

文章编号: 1000-4734(2016)03-0329-14

花岗斑岩-玄武岩热液蚀变体系研究: 以澜沧老厂锰银铅锌铜钼矿床为例

王静¹, 甘甜^{2,3*}, 杨金彪⁴, 石增龙⁵, 范云飞^{2,3}, 罗泰义³

(1. 西南能矿建设工程有限公司, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 怀柔 100049; 3. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 4. 云南澜沧铅矿有限公司, 云南 澜沧 665601; 5. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 655011)

摘要: 花岗斑岩侵入玄武岩中形成相应的铜钼矿化是三江成矿带的特色之一, 三江南段的澜沧老厂多金属矿床的花岗斑岩隐伏侵入石炭系玄武质火山岩中, 花岗斑岩-玄武岩热液蚀变体系得以完整保存。在确立初始岩石端元的基础上, 对花岗斑岩顶盖相的去钠化蚀变及玄武质围岩夕卡岩化过程的元素地球化学进行了初步研究, 主要结论包括: (1) 花岗斑岩驱动的热液体系以富含 Na-Ca-Si-Mn 为特征, Na-Ca-Si 主要来自花岗斑岩中的斜长石分解蚀变, 在花岗斑岩顶盖相中形成极度的 Na 亏损和极高的 K₂O/Na₂O 比值(去钠化蚀变); Si 在花岗斑岩顶盖相中弱富集, Si-Ca 在玄武质围岩夕卡岩化过程中明显富集 (w(SiO₂)平均增加了 4%~5%, w(CaO)平均增加了 5%左右), 目前在蚀变体系中没有发现 Na 的明显富集, 推测 Na 可能被热液搬运进入地表径流系统; Mn 是特征蚀变元素, 可能来自深部花岗斑岩, 在花岗斑岩顶盖相及玄武质围岩中都得到明显富集(平均富集 0.4~1.2 倍)。

(2) 矿化元素中 Mo 主要来自花岗斑岩, 在斑岩顶部及玄武质围岩中富集, 局部成矿; Sn-Zn 主要来自花岗斑岩, 但目前没有在花岗斑岩内外接触带发现矿化; Ag-Pb-Bi 的主要物源是玄武岩, 在斑岩顶部富集, 在更远端的碳酸盐岩地层中成矿; Cu 也主要来自玄武岩, 在玄武岩夕卡岩化过程中局部成矿。(3) 稀土元素在花岗斑岩的蚀变过程主要表现为活化迁移亏损, 在活化过程中 Eu 发生了比较明显的分异 (δEu 0.85~1.32); 玄武岩夕卡岩化过程中, 热液流体携带的稀土元素在橄榄玄武岩中基本收支平衡, 但在拉斑玄武岩中明显富集, 并以显示弱的正 Eu 异常为特征。

关键词: 花岗斑岩; 去钠化蚀变; 玄武岩夕卡岩化; 喜山期花岗斑岩; 澜沧老厂

中图分类号: P595; P611; P618.4

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.03.003

作者简介: 王静, 女, 1979 年生, 硕士研究生, 地质工程专业. E-mail: 1019385645@qq.com

Preliminary Research on Hydrothermal Alternation System Between Granitic Porphyry and Basalt: Exemplified by Laochang Mn-Ag-Pb-Zn-Cu-Mo ore Deposit, Lancang Area, Yunnan Province, China

WANG Jing¹, GAN Tian^{2,3*}, YANG Jin-biao⁴, SHI Zeng-long⁵, FAN Yun-fei^{2,3}, LUO Tai-yi³

(1. Construction Engineering Co. Ltd., Southwest Energy & Mine Group, Guiyang 550002, China; 2. School of the Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The state Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 4. Yunnan Lancang Lead Mine Co. Ltd., Lancang 665601, China; 5. Yunnan ChiHong Zn & Ge Co. Ltd., Qujing 655011, China)

Abstract: Cu-Mo mineralization caused by granitic porphyry invading into basalt formation is one of distinctive metallogenesis located in Sanjiang metallogenic belt. The hydrothermal alternation system has been completely preserved in Laochang polymetallic deposit (Lancang Area, Yunnan Province, the southern end of Sanjiang belt,

收稿日期: 2016-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41072054; 41530210), 国家 973 项目 (编号: 2015CB452603).

* 通讯作者, E-mail: gantian@mail.gyig.ac.cn

China), in which Carboniferous basaltic rocks have been invaded by deep concealed granitic porphyry. Based on determining the initial end-member rocks, element geochemistry research has been focused on desodiuating alteration in upper part of granitic porphyry and skarnization in basaltic wall rocks. Some results have been concluded. (1) The hydrothermal fluid in the upper part of granitic porphyry is enriched with Na-Ca-Si-Mn which is mostly from plagioclase decomposed alteration, characterized with extremely depleted Na and high K_2O/Na_2O rate (Desodiuating). Till now no Na-enriched alteration has been found, we speculated that the element Na should be transferred into the runoff system. There is about 1%—2% SiO_2 enriched in the upper part of granitic porphyry, however, there are obviously enriched Si and Ca in basaltic wall rock during skarnization (SiO_2 average increment is about 4% to 5% and CaO average increment is about 5%). The characteristic Mn sourced from deep granite has most enriched 0.4—1.2 times in the upper part of granitic porphyry and basaltic wall rocks. (2) Elements Mo-Sn-Zn are mainly from granitic porphyry. Mo is enriched in the upper part of porphyry and adjacent basaltic wall rocks and extensively low ore-grade Mo mineralization has been confirmed, however, no Sn-Zn mineralization in contact zone of granitic porphyry has been found at present. Elements Ag-Pb-Bi-Cu mainly come from basalt. Cu is enriched in basaltic wall rocks and locally low ore-grade mineralization has been proved. Ag-Pb-Bi are enriched in the upper part of granitic porphyry and Ag-Bi-enriched galena veins have been explored in carbonate formation overlain upon Carboniferous basalt. (3) The rare-earth elements (REE) are totally depleted due to be activated and transported during the hydrothermal alternation in granite porphyry. Obviously differentiate has been observed in the element Eu (δEu : 0.85—1.32) during the process of activation. The REE is balance of gain and loss in skarnization of olivine basalt but obvious enrichment in skarnization of tholeiite combining with slightly positive Eu anomaly.

Keywords: hydrothermal alteration system; desodiuating alteration; basalt skarnization; Himalayan granitic porphyry; Laochang, Lancang, Yunnan

滇西澜沧老厂铅矿是三江成矿带南段最重要的代表性矿床, 具有悠久的开采历史^[1], 为火山喷流沉积叠加喜山期岩浆热液改造的多因复成矿床^[2,3]。明清时期主要开采石炭系火山岩之上碳酸盐岩地层中赋存的富银方铅矿脉, 建国后直到上世纪九十年代主要开采前人遗留的铅渣^[1], 随后开始对原生硫化矿进行找矿勘探, 本世纪初开展的危机矿山找矿, 在深部发现了厚大的低品位铜钼矿体, 最终确证了澜沧老厂是具有多级垂直分带模式的多金属矿床: 地表氧化带为锰银, 碳酸盐岩中为铅银, 火山岩中为铅锌铜硫, 深部夕卡岩带和花岗斑岩中为铜钼^[2]。澜沧老厂多金属矿床具有保存完整的成矿及蚀变分带模式, 是解剖相关岩浆热液成矿体系的典型矿床。

相关年代学研究表明, 老厂深部隐伏花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 44.6 ± 1.1 Ma^[4,5], 与三江成矿带中北段的玉龙斑岩 (41.3 ± 0.2 Ma)^[6] 及纳日贡玛花岗斑岩 ($41 \sim 44$ Ma)^[7,8] 具有相近的年龄, 暗示三江成矿带在大致的时限内发生了一系列成因机制相似的岩浆活动。进一步对比表明, 该时期花岗斑岩在北段和南段都侵入到不同时代的玄武岩中, 形成了独特的花岗斑岩-玄武岩热液蚀变体系, 矿化以夕卡岩型铜矿加斑岩型钼矿为特征。北段的纳日贡玛黑云母花岗斑岩侵入于二叠系开心岭群玄武岩中, 斑岩出露面积约 0.7 km²; 南段澜沧老厂花岗斑岩基

本为隐伏产出, 侵入于下石炭统依柳组玄武质火山岩中, 花岗斑岩-玄武岩的热液蚀变及成矿体系得以完整保存。花岗斑岩-玄武岩蚀变体系中元素的活化迁移特征对于剖析成矿物质来源及成矿系列的空间展布都具有重要意义, 但相关的研究还比较薄弱, 本次研究拟以详细取样的澜沧老厂 ZK14830 为重点, 对花岗斑岩侵入玄武岩中的热液蚀变体系及矿化特征进行元素地球化学解剖。

1 地质概况及样品采取

1.1 地质概况

澜沧裂谷属于三江特提斯成矿带昌宁—孟连晚古生代大陆边缘裂谷系的南段, 南北长达 100 km, 东西宽约 20~40 km。澜沧裂谷自泥盆世开始拉张沉陷, 至早石炭世, 裂谷拉张引发大规模中基性岩浆喷溢作用, 形成下石炭统依柳组火山岩; 中晚石炭世至早二叠世, 裂谷处于平静的稳定沉降时期, 沉积了一套巨厚的碳酸盐岩建造; 晚二叠世开始, 裂谷受海西-印支运动的挤压逐渐封闭; 中生代中晚期, 裂谷再次扩张, 但沉降规模较小, 形成较厚层的红色碎屑岩建造, 不整合覆盖于上古生界地层之上; 燕山运动该裂谷再次因挤压而封闭, 喜山早期青藏高原的碰撞造山作用诱发中酸性岩浆侵入^[9]。

老厂矿区位于澜沧裂谷中北部, 北端邻近黑河大断裂, 南东方向距澜沧县城约 30 km, 属澜沧县竹塘乡, 澜沧—西盟公路省道 S315 线从矿区北侧经过。老厂矿区主要出露泥盆系、石炭系、二叠系和第四系地层, 泥盆系地层为一套碎屑岩夹硅质岩建造, 在矿区内呈现为飞来峰构造; 下石炭统为一套基性-中性的火山-沉积岩系, 受澜沧裂谷和火山喷发中心控制; 中上石炭统一下二叠统为一套连续沉积的碳酸盐岩建造, 为矿区出露的主要地层; 第

