

# 广东省典型花岗岩成土剖面元素垂向分布特征

王海荣<sup>1,2</sup> 侯青叶<sup>1</sup> 杨忠芳<sup>1</sup> 李 括<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国五矿集团勘查开发有限公司, 北京 100010;  
3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**对广东省南部花岗岩广泛发育地区的两个花岗岩风化剖面进行部分主量元素和重金属元素含量变化的研究表明:研究区成土过程是 Na、Mg、K、Ca 持续风化淋失的过程,且风化程度较高,土壤剖面中重金属元素与主量元素含量的变化趋势一致。研究区两土壤剖面的淋溶作用较强,淋溶层深达 200 cm,淀积层深度为 100~300 cm。在淀积层内,随着 Ca、K、Na、Mg 等主量元素的新生矿物沉淀,As、Cd、Pb、Zn、Ni 等元素也相对富集,是广东地区深层土壤 As、Pb 等元素含量高于表层土壤的可能成因之一。

**关键词:**广东省;花岗岩成土剖面;主量元素;重金属元素;淋溶层;淀积层

**中图分类号:**P595 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)02-0619-10

## 1 引言

成土母质是土壤形成的物质基础,是植物矿物质养分元素以及有毒元素的最初来源。母质对土壤的物理性状和化学组成均产生重要作用,这种作用在土壤形成的初期阶段最为显著。成土过程进行得愈久,母质与土壤之间性质的差别也愈大,尽管如此,土壤中总会保存有母质的某些特征<sup>[1]</sup>。

花岗岩的化学风化过程实质上就是碱金属、碱土金属组分解淋失与脱硅富铁铝化的地球化学过程。风化的初期阶段,斜长石晶格遭到破坏,Ca 和 Na 迁移出去,残留的粘土矿物中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量增加;随着风化作用的进行,K 含量也逐渐降低,而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量逐渐增加,整个风化过程中,K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO 和 MgO 不断淋失,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 逐渐富集<sup>[2]</sup>。岩石风化及成土过程中矿物、主量和部分微量元素组成变化已得到广泛的研究<sup>[3-9]</sup>,但风化过程中重金属的地球化学行为以及潜在的生态风险研究较少<sup>[10-11]</sup>。已有研究表明,广东省珠三角经济区表层土壤中重金属元素富集程度高,表层土壤除 As 元素之外,

Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg 元素的平均含量都已超过了广东省土壤背景值和全国土壤背景值<sup>[12,13]</sup>,这使得广东省土壤中重金属迁移转化及来源研究成为热点。且对比不同省份多目标区域地球化学调查获得的深表层土壤中重金属元素含量发现:广东省珠三角经济区 As、Cr、Pb 元素在深层(>150 cm)的元素含量高于表层(0~20 cm)。各个省份的对比结果表明:重金属元素呈现出自南向北表层土壤中含量相对深层土壤越来越高的趋势;在山东、河北、辽宁省重金属元素的表层含量普遍高于深层<sup>[14]</sup>(图 1)。表层土壤重金属元素富集可以归结为四个方面:(1)受成土母质重金属含量的影响<sup>[10,14-17]</sup>;(2)受影响重金属元素分布的环境变量的制约,如 pH、粘粒和有机质等;(3)受重金属元素外源输入的影响;(4)与成土过程中元素的淋溶迁移与沉淀富集有关。

为了探究广东省深层土壤 As、Cr、Pb 含量普遍高于表层土壤元素含量的原因,查明深层土壤中 As、Cr、Pb 富集是由人为活动引起,还是成土母质自然风化的结果,本文选取广东省最主要的岩石类型分布区采集土壤剖面样品进行研究。已知广东省出

收稿日期:2012-04-12;改回日期:2012-06-25

作者简介:王海荣,女,1986年生,硕士生,地球化学专业,主要从事环境地球化学研究工作;E-mail:hairongwang29@gmail.com。

①数据来源于项目“中国农田、河流生态系统区域生态地球化学评价成果集成”。

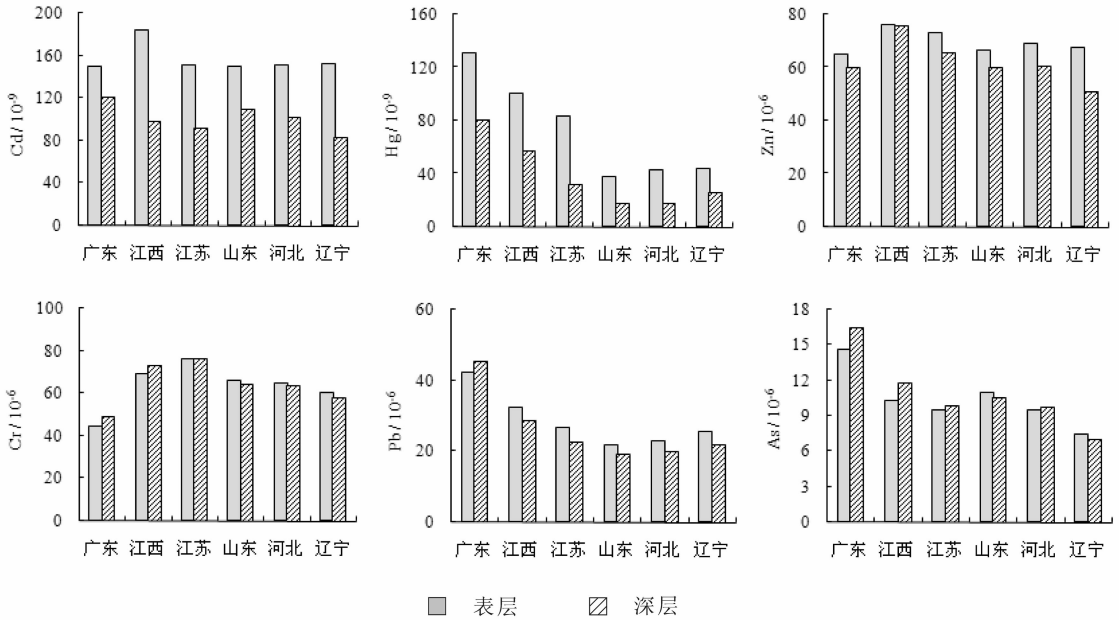


图1 不同省份深表层土壤重金属元素含量对比

Fig.1 Concentrations of heavy metals in the top and deep soil in different provinces

露的岩石类型主要有花岗岩、砂页岩、石灰岩和玄武岩等,其中花岗岩分布范围最广;其土壤类型主要为红壤、赤红壤和砖红壤<sup>[18]</sup>。因此本文选取了花岗岩广泛发育的中山市和台山市,分别采集两条土壤剖面,对这两条花岗岩风化剖面进行对比研究,旨在通过探讨花岗岩风化过程中 Na、Mg、Al、K、Ca 和重金属 Hg、As、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni 元素含量的变化特征,对

