

关于峨眉山溢流玄武岩省资源勘查的几个问题

朱炳泉

(中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

提要:通过全球资料对比表明峨眉山溢流玄武岩省具有较完整的岩浆-热液成矿系列。峨眉山玄武岩裂隙式喷发的溢流通道受地球化学边界所揭示的岩石圈不连续界面所控制。这些地段存在完整的古火山口相岩石组合, 为找矿提供了重要线索。溢流通道岩浆房存在贫硫低氧逸度、贫硫高逸度和富硫 3 个岩浆分异趋向, 构成 3 个岩浆成矿系列(Cu-Ni-PGE, Cu-Ag-Pd 与 Fe-Ti-V)。同生火山热液活动形成了从低绿片岩相、葡萄石相到沸石相(400°C 至 100°C)的铜成矿系列。热液组成的不同控制自然铜、氧化铜和铜硫化物的形成。反射率资料对比表明对自然铜形成起重要制约作用的沥青来自 P_2-T_1 界面地层有机质的热液裂解, 并处于生油成熟期。因此和 Keweenaw 大陆裂谷一样, 应开展铜、镍、铂钯、油气一体化的勘查。

关 键 词:大陆溢流玄武岩; 地球化学急变带; Cu、Ni、Pt-Pd 成矿作用

中图分类号: P558.14⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2003)04-0406-07

由于铜、镍、铂钯资源的紧缺, 近来对峨眉山大火成岩省的资源勘查工作引起了各方面的关注。但目前对溢流玄武岩省成矿的有利和不利因素, 它们的成矿体系, 以及找矿中要注重的问题还缺少全面系统的认识。由于近来滇黔边境自然铜-氧化铜矿床的研究进展^[1-2], 峨眉山大火成岩省已构成一个较完整的岩浆-热液成矿系统。这在全球溢流玄武岩省中不多见。因此开展峨眉山大火成岩省成矿系统的综合研究具有重要的理论和现实意义。笔者将对有关共同关心的问题作以下讨论。

1 全球溢流玄武岩省溢流与成矿时限

全球从新元古宙到新生宙的溢流玄武岩(暗色岩系、大火成岩省)在大陆与海洋均有广泛分布(图 1、表 1), 约占全球 1/8 的表面积。虽然与大陆溢流玄武岩有关的金属矿产已有不少发现, 如俄罗斯的 Noril'sk 的铜镍铂钯矿, 美国的 Keweenaw 铜矿床, 加拿大 Voisey 湾 Ni-Cu-Co 矿床以及峨眉山玄武岩有关的钛铁钒、铜、镍、铂钯矿, 但与这一火成岩类的分布面积相比, 发现的资源量相对较少。不少溢流玄武岩省没有发现具规模的矿床。一个主要的原因是巨量溢流玄武岩在相对很短时间内喷发出(约占 90% 的熔岩体积, 在 1~2 Ma 溢出)^[3], 因此难于产生充分的岩浆分异, 导致成矿物质的富集。然而溢流玄武岩浆体系贫硫, 因此金

属元素不易以硫化物形式分离, 而在岩浆液相中高富集。在地壳岩浆房形成时, 这些金属元素也在地壳岩浆房中富集, 因此溢流玄武岩分布区存在普遍的铜、镍、铂钯高异常^[4]。同时有些溢流玄武岩省在喷发的结束阶段持续了相对较长时间的间隙式喷发, 使古火山通道的中上部在从封闭到开放的岩浆房, 可以出现高的岩浆分异作用。如峨眉山玄武岩的主溢流期短于 3 Ma, 它的上部层位存在多个气孔状熔岩与火山碎屑岩-碳泥质岩的互层, 持续时间长达 15 Ma (251~236 Ma)^[5-7], 岩浆分异可以从苦橄质到安山质。相伴随的镁铁-超镁铁侵入岩活动则持续到更晚(~210 Ma)。Keweenaw 大陆裂谷溢流玄武岩主溢流期为 2 Ma, 而上部存在的多个气孔状熔岩与火山碎屑岩-碳泥质岩的互层, 持续时间长达 22 Ma^[8], 岩浆分异从玄武质到流纹质。西伯利亚溢流玄武岩的晚期岩浆分异相近于峨眉山玄武岩。当地壳岩浆房从地壳中吸取硫时, 则金属元素与硫结合而析离出, 形成硫化物矿床。当地壳贫硫而富有机质时, 则可以形成自然铜矿床。因此加强溢流玄武岩上部层位的古火山口相及其相伴的侵入岩形成环境和持续时间研究对于资源寻找是十分重要的。