四系主要为残坡积红壤, 是红土型银锰矿床的赋矿层位^[10]。

老厂矿区的花岗斑岩主要赋存在深部, 隐伏侵入到依柳组地层中, 到目前为止, 矿区共有 7 个钻孔揭露到花岗斑岩(ZK15006, ZK15007, ZK15106, ZK153101, ZK14827, ZK14830, ZK15501), 具体位置见老厂隐伏花岗斑岩等深线图(图 1); 花岗斑岩等深线呈北西向, 隐伏斑岩的顶界集中在 147—155 勘探线之间, 总体显示西高东低的特征。

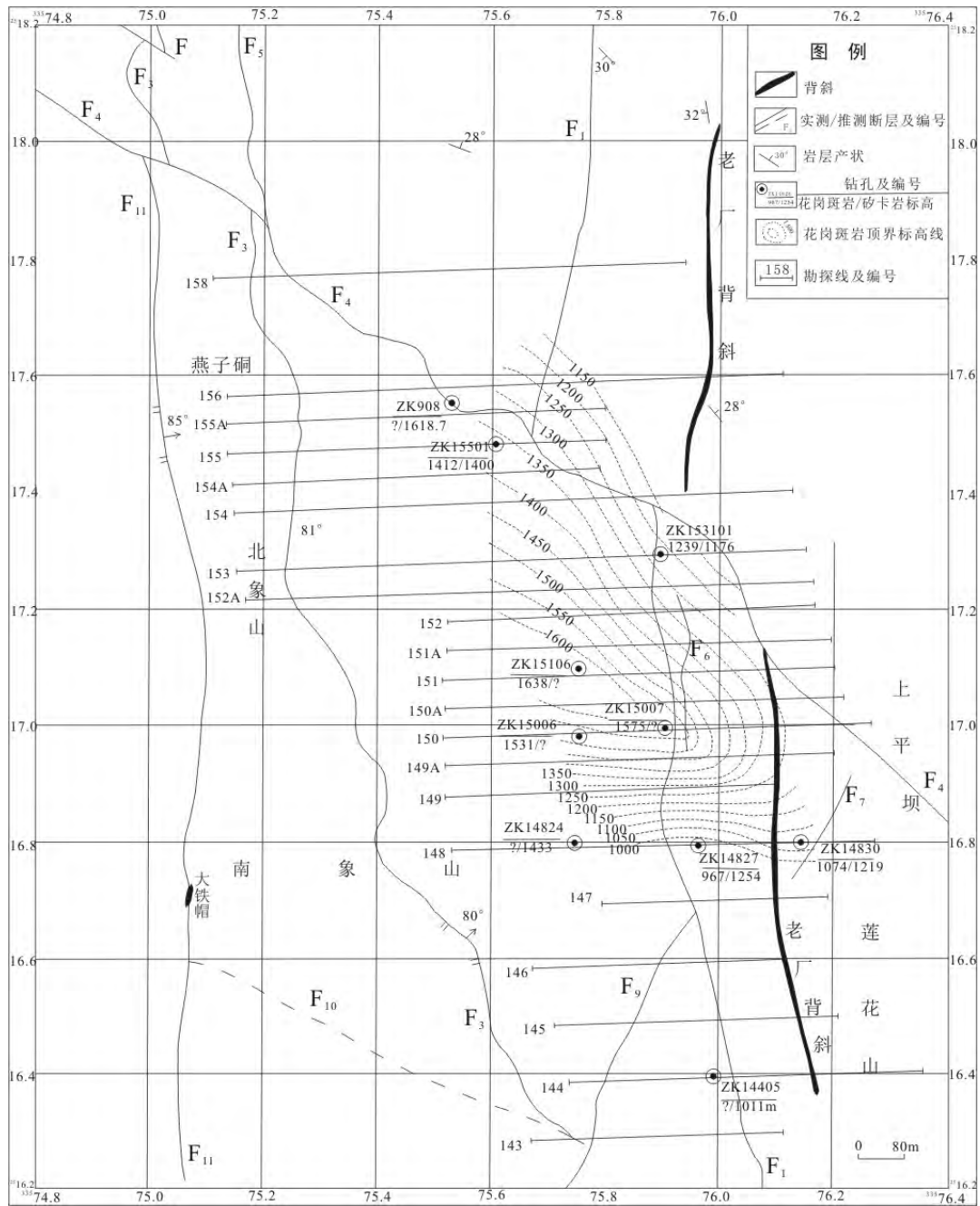


图 1 澜沧老厂矿区隐伏花岗斑岩等深线图及钻孔分布图

Fig. 1. Isobathic and drilling distributing diagrams for concealed granitic porphyry in Laochang deposit, Lancang Area, Yunnan Province, China.

1.2 取样及分析

ZK14830 在 670~1074 m 标高(孔深 780~1184 m) 揭露了厚度近 400 m 的岩枝, 在 598~363 m 标高(孔深 1256~1490 m) 揭示有 200 多米厚的主岩体; 钼矿化体总厚度 869 m (孔深 622~1491 m, 相邻的 ZK14827 的钼矿化岩芯总长约 850 m), 其中 $w(\text{Mo}) \geq 0.03\%$ 的矿体厚度为 379 m, $w(\text{Mo}) \geq 0.06\%$ 工业矿体厚度为 126 m, 工业矿体的平均品位为 0.08%。在对该钻孔进行编录的同时, 重点对花岗斑岩岩枝及其接触部位的夕卡岩进行了重点取样, 相关取样情况见图 2。

对所有样品进行了主量和微量元素分析, 对典型样品进行了切片观察。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱熔融法(ME-XRF26d), 精度为 0.01%; 微量元素分析采用四级杆型电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICP-MS), 重复性测试的相对标准偏差(RSD)

绝大多数优于 10%。所有分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。本次分析数据及收集的相关数据综合列于表 1。

2 分析结果及讨论

2.1 花岗斑岩蚀变过程的元素地球化学

2.1.1 弱蚀变花岗斑岩的厘定

成矿过程是巨量热液流体对花岗斑岩及围岩不断进行改造的结果, 为了更精确揭示热液蚀变过程中的元素变化, 我们需要对澜沧老厂成矿区域的典型岩石的原始特征进行一定限定。澜沧老厂矿区目前钻探揭露的花岗斑岩大部分属于岩浆房的顶盖相, 经历了强烈的蚀变交代, 以前分析的样品普遍具有极高的 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 比值^[11, 12], 主要体现在岩石中 Na_2O 的极度亏损, 从元素地球化学研究的

层位	孔深 (m)	柱状图 (顶板)	取样位置	岩性描述
$C_1^2\beta$	890.8-894.0	+		灰夹浅紫红色砂卡岩
$\gamma \pi_6^1$	894.0-913.2	+		黑夹灰白色花岗岩
$C_1^2\beta$	913.2-923.9	+		灰绿夹浅红色砂卡岩
$\gamma \pi_6^1$	923.9-929.0	+		黑夹灰白色花岗岩
$C_1^2\beta$	929.0-939.6	+		灰绿色砂卡岩
	939.6-942.9	+		灰、灰白色花岗岩
$C_1^2\beta$	942.9-947.0	+		灰绿色透辉石砂卡岩
$\gamma \pi_6^1$	947.0-955.9	+		灰白色花岗岩
$C_1^2\beta$	955.9-958.4	+		黑灰、灰绿色砂卡岩
	958.4-1039.7	+		灰白色花岗岩, 花岗结构、斑状结构
$C_1^2\beta$	1039.7-1061.2	+		灰-黑绿色夹浅红色透辉石、石榴子石砂卡岩
$C_1^2\beta$	1061.2-1070.3	+		灰白色花岗岩, 斑状结构, 透辉石砂卡岩致密块状构造
$C_1^2\beta$	1070.3-1079.1	+		黑绿色透辉石砂卡岩致密块状构造
$\gamma \pi_6^1$	1079.1-1082.1	+		灰白色花岗岩
$C_1^2\beta$	1082.1-1098.9	+		绿、灰绿色透辉石石榴子石砂卡岩, 致密块状构造
$C_1^2\beta$	1098.9-1135.3	+		绿、灰绿色透辉石石榴子石砂卡岩, 致密块状构造
$\gamma \pi_6^1$	1135.3-1138.0	+		灰白色花岗岩
	1138.0-1217.1	+		灰黑色砂卡岩
	1138.0-1217.1	+		灰白色花岗岩斑状结构

层位	孔深 (m)	柱状图 (底板)	取样位置	岩性描述
	1138.0-1217.1	+		黑绿色石榴石/透辉石砂卡岩
$C_1^2\beta$	1217.1-1221.9	+		灰白色花岗岩
$C_1^2\beta$	1221.9-1232.6	+		灰黑色砂卡岩
$\gamma \pi_6^1$	1232.6-1236.0	+		灰白色花岗岩
$C_1^2\beta$	1236.0-1241.6	+		灰黑色砂卡岩
$\gamma \pi_6^1$	1241.6-1242.6	+		浅灰、灰白色花岗岩
$C_1^2\beta$	1242.6-1257.2	+		深灰绿色砂卡岩
	1257.2-1439.5	+		灰白色花岗岩, 块状构造
$C_1^2\beta$	1439.5-1464.2	+		灰绿色石榴子石透辉石砂卡岩
	1464.2-1468.7	+		灰绿、浅灰色透辉石砂卡岩
$C_1^2\beta$	1468.7-1472.6	+		浅灰-浅粉红色黑云母花岗岩
$\gamma \pi_6^1$	1472.6-1476.0	+		灰绿、灰色透辉石砂卡岩
$C_1^2\beta$	1476.0-1479.8	+		黄白色, 略带粉红色花岗岩
$\gamma \pi_6^1$	1479.8-1490.9	+		灰绿、灰色透辉石砂卡岩

图 2 ZK14830 下部柱状图及取样位置分布图 (样品编号中-后的数值代表样品所在孔深, 单位: m)

Fig. 2. The columnar section and sampling location diagram for the lower part of ZK14830 in Laochang deposit, Lancang Area.