广东省深表层土壤中重金属元素含量差异的成因进行解释。

## 2 样品处理与分析

### 2.1 采样方法

土壤剖面选取花岗岩广泛发育的中山市和台山市,土壤剖面位置见图2所示;剖面一(P1)为自然出

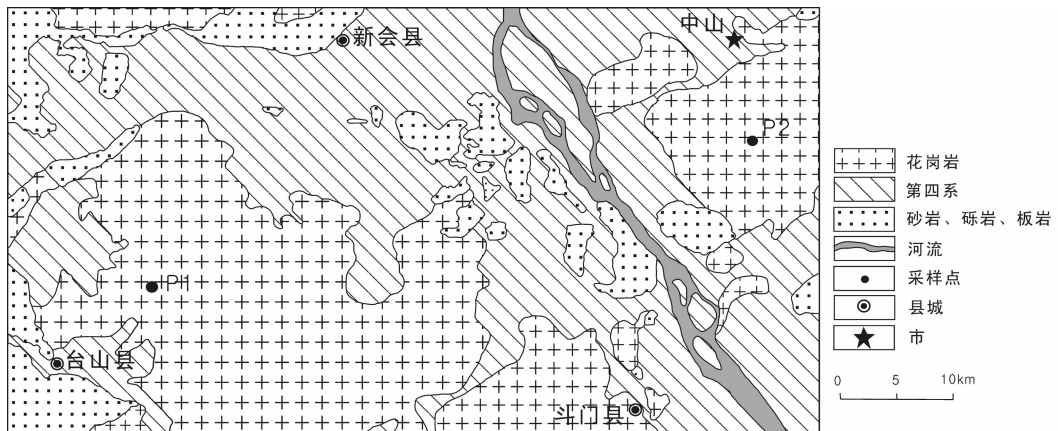


图2 采样点地质概况图<sup>①</sup>

Fig.2 Simplified geological map of sampling locations

<sup>①</sup>底图来源于全国 1:500000 地质图,经作者修订。

露剖面,剖面二(P2)为人工挖掘剖面。样品采样密度为:0~200 cm 深度内每 10 cm 采集 1 个土壤样品,200~400cm 深度内每 20 cm 采集一个土壤样品,400~950 cm 深度内每 50 cm 采集 1 个土壤样品,样品重量为 2 kg,另采集原岩样品一件。采集 P1 土壤样品时,先将剖面表层松散的土壤刮掉,然后采集新鲜土壤。土壤剖面特征见表 1。

### 2.2 样品处理与分析

土壤样品采集后常温下风干、去除粗颗粒物后磨细、过筛(2 mm 孔径筛)、混匀、分装,制成待分析试样。样品处理加工过程保证无污染、无混染。样品送国土资源部合肥矿产资源监督检测中心测试,其中,Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Zn 采用 ICP-OES 测试,Hg、Cd、Cr、Pb、Ni、Zr 采用 ICP-MS 测试,As 选用原子荧光法测试,元素含量的测试结果见表 2。对 Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Zr 以及重金属 Hg、As、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni 的测试结果均采用国家一级标准物质进行准确度 and 精密度检验,其中,Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Zr 准确度采用  $\Delta \lg C = |\lg C_1 - \lg C_2|$  检验,重金属 Hg、As、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni 准确度采用  $RE\% = |C_1 - C_2| * 100 / C_1$  检验,精密度均采用  $RD\% = 100 * |C_1 - C_2| / (C_1 + C_2)$  检验,检验结果见表 3。

## 3 结果与讨论

### 3.1 风化过程中元素的地球化学行为

#### 3.1.1 主量元素

在表生地球化学作用过程中,不同元素活性差异很大,有些元素很少随流水或其他介质迁移出

母体。假设这些元素在风化过程中是稳定不变的,则其他元素在风化过程中的富集或贫化量是可以计算的。Th、Ti、Zr、Nb、Ta 以及 Al 都曾被用作计算风化过程中元素含量变化的参比元素<sup>[7,19~21]</sup>,其中常用的是 Ti、Zr、Nb、Ti 和  $0.1Ti + Zr$ 、 $Ti/Zr$  等,利用这些参比元素或比值就可计算风化过程中易活动元素的变化<sup>[20]</sup>。本文首先选取 Ti 和 Zr,分别计算两剖面中 Ti 和 Zr 相对新鲜原岩的变化率 =  $(X_{土壤} / X_{原岩}) - 1$ ,据此选择参比元素,计算结果见表 4。

从表中可以看出,P2 剖面中 Ti 和 Zr 的变化率明显比 P1 剖面小,其中 Zr 在整个剖面的含量几乎不变。一些研究认为风化过程中元素  $\pm 20\%$  以内的含量变化属于误差范围,不能得出元素富集或贫化的结论,因为某些微量元素赋存在粘土矿物中,粘土矿物的积累或丢失会造成微量元素含量的变化,而被认为含量不变的元素实际上也存在一定的变化率<sup>[7,20]</sup>,本文选用变化率较小的 Zr 作为参比元素来计算两剖面中主量元素以及重金属元素含量的变化量。风化过程中某一元素含量的变化量  $b(i)$  计算公式如下<sup>[7]</sup>:

$$b(i) = [(c(i)_{样品} / c(i)_{原岩}) \times (c(Zr)_{原岩} / c(Zr)_{样品}) - 1] \times 100\%$$

其中, $b(i)$  为元素 i 的变化量, $c(i)_{样品}$  和  $c(i)_{原岩}$  分别为样品和原岩中元素 i 的含量, $c(Zr)_{原岩}$  和  $c(Zr)_{样品}$  分别为样品和原岩中元素 Zr 的含量, $b(i) < 0$  表示样品中元素 i 相对原岩贫化, $b(i) > 0$  则表示相对原岩富集。

图 3 为 Na、Mg、Al、K、Ca 变化量随深度变化的趋势图,对比两剖面中不同元素变化量可以看出:(1)P1 剖面中 Na、Mg、K、Ca 高度贫化,其变化量平

表 1 广东省南部花岗岩剖面特征  
Table 1 Characteristics of granite profiles in the south of Guangdong

剖面编号	剖面深度/cm	样品数量	剖面位置	周围环境描述	剖面特征描述
P1	950	41	台山市台城乡	自然土壤剖面,植被发育,为茂密的桫欏树林	上部0~180 cm为黄红色土壤,除石英外,其他矿物颗粒细小肉眼难以识别,土质疏松,湿润;180~260 cm土壤中石英粒度变大,土质较干燥;260~340 cm岩石风化程度较弱,可见半风化石颗粒;340~950 cm为花岗岩风化母岩,有一定硬度
P2	750	37	中山市五桂山镇	人工挖掘剖面,剖面位于人类活动较少的荒地,周围为杂草覆盖的小山包	上层为风化程度高的花岗岩成土母质,长石风化程度较高,石英基本未风化;下部风化相对较弱

