

与碱性岩有关的浅成低温热液型金矿特征 与控矿因素 ——以巴布亚新几内亚波尔盖拉金矿为例

李文光¹, 王天刚², 姚仲友², 李红军², 朱意萍²

LI Wen-guang¹, WANG Tian-gang², YAO Zhong-you², LI Hong-jun², ZHU Yi-ping²

1. 中矿资源勘探股份有限公司, 北京 100089;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

1. Sinomine Resource Exploration Co., Ltd., Beijing 100089, China;

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

摘要:与碱性岩有关的浅成低温热液型金矿在全球特别是环太平洋成矿带中具有重要意义,波尔盖拉金矿位于新几内亚造山带内较为典型的该类型金矿床。矿床的矿化与碱性的波尔盖拉侵入杂岩体有关,矿化主要发育在岩体与白垩纪Chim组的接触部位,矿化作用分为2期,矿化形态主要为脉状和角砾岩矿化,成矿物质和成矿流体具有明显的岩浆来源的特征。与成矿有关的波尔盖拉杂岩体侵入时代为5.99Ma,与成矿时间一致,并来源于被交代富集型的上地幔,该类碱性岩浆对于金的富集具有重要的意义。通过总结该类矿床的控矿因素和找矿标志为中国企业在该地区寻找同类型金矿提供参考。

关键词:碱性岩;浅成低温热液型金矿;波尔盖拉;巴布亚新几内亚

中图分类号:P618.51

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2014)02/03-0308-10

Li W G, Wang T G, Yao Z Y, Li H J, Zhu Y P. Ore-controlling factors and exploration indicators of alkaline magmatism related epithermal gold deposits: A case study of the Porgera gold deposit in Papua New Guinea. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(2/3):308-317

Abstract: Epithermal gold deposits related to alkaline rocks possess a significant place in global metallogenic belts, especially in the Circum-Pacific metallogenic belt. Among them, the Porgera gold deposit located in the New Guinea orogenic belt is a typical deposit. The mineralization of the deposit is associated with alkaline Porgera intrusive complex and mostly occurs in the contact zone between the rock mass and the strata of Cretaceous Chim Formation. The ore-forming process can be divided into two stages, and the mineralization styles includes vein mineralization and breccia mineralization. The metallogenic materials and fluids of the deposit exhibit the characteristics of magma resources. The age of mineralization-related Porgera complex intrusion is 5.99Ma, which is consistent with the metallogenic epoch, and the magma of the intrusion originated from the metasomatic-enrichment type upper mantle. This kind of alkaline magma played an important role in gold concentration. The ore-controlling factors and indicators for the exploration of the deposits are summarized in this paper, which can provide guidance in search of similar deposits for China's mining enterprises.

Key words: alkaline rocks; epithermal gold deposit; Porgera; Papua New Guinea

收稿日期:2013-11-22;修订日期:2014-01-15

资助项目:中央地勘基金项目(编号:201130D06200123)和中国地质调查局项目(编号:1212011120325)

作者简介:李文光(1974-),男,硕士,工程师,从事矿产资源勘查和区域成矿规律研究。E-mail:liw911@163.com

通讯作者:王天刚(1983-),男,博士,助理研究员,从事区域成矿规律和矿床地球化学研究。E-mail:wangtg1899@gmail.com

浅成低温热液型(Epithermal)金矿是一种十分重要的金矿类型,近年来随着勘探工作的不断发展,在环太平洋成矿带内发现了一批大型—特大型金矿床,这些金矿床被认为与碱性岩有关,逐渐引起地质学家的注意,被称为与碱性岩有关的浅成低温热液型金矿^[1],并以美国的克里普溪(Cripple Creek)金矿^[2]、巴布亚新几内亚的波尔盖拉(Porgera)金矿^[3]和利希希岛(Lihir)金矿^[4]、斐济的帝王(Emperor)金矿^[5]最为典型。该类金矿床多与碱性岩或橄榄玄粗岩有关^[1, 6~7],并且这些碱性岩具有异常高的氧逸度,富含挥发份^[8~9]。该类矿床虽然较少,但具有规模大、品位较高、硫化物含量少、开采对环境危害小等特点^[10],因此具有极高的经济价值,是较为理想的找矿对象。本文通过对巴布亚新几内亚波尔盖拉金矿的地质和矿产特征、矿床地球化学等方面的研究,对矿床成因和形成的构造背景进行总结,在此基础上简要分析该类矿床在全球的分布特征,并结合笔者对矿床的实地考察,提出寻找该类矿床的找矿标志和找矿远景区,从而为地质工作者寻找同类型的矿床提供参考。

1 区域地质背景

波尔盖拉金矿床位于巴布亚新几内亚高地的恩加省(5°28'S, 143°05'E),距离西高地省省会芒特哈根约130km,矿床金储量为410Mt,银储量为890t,金平均品位27g/t。矿床的金矿化主要表现为中低温矿化作用,并与浅部基性的波尔盖拉碱性侵入杂岩体有关^[11]。

波尔盖拉金矿位于新几内亚造山带内。该造山带位于澳大利亚板块东北部边缘,是印澳板块与太平洋板块及其它一系列小板块如卡洛琳板块和菲律宾板块之间的界线。该造山带在三叠纪—侏罗纪之后开始形成,并在中生代经历了一系列的弧陆碰撞过程^[12],形成了造山带目前的形态。

区内地层由侏罗系Om组、白垩系Chim组和始新统一中新统灰岩组成,为大陆边缘相沉积。Om组岩性为薄层深灰色炭质粉砂岩,黄铁矿含量较高。Chim组由生物扰动层纹状灰色钙质粉砂岩、泥岩和砂质岩石组成^[13]。在中渐新世由于太平洋板块向印澳板块的南向俯冲而发生沉积间断^[14],中晚渐新世该地区发生弧陆碰撞,导致塞皮克弧沿Lagaip断层带拼贴到大陆边缘之上^[15]。晚渐新世—早中新

