https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.151



# 老挝表层沉积物 69 种元素地球化学背景值

王 玮<sup>1,2,3</sup>,王学求<sup>1,2,3\*</sup>,张必敏<sup>1,2,3</sup>,聂兰仕<sup>1,2,3</sup>,

程新彬4,韩志轩5,刘汉粮1,2,3,刘东盛1,2,3

1. 自然资源部地球化学探测重点实验室,河北廊坊 065000

2. 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

3. 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心,河北廊坊 065000

4. 北京市地质调查研究院,北京海淀 100195

5. 桂林理工大学有色金属矿产勘查与资源高效利用省部共建协同创新中心, 广西桂林 541004

摘 要:老挝地质条件优越,资源潜力巨大.为响应国家"一带一路"倡议,在老挝全境开展1:100万国家尺度地球化学填图工作.采集了大量地球化学数据,为研究区元素分散富集、矿产开发、环境保护、农业生产提供了高质量的基础地球化学数据.共采集地球化学样品2079件,采用高精度分析技术及严格的质量控制,分析了69种元素.采用X±3S一次性剔除异点后数据集的中位值作为估值,首次给出了老挝全国69种元素地球化学背景值,填补了老挝国家尺度地球化学填图工作的空白.初步讨论了老挝全境、7个三级大地构造单元,6个三级成矿带69种元素的背景值特征.研究表明不同构造单元中受地质背景、构造及岩浆活动的影响,元素分布具有各自特征,同时不同成矿带受成矿作用及构造岩浆活动的影响,元素在各个成矿带分布特征不同,元素的富集对矿床有很好的指示意义.这些背景值的获得为下一步深入研究老挝地球化学填图数据提供了基础对比数据.

关键词: 69种元素背景值;表层沉积物;国家尺度填图;地球化学;老挝.
中图分类号: P595;P596
文章编号: 1000-2383(2022)08-2765-16
收稿日期: 2021-08-26

## Geochemical Background Values of 69 Elements in Surface Sediment of the Laos

Wang Wei<sup>1,2,3</sup>, Wang Xueqiu<sup>1,2,3\*</sup>, Zhang Bimin<sup>1,2,3</sup>, Nie Lanshi<sup>1,2,3</sup>,

Cheng Xinbin<sup>4</sup>, Han Zhixuan<sup>5</sup>, Liu Hanliang<sup>1,2,3</sup>, Liu Dongsheng<sup>1,2,3</sup>

1. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Langfang 065000, China

2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

3. UNESCO International Centre on Global-Scale Geochemistry, Langfang 065000, China

4. Beijing Institute of Geological Survey, Beijing 100195, China

5. Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources by the Province and Ministry, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

**基金项目:**国家重点研发计划项目(No. 2016YFC0600600);中国地质调查项目(Nos. DD20190451, DD20221807).物化探所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(No. AS2022P03).

作者简介:王玮(1984-),女,硕士,高级工程师,从事勘查地球化学研究.ORCID:0000-0002-0040-609X.E-mail:cgswangwei@163.com \* 通讯作者:王学求, E-mail:wxueqiu@mail.cgs.gov.cn

**引用格式:**王玮,王学求,张必敏,聂兰仕,程新彬,韩志轩,刘汉粮,刘东盛,2022.老挝表层沉积物69种元素地球化学背景值.地球科学,47(8): 2765-2780.

**Citation**: Wang Wei, Wang Xueqiu, Zhang Bimin, Nie Lanshi, Cheng Xinbin, Han Zhixuan, Liu Hanliang, Liu Dongsheng, 2022. Geochemical Background Values of 69 Elements in Surface Sediment of the Laos. *Earth Science*, 47(8):2765–2780.

**Abstract:** Laos has excellent ore-forming geological conditions and great resource potentials. The 1: 1 000 000 National-scale Geochemical Mapping project was conducted in the whole area of Laosat the advocate of the "Belt and Road" Initiative. A large amount of geochemical data was collected, which provided high-quality basic geochemical data for the study on elemental dispersion and enrichment, mineral exploration, environmental protection and agricultural production. A total of 2079 geochemical samples were collected, 69 elements were analyzed by high-precision analytical techniques under the strict quality control. The data set was once processed by the  $X \pm 3S$  and the anisotropy was dropped, the median value of the processed data set was used as the valuation. As a result, the first batch of geochemical background values of 69 element background values of Laos, 7 tertiary geotectonic units and 6 tertiary metallogenic belts throughout Laos are primarily discussed. The study shows that the distribution of elements in different tectonic units is characterized by geological background, tectonic and magmatic activities, while the distribution of elements in different mineralization zones are different due to the influence of mineralization and tectonic magmatic activities, and the enrichment of elements is a good indicator of mineral deposits. The acquisition of these background values provides basic comparative data for the next in-depth study of geochemical mapping data in Laos.

Key words: 69-element background values; surface sediment; national-scale geochemical mapping; geochemistry; Laos.

## 0 引言

"地球化学背景"一词最初来源于勘查地球化 学(Hawkes and Webb, 1962),地表各种沉积物(水 系沉积物、土壤及其他疏松沉积物等)的地球化学 背景及其元素分布特征被作为勘查地球化学、环 境、农业等研究的基础. 沉积物中元素的含量会随 着地质作用、表生物理、化学、生物作用的变化而变 化,特别是受人类工农业生产活动的影响,因此对 背景及基准的研究被全球众多科学家重视(Salminen and Tarvainen, 1997; Vivo *et al.*, 1997; Salminen and Gregorauskien, 2000; Reimann and Garrett, 2005; Albanese *et al.*, 2007; 迟清华和鄢明才, 2007; 王学求, 2012; 成杭新等, 2014; 史长义等, 2016; 王 学求等, 2016; 刘汉粮等, 2020). 本次研究取得的成 果对研究老挝表层沉积物的元素地球化学特征具 有重要意义.

在中国已开展的全国性的以表层沉积物为主 的地球化学填图工作主要有:中国区域化探扫面计 划(RGNR)于1978年启动.从1978年到2009年,覆 盖中国陆地面积超过700万km<sup>2</sup>,并从项目中获得了 数千万高质量元素数据,并发现2000多处矿产,取 得了巨大的科学成就、经济效益和社会效益(谢学 锦,1979,2002;谢学锦和刘大文,2006;谢学锦等, 2009).作为全球地球化学基准项目(Darnley,1995) 的一部分,中国地球化学基准计划(CGB)(Wang, 2015)于2008年至2014年实施,大部分样品于2010 年至2012年采集.CGB项目是目前唯一一个满足 联合国教科文组织规定的71种化学元素分析要求 的项目(Darnley, 1995). 它分析了 76种元素和 5个 其他指标,并为 81个指标制定了一套高质量的分析 和质量控制方法(张勤等, 2012). 在上述项目的基 础上,中国在地球化学填图和方法技术方面积累了 丰富的经验.

本项目的实施响应了国家"一带一路"倡议,支 撑了联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研 究中心实施的"化学地球"国际大科学计划,同时履 行了自然资源部中国地质调查局(原中华人民共和 国国土资源部中国地质调查局)与老挝人民民主共 和国自然资源与环境部地质矿产司签署的"关于老 挝地质地球化学填图合作项目"的协议.在老挝全 境开展1:100万国家尺度地球化学填图工作,由我 方提供技术方案及培训,双方共同完成采样工作, 分析及数据处理工作在中国完成,2015~2018年共 采集样品2079件. 通过对这批数据的分析,研究了 老挝表层沉积物 69 种元素背景值,为老挝矿产开 发、环境保护、社会发展提供了高质量的基础地球 化学数据.由于老挝地质勘查程度较低,并从未进 行全国范围的地球化学填图工作,本次研究填补了 老挝国家尺度地球化学勘查的空白,并首次对老挝 元素地球化学背景值进行了较为深入的研究.