注:样品采集时间为 2009 年 7 月。

表 2 土壤剖面中元素含量  
Table 2 Chemical composition of elements in soil profiles

剖面 编号	深度/cm	Ti	Zr	Na	Mg	Al	K	Ca	Hg	As	Cr	Cd	Pb	Zn	Ni
PI	0-10	3397	395.9	0.05	0.22	29.0	0.86	0.09	83.6	3.14	325.3	146.9	21.3	33.7	5.69
	10-20	2822	320.1	0.05	0.21	28.6	0.78	0.08	100.2	3.35	624.9	22.6	13.6	29.5	7.64
	20-30	2491	247.5	0.05	0.21	29.3	0.76	0.07	82.2	3.25	466.8	47.2	11.5	29.0	7.98
	30-40	2406	262.4	0.07	0.24	27.5	0.75	0.17	78.2	4.16	666.0	45.0	14.5	34.2	10.50
	40-50	2461	229.7	0.05	0.21	29.5	0.78	0.06	80.8	3.56	510.3	63.9	12.5	29.7	8.74
	50-60	2439	210.3	0.05	0.21	30.8	0.82	0.05	61.8	3.45	333.0	22.5	16.1	30.9	6.91
	60-70	2497	207.6	0.05	0.22	31.5	0.86	0.05	68.3	3.60	224.1	30.0	16.2	33.3	5.77
	70-80	2571	192.5	0.05	0.23	31.9	0.92	0.05	61.8	3.50	194.4	10.9	19.3	34.8	5.50
	80-90	2510	189.3	0.05	0.25	31.4	1.03	0.04	82.4	3.42	166.1	10.5	32.4	35.0	5.15
	90-100	2509	179.1	0.04	0.26	31.3	1.08	0.05	75.3	3.40	145.0	9.1	26.1	34.3	4.44
	100-110	2587	184.1	0.04	0.27	31.6	1.13	0.04	80.8	3.50	148.7	35.0	24.5	34.7	4.64
	110-120	2480	182.8	0.05	0.27	31.4	1.25	0.05	77.1	3.10	211.7	18.7	30.8	35.9	5.11
	120-130	2438	199.7	0.05	0.27	31.0	1.19	0.05	97.2	3.43	105.3	20.0	47.6	33.2	3.75
	130-140	2464	195.4	0.05	0.28	31.3	1.34	0.05	82.7	3.60	90.3	39.0	36.1	31.4	3.45
	140-150	2341	192.5	0.05	0.31	28.0	1.37	0.14	125.3	6.00	166.0	40.0	47.9	31.9	6.66
	150-160	2653	204.1	0.05	0.30	31.3	1.39	0.05	98.2	3.88	97.0	20.1	40.5	34.9	4.01
	160-170	2582	228.3	0.05	0.26	31.6	1.21	0.04	110.2	3.25	124.0	20.5	45.9	34.6	4.00
	170-180	2718	199.6	0.05	0.27	31.9	1.23	0.05	112.5	3.70	88.0	24.8	48.8	37.5	3.51
	180-190	2518	222.8	0.05	0.26	31.7	1.24	0.04	100.5	3.61	82.8	38.6	52.1	36.3	3.19
	190-200	2927	215.2	0.05	0.24	32.1	0.90	0.05	112.6	3.18	99.9	32.5	118.3	43.3	5.13
	200-220	2724	223.7	0.05	0.22	31.9	0.91	0.05	116.6	3.42	101.0	45.4	238.4	54.0	6.65
	220-240	2684	271.2	0.05	0.26	32.0	0.94	0.05	105.5	2.22	95.9	23.0	244.5	54.1	6.93
	240-260	2575	250.0	0.05	0.24	31.8	0.97	0.05	68.8	1.69	121.1	46.1	243.6	49.5	6.24
	260-280	2567	246.3	0.05	0.24	32.0	1.13	0.05	80.7	1.48	131.0	21.1	185.7	44.5	4.76
	280-300	2573	239.9	0.06	0.22	31.5	1.56	0.05	53.2	1.98	121.4	30.3	83.5	33.7	2.62
	300-320	2929	248.5	0.06	0.21	31.8	1.76	0.05	45.1	1.42	84.0	22.2	96.4	36.5	2.25
	320-340	2848	239.6	0.07	0.24	31.3	1.98	0.05	32.5	1.20	98.6	36.2	73.3	33.0	2.09
	340-360	2426	239.2	0.07	0.27	30.5	2.62	0.05	29.7	1.20	109.2	34.1	55.1	32.3	1.77
	360-380	2306	252.8	0.08	0.30	29.6	3.18	0.06	43.0	1.55	117.8	20.1	60.3	30.9	1.30
	380-400	2336	244.7	0.07	0.33	30.4	2.77	0.06	78.6	1.20	97.5	31.5	63.6	33.8	1.40
	400-450	2240	254.8	0.07	0.39	29.6	3.40	0.08	90.8	1.20	89.0	25.0	26.2	35.5	1.65
	450-500	3068	331.6	0.07	0.37	28.0	3.74	0.08	55.6	2.68	110.2	19.1	17.9	38.5	1.00
	500-550	3634	310.7	0.07	0.36	29.5	2.86	0.08	70.2	1.30	119.4	51.0	16.7	44.8	1.94
550-600	3983	347.3	0.08	0.35	28.2	3.60	0.08	65.0	2.33	174.0	14.0	14.1	41.7	1.53	
600-650	3319	321.9	0.07	0.46	30.2	2.31	0.08	65.2	1.10	96.1	47.9	16.1	65.5	2.45	
650-700	3423	352.4	0.09	0.35	29.4	2.95	0.08	25.8	0.70	108.8	37.4	23.5	49.5	2.57	
PI	700-750	3380	310.4	0.09	0.40	29.5	2.61	0.08	28.3	0.60	110.1	38.3	19.2	42.3	2.31
	750-800	3526	319.5	0.09	0.40	29.0	2.98	0.10	28.8	0.80	113.7	41.0	20.0	38.1	1.57
	800-850	3272	331.3	0.09	0.39	28.3	3.66	0.11	24.6	0.75	126.1	47.5	17.0	31.7	1.54
	850-900	3845	385.6	0.08	0.42	29.3	2.78	0.11	24.5	0.74	113.5	24.8	18.3	39.6	1.69
	900-950	3638	340.6	0.09	0.45	28.7	2.83	0.10	25.8	0.50	124.4	10.7	17.5	43.0	2.01
原岩	506	42.0	0.08	0.20	8.9	0.90	0.16	26.5	1.50	1669.0	13.4	23.9	9.8	21.39	

