

# 老挝南部波罗芬高原玄武岩砖红壤 风化壳微量元素地球化学特征<sup>①</sup>

杨社锋<sup>1,2,3</sup>, 方维萱<sup>1,2,3</sup>, 胡瑞忠<sup>1</sup>, 王思德<sup>2</sup>, 陈振伟<sup>2</sup>, 韦寿贤<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵阳 550002;

2. 北京东南亚资源科技有限公司, 北京 100012; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**老挝南部波罗芬高原分布大面积新生代玄武岩,并一直在缓慢抬升,由于老挝地属热带季风气候,炎热和高降雨量作用,形成了砖红壤风化壳,厚度在25m以上。论述了风化壳中20种微量元素分散富集规律,大部分微量元素在表生环境下的化学活动性符合元素在氧化环境和酸性环境中的元素活动规律。

**关键词:**元素地球化学;砖红壤风化壳;微量元素;玄武岩;波罗芬高原;老挝

**中图分类号:**P595 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-5663(2005)06-0723-05

老挝为中南半岛唯一内陆国家,属热带季风型气候。南部占巴塞省(Champasak)的波罗芬高原(Boloven Plateau)分布较大面积玄武岩,在湿热气候条件下已经形成砖红壤风化壳。开展老挝南部波罗芬高原玄武岩砖红壤风化壳微量元素地球化学的调查,为建立热带季风型气候条件下玄武岩风化壳地球化学模式提供基础资料,探索老挝高原生态系统中玄武岩风化过程对土壤的生态环境地球化学制约,为老挝南部农业地球化学规划和资源开发提供科学依据。

## 1 波罗芬高原玄武岩

### 1.1 玄武岩分布特征

老挝地处印支地块、华南地块和思茅—南邦地块3个一级大地构造单元,其分界为莫边府—琅勃拉邦—难府和马江两个板块缝合带。印支地块起源于早古生代冈瓦纳大陆的北缘,并向北漂移,到早石炭世时,华南和印支地块沿着 Song Ma 缝合线合并成东南亚古陆块。老挝出露地层从元古界到第四系都有出露,构造线以NW向和NE向为主。在老挝境内,特别是巴莱(Paklay)—琅勃拉邦(Louangphrabang)、桑怒

(Xam Nua)、长山(Xayphou)、公河(Xe Kong)等地区,从加里东期到喜马拉雅期的酸性、中性、基性—超基性岩浆侵位强烈,其多形成于板块俯冲碰撞、岛弧活动及裂谷作用。

在老挝,共发现了3处喜马拉雅期玄武岩,更新世—全新世碱性玄武岩主要分布于南部占巴塞省东部波罗芬高原上;上新世—早更新世玄武岩分布在老挝中部 Nam Theum 河上游、Nam Non 和 Nam Noy 地区。此外,在老挝西北部会洒省(Bokeo)蒿塞村(Ban Houei Sai)附近也发现玄武岩分布,但面积很小且时代不详。波罗芬高原碱性玄武岩覆盖在上新一更新世砂岩和侏罗纪—三叠纪含盐红层(厚约2000m)之上,含盐红层之下为呵叻(Korat)建造(石炭系—二叠系)。同时代越南 Xuanlorc 地区玄武岩同位素年龄为0.65~0.70Ma<sup>[1]</sup>。

### 1.2 波罗芬高原地质及气候

波罗芬高原玄武岩地表分布面积超过2000km<sup>2</sup>,厚度700m~800m。Lan D. Maycock, Christopher Stone 等人研究认为,波罗芬高原玄武岩从中新世开始喷发,熔岩在波罗芬高原周围平原河谷中都有分布,波罗芬高原北部玄武岩年龄5.7Ma<sup>[2]</sup>。在波罗芬