2 峨眉山玄武岩溢流通道与岩石圈结构

通过同位素填图确定的地球化学急变带(边界)标志着

收稿日期: 2002-10-28; 改回日期: 2003-05-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G19990432)和中国科学院知识创新项目(KZCX2-SW-125)资助。

作者简介: 朱炳泉, 男, 1940 年生, 研究员, 主要从事同位素地球化学、壳幔相互作用与成矿作用研究; E-mail: bqzhu@gig.ac.cn。

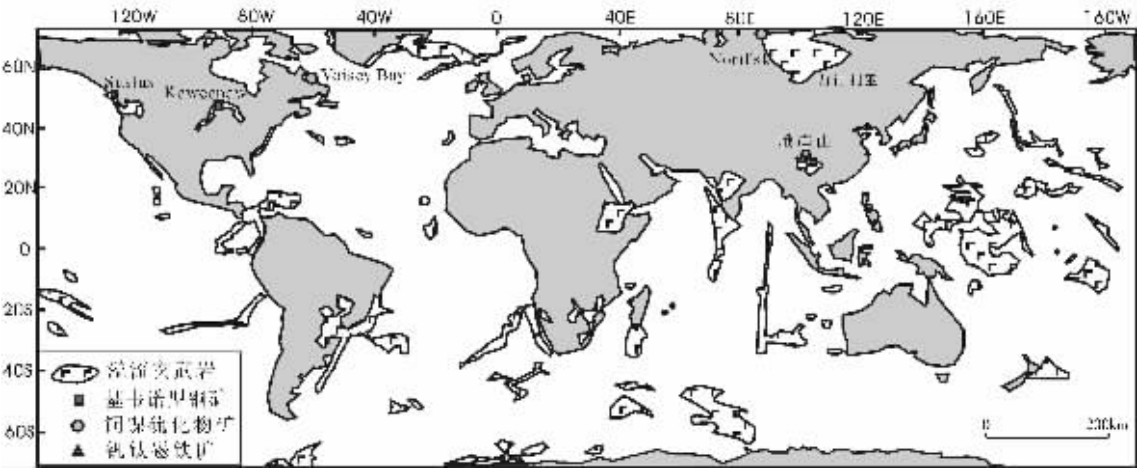


图 1 全球溢流玄武岩省及主要类型矿床的分布

Fig. 1 Global distribution of flood basalt provinces and related major deposit types

表 1 全球主要溢流玄武岩省的形成时代与时空分布^[3,5-8]

大火成岩省	形成时代 (Ma)	地层边界时代(Ma)	喷发期间 (Ma)	体积 (10 ⁶ km ³)	地域
Columbia River	16 ± 1	早/中-中新世 16.4	~ 1 (90%)	0.25	美国西部
Ethiopia	31 ± 1, 37 ± 1	早/晚-更新世 30	~ 1	~ 1.0	埃塞俄比亚
North Atlantic	57 ± 1, 60.5	古新世/始新世 54.8 (57.9)	~ 1	>1.0	北大西洋
Deccan	66 ± 1	白垩纪/古近纪 65.0 ± 0.1	~ 1	>2.0	印度
Madagascar	88 ± 1, 94 ± 1	森诺曼阶/土伦阶 (K ₁ /K ₂) 93.5 ± 0.2 (89 ± 0.5)	~ 6 ?	?	马达加斯加南
Kerguelen	110, 85 ~ 95, 38 ~ 82		>10	~3	西南印度洋
Rajmahal	116 ~ 118	阿普第阶/阿尔布阶 (K ₁) 112.2 ± 1.1	~ 2	~2.5	印度东部
Ontong Java	120 ~ 124, 90	早/中白垩纪	4	~5	西太平洋
Parana-Etendeka	132 ± 1	侏罗纪/白垩纪 142 ± 2.6 (132 ± 1.9)	~ 1 or ~ 5?	>1.0	巴西
Antarctica	176 ± 1, 183 ± 1	阿连阶/巴柔阶 (J ₁ /J ₂) (176.5 ± 4)	~ 1?	>0.5	南极
Karoo	183 ± 1, 190 ± 3	早/中-侏罗纪 180.1 ± 4	0.5 ~ 1	>2.0	南非
Newark	201 ± 1	三叠纪/侏罗纪 205.7 ± 4	~ 0.6	>1.0?	北美洲东
Siberian	249-251	二叠纪/三叠纪 248.2 ± 4.8	~ 2	>2.0	西伯利亚
峨眉山	253.4-250.2 ~ 236	二叠纪/三叠纪 248.2 ± 4.8	~3-22	~0.25	中国西南
Antrim	513 ± 12, 508 ± 2	寒武纪/奥陶纪			澳大利亚
Bangemall	1070	中元古代 / 新元古代 1050	?	~0.25	澳大利亚
Keweenaw	1109 ~ 1087	中元古代 / 新元古代 1050	2-22	~0.42	美国北部