续表 2

剖面 编号	深度/cm	Ti	Zr	Na	Mg	Al	K	Ca	Hg	As	Cr	Cd	Pb	Zn	Ni
	450-500	3068	331.6	0.07	0.37	28.0	3.74	0.08	55.6	2.68	110.2	19.1	17.9	38.5	1.00
	500-550	3634	310.7	0.07	0.36	29.5	2.86	0.08	70.2	1.30	119.4	51.0	16.7	44.8	1.94
	550-600	3983	347.3	0.08	0.35	28.2	3.60	0.08	65.0	2.33	174.0	14.0	14.1	41.7	1.53
	600-650	3319	321.9	0.07	0.46	30.2	2.31	0.08	65.2	1.10	96.1	47.9	16.1	65.5	2.45
	650-700	3423	352.4	0.09	0.35	29.4	2.95	0.08	25.8	0.70	108.8	37.4	23.5	49.5	2.57
	700-750	3380	310.4	0.09	0.40	29.5	2.61	0.08	28.3	0.60	110.1	38.3	19.2	42.3	2.31
	750-800	3526	319.5	0.09	0.40	29.0	2.98	0.10	28.8	0.80	113.7	41.0	20.0	38.1	1.57
	800-850	3272	331.3	0.09	0.39	28.3	3.66	0.11	24.6	0.75	126.1	47.5	17.0	31.7	1.54
	850-900	3845	385.6	0.08	0.42	29.3	2.78	0.11	24.5	0.74	113.5	24.8	18.3	39.6	1.69
	900-950	3638	340.6	0.09	0.45	28.7	2.83	0.10	25.8	0.50	124.4	10.7	17.5	43.0	2.01
	原岩	506	42.0	0.08	0.20	8.9	0.90	0.16	26.5	1.50	1669.0	13.4	23.9	9.8	21.39
P2	0-10	2218	388.3	0.06	0.13	30.3	0.47	0.06	144.5	4.48	418.6	42.4	19.0	38.2	7.69
	10-20	2275	353.8	0.06	0.13	30.5	0.42	0.06	117.1	4.09	314.5	35.1	15.7	36.2	7.34
	20-30	2333	353.0	0.05	0.13	32.1	0.44	0.06	145.7	4.59	400.9	34.4	15.2	43.8	8.61
	30-40	2076	290.8	0.05	0.13	32.3	0.40	0.05	141.7	5.15	242.4	13.4	13.1	41.0	7.94
	40-50	2248	342.1	0.06	0.13	32.1	0.41	0.05	143.0	4.80	215.6	112.1	15.2	42.1	6.96
	50-60	1865	234.7	0.05	0.13	32.7	0.40	0.06	100.0	5.50	219.2	21.9	16.4	43.3	8.53
	60-70	1779	239.6	0.05	0.13	32.2	0.39	0.07	94.5	5.47	297.9	15.5	15.7	40.3	9.67
	70-80	1906	265.3	0.07	0.15	31.7	0.44	0.11	135.2	6.05	332.5	30.5	18.9	42.5	10.19
	80-90	1777	251.1	0.05	0.13	31.8	0.40	0.09	120.2	5.60	289.8	24.5	24.7	42.7	10.51
	90-100	1846	245.5	0.05	0.14	32.9	0.41	0.09	94.8	5.86	235.0	17.3	22.1	40.8	9.94
	100-110	1841	266.8	0.06	0.14	32.4	0.42	0.11	82.7	5.30	339.8	47.8	24.5	44.9	10.95
	110-120	1947	253.8	0.05	0.14	32.9	0.43	0.11	90.5	5.29	265.1	46.1	27.9	42.0	9.21
	120-130	1798	241.0	0.05	0.13	32.7	0.42	0.14	77.1	5.86	295.7	45.6	29.7	45.3	9.79
	130-140	1795	218.3	0.05	0.13	33.4	0.41	0.15	80.0	6.15	284.7	16.3	36.6	49.0	9.45
	140-150	1799	204.8	0.08	0.14	33.4	0.41	0.25	61.3	6.10	150.0	13.0	32.2	48.3	8.70
	150-160	1804	212.0	0.06	0.14	33.5	0.41	0.18	54.8	5.86	147.0	40.5	32.0	49.9	9.17
	160-170	1683	206.5	0.05	0.13	33.6	0.40	0.16	78.9	6.35	154.0	57.5	30.2	48.6	8.56
	170-180	1591	194.6	0.05	0.13	33.5	0.40	0.17	57.1	5.89	151.9	49.5	30.0	51.7	9.38
	180-190	1491	203.1	0.05	0.12	32.7	0.39	0.16	102.2	6.24	225.5	29.0	27.0	47.6	9.40
	190-200	1352	171.2	0.05	0.12	33.5	0.41	0.18	323.8	6.42	131.0	49.5	25.2	46.4	7.75
	200-220	1230	178.5	0.05	0.10	32.9	0.44	0.17	247.6	5.57	116.1	50.3	25.5	47.8	7.51
	220-240	1134	181.7	0.05	0.11	33.1	0.44	0.18	270.4	5.12	113.8	24.3	29.0	45.9	7.62
	240-260	1166	174.7	0.05	0.11	33.4	0.47	0.18	207.2	4.87	162.5	23.2	21.5	44.7	7.74
	260-280	1171	172.2	0.04	0.11	33.3	0.45	0.18	217.9	4.41	154.9	18.1	25.5	43.3	7.48
	280-300	1060	163.7	0.05	0.09	33.3	0.41	0.17	533.3	4.65	192.9	22.2	42.0	38.9	8.18
	300-320	1127	201.8	0.05	0.10	33.8	0.44	0.15	390.2	4.55	210.4	32.1	40.5	42.1	7.20
	320-340	1085	243.1	0.04	0.09	32.5	0.46	0.16	696.9	3.28	182.7	39.6	99.1	42.2	7.88
	340-360	1127	233.1	0.05	0.09	33.2	0.49	0.16	615.2	3.03	228.5	45.5	63.8	47.8	9.31
360-380	1121	273.3	0.05	0.09	33.1	0.46	0.15	426.5	4.23	195.1	28.0	86.9	45.4	8.43	
380-400	1187	239.1	0.05	0.08	33.6	0.35	0.09	406.5	3.60	201.8	20.6	95.4	37.3	8.08	
400-450	1196	268.1	0.05	0.09	32.8	0.38	0.05	429.3	3.85	212.8	21.7	95.0	43.9	8.13	
450-500	1193	274.7	0.04	0.07	31.5	0.38	0.05	484.1	2.26	275.1	23.5	260.3	43.7	9.78	
500-550	954	223.0	0.05	0.10	31.7	0.42	0.05	1635.3	3.25	185.0	26.6	341.8	45.4	8.18	
550-600	888	190.6	0.04	0.12	31.8	0.36	0.05	1077.8	3.00	186.2	24.7	516.9	40.2	6.82	
600-650	854	239.1	0.05	0.11	31.7	0.62	0.04	943.2	1.70	214.3	44.7	308.5	44.8	7.23	
650-700	903	249.7	0.05	0.13	31.9	0.79	0.05	947.7	2.11	211.8	29.9	227.5	47.9	7.71	
700-750	757	227.0	0.06	0.19	28.7	1.09	0.05	541.7	2.79	294.2	137.7	169.9	54.5	8.21	
	原岩	622	230.8	1.64	0.09	24.1	3.42	0.34	72.5	1.34	241.1	18.3	124.1	33.1	4.33

