

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.02.024

陕西关中富硒土壤区农作物重金属含量 相关性及其安全性评价

陈继平, 钞中东, 任蕊, 罗婷, 晁旭, 张志敏, 乔新星

(陕西省地质调查院, 陕西 西安 710068)

摘要:为了研究关中富 Se 土壤区不同农作物与土壤中重金属元素间的相关关系和土壤环境的安全性,选择关中三原—阎良、户县等富 Se 土壤区不同农作物和根系土壤开展研究,采集小麦、油菜、甘蓝等各类农作物样品及根系土样品,分析重金属元素含量,并进行植物重金属含量相关性分析和土壤安全性评价,得出以下结论:不同种属农作物对各重金属表现为不同的富集特征。油菜对重金属表现出较强的富集性,而番茄、辣椒等表现为不富集特征;关中富硒区土壤十分清洁,未受到重金属的污染,满足无公害农产品和果品基地建设的要求。该研究成果将为大力开发关中富 Se 土壤资源提供地球化学依据。

关键词: Se; 关中富 Se 区; 重金属; 十字花科; 潜在生态危害指数法

中图分类号: P596

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2021)02-0273-09

Correlation and Safety Evaluation of Crop Heavy Metal Content in Shaanxi Guanzhong Selenium-enriched Areas

CHEN Jiping, CHAO Zhongdong, REN Rui, LUO Ting, CHAO Xu, ZHANG Zhimin, QIAO Xinxing

(Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the correlation between different crops and heavy metal elements in the soil and the safety of the soil environment in Guanzhong soilselenium-enriched areas, the authors selected some different crops i. e. wheat, rapeseed, cabbage, etc and root soils from the selenium-enriched areas of Guanzhong Sanyuan-Yanliang and Huxian for analysis. Through analyzing heavy metal element content in crops and the soil safety, it is concluded that different species of crops have different enrichment characteristics for different heavy metals. Rape shows strong enrichment for heavy metals, while tomatoes and peppers show no enrichment characteristics. The non-polluting soil in Guanzhong selenium-rich areas meets the requirements of the pollution-free agricultural bases. The results provides geochemical references for the development of Guanzhong selenium-enriched soil resources.

Keywords: Se; Guanzhong selenium-enriched area; heavy metal; cruciferae; potential ecological hazard index

收稿日期:2020-04-12;修回日期:2020-09-23

基金项目:陕西省公益性地质项目“陕西省关中地区碱性富硒土地开发利用综合研究”(20180307),中国地质调查局西安地质调查中心二级子项目“陕西省黄陵—韩城地区 1:25 万土地质量地球化学调查”项目(1212010110001500XX)。

作者简介:陈继平(1987-),男,工程师,陕西省地质调查院,主要从事多目标区域地球化学调查工作。E-mail:501975628@qq.com。

1973 年,世界卫生组织宣布 Se 是人体必需微量元素,是人体谷胱甘肽过氧化物酶(GSH2Px)的重要组成部分(J T Rotruck,1973)。Se 的丰缺对人体和动植物的健康会产生重要影响,摄入不足会产生“克山病”、“大骨节病”等典型疾病,摄入过量会导致中毒甚至死亡。因此,其兼具营养、毒性、解毒三重功效,被誉为“生命之火”、“生命保护剂”(宋晓珂等,2018)。据研究,全球三分之二的地区约 5~10 亿人口缺 Se,中国 72% 的县市存在不同程度的缺 Se,三分之一地区极度缺 Se(梁东丽等,2017)。因此,早在 2011 年,中国科学补硒工作协会就发起了“全民补硒工程”,指导全民科学补硒,防病治病。近年,国内外关于微量元素 Se 和人体健康的研究已成为热点领域,各国相继制定了居民每日 Se 摄入量阈值,芬兰更是通过颁布法律进行全面补 Se,成功改善了芬兰人民缺 Se 问题(田欢,2017)。人体摄入 Se 主要来源于食物,由于大多数植物从土壤中吸收 Se。因此,土壤中的 Se 含量和农作物 Se 含量水平对人体健康有重要意义(任蕊等,2016)。

21 世纪初,中国通过多目标区域调查工作,发现富 Se 土地 20.87 万 km²,富 Se 土地开发在中国取得显著成果,年经济效益数以千亿计,对于精准扶

贫、永久脱贫发挥独特作用(武春林等,2018)。陕西省自 2005 开展多目标地球化学调查工作至今,在关中地区发现富 Se 土壤约 6 051 km²,对三原—阎良地区土壤和农作物 Se 含量特征、Se 形态特征等进行研究(任蕊等,2016;尹宗义等,2016)取得了丰硕的成果。大量研究表明,各种因素导致农田土壤重金属积累量增加,使富 Se 地区存在较大的重金属威胁(孙协平等,2015)。因此,研究富 Se 地区土壤重金属含量对农产品的安全生产有重要指导意义。笔者通过对关中富 Se 土壤区植物及根系土中重金属开展研究,以期为陕西省关中地区富 Se 土壤资源开发利用提供地球化学依据。