板块之间的拼接线,或具有不同岩石圈结构块体之间的结合线。隐性地球化学边界出现于造山作用弱的地区,地球化学边界可以与地表不明显的地幔深断裂有关。有时甚至不能确定是否有重要的构造线,如滇黔边界存在一条北西走向构造隐性(无明显的主构造线)的地球化学急变带^[9-10](图 2)。该带两侧从滇东至黔西岩石圈厚度从薄(<150 km)至厚(>150 km),而地壳厚度从厚(>47 km)至薄(<47 km),表明岩石圈存在着明显的不连续面。约占 2/3 面积的东区峨眉山大陆溢流玄武岩正是沿着这一岩石圈结构的薄弱带,形成火山口分布呈线性排列(云南鲁甸、宣威和贵州威宁、盘县等地)的裂隙式喷发。在滇东至黔西峨眉山玄武岩厚度从 1 500 m 急剧下降至 200 m

以下,而二叠系底部茅口组灰岩厚度急剧增加,标志着沉积环境的急剧改变也是受岩石圈不连续界面所控制。峨眉山大陆溢流玄武岩古火山口的分布及其对应的沉积环境急剧改变是滇黔边境铜成矿带的一级控制因素。

同位素体系填图表明印支与扬子块体之间的地球化学边界并不是哀牢山造山带(新生代左旋走滑带),而是穿过楚雄盆地,沿双柏、姚安、宾川、丽江一线,与扬子块体向印支块体陆-陆深俯冲的起始位置相一致^[10]。这一地球化学边界穿过了西区峨眉山玄武岩,同样也标志着裂隙式喷发的古火山口通道的走向。由于康滇古陆南北岩石圈结构性质也存在显著差异,因此在会理—宾川之间也存在一个岩石圈不连续