## 1 地质背景

老挝位于亚洲中南半岛中北部,是东南亚成矿带的重要组成部分,也是我国西南"三江"成矿带向南延伸.境内80%的区域为高原和山地,其余为平原和盆地.属热带和亚热带季风气候,植被极为发育,现代风化堆积作用强烈,基岩出露较少.老挝出

露地层主要为古生界,其次为中生界和新生界.古 生界主要发育在北部和东部地区,中生界主要为出 露在桑怒地区的中、上三叠统海相灰岩、砂岩和粉 砂岩等,其次在南部北通河谷中有侏罗系海相沉积 发育.新生界在北部山间谷地发育,并有褐煤层出 现,第四系在沟谷中广泛分布.老挝作为东南亚唯 一的内陆国家,区内主要构造单元是中国青藏一三 江带古特提斯构造的向东延伸,经历了冈瓦纳大陆 裂解,印度一亚洲陆陆碰撞等构造事件形成一个由 多陆块、多洋盆和多岛弧相间排布而成的成矿体 系. 是由众多小块体及其间拼接带组成的结构复杂 的统一陆块.区内经历了多期不同类型的构造运 动,构造单元多,断层发育,地质构造复杂,成矿条 件良好.多期次的岩浆岩重合叠加、成带、成片展布 构成了岩浆岩带,岩浆岩带多分布在俯冲带、碰撞 带等板块构造活动强烈的部位,形成了具有大地构 造意义的构造岩浆岩带,这些构造岩浆带与该地区 矿产资源的形成关系密切(Fan, 2000;李兴振等, 2002; Wakita and Metcalfe, 2005; Yin, 2006; 卢映祥 等,2009;施美凤等,2011;贾润幸等,2014;Zaw et al.,2014a,2014b;王宏等,2015;刘书生等,2018;黄 丰等,2020;曾庆高等,2020).

2 研究方法

#### 2.1 样品采集与分析测试

按照编制地球化学图的要求,最基本原则是要 求在图纸上至少1个数据/cm<sup>2</sup>,因此,老挝1:100万 国家尺度地球化学填图设计采样网格大小为10 km×10 km.为了避免使用方里网作为采样单元格 在图幅边界出现半个格子,同时也为了使用GPS的 方便和避免坐标系转换的不一致等,考虑进行按经 纬度划分采样格子,为了布点和采样方便,以每一 个1:2.5万图幅(相当于经度差7.5'×纬度差5.0',面 积大约100 km<sup>2</sup>)作为一个采样格子,每一个格子采 集1个样或组合样,采样密度:1个样/100 km<sup>2</sup>.每个 采样点应能够控制每个采样网格最大面积.

老挝地理上处于中南半岛,境内多山,海拔总体较高,低山丘陵次之,平原低谷较少,在山区和丘陵地区以水系沉积物为采样介质,在平原地区以土壤为采样介质.在每个网格的低洼处采样,样品粒级小于2mm(-10目).采样重量应该过筛后大于1kg,重复样数量要达到总样品数量的3%~5%,总样品数大于1000件的重复样达到3%.(Wang,

2015;王玮等,2020a).2015~2018年老挝全境共采 集样品2079件(图1),根据采样技术要求采集重复 样72件,占总样品数的3.5%.

所有样品统一由河南岩石矿物测试中心分析 69种元素,分析方法以ICP-MS、FU-ICP-OES和 XRF为主,所有元素分析检出限必须低于地壳克拉 克值.各元素对应的分析方法如下:GF-AAS(Au); ICP-MS(Bi、Cd、Cs、Hf、In、Mo、Pb、Sc、Ta、Th、Tl、 U、W、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、 Tm、Yb、Lu、Y、Te);XRF(SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 K<sub>2</sub>O、Ba、Br、Cl、Co、Cr、Cu、Ga、Nb、Ni、P、Rb、S、 Ti、V、Zn、Zr);HG-AFS(As、Sb、Se、Ge);CV-AFS (Hg);SIE(F);ES(Ag、B、Sn);CF-COL(I);FU-ICP-OES(CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O、Be、Li、Mn、Sr);GC (C、N).所有元素报告率为100%,同时采用国家标 准物质(SRMs)严格控制实验室分析准确度,合格 率达到100%(张勤等,2012;Wang,2015).

#### 2.2 统计单元划分

参考王宏等(2015)结合前人研究资料依据区 域构造一岩石的分布发育情况及时空属性等,对构 造单元划分方法,将研究区自西向东划分为7个三 级大地构造单元(图1)(将印支地块区作为二级构 造单元,并将其内部的缝合带作为与地块并列的构 造单元划分),即景洪一素可泰火山弧、思茅一彭世 洛地块、奠边府一黎府缝合带、万象一昆嵩地块、色 潘一三岐缝合带、长山地块、哀牢山一马江缝合带 (朱延浙等,2009;王宏等,2015;刘书生等,2018). 同时在成矿单元划分上,老挝属于印支成矿省,在 此基础上划分为6个三级成矿带(图1),分别为:清 迈成矿带、琅南塔一庄他武里成矿带、琅勃拉邦一 大叻成矿带、万象一昆嵩成矿带、长山成矿带、红河 成矿带(施美凤等,2013;Kamvong et al.,2014;Zaw et al.,2014a;贾润幸等,2014;刘书生等,2018).

### 2.3 背景值确定

背景值可以用来量化未来的变化,沉积物中化 学元素背景值一直是一个重要的问题,世界上有着 悠久人类工农业文明的地区土壤和沉积物中元素 背景值的变化都反映了其环境的变化(Hawkes and Webb,1962;Reimann and Garrett,2005;王学求等, 2016).老挝以农业为主,现代工业落后,因此背景 值受工业和人类活动影响较小.目前很多方法用来 计算背景值,例如算数平均值(AM)、中位数、UCL、 UBC、第 N 个 百 分 位 等 方 法 (Breckenridge and



据刘书生等(2018),王宏等(2015)修改

Crockett, 1998; Salminen and Tarvainen, 1997; Chen *et al.*, 2001; 迟清华和鄢明才, 2007; 史长义 等, 2016; 王学求等, 2016). 本文采用 X±3S一次性 剔除异点后数据集的中位值作为背景值统计老挝 全境 69种元素地球化学背景值.本次背景值研究分 2个单元进行: 7个三级构造单元及6个三级成矿 区带.

## 3 老挝地球化学背景值总体特征

老挝全国表层沉积物统计参数见附表1,以 $X\pm$ 3S为临界值剔除异点后数据集的中位值作为背景 值,在讨论国家尺度、构造单元及成矿带中元素富 集与贫化,采用区域浓集系数RCC值进行讨论,其 中区域浓集系数RCC不仅可以反映出元素分散与 富集规律,指出成矿有利地质体,还可以为确定区 域主要成矿元素提供信息(史长义,1994).老挝表 层沉积物背景值与大陆地壳丰度(Rudnick *et al.*, 2003)相比较(附表1)如下:N、B、Sb、As、Br、Cs、 Hf、Zr、Li、Pb、SiO<sub>2</sub>、U、Te、TC等14种元素RCC> 1.1,显示明显富集,Sn、Ag、Nb、Th、Rb、I、Bi、La、 Tm、Ge、Hg、Ta、Pr、Yb等14种元素RCC介于 0.9~1.1之间;Lu、W、Tb、Nd、Sm、Y、Ce、Dy、Gd、 Er、In、Cd、Au、Ho、Se、K<sub>2</sub>O、P、Ti、Eu、Zn、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 Ga、Tl、Be、Cu、Ba、Mo、Mn、F、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、V、Sc、Co、 Cr、Ni、Cl、S、Sr、Na<sub>2</sub>O、MgO、CaO 等 41 种元素 RCC均小于0.9显示亏损.其中主量元素除 SiO<sub>2</sub>略 高于地壳丰度之外,其余 K<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO均低于地壳丰度;明显富集的元 素多为亲石元素、不相容元素和挥发元素.老挝表 层沉积物中多数元素贫化,一方面是老挝河网密 布,水流充沛,随着水流的搬运,与矿化作用相关的 元素含量不同程度的降低,另一方面表层沉积物受 表生作用影响存在次生富集与贫化现象.老挝地处 亚热带,常年高温,降水量充沛,表生物理、化学、生 物风化及淋滤作用强烈,这也说明了表层沉积物中 元素的分布很明显受表生地球化学作用影响(谢学 锦,1979;任天祥等,1983;朱延浙等,2009).