1 关中富 Se 土壤分布特征

对多目标区域地球化学调查发现,关中富 Se 土壤(Se 含量大于 0.2×10⁻⁶)主要分布于渭河两岸及黄河沿线,呈面状、条带状分布,富 Se 面积达 8 938.74 km²(图 1)。其中,Se 含量为 0.3×10⁻⁶~0.4×10⁻⁶ 的土壤面积为 973.48 km²,从东到西依次分布在韩城、华县—华阴、泾阳—三原—阎良、西安市、户县、宝鸡市等地(任蕊等,2018)。

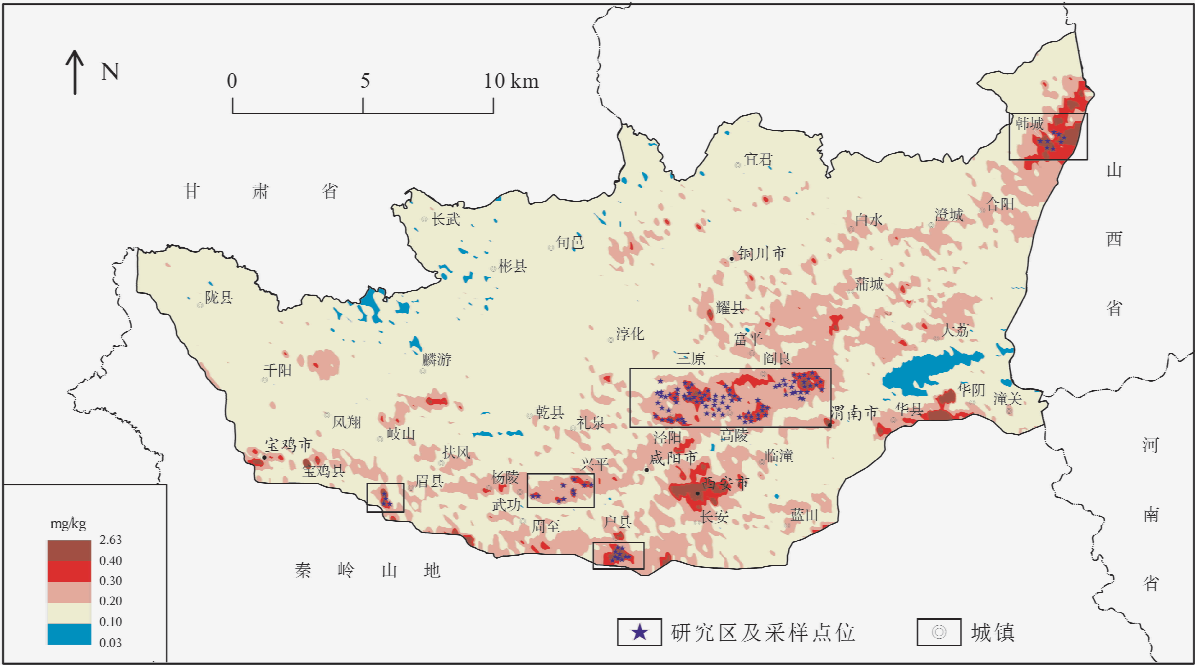


图 1 关中地区表层土壤 Se 含量分布特征图

Fig. 1 Distribution characteristics of selenium content in surface soil of Guanzhong area

2 样品采集分析与评价方法

2.1 样品采集

农作物样品采集:选择具代表性的样品,以 0.1~0.2 hm²为采样单元,选取 10~20 棵植株,小麦采集麦穗混合成 1 件样品,重量大于 300 g(干重);小型植株的叶菜类(芹菜、菜花等)去根整株采集,重量大于 1 000 g(鲜重)。样品采集时间选择无风晴天,采集时避开病虫害和其他特殊的植株。

根系土样品采集:与农作物样品采集相配套,使用竹铲直接采取相同点位的农作物根系土,采样深度为 0~20 cm,由 4~6 个子样等量混合组成 1 件样品,采样重量大于 1 000 g。

2.2 样品加工与分析

根系土样品经自然风干,用木棒压碎团块,过 20 目尼龙筛后,提取 500 g 分析样,分析指标为 Se、pH 及 Pb、Cd 等 8 种重金属元素。分析方法为原子荧光光谱法(AFS)、pH 计电极法(ISE)。农作物样品经洗净、晾干,去掉非食用部分后剁碎或用捣碎机捣碎,称取适量试样,加硝酸浸泡过夜,再加双氧水,盖好内盖,旋紧外套,放入微波消解仪器内消解 3~4 h 后,取出冷却,转移溶液,稀释至一定体积进行分析。分析元素为 Se、As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn、Ni 共 9 项,分析方法为原子荧光光谱法(AFS)。

2.3 样品分析质量

样品分析由国土资源部西安矿产资源监督检测中心承担。测试过程中加入国家一级标准物质进行分析质量控制,所有样品的报出率为 100%,准确度和精密度监控样合格率达 98%以上。