世时期,该区域沉积具有大陆边缘特征的灰岩、钙质泥岩,沉积一直持续到晚中新世。在Lagaip断裂带北侧的增生地体内(马拉穆尼弧)发育广泛的中新世钙碱性岩浆侵入活动,该过程与渐新世太平洋板块的南向俯冲有关。在中新世末期,该地区停止接受沉积,并开始碰撞造山过程,在早上新世隆升形成高地地区的雏形。碰撞造山引发隆升过程的同时,SW向的俯冲过程在该地区形成了前陆盆地逆冲推覆褶皱带,该褶皱带以兼有薄皮构造和厚皮构造为特征,该俯冲过程也使得位于澳大利亚板块与俾斯麦海微板块之间的所罗门海被不断消减^[15]。中新世,后期火山岛弧沿马克汉姆—拉穆断裂与塞皮克、马拉穆尼岛弧发生碰撞,在中央造山带内引发广泛的变形和地壳增厚过程,变形向西传导引发形成了巴布亚褶皱带^[16]。在早上新世主造山期和前陆盆地逆冲带形成之后,晚上新世—第四纪巴布亚褶皱带内发生大规模的钙碱性到富钾的碱性岩浆活动,波尔盖拉侵入杂岩体此时形成(图1)。

区内地层经历了逆冲褶皱变形,但未发生变质。区域褶皱相对开阔,核部倾角20~70°,褶皱多与NW向的逆冲断层有关,这些断层多呈陡倾,并一直向下延伸到基底部分,在近系—古近系灰岩底部的白垩系泥岩和粉砂岩中还发育拆离断层^[16]。

区内岩浆活动主要为波尔盖拉侵入杂岩体,岩浆活动受到Lagaip断层的控制。岩体侵位深度较浅,约为2~3km。岩体由一系列小规模岩株和岩基组成,并呈Y字型侵位于地层中。岩体地球化学成分从基性到中酸性都有,主要为闪长岩、闪长玢岩、花岗斑岩等。区内还发育中基性岩脉,岩脉形成时间晚于矿化事件(图2)。

2 矿区地质矿产特征

2.1 区域地质

矿区内地层主要为白垩系Chim组,以富含黑色和黑灰色、层理发育的浅海相粉砂质沉积物为特征。地层岩性主要为含炭的粉砂岩,还含有少量黑色杂砂岩、崩塌角砾岩,角砾主要成分为黑色粉砂岩和页岩,基质成分与角砾相似。在矿区西南和西北部的钻孔中还发现少量棕色泥岩。此外,在区内还可见少量钙质沉积物(图3)。在区内侵入岩体周围发现大量被蚀变的沉积物,是绢云母—白云石化

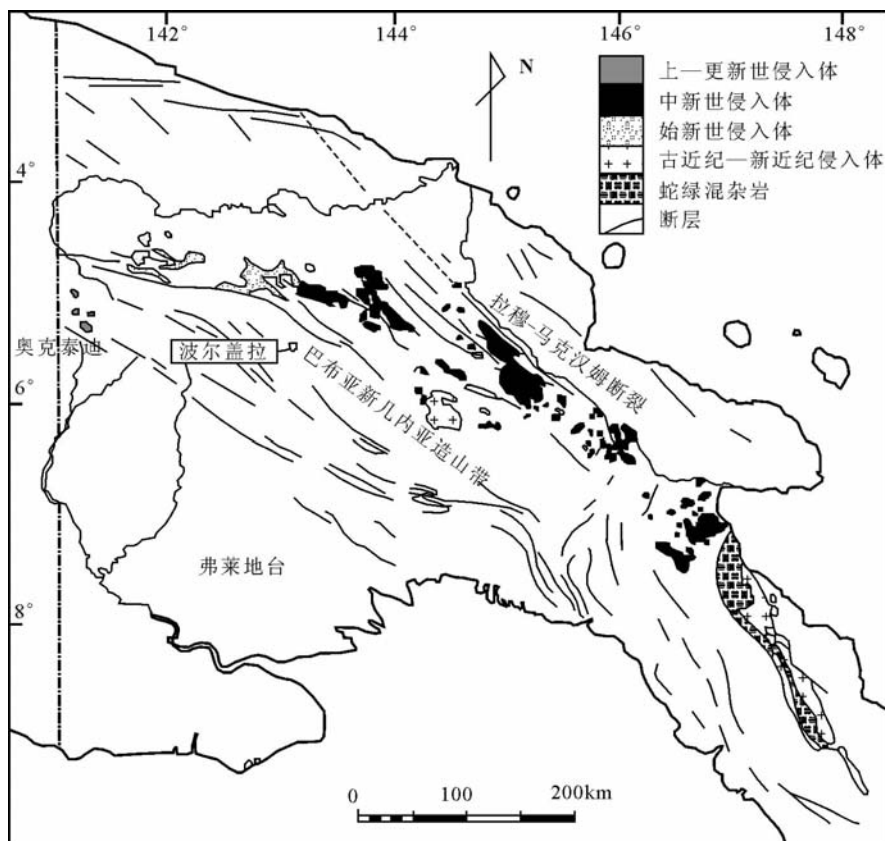
图 1 巴布亚新几内亚大地构造格架和侵入岩分布^[17]

Fig. 1 Major tectonic provinces and igneous intrusions in Papua New Guinea

蚀变的产物,蚀变更强烈的沉积物呈红色、绿色,主要在钻孔中可见。

区内构造主要发育ENE向的罗姆尼断层,该断层系统控制了金矿化(图4)。

矿区内的侵入岩体主要以基性超基性的辉长岩到闪长岩系列为主,呈岩基和岩脉产出。侵入岩体接触面的倾角均大于45°,该侵入体呈Y字型出露于较软的页岩范围内(图4)。区内每种岩性都形成多个侵入体,约几十米宽,成分和结构特征表明其并非同源岩体。岩体未发育变质变形,但侵位受到ENE向的张性罗姆尼断层控制。区内侵入岩体以辉长—闪长岩最为重要,产出规模最大,岩体主要呈粗粒等粒结构或斑状结构,角闪石斑晶最大可达10mm,主要组成矿物为长石、角闪石和辉石,还含有少量黑云母和磷灰石,而且该岩体以富含长柱状角闪石斑晶为特征;辉长岩在矿区北部也有出露,呈等粒结构,主要矿物为辉石、角闪石和长石;花岗斑岩仅在南部侵入,位于2个辉长—闪长岩侵