## 4 老挝不同构造单元内表层沉积物 背景值

东南亚地区位于全球特提斯成矿域、环太平洋 成矿域与印度-澳大利亚成矿域的交汇地带,刘书 生等(2018)将东南亚地区划分为6个一级构造单 元、32个二级构造单元和57个三级构造单元.老挝 位于中南半岛中北部,境内跨7个三级构造单元,分 别为:景洪-素可泰火山弧、思茅-彭世洛地块、奠 边府-黎府缝合带、万象-昆嵩地块、色潘-三岐 缝合带、长山地块、哀牢山-马江缝合带(Dickins and Tien,1997;潘桂棠等,2009;邓军等,2010;王宏 等,2015;刘书生等,2018).

老挝全国不同构造单元表层沉积物背景值与 老挝全国背景值比值见附表2,奠边府一黎府缝合 带、色潘一三岐缝合带、长山地块3个三级构造单元 多元素背景值高于老挝全区背景值;景洪一素可泰 火山弧、思茅一彭世洛地块、万象一昆嵩地块、哀牢 山一马江缝合带4个三级构造单元多元素背景值低 于老挝全区背景值.

#### 4.1 景洪-素可泰火山弧

景洪-素可泰火山弧位于昌宁-清莱缝合带 以东,北段在中国境内称为杂多-景洪火山弧带, 向南过老挝西部至泰国接素可泰火山弧地块(Dickins and Tien,1997;邓军等,2010;潘桂棠等,2009; 王宏等,2015).带内主要发育上石炭统-三叠系陆 源碎屑岩、灰岩及火山岩,二叠系-三叠系英安 岩-安山岩-玄武岩等弧火山岩系,且中下三叠统



Fig. 2 Comparison map of regional concentration coefficient values in Jinghong-Sukhothai arc

火山岩地化数据显示陆缘弧特征,这些早期地层遭 受后期褶皱作用形成 NE 向褶皱带,并被晚三叠世 陆相砂岩不整合覆盖,侵入岩主要为早中三叠世岛 弧 I 型 花 岗 岩 和 晚 三 叠 世 S 型 花 岗 岩 (王 宏 等, 2015). 本次研究工作, 在该构造单元内采集表层沉 积物样品166件,根据研究成果可知景洪-素可泰 火山弧元素背景值:Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Mn<sub>2</sub>Co<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub> Zn, Li, Cs, B, Cd, Au, TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc, Ni, Rb, MgO, K<sub>2</sub>O, CaO, As, V, P, Be, Ba, Ge, Ti, F, Tl, Nb, SiO<sub>2</sub>、Cu、Nd、Bi、Sn、Mo、Th共37种元素 RCC>1, 其中Na<sub>2</sub>O、Sr、Sb、Te、Mn、Co共6种元素 RCC> 1.2,显著富集;Ta、Zn、Li、Cs、B、Cd、Au、TFe2O3共 8种元素 RCC1>1.1, 富集; Tm、Lu、Ce、Hg、In、Zr、 Se、Hf、TC、Br、Cl共11种元素RCC<0.9,亏损(图 2),大部分造岩元素和铁族元素在本构造单元内均 表现出富集状态,而部分稀土元素、卤素及分散元 素表现出亏损,这与本构造单元内发育的基岩类型 及各元素在成壤过程中本身的物理化学性质相关.

#### 4.2 思茅-彭世洛地块

思茅-彭世洛地块位于难河-程逸缝合带以 东、哀牢山-奠边府-黎府缝合带以西.该地块可 进一步划分为西部思茅-彭世洛中新生代盆地和 东部墨江-黎府火山弧带两个次级构造单元.思 茅-彭世洛中新生代盆地主要由上三叠统前陆盆 地相含煤磨拉石沉积岩系、侏罗系-古近系红色陆 相碎屑岩系组成.墨江-黎府火山弧带发育一套从 基性(玄武岩)、中性(安山岩)到酸性(流纹岩)的晚 石炭世-中三叠世岛弧型钙碱性火山岩系列.上三 叠统-白垩系陆相含盐层红色碎屑岩系不整合上 覆于石炭一二叠系陆源碎屑岩一碳酸盐岩和火山 岩系之上(Wang et al., 2000;刘俊来等, 2011;王宏 等, 2015).

本次研究工作,在该构造单元内采集表层沉积 物样品586件,根据研究成果可知思茅一彭世洛地 块元素背景值:Te、As、CaO、Sr、Na<sub>2</sub>O、MgO、Ba、 K<sub>2</sub>O、Au、Zn、Co、Rb、Cd、Mn、Dy、Ho、Er、F、Sc、Tl、 Tb、Yb、Ga、Tm、Lu、Ta、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pb、Li、Gd、W、Y、 Ag、Cs、Th、Be、Sm、Cu、Ti、In、V、Sn、B、Sb、U、Eu、 Bi、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Nd、Pr、Ge、Ni、La共53种元素RCC>1, 其中Te、As、CaO共3种元素RCC>1.2,显著富集; Sr、Na<sub>2</sub>O、MgO、Ba、K<sub>2</sub>O共5种元素RCC>1.1,富 集;Se、N、Zr、Br、TC、Hf共6种元素RCC<0.9,亏 损(图3).该构造单元较为稳定,内部大部分元素分 布较均匀,显著富集或亏损的元素较少,本地区As、 Te富集明显而Se亏损,可能与该地区金矿床形成 过程中形成许多金的砷化物、碲化物,并在本地区 存留下来有关.

#### 4.3 奠边府-黎府缝合带

奠边府-黎府缝合带是中国云南哀牢山带南 东延伸经墨江地段后分为两支中西支向南延相继 接奠边府断裂带、黎府缝合带和东南端的斯雷博河 缝合带,在哀牢山带和马江带发育较为完整的蛇绿 岩层序,由下而上依次为变质橄榄岩、堆晶杂岩、基 性熔岩及含放射虫硅质岩,在老挝超基性岩仅见于 琅勃拉邦东奠边府断裂带与南康河谷交切地带 (Wang et al.,2000;刘俊来等,2011;王宏等,2015).

本次研究工作,在该构造单元内采集表层沉积 物样品22件,根据研究成果可知奠边府一黎府缝合





带元素背景值:Cs、Rb、Ni、Se、N、Th、Hg、Bi、Tl、 Sb、Be、W、Ce、Li、U、La、Pr、Co、As、Pb、K<sub>2</sub>O、Cd、 In、Sm、Zn、Dy、Y、Ho、F、Nd、Cr、Cu、B、Tm、Ga、 Er、Lu、Br、Yb、Gd、Tb、Eu、Te、S、Ba、Sc、Nb、Mo、 Sn、Ta、P、Au、V、TC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sr、Ti、Ge、 Mn、I、Cl、Hf共63种元素RCC>1,其中Cs、Rb、Ni、 Se、N、Th、Hg、Bi、Tl、Sb、Be、W、Ce、Li、U、La、Pr、 Co、As、Pb、K<sub>2</sub>O、Cd、In、Sm、Zn、Dy、Y、Ho、F、Nd、 Cr、Cu、B、Tm、Ga、Er、Lu共37种元素RCC>1.2, 显著富集;Br、Yb、Gd、Tb、Eu、Te、S、Ba、Sc、Nb、 Mo、Sn、Ta、P、Au、V、TC共17种元素RCC>1.1, 富集;CaO、Na<sub>2</sub>O共2种元素RCC<0.9,亏损(图 4).在该缝合带,绝大多数元素相对富集,其中易挥 发元素、不相容元素和稀土元素均表现出显著富 集,这与缝合带地区构造运动活跃、岩浆活动剧烈 导致元素的富集与混染相吻合,同时也导致造岩元素Ca和Na的相对亏损.

#### 4.4 万象-昆嵩地块

万象-昆嵩地块西南以奠边府-黎府-斯雷 博河缝合带为界、北东以色潘-三岐缝合带为界、 东临南海盆地,万象一呵叻中新生代盆地发育地层 主要为-套三叠系-古近系陆相含盐红层岩系,是 东南亚最主要的大型钾盐-盐岩-石膏矿盆地;公 河褶皱带主要由古生代地层构成,发育寒武系-志 留系的浅变质火山-沉积岩系;昆嵩地块为-古陆 块,由结晶基底和盖层构成.结晶基底主要由太古 宇镁铁质麻粒岩、斜长片麻岩和硅铝质花岗岩,元 古宇为斜长片麻岩、角闪岩和变质花岗岩,盖层主 要是中三叠统碎屑岩、碳酸盐及少量流纹岩,以及 中侏罗统造山磨拉石相砂砾岩层.并且万象-昆嵩



Fig. 5 Comparison map of regional concentration coefficient values in Vientiane-Kontum block

地块岩浆活动强烈,前寒武纪至中生代主要发育花 岗质侵入岩类,在老挝南部及波罗芬高原中也有大 量中生代的酸性岩浆喷发,新生代发育大面积裂隙 式溢流玄武岩(Wang *et al.*,2000;刘俊来等,2011; 王宏等,2015).