2.4 数据处理

利用 Excel 和 Spss 软件对样品数据进行整理分析,剔除异常值,然后进行排序,以一组数据的中值、上下四分位数为重金属含量分段值,最后分为 4 个含量区间,比较不同重金属含量区间内各农作物样品对根系土中重金属的富集特征,富集系数(BCF)=农作物样品中重金属含量/土壤中重金属含量。

2.5 评价方法

采用内梅罗综合污染指数法对土壤整体环境进行综合评价(孟昭虹等,2008)。内梅罗综合污染指数的等级划分见表 1,该方法的计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\overline{P})^2 + P_{\text{max}}^2}{2}}$$

$$\overline{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

式中: $P_{\text{综}}$ ——内梅罗综合污染指数; $\overline{P}$ ——单因子污染指数 P_i 的平均值; P_i ——单因子污染指数; P_{max} ——单因子污染指数的最大值。

表 1 内梅罗综合污染指数等级划分表
Tab. 1 Classification of Nemerow Comprehensive Pollution Index

质量等级	内梅罗综合污染指数	质量评价
I	$P_{\text{综}} \leq 1.0$	清洁(安全)
II	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染
III	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染
IV	$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染

考虑到土壤中各重金属元素对作物毒害性的差别,采用瑞典科学家 HAKANSON 提出的潜在生态危害指数法进行评价,潜在生态危害指数涉及单项质量分数、重金属毒性响应系数及多种重金属潜在生态风险指数(赵沁娜等,2005),公式为:

$$E_r^i = T_i \times P_i \quad RI = \sum_{i=1}^m E_r^i$$

式中: E_r^i ——金属 i 的潜在生态风险指数; T_i ——金属 i 的毒性响应系数; RI ——多种重金属潜在生态风险指数。其中重金属毒性响应系数分别为 Hg=40,Cd=30,As=10,Pb=Cu=Ni=5,Cr=2,Zn=1。单因子污染物生态风险参数和总的潜在生态指数分级标准见表 2。

表 2 潜在生态风险等级划分图
Tab. 2 Classification of potential ecological risk

潜在生态风险参数范围	单因子污染物生态风险程度	潜在生态风险指数范围	总的潜在生态风险程度
$E_r^i < 30$	低	$RI < 135$	低度
$30 \leq E_r^i < 60$	中	$135 \leq RI < 265$	中度
$60 \leq E_r^i < 120$	较重	$265 \leq RI < 525$	重度
$120 \leq E_r^i < 240$	重	$RI \geq 525$	严重
$E_r^i \geq 240$	严重		

3 结果与分析

3.1 根系土与农作物样品中各元素的相关性分析

对不同农作物中元素含量与其根系土元素含量进行相关性分析(表 3)。

不同农作物样品中各元素含量与其根系土中元素含量表现为大小不同的相关性。As、Cr 显示无相关性,可能指示上述农作物对其敏感性较低,或因土壤中其元素含量低,导致农作物对其吸收较少;Cd、Se 在小麦籽粒、芹菜、甘蓝、小青菜中含量与其在根系土中含量均呈现显著性相关,相关系数较高,指示 Cd、Se 在参与小麦等农作物生物化学活动中具有一定的一致性,但相较而言,Se 具有更高的相关性。番茄和辣椒对重金属元素及 Se 反应不灵敏,多显示无相关性,仅番茄对 Se 有一定的反映。

对所采集的农作物根系土样品分析数据进行元素间相关分析(表 4)。重金属元素间多表现为在 0.01 级别上相关性显著。其中,As 和 Ni,Cr、Zn 和 Cu,Hg 和 Pb 之间分别表现为强相关性,可能指示元素化学性质相近或元素的同源性。Se 与重金属 As、Cd、Hg、Ni、Pb 之间也存在相关性,具体表现为:Se 与 As、Ni 之间呈负相关,与 Cd、Hg、Pb 之间呈正相关。土壤 pH 是土壤中十分重要的理化性质,其大小直接影响元素在土壤中的迁移活性和生物有效性(廉梅花,2015; T Q Dinh,2018)。从表 4 可知,土壤 pH 与重金属元素之间均呈负相关性,其中,在 0.01 水平上与 Cu、Hg、Pb、Zn 呈显著性相关,但 Se 与土壤 pH 之间呈显著的正相关性。

3.2 农作物对重金属元素的富集特征

不同农作物样品在不同重金属含量区间内对重金属元素的富集系数见表 5。

表 3 不同植物根系土与植物样中元素含量相关系数表

Tab. 3 Table of correlation coefficients between element contents in different plant root soils and plant samples