入体之间,该类侵入岩体规模也较大,主要矿物组成为短柱状长石斑晶,并含少量的角闪石、辉石和黑云母,基质为长石和石英,岩体以发育自碎角砾岩和岩浆顶蚀作用为特征,该期侵入体与矿化没有直接关系;闪长玢岩仅在矿区南部的钻孔中发现,呈斑状结构,斑晶以长石为主,呈长柱状,斑晶还含有少量角闪石,不含辉石,基质主要为长石、磷灰石和石英。此外,区内还出露少量的安山岩和玄武岩^[19]。

2.2 矿化

矿床的矿化作用分为2个阶段(表1),即第Ⅰ阶段矿化一般与斑状侵入体就位有成因关系,属于与侵入作用有关的低硫化浅成热液金矿床的石英—硫化物和碳酸盐—贱金属—金矿类型,矿物组合主要为磁铁矿—黄铁矿—闪锌矿—方铅矿—碳酸盐,局部含黝铜矿、银黝铜矿和黄铜矿。

第Ⅱ阶段矿化是横切搓碎基质的流体化角砾岩墙型金矿,含细粒硅质—黄铁矿,矿物组合主要为石英—钼云母—黄铁矿—游离金,由热液爆破活

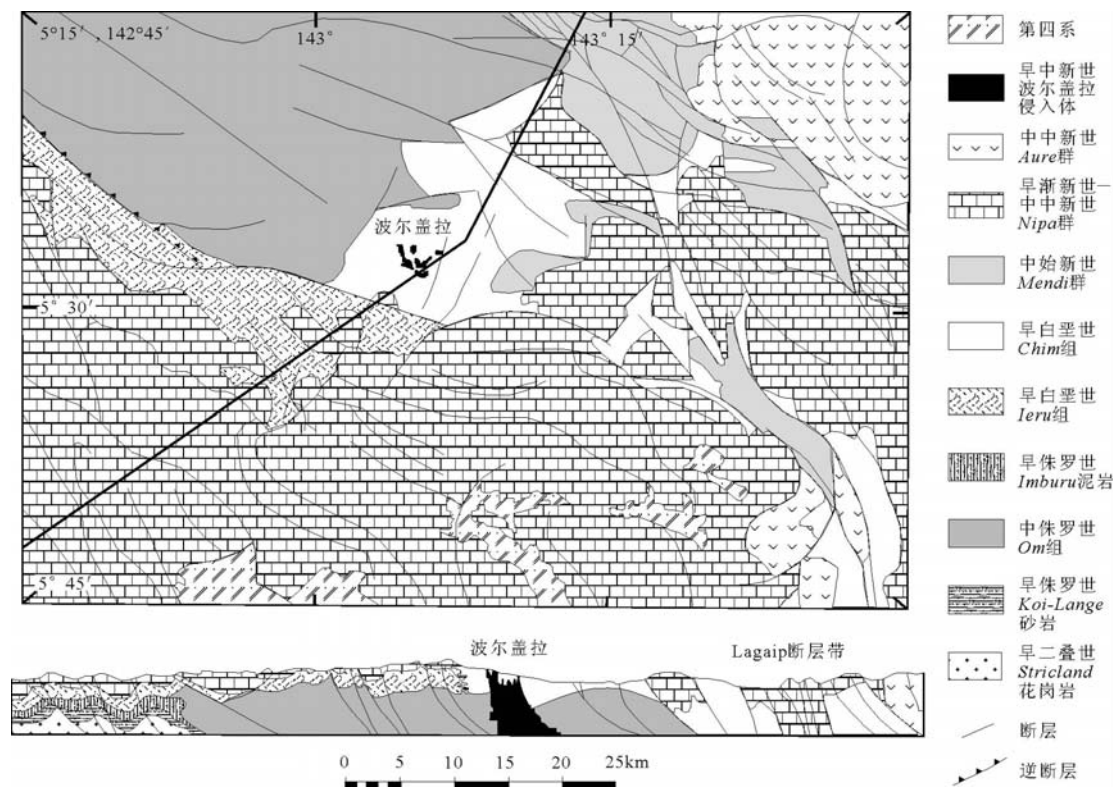
图 2 波尔盖拉金矿区域地质图^[18]

Fig. 2 Regional geological map of the Porgera gold ore district

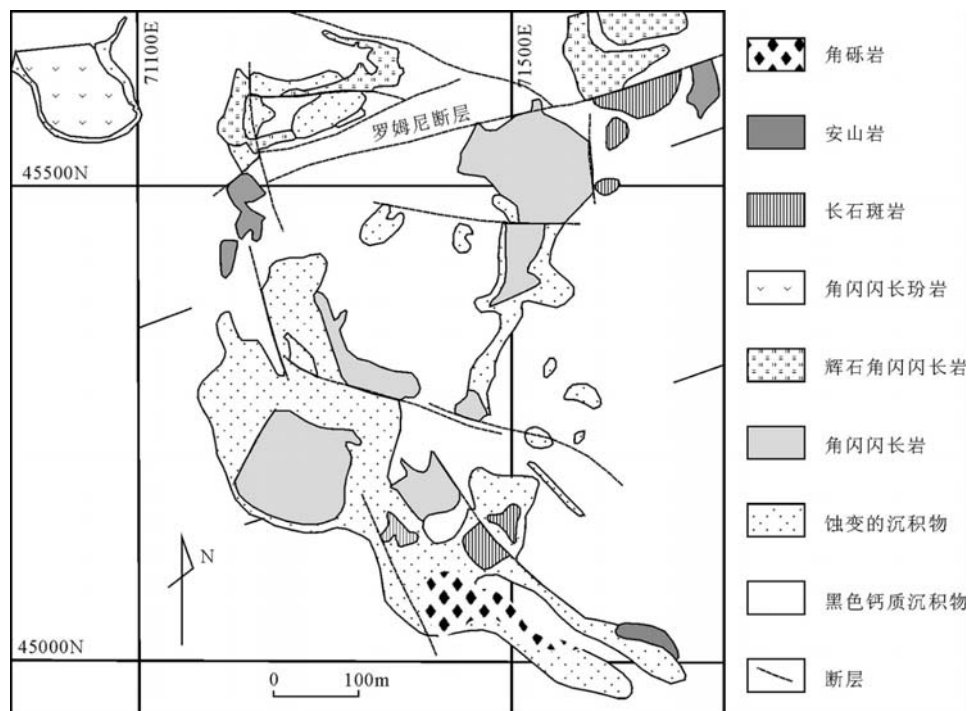
图 3 波尔盖拉金矿区地质图^[19]