万象-昆嵩地块是老挝境内面积最大的三级 构造单元,区内共采集表层沉积物样品664件,该地 块元素背景值:Hf、Zr、SiO<sub>2</sub>、U、Cl、I共6种元素 RCC>1,其中Hf、Zr共2种元素RCC>1.2,显著富 集;Pr、Ag、Sn、Ta、Se、Lu、N、Y、Yb、Gd、Sm、Nd、 Be、Tm、Er、Ti、W、Dy、Cr、Ho、S、CaO、Tb、Mo、 Eu、MgO、Mn、In、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ga、Tl、Li、Cu、Ba、Hg、V、 B、F、Rb、P、Bi、Cs、Na<sub>2</sub>O、Sr、Au、Sc、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Zn、 Co、K<sub>2</sub>O、Ni、Te、Sb、Cd、As 共55种元素RCC< 0.9,亏损(图5).区内大部分元素相对亏损,稀有稀 土元素Hf、Zr显著富集,这可能与该地区含盐红层 岩系、变质岩组合的结晶基底有关,锆石的化学稳 定性较高,风化作用后残留富集风化剖面中,而且 土壤中的Zr、Hf显著富集在碱性火成岩形成的红壤 中(刘英俊等,1984).

#### 4.5 色潘-三岐缝合带

色潘一三岐缝合带呈北西向分布,从越南三岐向北西经老挝色潘、他曲,在万荣附近被奠边府断裂截切.古洋壳以超镁铁质岩、镁铁质岩和陆源碎 屑岩为代表的蛇绿混杂岩组合出露,受后期强烈构造变形作用,蛇绿混杂岩体呈构造透镜体沿缝合带 断续出露,带内还出露有石英岩、云片岩等中高级 变质岩系和绿片岩、变凝灰岩、变流纹岩一玄武岩 等中低级火山变质岩系(Lepvrier *et al.*,2004;王宏

等,2015),本次研究在本区域采集代表性表层沉积 物样品22件,色潘一三岐缝合带元素背景值:Se、 Hg, I, Mo, TC, F, Bi, N, Cd, S, Tl, Sb, Cs, U, Ni, Hf, Th, Pb, Rb, Be, Zr, As, Ag, Lu, Yb, Tm, Y, Br, Er, Pr, Ta, Nd, K<sub>2</sub>O, Cr, La, Ho, Sn, Sm, CaO, Ba,  $Gd_Ce_V_Tb_Dy_W_Nb_Eu_Cu_Sc_TFe_O_3_Li_$ Cl、P、Ga共55种元素 RCC>1,其中 Se、Hg、I、Mo、 TC,F,Bi,N,Cd,S,Tl,Sb,Cs,U,Ni,Hf,Th,Pb, Rb, Be, Zr, As, Ag, Lu, Yb, Tm, Y, Br, Er, Pr, Ta, Nd、K<sub>2</sub>O、Cr、La、Ho共36种元素RCC>1.2,显著富 集;Sn、Sm、CaO、Ba、Gd、Ce、V、Tb、Dy、W 共10种 元素 RCC>1.1, 富集; Te、MgO、Au、Mn、Sr、Na<sub>2</sub>O 共6种元素RCC<0.9,亏损(图 6)表明大部分元素 相对富集,其中易挥发元素、不相容元素和稀土元 素显著富集,其中Hg、I、Mo、Se这4种元素 RCC> 2,这些指示元素对该地区的多金属矿床的发现具 有重要意义.

#### 4.6 长山地块

长山地块介于南部色潘一三岐缝合带与北部 马江缝合带之间(Lepvrier et al., 2004; 王宏等, 2015). 块体内主要发育有前寒武纪中高级变质岩 及奥陶纪一白垩纪的沉积岩和火成岩.大江断裂以 南,主要发育泥盆一石炭纪活动陆缘一岛弧型钙碱 性火山一侵入岩和早中二叠世碰撞造山型花岗岩; 大江断裂以北,下部为元古宙混合岩化角闪岩夹黑 云斜长片麻岩、结晶片岩;上部为新元古代一早寒 武世变质岩,显生宙主要发育有晚石炭世一二叠纪 的碳酸盐岩一陆源碎屑沉积岩系和玄武岩、安山岩 等岛弧型钙碱性火山岩系.长山褶皱带形成过程中





岩浆活动异常强烈,本次研究在本区域采集代表性 表层沉积物样品609件,该地块元素背景值:N、Hg、 Se、As、Cd、TC、Sb、B、V、Ni、Cu、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P、S、Bi、 Li、Cr、In、Mn、Sc、Ce、Co、Zn、La、Mo、Y、Rb、Cs、 Tl、Be、Dy、Lu、Nd、F、Tb、Pr、Sm、K<sub>2</sub>O、W、Ho、Ag、 Eu、Ga、Er、Ti、Sr、Te、Tm、I、MgO、Br、Yb、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 Na<sub>2</sub>O、Au、Gd、Sn、CaO、Ba、Pb、Th、Cl、Ge共63种 元素 RCC>1,其中N、Hg、Se、As、Cd、TC、Sb、B、 V、Ni共10种元素 RCC>1.2,显著富集,富集元素 多为易挥发元素、不相容元素和稀土元素;Cu、 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P、S、Bi、Li、Cr、In、Mn、Sc、Ce、Co、Zn、La、 Mo、Y、Rb、Cs、Tl共19种元素 RCC>1.1,富集(图 7).长山地块大部分元素相对富集程度一般,但其 中Hg、As等金矿指示元素 RCC>1.2,与本地区已 知的塞奔金矿、富开金矿等吻合很好.

#### 4.7 哀牢山-马江缝合带

哀牢山-马江缝合带北起哀牢山缝合带向东 南接马江缝合带,发育较为完整的蛇绿岩层序,由 下而上依次为变质橄榄岩、堆晶杂岩、基性熔岩及 含放射虫硅质岩(Wang *et al.*,2000;王宏等,2015) 本次研究在本区域采集代表性表层沉积物样品 10 件,哀牢山-马江缝合带元素背景值:CaO、Bi、 K<sub>2</sub>O、W、Pb、Rb、Na<sub>2</sub>O、Cd、As、Zn、Br、Ba、In、Cl、F、 Ga、V、Co、Mn、Ge、Dy、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>共22种元素 RCC> 1,其中CaO、Bi、K<sub>2</sub>O、W、Pb、Rb、Na<sub>2</sub>O共7种元素 RCC>1.2,显著富集;Cd、As、Zn、Br、Ba、In、Cl、F 共8种元素 RCC>1.1,富集;Hf、Sr、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、I、U、Cs、 S、Se、MgO、Ti、Nd、Cr、TC、Mo、Pr、La、Ce、N、Li、 Sb、Hg、Te、B、Zr、Au、Th共26个元素 RCC<0.9, 亏损(图 8).



Fig. 8 Comparison map of regional concentration coefficient values in Ailaoshan-Song Ma sture

总之,不同三级大地构造单元表层沉积物元素 含量特征不同,主要受地质背景、构造及岩浆活动 的影响,反映出区域上元素分布的不均一性.同时 不同构造单元内表层沉积物元素含量具有各自特 征,亲硫元素(Au、Cu、Zn、As、Pb、Sb、Hg等)、钨钼 族元素(W、Sn、Mo、Bi)、亲铁元素(Fe、Ti、V、Cr、 Mn、Co、Ni)、稀有分散元素(Li、Be、Rb、Cs、Sr、Ba 等)、稀土及放射性元素主要在奠边府一黎府缝合 带、色潘一三岐缝合带、长山地块富集.如受岩浆热 液及构造条件所控制,老挝的主要铜元素高含量地 区主要在长山地块和各类缝合带上.铜矿床多为夕 卡岩型、热液型、斑岩型铜矿,老挝铜元素共圈定地 球化学异常13处,其中4处达地球化学省规模(王 玮等,2020a,2020b).