植物科属	plant * soil	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
禾本科	小麦	0.141	.786**	−0.244	0.216	−0.051	0.23	0.039	.703**	.377**
葫芦科	甜瓜	−0.022	−0.084	0.192	0.273	−0.053	.353*	.436**	.780**	.312*
伞形科	芹菜	0.07	.598**	0.149	0.107	.346*	0.038	−0.153	.807**	0.327
百合科	洋葱	−0.292	.420**	0.177	−0.119	0.095	−0.301	0.263	.728**	−0.02
	大蒜	0.037	.738**	−0.041	−0.049	−0.041	0.056	−0.261	.709**	−0.107
十字花科	花椰菜	−0.154	0.156	0.024	−0.042	0.069	0.018	−0.062	.706**	0.11
	甘蓝	0.013	.466**	−0.167	−0.186	0.268	−0.216	−.309*	.579**	−0.08
	小青菜	−0.145	.633**	−0.065	.459*	0.265	−0.024	0.076	.860**	.508*
	油菜	−0.19	0.235	−0.3	.389*	−0.07	0.159	−0.098	0.295	.406*
	白菜	−0.066	−0.274	0.101	−0.215	.877**	0.141	−0.009	0.304	−0.164
茄科	番茄	0.118	0.269	0.108	0.103	−0.125	0.19	−0.097	.782**	0.105
	辣椒	0.015	−0.005	−0.006	−0.255	−0.115	−0.098	−0.234	0.066	−0.131

注:* . 在 0.05 级别(双尾),相关性显著;* * . 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

表 4 农作物根系土样品元素间相关系数表(N=450 件)

Tab. 4 Inter-element correlation coefficients of plant root soil samples (N=450 samples)

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	pH	Se	Zn
As	1									
Cd	.136**	1								
Cr	.527**	.287**	1							
Cu	.534**	.414**	.483**	1						
Hg	.152**	.158**	0.065	.376**	1					

续表 4

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	pH	Se	Zn
Ni	. 805**	. 220**	. 707**	. 590**	0. 09	1				
Pb	. 357**	. 246**	. 367**	. 542**	. 617**	. 358**	1			
pH	－0. 092	－0. 069	－0. 076	－. 208**	－. 194**	－0. 07	－. 180**	1		
Se	－. 190**	. 157**	0. 09	0. 044	. 263**	－. 173**	. 219**	. 108*	1	
Zn	. 464**	. 473**	. 524**	. 864**	. 293**	. 580**	. 425**	－. 228**	0. 047	1

注：* . 在 0. 01 级别(双尾),相关性显著；* . 在 0. 05 级别(双尾),相关性显著。

表 5 农作物样品对根系土中元素的富集系数表
Tab. 5 Enrichment coefficient of plant samples for elements in root soil