① 收稿日期:2005-05-11 作者简介:杨社锋(1971-),男,博士研究生,工程师,矿床地球化学专业。

基金项目:国家重大基础研究规划项目(2001CB409805),北京东南亚资源科技有限公司老挝项目联合资助。

高原边部山脚河谷中发现了中新世玄武岩,说明波罗芬高原在晚白垩世一早第三纪就开始抬升,中新世以前就形成强烈切割地貌,并在玄武岩喷发后保持到现在。

老挝南部气候属热带季风型,全年形成干、雨两大季节,雨季集中在5月至10月,降雨量年平均3742.5mm,热带气候造成波罗芬高原玄武岩风化强烈。<sup>[3]</sup>波罗芬高原放射状水系发育,将高原玄武岩切割成若干狭窄、险峻谷地,造成强烈的冲刷剥蚀;地表水下渗形成潜水层,经水岩反应,将风化壳中可溶于水体中的元素搬运迁移,铁铝质残留富集,形成典型砖红壤。

## 2 波罗芬高原风化壳特征

在适宜气候条件下,玄武岩、花岗岩、碳酸盐岩、砂岩等多种母岩都能发育形成砖红壤风化壳,而且砖红壤风化壳一般具有明显垂直分带特征<sup>[4~7]</sup>。

在波罗芬高原分布的砖红壤厚度约25~40m,最厚可达100余米。

在波罗芬高原上,许多地方土壤中夹有大量火山弹和玄武岩碎块,表层土壤中的水分约为12.2%~17.8%,土壤化学成分: $w(\text{SiO}_2)$ 为13.6%~23.6%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为60.4%~69.5%, $w(\text{CaO})$ 为0.05%~0.3%, $w(\text{Mg})$ 为0.06%~0.13%。当地原生玄武岩岩石化学成份: $w(\text{SiO}_2)$ 为48.4%~51.2%, $w(\text{CaO})$ 为8.3%~8.6%, $w(\text{MgO})$ 为6.2%~6.8%,可见 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 淋失相当显著<sup>[3]</sup>,说明土壤发育具有砖红壤化过程的典型特征。

风化速率:同种条件下多种母岩中,玄武岩风化蚀变指数CIA(反映玄武岩风化速率)较高<sup>[8]</sup>。波罗芬高原岩石风化强烈,淋溶作用旺盛。风化壳在高原中部呈层状分布,厚度随地形条件有所变化,属面型风化壳。根据以波罗芬高原玄武岩年龄最大值5.7Ma和风化壳平均值30m进行的计算,不考虑高原抬升影响,波罗芬高原风化速率大约为5.26mm/千年。而以70万年计算,风化速率则为42.86mm/千年。由于对玄武岩喷出时代认定不同,两种计算结果相差悬殊。

分层特征:波罗芬高原土壤表层可见直径5~50mm不等的大量褐铁矿结核,在高温和强蒸发作用下,形成由豆状、结核状和结壳状褐铁矿组成的铁质硬壳。其土壤淋溶层A层为土黄色淋滤贫化土壤,厚度1~5m。土壤沉淀层B层为砖红色含豆状铁铝矾

土土壤,厚度为2~5m。A、B层下为含玄武岩巨砾C层土壤。根据波罗芬高原玄武岩地质条件、地貌情况和表生环境,A层土壤和B层土壤很可能形成风化型铝土矿层,但由于玄武岩喷出时代可能较新,形成工业品位铝土矿可能性不是很大<sup>[9]</sup>。高原植被丰茂,在新修简易公路边风化壳未见底部基岩出露,仅在下层见到含玄武岩巨砾及角砾的具C层特征的红色土壤。

## 3 样品采集与分析

### 3.1 样品采集

在波罗芬高原上的简易公路边,选择一处玄武岩风化壳较新鲜剖面,GPS测定的海拔高度为779.5m,剖面出露高度20m,在A、B、C层分别采集样品共10件(表1),此处采样点未发现新鲜玄武岩。在附近采集了1件新鲜玄武岩样品,采样深度值大于20m,取的深度值为25m,GPS测定海拔高度为555.0m。样品采样深度及形态描述见表1。

表1 老挝波罗芬高原玄武岩风化壳剖面采样特征  
Table 1 Sampling characteristics from basalt regolith sections in Boloven Plateau, Laos

