

李 杰,朱立新,康志强. 南宁市郊周边农田土壤—农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. 中国岩溶,2018,37(1):43-52.
DOI:10.11932/karst2018y01

南宁市郊周边农田土壤—农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素

李 杰^{1,2},朱立新¹,康志强²

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 广西壮族自治区地质调查院, 南宁 530023)

摘 要:通过采集南宁市郊农田中玉米、蔬菜、水稻可食部分及其根系土 150 组,研究重金属元素在不同土壤—农作物系统中迁移特征及其影响因素,结果表明:根系土中 Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 平均含量分别为 0.116、0.202、56.76、22.12、14.49、25.18 和 56.28 mg·kg⁻¹。农作物对应平均含量分别为 0.001 1、0.037、0.054、1.153、0.205、0.011 和 9.37 mg·kg⁻¹。根系土富集因子表明 Cd 受到不同程度人为活动影响,Cr 和 Ni 主要受地质背景控制;不同作物系统元素富集因子表明 Pb 在土壤—农作物系统中迁移能力最低,Zn 迁移能力最强。Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 在土壤—水稻系统重迁移能力显著高于蔬菜和玉米。根系土中 pH、CaO、有机质、Fe₂O₃、K₂O、MgO 与重金生物富集系数呈显著性负相关,但在土壤—叶类蔬菜系统中根系土中 K₂O、MgO 与 Hg 生物富集系数呈显著正相关。

关键词:农田土壤;重金属;元素迁移;农作物;南宁市

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2018)01-0043-10

0 引 言

2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示:全国耕地土壤环境质量堪忧,全国土壤总的污染物超标率为 16.1%,其中,无机污染物超标点位数占全部的 82.8%。无机污染物主要包括镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌和镍等 8 种重金属,其污染或超标耕地主要分布在南方地区,而地质背景高、成土过程次生富集和人类活动是造成耕地污染或超标的主要原因^[1]。同时,土壤是农作物或蔬菜中重金属主要来源之一,重金属通过食物链对人体健康产生威胁^[2-8]。因此,重金属元素在土壤—作物系统中迁移转换规律及其控制影响研究对我们了解和评估调查区重金属元素生态风险显得尤为重要。研究表明,不同地区由于作物品种、土壤理化性质、元素本底含量、元素地球化学

行为、地质背景等多重影响因素的差异,造成元素在不同作物系统迁移呈现不同特征^[9-14]。

南宁市地处我国华南、西南和东南亚经济圈的结合部,是环北部湾沿岸重要的中心城市、中国面向东盟国家的区域性国际城市。随着城市化不断推进,城郊农田成为城市居民高品质农产品的主要生产基地,食品安全显得尤为重要。2000—2006 年期间,前人对市郊蔬菜基地土壤进行了调查^[15-17],评价了蔬菜基地土壤以及主要食品中重金属含量特征,但主要开展土壤调查,仅采集了部分农副产品样品并且样本过少,并不能全面代表市郊农副产品食品安全水平。本研究系统大面积采集了市郊农田土壤及其农作物可食部分,全面评价了市郊土壤污染水平和农产品安全性,拟探讨城市化影响下元素在土壤—农作物系统的迁移特征,为南宁市郊农田生态环境保护、农产品质

资助项目:南宁市城市土地地下空间开发利用调查(桂国土资办[2014]71 号);桂湘鄂 1:25 万土地质量地球化学调查(DD20160327)
第一作者简介:李杰(1983—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事生态地球化学和地球化学勘查技术应用研究。E-mail:lj@cug.edu.cn。
通信作者:朱立新,E-mail:lixinz@cags.net.cn。
收稿日期:2017-01-07

量安全监控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南宁市位于广西南部,是广西壮族自治区的首府,全区的政治、经济、文化、科技、教育、金融和信息中心。外环高速公路为界的城区面积为 900 km²(东经 108°09′~108°40′,北纬 22°40′~22°56′),城区已建成面积 264.57 km²。研究区主要集中在外环高速附近农耕地区域,配套采集不同农作物及其根系土,分别分析了土壤和农作物中 Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 元素含量。研究区地处亚热带,地形地貌为典型的盆地,右江从研究区北西面的那龙镇业仁村流入南宁市,由北西向南东流,左江从研究区西南面的江西镇同良村邕皮屯流入南宁市,由西南向北东流;右江与左江在江西镇同江村三江口汇合后称邕江,邕江是南宁市最大的河流,经江西、石埠、沙井、上尧、亭子、津头穿过研究区的中部,平均海拔 76.5 m,气候温和,雨量充沛,年均气温 21.7℃,年均降雨量 1 298 mm。土壤类型主要为赤红壤,局部地区分布有水稻土和紫色土。研究区内第四系分布最广,主要