元素	植物种属	禾本科	葫芦科	伞形科	百合科		十字花科					茄科	
		小麦	甜瓜	芹菜	洋葱	大蒜	花椰菜	甘蓝	小青菜	油菜	白菜	番茄	辣椒
	含量分段值	富集系数(植物样品/根系土)—BCF											
As	≤13. 2	3. 05	0. 75	0. 49	0. 51	1. 15	0. 36	0. 53	1. 1	3. 12	0. 98	0. 1	0. 17
	13. 2~14. 2	3. 06	0. 83	0. 51	0. 3	1. 06	0. 33	0. 34	1. 15	2. 33	0. 49	0. 09	0. 24
	14. 2~15. 2	3. 65	0. 58	0. 42	0. 28	0. 77	0. 24	0. 38	1. 11	2. 09		0. 12	0. 13
	>15. 2	2. 2	0. 52	0. 38	0. 26	0. 76	0. 23	0. 25	0. 74	2. 47		0. 08	0. 46
Cd	≤0. 2	95. 28	19. 2	38. 37	10. 09	40. 7	22. 28	12. 38	64. 37	129. 71		20. 92	37. 16
	0. 2~0. 23	70. 27	14. 3	42. 45	9. 12	41. 23	13. 49	10. 21	62. 27	96. 27	44. 75	30. 04	38. 21
	0. 23~0. 27	97. 56	13. 93	53. 84	5. 89	32. 66	18. 97	10. 26	78. 55	101. 56	5. 74	21. 52	38. 34
	>0. 27	93. 24	12. 7	48. 34	4. 47	45. 88	13. 65	15. 66	82. 05	107. 06		18. 62	36. 3
Cr	≤68. 6	2. 53	1. 07	0. 29	0. 14	0. 33	1. 28	2. 79	0. 86	15. 3	0. 24	0. 16	0. 22
	68. 6~72. 4	2. 13	1. 67	0. 24	0. 09	0. 16	1. 32	4. 24	1. 12	11. 04	0. 22	0. 12	0. 2
	72. 4~75. 9	1. 47	2. 52		0. 1	0. 23	0. 97	4. 61	0. 6	11. 14	0. 18	0. 1	0. 17
	>75. 9	1. 09	2. 63		0. 11	0. 13	1. 41	1. 22	0. 82	10. 14	0. 33	0. 11	0. 2
Cu	≤26	0. 19	0. 18	0. 008	0. 01	0. 06	0. 17	0. 92	0. 01	0. 1	0. 007	0. 02	0. 23
	26~27. 7	0. 19	0. 32	0. 008	0. 01	0. 07	0. 1	0. 48	0. 01	0. 11	0. 006	0. 02	0. 03
	27. 7~30. 1	0. 17	0. 53	0. 01	0. 01	0. 05	0. 12	0. 15	0. 01	0. 11	0. 006	0. 02	0. 02
	>30. 1	0. 14	0. 47	0. 006	0. 01	0. 05	0. 23	1. 38	0. 01	0. 1		0. 01	0. 02
Hg	≤53. 7	63. 3	4. 33	6. 2	6. 61	7. 07	7. 18	4. 4	14. 42	72. 8		4. 29	4. 88
	53. 7~72. 2	44. 13	3. 5	4. 39	2. 75	4. 55	4. 8	3. 22	9. 97	51. 12	2. 99	3	3. 76
	72. 2~101	30. 05	2. 55	3. 96	2. 11	3. 53	3. 93	2. 67	6. 74	33. 4	2. 55	3. 23	2. 97
	>101	20. 74	1. 6	2. 13	1. 63	2. 26	2. 26	1. 58	6. 55	24. 47		1. 55	2. 36
Ni	≤31. 9	3. 38	2. 43	0. 73	0. 82	2. 06	3. 55	15. 26	1. 38	13. 83	0. 89	0. 46	3. 24
	31. 9~33. 8	3. 6	3. 77	0. 6	0. 63	2. 22	6. 23	6. 09	1. 26	18. 01	0. 74	0. 75	1. 78
	33. 8~36. 3	3. 93	5	0. 66	0. 66	1. 77	3. 16	3. 73	1. 44	13. 36		0. 52	1. 36
	>36. 3	3. 12	5. 83	0. 49	0. 47	1. 82	3. 51	5. 95	1. 22	18. 44		0. 45	1. 54
Pb	≤25. 1	1. 56	8. 31	0. 31	0. 12	0. 1	3. 63	68. 33	0. 61	2. 39	0. 13	0. 1	0. 95
	25. 1~26. 6	1. 57	9. 29	0. 18	0. 08	0. 11	5. 99	24. 56	0. 52	2. 09	0. 4	0. 1	0. 13
	26. 6~28. 1	1. 82	24. 23	0. 23	0. 08	0. 15	4. 27	3. 85	0. 63	1. 69		0. 09	0. 08
	>28. 1	1. 33	25. 38	0. 19	0. 07	0. 09	4. 7	5. 51	0. 52	2. 19	0. 09	0. 08	0. 09

续表 5

元素	植物种属	禾本科	葫芦科	伞形科	百合科		十字花科					茄科	
		小麦	甜瓜	芹菜	洋葱	大蒜	花椰菜	甘蓝	小青菜	油菜	白菜	番茄	辣椒
	含量分段值	富集系数(植物样品/根系土)—BCF											
Se	≤0.29		0.007	0.01	0.035	0.44	0.03	0.02	0.02	0.74	0.04	0.007	0.08
	0.29~0.43	0.55	0.01	0.01	0.039	0.26	0.05	0.02	0.03	0.55	0.03	0.007	0.02
	0.43~0.6	0.34	0.013	0.02	0.049	0.35	0.075	0.04	0.07	0.75	0.01	0.01	0.03
	>0.6	0.63	0.019	0.04	0.06	0.6	0.085	0.1	0.1	0.29	0.01	0.03	0.03
Zn	≤76.2	0.36	0.02	0.011	0.012	0.095	0.03	0.03	0.028	0.492	0.018	0.011	0.023
	76.2~81.6	0.3	0.02	0.009	0.011	0.071	0.038	0.025	0.028	0.426	0.016	0.012	0.074
	81.6~87.8	0.29	0.02	0.009	0.01	0.082	0.028	0.037	0.023	0.526	0.009	0.011	0.016
	>87.8	0.29	0.03	0.01		0.069	0.03	0.019	0.027	0.462	0.008	0.01	0.015

注:元素 As、Cd、Cr、Hg、Ni、Pb 的 BCF 值为×1 000 后的值。

以 Pb 为例,葫芦科甜瓜和十字花科中的甘蓝较其他农作物更易富集 Pb,而小麦、芹菜、番茄、辣椒及十字花科的油菜和白菜富集能力较弱,对 Pb 不敏感。对同一农作物而言,根系土 Pb 含量的升高,富集系数也发生变化。甜瓜根系土中 Pb 含量不断升高,富集系数也相应增大,表明在一定的土壤 Pb 浓度变化范围内,甜瓜能不断富集 Pb,对 Pb 具有较高的富集能力。甘蓝则与之相反,当根系土中 Pb 浓度较低时,富集系数较大,而随着根系土中 Pb 含量的增加,富集系数则降低,当根系土中 Pb 含量大于 26.6×10^{-6} 时,Pb 富集系数则变化不大,表明当土壤中 Pb 含量到达一定浓度后,农作物吸收 Pb 行为趋于稳定(图 2)。

