

合肥草莓基地土壤重金属污染风险评价

孙庆, 武旭斌, 李学德, 花日茂*

(农产品质量安全安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要: 采集合肥市某草莓基地区域 100 个样点的土壤, 测定表层土壤 (深度分别为 0~10 cm 和 10~20 cm) 的 6 种重金属 (Cd、Hg、As、Pb、Cr 和 Cu), 利用地累积指数方法对草莓种植土壤重金属的污染程度和生态风险进行评价, 并结合多元统计分析探讨重金属来源。结果表明, Pb、Cd、Hg、Cu 和 Cr 虽对草莓基地部分区域的土壤有一定程度的累积和污染, 但污染风险低; 主成分分析表明, Pb、Cd、As、Cu 和 Hg 源于人类农业活动, Cr 源于土壤母质及风化累积。显示草莓基地整体区域的土壤重金属生态风险低, 种植基地土壤重金属未对草莓质量安全产生影响。

关键词: 重金属; 土壤; 草莓; 生态风险评价

中图分类号: X53; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)05-0794-05

Risk assessment of heavy metal pollution in soil of Hefei strawberry base

SUN Qing, WU Xubing, LI Xuede, HUA Rimao

(Key Laboratory of Agri-food Safety of Anhui Province, School of Resource and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: The contents of six heavy metals (Cd, Hg, As, Pb, Cr and Cu) were measured in the surface soil (depth in 0-10 cm and 10-20 cm, respectively) from 100 sampling sites in a strawberry base area in Hefei, and the degree of contamination and ecological risk of heavy metals in strawberry growing soil were evaluated using the ground accumulation index method and combined with multivariate statistical analysis to explore the sources of heavy metals. The results showed that Pb, Cd, Hg, Cu and Cr had accumulated and polluted soil in some areas of strawberry base to a certain extent, but the pollution risk was low. The principal component analysis showed that Pb, Cd, As Cu and Hg were derived from human agricultural activities. Cr originates from soil parent material and weathering accumulation. It showed that the ecological risk of soil heavy metals in the whole area of strawberry base was low, and the heavy metals in the soil have not affected the quality and safety of strawberries.

Key words: heavy metals; soil; strawberry; ecological risk assessment

草莓为多年生草本植物, 因其富含多种营养成分和香甜的口感而被誉为“水果皇后”^[1-3]。自其进入我国以来, 深受消费者的喜爱, 因此, 草莓种植在我国快速发展, 目前我国的草莓种植面积和产量已经位居全球第一^[4-5]。土壤是草莓种植生产中不可或缺的组成部分, 随着社会的发展, 土壤各种污染也随之而来, 尤其是土壤重金属的污染。一些养殖业生产过程中的动物粪便含有的重金属被作为有机肥使用, 会给农田土壤带来潜在风险。目前, 对土壤的重金属污染已有众多学者进行研究^[6-7]。本研究以草莓基地的土壤为研究对象, 研究了草莓种植基

地土壤中的 Cd、Hg、As、Pb、Cr 和 Cu 6 种重金属的含量分布特征, 利用地累积指数对土壤重金属污染程度和生态风险进行评估, 为草莓生产和食用安全, 促进草莓产业的健康发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

某草莓基地位于合肥市区域内, 该区域土地平坦, 属于亚热带季风气候, 气候条件比较优越, 雨水充足, 光照充足^[8]。研究区域草莓基地的土壤类型相对单一, 且具有气候温暖湿润的良好条件, 因

收稿日期: 2021-04-19

基金项目: 安徽省农业竞争力项目 (20803005) 资助。

作者简介: 孙庆, 硕士研究生。E-mail: 1577588976@qq.com

* 通信作者: 花日茂, 博士, 教授。E-mail: rimaohua@ahau.edu.cn

此十分适合种植草莓。目前, 草莓产业已成为当地的特色主导产业, 并且已经成为当地农业的主要经济支柱之一。

1.2 样品采集与测试

1.2.1 样品采集

调查研究土壤样品采集在草莓种植前进行, 草莓样品待草莓种植成熟后进行采集。土壤采集在 5 000 亩研究区域草莓基地内设置 100 个取样点, 每个采样点内分别以下 0~10 cm 和 10~20 cm 两种表层土壤进行系统采集。采集好的土壤样品挑出石块、枯叶等杂物后混匀, 再将其风干、破碎、过筛。