序号	样品编号	采样深度(m)	采样层位	形态特征
1	LR151	0.3	A	土黄色土壤
2	LR156	0.5	A	褐黄色土壤
3	LR157	0.7	A	红土
4	LR158	1.0	A	褐红色土壤
5	LR155	2.0	A	含胶状褐铁矿红土
6	LR154	2.5	B	砖红色土
7	LR153	5.0	B	褐黄色土
8	LR152	7.0	B	褐色含豆状三水铝石红土
9	LR150	18.0	B	浅褐黄色土
10	LR141	20.0	C	弱风化暗绿色气孔状玄武岩
11	LR140	25.0	D	暗绿色气孔状玄武岩

### 3.2 样品加工和分析

所有样品均加工至200目,在有色金属桂林矿产地质测试中心分析,针对不同元素分别使用测试仪器。共测定了Cu、Pb、W、Mn、Cr、Ni、Mo、Sn、V、Ag、Ti、Zn、Co、B、Ba、As、Sb、Bi、Hg、Au等20种微量元素

素。样品分析结果见表 2。

表 2 老挝波罗芬高原玄武岩风化壳剖面微量元素含量表  
Table 2 Analytic results of trace elements from basalt  
regolith sections in Boloven Plateau, Laos

样品编号	Cu	Pb	W	Mn	Cr	Ni	Mo	Sn	V	Ag	Ti	Zn	Co	B	Ba	As	Sb	Bi	Hg	Au <sup>1)</sup>
LR151	35.3	12.0	1.6	347	>500	130.9	2.80	5.3	357.2	0.067	>15000	68	7.3	16.9	200	3.64	0.50	0.35	0.165	0.99
LR156	36.2	37.5	2.0	556	>500	136.5	2.67	5.9	386.2	0.083	>15000	47	12.6	15.5	530	4.88	0.69	0.31	0.097	0.99
LR157	36.0	22.8	1.5	4017	440.3	48.5	4.02	3.0	>500	0.309	>15000	815	148.4	17.5	>2000	2.97	0.45	0.05	0.021	0.35
LR158	37.0	30.0	1.6	2249	>500	80.0	5.67	3.0	>500	0.273	>15000	321	49.3	16.4	1943	5.52	0.52	0.22	0.169	1.13
LR155	38.0	40.0	1.5	1019	>500	63.8	6.04	3.0	>500	0.556	>15000	83	22.1	21.1	1733	10.7	0.90	0.15	0.151	1.02
LR154	39.3	29.4	1.5	450	334.1	84.1	2.29	5.0	318.7	0.064	>15000	50	5.5	13.4	690	2.65	0.47	0.16	0.064	0.96
LR153	48.7	12.0	1.6	873	284.2	324.7	1.91	4.6	381.7	0.085	>15000	97	27.5	7.6	238	2.01	0.37	0.19	0.135	0.94
LR152	73.5	17.4	1.6	151	401.3	38.9	3.52	5.9	386.6	0.211	>15000	75	6.5	12.3	396	4.53	0.38	0.02	0.205	0.53
LR150	54.9	22.0	1.6	391	>500	85.5	3.98	3.0	>500	0.289	>15000	82	17.0	14.0	617	2.85	0.36	0.08	0.090	0.99
LR141	69.9	6.7	1.5	741	159.1	172.3	0.63	3.5	132.9	0.034	5983	91	48.7	3.9	166	0.50	0.31	0.07	0.011	0.31
LR140	59.0	6.4	1.5	721	217.1	113.2	0.52	1.5	121.6	0.025	3642	85	41.7	3.5	234	0.59	0.31	0.18	0.017	0.40

注:1.分析者为有色金属桂林矿产地质测试中心。1) $w(\text{Au})$ 单位为 $10^{-9}$ 。

表 3 老挝波罗芬高原玄武岩风化壳剖面样品微量元素比值表

Table 3 Ratios of trace elements of samples from basalt regolith sections in Boloven Plateau, Laos