## 5 老挝不同成矿带内表层沉积物背景值

老挝位于全球特提斯成矿域、环太平洋成矿域 交汇地带.东南亚特提斯成矿域属于特提斯成矿域 东段,经历了冈瓦纳大陆裂解,印度一亚洲陆陆碰 撞等构造事件形成一个由多陆块、多洋盆和多岛弧 相间排布而成的成矿体系.其复杂的地质演化过程 注定了其成矿具多金属、多类型的特征,漫长的地 质演化过程决定了其金属堆积的连续成带性,在构 造构架基础上将特提斯成矿域、环太平洋成矿域划 分为5个成矿省,20个三级成矿带,老挝境内共6个 三级成矿带,见图1:清迈成矿带、琅南塔一庄他武 里成矿带、琅勃拉邦一大叻成矿带、万象一昆嵩成 矿带、长山成矿带、红河成矿带(朱延浙等,2009;施 美凤等,2013;贾润幸等,2014; Kamvong *et al.*, 2014; Zaw *et al.*,2014; 刘书生等,2018).

老挝全国不同成矿带表层沉积物背景值与老 挝全国背景值比值见附表3,清迈成矿带、琅勃拉 邦一大叻成矿带、长山成矿带3个成矿带多元素背 景值高于老挝全区背景值;琅南塔一庄他武里成矿 带、万象一昆嵩成矿带、红河成矿带3个成矿带多元 素背景值低于老挝全区背景值.

#### 5.1 清迈成矿带

清迈成矿带隶属于特提斯成矿域缅甸-苏门 答腊成矿省,该成矿带构造上称临沧-景栋微陆 块,主要为钨-锡-锰-铜-铅-锌-锑-金-铁一铝成矿带,主要发育伟晶岩型、块状云英岩型 和石英脉型钨锡矿,也有浅成高温热液型(斑岩或 砂卡岩型)锡钨矿;第四纪风化残余型锰矿.已知钨 锡矿床(点)72处,典型矿床为那空是贪玛叻大型锡 矿(施美凤等,2013;贾润幸等,2014;Kamvong et al., 2014; Zaw et al., 2014a; 刘书生等, 2018). 本次 研究在本区域采集代表性表层沉积物样品33件,清 迈成矿带元素背景值:Tl、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Rb、Ta、W、 Cs、Ba、Sr、Th、U、Cd、Mo、Bi、Te、Sn、Be、Nb、CaO、 Mn、Sb、Li、Pb、I、Zn、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ga、Sc、Ge、Cl、SiO<sub>2</sub>共 31 种元素 RCC>1,其中 Tl、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Rb、Ta、W、 Cs、Ba、Sr、Th、U、Cd、Mo、Bi、Te、Sn、Be共17种元 素 RCC>1.2, 显著富集; Nb、CaO、Mn、Sb、Li、Pb共 6种元素RCC>1.1,富集,主要为亲铜元素、钨钼族 元素及稀有分散元素;Tm、Eu、Ce、In、Er、Sm、Ho、 Y、Se、B、Cr、Zr、Cu、Tb、Dy、Hg、Hf、TC、Ni、Br共 20个元素 RCC<0.9, 亏损(图9).





#### 5.2 琅南塔-庄他武里成矿带

琅南塔一庄他武里成矿带隶属于特提斯成矿 域印支成矿省,构造上介于澜沧江一清莱结合带和 景洪一难河一沙缴一贡布结合带之间,该成矿带主 要为金一锑一铜成矿带,主体由二叠一三叠纪火 山一沉积岩系构成,成矿带成矿作用与该岩系中的 构造裂隙有关,东部岩浆岩带以发育晚二叠世一三 叠纪弧火山一侵入岩系为主;西部则为中、新生代 陆相盆地沉积.主要发育岛弧一碰撞背景下形成的 斑岩型铜(钼金)矿、剪切带型金矿、高温热液型锡 矿及低温热液型锑矿.该带已知的金、铜、锑矿床 (点)60余处(施美凤等,2013;贾润幸等,2014;Kamvong *et al.*,2014;Zaw *et al.*,2014a;刘书生等, 2018;朱华平等,2016).本次研究在本区域采集代 表性表层沉积物样品189件,琅南塔一庄他武里成 矿带元素背景值:Na<sub>2</sub>O、Sr、Co、As、Te、Sb、Mn、Zn、 Li、Au、Sc、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、B、Ta、MgO、Ni、Cd、Cs、Cu、V、 F、P、Ti、Ge、SiO<sub>2</sub>共25种元素RCC>1,其中Na<sub>2</sub>O、 Sr、Co、As、Te、Sb 共6种元素RCC>1.2,显著富 集;Mn、Zn、Li、Au、Sc、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、B、Ta 共8种元素 RCC>1.1,富集;Th、Lu、I、La、W、Pb、Ce、In、U、 Se、Zr、Hf、TC、Cl、Br共15种元素RCC<0.9,亏损 (图 10).

#### 5.3 琅勃拉邦-大叻成矿带

琅勃拉邦一大叻成矿带隶属于特提斯成矿域 印支成矿省,该成矿带位于彭世洛中生代沉积盆地 和琅勃拉邦-黎府火山弧带,东部岩浆岩带以发育 晚二叠世-三叠纪弧火山-侵入岩系为主;西部则 为中新生代陆相盆地沉积.主要为金-锑-铁-铝-钾盐成矿带(朱延浙等,2009;施美凤等,2013;



Fig. 11 Comparison map of regional concentration coefficient values in Louangphrabang-Dà Lat Metallogenic Belt

贾润幸等, 2014; Kamvong et al., 2014; Zaw et al., 2014a;刘书生等,2018). 区内发育有金、铜、铅锌等 矿床,矿床类型有热液型、砂卡岩型、斑岩型等,区 内代表性矿床有帕奔(Phabon)金矿、富道(Phudao) 金矿、班康姆(Pangkuam)铜金矿和帕栾(Pha Luang)铅锌等矿床(牛英杰等,2013;贾润幸等,2014; 赵延朋等,2015).本次研究在本区域采集代表性表 层沉积物样品635件,琅勃拉邦一大叻成矿带元素 背景值:As、Te、Rb、K2O、Cd、Tl、MgO、Ba、Sr、Ho、 Dy, CaO, Na<sub>2</sub>O, Be, Y, Er, Bi, Ni, F, Tb, Co, W, Zn, Tm,Cs,Th,In,Cu,Sn,Au,Yb,Lu,Ga,Pr,Mn,Pb, Sm,Gd,U,Sc,Ce,Nd,La,TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Hg,V,Sb,Eu, B、Ti、Ta、Ag、P、Li、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、S、Nb、Mo、Ge、Se、Cl共 61 种元素 RCC>1, 其中 As、Te、Rb 共 3 种元素 RCC>1.2,显著富集;K<sub>2</sub>O、Cd、Tl、MgO、Ba、Sr、 Ho、Dy、CaO、Na<sub>2</sub>O、Be、Y、Er、Bi、Ni、F、Tb、Co共 18种元素 RCC>1.1, 富集; Hf元素 RCC<0.9, 亏损 (图 11).