集中在邕江两岸,主要以粘土、亚砂土、砂砾土为主;南部有一定面积的泥盆系砂岩、泥岩和石炭系灰岩出露。

1.2 样品采集与制备

2015 年 6—8 月在南宁市市郊南部和东北部主要的蔬菜、水稻和玉米种植区采集根系土及其农产品各 150 件(图 1)。用 GPS 定位采样点,每个土壤样品采样点采用对角线法设置 5 个不同的采样位置(四角与中心位置间隔约 30 m),每个位置采集 0~20 cm 的耕作层土壤,然后将 5 个位置采集的土样充分混匀到一起作为一个样本。在采集土样的对应样点采集了水稻籽实、玉米籽实和蔬菜可食部分。每个点位水稻以 1 m×1 m 的样方采集水稻籽实 500 g,玉米在每个样点选取代表性植株 10~20 株,蔬菜采集 15 个以上,多个植株混成成一个样本。共采集茎类蔬菜 103 件、水稻 44 件、叶类蔬菜 83 件、玉米 44 件;其中茎类蔬菜及其根系土 57 组,水稻及其根系土 24 组、叶类蔬菜及其根系土 45 组,玉米及其根系土 24 组。水稻和玉米风干后送实验室分析,蔬菜装入聚乙烯袋,及时送实验室分析。土壤样品经自然风干,过 20 目尼龙筛去除根系、残渣、石块等杂物,以备实验室化学分析。

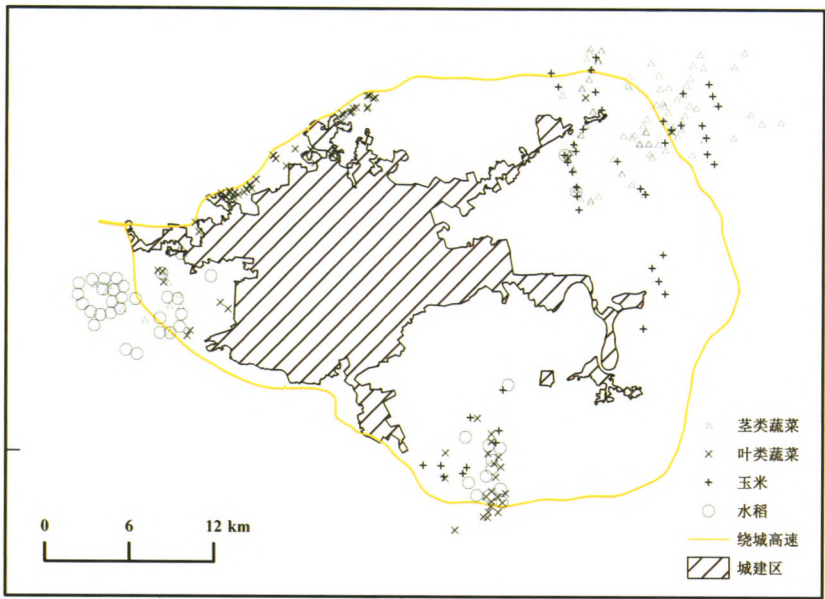


图 1 农作物及其根系土采样点位图

Fig. 1 Sampling locations of agricultural soils and crops

1.3 分析方法

土壤样品中 Hg、Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 和 Ni 7 种重

金属元素含量测定以 X 荧光光谱法和等离子体光谱法为主,辅以原子吸收光谱法、发射光谱法、原子荧光

光谱法、催化极谱法等方法体系。Hg 首先用王水溶样,KBH₄还原、氢化法处理,再用原子荧光光谱法测试含量。元素 Cd、Pb、Cr、Cu、Pb 和 Ni 含量的测试,首先用 HCl—HNO₃—HClO₄—HF 四联酸对土壤粉末样品消解,然后 Cr、Cu、Zn 和 Ni 含量用 ICP—OES 分析完成,Cd 和 Pb 用 ICP—MS 分析。土壤 pH 值用 pH 计(1:2.5)测试。总有机碳用重铬酸钾氧化+氧化还原容量法分析。土壤总氮先采用硫酸分解—加浓碱蒸馏处理,然后酸碱滴定容量法进行含量分析测定。土壤 Fe、P、K、S、Mn、Ca、Mg 等元素含量利用粉末压片 XRF 法测试。分析数据质量采用国家一级土壤标准物质(GBW07402 和 GBW07406)进行准确度和精密度监控,按比例随机检查和异常点抽查进行样品分析质量监控,以重复采样、重复分析来评定采样和分析误差是否对区域地球化学变化有显著影响,检测数据均符合中国地质调查局生态地球化学调查标准和规范的要求。

将水稻、玉米、芥菜、豆角、丝瓜、苦瓜经过清洗、烘干、破碎等过程制成待分析样。准确称取 0.100 0~1.000 0 g 按要求加工至粒度的干基或鲜基(2.000 0 g)样品于干净的微波消解仪内罐中,加入浓硝酸 5 mL,按微波消解仪操作规程进行样品分解,待消解完成冷却至室温后取出内罐,将内罐放入赶酸器中约 100 ℃ 中赶酸,至 NO₂ 烟气冒尽,取出冷却,转移至 25 mL 无硼试管中,用水定容摇匀待测。采用标准物质与加标回收相结合的方法进行准确度控制,每件样品 100% 重复分析进行精密度控制。检测数据符合中国地质调查局《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD2005—03)规范要求。

2 结果与讨论

2.1 不同根系土中重金属元素含量特征

不同农作物根系土中重金属含量统计参数见表 1。Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 在不同作物系统中平均含量分别为 115.58 ug·kg⁻¹、202.47 ug·kg⁻¹、56.76 mg·kg⁻¹、22.12 mg·kg⁻¹、14.49 mg·kg⁻¹、25.18 mg·kg⁻¹ 和 56.28 mg·kg⁻¹。Cr、Cu 和 Pb 在不同农作物根系土中含量差异不明显,变异系数分别为 0.116、0.076 和 0.097 2;Cr 在茎类蔬菜、水稻、叶类蔬菜和玉米根系土中含量分别是南宁市土壤背