比值	Cu	Pb	W	Mn	Cr	Ni	Mo	Sn	V	Ag	Ti	Zn	Co	B	Ba	As	Sb	Bi	Hg	Au
LR140/LR140	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LR141/LR140	1.18	1.05	1.00	1.03	0.73	1.52	1.21	2.33	1.09	1.36	1.64	1.07	1.17	1.11	0.71	0.85	1.00	0.39	0.63	0.78
LR150/LR140	0.93	3.44	1.07	0.54	2.30	0.76	7.65	2.00	4.11	11.56	4.12	0.96	0.41	4.00	2.64	4.81	1.14	0.47	5.39	2.48
LR152/LR140	1.25	2.72	1.07	0.21	1.85	0.34	6.77	3.93	3.18	8.44	4.12	0.88	0.16	3.51	1.69	7.65	1.23	0.11	12.23	1.33
LR153/LR140	0.83	1.88	1.07	1.21	1.31	2.87	3.67	3.07	3.14	3.40	4.12	1.14	0.66	2.17	1.02	3.40	1.18	1.11	8.04	2.35
LR154/LR140	0.67	4.59	1.00	0.62	1.54	0.74	4.40	3.33	2.62	2.56	4.12	0.59	0.13	3.83	2.95	4.48	1.49	0.91	3.81	2.40
LR155/LR140	0.64	6.25	1.00	1.41	2.30	0.56	11.62	2.00	4.11	22.24	4.12	0.98	0.53	6.03	7.41	18.02	2.88	0.86	9.01	2.55
LR158/LR140	0.63	4.69	1.07	3.12	2.30	0.71	10.90	2.00	4.11	10.92	4.12	3.78	1.18	4.69	8.30	9.33	1.68	1.25	10.12	2.83
LR157/LR140	0.61	3.56	1.00	5.57	2.03	0.43	7.73	2.00	4.11	12.36	4.12	9.59	3.56	5.00	8.55	5.02	1.43	0.26	1.24	0.88
LR156/LR140	0.61	5.86	1.33	0.77	2.30	1.21	5.13	3.93	3.18	3.32	4.12	0.55	0.30	4.43	2.26	8.25	2.21	1.76	5.80	2.48
LR151/LR140	0.60	1.88	1.07	0.48	2.30	1.16	5.38	3.53	2.94	2.68	4.12	0.80	0.18	4.83	0.85	6.14	1.61	1.98	9.88	2.48

注:同表 1。

所有样品各元素含量分别与玄武岩基岩 LR140 对应元素含量相除得到比值(表 3),在相除前将表 2 中含“>”者均舍掉“>”而保留数值。

#### 4 砖红壤风化壳微量元素地球化学特征

玄武岩红土风化壳垂直分带中微量元素地球化学特征研究及其形成机理已有大量研究成果<sup>[4,6,8]</sup>。程忠富等和杨元根等分别采用了不同方法研究了微量元素分布规律,程忠富等对广东、海南玄武岩研究过程中提出了富集因子(ER)概念,并将每层土壤元素按照富集因子不同划分为活泼元素和不活泼元素。杨元根等运用正规化值来反映元素分散富集规律,都有明显效果。本文