Fig. 3 Geological map of the Porgera gold ore district

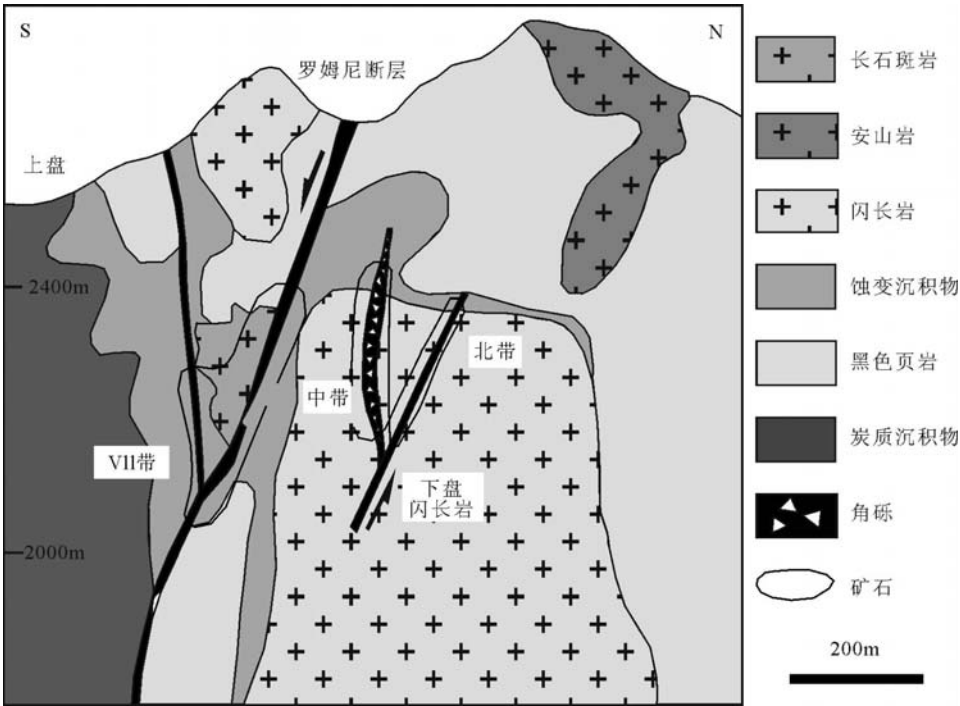


图 4 波尔盖拉金矿剖面图^[19]
Fig. 4 Geological cross section of the Porgera gold deposit

动形成的,在晚期富含碳酸盐的组合中常含碲银矿,其中有几个富矿柱赋存于顶板帚状构造与罗姆尼断层的交会地段。

根据矿床平面和剖面图估算,矿体长200~500m,宽度 50~150m,厚度 40~100m,矿体底部埋深约 700m。

矿床发育的蚀变有4种:①青磐岩化,主要矿物组合为方解石—白云石—绿泥石;②绢云母—白云石化,主要矿物组合为绢云母—白云石,偶见方解石、菱铁矿、绿帘石、粘土矿物和黄铁矿,该期蚀变与成矿作用关系密切;③钼云母—氧化硅—碳酸盐化,通常叠加于绢云母—白云石化之上,亦可单独

表 1 波尔盖拉金矿矿化阶段及其特征^[20]
Table 1 Mineralization stages and characteristics of the Porgera gold deposit

矿化阶段	类 型	矿化特征	主要矿石矿物	次要矿石矿物	脉石矿物
第 I 阶段	C/局部发育	破碎角砾岩中细浸染	细自形含金含砷黄铁矿	黄铁矿、白铁矿	磷灰石
	B/常见	浸染、细脉、网脉	粗粒自形含金黄铁矿	闪锌矿、方铅矿	方解石、白云石、石英
	A/最常见	脉、细脉、角砾岩胶结物	含金黄铁矿、闪锌矿、方铅矿	含砷黄铁矿、银黝铜矿、金、银金矿、磁黄铁矿、淡红银矿/深红银矿局部	方解石、白云石、石英、沸石
	E/局部发育	脉、细脉、角砾岩胶结物	硫砷银矿—深红银矿、银黝铜矿	黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黝铜矿	钙质白云岩、石英
第 II 阶段	D/局部发育	细脉和角砾岩胶结物,通常为晶簇	金、银金矿	黄铁矿、赤铁矿、碲化物	钼云母、石英、方解石/白云石、沸石

出现,该蚀变限于窄脉、脉断层泥和局部角砾岩带中;④硫酸盐化,主要矿物组合为硬石膏,伴有少量绢云母和白云石,该期蚀变仅在深部钻孔中发现,呈裂隙充填和部分交代产出,硬石膏亦呈脉石矿物产于切穿硫化物和含游离金矿脉的脉体中。

3 矿床地球化学特征

3.1 岩石地球化学特征

野外地质特征和岩石地球化学数据显示,矿区内波尔盖拉侵入杂岩体的 SiO_2 含量为45%~55%,为超基性—中性岩, $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量为3.34%~7.39%,在TAS图解上落在碱性的辉长岩—正长闪长岩系列内(图5-a),岩石 SiO_2 含量变化较小,说明结晶分异作用不显著。

岩体的 SiO_2 含量与其它主量元素呈良好的线性关系,说明侵入岩体为同源岩浆演化形成(图5-c、d)。杂岩体 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 平均值为0.85,而

且岩石中磁铁矿含量较高,说明岩体的原始岩浆为典型的氧化性岩浆^[23]。

岩体稀土和微量元素测试结果表明,岩体富集轻稀土元素($[\text{La}/\text{Yb}]_{\text{cn}}=15\sim19$)和不相容元素(图5-b),具有典型的板内玄武岩的特点,并且来源于上地幔的部分熔融,而岩体较高的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 值表明该上地幔曾经被交代。岩体的Sr-Nd、Pb同位素测定结果($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}\approx 0.7035$, $\varepsilon_{\text{Nd}}\approx +6$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\approx 18.66$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\approx 15.56$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\approx 38.55$)也暗示岩体来源于被交代富集型的上地幔^[3]。