角度, 建议将这种蚀变定名为去钠化蚀变。148 勘探线的钻孔揭露了厚度达 400 m 的岩枝, 在深部主岩体中也有近 200 m 的岩心, 钻孔 14830 中部分样品 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 接近 3%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 比值接近 2, 这些样品主要分布在岩枝的中部, 代表了相对新鲜或弱蚀变的花岗斑岩。

将 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 高于 2.3% 并且没有明显成矿元素异常 (Mo-Cu-Pb-Zn-Ag) 的 5 个样品作为弱蚀变花岗

斑岩的代表样品, 将该组样品的平均值作为相对新鲜的花岗斑岩的标准值 (老厂弱蚀变花岗斑岩平均)。从图 3 中可以看出, 5 个弱蚀变斑岩的特征微量元素具有相似的配分模式, 总体上具有右倾特征, 强不相容元素中明显亏损 Cs-Rb 和 Nb-Ta, 暗示了岩浆起源的熔融过程中石榴子石和金红石的残留; 高钾含量, 高的 $w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O})$ 含量, Sr-Yb 分类图解 (图略) 中落入低 Yb 高 Sr 区域, 表明老厂

表 1 澜沧老厂矿区花岗斑岩及玄武质夕卡岩主量元素、微量元素含量表

Table 1. Major element and trace element contents in granitic porphyry and basaltic skarn from Laochang deposit, Lancang

样 品	$w_B/\%$											$w(\text{K}_2\text{O})/$	
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	$w(\text{Na}_2\text{O})$
花岗斑岩													
ZK14830-1365	70.18	0.25	14.47	1.14	0.01	0.58	2.13	3.01	6.01	0.08	2.07	100.15	2.00
ZK14830-1330	69.24	0.33	14.15	1.49	0.02	0.77	1.83	2.94	6.20	0.09	1.49	98.70	2.11
ZK14830-1361	71.77	0.26	13.29	1.12	0.01	0.59	2.05	2.74	5.57	0.09	1.44	99.11	2.03
ZK14830-1297	71.48	0.29	13.55	0.90	0.01	0.48	1.82	2.63	6.06	0.08	1.80	99.26	2.30
ZK14830-0945	70.34	0.26	14.37	1.04	0.01	0.58	1.96	2.36	6.22	0.08	2.58	99.99	2.64
老厂弱蚀变花岗斑岩平均(5) ^①	70.60	0.28	13.97	1.14	0.01	0.60	1.96	2.74	6.01	0.08	1.88	99.44	2.20
ZK14830-1272	68.14	0.35	13.66	0.75	0.02	0.49	2.93	1.07	7.49	0.12	3.93	99.14	7.00
ZK14830-1060	69.16	0.26	14.03	1.04	0.02	0.35	2.22	0.99	8.10	0.08	3.03	99.47	8.18
ZK14830-1314	70.66	0.27	13.81	1.15	0.01	0.62	1.74	2.16	7.03	0.08	1.81	99.57	3.25
ZK14830-0948	71.10	0.28	12.59	0.79	0.13	0.75	2.27	0.42	7.52	0.09	3.26	99.40	17.90
ZK14830-1489	72.00	0.24	13.19	0.93	0.01	0.54	1.81	2.17	6.50	0.07	2.41	100.15	3.00
ZK14830-0953-B	72.33	0.19	12.44	0.79	0.03	0.51	1.81	1.35	7.23	0.06	2.11	99.10	5.36
ZK14830-0939-2B	72.50	0.28	11.94	0.56	0.01	0.50	2.10	1.40	6.90	0.09	2.68	99.12	4.93
ZK14830-1479	72.58	0.22	12.41	1.00	0.01	0.48	1.56	1.21	7.26	0.06	2.54	99.49	6.00
ZK14830-1407	73.06	0.27	14.16	0.46	0.01	0.32	1.25	0.30	5.73	0.08	3.55	99.32	19.10
ZK14830-1437	73.29	0.29	11.37	1.06	0.01	0.71	1.90	1.84	6.00	0.09	1.99	98.72	3.26
ZK14830-1062	73.33	0.19	11.21	1.39	0.03	0.39	2.04	0.32	7.18	0.06	2.91	99.19	22.44
ZK14830-1428-A	73.53	0.26	14.46	1.34	0.01	0.72	0.67	0.03	2.66	0.08	4.95	98.74	88.67
ZK14830-1065	74.90	0.19	10.18	1.17	0.03	0.46	2.26	0.66	6.20	0.06	2.42	98.66	9.39
ZK14830-1428-B	75.62	0.25	13.53	1.10	0.01	0.81	0.63	0.04	2.49	0.08	4.74	99.42	62.25
ZK14830-1280	78.03	0.18	10.04	0.25	0.01	0.34	1.37	0.82	6.62	0.06	1.87	99.76	8.07
深部花岗斑岩平均(26) ^②	72.01	0.26	13.01	1.08	0.03	0.57	1.86	1.58	6.18	0.08	2.61	99.40	3.92
浅部花岗斑岩平均(12) ^③	73.62	0.21	11.56	1.14	0.05	0.60	1.33	0.29	7.06	0.07	2.72	98.79	24.03
橄榄玄武质夕卡岩													
ZK14830-1056	37.39	2.60	11.50	11.86	0.28	5.24	23.10	0.53	1.39	0.49	1.91	96.45	2.62
ZK14830-1058	38.24	2.02	9.68	10.78	0.27	6.91	20.65	0.71	1.58	0.21	2.53	93.72	2.23
ZK14830-1049	40.76	2.58	12.44	12.11	0.22	10.61	15.16	1.49	1.50	0.60	1.67	99.31	1.01
ZK14830-1441	40.82	2.30	7.60	15.85	0.26	9.46	16.21	1.08	1.90	0.50	2.41	98.50	1.76
ZK14830-1448	41.97	2.01	10.89	9.94	0.19	8.34	15.82	1.01	2.70	0.57	2.69	96.28	2.67
ZK14830-1471	44.12	3.51	15.61	7.63	0.16	5.34	15.19	2.13	1.99	0.80	2.27	98.86	0.93
ZK14830-1439	44.68	2.38	8.27	13.53	0.32	6.45	17.81	1.41	1.48	0.52	2.19	99.14	1.05
老厂橄榄玄武质夕卡岩平均(7)	41.14	2.49	10.86	11.67	0.24	7.48	17.71	1.19	1.79	0.53	2.24	97.47	1.50
老厂橄榄玄武岩平均(12) ^④	37.46	3.54	12.75	11.77	0.17	8.86	12.76	1.17	2.40	0.90	8.27	100.05	2.05
拉斑玄武质夕卡岩													
ZK14830-0939-1	45.29	1.76	13.06	7.05	0.24	8.07	16.40	1.49	2.14	0.58	2.35	98.49	1.44
ZK14830-0953-X	50.34	1.97	14.07	6.17	0.27	4.19	8.10	1.67	6.23	0.81	4.47	98.41	3.73
ZK14830-1478	56.33	2.56	16.30	3.72	0.06	3.18	6.37	3.33	4.75	0.80	2.30	99.82	1.43
老厂拉斑玄武质夕卡岩平均(3)	50.65	2.10	14.48	5.65	0.19	5.15	10.29	2.16	4.37	0.73	3.04	98.91	2.02
老厂拉斑玄武岩平均(3) ^⑤	45.81	3.40	16.20	10.81	0.09	8.86	5.04	2.50	3.02	0.81	3.47	100.00	1.21

续表 1

样品	$w_B/10^{-6}$												
	Ag	Ba	Bi	Cd	Ce	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Ga	Gd
花岗斑岩													
ZK14830-1365	0.20	1260	0.08	0.10	67.30	8.07	5.76	13.19	1.91	0.97	1.00	18.40	2.94
ZK14830-1330	0.21	820	0.25	0.07	70.50	10.80	5.82	8.07	2.53	1.39	0.94	18.50	3.51
ZK14830-1361	0.27	999	0.11	0.12	93.30	8.19	4.90	32.11	1.90	0.95	1.00	16.70	3.27
ZK14830-1297	0.19	1000	0.11	0.07	50.50	8.54	5.19	11.71	1.84	1.01	0.90	16.00	2.75
ZK14830-0945	0.40	1240	0.26	0.27	53.30	10.20	9.57	9.72	2.00	1.12	1.02	17.50	2.85
老厂弱蚀变花岗斑岩平均(5) ^①	0.25	1064	0.16	0.13	66.98	9.16	6.25	14.96	2.04	1.09	0.97	17.42	3.06
ZK14830-1272	0.23	1280	0.12	0.14	66.50	17.00	7.47	7.45	2.39	1.29	1.14	16.80	3.57
ZK14830-1060	0.89	1420	0.78	0.46	50.30	8.34	7.40	86.77	1.71	0.91	0.89	18.00	2.61
ZK14830-1314	0.73	1350	1.88	0.27	52.60	8.21	4.97	36.36	1.72	0.95	0.87	17.10	2.45
ZK14830-0948	0.72	1220	2.26	0.58	55.40	10.40	8.73	9.46	1.95	1.10	1.01	15.90	2.91
ZK14830-1489	0.31	1020	1.11	0.34	56.20	8.80	4.53	24.64	2.05	1.10	0.77	17.70	2.87
ZK14830-0953-B	0.62	1530	2.20	0.83	39.10	8.07	7.08	7.54	1.73	0.89	0.75	14.80	2.36
ZK14830-0939-2B	0.48	1020	0.32	0.89	48.50	13.50	6.45	17.01	1.88	1.04	0.90	15.10	2.80
ZK14830-1479	1.39	1180	5.46	0.88	47.80	7.43	3.31	52.84	1.58	0.91	0.75	16.50	2.35
ZK14830-1407	0.23	1120	0.08	0.16	58.70	7.78	4.68	6.69	2.06	1.11	0.82	17.20	2.69
ZK14830-1437	0.37	1070	0.68	0.36	51.10	9.25	4.41	35.75	1.63	0.81	0.94	16.10	2.18
ZK14830-1062	3.43	1140	1.05	2.03	35.90	7.25	3.91	259.45	1.27	0.70	0.72	15.60	1.85
ZK14830-1428-A	2.17	304	2.20	0.30	59.10	8.16	15.70	19.00	2.02	1.09	0.89	18.00	2.60
ZK14830-1065	11.50	948	15.70	1.86	31.20	6.82	3.76	288.95	1.24	0.68	0.60	13.50	1.79
ZK14830-1428-B	1.37	1090	14.80	1.02	58.00	7.08	8.46	13.71	2.15	1.16	0.90	16.90	2.95
ZK14830-1280	0.19	1340	0.42	0.21	38.10	9.22	3.12	8.05	1.49	0.77	0.72	13.50	2.10
深部花岗斑岩平均(26) ^②	1.30	1086	2.30	0.55	53.22	9.80	6.19	44.67	1.89	0.98	0.88	16.49	2.69
浅部花岗斑岩平均(12) ^③	2.66	862	8.98		44.32	10.00	5.74	159.31	1.61	0.82	0.68	16.55	2.36
拉斑玄武质夕卡岩													
ZK14830-1056	1.35	378	0.20	0.59	108.00	482.00	6.26	39.13	6.04	2.96	2.99	17.10	8.28
ZK14830-1058	1.12	224	0.33	0.36	66.80	361.00	7.04	125.82	4.67	2.38	2.25	16.10	5.90
ZK14830-1049	1.13	87	0.28	0.26	76.90	475.00	1.72	72.02	5.32	2.51	2.54	19.20	6.70
ZK14830-1441	0.88	185	0.48	0.87	84.10	343.00	2.15	115.41	4.04	1.77	2.60	22.30	5.78
ZK14830-1448	0.85	185	0.19	0.53	79.10	500.00	4.89	287.21	5.17	2.54	2.67	18.00	7.09
ZK14830-1471	1.25	209	0.36	0.32	110.00	153.00	3.82	223.87	7.23	3.50	3.79	25.60	10.28
ZK14830-1439	1.08	145	0.26	0.71	100.00	334.00	5.69	486.79	4.47	1.92	2.73	20.70	6.63
老厂橄榄玄武质夕卡岩平均(7)	1.09	202	0.30	0.52	89.27	378.29	4.51	192.89	5.28	2.51	2.80	19.86	7.24
老厂橄榄玄武岩平均(12) ^④	0.90	120	1.08	0.46	92.51	353.08	12.25	78.64	5.83	2.52	3.19	18.76	8.55
拉斑玄武质夕卡岩													
ZK14830-0939-1	1.85	150	0.13	0.4	129	16.7	9.91	27.51	8.2	4.28	4.05	21.7	11.01
ZK14830-0953-X	2.3	785	0.32	0.64	146	8.56	15.9	118.01	9.92	4.83	5.37	22.3	14.28
ZK14830-1478	4.03	665	7.83	1.62	135	12.3	5.22	146.64	8.76	4.29	4.44	23.7	11.63
老厂拉斑玄武质夕卡岩平均(3)	2.73	533	2.76	0.89	136.67	12.52	10.34	97.39	8.96	4.47	4.62	22.57	12.31
老厂拉斑玄武岩平均(3) ^⑤	0.76	120	3.54	0.14	117.97	105.17	12.1	128.93	7.85	3.62	3.59	23.03	10.58
样 品	$w_B/10^{-6}$												
	Ge	Hf	Ho	La	Li	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Pr	Rb
花岗斑岩													
ZK14830-1365	1.41	3.32	0.35	35.40	11.04	0.13	8.46	6.05	24.40	4.97	31.80	7.26	107
ZK14830-1330	1.51	2.86	0.52	37.00	10.79	0.17	43.40	9.34	26.20	5.83	35.90	7.45	101
ZK14830-1361	1.47	2.89	0.34	49.80	10.37	0.12	3.07	5.64	33.40	5.52	25.10	9.78	95
ZK14830-1297	1.45	2.90	0.37	25.50	13.02	0.14	13.60	6.31	19.30	4.54	24.00	5.27	102
ZK14830-0945	1.84	4.07	0.36	28.90	7.38	0.17	31.30	6.51	21.20	6.55	29.30	5.82	122
老厂弱蚀变花岗斑岩平均(5) ^①	1.54	3.21	0.39	35.32	10.52	0.15	19.97	6.77	24.90	5.48	29.22	7.12	105
ZK14830-1272	1.72	3.53	0.46	32.70	8.90	0.17	45.40	7.36	25.70	9.23	19.70	7.20	129
ZK14830-1060	1.83	3.32	0.32	25.60	7.00	0.14	167.00	6.08	18.70	6.84	33.10	5.28	160
ZK14830-1314	1.53	2.71	0.32	27.10	7.11	0.11	146.00	6.01	19.20	5.33	56.50	5.51	126
ZK14830-0948	1.96	3.18	0.38	27.30	10.22	0.14	108.00	6.49	21.60	8.37	71.50	5.98	178