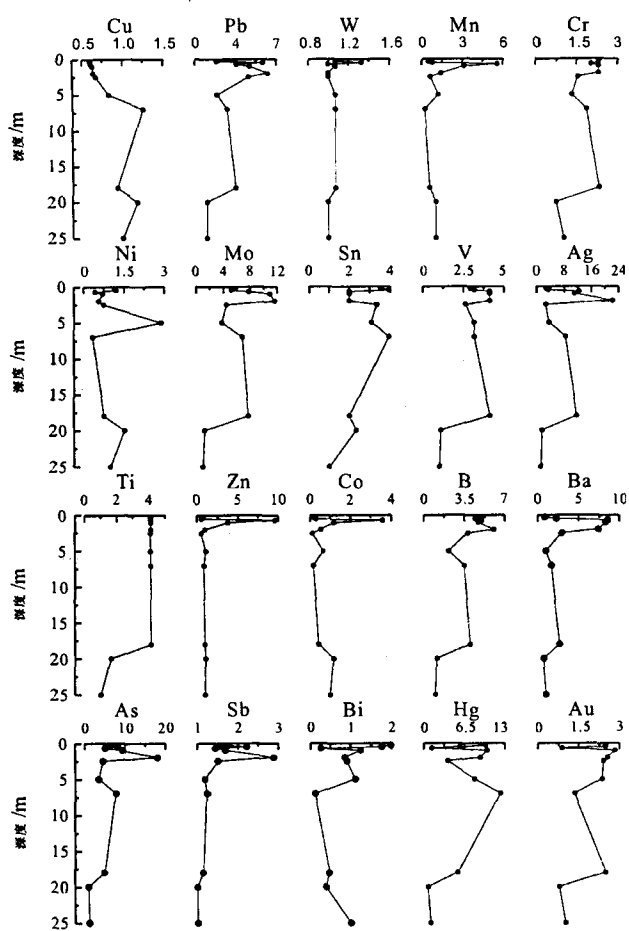


图 1 老挝波罗芬高原玄武岩风化壳微量元素/LR140 比值与采样深度变化趋势简图  
Fig. 1 Schematic plot showing trends of trace element content/ LR140 ratios with sampling depth of basalt regolith in Boloven Plateau, Laos

为了简化,采用了不同元素含量与基岩对应元素含量直接相比方法,比值即反映了富集程度。计算结果见表 3 和图 1。

由表 2 和图 1 可见微量元素含量随采样深度增加而发生变化。经过计算,共划分出 4 种变化趋势:

(1)Cu 在风化过程中可能发生淋滤分散,并且没有产生明显的沉淀。Cu 含量随深度减少而总体趋于变低。

(2)Cu、Ni 在风化壳中 B 层发生富集作用。含量在 B 层上部有弱增大现象。

(3)与新鲜玄武岩相比,除了 Cu、Ni 等之外,其它微量元素在地表以下 2.5m 内的风化壳中都有不同程度的富集,其中富集程度超过 4 倍的有 Pb、W、Mn、Mo、V、Ag、Ti、Zn、B、Ba、As、Hg 等 12 种微量元素,富集程度在 1~4 倍的有 Cr、Sn、Co、Sb、Bi、Au 等 6 种微量元素。W、Bi 在风化壳表层富集程度最小,基本小于 2,说明有微弱富集。

(4)W、Mn、Zn、Co 等在地表 2.5m 以下没有明显富集和分散。含量与新鲜玄武岩相差不大。另外,在整个风化壳剖面上 Mn 与 Zn、Co 相关系数分别为 0.971、0.937,As 与 Sb 相关系数为 0.91,可能说明在热带季风气候条件下这些相关的元素具有相似地球化学行为。

上述 4 种变化趋势反映了在热带季风型气候下的玄武岩在表生环境下微量元素变化特征。波罗芬高原玄武岩风化壳中大部分微量元素在表生环境下化学活动性符合元素在氧化环境和酸性环境中的元素活动规律<sup>[10]</sup>。

#### 5 讨论

波罗芬高原玄武岩喷出时代数据相差较大,对波罗芬高原玄武岩风化壳风化速率计算就存在两种不同数据:5.26mm/千年和 42.86mm/千年,这有待于进一步研究确认。

在表生作用下的波罗芬高原玄武岩风化壳剖面中,20 种微量元素随深度变化出现不同的分散富集规律,其中 Cu 随深度增加总体上变小,属淋滤贫化元素。Cu、Ni 在风化壳中 B 层发生富集作用。Cu、Ni 等之外,其它微量元素与新鲜玄武岩相比在距地表 2.5m 之上都有不同程度富集。Ti 在风化壳中富集最为稳定, $w(\text{Ti})$  大于  $15 \times 10^{-2}$ ,说明在表生环境下其地球化学活动性很小。