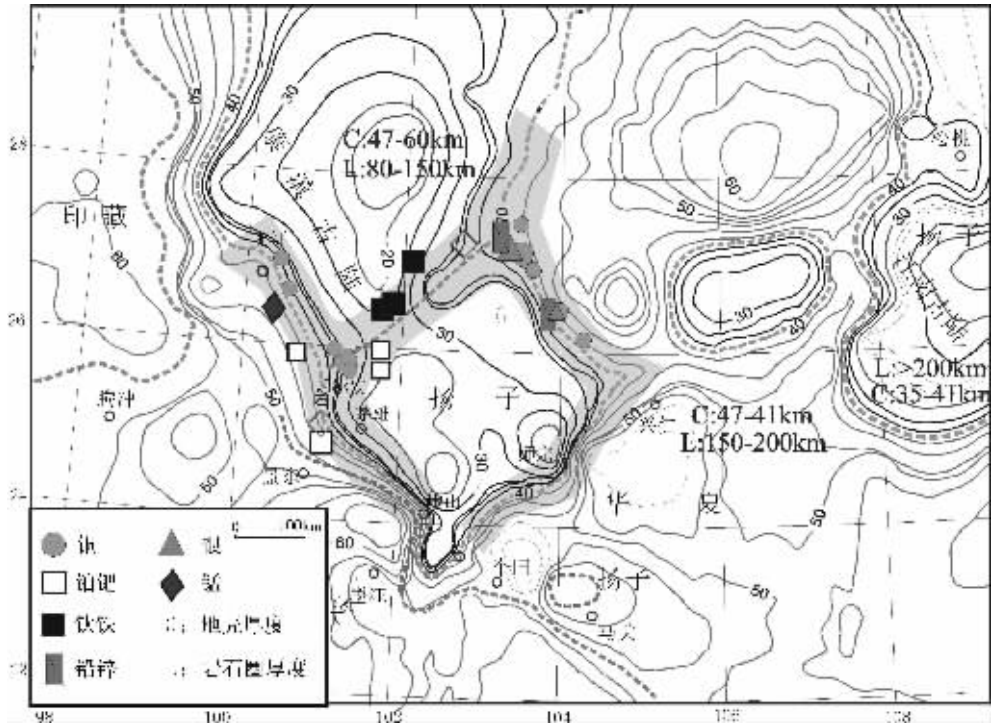


图 2 滇黔地区地球化学块体、地球化学急变带(虚线)、峨眉山溢流玄武岩喷发通道(阴影区)及其相关矿产(图中等值线为铅同位素矢量值)

Fig. 2 Map showing geochemical blocks, geochemical steep gradient zones (heavy dotted lines), eruption channels of the Emeishan flood basalt (shaded area) and related ore deposits (Contours in the map represent lead isotope vector values)

面。从图 2 可见,这一不连续面已被同位素填图初步证实。因此在鲁甸—金阳—会理之间和姚安—丽江—攀枝花之间形成了三叉拼接位。两个三叉拼接位恰好位于东区和西区峨眉山玄武岩的中心部位,可能代表了两个主要的喷发中心。

目前已发现与峨眉山大火成岩省及其上覆地层有关的铜、钒钛铁、铂—钯、镍、铅锌银、锰等矿床明显位于由地球化学急变带所揭示的岩石圈不连续界面上,特别是三叉拼接位区(图 2)。

3 古火山口相岩石组合特征

由于溢流玄武岩省的主要成矿作用与古火山岩浆通道密切相关,因此识别火山口将是资源勘查的首要任务。虽然卫片和地貌特征分析可以提供古火山口的一些证据,但对于前中生代的古火山口的确定,更主要的是靠火山口相岩石组合(火山碎屑岩和气孔状熔岩)特征识别^[4]。有人认为峨眉山溢流玄武岩喷发没有确定的火山口。这种看法是不正确的。野外观察表明峨眉山玄武岩表明裂隙式喷发产生的火山口证据是十分明显的。滇黔边境离火山口近处(鲁甸向斜、茂林向斜、迤车向斜和乌蒙山向斜)的火山碎屑岩均普遍存在以下的岩石组合。

火山弹和抛射岩块:火山喷发时,由于高的气体压力使岩浆团块以及携带的岩石圈岩块,或两者的结合体被抛射到空中再降落形成火山弹和抛射岩块(>32 mm 至米级巨块)。在偏中酸的火山岩浆喷发时,由于岩浆黏度大,含气体量多易形成旋卷式火山弹。对于偏基性的溢流玄武岩则常形成由内胀外缩机制产生的胀裂式(火山学上称面包壳式)火山弹,即具有近垂直交错深裂纹的熔岩椭球体,以单独的大岩块出现在凝灰岩层中。由于裂纹很深,切至椭球体中心部位,因此明显区别于枕状熔岩和玄武岩球状风化体。

火山角砾岩:早期阶段形成的火山岩或围岩的角砾碎块(4 mm)被后期的火山喷发带出,并被凝灰质、碳泥质细碎屑物质胶结,形成火山角砾岩。它们与火山弹和抛射岩块一样均位于火山喷发通道附近,并不受地貌限制,无定向排列性和分选性。火山爆发形成的角砾岩区别于熔岩流上部和前缘由于气体释放、固结挤碎或进入水体冷却形成的角砾岩。这些角砾岩成分均一,基质也仍然是熔岩物质,角砾有定向排列性。

火山集块岩:火山集块岩类同于火山角砾岩,含火山角砾、岩块和火山弹,但角砾有一定的磨圆度,堆积较密集。胶结物主要为火山灰。在火山口附近的集块岩的集块无定向性

排列性和分选性。远离火山口的地方分选性增加。

熔结凝灰岩:含气体多和处于热粘结状态的角砾凝灰岩(以火山灰、玻屑为基质),在气体浮力作用下可从火山口运移到周边的低洼地,形成熔结凝灰岩。由于气体的析出,形成特征的拉长的气孔通道和杏仁状气孔。由于含有微细的火山角砾和火山灰,因此区别于气孔状熔岩。