#### 5.4 万象-昆嵩成矿带

万象一昆嵩成矿带隶属于特提斯成矿域印支 成矿省,包括万象一呵叻中生代盆地和昆嵩陆块, 该成矿带主要为钾一铝一铜一金一铅一锌成矿带, 由三叠系、侏罗系、白垩系红色砂页岩和蒸发岩及 太古宇、元古宇及多期次花岗质岩石、新近纪一第 四纪玄武岩.其沉积演化与思茅一彭世洛中生代盆 地相类似,万象一昆嵩成矿带主要发育蒸发沉积型 钾盐矿、玄武岩风化残余型铝土矿、砂卡岩型+残 余型铁矿、低温热液型金矿和砂金,以及砂页岩型 铜矿.沙空那空盐盆地内有他曲、乌隆、廊开、哇仑 农汉等钾盐矿床,钾盐总资源量为270亿吨,居亚洲 第一(朱延浙等,2009;林方成等,2010;施美凤等, 2013;贾润幸等,2014;Kamvong *et al.*,2014;Zaw *et al.*,2014a;刘书生等,2018).本次研究在本区域采 集代表性表层沉积物样品678件,万象一昆嵩成矿 带元素背景值:Hf、Zr、SiO<sub>2</sub>、Cl共4种元素RCC>1, 其中Hf、Zr共2种元素RCC>1.2,显著富集;Pb、 Ag、Th、N、Pr、Sn、Ta、W、Nd、Gd、Se、Be、CaO、S、 Y、Yb、Lu、Er、Sm、Tm、Tb、Dy、Ti、Mn、MgO、Ho、 Cr、Eu、Li、Tl、Mo、In、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ga、Hg、B、Rb、F、 Na<sub>2</sub>O、Ba、Cu、P、V、Cs、Bi、Sr、K<sub>2</sub>O、Au、Ni、 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Co、Zn、Sc、Sb、Te、Cd、As 共57种元素 RCC<0.9,亏损(图12).

#### 5.5 长山成矿带

长山成矿带隶属于特提斯成矿域印支成矿省, 位于色潘一三岐缝合带和马江缝合带之间,古生代 和中生代强烈的岩浆活动,形成了诸多与岩浆活动 有关的金属矿产,该成矿带主要为铜一铁一钨一 锡一铅一锌一金成矿带(朱延浙等,2009;施美凤 等,2013;贾润幸等,2014;Kamvong *et al.*,2014; Zaw *et al.*,2014a;刘书生等,2018).主要矿床类型 为斑岩一砂卡岩型铜金矿、低温热液型铅锌矿、高 温热液型锡矿和残积型砂锡矿等.已知矿床主要有 富开(Phu Kham)斑岩一砂卡岩型超大铜金矿床、色 奔(Sepon)铜金矿、南巴坦(Nam Pathene)锡矿等矿 床(施美凤等,2013;赵延朋等,2013;贾润幸等, 2014;王玮等,2020a,2020b).本次研究在本区域 采集代表性表层沉积物样品532件,长山成矿带元 素背景值:Se、TC、As、N、Cd、Hg、Sb、B、Ni、V、



Fig. 13 Comparison map of regional concentration coefficient values in Truong Son Metallogenic Belt

TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr、P、Cu、Bi、Mn、Sc、In、Co、Mo、CaO、S、 I、Zn、Li、La、Ag、Y、Tl、Ce、Nd、Cs、Pr、Sm、Rb、Be、 Tb、Dy、F、Ho、Lu、Eu、Ti、Ga、Er、W、Tm、Au、 MgO、K<sub>2</sub>O、Yb、Te、Gd、Sn、Br、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sr、Pb、Th、 Ba、Ge、Cl、Nb、Ta、Zr、U 共 66 种元素 RCC>1,其 中 Se、TC、As、N、Cd、Hg、Sb、B、Ni、V、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr 共 12 种元素 RCC>1.2,显著富集;P、Cu、Bi、Mn、 Sc、In、Co、Mo、CaO、S、I、Zn、Li、La、Ag、Y、Tl、Ce、 Nd、Cs、Pr、Sm、Rb、Be、Tb、Dy、F、Ho、Lu、Eu、Ti共 31 种元素 RCC>1.1,富集(图 13).

#### 5.6 红河成矿带

红河成矿带隶属于环太平洋成矿域扬子成矿 省,位于红河基底逆冲推覆构造,该成矿带主要为 铁铜铬镍金铅锌锑成矿带(施美凤等,2013;贾润幸 等,2014;Kamvong *et al.*,2014;Zaw *et al.*,2014a;刘 书生等,2018).该成矿带出露地层主要为中、古元 古界火山-沉积变质岩系,并伴大量中酸性、基性 超基性岩浆侵入.主要发育海底火山沉积-变质改 造型铁、铜矿床,沉积变质-热液改造型铜金稀土 矿和风化残余型铁矿(朱华平等,2016).本次研究 在本区域采集代表性表层沉积物样品12件,红河成 矿带元素背景值:Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Ba、CaO、Rb、Bi、Pb、 W、Cl、Zn、Br、In、Cd、Ga、Co、Tl、V共17种元素 RCC>1,其中Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Ba、CaO、Rb、Bi、Pb共7 种元素 RCC>1.2,显著富集;W、Cl、Zn、Br、In、Cd 共6种元素 RCC>1.1,富集;Sc、Be、Nb、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 Sr、Sn、Nd、Mo、I、TC、S、Cr、MgO、U、Hf、Se、Ti、 Pr、Cu、Sb、N、Ce、La、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Li、Au、Zr、As、B、Te、 Th、Hg、Cs共33种元素 RCC<0.9,亏损(图14),.



Fig. 14 Comparison map of regional concentration coefficient values in Honghe Metallogenic Belt

总之,研究结果显示受成矿作用及构造岩浆活动的影响,元素在各个成矿带分布特征不同,亲硫元素(Au、Cu、Zn、As、Pb、Sb、Hg等)、钨钼族元素(W、Sn、Mo、Bi)、亲铁元素(Fe、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni)、稀有分散元素(Li、Be、Rb、Cs、Sr、Ba等)主要富集在琅勃拉邦一大叻和长山成矿带,同时老挝大部分优势矿种也分布于这两个成矿带内.分析元素地球化学分布特征及综合异常特征,在单元素地球化学图和地球化学异常图的基础上圈定了7个地球化学成矿远景预测区.为老挝未来找矿提供基础地球化学数据(王玮等,2019,2020a,2020b).

## 6 结论

老挝1:100万国家尺度地球化学填图工作作为 "化学地球"大科学计划的组成部分,提供了老挝全 国高质量69种元素地球化学数据,填补了老挝国家 尺度地球化学填图工作的空白.以X±3S为临界值 一次性剔除异点后数据集的中位值作为估值,研究 了老挝全国表层沉积物69种元素背景值,为老挝基 础地质、矿产勘查、环境保护及农业生产多个领域 提供基础地球化学数据.

通过对老挝全区、各构造单元及成矿带元素背 景值的研究发现,受表生风化淋滤作用影响,老挝 全区表层沉积物中多数元素含量与大陆地壳元素 丰度相比相对贫化.老挝构造单元受地层、构造及 岩浆活动的影响,元素分布具有各自特征:奠边 府一黎府缝合带、色潘一三岐缝合带、长山地块3个 三级构造单元多元素背景值高于老挝全区背景值; 景洪一素可泰火山弧、思茅一彭世洛地块、万象一 昆嵩地块、哀牢山一马江缝合带4个三级构造单元 多元素背景值低于老挝全区背景值.老挝的成矿带 受成矿作用及构造岩浆活动的影响:清迈成矿带、 琅勃拉邦一大叻成矿带、长山成矿带3个成矿带多 元素背景值高于老挝全区背景值;琅南塔一庄他武 里成矿带、万象一昆嵩成矿带、红河成矿带3个成矿 带多元素背景值低于老挝全区背景值,元素在各个 成矿带分布特征不同,不少元素的富集亦能对Au、 Cu等矿床有很好的指示意义.

致谢:感谢所有参与样品采集和分析测试的工 作者!感谢中国地质科学院地球物理地球化学勘 查研究所迟清华教授对文章提出的宝贵建议!感 谢审稿人和责任编辑提出的宝贵修改意见!

附表见本刊官网(www.earth-science.net).