3.2 成矿时代

前人通过对矿区内与成矿密切相关的波尔盖拉杂岩体中岩浆成因的角闪石和黑云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,其中黑云母定年结果为 $5.99\text{Ma} \pm 0.11\text{Ma}$ (MSWD=3.7),角闪石定年结果为 $6.35\text{Ma} \pm 0.23\text{Ma}$ (MSWD=1.0)和 $6.3 \pm 0.7\text{Ma}$ (MSWD=2.6)^[25],而前人通过对岩浆成因的黑云母进行K-Ar定年得到波

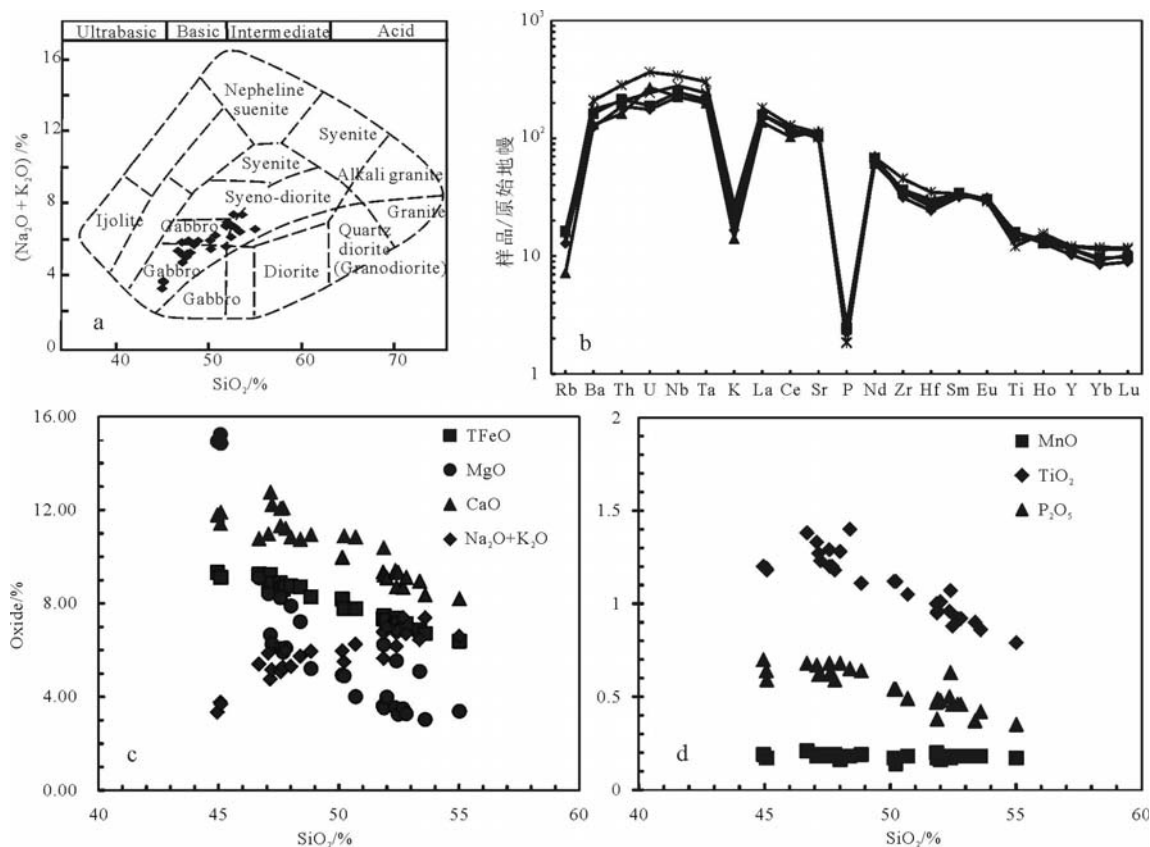


图5 波尔盖拉侵入杂岩体地球化学图解

Fig. 5 Geochemical characteristics diagram of Porgera intrusion

a—TAS图解底图据参考文献[21],数据据参考文献[22];b—微量元素蛛网图,标准化数据据参考文献[24],数据据参考文献[3];c、d—波尔盖拉杂岩体主量元素协变图解,数据据参考文献[22]

尔盖拉侵入体的年龄为 $5.97 \pm 0.19 \text{ Ma}$ ^[11], 因此波尔盖拉杂岩体的形成时代应为 $5.99 \pm 0.11 \text{ Ma}$, 角闪石可能因为矿物受到后期蚀变和存在石英杂质等影响导致年龄偏大。通过对第 I 阶段热液成因的黑云母及第 II 阶段钒云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年, 获得黑云母形成年龄为 $5.98 \pm 0.13 \text{ Ma}$ (MSWD=2.7), 钒云母形成年龄为 $5.92 \pm 0.08 \text{ Ma}$ ^[25], 两阶段矿化年龄在误差范围内基本重合, 表明波尔盖拉金矿化事件持续时间小于 0.1 Ma ^[25]。

3.3 成矿流体特征

矿床的矿化过程分为 2 个阶段, 两阶段成矿流体表现出截然不同的特征。第 I 阶段贱金属硫化物石英脉型矿化成矿流体以 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系为主, 具有中等盐度和高温的特征 ($7.7\% \sim 11.3\% \text{ NaCl}_{\text{equiv}}$, 平均 $9.5\% \text{ NaCl}_{\text{equiv}}$; $T_h = 266 \sim 332^\circ\text{C}$, 平均 299°C), 流体中挥发份含量较低^[20]; 第 II 阶段石英—钒云母—黄铁矿—游离金脉矿化成矿流体则以富含挥发份为特征, 具有中等盐度和低温的特征 ($7.5 \pm 1.0 \sim 9.6 \pm 0.2\% \text{ NaCl}_{\text{equiv}}$, $T_h = (127 \pm 2 \sim 167 \pm 25)^\circ\text{C}$, 流体以富含 CO_2 为特征, 并含有少量的 CH_4 、 N_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 和 COS , 而流体中离子成分以 Cl^- 、 Br^- 、 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 为主, 富含挥发份且可见富气相流体包裹体说明成矿流体经历了沸腾过程, 据此计算出矿床的形成深度为 $2.0 \sim 2.5 \text{ km}$ ^[26]。