火山灰和尘埃沉积:由微细粒的火山碎屑(0.1 mm)沉降形成的堆积物,能用手指压成粉末,无颗粒感。虽然火山灰可以漂移到离火山口上百千米的地方,但厚层的纯火山灰沉积一般均在火山口附近,并被其他火山碎屑岩覆盖而保存下来。

4 古火山通道的岩浆分异与不同的成矿类型

与溢流玄武岩有关的铜镍铂钨硫化物矿床形成过程已被广泛研究和得到共识^[4]。成矿经历以下过程:(1)热地幔柱上涌;(2)产生贫硫富集金属的玄武岩质岩浆,并上升到地壳中形成岩浆房;(3)岩浆房中岩浆与地壳物质混合,硫从围岩中加入到岩浆中;(4)当硫饱和时,产生液相硫化物,由于硫化物液滴密度比玄武岩浆大而下沉到岩浆房底部;(5)硫化物液滴分离使Ni-Cu-PGE从岩浆中析出,形成硫化矿床。

在间隙式火山喷发期间,当地壳环境仍然贫硫时,火山通道内从封闭到开放的岩浆房具有很高的岩浆分异作用。在低氧逸度的封闭岩浆房,岩浆向高铁、高钛、贫硅方向演化(Fenner趋向)。但在高氧逸度的开放岩浆房,岩浆向低铁、低钛、富硅方向演化(Bowen趋向)^[13]。因此火山口附近的火山熔岩与角砾岩在小范围内岩石化学组成变化可以很大。如鲁甸地区火山通道SiO₂含量37%~63%,与TiO₂(1.2%~5.4%)、TFeO(全铁)(2.6%~22.6%)之间存在好的线性反相关,具有从苦橄质到安山质岩石的化学组成变化。滇黔边境非矿化区的峨眉山玄武岩则具有较稳定的化学组成(SiO₂为48.3%~49.4%,TiO₂ 3.9%~4.3%、TFeO 3.3%~13.8%),位于反相关趋向线的中心。高钛高铁系列岩石为形成钒钛磁铁矿提供了成矿条件。而低钛的拉斑-安山质岩石可以使铜发生高度富集^[14-15],部分岩石可以成为含粒状铜的富矿石(铜含量可高达3%~14%),为自然铜-氧化铜-银矿床形成提供了条件^[12,13]。

5 火山热液交代变质现象和同生热液成矿作用

虽这一类型矿床的形成存在红层淋滤、变质热液和火山同生热液说之争,但对于围岩蚀变现象是存在共识的。变质热液说认为可以划分出变质相带,而同生热液说认为是快速不平衡的热液交代作用,不存在相带。作者认为铜矿化主要与火山喷发后的同生热液活动有关。系统认识火山热液交代变质现象是找矿勘查工作中另一个需要关注的重要问题。Keweenaw半岛的Portage火山岩存在典型的低级交代变质作用,也是最早确定低级变质岩相划分指标(低绿片岩相、葡萄石/绿纤石相和沸石相)的地方^[16-17]。滇黔边境铜矿化区与

溢流玄武岩有关的铜矿化一样,也出现温度从高到低,即从低绿片岩相到沉积成岩阶段的热液交代变质作用,可以分以下4个阶段,但在地域难于划分出变质相带。

低绿片岩相:在二叠纪玄武岩和宣城组地层之间出现了阳起石化、绿泥石化、绿帘石化和沥青化等,表明热液交代变质在350~450°C^[18]。沥青的反射率在1.6%~1.9%,表明变质温度T_{max}也在400~450°C^[19]。美国Keweenaw铜矿也广泛存在绿泥石化、绿帘石化和沥青化;沥青的T_{max}在410~420°C^[20],与滇黔边境铜矿床十分相似。显然,这样的温压条件是300~500 m的上覆三叠系地层埋深变质不能达到的。

葡萄石-绿纤石相:这些矿物也属于沸石类,但它们的变质温度制约在270~350°C。美国KEWEENAW铜矿有广泛的葡萄石-绿纤石化和玉髓化。在鲁甸地区铜矿床中存在绿纤石化,而在富源—盘县一带的铜矿化带中可以观察到强的葡萄石化。滇黔边界浸染状浊沸石化和硅化则很普遍。浊沸石的形成温度范围在180~350°C^[21]。与葡萄石-绿纤石处于相近的温压条件。