注:Na、Mg、Al、K、Ca 含量单位为  $10^{-2}$ ,Hg、Cd 为  $10^{-9}$ ,其他元素为  $10^{-6}$ 。

表3 元素测试结果准确度、精密度检验

Table 3 The control of accuracy and precision of test results

	Ti	Zr	Na	Mg	Al	K	Ca
准确度 $\Delta$ lgC	0.019	0.018	0.035	0.019	0.008	0.016	0.014
精密度RD%	1.35	2.76	4.44	1.93	0.60	1.28	2.80
	Hg	As	Cr	Cd	Pb	Zn	Ni
准确度RE%	5.25	2.25	5.51	1.47	3.24	3.18	2.68
精密度RD%	1.12	2.08	1.54	3.79	1.83	2.99	2.82

表4 土壤剖面中Ti和Zr变化率

Table 4 The change rate of Ti and Zr in the two profiles

剖面	Ti	Zr
	变化范围(均值)	变化范围(均值)
P1	3.43~6.88 (4.55)	3.26~8.42 (5.1)
P2	0.22~2.75 (1.41)	-0.29~0.68 (0.039)

值分别为-87.39%、-75.82%、-68.57%和-93.06%，变化范围分别在-83.37~-93.36%、-66.15~-88.32%、-37.66%~-89.85%和-80.89~-95.40%；(2)P2剖面中K、Na高度贫化，其变化量平均值分别为-86.73%和-96.84%，变化范围分别在-67.60~-91.83%和-94.50~-98.01%。这些特征表明研究区成土过程是一个持续丢失Na、Mg、K、Ca的过程<sup>[2]</sup>，且两剖面的风化程度均较高。从不同元素在土壤垂向剖面上的变化趋势可以看出，P1剖面研究区土壤0~100cm为淋溶层，土壤100~200cm为淀积层，P2剖面研究区土壤0~200cm为淋溶层，土壤200~300cm为土壤淀积层。淋溶层中，主量元素的氧化物均表现为越接近地表其变化量的负值越大，说明其淋失越明显；

均淀积层中，Mg、K、Na、Ca以及Al均表现为不同程度的富集。

研究区土壤淋溶层深达200cm，是研究区气候特征决定的。罗健等<sup>[23]</sup>研究表明广东省降雨侵蚀力在1960—2007年间呈现不明显上升趋势，降雨侵蚀力越大，对土壤中元素的淋滤作用则越强，且水分状况是影响土壤中钾含量的重要因素之一，高含水量的土壤中钾的有效态含量增加，活动性增强<sup>[23]</sup>。Burnham C P等<sup>[24]</sup>研究表明，花岗岩风化过程中元素的活性顺序为 $\text{Na}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{K}_2\text{O} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO} > \text{SiO}_2 > \text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3$ ，研究区P2土壤剖面上Mg呈微富集状态，一方面是由于Mg活性较小，很少被淋溶出土壤，一方面是由于土壤中大量K、Na和Ca被淋失，Mg相对含量增加引起的；土壤

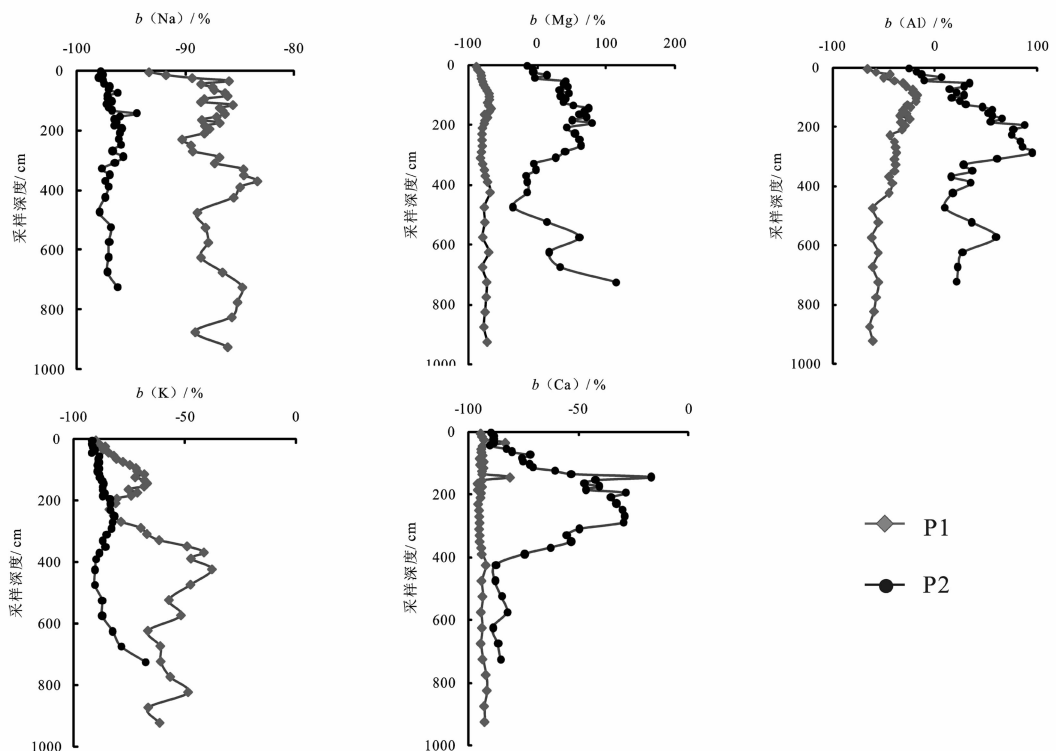


图3 两剖面中Na、Mg、Al、K、Ca变化量随深度变化趋势图

Fig.3 The relative changes in Na, Mg, Al, K, Ca content during the weathering process of two profiles with the depth