景值的 0.76、0.86、0.78 和 0.73 倍,Pb 在对应农作物根系土中含量分别是南宁市背景值的 0.91、1.31、1.11 和 1 倍。Cd 变系数为 0.634,不同作物根系土中含量差异明显,水稻根系土平均含量 310.88 μg·kg⁻¹,显著高于叶类蔬菜根系土(225.04 μg·kg⁻¹)、茎类蔬菜根系土(113.47 μg·kg⁻¹)、玉米根系土(202.47 μg·kg⁻¹)平均含量,主要因为水稻根系土在淹育条件下土壤氧化还原条件相对于其他土壤复杂^[2]。Ni 和 Zn 在茎类蔬菜和玉米根系土中含量显著低于其在水稻和叶类蔬菜中的含量。

与南宁市土壤背景值^[18]相比较,农作物土壤中 Cd 平均含量显著高于南宁市土壤背景值,Cr 和 Ni 显著低于南宁市背景值,Pb 与背景值相当;Hg 在玉米根系土中显著低于背景值,其他作物根系土中高于背景值。Zn 在茎类蔬菜和玉米根系土中平均含量低于背景值,在水稻根系土显著高于背景值。相对广西土壤(A 层)背景值而言^[19],Cd 和 Pb 在水稻根系土中平均含量高于广西土壤背景值外,其余元素均低于广西土壤背景值;Hg 和 Cd 在根系土中平均含量显著高于中国土壤背景值,Hg 在叶类蔬菜根系土和 Cd 在水稻根系土中平均含量分别为中国土壤背景值的 2.09 和 3.2 倍。

富集因子(EF)^[20-22]经常被用来判断重金属的来源。当 EF<0.5,表明重金属主要来源于地壳;当 0.5≤EF≤1.5,表明重金属可能完全来成土母岩或自然风化过程;EF>1.5,表明重金属主要为人为来源。富集因子公式如下:

$$EF = \frac{(C_i/Fe)_{\text{实测值}}}{(C_i/Fe)_{\text{背景值}}}$$

式中:(C_i/Fe)_{实测值} 为土壤中 i 元素与 Fe 的比值;(C_i/Fe)_{背景值} 为土壤中 i 元素与 Fe 背景值的比值。

不同元素富集因子见表 2。Hg、Cu、Pb 和 Zn 在叶类蔬菜根系土中富集因子高于其他农作物根系土,其中 Hg 和 Zn 富集因子大于 1.5,表明其有受到人为活动的影响,这与蔬菜地经常受到施肥、农药喷洒等人为活动影响有关;Cr 在茎类蔬菜和玉米根系土中相对较高,但其介于 0.5~1.5 之间,主要来源于自然成土过程;Cd 和 Ni 在水稻根系土中富集因子最高,Cd 富集因子显著大于 1.5,表明其主要来源于人为活动,Ni 富集因子低于 1.5,其主要来源于成土母质自然成土过程。

表 1 不同农作物根系土中重金属含量

Table 1 Concentration of heavy metals in the rhizosphere soils of different corps

根系土		Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		mg · kg ⁻¹						
茎类蔬菜	样品数	57	57	57	57	57	57	57
	均值	113.47	164.47	55.52	21.03	13.1	21.87	48.86
	极小值	42.6	26	33.3	10.1	5.95	11.4	19
	极大值	257	574	83.8	41.7	31.6	45.9	157
	标准差	40.32	92.28	10.34	6.47	5.39	6.98	23.48
	变异系数	35.53	56.11	18.62	30.74	41.13	31.92	48.06
水稻	样品数	24	24	24	24	24	24	24
	均值	116.09	310.88	62.69	25.94	20.08	31.48	75.12
	极小值	45.7	103	22	12.2	2.64	12.8	18.1
	极大值	210	539	78.6	33.9	33.5	44.8	107
	标准差	40.27	112.93	12.61	5.72	7.56	8.62	21.65
	变异系数	34.69	36.33	20.11	22.04	37.64	27.38	28.81
叶类蔬菜	样品数	45	45	45	45	45	45	45
	均值	136.04	225.04	56.96	23.54	15.3	26.68	63.55
	极小值	24.1	49	33.9	12.8	5.33	13.4	26.8
	极大值	342	724	81.5	61.1	33.8	60.1	124
	标准差	76.63	143.67	11.92	10.25	7.25	10.24	25.52
	变异系数	56.33	63.84	20.93	43.53	47.4	38.37	40.16
玉米	样品数	24	24	24	24	24	24	24
	均值	81.72	141.96	53.4	18.24	10.67	23.94	41.43
	极小值	30	49	34.9	10.4	3.35	12.5	21.3
	极大值	120	287	84.4	25.7	18.3	61.5	78.7
	标准差	26.45	56.05	11.6	4.13	4.37	12.02	12.93
	变异系数	32.37	39.48	21.73	22.66	41.01	50.19	31.22
合计	样品数	150	150	150	150	150	150	150
	均值	115.58	202.47	56.76	22.12	14.49	25.18	56.28
	极小值	24.1	26	22	10.1	2.64	11.4	18.1
	极大值	342	724	84.4	61.1	33.8	61.5	157
	标准差	54.92	122.22	11.64	7.76	6.82	9.72	25.05
	变异系数	47.52	60.37	20.51	35.08	47.09	38.61	44.51
南宁市土壤背景值		80	136	59	21.7	17	24.4	50
广西土壤背景值		152	267	82.1	27.8	26.6	24	75.6