续表 1

样 品	$w_B/10^{-6}$														
	Ge	Hf	Ho	La	Li	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Pr	Rb		
ZK14830-1489	1.63	2.85	0.37	29.00	8.98	0.14	136.00	6.63	20.70	5.19	34.30	5.88	123		
ZK14830-0953-B	1.84	2.22	0.31	18.70	6.06	0.15	38.40	4.25	15.00	7.59	43.30	4.29	139		
ZK14830-0939-2B	2.07	3.47	0.36	25.50	5.34	0.15	834.00	5.98	20.40	8.54	15.60	5.39	127		
ZK14830-1479	1.53	2.92	0.30	24.20	9.60	0.11	2.43	5.74	18.00	4.98	93.40	5.04	140		
ZK14830-1407	1.40	3.22	0.40	29.80	13.24	0.16	103.00	5.85	21.60	5.23	31.60	6.22	105		
ZK14830-1437	1.60	2.92	0.30	24.80	17.11	0.11	21.40	5.47	19.20	9.67	28.60	5.39	110		
ZK14830-1062	1.97	2.37	0.25	17.70	6.82	0.10	1140.00	4.64	12.90	6.12	37.60	3.73	163		
ZK14830-1428-A	1.08	2.97	0.39	30.40	27.48	0.15	81.40	7.49	22.40	4.92	61.80	6.31	128		
ZK14830-1065	1.92	2.11	0.25	15.20	7.52	0.10	527.00	3.93	12.00	5.55	1210.00	3.25	135		
ZK14830-1428-B	1.38	2.92	0.40	29.40	30.90	0.15	30.30	6.33	21.50	4.73	228.00	6.11	136		
ZK14830-1280	1.57	1.98	0.28	17.80	5.88	0.10	85.70	4.30	14.40	5.93	20.10	4.11	125		
深部花岗斑岩平均(26) ^②	1.64	3.05	0.35	27.42	11.24	0.13	187.95	6.06	20.63	6.44	122.81	5.86	122		
浅部花岗斑岩平均(12) ^③		3.09	0.30	22.50		0.11	397.92	5.48	15.79	5.00	148.92	4.63	207		
拉斑玄武质夕卡岩															
ZK14830-1056	2.70	4.91	1.11	62.90	10.99	0.34	318.00	49.13	47.70	194.23	2.41	12.80	46		
ZK14830-1058	2.58	3.86	0.89	29.40	28.58	0.30	32.90	36.93	30.60	188.08	5.70	7.62	63		
ZK14830-1049	2.44	4.51	0.98	38.00	7.85	0.30	11.90	43.34	35.00	272.45	2.94	9.01	33		
ZK14830-1441	9.24	3.08	0.73	42.90	19.64	0.19	15.10	37.11	35.70	156.44	17.10	9.31	61		
ZK14830-1448	3.15	3.54	0.93	44.60	34.76	0.26	256.00	37.56	41.20	137.98	3.28	10.20	133		
ZK14830-1471	2.61	5.37	1.33	56.10	26.71	0.36	51.90	52.86	54.10	48.69	5.85	13.40	99		
ZK14830-1439	7.05	3.30	0.75	54.90	16.00	0.20	85.40	37.73	42.20	228.51	5.21	11.10	45		
老厂橄榄玄武质夕卡岩平均(7)	4.25	4.08	0.96	46.97	20.65	0.28	110.17	42.10	40.93	175.20	6.07	10.49	69		
老厂橄榄玄武岩平均(12) ^④	2.11	4.84	1.02	43.08	14.64	0.26	1.59	53.59	46.54	137.90	40.33	11.04	15		
拉斑玄武质夕卡岩															
ZK14830-0939-1	3.22	8.34	1.53	69.80	20.75	0.48	10.30	75.20	64.70	19.16	3.38	16.40	101		
ZK14830-0953-X	2.98	8.71	1.87	74.00	26.60	0.58	418.00	74.31	80.80	18.37	15.40	20.00	196		
ZK14830-1478	2.41	8.84	1.61	68.90	27.81	0.44	91.40	78.14	69.50	10.99	220.00	17.50	142		
老厂拉斑玄武质夕卡岩平均(3)	2.87	8.63	1.67	70.90	25.05	0.50	173.23	75.89	71.67	16.17	79.59	17.97	146		
老厂拉斑玄武岩平均(3) ^⑤	1.91	7.32	1.43	55.93	11.08	0.39	1.68	66.93	55.87	53.23	9.56	13.67	19		
样 品	Sc	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tl	Tm	U	V	Y	Yb	Zn	Zr
花岗斑岩															
ZK14830-1365	6.70	3.96	3.19	816	0.57	0.42	13.00	0.52	0.14	3.62	19.60	10.00	0.93	29.1	114
ZK14830-1330	6.98	4.45	2.34	682	0.98	0.53	14.70	0.44	0.20	5.50	29.60	14.50	1.23	38.1	90
ZK14830-1361	6.20	4.69	2.97	747	0.50	0.45	12.40	0.40	0.14	2.48	20.50	9.94	0.81	32.5	98
ZK14830-1297	4.80	3.38	2.17	534	0.70	0.40	12.10	0.43	0.14	3.41	23.50	10.40	0.84	22.1	101
ZK14830-0945	7.04	3.69	2.26	492	0.66	0.41	11.30	0.79	0.19	3.73	18.80	10.20	0.96	39.7	126
老厂弱蚀变花岗斑岩平均(5) ^①	6.34	4.03	2.59	654	0.68	0.44	12.70	0.52	0.16	3.75	22.40	11.01	0.96	32.3	106
ZK14830-1272	5.39	4.38	3.05	609	0.64	0.49	10.90	0.81	0.17	3.75	33.10	13.50	1.14	20.6	124
ZK14830-1060	6.42	3.29	4.05	426	0.60	0.36	10.80	1.11	0.15	3.26	20.80	9.61	0.83	52.7	112
ZK14830-1314	4.69	3.25	3.27	770	0.59	0.37	12.40	0.68	0.13	4.05	20.90	9.85	0.82	37.5	91
ZK14830-0948	4.73	3.87	3.35	594	0.61	0.42	10.60	1.46	0.15	5.28	22.00	10.60	0.95	76.0	110
ZK14830-1489	6.11	3.44	4.14	1390	0.69	0.42	11.90	0.59	0.14	3.90	17.70	11.20	0.95	50.3	99
ZK14830-0953-B	3.11	3.02	2.48	622	0.66	0.36	10.60	0.92	0.14	2.90	18.00	9.77	0.81	161.0	71
ZK14830-0939-2B	6.10	3.50	2.52	498	0.58	0.41	9.93	0.73	0.17	3.14	19.00	8.93	0.92	23.5	109
ZK14830-1479	6.33	3.10	5.25	389	0.47	0.35	13.40	0.79	0.11	3.68	15.00	9.12	0.71	135.0	96
ZK14830-1407	3.99	3.72	2.61	245	0.54	0.42	13.00	0.56	0.17	3.36	19.90	10.80	1.01	28.3	113
ZK14830-1437	5.20	3.02	4.07	640	0.41	0.34	8.88	0.51	0.13	2.54	25.00	8.40	0.74	57.0	109
ZK14830-1062	3.83	2.42	7.23	303	0.48	0.27	8.54	1.07	0.10	2.23	15.10	7.11	0.62	135.0	80
ZK14830-1428-A	3.65	3.84	4.24	67	0.79	0.41	11.70	5.50	0.15	4.67	22.50	11.10	0.94	29.3	102
ZK14830-1065	3.47	2.09	4.32	412	0.44	0.26	8.66	0.99	0.11	2.29	13.90	7.18	0.56	170.0	75
ZK14830-1428-B	3.79	3.73	6.07	65	0.78	0.45	11.70	1.53	0.17	4.00	19.90	12.30	1.06	145.0	99
ZK14830-1280	2.35	2.67	2.19	399	0.43	0.29	7.96	0.65	0.11	2.87	11.80	8.22	0.65	26.4	67
深部花岗斑岩平均(26) ^②	5.04	3.52	3.79	526	0.62	0.39	11.21	1.02	0.15	3.48	20.99	10.07	0.89	77.4	101
浅部花岗斑岩平均(12) ^③	3.58	2.69	7.69	303	0.62	0.33	10.46	0.96	0.12	2.99	21.77	8.64	0.74	100.3	106