沸石相:这一低温蚀变相在100~270°C,主要是指片沸石、方沸石等的形成温度。在火山碎屑岩和气孔状熔岩中呈不规则脉体、晶洞状或浸染状出现的褐红色片沸石化代表了晚期阶段的交代作用。

碳酸盐相:在更低温的条件下(<100°C)则出现菱铁矿-方解石化。在地层有一定量硫时形成辉铜矿、黄铜矿、黄铁矿等硫化物。

前3个阶段均伴随着自然铜-氧化铜矿化。自然铜与沥青密切共生,而沥青的R₀在手标本范围变化很大,显然不是埋深变质所产生的。因此,第一阶段和第二阶段形成浸染状自然铜-氧化铜矿石,是较短时间内在强烈的高温高压热液作用下产物,与火山喷发后的同生热液活动是密切相关的。在第三阶段则形成板片状和网脉状自然铜,是较长时间内低温成矿作用的产物。在第四阶段可以形成块状自然铜、辉铜矿脉状矿石。在滇黔边境和Keweenaw半岛,这几个阶段的成矿十分相似。自然铜、氧化铜与铜硫化物矿化的出现与不同的类型的蚀变矿物密切共生。这与不同的热液组分密切相关。有机介质导致的强还原环境产生自然铜矿化,并伴随沥青化、浊沸石化与绿泥石化;硅酸介质导致氧化铜沉淀,与阳起石化、沸石化和硅化相伴随;而少量铜硫化物的出现常伴随着碳酸盐化、硅化和绿帘石化,标志着热液中有时有S²⁻、CO₃²⁻、Cl⁻等负离子的存在。

6 铜矿床的类型问题

与溢流玄武岩省有关的铜矿床一类是大家较熟悉的铜镍硫化物型(基性-超基性侵入相中),另一类是Keweenaw自然铜型(中、基性火山岩相中)。密歇根Keweenaw铜矿具有以下主要特征,在全球具独一无二性:(1)以自然铜为主要矿石,并含自然银;(2)产于裂谷环境大陆溢流玄武岩与上覆

碎屑岩之间的向斜构造;(3)成矿与从低绿片岩相至沉积成岩阶段(400~100℃)的热液交代变质有关;(4)有机质对成矿起着重要作用。滇黔边境的铜矿化明显具有以上4个特征。因此 Keweenaw 铜矿应作为一个特定的类型来看待,即大陆溢流玄武岩型自然铜矿床。

1996 年加拿大 Lefebure 与 Church 等人将火山岩与陆相或浅海相红层沉积接触带之间的铜矿化(包括 Keweenaw 半岛的铜矿)统称为火山红层型铜矿^[2]。这一类型的划分虽对与火山岩和沉积岩接触带的铜矿形成的地质环境和产状作了归纳,但没有限定火山岩的成因类型,沉积岩的沉积环境以及铜矿物的产出形式。因此他们除了将 Keweenaw 半岛的自然铜矿床作为该类型划分的基础外,还将智利与大陆边缘矿岛弧火山岩(安山岩—流纹岩)有关的铜—银矿(Mantos, Ivan 与 Altamira 等)划为此类矿床。这些均为开采中的大型矿床,因此也是该类型矿床确定的主要依据对象。但这些矿床矿石为硫化物—氧化物型,无自然铜,产出的地质环境也不是大陆溢流玄武岩。因此多数学者仍将它们视为斑岩型或非典型斑岩型铜矿。其他的一些矿床实例来自加拿大应属哥伦比亚和美国阿拉斯加的一些中、小型矿床或矿化点。这些矿床中 Sustus 正在进行勘探,目前已探明储量为 22~30 万 t,为中型矿床。但该矿床以辉铜矿为主,自然铜极少,上覆地层为浅海相泥质—碳酸盐沉积,因此与 KEWEENAW 半岛的铜矿有显著差别。其余只是具有勘探远景,均未进行勘探。同时对这一类型铜矿铜的来源认为是来自红层,而不是火山岩。因此火山红层矿类型的提出是不很恰当的。

产于东欧克拉通 Volyno-Podolian 新元古代大陆溢流玄武岩中的铜矿床以自然铜为主,含矿地质特征与 Keweenaw 和滇黔边境则十分相似,但矿床规模较小,品位也低^[2]。