#### References

- Albanese, S., De Vivo, B., Lima, A., et al., 2007. Geochemical Background and Baseline Values of Toxic Elements in Stream Sediments of Campania Region (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 93(1): 21-34. https: //doi.org/10.1016/j.gexplo.2006.07.006
- Breckenridge, R.P., Crockett, A.B., 1998. Determination of Background Concentrations of Inorganics in Soils and Sediments at Hazardous Waste Sites. *Environmental Monitoring and Assessment*, 51 (3): 621-656.https://doi. org/10.1023/A:1005808031053
- Chen, M., Ma, L. N., Hoogeweg, C. G., et al., 2001. Arsenic Background Concentrations in Florida, U.S.A. Surface Soils: Determination and Interpretation. *Environmental Forensics*, 2(2): 117–126. https://doi.org/10.1006/enfo.2001.0050

- Cheng, H.X., Li, K., Li, M., et al., 2014. Geochemical Background and Baseline Value of Chemical Elements in Urban Soil in China. *Earth Science Forntiers*, 21(3): 265– 306(in Chinese with English abstract).
- Chi, Q.H., Yan, M.C., 2007. Applied Geochemistry Elemental Abundance Data Book. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Darnley, A., Björklund, A., Bölviken, B., et al., 1995. A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management. Final Report of IGCP Project 259. UNESCO, Paris, 19: 122.
- Deng, J., Yang, L.Q., Wang, C.M., 2010. Research Advances of Superimposed Orogenesis and Metallogenesis in the Sanjiang Tethys. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 37-42(in Chinese with English abstract).
- Dickins, J., Tien, P., 1997. Indosinian Tectogeny in the Geological Correlation of Vietnam and Adjacent Regions. Late Palaeozoic and Early Mesozoic Circum - Pacific Events and Their Global Correlation, 10:87-96.https:// doi.org/10.1017/CBO9780511564413.009
- Fan, P. F., 2000. Accreted Terranes and Mineral Deposits of Indochina. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 343– 350. https://doi.org/10.1016/s1367-9120(99)00061-9
- Hawkes, H., Webb, J., 1962. Geochemistry in Mineral Exploration. Harper, New York.
- Huang, F., Xu, J.F., Wang, B.D., et al., 2020. Destiny of Neo -Tethyan Lithosphere during India-Asia Collision. *Earth Science*, 45 (8): 2785-2804(in Chinese with English abstract).
- Jia, R.X., Fang, W.X., Wei, X.Y., 2014. General Introduction of Geology, Mineral Resources and Mining Exploitation in Laos. *Mineral Exploration*, 5 (5): 826-833(in Chinese with English abstract).
- Kamvong, T., Khin, Z., Meffre, S., et al., 2014. Adakites in the Truong Son and Loei Fold Belts, Thailand and Laos: Genesis and Implications for Geodynamics and Metallogeny. *Gondwana Research*, 26(1): 165–184. https://doi. org/10.1016/j.gr.2013.06.011
- Lepvrier, C., Maluski, H., Van Tich, V., et al., 2004. The Early Triassic Indosinian Orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif); Implications for the Geodynamic Evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393(1/2/3/4): 87–118. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.030
- Li, X.Z., Jiang, X.S., Sun, Z.M., et al., 2002. Collisional Orogeny in the Sanjiang Region of Southwest China. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Lin, F.C., Shi, M.F., Li, X.Z., 2010. Report on the Results of a Comparative Study on the Geological Background and

Mineralization Rules of the Sanjiang-Mekong Mineralization Belt. Chengdu Geological Survey Center, Chengdu(in Chinese).

- Liu, H.L., Nie, L.S., Wang, X.Q., et al., 2020. Background Values of 69 Elements in Catchment Sediments of the China -Mongolia Boundary Region. *Earth Science Forntiers*, 27 (3): 202-221(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.L., Tang, Y., Song, Z.J., et al., 2011. The Ailaoshan Belt in Western Yunna: Tectonic Framework and Tectonic Evolution. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition )*, 41 (5): 1285-1303(in Chinese with English abstract).
- Liu, S.S., Yang, Y.F., Guo, L.N., et al., 2018. Ectonic Characteristics and Metallogeny in Southeast Asia. *Geology* in China, 45 (5): 7-33(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.J., Cao, L.M., Li, Z.L., et al., 1984. Elemental Geochemistry. Geological Science Publishing & Media Ltd., Beijing(in Chinese).
- Lu, Y.X., Liu, H.G., Huang, J.N., et al., 2009. Preliminary Division of the Metallogenetic Belts in the Central South Peninsula of Southeast Asia and Their Regional Ore -Forming Characteristics. *Geological Bulletin of China*, 28 (2): 314-325(in Chinese with English abstract).
- Niu, Y.J., Hu, J.C., Li, X.H., 2013. Study on the Geochemical Features of the Phabon Gold Deposit, Laos. *Geological Survey and Research*, 36 (2): 92-99(in Chinese with English abstract).
- Pan, G.T., Hao, G.J., Feng, Y.F., et al., 2009. Subdivision of Tectonic Units in China. *Geology in China*, 36 (1): 1-28(in Chinese with English abstract).
- Reimann, C., Garrett, R.G., 2005. Geochemical Background-Concept and Reality. Science of The Total Environment, 350 (1-3): 12-27. https://doi. org/10.1016/j. scitotenv.2005.01.047
- Reimann, C., Garrett, R. G., 2005. Geochemical Background -Concept and Reality. Science of The Total Environment, 350(1/2/3): 12-27. https://doi. org/10.1016/j. scitotenv.2005.01.047
- Ren, T.X., Li, M.X., Xu, Y.X., et al., 1983. A Preliminary Study of Hyoergene Geochemistry and Regional Geochemical Exploration Techniques High-Cold Mountainous Regions. *Geological Review* 29 (5): 428-438(in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R., Gao, S., Holland, H., et al., 2003. Composition of the Continental Crust. *The Crust*, 3:1-64.https://doi. org/10.1006/B0-08-043751-6/-03016-4
- Salminen, R., Gregorauskien, V., 2000. Considerations Regarding the Definition of a Geochemical Baseline of Ele-

ments in the Surficial Materials in Areas Differing in Basic Geology. *Applied Geochemistry*, 15(5): 647-653. https://doi.org/10.1016/s0883-2927(99)00077-3

- Salminen, R., Tarvainen, T., 1997. The Problem of Defining Geochemical Baselines: a Case Study of Selected Elements and Geological Materials in Finland. *Journal of Geochemical Exploration*, 60(1): 91-98. https://doi.org/ 10.1016/s0375-6742(97)00028-9
- Shi, C. Y., 1994. A New Method for Studying Regional Dispersion and Enrichment Regularity of Trace Elements. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 18 (3): 219-227 (in Chinese with English abstract).
- Shi, C.Y., Liang, M., Feng, B., 2016. Average Background Values of 39 Chemical Elements in Stream Sediments of China. *Earth Science*, 41 (2): 234-251(in Chinese with English abstract).
- Shi, M.F., Lin, F.C., Li, X.Z., et al., 2011. Stratigraphic Zoning and Tectonic Events in Indochina and Adjacent Areas of Southwest China. *Geolegy in China*, 38 (5): 1244-1256(in Chinese with English abstract).
- Shi, M.F., Lin, F.C., Liu, C.J., et al., 2013. Classification and Metallogenesis of Metallogenic Belts in Southeast Asia and the Neighbouring Southwestern Part of China. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 33 (2): 103-112(in Chinese with English abstract).
- Vivo, B., Boni, M., Marcello, A., et al., 1997. Baseline Geochemical Mapping of Sardinia (Italy). Journal of Geochemical Exploration, 60(1): 77-90. https://doi.org/ 10.1016/s0375-6742(97)00027-7
- Wakita, K., Metcalfe, I., 2005. Ocean Plate Stratigraphy in East and Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(6): 679-702. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.04.004
- Wang, H., Lin, F.C., Li, X.Z., et al., 2015. The Division of Tectonic Units and Tectonic Evolution in Laos and Its Adjacent Regions. *Geology in China*, 42 (1): 71-84(in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Wang, X.Q., Zhang, B.M., et al., 2020a. National - Scale Geochemical Mapping and Prediction of Metallogenic Prospective Areas in Laos. Acta Geologica Sinica, 41 (1): 80-90(in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Wang, X.Q., Zhang, B.M., et al., 2020b. Geochemical Background and Anomalies of Copper in Laos. *Acta Geoscientica Sinica*, 41 (6): 125-131(in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Wang, X.Q., Zhang, B.M., et al., 2019. Progress in National Scale and Geochemical Mapping of Laos: Taking Fluorine Element as an Example. *Journal of Guilin University of Technology*, 39 (2): 335-340(in Chinese

with English abstract).