农作物根系土富集因子大小顺序为 Cd>Hg>Pb>Cu>Zn>Cr>Ni, 富集因子平均值分别为 4.19、1.85、1.80、1.58、1.38、1.36、1.01, 对应变化范围为 0.7~12.08、0.3~5.7、0.82~4.3、0.75~4.1、0.53~3.65、0.79~2.83、0.38~1.74。由图 2 可以看出,Cd 在研究区不同农作物根系土中富集因子显

著高于其他元素,并且明显高于 1.5,表明研究区土壤中 Cd 受到不同程度人为活动的影响;Hg、Pb、Cu 富集因子略高于 1.5,受人为活动影响较小;Cr 和 Ni 主要受控自然背景,人为来源较少。Cd 在不同农作物中表现出不同程度的高富集,特别是水稻中Cd富集因子范围2.99~10.38,其已受到人为

表 2 不同作物根系土中重金属元素富集因子

Table 2 Enrichment factors of heavy metals in the rhizosphere soils of different corps

作物种类		Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
茎类蔬菜	最小值	0.86	0.7	0.81	0.85	0.62	0.98	0.79
	最大值	4.81	7.38	2.83	3.67	1.74	4.16	2.98
	平均值	1.89	3.68	1.45	1.63	1.03	1.72	1.31
水稻	最小值	0.33	2.99	0.82	1.03	0.77	1.04	1.19
	最大值	3.29	10.38	2.43	4.1	1.44	4.3	2.18
	平均值	1.5	5.28	1.2	1.53	1.11	1.82	1.49
叶类蔬菜	最小值	0.3	0.91	0.79	0.89	0.41	0.82	0.93
	最大值	5.7	12.08	2.39	3.47	1.47	3.8	3.65
	平均值	2.19	4.65	1.33	1.63	1.04	1.89	1.55
玉米	最小值	0.33	0.74	0.86	0.75	0.38	0.9	0.53
	最大值	2.65	7.18	1.91	2.04	1.22	3.25	1.6
	平均值	1.44	3.42	1.37	1.42	0.83	1.82	1.14
合计	最小值	0.3	0.7	0.79	0.75	0.38	0.82	0.53
	最大值	5.7	12.08	2.83	4.1	1.74	4.3	3.65
	平均值	1.85	4.19	1.36	1.58	1.01	1.8	1.38

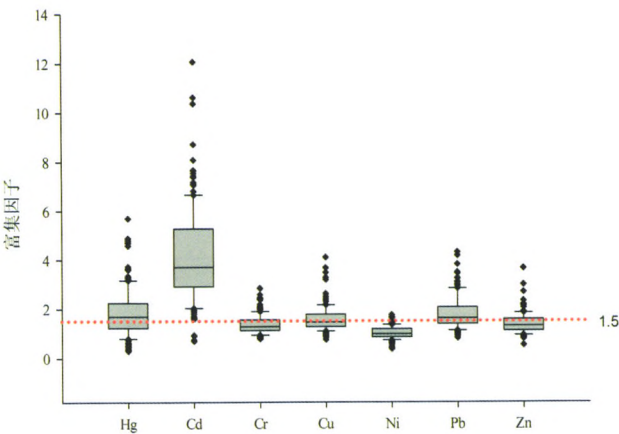


图 2 不同作物根系土中重金属元素富集因子
Fig. 2 Enrichment factors of heavy metals in the rhizosphere soils of different corps

活动显著影响;从土壤防控角度,应重点关注土壤中 Cd。

2.2 不同农作物中重金属元素含量特征

图 3 为研究区不同农作物含量箱式图,4 类农作物可食部分中 Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 重金属含量范围分别为 0.041~11 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.001~0.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.006~0.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.122~5.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.002~0.986 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0~0.098 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、

1.19~43.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Hg、Cd、Cu 在水稻籽实中平均含量最高,显著高于其他农作物可食部分中平均含量;Ni 和 Zn 在玉米中平均含量最高;Pb 在叶类蔬菜中平均含量最高,其余元素在蔬菜中平均含量低于玉米和水稻平均含量。蔬菜鲜重中 Cu 和 Ni 平均含量在茎类蔬菜中高于叶类蔬菜,其余元素均表现为叶类蔬菜可食部分元素平均含量高于茎类蔬菜;Cr 和 Ni 在玉米中平均含量高于水稻,其余元素在水稻中平均含量均显著高于其在玉米中含量。可见,不同农作物对 7 种重金属的吸收富集均表现出一定的差异性。土壤中重金属由根系转运至植株上部过程中,受到不同作物转运能力、迁移距离、根际环境、植物重金属螯合肽等多重影响因数控制。

