doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2020.03.008

深圳杨梅坑地区岩石-土壤-植物系统中 重金属元素的迁移特征

孙现领¹,贾黎黎²

SUN Xian-Ling¹, JIA Li-Li²

(1. 深圳大鹏半岛国家地质公园管理处,深圳 518121; 2. 广东省地质调查院,广州 510080)

Shenzhen Dapeng Peninsula National Geopark Management Office, Shenzhen 518121, Guangdong, China;
Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

摘要:本文以广东省深圳杨梅坑地区为研究对象,在详细的野外调查和系统的资料搜集的基础上,采集土壤、岩石和芒萁植物样品,研究深圳杨梅坑地区不同地层岩石-土壤-植物系统中重金属元素的含量及分配特征,并揭示重金属元素在岩石-土壤-植物系统中的迁移累积规律。结果表明:(1)从岩石到土壤,春湾组土壤富集 Cu、Ni、Cr,南山组土壤富集 Pb、Zn、Cd、 Hg。土壤在区域上富集特征,与岩石富集特征基本一致,表明地质背景是影响土壤重金属分布的主要因素之一。(2)芒萁对 土壤中 Cu、Cd 元素吸收程度最强,而对 As 元素吸收程度最低。植物体内重金属的转移能力趋势为 Zn>Hg>Cd>Pb>Cu>Ni> Cr>As。(3)在岩石-土壤-植物系统中,As 元素的迁移能力极弱,主要集中于土壤和成土母岩中; Pb、Zn、Hg、Cr、Ni 在岩石-土壤-植物系统中的迁移较弱,较少受成土母质和母岩的影响;Cd、Cu 在岩石-土壤-植物系统中的迁移较强,存在人为引起 的来源。

文章编号:1007-3701(2020)03-0270-10

Sun X L and Jia L L. Migration Characteristics of Heavy Metals in Rock-Soil-Plant System in Yangmeikeng Area, Shenzhen. South China Geology, 2020, 36(3):270-279.

Abstract: Based on detailed field investigation and systematic data collection, soil, rock and Osmunda japonica plant samples were collected to study the content and distribution characteristics of heavy metal elements in rock soil plant system of different strata in Yangmeikeng area of Shenzhen, Guangdong Province, and to reveal the migration and accumulation rules of heavy metal elements in rock soil plant system. The results show that : (1) from rock to soil, the soil of Chunwan Formation is rich in Cu, Ni and Cr, and that in Nanshan Formation is rich in Pb, Zn, Cd and Hg. The regional enrichment characteristics of soil are basically consistent with those of rocks, indicating that geological background is one of the main factors affecting the distribution of heavy metals in soil. (2) The absorption of Cu and Cd by Dicranopteris was the strongest, while that of As was the lowest. The trend of heavy metal transfer capacity in plants was Zn > Hg > Cd > Pb > Cu > Ni > Cr > As. (3) In the rock soil plant system, the migration ability of As is very weak, mainly concentrated in the soil and parent rock; Pb, Zn, Hg, Cr,

基金项目:深圳大鹏半岛国家地质公园管理处"七娘山古火山生态地质调查研究项目"

收稿日期:2020-6-14;修回日期:2020-7-28;责任编辑:董好刚

第一作者:孙现领(1987—),男,工程师,主要从事地球化学、生态地质调查与研究工作,E-mail:568139720@qq.com

Ni in the rock soil plant system are relatively weak, less affected by the parent material and parent rock; Cd, Cu in the rock soil plant system migration is strong, there exiting man-made sources.