续表 1

样品	$w_B/10^{-6}$															
	Sc	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tl	Tm	U	V	Y	Yb	Zn	Zr	
拉斑玄武质夕卡岩																
ZK14830-1056	26.9	8.35	9.07	249	3.12	1.18	4.33	0.18	0.40	1.91	196	29.5	2.28	104	204	
ZK14830-1058	23.0	6.30	9.59	363	2.37	0.91	3.06	0.35	0.35	1.83	170	20.7	1.89	99	169	
ZK14830-1049	27.6	7.28	4.92	585	2.83	1.05	3.62	0.19	0.35	1.55	262	25.0	1.97	194	186	
ZK14830-1441	17.7	6.58	36.61	296	2.22	0.86	3.15	0.25	0.24	2.02	174	18.1	1.36	180	133	
ZK14830-1448	22.0	7.69	14.43	543	2.47	1.07	3.43	0.55	0.32	1.25	139	26.4	1.84	132	149	
ZK14830-1471	21.8	11.00	13.11	567	3.75	1.50	5.33	0.42	0.43	2.26	242	33.0	2.51	105	219	
ZK14830-1439	18.0	7.60	26.93	359	2.32	0.93	3.57	0.23	0.25	2.73	190	19.5	1.45	121	130	
老厂橄榄玄武质夕卡岩平均(7)	22.4	7.83	16.38	423	2.73	1.07	3.78	0.31	0.33	1.94	196	24.6	1.90	134	170	
老厂橄榄玄武岩平均(12) ^④	25.2	9.22	7.23	388	2.91	1.12	5.07	1.55	0.31	1.88	299	25.1	1.86	171	240	
拉斑玄武质夕卡岩																
ZK14830-0939-1	6.63	12.2	8.55	421	5.43	1.65	7.66	0.51	0.56	2.52	99	36.4	3.24	97.5	351	
ZK14830-0953-X	10.60	16.0	9.51	414	5.20	2.08	8.34	1.41	0.66	2.41	111	45.8	3.76	84.7	366	
ZK14830-1478	12.40	12.8	13.03	440	5.55	1.73	9.38	0.72	0.58	3.10	133	41.6	3.24	237	378	
老厂拉斑玄武质夕卡岩平均(3)	9.88	13.7	10.36	425	5.39	1.82	8.46	0.88	0.60	2.68	114	41.3	3.41	139.73	365	
老厂拉斑玄武岩平均(3) ^⑤	18.23	11.2	6.93	286	3.75	1.45	7.31	1.94	0.46	1.95	263	35.1	2.87	93.47	372	

注：①前面 5 个弱蚀变斑岩样品的平均；②包含杨帆（2014）论文中 ZK14827 中的 6 个样品；③龙汉生（2008）论文中 12 个数据平均；④陈颢（2008）论文中 12 个数据平均；⑤陈颢（2008）论文中 3 个数据平均；表中的空白是因为所引用文献中该数据没有列出。

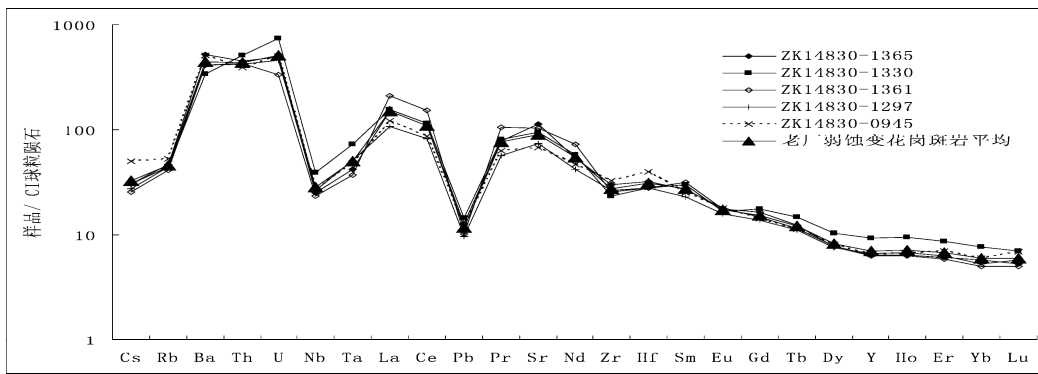


图 3 老厂弱蚀变花岗斑岩的微量元素蛛网图(CI 球粒陨石数据引自 McDonough & Sun, 1995, 下同)

Fig. 3. Spider diagram for CI-chondrite normalized trace elements of weakly altered granite porphyry in Laochang deposit (CI chondrite meteorites data come from McDonough & Sun, 1995, same as below).

弱蚀变花岗斑岩具有高钾埃达克岩的性质^[13,14]，这一特征和三江成矿带中段的玉龙斑岩及北段的纳日贡玛斑岩^[15]相似。

2.1.2 花岗斑岩蚀变过程中的主量元素地球化学

以老厂弱蚀变花岗斑岩平均值作为标准值，ZK153101（13 个数据^[12]）、ZK14827（6 个数据^[16]）和 ZK14830（20 个数据，本次研究）中花岗斑岩的主量元素的配分图如图 4。从图中可以看出，花岗斑岩蚀变最特征的是钠的活化迁移，有近 50% 的样品中钠迁移超过 75%，同时钙也主要表现为迁移，但亏损程度较低，结合相关的岩矿鉴定表明，老厂花岗斑岩的蚀变过程中最重要的矿物变化是斜长石分解并形成白云母或绢云母化，其中钠很快被迁移而形成钠的亏损。铁表现为均衡的涨落，可能代表

斑岩中黑云母的白云母化，同时伴随不均一的黄铁矿化；锰主要表现为富集，而且浅部的花岗斑岩

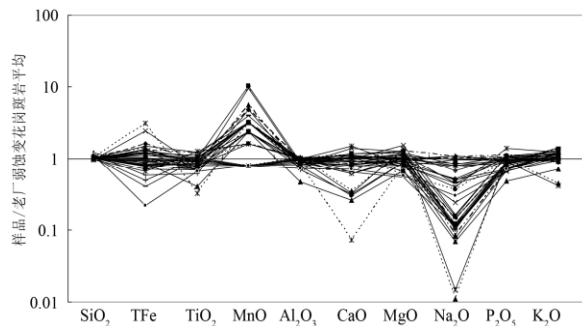


图 4 ZK14827、ZK14830、ZK15310 花岗斑岩样品的主量元素配分图

Fig. 4. Major elements distribution patterns for ZK14827, ZK14830, ZK15310 samples.

(ZK153101) 中锰富集程度明显高于深部的花岗斑岩, 在后面的火山岩夕卡岩化过程的解剖中锰也明显富集, 这些特征表明锰主要来自更深部的花岗斑岩, 热液蚀变过程中从深部向上部及围岩中迁移。

我们收集的钻孔数据中, ZK15310 的花岗斑岩样品的钻孔深度在 649~690 m 左右, 代表了花岗斑岩在较高标高位置的就位, ZK15310 花岗斑岩主要元素 Na 普遍亏损, $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 值基本恒定于 20 左右(平均 24.0), 表明岩石中广泛发生了去钠化蚀变。ZK14827 和 ZK14830 的花岗斑岩出现孔深都接近 1000 m, 取样深度都在 1000~1400 m 左右, 代表了花岗斑岩在较深标高位置的就位, ZK14827 和 ZK14830 的花岗斑岩中约有 30% 的弱蚀变样品的 $w(Na_2O)$ 大于 2% 以上, $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 相对恒定在 2 左右(平均 3.9), 但总体变化范围很大, 最高可达 80 左右, 表明了相应去钠化蚀变的不均一。为了更直观体现从深部 (ZK14827 +ZK14830) 到浅部 (ZK153101) 花岗斑岩蚀变过程元素的变化, 给出了不同孔深花岗斑岩的主量元素的平均值蛛网图 (图 5)。斑岩中 SiO_2 含量的基数高, 在蚀变过程

体现为略微增加 (石英网脉化), 从花岗斑岩的深部到浅部, 硅化逐渐增强, $w(SiO_2)$ 平均从 72.01% 增加到 73.62%, 增加 1.61%。最突出的是 MnO 的富集和 Na_2O 的亏损, 从深部到浅部, $w(MnO)$ 平均从 0.027% 上升到 0.048%, 增加约一倍, $w(Na_2O)$ 平均从 1.58% 锐减至 0.29%, 亏损约 80%, 去钠化蚀变强烈, 并伴随 CaO 的一定亏损, $w(CaO)$ 从 1.86% 递减至 1.33%, 平均亏损 0.53%。可以对比的是, K_2O 从深部到浅部略微增加, $w(K_2O)$ 从 6.18% 增加到 7.06%, K、Na 在花岗斑岩顶盖相蚀变过程中发生了明显的分异, 在浅部斑岩中形成极高的 $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 比值。

2.1.3 花岗斑岩蚀变过程中的微量元素地球化学

一般岩石学中微量元素的蛛网图是根据元素的相容性进行编排, 为了更好地反应成矿信息, 我们按照地壳中元素地球化学分异指数排序^[17], 结合老厂矿区特征的成矿元素组合 (Pb-Bi-Sn-Mo-Ag-Zn-Cu), 编排了反应花岗斑岩热液蚀变过程中元素活化迁移的多元素蛛网图。

热液蚀变过程的微量元素蛛网图 (图 6) 清晰反应了浅部花岗斑岩 (ZK153101) 在蚀变过程中的元素变化: Pb-Bi-Mo-Ag-Zn-Cu 都表现为突出的富集峰, 即主要表现为沉淀富集, Sn 中等富集; 大离子亲石元素 Rb 略微富集, Sr 略微亏损, Ba 基本持平。深部花岗斑岩蚀变过程 (图 7) 的元素变化规律为: Pb-Bi-Mo-Ag-Zn-Cu 依然表现为突出的富集峰, 但同时 Pb-Bi-Mo-Cu 也具备一定的亏损谷, 表现为弱的双锥模式, 代表了在 1000~1400 m 孔深, 花岗斑岩蚀变过程中成矿元素的活化迁移与沉淀成矿交织, 但以沉淀成矿为主, Sn-Zn 具有中等富集, 也具有弱的双锥模式; Sr 总体持平, 个别样品明显亏损, Rb-Ba 整体变化不明显。

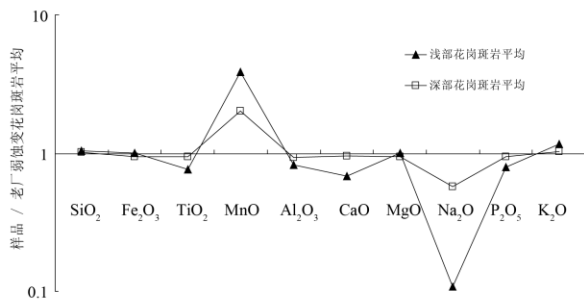


图 5 老厂矿区深部花岗斑岩与浅部花岗斑岩的主量元素平均值配分图

Fig. 5. Major elements mean value distribution patterns for deep and shallow granitic porphyry in Laocang deposit.