3.4 同位素地球化学特征

矿床 H、O 同位素数据显示: 第 I 阶段贱金属硫化物石英脉型矿化成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = -52\% \sim -50\%$, $\delta \text{D}_{\text{水}} = 2.7\% \sim 6.1\%$ ^[20]; 第 II 阶段石英—钒云母—黄铁矿—游离金脉矿化成矿流体 $\delta \text{D}_{\text{水}} = -77\% \sim -52\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = 1.2\% \sim 4.1\%$ ^[26]; 杂岩体中的黑云母和角闪石计算出的岩浆水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = -63\% \sim -49\%$, $\delta \text{D}_{\text{水}} = 7.9\% \sim 9.3\%$ ^[20], 第一阶段的成矿流体与杂岩体的岩浆水的 H、O 同位素特征相似。

对第 I 阶段、第 II 阶段的碳酸盐、蚀变围岩和围岩中的 C 同位素测定结果 ($\delta^{13}\text{C}$ 分别为 $-7.1\% \sim -4.5\%$ 、 $-3.3\% \sim -2.4\%$ 、 $-5.3\% \sim -4.1\%$ 、 $-5.4\% \sim -4.0\%$ 、 $-1.8\% \sim +1.2\%$ 、 $-1.5\% \sim 0.0\%$) 表明^[20, 26], 第 I 阶段的碳酸盐与蚀变围岩 C 同位素组成相似, 可能来源于岩浆, 而第 II 阶段的碳酸盐 C 同位素组成介于原始沉积围岩和岩浆来源的 C 同位素值之间, 也说明该阶段可能存在流体混合作用。第 II 阶段样品中流体包裹体内 CO_2 的 C 同位素值为 -9.5% , C 同位素在碳酸盐

与二氧化碳平衡反应中的分馏、成矿流体与围岩中有机物的反应、岩浆来源都有可能造成这一数值的降低。

矿床中含硫的矿物主要为黄铁矿, 在地层和矿石中均存在。S 同位素测定结果显示, 第 I 阶段矿化中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1\% \sim 5.4\%$; 第 II 阶段黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-9.4\% \sim 6.1\%$ 、硬石膏 $12.4\% \sim 17.5\%$; 而围岩炭质泥岩中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 2.1% , 灰岩中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.9% , 蚀变的炭质泥岩中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -12.7% 。从矿床的 S 同位素特征可以看出, 第 I 阶段矿化的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有明显的岩浆来源特征, 第 II 阶段黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值也表现出岩浆来源的特征, 其中的低值可能与热液活动有关^[27]。因为沸腾过程中沉淀的硫化物具有较低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值^[28], 这与第 II 阶段矿化流体特征相似, 说明该阶段流体曾经发生沸腾现象, 蚀变的炭质泥岩中黄铁矿较低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值也与此有关; 未蚀变地层与蚀变地层 $\delta^{34}\text{S}$ 值巨大的差异说明两者具有不同的来源。

矿床矿石矿物 Sr、Pb 同位素测定结果显示, 第 I 阶段早期矿化的石英硫化物脉和第 II 阶段晚阶段的石英—钨云母—碲化物等脉体的 Pb、Sr 同位素组成非常一致 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70745 \pm 0.00044$ [n=10], $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.603 \pm 0.004$ [n=15]), 落在未蚀变的侵入岩体和赋矿的侏罗纪围岩 Om 组之间 (侵入岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7035$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \approx 15.560$, 地层 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7153$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \approx 15.636$), 说明成矿热液中的 Sr、Pb 同位素组成主要继承围岩地层和侵入岩, 而金也可能来自于侵入岩和地层^[29]。

4 矿床成因

斑岩型—浅成低温热液型铜金矿床通常被认为形成于俯冲环境下, 并被认为是与洋壳俯冲有关。近年来, 该类矿床被发现不仅可以形成于俯冲环境, 还可以形成于碰撞、地壳增厚拆沉、俯冲后伸展等环境, 特别是与碱性岩有关的斑岩—浅成低温热液型铜金矿一般形成于俯冲之后伸展背景环境下被交代的岩石圈地幔的部分熔融^[30]。波尔盖拉碱性杂岩体位于新几内亚造山带内, 区内在新生代时期发育 2 期弧岩浆活动, 分别为始新世塞皮克弧和中新世马拉穆尼岩浆弧 ($17 \sim 10 \text{ Ma}$), 之后由于翁通爪哇高地的阻塞, 使得该地区的俯冲停止, 区内开始处于相对伸展的环境。在此环境下, 该地区交代富

集型的岩石圈地幔由于软流圈的上涌或者岩石圈减薄发生减压熔融,沿区域性基底断裂(Lagaip 断层)上涌,并形成碱性的波尔盖拉杂岩体。

这种俯冲之后伸展环境下的岩浆活动,可以被认为是俯冲之后的第2次部分熔融,由于弧岩浆中S含量较高,并且大部分处于氧化状态,仍然可能存在部分硫化物。这些硫化物富集Cu、Ni、Au、铂族元素等亲铜与亲铁元素,并以硫化物残留体的形式存在。而岩浆中由于Cu含量较高不会受到影响,但是岩浆中Au元素因为该过程而得到富集。这些残留体在之后的第2次部分熔融过程中,由于岩石圈地幔开始阶段的俯冲过程中富集了大量的含水物质,氧逸度也变得更高,因此产生比第1次熔融更加富金的碱性岩浆,并在地表经历了流体出熔、水岩作用等过程,使得矿床的品位更高^[30]。

根据矿床地球化学特征可将矿床的矿化过程分为2个阶段:第Ⅰ阶段为与碱性岩体有关的脉状矿化,具有岩浆来源的特征,矿化过程可能主要与岩体流体的出熔有关;第Ⅱ阶段为角砾岩型矿化,成矿物质主要来源于岩浆,成矿过程较为复杂,成矿流体特征显示其成矿过程经历了水岩作用、流体沸腾、流体混合等多种过程,是矿床的主要成矿期。