1.2.2 样品测试

研究测定的是常见 6 种重金属元素: Pb、Cd、Hg、As、Cu 和 Cr。

土壤重金属各元素分析测试方法为: Pb 和 Cd 的测定采用石墨炉原子吸收分光光度法 (GB/T 17141—1997) [9], Hg 和 As 的测定采用微波消解/原子荧光法 (HJ 680-2013) [10], Cu 和 Cr 的测定采用火焰原子吸收光度法 (HJ 491—2019) [11]。

草莓产品重金属含量按照食品安全国家标准食品中多元素的测定。其中 Pb、Cd、As、Cu 和 Cr 为食品安全国家标准 (GB 5009.268-2016 第一法) [12] 测定, Hg 为食品安全标准 (GB 5009.17-2014 第一篇第一法) [13] 测定。

1.3 生态风险评价方法

地累积指数 (I_{geo}) 是一种由国外科学家 Muller 开发的用于反映单一重金属分布的自然变化特征的污染评价方法, 通过浓度差异来评估重金属的污染状况, 此方法在重金属生态风险评估研究得到广泛应用。通过计算各重金属的地累积指数, 可以反映检测地点的土壤重金属污染情况 [14-17]。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_a}{1.5B_a} \right]$$

C_a 为样品土壤中重金属元素 a 的浓度; B_a 为当地的土壤重金属 a 的背景浓度, 本次研究采用安徽 A 层土壤元素背景值; 1.5 为修正指数。 $I_{geo} \leq 0$ (I 级) 未受污染; $0 < I_{geo} \leq 1$ (II 级) 轻度污染; $1 < I_{geo} \leq 2$ (III 级) 中度污染; $2 < I_{geo} \leq 3$ (IV 级) 中度污染到重度污染; $3 < I_{geo} \leq 4$ (V 级) 重度污染; $4 < I_{geo} \leq 5$ (VI 级) 重度污染到极度污染; $I_{geo} > 5$ (VII 级) 极度污染。

2 结果与分析

2.1 土壤中重金属浓度水平

本次调查研究选用的元素参比值为安徽省土壤元素算术平均值 [18]。从表 1 可以看出, 地表 0~10 cm

深度的浅表层土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr 和 Cu 的平均浓度分别为 0.118、0.038、8.78、28.02、75.11 和 28.89 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。除 As 的平均浓度低于背景值 9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd、Hg、Pb、Cr 和 Cu 的平均浓度均高出了对应的环境背景值。10~20 cm 表层土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr 和 Cu 的平均浓度分别为 0.111、0.039、8.86、27.96、75.94 和 28.48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与 0~10 cm 表层土壤一样, 除了 As 的平均浓度低于背景值 9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其余 Cd、Hg、Pb、Cr 和 Cu 的平均浓度均高出了对应的安徽省的元素环境背景值。各个取样点 0~20 cm 土壤中的 6 种重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cr 和 Cu 的平均浓度分别为 0.115、0.039、8.82、27.99、75.52 和 28.69 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。除 As 的平均浓度低于背景值 9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其余 Cd、Hg、Pb、Cr 和 Cu 的平均浓度均高出了对应的环境背景值。对照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行) (GB15618-2018)》 [19], 采用较严格的风险筛选值进行评价, 所测 6 种重金属 100 个取样点位中的 200 样品均未有样品超出风险筛选值, 未超过土壤环境质量标准。由此可见研究区域土壤重金属呈现较低程度的累积。变异系数可以在一定程度上反映干扰活动的影响, 根据变异系数的分级标准: 变异系数大于 30% 为强变异, 10% 至 30% 为中等变异, 小于 10% 为弱变异。草莓基地土壤中 Cd 和 Hg 变异系数大于 30%, 为强变异。其余 4 种重金属变异系数在 10% 和 30% 之间, 为中度变异。由此表明草莓基地土壤重金属有可能受外界因素的影响。