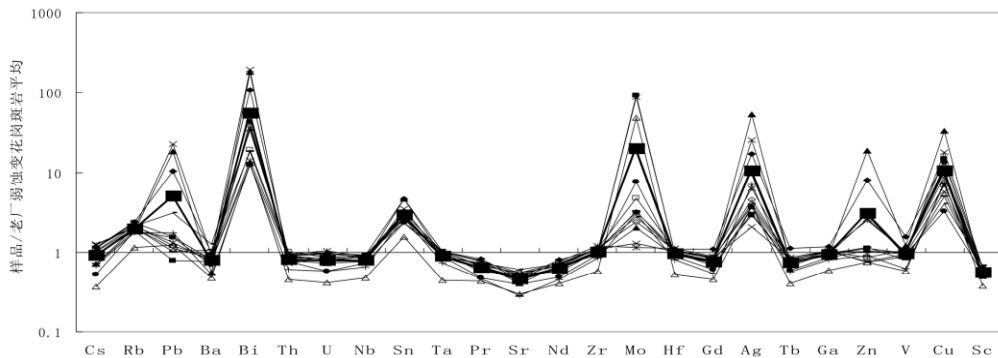


图 6 浅部花岗斑岩矿化蚀变踪的微量元素配分图 (粗实线为平均值)

Fig. 6. Mineralized trace elements distribution patterns for shallow granite porphyry. The heavy line is mean value.

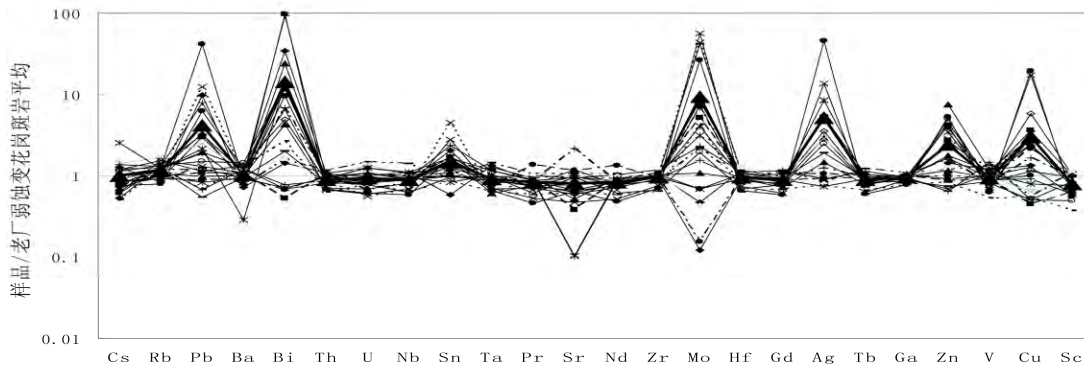


图 7 深部花岗斑岩矿化蚀变追踪的微量元素配分图 (粗实线为平均值)

Fig. 7. Mineralized trace elements distribution patterns for deep granite porphyry. The heavy line is mean value.

2.1.4 花岗斑岩蚀变过程中的稀土元素地球化学

代表不同深度的花岗斑岩蚀变过程中稀土元素的配分模式如图 8。浅部 (ZK153101) 花岗斑岩样品为水平分布模式, 整体上稀土元素在蚀变过程中有一定的活化迁移, 与弱蚀变花岗斑岩平均值 ($\Sigma\text{REE}=147.60\times 10^{-6}$) 相比, 表现为稀土总量亏损约 35% (平均 $\Sigma\text{REE}=97.01\times 10^{-6}$), 在此过程中稀土元素分异很小: δCe 基本无异常 (1.01~1.05), 平均 1.03; δEu 有明显波动 (0.85~1.22), 平均为 0.97。深部 (ZK14830) 花岗斑岩样品的模式同样为水平分布模式, 与弱蚀变花岗斑岩平均值相比, 整体上稀土元素在蚀变过程中亏损约 20% (平均 $\Sigma\text{REE}=119.00\times 10^{-6}$), 在此过程中稀土元素分异不明显: δCe 基本无异常 (0.97~1.05), 平均 1.02; δEu 分异较为明显 (0.86~1.32), 平均为 1.04。

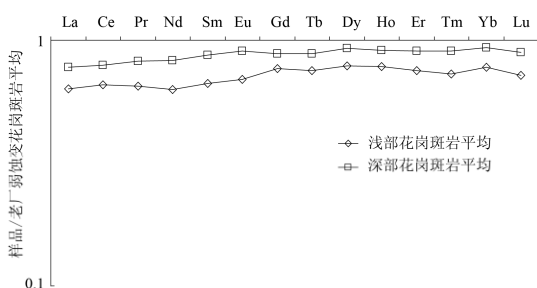


图 8 老厂深部、浅部花岗斑岩矿化蚀变过程的稀土元素配分图

Fig. 8. REE patterns for deep and shallow granite porphyry during the process of mineralized alteration in Laochang deposit.

总体上不同深度的花岗斑岩在蚀变过程中稀土元素主要表现为活化迁移亏损, 活化的稀土元素进入热液体系中。在活化过程中稀土元素分异不明显, 但 Eu 表现出一定的分异 ($\delta\text{Eu}=0.85\sim 1.32$), 可能与热液体系的温度变化有关。

2.2 玄武岩夕卡岩化的元素地球化学

2.2.1 弱蚀变玄武岩的厘定

澜沧裂谷体系在早石炭世中基性火山活动发育, 火山岩类型多样, 老厂矿区的依柳组主要由火山熔岩和火山碎屑岩组成, 其中玄武岩约占熔岩的 90% 以上^[18], 是后期侵入的花岗斑岩的主要围岩。陈冕^[19]在澜沧老厂不同标高坑道采集了不少新鲜火山岩样品, 我们在排除矿化元素异常的基础上, 结合岩矿特征及不同岩石类型的元素规律, 初步厘定了澜沧矿区内玄武岩的两种主要岩石类型标准。

橄榄玄武岩是澜沧石炭系火山岩中的最主要类型, 基本特征是高钛高铬中等锆钨 (12 个样品平均: $w(\text{TiO}_2)=3.54\%$, $w(\text{Cr})=353\times 10^{-6}$, $w(\text{Zr})=240\times 10^{-6}$, $w(\text{Nb})=53\times 10^{-6}$); 拉斑玄武岩是石炭系火山岩中的重要类型, 基本特征是高钛中铬高锆钨 (3 个样品平均: $w(\text{TiO}_2)=3.40\%$, $w(\text{Cr})=105\times 10^{-6}$, $w(\text{Zr})=373\times 10^{-6}$, $w(\text{Nb})=67\times 10^{-6}$)。2 种岩石类型平均值的微量元素蛛网图如图 9, 都表现为相似的具有强烈 Rb-Pb 亏损和中等 Sr 亏损的右倾模式, 两种岩石类型的特征不相容元素 Nb-Ta-Zr-Hf 等具有大致平行分布的特点, 暗示了二者同源演化的特征。根据上述 Ti-Cr-Zr-Nb 的基本规律, ZK14830 大致可以鉴定出二种对应的夕卡岩, 下面分述蚀变过程中不同玄武岩的元素变化特征。

2.2.2 玄武岩蚀变过程中的主量元素地球化学

橄榄玄武质夕卡岩有 7 件样品, 平均含 $w(\text{TiO}_2)$ 2.49%, $w(\text{Cr})=378\times 10^{-6}$, $w(\text{Zr})=170\times 10^{-6}$, $w(\text{Nb})=42\times 10^{-6}$, 与橄榄玄武岩的平均值接近, 相应的微量元素蛛网图 (图略) 中除 Cs-Rb-Pb 强烈变化外二者具有基本相似的配分模式, 表明在热液夕卡岩化过程中, 大部分微量元素的相对稳定。以老厂橄榄玄武

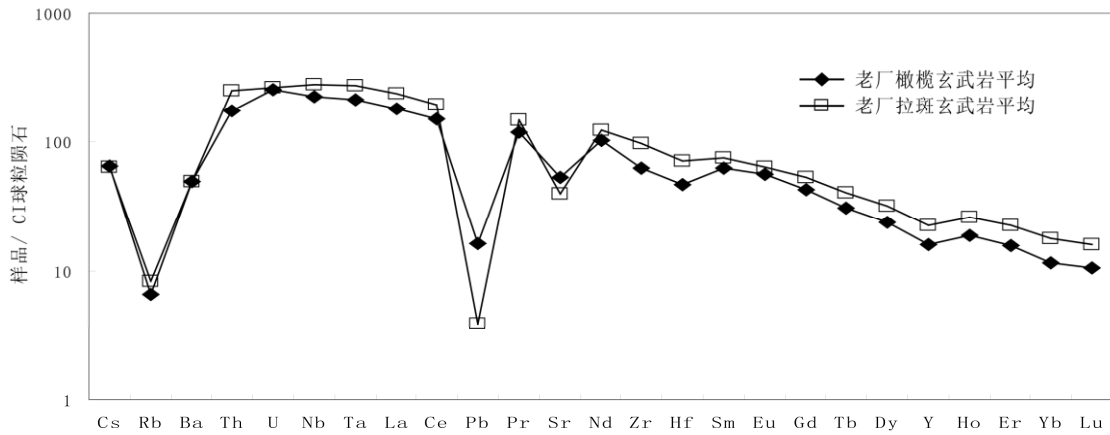


图 9 老厂弱蚀变的两种玄武岩平均的微量元素蛛网图

Fig. 9. CI-chondrite normalized trace elements spider diagram for weekly altered two types of basalt in Laochang deposit.