波罗芬玄武岩高原砖红壤风化壳剖面特征对第四纪气候变化响应问题有待于以后工作中解决。

## 参考文献:

- [1] Phan Cu Tien, Le Dzuy Bach et al. Geology of Kampuchea, Laos and Vietnam [M]. Institute for Information or Mines and Geology (Hanoi), 1989.
- [2] Lan D. Maycock, Christopher Stone et al. Guide Book for Fieldtrip[R]. Laos Hunt Oil Company, 1994.
- [3] 中国科学院地理所外国地理研究室. 老挝地理[M]. 1977.
- [4] 程忠富, 李文达, 王文斌等. 华南玄武岩红土化过程中微量元素地球化学[J]. 火山地质与矿产, 1994, 15(2): 35-45.
- [5] 周芳, 陈世益. 广西贵港红土风化壳的地球化学特征[J]. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(2): 151-155.
- [6] 徐义芳, 朱照宇, 文高国等. 雷州半岛南部若干红土剖面的地球化学与成土环境研究[J]. 地球化学, 2000, 29(4): 402-409.
- [7] 熊尚发, 刘东生, 丁仲礼. 南方红土的剖面风化特征[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 7-12.
- [8] 杨元根, 刘丛强等. 南方红土形成过程及其稀土元素地球化学[J]. 第四纪研究, 2000, 20(5): 169-181.
- [9] 洪金益. 红土型铝土矿的矿化时间研究[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(3): 141-145.
- [10] 刘英俊, 邱德同等. 勘查地球化学[M]. 科学出版社, 1987.

## GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF TRACE ELEMENTS OF BASALT LATERITE REGOLITH SECTION IN BOLOVEN PLATEAU, SOUTH LAOS

YANG She-feng<sup>1,2,3</sup>, FANG Wei-xuan<sup>1,2,3</sup>, HU Rui-zhong<sup>1</sup>

WANG Si-de<sup>2</sup>, CHEN Zhen-wei<sup>2</sup>, WEI Shou-xian<sup>2</sup>

- (1. *The Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002*; 2. *Beijing Southeast Asia Mineral Resources Sci-Tech Co. Ltd, Beijing 100012*;  
3. *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

**Abstract:** The climate of Laos is typically tropical monsoon type. Boloven Basalt Plateau is located in Champasak Province of south Laos. The Plateau is covered by basalt dated Cenozoic age in large area and has been uplifted slowly. The annual average rainfall and temperature in Boloven Basalt Plateau is 3742.5mm and 20.1℃ respectively, so there has been formed laterite regolith. The regolith with limonite and bauxite is averagely more than 25m deep in the whole Plateau. The geochemical characteristics of twenty trace elements in regolith are discussed.

**Key Words:** Boloven Plateau, Laos, basalt, laterite regolith, geochemical characteristics

## 我国矿产勘查开采持续升温

国土资源部日前发布的国土资源综合统计报告表明,全国勘查开采热度不减。1~8月,全国共批准颁发勘查许可证 7455 件,比去年同期增加 13.3%;批准颁发采矿许可证 24580 件,比去年同期增加 19.9%;两证批准量增幅中部地区最大。

1~8月,在全国批准颁发的勘查许可证中外商投资企业有 118 件,比去年同期增加 48 件。中部地区发证数大幅度增加,1~8月颁发勘查许可证 2115 件,占全国发证总数的 29.9%,比去年同期增加了 126.5%。

探矿权、采矿权招拍挂出让件数减少。1~8月全国探矿权出让宗数为 1156 件,出让价款为 10.75 亿元,其中招拍挂出让 195 件,比去年同期减少 58.7%;招拍挂出让价款为 7.69 亿元,比去年同期增加 31.7%。东部地区探矿权招拍挂出让件数最多,西部地区出让价款最高。1~8月全国采矿权出让宗数为 15932 件,出让价款为 31.46 亿元,其中招拍挂出让 6755 件,招拍挂出让价款 17.13 亿元,招拍挂出让宗数和价款分别比去年同期减少 17.7%和 27.2%。