中大量 K、Na 和 Ca 的淋失也是引起 Al 相对含量增加的原因。剖面中 K 相对于 Na 和 Ca 贫化程度稍弱,是因为 K 会以类质同象的形式赋存在粘土矿物中,也说明了钠长石比钾长石更容易被风化,这与前人研究结果是一致的<sup>[25,26]</sup>。

### 3.1.2 重金属元素

从两土壤剖面中重金属元素含量随深度的变化趋势(图 4)可以看出,两剖面中某些重金属元素含量也出现深层高于表层的现象。P1 土壤剖面中 Hg、As、Pb、Zn 在 150~200 cm 深度内元素含量随深度增加而增加,且均高于表层土壤中元素含量。P2 土壤剖面中 As、Pb、Zn 在 150~200 cm 深度内元素含量亦高于表层土壤中元素含量,且 Hg 在 200 cm 深度以下元素含量高于表层土壤中元素含量。但 Cr 在两剖面中均呈现表层含量显著高于深层的现象。

为了讨论重金属元素在风化过程中的元素地球化学行为,在此计算风化过程中重金属元素含量的变化量  $b(i)$ 。

两剖面中重金属元素含量的变化量差异较大,P1 剖面中重金属元素均相对原岩贫化,仅 Pb 元素在 200 cm 深度出现富集;P2 剖面中的重金属元素相对原岩均呈现不同程度的富集(图 5)。P1 剖面中

重金属元素的集体贫化可能是由于此剖面中的参比元素 Zr 发生了一定程度的富集,Zr 在 P1 剖面中的变化率均值为 5.1,在 P2 剖面中的变化率均值为 0.039,但两剖面中重金属含量仍呈现一定的规律性。与图 3 所示的主量元素变化趋势类似,P1 剖面中,由于土壤剖面 100~200 cm 为淀积层,随着 Ca、K、Na、Mg 等大量元素的新生矿物沉淀,图 5 中 As、Cd、Zn 等元素在此深度表现为相对富集;P2 剖面中土壤 200~300 cm 为淀积层,随着 Ca、K、Na 等大量元素的新生矿物沉淀,图 5 中 As、Cd、Zn、Ni 等元素在此深度也表现为明显富集。研究表明,成土作用过程中,微量元素的地球化学行为受主量元素控制,As、Pb、Cd、Zn、Ni 和 Fe 的含量均呈很好的线性关系<sup>[26-28]</sup>,Pb、Cd、Zn 和 Al 也有一定的相关性<sup>[27]</sup>。在氧化环境下,As 会被 Fe 的氢氧化物吸附或者以  $FeAsO_4$  沉淀的形式存在<sup>[26]</sup>。

P2 剖面中 Pb 在 600 cm 深度上相对原岩出现富集峰值,这可能是由于赋存于长石中的 Pb 元素随着长石风化原地转入新生成的粘土矿物中,由于其他易溶组分淋失而得到富集,此处,Al 相对上下层土壤也出现峰值,说明有富含 Al 的矿物生成。Cr 在整个剖面上相对原岩含量变化不大,说明在强

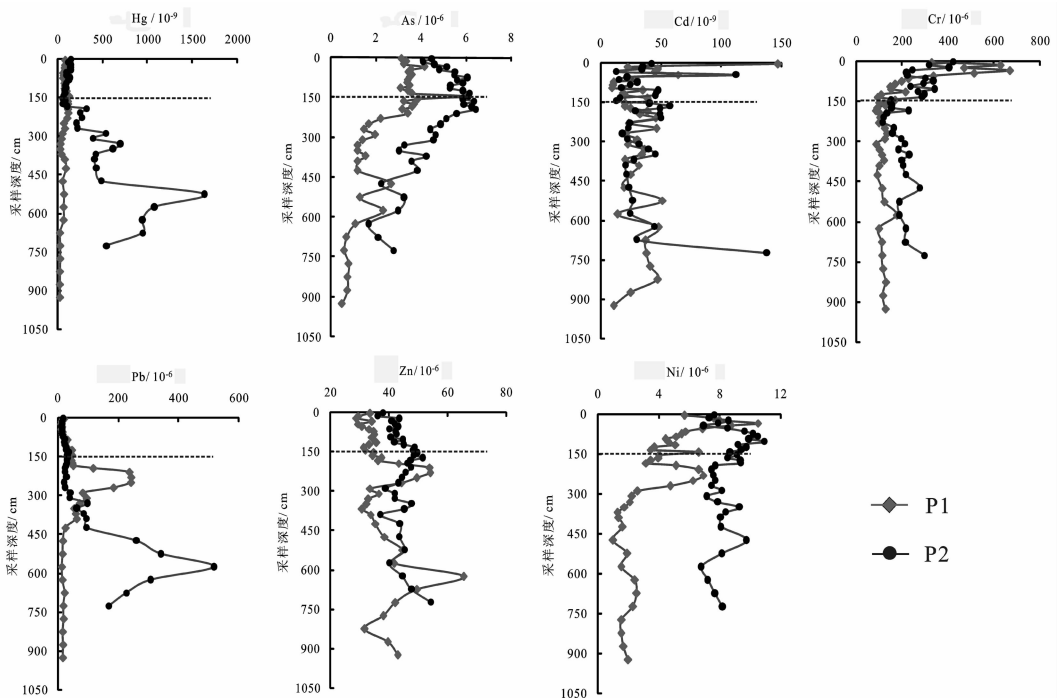


图 4 两剖面中 Hg、As、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni 含量随深度变化趋势图

Fig.4 Plots of the variation of concentrations of Hg, As, Cd, Cr, Pb, Zn, Ni along two profiles with the depth