5 控矿因素与找矿标志

与碱性岩有关的金矿床在世界范围内广泛分布,其时代从太古宙一直到新生代。太古宙与碱性岩有关的金矿床,例如苏必利尔地区(Seperior)和伊尔岗地块(Yilgarn Block)的绿岩带型金矿,被认为与碱性的煌斑岩脉活动有关;元古宙奥林匹克坝铁氧化物型矿床表现出强烈的碱性蚀变特征;新生代以来与碱性岩有关的金矿床多为浅成低温热液—斑岩型矿床,与该类矿床有关的碱性侵入体一般侵入深度较浅,因此仅在新生代的环太平洋地区得以保存,矿床型金矿床主要分布在西南太平洋地区和北美地区(图6)。

该类矿床在浅部表现为浅成低温热液型矿化,在深部经常发育斑岩型矿化。笔者赴巴布亚新几内亚波尔盖拉和利希尔岛(Lihir)金矿考查时发现,在勘探开采过程中均在深部发现规模可观的斑岩型铜矿化。前人^[31]通过对与碱性岩有关的浅成低温热液型金矿的研究,发现在地壳厚度较薄地区的矿床深部发育斑岩型铜矿化,有关的碱性岩浆SiO₂含量小于60%,而部分矿床在深部发育钼矿化且SiO₂含量通常大于65%,反应其地壳厚度较厚^[31]。根据

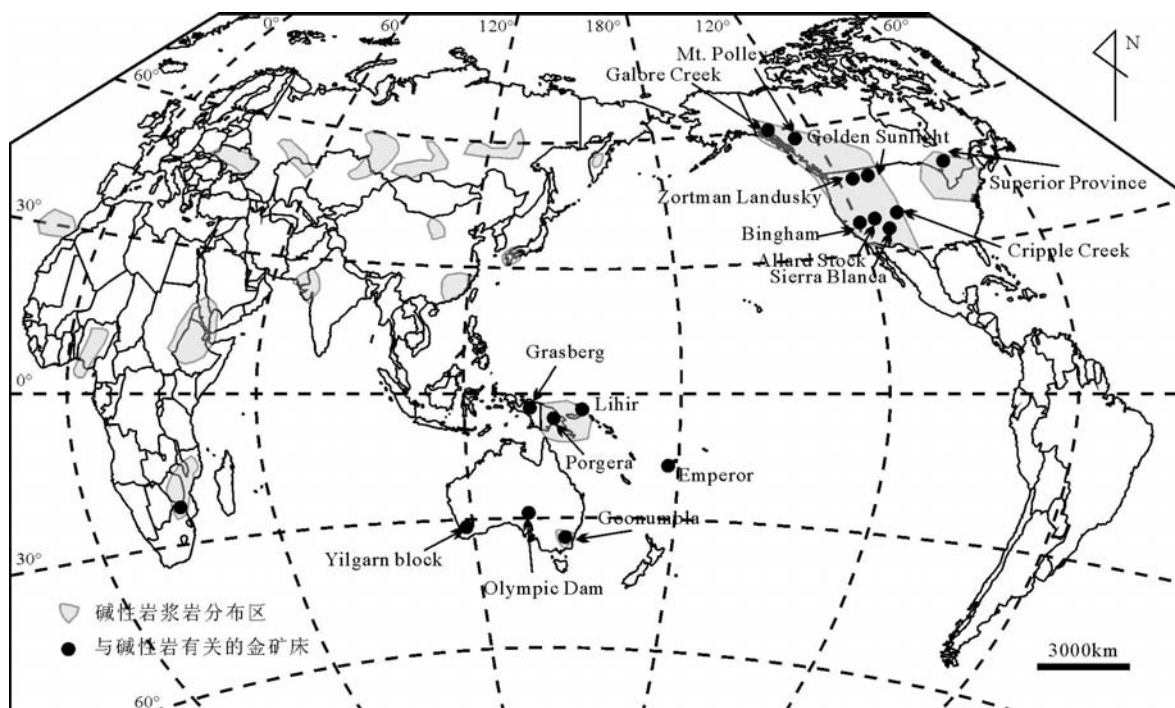


图6 全球碱性岩及与碱性岩有关的金矿分布^[31]

Fig. 6 Distribution of alkaline rocks and gold deposits related to alkaline rocks in the world

该类矿床的分布和地质特征、构造背景等,总结出与碱性岩有关的浅成低温热液型金矿床的控矿特征:①构造背景:矿床可以产出于弧陆碰撞带、弧后伸展环境、陆内裂谷、洋内弧、陆内伸展等环境下;②区域岩浆活动:与成矿有关的碱性侵入体多为杂岩体,规模相对于弧岩浆活动较小,岩性从基性到酸性均可;③区域地层:区域分布还原性的沉积地层,如泥岩、粉砂岩、板岩等;④区域构造:与成矿有关的碱性岩的分布多受到基底性断裂的控制。

根据矿床的地质特征,总结矿床的找矿标志为:①侵入岩体特征:与矿化有关的岩体多为中基性的碱性岩,具有磁性;②蚀变特征:区域的蚀变表现出典型的碱性蚀变的特征,具体表现为黑云母化和钾长石化、泥化和高级泥化等酸性蚀变发育较少,石英含量稍低;③成矿深度:根据矿床的成矿流体地球化学特征可知,矿床的成矿深度为2~2.5km,比一般的浅成低温热液型金矿成矿深度大;④成矿时代:该类矿床通常与晚期的岩浆侵入活动有关,在野外表现为成矿岩体可能侵入到早期的弧岩岩浆之内;⑤物化探特征:与浅成低温热液型金矿有关的碱性岩的氧逸度较高,具体表现为岩体内的磁铁矿含量较高,在区域内可以形成一定规模的磁异常。