2.3 不同土壤—农作物系统中重金属元素迁移特征

为了衡量农作物从土壤中吸收富集重金属元素的能力,定义生物富集系数(BCF)= $C_{\text{农作物}}/C_{\text{根系土}}$, $C_{\text{农作物}}$ 元素在农作物中的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), $C_{\text{根系土}}$ 表示元素在农作物对应根系土中的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。图 4 为研究区不同农作物中重金属元素的生物富集系数。重金属元素在玉米和茎类蔬菜中平均生物富集大小顺序为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ni} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Pb}$,在水稻和叶类蔬菜中平均生物富集大小顺序为 $\text{Cd} > \text{Zn}$

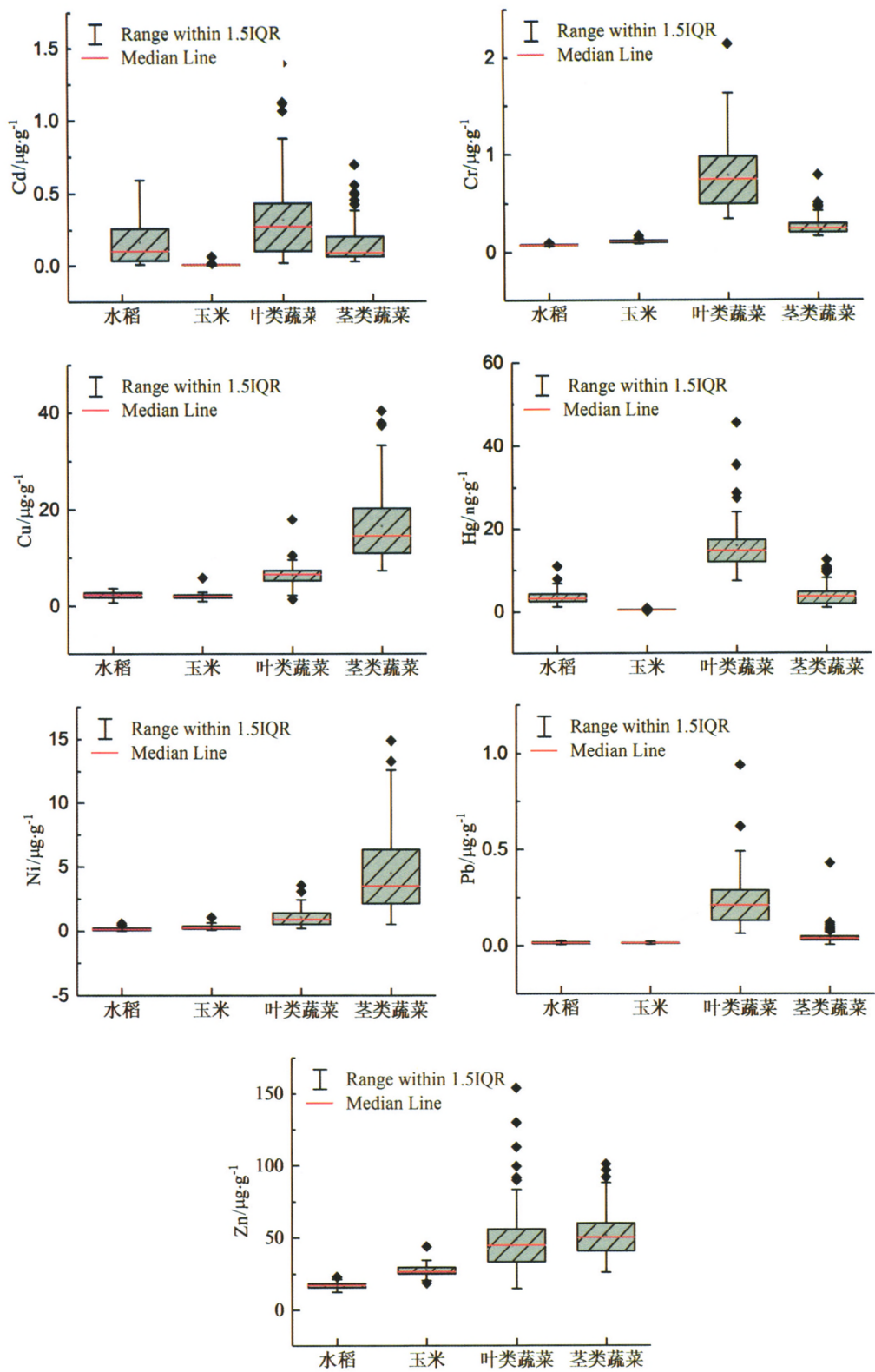


图 3 研究区不同农作物中重金属含量箱式图

Fig. 2 Box plots of heavy metal concentrations in different crops

>Cu>Hg>Ni>Cr>Pb。经对比发现，研究区叶类蔬菜 and 茎类蔬菜中，各元素生物富集系数显著高于其它农作物，Pb、Cr、Hg 和 Cd 的生物富集系数在叶类蔬菜中最高，而 Ni、Cu 和 Zn 在茎类蔬菜中最高。玉

米和水稻中各元素生物富集系数较低,主要是由于水稻和玉米主要通过茎叶传输吸收累积重金属,而叶类蔬菜叶片等器官末端的蒸发量较大且较易受到大气粉尘中重金属的污染,极易发生含有毒重金属等污染物的富集^[23-24]。