Key words: Yangmeikeng area, Shenzhen; rock -soil-herb system; heavy mental transfer

生态地质调查是服务于自然资源安全保障与 管理、生态保护与修复的基础地质工作^[1-3]。根据我 国生态地质调查试点经验,不同地区研究内容和调 查重点存在很大区别^[4-6]。以往的调查多局限于地质 学、植物学、动物学等单学科调查研究^[7-12],没有系 统性分析岩石-土壤-植物系统的相关性和内在联 系。因此,本次研究主要以岩石-土壤-植物生态系 统的地质控制作用作为重点研究内容。寻找岩石-土壤-植物系统中重金属元素的含量及分布特征, 从生态地球化学角度分析重金属元素在岩石-土 壤-植物系统中的迁移转化累积规律及其相互作用 机理,对全面掌握生态系统的物质循环特征,进行 生态地质环境保护、治理以及土地利用规划以及土 地资源可持续利用具有重要意义。

1 研究区概况

研究区位于深圳大鹏半岛国家地质公园内,东 南毗珠江三角洲,西与香港隔海相望,北与惠州海 域相接,与深圳市区相距约50km,交通便利(图1) 区内。地层发育较简单,主要为泥盆系春湾组和侏 罗系南山组(图 2)。土壤类型主要为赤红壤、红壤、 黄壤,其中分布面积最大是赤红壤,占整个半岛的 60%左右。研究区属亚热带季风气候。年平均气温 22℃,最冷的1月平均气温 15.2℃,最热7月平均 气温 27.9℃。全年降雨量 2280 mm 左右,十分利于 植物的生长,植被茂密。

2 研究方法

2.1 样品采集与测定

研究区内主要地层为南山组,只有小部分春湾 组(图2)。结合野外考察选择土壤发育较完整地 段,最终确定5个采样点。每个采样点由上至下,按 照土壤自然发生层采集植物、表土层(A层)、成土 母岩(D层)样品。芒萁是杨梅坑地区一种很常见的 蕨类植物,是区域植被草本层的主要组成物种,也 是区域酸性土壤的指示物种。该植物抗旱能力强, 分布范围广,具有很好的水土保持作用,是研究植 物体内元素含量分布、迁移、累积规律的理想材料。 为此,本研究以其为主要植物研究对象,其茎为根 状茎,生长在地下,根附着在根状茎上,呈须状;地



图1 研究区地理位置图 Fig. 1 Geographical location map of the study area



图2 研究区地质简图 Fig. 2 Simplified geological map of the study area

上部分为叶,其叶柄直立,占植株总重量的很大一部分。为了解植物体内各器官元素含量的差异,这 里将芒萁植株分为根、茎、叶3个器官分别测定其 元素含量。

本次样品分析工作由广东省地质实验中心承 担。岩石和土壤带回实验室后风干,清除杂质后过 筛备用,植物样品带回实验室清洗干净,烘干至恒 重,粉碎研磨备用。岩石、土壤和植物样品中的 Pb、 Zn 含量采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定;Cd 含 量采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定;Cr、Cu、Ni 含量采用等离子体光谱法(ICP-OES)测定;As、Hg 含量采用原子荧光光谱法(AFS)测定。

2.2 指标计算方法

①转移系数:指地上部元素的含量与地下部同 种元素含量的比值,用来评价植物将金属元素从地 下向地上的运输和富集能力。转移系数越大,则金 属从根系向地上部器官转运能力越强^[13]。

 $TF = \frac{H_{MG}}{H_{MP}}$

H_{MG}:植物地上部分金属含量,本文取芒萁叶中含量;

H_{MR}:植物根部金属含量。

②生物富集系数:植物对重金属的生物富集系

数,也称吸收系数,是指植物地上部某重金属的含量与其生长介质中某重金属含量之比。生物富集系数是植物将重金属吸收转移到体内并在体内累积的能力大小的评价指标,常用此指标来反映重金属元素在土壤-植物体系中迁移的难易程度,计算公式为:

$$CF = \frac{HM_P}{HM_S}$$

HM_P:植物体内某重金属含量

HMs:土壤中某重金属含量

③综合富集系数:某植物综合富集系数是植物 体各器官对各元素富集系数的平均值。植物的根、 茎、叶是一个整体,综合富集系数能较直观、清晰的 反映植物整体富集某种金属的能力大小^[14]。