7 铜—镍—铂—钯—油气一体化勘查

美国地质调查局 1997 年以来在密西根中大陆裂谷开展了两个资源勘查计划;一个是铜、镍、铂、钯勘查,另一个是油气勘查。由于近期发现的西伯利亚 Noril'sk Ni—Cu—PGM 以及加拿大拉布拉多 Voisey 湾 Ni—Cu—Co 大型硫化物矿床均与地幔柱环境下溢流玄武岩有关。Keweenaw 大陆裂谷不但具有形成自然铜矿床(地壳贫硫,并富有机质)的条件,同时也具有形成地壳富硫形成 Ni—Cu—PGM 硫化物矿床的条件^[24]。

在 Keweenaw 半岛 White Pine 铜矿的钻探中已发现了油气。密歇根中大陆裂谷溢流玄武岩上部的 Nonesuch 组黑色页岩富含有机质。沥青反射率确定的 Tmax 为 418~427℃,表明生油进入成熟期^[24],具有油气勘探前景。

峨眉山溢流玄武岩省铜、镍、铂、钯找矿已取得了一定的进展,如金山山、杨柳坪的铂、钯,力马河的镍矿,滇黔边境的铜矿床(图 1)。它们均与玄武岩喷发的通道有关。应注重在火山胫相侵入岩和具有 Fenner 岩浆分异趋向的火山岩找镍、铂、钯,而在具有 Bowen 趋向的火山岩找铜、银、钯。在滇黔边

境峨眉山玄武岩与宣威组之间铜矿化地段有大量的沥青化出现。沥青反射率($R_0=1.6\% \sim 1.9\%$)所反映的 Tmax 为 350~450℃与 Keweenaw 铜矿区相一致,也处在生油成熟期。在威宁峨眉山玄武岩所构成的乌蒙山向斜中出现很厚的油页岩—沥青砂岩层。楚雄盆地“砂岩型铜矿”中(大姚、牟定)也存在沥青化,反射率与滇黔边境一致。Tmax 表明这些沥青是由干酪根热液裂解形成(壳幔相互作用,200~550℃),而不是从三叠纪至白垩纪地层埋深地温产生的干酪根蒸馏沥青(50~200℃)^[24]。这些沥青也不大可能来自早于早二叠纪以前的地层中。因为在中国南方和西南地区,这些古生代地层所含沥青的反射率 R_0 均在 2.2%~7.6%之间^[24],为过成熟沥青,也不易于运移。因此峨眉山玄武岩喷发产生的同生热液活动既导致了铜的成矿,又导致了界面地层中处于油气的成熟期沥青的形成,两者的结合为自然铜形成提供了充分必要条件。楚雄盆地中“砂岩型铜”的原生矿石富铜贫硫,自深至浅有辉铜矿—斑铜矿—黄铜矿的垂向分带^[24],吻合红层淋滤模式,铜源应来自玄武岩。楚雄盆地的油气勘探表明深部有处于成熟期的厚层沥青,并有油气显示。楚雄盆地是覆盖在峨眉山玄武岩省上最大的盆地,为金属成矿和油气储藏提供了良好的储层和圈闭层。同时地球化学急变带已反映出楚雄盆地位于岩石圈峨眉山溢流三叉通道上。楚雄盆地的资源潜力应引起充分重视。在楚雄盆地深部勘探中应将油气和铜资源勘查结合起来。

东区(滇黔川接壤区)与西区(丽江地区)玄武岩相比,成矿有各自的有利和不利因素。东区低钛高硅系列岩石相对较少,表明富铜岩石占的比例较少。但东区上覆地层为陆相沉积,富含有机质,有利于 Keweenaw 式铜矿的形成。西区低钛高硅系列岩石(富铜系列)相对较多,但上覆地层为浅海相,出现锰矿沉积,缺少有机质,不利于 Keweenaw 式铜矿的形成,然而具有形成 Sustus 式铜矿的条件。

根据云南、贵州、四川省地质调查院有关负责人在峨眉山玄武岩区资源勘查、填图中提出的问题,在作者与他们进行了有益的讨论后,并听取了涂光炽、陈毓川院士、毛景文研究员、冯瑞博士的宝贵意见,写成此文。在此一并致谢。

参考文献(References):

[1] 朱炳泉,张正伟,胡耀国. 滇东北发现具工业价值的火山凝灰角砾岩层控型铜矿床[J].地质通报,2002,21(7):450.
Zhu Bingquan, Zhang Zhengwei, Hu Yaoguo. Discovery of a stratabound Cu deposit of industrial significance in volcanic tuffaceous breccia in NE Yunnan [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (7): 450 (in Chinese with English abstract).
[2] Zhu Bingquan, Hu Yaoguo., Zhang Zhengwei,et al. Discovery of copper deposits with features of the Keweenawan type in the border area of Yunnan—Guizhou Provinces[J]. Science in China(D), 2003, 46(supp): 60~72 (in Chinese).
[3] White R S, Mckenzie D. Mantle plume and flood basalts [J]. J. Geophys. Res., 1995,100: 543~585.