- Wang, X. F., Metcalfe, I., Jian, P., et al., 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: Tectonostratigraphy, Age and Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 675-690. https://doi.org/10.1016/s1367-9120(00) 00039-0
- Wang, X. Q., 2012. Global Geochemical Baselines : Understanding the Past and Predicting the Future. *Earth Science Forntiers*, 19 (3): 7-18(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., 2015. China Geochemical Baselines: Sampling Methodology. Journal of Geochemical Exploration, 148 (1): 25–39. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.05.018
- Wang, X.Q., Zhou, J., Xu, S.F., et al., 2016. China Soil Geochemical Baselines Networks: Data Characteristics. Geology in China, 43 (5): 1469-1480(in Chinese with English abstract).
- Xie, X., 1979. Regional Geochemical Exploration. Field Method of Regional Geological Survey, 4. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Xie, X., 2002. Exploration Geochemistry: Retrospect and Prospect. *Geology and Prospecting*, 38 (6): 1-9.
- Xie, X., Liu, D., 2006. Geochemical Mapping and Geochemical Exploration. geological Review, 52 (6): 721-732(in Chinese with English abstract).
- Xie, X., Ren, T.X., Xi, X.H., et al., 2009. The Implementation of the Regional Geochemistry-National Reconnaissance Program (RGNR) in China in the Past Thirty Years. *Acta Geologica Sinica*, 30(6): 700-716(in Chinese with English abstract).
- Yin, F.G., Pan, G.T., Wang, F., et al., 2006. Tectonic Facies along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Orogenic Belt in Southwestern China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(4): 33-39.https://doi.org/10.1007/s11442 -006-0415-5
- Zaw, K., Meffre, S., Lai, C.K., et al., 2014a. Tectonics and Metallogeny of Mainland Southeast Asia: A Review and Contribution. *Gondwana Research*, 26 (1): 5-30.https:// doi.org/10.1016/j.gr.2013.10.010
- Zaw, K., Santosh, M., Graham, I.T., 2014b. Tectonics and Metallogeny of Mainland SE Asia: Preface. Gondwana Research, 26 (1): 1-4. https://doi. org/10.1016/j. gr.2014.01.005
- Zeng, Q.G., Wang, B.D., Mao, G.Z., et al., 2020. Suture Zones in Tibetan and Tethys Evolution. *Earth Science*, 45 (8): 2735-2763(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Bai, J.F., Wang, Y., 2012. Analytical Scheme and Quality Monitoring System for China Geochemical Baselines. *Earth Science Forntiers*, 19 (3): 33-42(in Chinese

with English abstract).

- Zhao, Y.P., He, G.P., Lu, J.H., 2013. Geological Characteristics and Metallogenic Model of Typical Gold Deposits in Laos. *Mineral Resources and Geology*, 27 (S1): 47-52 (in Chinese).
- Zhao, Y. P., Mo, J. P., Wang, X. M., 2015. Clues for Prospecting and Metallogenic Prognosis of Pangkuam Cu-Au Deposit in Laos. *Mineral Resources and Geology*, 29 (2): 178-188(in Chinese with English abstract).
- Zhu, H.P., Lin, F.C., Shi, M.F., et al., 2016. Analysis of the Output Environment, Mineralization Potential and Direction of Mineralization Search in Important Mining Areas in the East Tethys Region, Chengdu Geological Survey Center, Chengdu(in Chinese).
- Zhu, Y.J., Wu, J., Hu, J.J., et al., 2009. Introduction for Geology and Mineral Resources in Laos. Yunnan Science and Technology Publishing House, Kunming(in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 成杭新,李括,李敏,等,2014.中国城市土壤化学元素的背景 值与基准值.地学前缘,21(3):265-306.
- 迟清华, 鄢明才, 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册. 北 京:地质出版社.
- 邓军,杨立强,王长明,2010.三江特提斯复合造山与成矿作 用研究进展.岩石学报,27(9):37-42.
- 黄丰,许继峰,王保弟,等,2020.印度-亚洲大陆碰撞过程中 新特提斯洋岩石圈的命运.地球科学,45(8):2785-2804.
- 贾润幸,方维萱,隗雪燕,2014.老挝地质矿产资源及开发概况.矿产勘查,5(5):826-833.
- 李兴振,江新胜,孙志明,等,2002.西南三江地区碰撞造山过 程.北京:地质出版社.
- 林方成,施美凤,李兴振,2010.三江一湄公河成矿带地质背景和成 矿规律对比研究专题成果报告.成都:成都地质调查中心.
- 刘汉粮, 聂兰仕, 王学求, 等, 2020. 中蒙边界地区汇水域沉积物 69 种元素的背景值. 地学前缘, 27(3): 202-221.
- 刘俊来,唐渊,宋志杰,等,2011. 滇西哀牢山构造带:结构与 演化.吉林大学学报(地球科学版),41(5):1285-1303.
- 刘书生, 杨永飞, 郭林楠, 等, 2018. 东南亚大地构造特征与成 矿作用. 中国地质, 45(5): 7-33.
- 刘英俊,曹励明,李兆麟,等,1984.元素地球化学.北京科学出版社.
- 卢映祥,刘洪光,黄静宁,等,2009.东南亚中南半岛成矿带初 步划分与区域成矿特征.地质通报,28(2):314-325.
- 牛英杰, 胡金才, 李孝红, 2013. 老挝琅勃拉邦省帕奔金矿地 球化学特征. 地质调查与研究, 36(2): 92-99.
- 潘桂棠,郝国杰,冯艳芳,等,2009.中国大地构造单元划分. 中国地质,36(1):1-28.

- 任天祥,李明喜,徐耀先,等,1983. 高寒山区表生作用地球化 学特征及区域化探方法的初步研究. 地质论评,29(5): 428-438.
- 施美凤,林方成,李兴振,等,2011.东南亚中南半岛与中国西南邻 区地层分区及沉积演化历史.中国地质,38(5):1244-1256.
- 施美凤,林方成,刘朝基,等,2013.东南亚缅泰老越柬五国与 中国邻区成矿带划分及成矿特征.沉积与特提斯地质, 33(2):103-112.
- 史长义,1994.研究微量元素区域分散与富集规律的新方法. 物探与化探,18(3):219-227.
- 史长义,梁萌,冯斌,2016.中国水系沉积物39种元素系列背 景值.地球科学,41(2):234-251.
- 王宏,林方成,李兴振,等,2015.老挝及邻区构造单元划分与 构造演化.中国地质,42(1):71-84.
- 王玮,王学求,张必敏,等,2020a.老挝全国地球化学填图与 成矿远景区预测.地球学报,41(1):80-90.
- 王玮,王学求,张必敏,等,2020b.老挝铜地球化学背景与异常特征.地球学报,41(6):125-131.
- 王玮,周建,王学求,等,2019.老挝国家尺度地球化学填图进 展——以氟元素为例.桂林理工大学学报,39(2):335-340.
- 王学求,2012.全球地球化学基准:了解过去,预测未来.地学 前缘,19(3):7-18.
- 王学求,周建,徐善法,等,2016.全国地球化学基准网建立与 土壤地球化学基准值特征.中国地质,43(5):1469-1480.
- 谢学锦,1979. 区域化探. 区域地质调查野外工作方法. 北京: 地质出版社,4.
- 谢学锦,2002. 勘查地球化学:发展史·现状·展望. 地质与勘探, 38(6):1-9.
- 谢学锦,刘大文,2006.地球化学填图与地球化学勘查.地质 论评,52(6):721-732.
- 谢学锦,任天祥,奚小环,等,2009.中国区域化探全国扫面计 划卅年.地球学报,30(6):700-716.
- 张勤,白金峰, 王烨, 2012. 地壳全元素配套分析方案及分析 质量监控系统. 地学前缘, 19(3): 33-42.
- 赵延朋,何国朝,陆家海,2013.老挝典型金矿床地质特征及 成矿模式.矿产与地质,27(S1):47-52.
- 赵延朋,莫江平,王晓曼,2015.老挝班康姆铜金矿床找矿标 志及成矿预测研究.矿产与地质,29(2):178-188.
- 朱华平,林方成,施美凤,等,2016.东特提斯地区重要矿区产 出环境、成矿潜力和找矿方向分析成果报告.成都:成都 地质调查中心.
- 曾庆高, 王保弟, 毛国正, 等, 2020. 西藏的缝合带与特提斯演化. 地球科学, 45(8): 2735-2763.
- 朱延浙,吴军,胡建军,等,2009.老挝地质矿产概论.昆明:云 南科技出版社.