农作物中重金属元素平均生物富集系数大小顺序为 Cd>Zn>Cu>Ni>Hg>Cr>Pb,与 Chen 等^[2]研究结果一致。Cd 元素平均生物富集系数 1.08,介于 0.007~9.17,在水稻和叶类蔬菜系统迁移能力最强,平均生物富集系数分别为 0.64 和 2.22,可能是一方面土壤中 Cd 主要以可交换态或碳酸盐结合态等易于迁移的形态存在,Cd²⁺通过 Fe²⁺、Ca²⁺、Zn²⁺等二价离子转运易于被作物吸收;另一方面,Zn 与 Cd 在土壤—农作物系统中的协同作用促进了 Cd 向植物可食部分的迁移^[25-26]。Zn 和 Cu 作为植物生长必需元素在土壤—农作物系统中呈现出较强的迁移

能力。Zn 在水稻、玉米、茎类蔬菜和叶类蔬菜农作物系统中对应的平均生物富集系数分别为 0.26、0.69、1.26、0.88,Cu 对应平均生物富集系数分别为 0.31、0.11、0.79 和 0.31,表明 Zn 和 Cu 从土壤迁移至农作物可食部分的能力显著高于其他元素,特别是在蔬菜中迁移能力最强,这与蔬菜大量使用含 Zn 和 Cu 微肥有关。Pb 和 Cr 元素生物富集系数明显低于其他元素,Pb 对应平均生物富集系数分别为 0.000 5、0.006、0.002、0.008,Cr 对应的平均生物富集系数分别为 0.001、0.002、0.005、0.014,研究表明土壤中 Pb 主要以不易溶于水 Pb(OH)₂、PbCO₃和 PbSO₄,作物根系阻碍了作物对 Pb 的吸收^[27-29];另外,长期施肥使铬的有效性在逐步降低,从不稳定形态(可交换态和碳酸盐结合态)向较为稳定的形态转化(铁锰氧化物结合态和有机结合态),造成 Cr 不易向农作物中迁移^[30]。

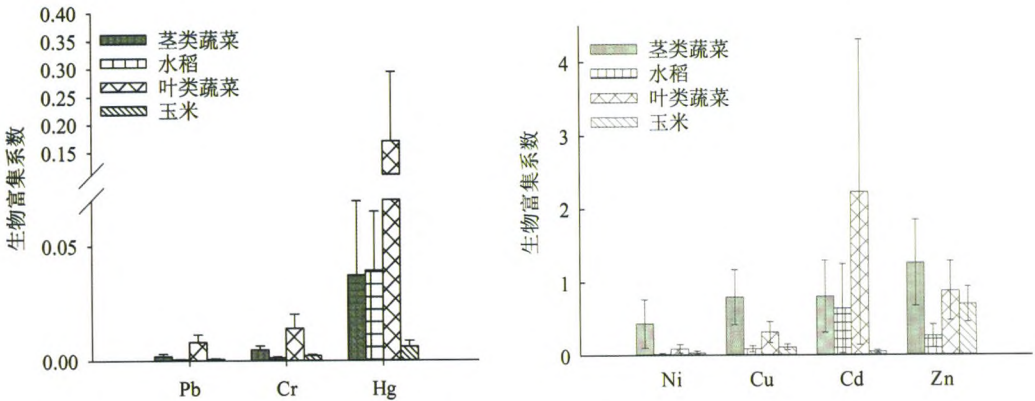


图 4 不同土壤—农作物系统中重金属元素生物富集系数
Fig. 4 Bio-accumulation coefficient of heavy metals in four soil-crop systems
in the peri-urban agricultural soils of Nanning

2.4 土壤性质对元素生物富集系数的影响

表 3 为土壤理化性质与元素生物富集系数相关性统计表。土壤 pH 与叶类蔬菜($r=-0.377$, $P<0.05$)、水稻($r=-0.422$, $P<0.05$)和玉米($r=-0.570$, $P<0.05$)Cd 元素的生物富集系数显著负相关,表明土壤 pH 越高,土壤中重金属元素迁移到作物中的含量越低。随着 pH 减少迁移到土壤溶液中的 H⁺越多,加速了重金属从土壤向根系的迁移,促使农作物对重金属的吸收^[2,31]。土壤 CaO 与 Cu、Ni、Pb、Zn 生物富集系数在不同农作物也呈现出不同程度的显著负相关,也印证了上述观点。研究区土

壤有机质和 Fe₂O₃与不同系统中重金属元素存在不同程度的显著负相关,可能与研究区土壤中重金属主要以不易被作物吸收的有机态和铁锰氧化态存在有关。土壤中 K₂O、MgO 与叶类蔬菜 Hg 元素生物富集系数呈显著正相关,表明 K⁺和 Mg²⁺有助于 Hg 元素在叶片富集。通过对比可知,土壤中重金属元素从土壤迁移到作物籽实中的过程是非常复杂,即受到土壤物理化学性质影响,例如土壤 pH、有机质、重金属形态、氧化还原条件、阳离子交换量、水文条件、盐碱度等^[32-35],又与农作物生物特性有关。

表 3 土壤性质与元素生物富集系数的相关系数
Table 3 Relationship between soil properties and bioaccumulation coefficient