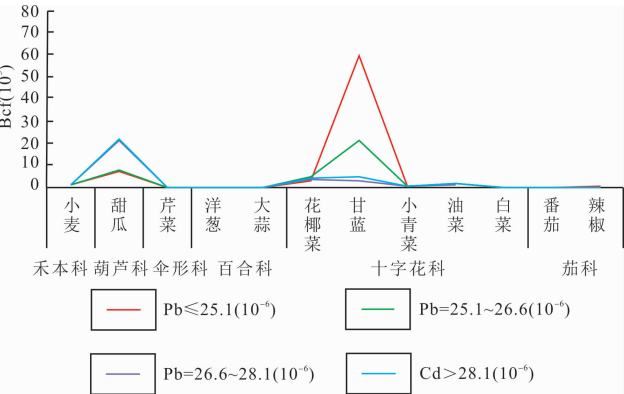


图 2 农作物样品对 Pb 的富集特征图

Fig. 2 Enrichment characteristics of Pb elements in plant samples

以 Cd 为例,不同农作物对其吸收差异较大,小麦、小青菜和油菜对 Cd 具有较强的富集能力,次为

芹菜和大蒜,而甜瓜、洋葱、花椰菜、甘蓝、番茄和辣椒对 Cd 富集能力则一般。对油菜而言,根系土中 Cd 含量不同区间内,油菜富集系数变化较大,表现为低浓度富集,高浓度趋于稳定的特征。芹菜对 Cd 富集表现为随着根系土中 Cd 浓度的增加,富集系数也相应增大(图 3)。

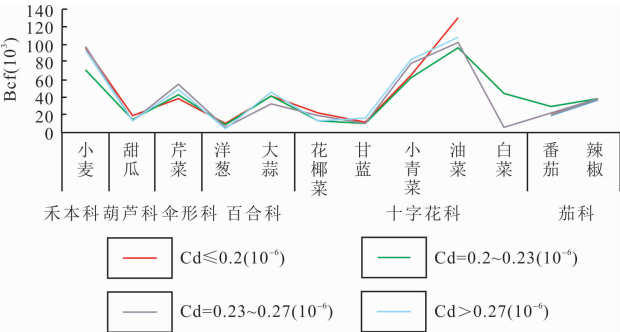


图 3 农作物样品对 Cd 的富集特征图

Fig. 3 Enrichment characteristics of Cd elements in plant samples

综上所述,相比其他农作物,十字花科的油菜对重金属元素表现出较强的富集性,主要富集 Cd、As、Ni、Cr,禾本科小麦对 Cd、As、Zn 较为敏感,富集系数较大,甜瓜仅对 Pb 有一定富集作用,大蒜主要富集 Cd 和 As,甘蓝主要富集 Cu 和 Pb,而伞形科芹菜以及茄科辣椒和番茄对重金属元素未表现出富集特征。

随着根系土中某元素含量的变化,农作物对元素富集能力也发生变化,综合表现为:①一定浓度范围内,随着根系土中元素含量的升高,农作物不断吸收富集某重金属元素,但当土壤中某元素含量超过

一定浓度后,农作物则表现为缓慢吸收特征,甚至拮抗。例如,小麦对 As 的吸收:当根系土中 As 含量小于 15.2×10^{-6} 时,小麦对 As 的富集系数不断增大,从 3.05 增大至 3.65,但当根系土中 As 含量大于 15.2×10^{-6} 时,小麦对 As 的富集系数降低至 2.2。②低浓度范围内,农作物主动吸收某重金属元素,随着根系土中元素含量的升高,农作物对元素的富集能力不断减弱。例如,小麦对 Cr 的吸收,随着根系土中 Cr 含量从 68.6×10^{-6} 升高至 75.9×10^{-6} ,小麦对 Cr 的富集系数从 2.53 降低为 1.09。③一定浓度范围内,随着根系土中某元素含量的升高,农作物对其富集系数逐渐变小,但当根系土中元素含量超过一定阈值时,农作物又主动性地吸收某元素,富集系数相应增大。例如,油菜对 As 的吸

收,随着油菜根系土中 As 含量增大,油菜对 As 的富集系数不断降低,而当根系土中 As 含量增大至 15.2 时,油菜对 As 的富集能力反而增强,富集系数变大。

3.3 土壤重金属污染评价及潜在生态风险评价

采用内梅罗综合污染指数和潜在生态危害指数法对土壤质量进行评价(表 6、表 7)。从单一金属平均污染指数可知,所采集的植物根系土中重金属单项污染指数均小于 0.7,土壤重金属污染程度处于安全范围内;从单一金属平均生态风险指数可知,所有重金属的潜在生态风险指数均在 30 以下,均属于低生态风险程度。从单项重金属污染指数和单一重金属潜在生态风险指数二者结合来看,研究区土壤十分清洁,土壤环境中的重金属含量水平适宜于无公害农产品和果品基地建设的要求。