 $CF^* = \frac{CF_R + CF_L + CF_S}{2}$

其中, CF_R 根富集系数; CF_L 叶富集系数; CF_s 茎 富集系数。

3 研究结果

3.1 成土母岩与土壤

3.1.1 成土母岩特征

调查区岩石重金属元素含量特征见表1。

岩性

南山组流纹岩

春湾组石英砂岩

调查区岩石

华南褶皱系[15]

中国流纹岩[15]

中国东部石英砂岩[15]

114

82.15

12.8

68.28

66

55

13

ble 1 Content of heavy metal elements in rocks of yangmeikeng										
点号	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg		
01	4.61	35.9	80.4	3.38	1.6	0.13	1.34	0.0059		
02	1.8	20.2	50.2	1.58	1.26	0.04	1.85	0.01		
04	4.9	27.9	84	2.74	0.83	0.13	0.6	0.0038		

11.8

4.88

30.5

10

33

4.5

11

3.74

1.86

3.26

2.138

17

4

5.2

0.031

0.08

0.035

0.0732

0.098

0.08

0.03

6.42

2.55

1.62

2.366

3.7

3.5

2.5

表1 七娘山杨梅坑地区岩石重金属元素含量特征统计(单位:μg/g) Table

(1)本次调查全部流纹岩与中国流纹岩元素丰 度对比,含量高的(比值大于1.2)呈富集特征的元 素主要有 Pb、Zn,Ni 贫乏最为明显,其含量平均值 只有 1.86 µg/g,是中国流纹岩的 46.44%。

05

均值

03

均值

/

/

/

3.35

3.67

7.86

4.504

12

4.5

4.4

49

33.25

17.4

30.08

26

21

4

(2)石英砂岩样与中国东部石英砂岩元素丰度 相对比,含量高的(比值大于1.2)呈富集特征的元 素有 Cu、Pb、Cr, 贫乏 Ni、As、Hg。其中 Pb 富集最为 显著,其含量为中国东部石英砂岩的4.35倍。

(3)调查区全部岩石样与华南褶皱系元素丰度 对比,含量与其接近的元素有 Pb、Zn、Hg,呈现相对 贫化的元素为 Cu、Ni、Cr、Cd、As 等。

(4)不同地质体元素含量差异较大,相对于春 湾组老地层,南山组火山岩中 Pb、Zn、Cd 等重金属 元素含量偏高,而Cu、Cr、Ni等重金属元素在老地 层中的含量显著高于火山岩。

3.1.2 土壤与成土母岩关系

土壤来自于岩石的风化产物,因此研究土壤与

成土母岩的关系有较大意义,本次研究共采集5组 土壤样品,数据如表2所示。对本次采集的土壤中 元素含量及其成土背景母岩元素含量均值进行对 比分析发现,除As、Hg外,土壤中重金属元素与其 成土母岩中重金属元素含量具有较好的共消长关 系(图 3),说明调查区 Pb、Zn、Cu、Cd、Cr 等重金属 元素含量与地质背景关系密切,一定程度上受控于 成土母岩。

在不同地质背景上,成土母岩存在着差异,元 素富集情况也不一样。以泥盆系风化物为成土母质 的土壤富集 Cu、Ni、Cr, 以火山岩风化物为成土母 质的土壤富集 Pb、Zn、Cd、Hg。土壤在区域上富集特 征,与岩石富集特征基本一致,表明地质背景是影 响土壤重金属分布的主要因素之一。

3.2 植物与土壤

3.2.1 土壤-植物中重金属元素迁移

植物体内富集的重金属元素主要是从土壤吸

Table 2 Content of heavy metal elements in soil of yangmeikeng area									
地层	点号	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	Cd	Hg	As
	01	29.3	61.2	3.96	2.98	6.61	0.11	0.1	1.53
南	02	26.9	77.7	7.64	4.16	18.6	0.034	0.071	5.08
Щ	04	23.9	69.3	5.26	6.07	22.4	0.039	0.12	7.55
组	05	30.3	76.5	6.92	2.79	9.78	0.06	0.07	4.21
	均值	27.6	71.18	5.95	4.00	14.35	0.061	0.090	4.59
春湾组	03	17.50	30.00	8.08	10.00	90.60	0.03	0.06	15.90