岩平均值为标准的蚀变过程主量元素蛛网图 (图 10) 主要表现为 SiO_2 弱富集 (基数高变化不明显), $w(\text{SiO}_2)$ 平均增长 3.68%, CaO 明显富集, $w(\text{CaO})$ 平均增加了 4.95% (从 12.76% 增加到 17.71%), MnO 中等富集 ($w(\text{MnO})$ 从 0.17% 递增至 0.24%), Al_2O_3 和 TiO_2 表现为弱的亏损, P_2O_5 表现为比较明显的亏损, Na_2O 和 Fe_2O_3 表现为亏损与富集交织在一起。

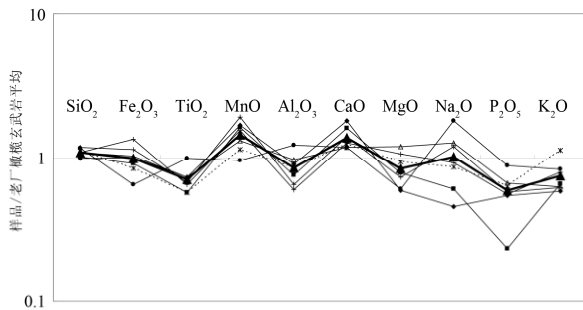


图 10 老厂橄榄玄武岩夕卡岩化过程的主量元素蛛网图 (粗实线为平均值)

Fig. 10. Major elements spider diagram showing the process of olivine basalt skarnization. The heavy line is mean value.

本次分析的 ZK14830 夕卡岩中有三件样品属于拉斑玄武质夕卡岩, 平均含 $w(\text{TiO}_2)$:2.10%, $w(\text{Cr})=13 \times 10^{-6}$, $w(\text{Zr})=365 \times 10^{-6}$, $w(\text{Nb})=76 \times 10^{-6}$, 与弱蚀变拉斑玄武岩相比较, Cr 亏损严重, 但 Zr-Nb-Ti 稳定。相应的主量元素蛛网图如图 11, 拉斑玄武岩在蚀变过程中主要表现为 SiO_2 弱富集, $w(\text{SiO}_2)$ 平均增长 4.84%, CaO 明显富集, $w(\text{CaO})$ 平均增加了 5.25%, MnO 一定富集, $w(\text{MnO})$ 平均增加了 0.10%, $\text{TFeO-TiO}_2\text{-MgO}$ 弱亏损, $\text{K}_2\text{O-Na}_2\text{O}$ 涨落大致均衡。

花岗斑岩是富硅富碱的酸性岩浆, 围岩主体是

贫硅富铁镁的玄武岩, 玄武岩夕卡岩化蚀变过程中大量物质发生了交换。 SiO_2 在所有玄武岩中都体现为弱的富集 (基数较大), 与相应岩石类型的平均值相比较仅仅增长 4%~5% 左右, 由于围岩总体贫硅, 在夕卡岩化过程由花岗斑岩蚀变带来的 SiO_2 被围岩玄武岩强烈吸收, 很难形成硅饱和的矿物如石英, 这可能是老厂矿区在花岗斑岩上覆地层中很难发现石英脉的原因之一。 Mn 是贯穿老厂整个成矿体系不同分带的特征元素, 地表的锰矿化是找矿的重要指标; 玄武岩中锰主要表现为富集, 在花岗斑岩蚀变过程中锰也主要表现为富集, 但具有弱的双锥分布, 表明蚀变中锰可能来自更深部的花岗斑岩, 也暗示了锰在今后的勘探中可以作为一个指示花岗斑岩蚀变分带的标型元素。钙的富集在夕卡岩中表现为透辉石+石榴石的大量出现, 可能与花岗斑岩中去钠化伴随的钙向围岩中的迁移, 但当斑岩侵入大规模热液体系建立后, 不排除天水循环中将上覆碳酸盐岩地层中的钙带入火山岩中的可能。花岗斑岩的蚀变主要表现为去钠化, 同时玄武岩中大量基

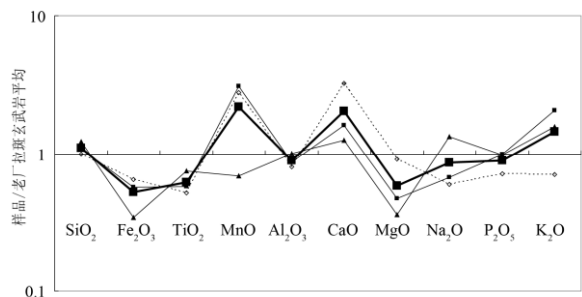


图 11 老厂拉斑玄武岩夕卡岩化过程的主量元素蛛网图 (粗实线为平均值)

Fig. 11. Major elements spider diagram showing the process of tholeiite skarnization. The heavy line is mean value.

性斜长石的透辉石透闪石化也将释放一定的钠,大部分的钠进入热液被搬运迁移。铁表现为亏损与富集的交织,代表了玄武岩中富铁镁矿物的蚀变,同时伴随不均一的黄铁矿化。铝和钛在玄武质夕卡岩中主要表现为弱的亏损,可能与夕卡岩化蚀变过程中含水矿物如透闪石、绢云母等的形成导致岩石比重的降低有关。磷表现为比较明显的亏损,在蚀变中进入流体迁移,但还缺乏系统的跟踪研究。

2.2.3 玄武岩蚀变过程中的微量元素地球化学

蚀变过程的微量元素蛛网图揭示了不同类型的玄武岩在热液夕卡岩化过程中的元素变化。橄榄玄武质夕卡岩(图 12)表现为:成矿元素 Mo 强烈富集, Sn-Cu 为中等富集, Pb-Bi 强烈亏损,大离子亲石元素 Rb-Ba 中等富集。拉斑玄武质夕卡岩(图 13)表现为:成矿元素 Mo 强烈富集, Pb-Ag 中等富集,但 Pb 具有双锥模式, Bi 亏损为主, Cu 弱亏损, Rb-Ba 中等富集。

所有玄武质围岩都表现出 Mo 的强烈富集,花岗斑岩中 Mo 也主要表现为富集模式,但具有一定亏损的双锥模式,表明花岗斑岩是矿区 Mo 最主要的来源,花岗斑岩中具弱亏损的双锥模式也揭示了深部还具有一定的成矿潜力。所有玄武质围岩都表现出 Pb-Bi 不同程度亏损的倾向,正好与花岗斑岩中 Pb-Bi 的明显富集对应,表明玄武岩是热液体系中 Pb-Bi 的主要来源;在夕卡岩化过程中 Ag 与 Pb-Bi 发生了分离, Ag 主要表现为持平到中等富集的趋势,鉴于 Ag-Pb-Bi 的地球化学亲和性,可以认为 Ag-Pb-Bi 的主要来源都是玄武岩。Cu 在橄榄玄武质夕卡岩中富集并表现为弱的双锥模式,在拉斑玄武质夕卡岩中弱亏损,兼之目前铜矿化主要发现在玄武质夕卡岩中,综合表明了玄武岩是老厂成矿体系中铜的重要物源;这一结论表明老厂花岗斑岩是斑岩型钼矿体系,铜矿化主要是因为玄武质围岩中铜的高背景,这一现象与同期三江成矿带北段的纳日贡玛相似^[20]。Sn-Zn 在玄武岩中主要表现为持平

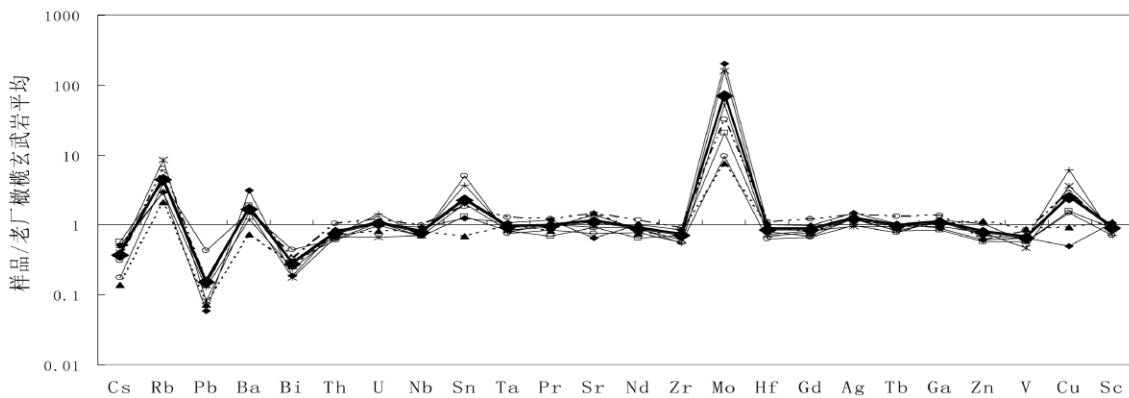


图 12 老厂橄榄玄武岩夕卡岩化过程的微量元素蛛网图(粗实线为平均值)

Fig. 12. Trace elements spider diagram showing the process of olivine basalt skarnization. The heavy line is mean value.

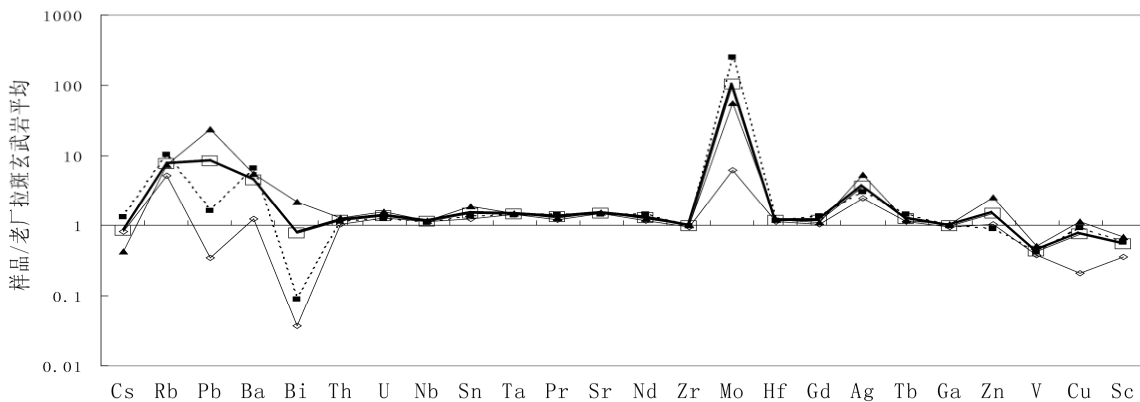


图 13 老厂拉斑玄武岩夕卡岩化过程的微量元素蛛网图(粗实线为平均值)

Fig. 13. Trace elements spider diagram showing the process of tholeiite skarnization. The heavy line is mean value.