表 6 单一金属污染指数和潜在生态风险指数表
Tab. 6 Single metal pollution index and potential ecological risk index

植物种属		指数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
禾本科	小麦	$\overline{P_i}$	0.56	0.47	0.30	0.29	0.04	0.17	0.18	0.29
		$\overline{E_i}$	5.58	14.10	0.59	1.47	1.56	0.87	0.91	0.29
葫芦科	甜瓜	$\overline{P_i}$	0.54	0.34	0.29	0.27	0.02	0.18	0.15	0.26
		$\overline{E_i}$	5.38	10.15	0.57	1.36	0.90	0.88	0.76	0.26
伞形科	芹菜	$\overline{P_i}$	0.56	0.43	0.29	0.28	0.03	0.17	0.16	0.27
		$\overline{E_i}$	5.55	12.94	0.58	1.39	1.13	0.87	0.79	0.27
百合科	洋葱	$\overline{P_i}$	0.59	0.41	0.29	0.29	0.03	0.19	0.18	0.29
		$\overline{E_i}$	5.88	12.26	0.59	1.47	1.34	0.94	0.90	0.29
	大蒜	$\overline{P_i}$	0.54	0.45	0.28	0.29	0.03	0.17	0.16	0.28
		$\overline{E_i}$	5.43	13.45	0.56	1.44	1.04	0.84	0.81	0.28
十字花科	花椰菜	$\overline{P_i}$	0.59	0.40	0.29	0.29	0.03	0.19	0.16	0.28
		$\overline{E_i}$	5.88	12.13	0.59	1.43	1.07	0.93	0.82	0.28
	甘蓝	$\overline{P_i}$	0.59	0.40	0.30	0.29	0.03	0.18	0.17	0.28
		$\overline{E_i}$	5.88	12.01	0.60	1.47	1.07	0.90	0.85	0.28
	小青菜	$\overline{P_i}$	0.59	0.45	0.29	0.31	0.03	0.19	0.17	0.29
		$\overline{E_i}$	5.87	13.46	0.58	1.53	1.29	0.94	0.83	0.29
	油菜	$\overline{P_i}$	0.57	0.40	0.28	0.28	0.02	0.18	0.16	0.27
		$\overline{E_i}$	5.68	12.08	0.56	1.40	0.91	0.89	0.78	0.27
茄科	白菜	$\overline{P_i}$	0.54	0.42	0.27	0.25	0.02	0.17	0.15	0.25
		$\overline{E_i}$	5.38	12.57	0.53	1.27	0.94	0.87	0.77	0.25
	番茄	$\overline{P_i}$	0.59	0.46	0.31	0.31	0.03	0.19	0.16	0.32
		$\overline{E_i}$	5.88	13.93	0.61	1.54	1.29	0.95	0.79	0.32
	辣椒	$\overline{P_i}$	0.61	0.42	0.29	0.30	0.03	0.19	0.17	0.29
		$\overline{E_i}$	6.05	12.60	0.59	1.50	1.27	0.93	0.83	0.29

根据农作物样品根系土的综合污染指数 $P_{综}$ 和其划分标准可知, $P_{综}$ 均小于 1, 无污染, 由多种重金属的潜在生态风险指数值可知, 所有农作物样品点的

RI 值远远小于 135, 根据综合污染指数和潜在生态风险等级划分, 研究区土壤重金属潜在生态风险程度为低度风险, 土壤质量状况良好, 未受到重金属的污染。

表 7 土壤重金属的综合污染指数和潜在生态风险指数表
Tab. 7 Comprehensive pollution index and potential ecological risk index of heavy metals in soil

植物种属		$P_{综}$	污染等级	RI	风险等级
禾本科	小麦	0.35~1.00	无	17.31~51.53	低度
	甜瓜	0.28~0.53	无	12.27~27.29	低度
伞形科	芹菜	0.38~0.81	无	22.57~45.88	低度
百合科	洋葱	0.36~0.68	无	14.26~37.80	低度
	大蒜	0.26~0.72	无	16.43~37.47	低度
十字花科	花椰菜	0.39~0.56	无	16.48~32.35	低度
	甘蓝	0.40~0.72	无	17.23~39.64	低度
	小青菜	0.40~0.86	无	17.80~45.00	低度
	油菜	0.34~0.57	无	17.13~33.66	低度
	白菜	0.40~0.50	无	20.88~29.53	低度
茄科	番茄	0.39~0.70	无	16.97~39.94	低度
	辣椒	0.36~0.60	无	14.96~36.75	低度

4 结论

(1)不同农作物样品中各元素含量与其根系土中元素含量呈现大小不同的相关性, 小麦籽粒、芹菜、甘蓝、小青菜中 Cd、Se 含量与根系土中含量为显著性相关, 不同农作物中 As、Cr 含量与其根系土中含量均无相关性。