2.2 土壤生态风险评估

从表 2 看出, 根据污染等级的划分, 草莓基地 0~10 cm 表层土壤所有采样点 As 的 I_{geo} 值为 I 级, 这表明土壤未受 As 的影响。Cd、Hg、Pb、Cr 和 Cu 的 I_{geo} 值范围均是从 I 级到 II 级, 分别为 78%、81%、95%、97% 和 96%, II 级占比分别为 22%、19%、5%、3% 和 4%。草莓基地 10~20 cm 表层土壤所有采样点 As 的 I_{geo} 值为 I 级, 表明目前土壤未受 As 的影响。Cd、Hg、Pb、Cr 和 Cu 的 I_{geo} 值范围均是从 I 级到 II 级, 分别为 86%、85%、97%、97% 和 97%, II 级占比分别为 14%、15%、3%、3% 和 3%。将各个取样点 0~20 cm 表层土壤数据进行分析评价, Cd、Hg、As、Pb、Cr 和 Cu 的 I_{geo} 值范围均是从 I 级到 II 级, 分别为 82%、85%、100%、96%、98% 和 96%, II 级的占比分别为 18%、15%、0%、4%、2% 和 4%。3 组数据表明, 重金属 Pb、Cd、Hg、Cu 和 Cr 虽对草莓基地的土壤有一定的污染, 但污染的程度不高, 草莓基地大多数地区未受到这几种重金属的污染。

表 1 土壤各重金属含量特征

Table 1 Characteristics of heavy metal content in soil

土壤类型	统计量	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu
0~10 cm 表层土壤	平均值/(mg·kg ⁻¹)	0.118	0.038	8.78	28.02	75.11	28.89
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	0.280	0.083	13.20	43.20	112.00	46.00
	最小值/(mg·kg ⁻¹)	0.050	0.015	4.98	20.20	38.00	19.00
	标准差	0.040	0.014	1.74	5.68	13.93	4.85
	变异系数/%	35.310	37.580	19.77	20.28	18.45	16.80
10~20 cm 表层土壤	平均值/(mg·kg ⁻¹)	0.111	0.039	8.86	27.96	75.94	28.48
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	0.260	0.097	12.70	44.40	103.00	46.00
	最小值/(mg·kg ⁻¹)	0.050	0.013	5.45	19.10	53.00	19.00
	标准差/(mg·kg ⁻¹)	0.040	0.014	1.70	5.70	11.36	4.55
	变异系数/%	32.370	34.630	19.22	20.39	14.97	15.97
0~20 cm 表层土壤	平均值/(mg·kg ⁻¹)	0.115	0.039	8.82	27.99	75.52	28.69
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	0.270	0.090	12.85	43.60	106.50	46.00
	最小值/(mg·kg ⁻¹)	0.055	0.017	5.29	19.65	48.00	19.50
	标准差	0.040	0.013	1.67	5.59	12.16	4.60
	变异系数/%	32.460	32.870	18.92	19.99	16.09	16.04
背景值(安徽)/(mg·kg ⁻¹)		0.097	0.033	9.00	26.60	66.50	23.70
GB15618-2018/(mg·kg ⁻¹)		0.300	1.300	25.00	120.00	150.00	50.00

注: 样本数 $n=100$, GB15618-2018 为《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(执行)》^[19]。

表 2 土壤重金属地质累积指数污染分级统计

Table 2 Grading statistics heavy metals geological accumulation index pollution in soil

土壤深度	污染等级	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	%
0~10 cm 表层	I 级	78	81	100	95	97	96	
	II 级	22	19	0	5	3	4	
	III至VII级	0	0	0	0	0	0	
10~20 cm 表层	I 级	86	85	100	97	97	97	
	II 级	14	15	0	3	3	3	
	III至VII级	0	0	0	0	0	0	
0~20 cm 表层	I 级	82	85	100	96	98	96	
	II 级	18	15	0	4	2	4	
	III至VII级	0	0	0	0	0	0	

表 3 Pearson 相关分析结果

Table 3 The results of Pearson correlation coefficients

元素	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu
Cd	1					
Hg	0.189	1				
As	0.113	-0.189	1			
Pb	0.262**	-0.060	0.501**	1		
Cr	0.164	0.073	0.187	-0.142	1	
Cu	0.337**	0.068	0.463**	0.355**	0.141	1

注: ** 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

2.3 土壤重金属来源分析

2.3.1 相关性分析 运用 SPSS 软件,通过皮尔逊(Pearson)相关性分析确定草莓基地 6 种重金属浓度之间的相互关系,初步探究草莓基地的土壤

重金属的可能相似来源^[20-21]。重金属之间的相关性越显著,表明其来源途径越接近^[22-23]。由表 3 可以看出,在 $P<0.01$ 水平上, Pb 与 Cd、As、Cu 呈极显著相关; Cd 与 Pb、Cu 之间呈极显著相关;