茎类蔬菜生物富集系数							
根系土	Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
CaO	-0.095	0.119	-0.207	0.028	-0.432**	-0.281*	-0.444**
有机质	-0.139	0.068	-0.395**	-0.108	-0.248	-0.133	-0.248
Fe ₂ O ₃	-0.228	0.124	-0.297*	-0.062	-0.448**	-0.237	-0.468**
K ₂ O	-0.358**	-0.086	-0.525**	-0.374**	-0.329*	-0.429**	-0.492**
MgO	-0.352**	-0.065	-0.531**	-0.356**	-0.334*	-0.432**	-0.495**
pH	-0.133	0.048	-0.113	0.091	-0.218	-0.055	-0.143
叶类蔬菜生物富集系数							
根系土	Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
CaO	0.079	-0.206	0.06	-0.284	-0.300*	-0.002	-0.305*
有机质	-0.496**	-0.480**	-0.164	-0.469**	-0.391**	-0.22	-0.182
Fe ₂ O ₃	0.112	0.088	-0.431**	-0.472**	-0.474**	-0.377*	-0.516**
K ₂ O	0.611**	0.191	-0.134	-0.159	-0.348*	-0.242	-0.444**
MgO	0.546**	0.133	-0.188	-0.18	-0.406**	-0.249	-0.480**
pH	0.077	-0.377*	0.007	-0.156	-0.300*	0.007	-0.380*
水稻生物富集系数							
根系土	Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
CaO	0.031	-0.298	-0.168	-0.264	-0.194	-0.074	-0.245
有机质	-0.546**	-0.08	-0.744**	-0.691**	-0.619**	-0.612**	-0.633**
Fe ₂ O ₃	-0.483*	0.025	-0.806**	-0.566**	-0.598**	-0.622**	-0.800**
K ₂ O	-0.178	-0.198	-0.453*	-0.460*	-0.373	-0.386	-0.500*
MgO	-0.201	-0.176	-0.480*	-0.467*	-0.379	-0.414*	-0.518**
pH	0.122	-0.422*	0.243	0.085	0.06	0.224	0.07
玉米生物富集系数							
根系土	Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
CaO	0.275	-0.191	-0.132	-0.437*	-0.463*	-0.288	-0.568**
有机质	-0.326	-0.135	-0.322	-0.129	-0.407*	-0.098	-0.086
Fe ₂ O ₃	-0.087	-0.114	-0.590**	-0.537**	-0.303	-0.428*	-0.625**
K ₂ O	0.234	0.169	-0.395	-0.563**	-0.174	-0.545**	-0.547**
MgO	0.19	0.162	-0.426*	-0.566**	-0.178	-0.571**	-0.552**
pH	-0.105	-0.570**	0.187	0.037	-0.397	0.003	-0.246

注：**在 0.01 水平(双侧)显著相关;*在 0.05 水平(双侧)显著相关。

3 结 论

(1)研究区根系土 Hg、Cr、Cu、Pb、Zn 平均值含量与南宁市土壤背景值相当,Cr 和 Ni 显著低于背景值。农作物可食部分重金属元素平均含量大小顺序为:Zn >Cu>Ni>Cd>Pb>Hg,Hg、Cr 和 Pb 均符合《食品中污染物限量(GB2762-2012)》规定的限值。

(2)农作物根系土富集因子大小顺序为 Cd>Hg>Pb>Cu>Cr>Ni,Cd 在研究区不同农作物根系土中富集因子显著高于其他元素,Hg 和 Zn 在叶类蔬菜根系土、Cd 在水稻根系土富集因子大于 1.5,特别是水稻根系土中 Cd 富集因子范围 2.99~10.38,从土壤防控角度,应重点关注土壤中 Cd。

(3)农作物中重金属元素平均富集系数大小顺序

为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Pb}$, 叶类蔬菜和茎类蔬菜各元素生物富集系数显著高于其他农作物, Pb 、 Cr 、 Hg 和 Cd 生物富集系数在叶类蔬菜中最高, 而 Ni 、 Cu 和 Zn 在茎类蔬菜中最高。在土壤—农作物系统中, Cd 和 Zn 呈现出较强迁移能力, Cr 和 Pb 迁移能力较弱。

(4) 重金属元素在土壤—农作物系统迁移过程复杂。大部分土壤—农作物系统中土壤 pH 、有机质、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 等理化性质阻碍重金属元素从土壤向农作物中迁移, 而土壤中 K_2O 、 MgO 与叶类蔬菜 Hg 元素含量呈显著正相关。