到弱的富集, 几乎没有亏损, 但在花岗斑岩主要表现为中等富集并具有弱的双锥模式, 表明 Sn-Zn 物源主要来自花岗斑岩。所有玄武岩中 Rb-Ba 都表现出明显富集的趋势, 结合花岗斑岩强烈的去钠化和火山岩中普遍钙的增加, 以及花岗斑岩的高 Rb-Ba 背景 (老厂弱蚀变花岗斑岩平均 $w(\text{Rb})=105.38 \times 10^{-6}$, $w(\text{Ba})=1063.80 \times 10^{-6}$), 推测花岗斑岩热液交代过程中带出的 Rb-Ba 导致了火山岩围岩中 Rb-Ba 的普遍富集, Rb-Ba 组合可用于矿区的找矿填图。

2.2.4 玄武岩蚀变过程中的稀土元素地球化学

2 种主要类型玄武岩在蚀变过程中稀土元素的变化配分图分别示于见图 14 和图 15。橄榄玄武质夕卡岩稀土元素为水平配分模式, 稀土总量基本无变化 (平均亏损约 10×10^{-6}), 蚀变过程中稀土元素分异不明显: δCe 0.87~1.05, 平均 0.95; δEu 0.99~1.17, 平均为 1.03; 拉斑玄武质夕卡岩稀土元素总体为弱富集, 水平配分模式, 平均的稀土总量相对老厂拉斑玄武岩平均值富集 14%~33%, 平均 22%,

平均富集稀土总量达 62×10^{-6} , 蚀变过程中稀土元素分异略有变化: δCe 0.89~0.91, 平均 0.88; δEu 1.06~1.10, 普遍显示弱的正异常, 平均为 1.08。

虽然样品数量较少, 但根据目前数据可大致判断, 在玄武岩主体蚀变过程中, 通过流体携带的稀土元素在橄榄玄武岩中基本收支平衡, 在拉斑玄武岩中基本上以沉淀富集为主, 拉斑玄武岩是热液携带稀土元素的重要捕获载体。

3 结论

老厂矿区富硅富碱花岗斑岩侵入以玄武岩为主体的火山岩围岩中, 岩浆驱动富硅富碱热液在斑岩顶盖相及贫硅玄武岩围岩中进行了强烈而广泛的交代蚀变。在有限的分析数据基础上, 首先确定了主要的初始岩石单元标准, 进而通过对比, 确定了热液蚀变过程中主要的元素变化特征, 获得如下初步结论:

(1) 花岗斑岩控制的热液体系, 主体成分以富 Si-Na-Ca-Mn 为特征。热液中 Si-Na-Ca 主要来源于

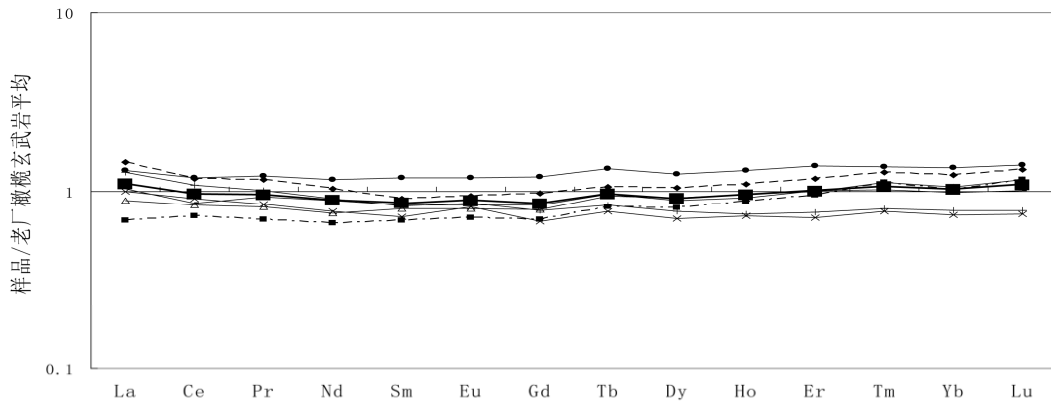


图 14 老厂橄榄玄武岩夕卡岩化过程的稀土元素蛛网图 (粗实线为平均值)

Fig. 14. REE distribution diagram showing the process of olivine basalt skarnization. The heavy line is mean value.

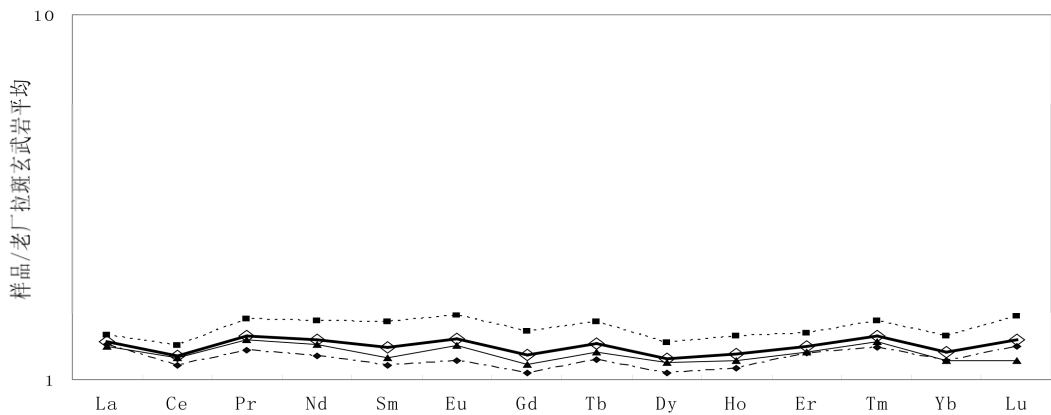


图 15 老厂拉斑玄武岩夕卡岩化过程的稀土元素蛛网图 (粗实线为平均值)

Fig. 15. REE distribution diagram showing the process of tholeiite skarnization. The heavy line is mean value.

花岗斑岩中斜长石的分解蚀变, 热液体系的硅主要被玄武质围岩捕获, 表现为 $w(\text{SiO}_2)$ 在玄武质夕卡岩中增加了 4%~5% 左右; Ca 主要消化在玄武岩的夕卡岩化过程中, $w(\text{CaO})$ 平均增加了 5% 左右; 目前没有发现富 Na 的蚀变相, 钠可能主要通过热液进入地表径流。相对深部斑岩, Mn 在浅部斑岩中平均增加了 0.8 倍; 在橄榄玄武岩夕卡岩化过程中增加了 0.4 倍, 在拉斑玄武岩夕卡岩化过程中增加了 1.2 倍, 综合说明 Mn 可能主要来自深部斑岩。

(2) 热液蚀变过程的微量元素变化规律可概括为: Mo 的主要物源是花岗斑岩, 在斑岩顶部及玄武质围岩中富集, 局部成矿; Ag-Pb-Bi 的主要物源是玄武岩, 在斑岩顶部富集, 在更远端的碳酸盐岩

地层中成矿; Cu 也主要来自玄武岩, 在玄武岩夕卡岩化过程中成矿; Sn-Zn 主要来自花岗斑岩, 目前没有发现花岗斑岩内外接触带发现矿化。所有玄武岩中 Rb-Ba 都表现出明显富集的趋势, 结合花岗斑岩强烈的去钠化、玄武岩中普遍钙的增加以及花岗斑岩的高 Rb-Ba 背景, 表明 Rb-Ba 组合可用于矿区的找矿填图。

(3) 稀土元素在不同深度的花岗斑岩的蚀变过程主要表现为活化迁移亏损, 在活化过程中稀土元素分异总体不明显, 但 Eu 分异较大 ($\delta\text{Eu}=0.85\sim 1.32$)。玄武岩蚀变过程中, 热液流体携带的稀土元素在橄榄玄武岩中基本收支平衡, 但拉斑玄武岩是热液携带稀土元素的重要捕获载体, 以形成弱正 Eu 异常的稀土配分为特征。

参 考 文 献:

- [1] 薛步高. 对澜沧老厂铅锌矿成因的讨论 [J]. 云南地质, 1989, (02): 181-188.
- [2] 黎功举, 张翼飞, 刘世维, 张弢, 陆继军. 更新思路部署促进找矿突破——以云南澜沧铅矿深部超大型斑岩铅(铜)矿发现为例 [J]. 云南地质, 2013, (03): 251-258+263.
- [3] 梁华英, 孙卫东, 喻亨祥, 谢应雯, 莫济海, 张玉泉. 西藏东缘玉龙斑岩铜矿带含矿岩体时代及斑岩铜金矿床形成研究 [J]. 矿床地质, 2006, (S1): 415-418.
- [4] 陈松岭, 彭省临, 王增润. 澜沧老厂银铅矿田构造 [J]. 中国有色金属学报, 1997, (03): 4-8.
- [5] 陈百友, 王增润, 彭省临, 张映旭, 陈伟. 云南澜沧老厂红土型银锰矿床地质特征及成因探讨 [J]. 大地构造与成矿学, 2002, (01): 86-91.
- [6] 许岳, 毕献武, 胡瑞忠, 胥磊落, 陈佑纬, 朱经经. 藏东囊谦盆地钾质类埃达克岩成因: 来自地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的制约[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2015, (S1).
- [7] 龙汉生. 云南澜沧老厂大型银多金属矿床成矿年代及地球化学 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2008.
- [8] 杨帆. 澜沧老厂多金属矿床叠加成矿系统特征及成矿模式 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [9] 岑况, 陈媛. 大陆地壳中元素地球化学分异指数排序模式 [J]. 地学前缘, 2011, (01): 56-62.
- [10] 陈百友, 王增润, 彭省临, 张映旭, 陈伟. 澜沧老厂银铅锌铜多金属矿床成因探讨 [J]. 云南地质, 2002, (02): 134-144.
- [11] 陈觅. 云南澜沧老厂银铅锌多金属矿床玄武岩年代学和地球化学 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2010.
- [12] 智超, 廖昆. 青海纳日贡玛斑岩铜钼矿床地球化学特征及成矿作用 [J]. 西北地质, 2014, (03): 26-34.