As 与 Pb、Cu 呈极显著相关; Cu 与 Pb、Cd、As 之间存在较强的相关性。Pb、Cd、As 和 Cu 4 种重金属元素之间有着相似的来源途径, Hg 和 Cr

与其他重金属之间相关性不显著, 表明这两种重金属元素来源跟其他重金属元素有所差别。

表 4 土壤重金属元素主成分分析

Table 4 Principal component analyses of heavy metals in soils

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差	累积/%	总计	方差	累积/%
1	2.067	34.460	34.460	2.067	34.460	34.460
2	1.290	21.510	55.970	1.290	21.510	55.970
3	1.043	17.390	73.360	1.043	17.390	73.360
4	0.697	11.620	84.980			
5	0.564	9.405	94.380			
6	0.337	5.619	100.000			

表 5 土壤重金属初始因子载荷矩阵

Table 5 Initial factor loading matrix of soil heavy metals

元素	成分		
	1	2	3
Cd	0.536	0.513	-0.239
Hg	-0.018	0.756	-0.394
As	0.776	-0.312	0.271
Pb	0.725	-0.315	-0.365
Cr	0.223	0.493	0.790
Cu	0.776	0.128	-0.001

2.3.2 主成分分析 基于相关性分析结果, 对 6 种重金属进行了主成分分析 (表 4 和表 5), 提取前 3 个特征值大于 1 的主成分, 其累计贡献率为 73.36%, 因此结合草莓基地土壤的利用情况对这 3 个主成分进行分析, 可以代表本次研究结果。由表 4 和表 5 可以看出, 第一主成分的贡献率为 34.46%, 在 Pb、Cd、As、Cu 含量上有较高的正载荷, 由相关性可知这 4 种重金属来源途径相似, 本研究结果与夏文建等^[24]和王飞腾等^[25]提出的化肥及有机肥显著提高了土壤中 Cu、Cd 和 As 等重金属的含量结果一致。且在研究区域草莓基地的各重金属污染程度较低或无污染, 说明第一主成分主要表征为人类施用化肥有机肥的农业活动。第二主成分的贡献率 21.51%, 在 Hg 含量上有较高的正载荷, 含 Hg 的农药能给农用地土壤带来污染^[26-27], 结合变异系数, 说明草莓基地 Hg 的第二主成分表征为人类使用农药影响。第三主成分贡献率为 17.39%, 在 Cr 含量上有较高的正载荷, 研究表明 Cr 主要受土壤母质及风化累积的作用^[28], 所以第三主成分主要表征为自然来源。

2.4 土壤重金属污染对草莓质量安全影响

由表 6 可知, 草莓样品检测出了 6 种重金属中

的 3 种。所有样品都检测出 Cu 元素, 有 2 个样品检测出 As, 还有 1 个样品检测出了 Cd。Cu 是人体的必需元素, 表明草莓是含丰富 Cu 元素的水果, 对照食品中 Cu 限量卫生标准 (GB 15199—94)^[29], 其含量远低于水果中 Cu 含量最高容许限量 10 mg·kg⁻¹。根据食品安全国家标准食物中污染物限量标准 (GB 2762—2017)^[30], 水果中 5 种重金属最高限量 (Cd-0.05 mg·kg⁻¹, Hg-0.01 mg·kg⁻¹, As-0.5 mg·kg⁻¹, Pb-0.2 mg·kg⁻¹, Cr-0.5 mg·kg⁻¹)。所有草莓样品中这 5 种重金属的含量低于最高限量。结合土壤的污染状态, 草莓基地土壤重金属未对草莓质量安全产生影响。

表 6 草莓重金属含量特征

Table 6 Characteristics of heavy metal content in strawberry (mg·kg⁻¹)

样品	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu
1	0.009	ND	ND	ND	ND	0.447
2	ND	ND	ND	ND	ND	0.362
3	ND	ND	ND	ND	ND	0.285
4	ND	ND	ND	ND	ND	0.281
5	ND	ND	0.008	ND	ND	0.361
6	ND	ND	0.006	ND	ND	0.402
7	0.008	ND	ND	ND	ND	0.362

3 结论

草莓基地土壤样品中的所测重金属元素 Pb、Cd、Hg、Cu 和 Cr 的均值均超出了安徽省的土壤元素背景值, As 的均值未超出背景值。在草莓基地 100 样品点位中, 200 份土壤样品的 6 种重金属含量均未超出对应的重金属风险筛选值, 未超过土壤环境质量标准。表明草莓基地的土壤风险低, 一般情况下可忽略其影响。

