg 和 215.57 mg/kg。

水城县的 4 个果园 Pb、As 和 Hg 的单因子污染指数都小于 0.7,污染等级为安全,污染水平为清洁,Cd 的 P_i 都大于 1,土壤重金属平均 P_i 值排序为 $Cd > Cr > Cu > Zn > As > Hg > Pb$;修文县的 4 个猕猴桃果园中 Zn、Pb 和 Hg 单因子污染指数均未超过 0.7,污染等级为安全,污染水平为清洁;Cd 单因子污染指数除马关小于 0.7 外,其余都大于 1,土壤重金属平均 P_i 值排序为 $Cd > Cu > Cr > As > Hg > Zn > Pb$;在 2 种评价标准下,修文县、水城县猕猴桃果园土壤重金属综合污染指数分别为 1.38、2.03,污染等级分别为轻度、中度。

参考文献:

- [1] Isinkaye M O. Distribution of heavy metals and natural radionuclides in selected mechanized agricultural farmlands within Ekiti State, Nigeria[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2012, 37(5): 1483-1490.
- [2] Zorer O S, Ceylan H, Dogru M. Determination of heavy metals and comparison to gross radioactivity concentration in soil and sediment samples of the Bendinmahi River Basin (Van Turkey)[J]. Water Air and Soil Pollution, 2009, 196(1-4): 75-87.
- [3] 黄雁飞, 黄玉溢, 陈桂芬, 等. 广西主要火龙果园土壤养分调查及

- 评价[J]. 西南农业学报, 2017, 30(9): 2035-2040.
- [4] 陈学民, 朱阳春, 伏小勇. 天水苹果园土壤重金属富集状况评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 893-898.
- [5] 李金强, 李文云, 彭志军, 等. 贵州清水江沿岸柑橘园土壤重金属含量特征及安全评价[J]. 江西农业学报, 2012, 24(7): 67-68, 72.
- [6] 汤民, 张进忠, 张丹, 等. 果园土壤重金属污染调查与评价——以重庆市金果园为例[J]. 中国农学通报, 2011, 27(14): 244-249.
- [7] 杨玉, 尹春峰, 汤佳乐, 等. 长沙和株洲地区葡萄园土壤重金属含量分析及污染评价[J]. 湖南农业科学, 2017(8): 41-44.
- [8] 刘强, 冯娜, 张娅娅, 等. 基于 GIS 的天水市秦州区樱桃园土壤重金属元素空间分布与污染评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 258-263.
- [9] 李晓彤, 岳田利, 胡仲秋, 等. 陕西省猕猴桃园土壤重金属含量及污染风险评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 173-178.
- [10] 罗永清, 陈银萍, 陶玲, 等. 兰州市农田土壤重金属污染评价与研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 98-104.
- [11] 党华美. 土壤-猕猴桃重金属含量特征及质量评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [12] 刘晗, 何腾兵, 党华美. 贵州修文土壤-猕猴桃系统重金属富集特征[J]. 山地农业生物学报, 2017, 36(2): 53-56.
- [13] 刘晗. 贵州黄壤重金属赋存形态与猕猴桃品质的关系[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [14] 高军侠, 党宏斌, 郑敏, 等. 郑州市郊农田土壤重金属污染评价[J]. 中国农学通报, 2013, 29(21): 116-120.
- [15] 郭金停, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 天津城市公园灰尘重金属污染健康风险评价[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 415-420.
- [16] Borauvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. Geoderma, 2005, 128(3): 289-300.
- [17] 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险[J]. 自然资源学报, 2006(1): 64-72.
- [18] 高明, 车福才, 魏朝富. 长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 11-17.
- [19] 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(2): 113-120.
- [20] 李丽霞, 郝明德, 薛晓辉, 等. 黄土高原沟壑区苹果园土壤重金属含量特征研究[J]. 水土保持学报, 2007(6): 65-69.
- [21] 杨玉, 童雄才, 王仁才, 等. 湖南猕猴桃园土壤重金属含量分析及污染评价[J]. 农业现代化研究, 2017, 38(6): 1097-1105.
- [22] 杨丹, 刘燕, 刘勇. 4 种园林植物修复河道疏浚底泥中重金属污染的试验研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 224-227.
- [23] 代静, 司万童, 赵雪波, 等. 稀土尾矿库复合污染对周边土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(20): 299-303.
- [24] 汤波, 赵晓光, 冯海涛, 等. 汉江上游铅锌尾矿库区土壤重金属富集特征与影响因素[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(13): 233-237.
- [25] 陈森, 张子谦, 李婧, 等. 土壤镉污染下生物炭对白菜生长及植株镉浓度的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(5): 129-131.
- [26] 王仁才, 石浩, 庞立, 等. 湘西猕猴桃种植基地土壤和猕猴桃中重金属积累状况研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3): 280-285.