6 结 论

(1)波尔盖拉金矿床为与碱性岩有关的浅成低温热液型金矿床。矿化表现为斑岩型和浅成低温热液型矿化两类,成矿物质和成矿流体均来源于岩浆,成矿过程与流体的沸腾、水岩作用、岩浆水出熔等多个过程有关,与成矿有关的碱性岩主要形成于伸展环境下岩石圈地幔的减压熔融,该过程对于形成富金的岩浆具有重要意义。

(2)与碱性岩有关的浅成低温热液型金矿床可形成于多种伸展环境下,矿床的分布受到伸展性的构造背景、基底性断裂、碱性侵入杂岩体和还原性地层的控制。

(3)总结矿床的找矿标志为:具有磁性的碱性中基性晚期侵入岩、较深的成矿部位、区域性的碱性蚀变和一定规模的磁异常。

致谢:巴布亚新几内亚矿产资源局(MRA)时任地调部长 Leonard Cranfield 在野外地质考查过程中给予热情而周到的帮助,在此致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1] Bonham Jr H F. Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits: a review[C]//International volcanological congress, symposium, 1986:13-17.
- [2] Kelley K, Ludington S. Cripple Creek and other alkaline-related gold deposits in the southern Rocky Mountains, USA: influence of regional tectonics[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 38-60.
- [3] Richards J P, Chappell B W, McCulloch M T. Intraplate-type magmatism in a continent-island-arc collision zone: Porgera intrusive complex, Papua New Guinea[J]. Geology, 1990, 18: 958-961.
- [4] Kennedy A, Hart S, Frey F. Composition and isotopic constraints on the petrogenesis of alkaline arc lavas: Lihir Island, Papua New Guinea[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1990, 95: 6929-6942.
- [5] Ahmad M, Solomon M, Walshe J. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji[J]. Economic Geology, 1987, 82: 345-370.
- [6] Sillitoe R. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 4-13.
- [7] Müller D, Groves D I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization[M]. Berlin: Springer, 1995: 1-256.
- [8] Kelley K D, Ludington S. Cripple Creek and other alkaline-related gold deposits in the southern Rocky Mountains, USA: influence of regional tectonics[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 38-60.
- [9] Müller D, Kaminski K, Uhlig S, et al. The transition from porphyry- to epithermal-style gold mineralization at Ladolam, Lihir Island, Papua New Guinea: a reconnaissance study[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 61-74.
- [10] White N C, Poizat V. Epithermal deposits, diverse styles, diverse origins[J]. Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 1995, 9: 623-628.
- [11] Richards J P, McDougall I. Geochronology of the Porgera gold deposit, Papua New Guinea: Resolving the effects of excess argon on K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age estimates for magmatism and mineralization[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54: 1397-1415.
- [12] Hill K, Hall R. Mesozoic-Cenozoic evolution of Australia's New Guinea margin in a west Pacific context[J]. Special Papers—Geological Society of America, 2003: 265-290.
- [13] Davies H. Structure and evolution of the border region of New Guinea[C]//Petroleum Exploration in Papua New Guinea. Proceedings of the first PNG Petroleum Convention, Port Moresby, 1990.
- [14] Pigram C, Davies H. Terranes and the accretion history of the New Guinea orogen[J]. BMR Journal of Australian Geology and Geophysics, 1987, 10: 193-211.
- [15] Cooper P, Taylor B. Seismotectonics of New Guinea: a model for arc reversal following arc-continent collision[J]. Tectonics, 1987, 6: 53-67.

- [16]Abers G, McCaffrey R. Active deformation in the New Guinea fold and thrust belt: Seismological evidence for strike slip faulting and basement involved thrusting[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 1988, 93: 13332–13354.
- [17]Page R W. Geochronology of igneous and metamorphic rocks in the New Guinea Highlands[M]. Australian Government Publ. Service, 1976.
- [18]Richards J P, Ledlie I. Alkalic intrusive rocks associated with the Mount Kare gold deposit, Papua New Guinea; comparison with the Porgera intrusive complex[J]. *Economic Geology*, 1993, 88: 755–781.
- [19]Fleming A, Handley G, Williams K, et al. The Porgera gold deposit, Papua New Guinea[J]. *Economic Geology*, 1986, 81:660–680.
- [20]Richards J P, Kerrich R. The Porgera gold mine, Papua New Guinea; magmatic hydrothermal to epithermal evolution of an alkalic-type precious metal deposit[J]. *Economic Geology*, 1993, 88: 1017–1052.
- [21]Wilson M. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach[M]. Dordrecht: Springer, 1989.
- [22]Richards J P. Petrology and geochemistry of alkalic intrusives at the Porgera gold deposit, Papua New Guinea[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, 35:141–199.
- [23]Meinert L D. Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits – Chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization[C]//Thompson J F H. *Magma, fluids, and ore deposits*. Min. Assoc. Can. Short Course Series, 1995, 23: 401–418.
- [24]McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 223–253.
- [25]Ronacher E, Richards J P, Villeneuve M E, et al. Short life-span of the ore-forming system at the Porgera gold deposit, Papua New Guinea: laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates for roscelite, biotite, and hornblende[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 75–86.
- [26]Ronacher E, Richards J, Reed M, et al. Characteristics and evolution of the hydrothermal fluid in the North zone high-grade area, Porgera gold deposit, Papua New Guinea[J]. *Economic Geology*, 2004, 99: 843–867.
- [27]Ohmoto H, Goldhaber M. Sulfur and carbon isotopes[C]//Barnes H L. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Place Wiley, 1997: 517–612.
- [28]McKibben M A, Eldridge C S. Radical sulfur isotope zonation of pyrite accompanying boiling and epithermal gold deposition; a SHRIMP study of the Valles Caldera, New Mexico[J]. *Economic Geology*, 1990, 85: 1917–1925.
- [29]Richards J P, McCulloch M T, Chappell B W, et al. Sources of metals in the Porgera gold deposit, Papua New Guinea: evidence from alteration, isotope, and noble metal geochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55: 565–580.
- [30]Richards J P. Postsubduction porphyry Cu–Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere[J]. *Geology*, 2009, 37: 247–250.
- [31]Jensen E, Barton M. Gold deposits related to alkaline magmatism [C]//Hagemann S G, Brown P E. *Reviews in Economic Geology: Gold in 2000*. Place Society of Economic Geologists, 2000: 279–314.