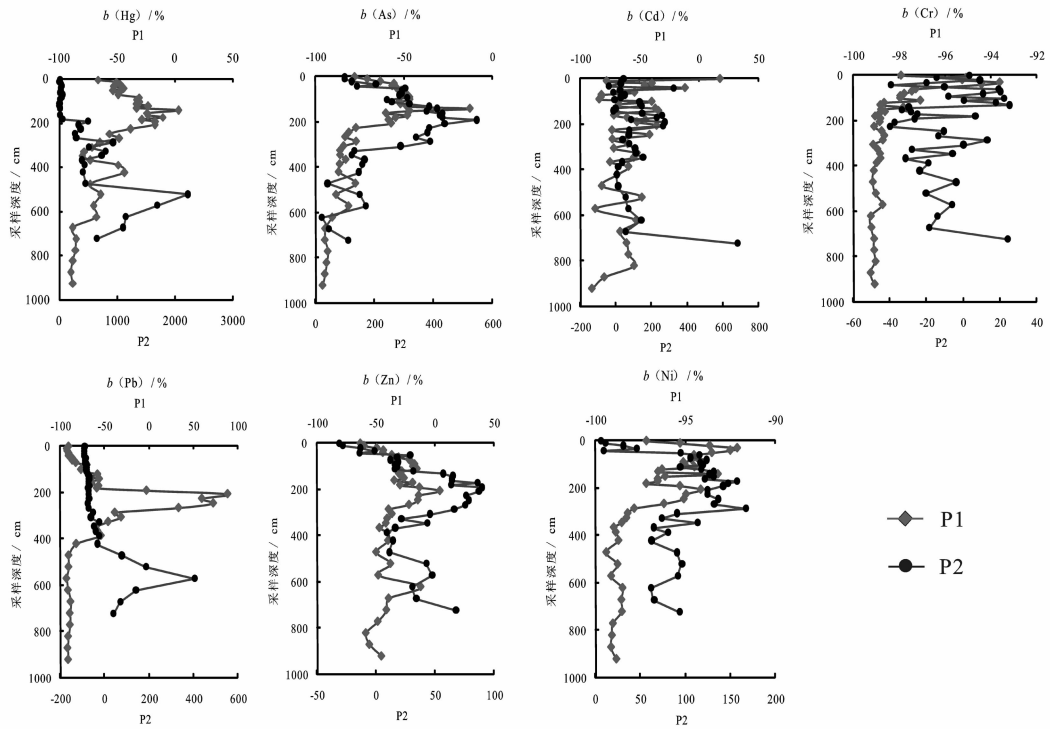


图5 两剖面中 Hg,As,Cd,Cr,Pb,Zn,Ni 变化量随深度变化趋势图

Fig.5 The relative changes in Hg, As, Cd, Cr, Pb, Zn, Ni concentrations during the weathering process of two profiles with the depth

烈风化条件下,Cr 仍可以稳定存在于土壤中。Middelburg 等<sup>[20]</sup>研究表明,Cr 在风化过程中保持不变是因为氧化条件下,Cr 会以  $Cr^{3+}$ 溶解或者和 Fe、Al 一起沉淀,含 Cr 的抗风化的自然矿物适度风化会导致 Cr 含量在剖面中的平衡。Hg 在表层土壤的含量稍低可能是因为 Hg 受热易挥发进入大气<sup>[21]</sup>。

### 3.2 结论

(1)P1 剖面中 Na、Mg、K、Ca 高度贫化,P2 剖面中 K、Na 高度贫化,体现了研究区成土过程是 Na、Mg、K、Ca 持续风化淋失的过程,且两剖面的风化程度均较高。

(2)两剖面土壤中重金属元素含量与主量元素含量的变化趋势一致,P1 剖面中,100~200 cm 淀积层内,随着 Ca、K、Na、Mg 等大量元素的新生矿物沉淀,As、Cd、Zn 等元素在此深度相对富集;P2 剖面中 200~300 cm 淀积层内,随着 Ca、K、Na 等主量元素的新生矿物沉淀,As、Cd、Zn、Ni 等元素在此深度也明显富集。

(3)研究区 P1 土壤剖面 0~100 cm 为淋溶层,100~200 cm 为淀积层,P2 土壤剖面 0~200 cm 为淋

溶层,200~300 cm 为淀积层。淋溶层深达 200 cm,淀积层深度范围为 100~300 cm,这是由当地的气候条件决定的,广东地区土壤淀积层厚度较大,导致采集的深层土壤样品正好在淀积层内,这正是某些重金属元素如 As、Pb 在深层土壤中含量高于表层的原因。Cr 在风化过程中含量稳定,其在广东深层土壤中富集的原因还有待于进一步研究。

(4)本文亦存在不足,某些典型主量元素和金属元素含量未测,如硅、铁和锰,硅和铁也是花岗岩风化过程中具有指示意义的主量元素,这使得元素在风化过程中的行为的讨论不够完整;重金属元素的迁移时常和另一些元素相关,使得元素含量变化原因的探讨受到制约。

### 参考文献(References):

[1] 王德厚,徐艳华.阿勒泰地区土壤微量元素环境背景值分布特征[J].干旱环境监测,1997,11(4):230-233.  
Wang Dehou, Xu Yanhua. Distribution characteristics of environmental background value of trace element in soil of Altai prefecture [J]. Arid Environ. Monitoring, 1997,11 (4):230-233(in Chinese with English abstract).