表2 七娘山杨梅坑地区土壤重金属元素含量特征统计(单位:μg/g)

0.0064

0.01

0.0081

0.00684

0.0066

0.007

0.011



图3 土壤与成土母岩重金属元素含量关系图

Fig. 3 Comparison of heavy metal content between soil and parent rock

收的,而植物从土壤中吸收的重金属元素最先在根部积累,然后有一部分通过植物体内循环被运输到 植物体的其他部位;因而植物体的不同器官对金属 元素吸收富集状况不一样,一般情况下植物的地下 部分要高于地上部分。

结合不同地层表层土壤和芒萁各个部位检测 到的重金属元素共得到了 Ni、As、Cr、Cu、Zn、Pb、 Hg、Cd 等 8 种重金属元素在芒萁内的综合富集系 数(图 4),由图 4 可知,在春湾组中,重金属元素综 合富集系数从大到小进行排序结果为:Cu>Cd>Zn> Pb>Hg>Ni>Cr>As,而在南山组中,重金属元素综合 富集系数从大到小进行排序结果为:Cu>Cd>Ni> Cr>Pb>Hg>Zn>As $_{\circ}$

植物生物量与重金属富集量之间存在着某种 平衡关系,尽管南山组与春湾组中的芒萁Zn、Pb、 Cr、Ni等元素含量并无明显差异,但由于春湾组土 壤富集Ni、Cr,南山组土壤富集Pb、Zn。相应元素土 壤含量高,以至于计算出的系数反而小。总体而言, 芒萁对土壤中Cu、Cd元素吸收程度最强,而对As 元素吸收程度最低。

3.2.2 植物体内重金属元素转移特征

如表 3 所示,在 5 个植物样中,As、Ni、Cr 元素 的含量分布普遍符合根>叶>茎规律,Cd、Hg、Pb、Zn 元素的含量分布普遍符合叶>根>茎规律(图 5)。从



图4 不同地层中植物综合富集系数

Fig. 4 Comprehensive enrichment coefficient of plants in different strata

表3 芒萁根、茎、叶中重金属元素含量分布表(单位:µg/g) Table 3 Distribution of heavy metal elements in roots, stems and leaves of dicranopteris pedata

点号	Ni	Cu	Zn	Pb	As	Hg	Cr	Cd
MQ01-根	3.11	12.4	11.44	10.6	0.17	0.0087	9.04	0.05
MQ01-茎	1.02	48.6	10.1	7.08	0.026	0.0029	2.6	0.04
MQ01-叶	1.71	4.82	27.8	11.9	0.07	0.017	5.26	0.07
ZW02-根	2.56	10.5	11.7	2.12	0.022	0.016	7.5	0.02
ZW02-茎	1.23	15	6.6	2.68	0.014	0.013	3.43	0.01
ZW02-叶	2.2	7.64	17.5	2.23	0.018	0.036	6.22	0.03
ZW03-根	1.59	6.43	9.09	6.28	0.058	0.015	6	0.02
ZW03-茎	0.88	17.9	7.56	4.51	0.014	0.0082	2.55	0.01
ZW03-叶	1.25	13.7	29.6	6.52	0.04	0.026	3.24	0.03
ZW04-根	2.4	18.4	9.26	5.68	0.082	0.018	6.48	0.07
ZW04-茎	0.68	2.93	7.19	3.48	0.016	0.0092	1.9	0.06
ZW04-叶	1.42	10.8	23.5	6.86	0.068	0.026	3.57	0.18
ZW05-根	3.11	5.79	10.3	12	0.077	0.025	8.87	0.03
ZW05-茎	1.6	19.5	8.86	4.45	0.012	0.01	4.39	0.02
ZW05-叶	1.83	10.4	23.3	7.48	0.029	0.028	5.18	0.04