参考文献

- [1] 张桃林. 科学认识和防治耕地土壤重金属污染[J]. 土壤, 2015, 47(3): 435-439.
- [2] Chen H, Yuan X, Li T, et al. Characteristics of heavy metal transfer and their influencing factors in different soil - crop systems of the industrialization region, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 126: 193-201.
- [3] Tóth G, Hermann T, Da Silva M R, et al. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety[J]. Environment International, 2016, 88: 299-309.
- [4] Ding C, Ma Y, Li X, et al. Derivation of soil thresholds for lead applying species sensitivity distribution: A case study for root vegetables[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 303: 21-27.
- [5] Al Mamun S, Chanson G, Muliadi, et al. Municipal composts reduce the transfer of Cd from soil to vegetables[J]. Environmental Pollution, 2016, 213: 8-15.
- [6] Guala S D, Vega F A, Covelo E F. The dynamics of heavy metals in plant-soil interactions[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(8): 1148-1152.
- [7] Li W, Xu B, Song Q, et al. The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil - rice systems at a regional scale in eastern China[J]. Science of The Total Environment, 2014, 472: 407-420.
- [8] Zhang X, Zhong T, Liu L, et al. Impact of Soil Heavy Metal Pollution on Food Safety in China[J]. PLOS ONE, 2015, 10(8): e135182.
- [9] 朱立新, 马生明, 王之峰, 等. 平原区多目标地球化学调查异常查证及生态效应评价方法[J]. 中国地质, 2004, 31(4): 431-435.
- [10] 朱立新, 马生明, 王之峰, 等. 沿海冲积平原区土壤中元素含量特征及其影响因素研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(1): 45-49.
- [11] 陈红燕, 袁旭音, 李天元, 等. 不同污染源对水稻土及水稻籽粒的重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 684-690.
- [12] 豆长明, 徐德聪, 周晓铁, 等. 铜陵矿区周边土壤-蔬菜系统中重金属的转移特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 920-927.
- [13] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 等. 岩溶区典型土壤对 Cd^{2+} 的吸附特性[J]. 中国岩溶, 2015, 34(4): 402-409.
- [14] 谌金吾, 孙一铭, 杨占南, 等. 三峡库区云阳消落带土壤重金属形态及其在植物中的富集和转移[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 415-422.
- [15] 黄碧燕, 韦宇宁. 广西南宁市郊区土壤及其农副产品重金属污染状况监测与评价[J]. 农业环境与发展, 2000, 17(4): 20-22.
- [16] 秦波, 白厚义, 陈秀娟, 等. 南宁市郊菜园土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S1): 45-47.
- [17] 孔德工, 唐其展, 田忠孝, 等. 南宁市蔬菜基地土壤重金属含量及评价[J]. 土壤, 2004, 36(1): 21-24.
- [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] 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.
- [20] Gu Y, Wang Z, Lu S, et al. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify source of anthropogenic impacts on metallic elements in sediments from the mid Guangdong coasts, China[J]. Environmental Pollution, 2012, 163(4): 248-255.
- [21] Zhang L, Ye X, Feng H, et al. Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 54(7): 974-982.
- [22] Gu Y, Gao Y, Lin Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou[J]. Applied Geochemistry, 2016, 67: 52-58.
- [23] 张伯尧. 兰州市菜地土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险评估[D]. 甘肃农业大学生态学, 2009.
- [24] 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.
- [25] Welch R M, Norvell W A. Mechanisms of Cadmium Uptake, Translocation and Deposition in Plants[M]. Springer Netherlands, 1999.
- [26] Nan Z, Li J, Zhang J, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions[J]. Science of the Total Environment, 2002, 285(1): 187-195.
- [27] Turan M, Esringü A. Phytoremediation Based on Canola (*Brassica napus* L.) and Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) Planted on Spiked Soil by Aliquot Amount of Cd, Cu, Pb, and Zn[J]. Plant Soil & Environment, 2007, 53(1): 7-15.
- [28] Cui L, Feng X, Lin C J, et al. Accumulation and translocation of 198Hg in four crop species[J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2014, 33(2): 334-340.
- [29] Guan G, Song X U. The Regularity of distribution, change

and migration of heavy metals in soil-rice plant system[J]. *Ecology & Environment*, 2006,15(2):315-318.

[30] 李玉会. 外源 Cr(Ⅲ)在长期不同施肥壤土中的形态转化及作物吸收[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.

[31] Zeng F, Ali S, Zhang H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011,159(1):84-91.

[32] Laing G D, Vos R D, Vandecasteele B, et al. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2008,77(4):589-602.

[33] Laing G D, Rinklebe J, Vandecasteele B, et al. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13):3972-3985.

[34] Du L G, Vanthuyne D R, Vandecasteele B, et al. Influence of hydrological regime on pore water metal concentrations in a contaminated sediment-derived soil[J]. *Environmental Pollution*, 2007,147(3):615-625.

[35] Papafilippaki A, Gasparatos D, Haidouti C, et al. Total and bioavailable forms of Cu, Zn, Pb and Cr in agricultural soils: A study from the hydrological basin of Keritis, Chania, Greece [J]. *Global Nest Journal*, 2007,9(3):201-206.

Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China

LI Jie^{1,2}, ZHU Lixin¹, KANG Zhiqiang²

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2. Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning, Guangxi 530023, China)

Abstract A total of 150 pairs of concentrations of Hg, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in the soils, grains of rice, vegetable and corn were determined in peri-urban agricultural soils of Nanning. The results indicated the mean soil concentrations of Hg, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were 0.116, 0.202, 56.76, 22.12, 14.49, 25.18, 56.28 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. The mean concentrations of six heavy metals in crops were 0.0011, 0.037, 0.054, 1.153, 0.205, 0.011 and 9.37 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Enrichment factor showed that Cd is mainly originated from human source; whereas Cr and Ni were controlled by natural sources. Transfer ability of Pb is lower than other metals while transfer ability of Zn is higher than other metals. Transfer ability of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn in soil-rice system was stronger than those in soil-vegetable and corn systems. Soil pH, CaO, total organic matter, Fe_2O_3 , K_2O and MgO were major factors influencing metal transfer from soil to crops, whereas soil K_2O and MgO contents presented a negative effect on heavy metal mobility in leafed vegetable cultivation systems.

Key words agricultural soils, heavy metal, element migration, crop, Nanning City

(编辑 吴华英)