- [2] 吴宏伟, 尚彦军, 曲永新, 等. 香港花岗岩风化分级化学指标体系与风化壳分带[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2):125-134.  
Wu Hongwei, Shang Yanjun, Qu Yongxin, et al. Chemical weathering indices, classification, and zoning of weathered granitic rock in Hong Kong[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(2): 125-134(in Chinese with English abstract).
- [3] 周俊, 朱江, 查世新, 等. 安徽省土壤微量元素状况与地质背景的关系[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(1):59-64.  
Zhou Jun, Zhu Jiang, Zha Shixin, et al. Soil micronutrient status as related to geological background in Anhui Province [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24 (1):59-64 (in Chinese with English abstract).
- [4] Ludek M, Anna Z, Jir B, et al. The behaviour of rare -earth elements and Y during the rock weathering and soil formation in the Rícaný granite massif, Central Bohemia [J]. The Science of the Total Environment, 1998, 215:101-111.
- [5] Hamdan J, Burnham C P. The contribution of nutrients from parent material in three deeply weathered soil of Peninsular Malaysia [J]. Geoderma, 1996, 74:219-233.
- [6] Nesbitt H W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite[J]. Nature, 1979, 279:206-210.
- [7] Vanderweijden C H, Vanderweijden R D. Mobility of major, minor and some redox-sensitive trace elements and rare -earth elements during weathering of four granitoids in central Portugal[J]. Chemical Geology, 1995, 125:149-167.
- [8] Middelburg J J, Vanderweijden C H, Woittiez J R W. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks[J]. Chemical Geology, 1988,68: 253-273.
- [9] Caillaud J, Proust D, Philippe S. Trace metals distribution from a serpentinite weathering at the scales of the weathering profile and its related weathering microsystems and clay minerals [J]. Geoderma, 2009, 149:199-208.
- [10] Zhang Xiaoping, Deng Wei, Yang Xueming. The background concentrations of 13 soil trace elements and their relationships to parent materials and vegetation in Xizang (Tibet), China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 21:167-174.
- [11] 姚德, 孙梅, 杨富贵, 等. 青岛城区土壤重金属环境地球化学研究[J]. 中国地质, 2008, 35(3):539-550.  
Yao De, Sun Mei, Yang Fugui, et al. Environmental geochemistry of heavy metals in urban soils of Qingdao City [J]. Geology in China, 2008, 35(3):539-550(in Chinese with English abstract).
- [12] 陈俊坚, 张会化, 曾晓舵, 等. 广东省土壤神元素空间变异与环境意义[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5):956-961.  
Chen Junjian, Zhang Huihua, Zeng Xiaoduo, et al. Spatial variation and environmental indications of soil arsenic in Guangdong Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(5):956-961(in Chinese with English abstract).
- [13] 肖莉, 温贤有, 张国权, 等. 广东省土壤重金属污染监测预警系统的设计[J]. 广东农业科学, 2010, (4):243-245.  
Xiao Li, Wen Xianyou, Zhang Guoquan, et al. Design of the monitoring and warning system for soil heavy metal pollution in Guangdong [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, (4):243-245(in Chinese with English abstract).
- [14] 陆森钦. 福建沿海地区土壤元素含量特征与地质背景研究[J]. 福建地质, 2009, (4):305-309.  
Lu Senqin. Study on the characteristics of soil element contents and the geologic background in the coastal area of Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 2009, (4):305-309(in Chinese with English abstract).
- [15] 赵维钧. 云南土壤锰元素背景值及其特征初探 [J]. 中国环境监测, 2006, 22(5):91-94.  
Zhao Weijun. Preliminary research on background value and characteristics of manganeses element in Yunnan Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2006, 22(5):91-94.
- [16] 席冬梅, 邓卫东, 高宏光, 等. 云南省主要地质背景区土壤理化性质及矿物质元素丰度分析[J]. 土壤, 2008, 40(1):114-120.  
Xi Dongmei, Deng Weidong, Gao Hongguang, et al. Physico-chemical properties of rocks and soils and abundances of minerals in main geological background areas in Yunnan Province [J]. Soils, 2008,40(1):114-120(in Chinese with English abstract).
- [17] 章海波, 骆永明, 吴龙华, 等. 香港土壤研究 II. 土壤硒的含量、分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2005, 42(3):404-410.  
Zhang Haibo, Luo Yongming, Wu Longhua, et al. Hong Kong soil researches II. Distribution and content of selenium in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (3):404-410 (in Chinese with English abstract).
- [18] 许炼烽, 刘腾辉. 广东土壤环境背景值和临界含量的地带性分异[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(4):58-62.  
Xu Lianfeng, Liu Tenghui. The zonal differentiation of soil environmental background values and critical contents in Guangdong[J]. South China Agr. Univ., 1996, 17(4):58-62.
- [19] Bain D C, Mellor A, Robertson-Rintoul M S E, et al. Variations in weathering processes and rates with time in a chronosequence of soils from Glen Feshie, Scotland[J]. Geoderma, 1993, 57:275-293.
- [20] Nadya T, Yigal E, Ludwik H, et al. The influence of rainfall on metal concentration and behavior in the soil [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(21):3499-3511.
- [21] Bo P, Zhao L, Song X L, et al. Release of heavy metals during weathering of the Lower ambrian Black Shales in western Hunan, China[J]. Environmental Geology, 2004(45):1137-1147.
- [22] 罗健, 荣艳淑, 陈乐, 等. 广东省 1960—2007 年降雨侵蚀力变化趋势分析[J]. 水文, 2010, 30(1):79-83.  
Luo Jian, Rong Yanshu, Chen Le, et al. Long-term trend of rainfall erosivity in Guangdong Province from 1960 to 2007 [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(1):79-83(in Chinese with English abstract).
- [23] 彭千涛, 范钦栋. 水分和温度对土壤钾素释放、固定影响的初步研究[J]. 土壤学报, 1984, 21(4):387-394.  
Pen Qiantao, Fan Qinzheng. et al. Preliminary study on influence of moisture and temperature on release and fixation of potassium in

- soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21 (4):387-394(in Chinese with English abstract).
- [24] Burnham C P. Soil formation and its variation with altitude in Malaya and Western Sabah [D]. Ph.D. Thesis, Wye College, Univ. of London, 1978.
- [25] Moshood N, Tijani O, Okunlola A, et al. Lithogenic concentrations of trace metals in soils and saprolites over crystalline basement rocks:A case study from SW Nigeria [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 46:427-438.
- [26] Middelburg J J, Cornelis H, et al. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks[J]. *Chemical Geology*, 1988, 68:253-273.
- [27] Acosta J A, Martínez-Martínez S, Faz A, et al. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials[J]. *Geoderma*, 2011, 161:30-42.
- [28] Cécile Q, Thierry B, Jacques B. Mn-oxide: a major source of easily mobilisable Co and Ni under reducing conditions in New Caledonia Ferralsols[J]. *C. R. Geoscience*, 2002, 334:273-278.
- [29] 乔振芳, 彭世彰, 徐俊增, 等. 稻田土壤重金属赋存形态、运移规律及灌溉的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(16):9698-9700, 9702. Qiao Zhenfang, Peng Shizhang, Xu Junzeng, et al. Chemical forms and migration of soil heavy metals in paddy and effects of irrigation [J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2011, 39(16):9698-9700, 9702(in Chinese with English abstract).

## Vertical distribution of some elements in typical weathering-soil profiles of granite in Guangdong Province

WANG Hai-rong<sup>1,2</sup>, HOU Qing-ye<sup>1</sup>, YANG Zhong-fang<sup>1</sup>, LI Kuo<sup>3</sup>

(1. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *China Minmetals Exploration and Development Cor., Ltd, Beijing 100010 China*; 3. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China*)

**Abstract:** Two granite weathering profiles developed in the south of Guangdong Province were studied in this paper. The concentrations of some major and heavy metal elements were determined by the authors. It can be concluded that the soil-forming process of the study area is a continual process of losing Na, Mg, K and Ca, the soil has been highly weathered, and the variation trend of heavy metal concentrations in two profiles is consistent with that of the major elements. It is also held that the eluviation of the two studied soil profiles is strong, the eluvial horizon has reached up to 200cm and the illuvial horizon is between 100 and 300cm in depth in the two soil profiles. In the illuvial horizon, with the precipitation of new minerals of the major elements (Ca, K, Na, Mg etc.), the heavy metal elements (such as As, Cd, Pb, Zn and Ni) are also relatively concentrated. These characteristics are of great significance in studying the cause of the phenomenon that the concentrations of As, Pb in deep soil are higher than those in top soil in Guangdong.

**Key words:** Guangdong; weathering-soil profiles of granite; major elements; heavy metal elements; eluvial horizon; illuvial horizon

**About the first author:** WANG Hai-rong, female, master candidate, majors in geochemistry, engages in the study of environmental geochemistry; E-mail: hairongwang29@gmail.com.