2020年



图5 芒萁不同部位元素含量对比图

Fig. 5 Comparison of element contents in different parts of dicranopteris pedata

元素的分配状态可以发现,五组植物样品对元素的 吸收有着基本相似性,主要富集器官为植物更新能 力强的根系和叶片,而茎相对积累能力偏低。

转移系数大于 1 的重金属元素有 Cu、Zn、Pb、 Hg、Cd,其余 Ni、As、Cr 等 3 种重金属元素转移系 数均小于 1(图 6),转移系数(TF)作为金属转移能 力的反映,可以看出芒萁对 Cu、Zn、Pb、Hg、Cd 元素 具有较高的转移能力,TF 分别为 1.13、2.24、1.01、 1.70 和 1.67,而对其他金属元素的转移能力稍弱, 其中芒萁对 Zn 元素的转移能力最强,高达 2.24。植 物体内重金属转移系数从大到小排序为:Zn>Hg> Cd>Pb>Cu>Ni>Cr>As。

3.3 岩石—土壤—植物中元素迁移特征

元素含量分布在不同地层中均有差异,但金属 迁移累积规律大致相同(图7)。

Pb、Zn、Ni、Hg、Cr 在土壤和岩石中的含量均高 于植株,植物中的 Pb、Zn、Ni、Hg、Cr 含量仅占岩 石-土壤-植物系统中 Pb、Zn、Ni、Hg、Cr 总含量的 20%-40%,反映出 Pb、Zn、Ni、Hg、Cr 在岩石-土壤-植物系统中的迁移较弱,芒萁根茎和叶片中 Pb、 Zn、Ni、Hg、Cr 较少来自土壤和母岩。

在不同地层中,Cd、Cu 在植物中的含量均大于 在土壤和岩石中的含量,在植物中生物富集系数均 大于1,表明Cd和Cu元素迁移能力极强,在岩石-土壤-植物系统中除了成土母岩外,存在人为引起 的来源。

As 含量主要分布在土壤和母岩中,在芒萁根茎 叶中的分布极少,表明芒萁对 As 的富集能力极弱。 在春湾组和南山组中,土壤中 As 的含量均超过成 土母岩,表明土壤对 As 具有一定的富集能力。



Fig. 6 Distribution of transfer coefficients of heavy metals

4 结论与展望

4.1 结论

本文通过对杨梅坑地区不同地层岩石-土壤-植物系统中的重金属元素迁移规律研究,总结出以 下几点结论。

(1)从岩石到土壤,以泥盆系风化物为成土母 质的土壤富集 Cu、Ni、Cr,以火山岩风化物为成土 母质的土壤富集 Pb、Zn、Cd、Hg。土壤在区域上富集 特征,与岩石富集特征基本一致,表明地质背景是 影响土壤重金属分布的主要因素之一。

(2)芒萁对土壤中 Cu、Cd 元素吸收程度最强, 而对 As 元素吸收程度最低。植物体内重金属的转 移能力趋势为 Zn>Hg>Cd>Pb>Cu>Ni>Cr>As。

(3)在岩石-土壤-植物系统中,As 元素的迁移 能力极弱,主要集中于土壤和成土母岩中;Pb、Zn、 Hg、Cr、Ni 在在岩石-土壤-植物系统中的迁移较弱, 较少受成土母质和母岩的影响;Cd、Cu 在岩石-土 壤-植物系统中的迁移较强,存在人为引起的来源。 4.2 展望

有关岩石-土壤-植物系统地球化学元素迁移 规律的研究很少,本文是一次探索性的尝试工作, 要明确元素迁移的内在本质,是一项复杂的系统工 程,与土壤酸碱度、元素的有效性、元素互补拮抗等 因子密切相关^[16]。本文将岩石、土壤和植物结合研 究,突破了传统将系统孤立的研究界限,试图为地 质背景系统潜在资源复杂综合作用找出理论依据, 为区域资源开发、生态保护与修复、政府决策等提 供了基础资料和地质科学依据。