根据污染评价方法的结果来看,6种重金属Pb、Cd、Hg、Cu、As和Cr对草莓基地的土壤有一定的污染,但污染的程度不高。草莓基地整体区域的土壤重金属的生态风险低,属于需要保护类型的土壤。主成分分析表明,Pb、Cd、As、Cu源于人类施用化肥、有机肥的农业活动,Hg源于农业生产中施用的农药,Cr源于土壤母质及风化累积。

草莓基地生产的草莓,其含量远低于标准食品安全国家标准食物中污染物限量(GB 2762—2017)^[30],表明草莓基地土壤重金属未对草莓产品质量安全产生影响。

参考文献:

- [1] 苟军. 大棚草莓种植技术[J]. 农民致富之友, 2015(12): 162-163.
- [2] KOWALSKA J, KOWALSKA H, MARZEC A, et al. Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack[J]. Food Sci Biotechnol, 2018, 27(3): 799-807.
- [3] 杨会苗, 毛清云, 刘兰英. 北京和保定地区草莓产业基本情况调研报告[J]. 北方园艺, 2019(6): 170-174.
- [4] 张欣馨, 王菲, 李浪, 等. 中国草莓生产中面临的主要问题及发展对策[J]. 中国林副特产, 2016(2): 92-96.
- [5] 王鸣谦, 薛莉, 赵珺, 等. 世界草莓生产及贸易现状[J]. 中国果树, 2021(2): 104-108.
- [6] 毛慧, 姚军, 吴晶. 草莓园土壤中重金属含量的研究与评价[J]. 现代农业科技, 2016(19): 181-182, 184.
- [7] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- [8] 秦倩凝. 地理环境与城市个性的交融: 以合肥市为例[J]. 科教文汇(中旬刊), 2013(2): 201-203.
- [9] 国家环境保护局规划标准处. 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法:GB/T 17141-1997[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
- [10] 环境保护部科技标准司. 土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法:HJ 680-2013[S]. 北京:中国环境科学出版社,2013.
- [11] 生态环境部生态环境监测司. 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 HJ 491-2019[S]. 北京:中国环境出版社,2019.
- [12] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268-2016[S].北京:中国标准出版社, 2017.
- [13] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定:GB 5009.17-2014[S].北京:中国标准出版社, 2014.
- [14] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 431-441.
- [15] 韦壮锦, 陈华清, 张煜, 等. 湘南柿竹园东河流域农田土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 环境化学, 2020, 39(10): 2753-2764.
- [16] ZENG Y, LIU J, LI Y Q, et al. Accumulation and health implications of metals in topsoil of an urban riparian zone adjacent to different functional areas in a subtropical city[J]. J Environ Qual, 2021, 50(3): 744-755.
- [17] TUME P, ACEVEDO V, ROCA N, et al. Potentially toxic elements concentrations in schoolyard soils in the city of Coronel, Chile[J]. Environ Geochem Health, 2022, 44(5): 1521-1535.
- [18] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- [19] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB15618-2018[S]. 北京:中国环境出版社,2018.
- [20] 冯乾伟, 王兵, 马先杰, 等. 黔西北典型铅锌矿区土壤重金属污染特征及其来源分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(4): 863-870.
- [21] 滑小赞, 程滨, 赵瑞芬, 等. 太原市农田土壤养分和重金属累积特征及相关性分析[J]. 山西农业科学, 2019, 47(6): 1027-1033.
- [22] 曾妍妍, 周金龙, 王松涛, 等. 新疆若羌县农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 87-91.
- [23] 梁雅雅, 易筱筠, 党志, 等. 某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 103-110.
- [24] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2469-2479.
- [25] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 257-263.
- [26] 王信凯, 张艳霞, 黄标, 等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 82-91.
- [27] 孙淑兰. 汞的来源、特性、用途及对环境的污染和对人类健康的危害[J]. 上海计量测试, 2006, 33(5): 6-9.
- [28] 马宪梅, 黄晓飞. 土壤铬污染现状及修复方法研究[J]. 环境与发展, 2020, 32(5): 61.
- [29] 卫生部卫生监督司. 食品中铜限量卫生标准: GB15199-94[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [30] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准:食品中污染物限量:GB 2762-2017 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.