(2)相比其他农作物, 十字花科的油菜对重金属元素表现出较强的富集性, 主要富集 Cd、As、Ni、Cr; 禾本科小麦主要富集 Cd、As、Zn; 而甜瓜仅对 Pb 有一定富集作用; 大蒜主要富集 Cd 和 As; 甘蓝主要富集 Cu 和 Pb; 而伞形科芹菜以及茄科辣椒和番茄对重金属元素未表现出富集特征。

(3)随着根系土中某元素含量的变化, 农作物对元素富集能力也发生变化。当小麦根系土中 As 含量低于 15.2×10^{-6} 时, 小麦富集系数不断增大; 当根系土中 As 含量大于 15.2×10^{-6} 时, 富集系数降低至 2.2; 当油菜根系土中 As 含量低于 15.2×10^{-6} 时, 油菜富集系数不断减小; 当根系土中 As 含量大于 15.2×10^{-6} 时, 富集系数不断增大。

(4)采用内梅罗综合污染指数法和潜在生态危

害指数法对关中富 Se 土壤区环境质量进行评价, 得出研究区土壤十分清洁, 潜在生态风险程度低, 土壤质量状况良好, 未受到重金属的污染。

参考文献(References):

宋晓珂, 李宗仁, 王金贵. 青海东部农田土壤硒分布特征及其影响因素[J]. 土壤, 2018, 50(4): 755-761.

SONG Xiaoke, LI Zongren, WANG Jingui. Distribution and Influential Factors of Soil Se in Eastern Qinghai Province [J]. Soil, 2018, 50(4): 755-761.

梁东丽, 彭琴, 崔泽玮, 等. 土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 374-380.

LIANG Dongli, PENG Qin, CUI Zewei, et al. Progress on Selenium Bioavailability and Influential Factors in Soil [J]. Current Biotechnology, 2017, 7(5): 374-380.

田欢. 典型富硒区岩石-土壤-植物中硒的赋存状态及环境行为研究[D]. 武汉: 中国地质大学. 2017.

TIAN Huan. The Occurrence State and Speciation of Seleni-

- um and its Environmental Behaviors in Rock-Soil-Plant from typical high-Se areas[D]. Wuhan:China University of Geosciences. 2017.
- 任蕊,尹宗义,王明霞,等. 三原-阎良地区土壤及农作物 Se 含量特征[J]. 西北地质,2016,49(4):193-200.
- REN Rui, YIN Zongyi, WANG Mingxia, et al. Survey and Research of Selenium Content in Soil and Crops in Sanyuan-Yanliang[J]. Northwestern Geology, 2016, 49 (4):193-200.
- 武春林,王瑞廷,丁坤,等. 中国土壤质量地球化学调查与评价的研究现状和进展[J]. 西北地质,2018,51(3): 240-252.
- WU Chunlin, WANG Ruiting, DING Kun, et al. Geochemical Survey and Evaluation on soil Quality in China: Research Status and Advances [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 240-252.
- 尹宗义,任蕊,晁旭,等. 三原-阎良地区富硒土壤中硒形态特征研究[J]. 陕西地质,2016,34(1):31-37.
- YIN Zongyi, REN Rui, CHAO Xu, et al. Selenium Speciation in Selenium-Rich Soil of Sanyuan-Yanliang Area [J]. Geology of Shaanxi, 2016, 34(1):31-37.
- 孙协平,谢永红,胡佳羽,等. 富硒土壤重金属污染研究进展[J]. 湖南农业科学,2015,(10):146-148.
- SUN Xieping, XIE Yonghong, HU Jiayu, et al. Research Advances in Heavy Metal Pollution in Selenium Enriched Soils [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2015, (10):146-148.
- 任蕊,王明霞,陈继平,等. 陕西关中地区土壤硒分布特征及影响因素[J]. 矿产勘查,2018,9(9):1827-1833.
- REN Rui, WANG Minxia, CHEN Jiping, et al. Distribution of soil selenium in Guanzhong Area and its influencing factors[J]. Mineral Exploration, 2018, 9(9):1827-1833.
- 孟昭虹,高玉娟. 黑龙江生态省土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(31): 13819-13821.
- MENG Zhaohong, GAO Yujuan. Distribution Characteristics of Heavy metals in Soil of Heilongjiang Ecological Province and Ecological risk assessment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(31):13819-13821.
- 赵沁娜,徐启明,杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报, 2005, (1):111-116.
- ZHAO Qin'na, XU Qixing, YANG Kai. Application of Potential Ecological Risk Index in Soil Pollution of Typical Polluting Industries[J]. Journal of East China Normal University, 2005, (1):111-116.
- 廉梅花. 根系土壤中重金属的活化因素及作用机理研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.
- LIAN Meihua. Study on the activating factors and mechanism of heavy metals in rhizosphere soil [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- J T Rotruck, A L Pope, H E Ganther, et al. Selenium: Biochemical Role as a Component of Glutathione Peroxidase [J]. Science, 1973, 179(4073): 588-590.
- DINH Toanquang, WANG Mengke, THUTRAN Thi Anh, et al. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2018, 49(6): 443-517.