参考文献:

- Trofimov V T. Ecological geology: A novel branch of geological sciences [J].地学前缘,2001,8(1):27-35.
- [2] Trofimov V T. Approaches, principles and criteria of evaluation of ecological geological conditions[J].地学前缘, 2004,11(2):533-542.
- [3] 刘孟合,胡俊良,王磊,张鲲,程顺波,崔森,彭三国,王宇,薛蛟.广西钟山县珊瑚矿周边及下游地区农作物重金属污染调查评价[J]. 华南地质与矿产,2020,36(2): 169-176.
- [4] 陈晶晶.关于生态环境地质的基本特点与技术分析[J].环



图7 元素在岩石-土壤-植物系统中的分布

Fig. 7 Distribution of elements in rock-soil-herb system

境与发展,2020,24(4):24-26.

- [5] 陈树旺,邢德和,丁秋红,郑月娟,高飞,卞雄飞,张志斌, [11] 支兵发. 试论区域生态地质环境质量评价的几个问 商 翎.生态地质调查评价——以辽宁铁岭地区为例[J].地 质与资源,2012,21(6):540-545.
- [6] 马 骏,李昌晓,魏 虹,马朋,杨予静,任庆水,张 雯.三峡 [12] 庞绪贵,战金成,宋海林,藤兆令,李秀章,王增辉,代杰 库区生态脆弱性评价[J].生态学报,2015,35(21):7117-7129.
- [7] 贾黎黎,李婷婷,朱鑫,赵艺.广东省阳江-茂名地区1:25 [13] 白永飞.拉萨河流域主要湿地芦苇不同部位金属元素富 万土地质量地球化学评估 [J]. 华南地质与矿产, 2017, 33(1): 88-93.
- [8] 贾黎黎,朱鑫,赵艺,李婷婷.雷州半岛土壤碳储量及其有 机碳时空变化规律 [J]. 华南地质与矿产, 2019, 35(3): 373-379
- [9] 邱啸飞. 珠三角沿海地区土壤硒的来源和富集成因初探 [J].华南地质与矿产, 2019, 35(4):441-448.
- [10] 苏航,杨光鹏.探讨生态地质环境与综合性生态环境地

质[J].城市建设理论研究,2018,34:153.

- 题——以珠江三角洲经济区为例 [J]. 灾害学.2008,23 (2):59-64
- 瑞.山东黄河下游地区局部生态地球化学评价方法与技 术[J].山东国土资源,2006,22(5):28-33
- 集规律研究[D].西藏大学,2019.
- [14] 吴迪. 钢铁企业重金属污染区园林植物富集特征—以 武钢炼钢厂和焦化厂为例[D].华中农业大学硕士学院 论文,2013.
- [15] 迟清华, 鄢明才.应用地球化学元素丰度数据手册[M].北 京:地质出版社,2007.
- [16] 陈文德,彭培好,李贤伟,王丽华.岩-土-植系统中重金属 元素的迁聚规律研究[J].土壤通报,2009,40(2):369-373.

《华南地质与矿产》更名为《华南地质》的启事

经国家新闻出版署批准(国新出审〔2020〕2462号),《华南地质与矿产》于2020年第3期正式更名 为《华南地质》(CN42-1913/P)。

《华南地质》办刊宗旨为:立足华南地区,刊载地质科技新进展、新成果、新技术,促进学术交流,推动成 果转化,服务生态文明建设和自然资源管理。

更名后的《华南地质》继续为中国知网、万方数据库、维普数据库、CA(化学文摘)及《JST日本科学技 术振兴机构数据库》等国内外数据库收录。《华南地质》将继续以提高刊物质量为抓手,进一步提高期刊 的编校质量和学术水平,为广大地质工作者提供学术交流平台,殷切希望广大专家学者继续支持期刊出 版工作,不吝赐稿,推动期刊学术质量再上新台阶,争取早日进入中国核心期刊方阵。

> 《华南地质》编辑部 2020年11月15日