- [4] 成杭新, 谢学锦, 严光生, 等. 中国泛滥平原沉积物中铂、钯丰度值及地球化学省的初步研究[J]. 地球化学, 1998, 27(2): 101~108.
Cheng Hangxin, Xie Xuejin, Yan Guangsheng, et al. Platinum and palladium abundances in floodplain sediment and their geochemical provinces [J]. *Geochemica*, 1998, 27(2): 101~108 (in Chinese with English abstract).
- [5] Harggerty B M. Episodes of flood basalt volcanism defined by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age distribution: correlation with mass extinction[J]. *J. Undergrad. Sci.*, 1996, 3: 155~164.
- [6] Boven A, Pasteels P, Punzalan L E, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the age and evolution of the Permo-Triassic Emeishan Volcanic Province, Southwest China[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2002, 20: 157~175.
- [7] Bowring S A, Erwin D H, Jin Y G, et al. U/Pb zircon geochronology and tempo of the end-Permian mass extinction [J]. *Science*, 1998, 280: 1039~1045.
- [8] Davis D W, Paces J B. Time resolution of geologic events on the Keweenaw Peninsula and implications for development of the Mid-continent Rift system[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990, 97: 54~64.
- [9] Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, Qiu Huaning, et al. Characteristics of Proterozoic basements on the geochemical steep zones in the continent of China and their implications for setting of super large deposits[J]. *Science in China (D)*, 1998, 41(Supp.): 54~64.
- [10] 朱炳泉. 地球化学省与地球化学急变带[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 1~120.
Zhu Bingquan. *Geochemical Provinces and Geochemical Steep Zones*[M]. Beijing: Science Press, 2001. 1~120 (in Chinese).
- [11] Fielder G, Wilson L. *Volcanoes of the Earth, Moon and Mars*[M]. New York: Martin Press, 1975, 49~56.
- [12] Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V, et al. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalt of the Noril'sk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores [J]. *Econ. Geol.*, 1992, 87: 975~1004.
- [13] Sugawara T. Ferric iron partitioning between plagioclase and silicate liquid: thermodynamics and petrological application [J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 2001, 141 (6): 659~686.
- [14] Ripley E M, Brophy J G. Solubility of copper in silicate melts as a function of oxygen and sulfur fugacities, temperature, and silicate composition [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 5027~5030.
- [15] 胡耀国, 朱炳泉, 常向阳. 滇黔边界大规模自然铜矿化的极端成矿条件耦合[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 390~394.
Hu Yaoguo, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, et al. The extreme coupling conditions for the native mineralization on large scale in the border area between Yunnan and Guizhou Provinces, China[J]. *Mineral Deposits*, 2002(Suppl.), 390~394 (in Chinese).
- [16] Yardley B W D. *An introduction to Metamorphic Petrology*[M]. New York: Harlow, 1989.
- [17] Puschner U. Very low-grade metamorphism in the Portage Lake volcanics on Keweenaw Peninsula, Michigan, USA[A]. In: *Metamorphic Petrography*[C]. Basel: University of Basel, 2001, 1~75.
- [18] Sueno S, Cameron M, Papike J J, et al. Tremolite[J]. *American Mineralogist*, 1973, 58: 649~664.
- [19] 贾蓉芬, 刘德汉, 李本超, 等. 碳酸盐岩油气普查与勘探中矿物包裹体及固体沥青的研究[J]. 石油实验地质, 1990, 专辑: 1~52.
Jia Rongfen, Liu Dehan, Li Benchao, et al. Study on mineral inclusions and solid bitumens in oil-gas exploration of carbonates [J]. *Petroleum Experiment Geology*, 1990, Special Issue: 1~52 (in Chinese).
- [20] Palacas J G. Source-rock potential of Precambrian rocks in selected basins of United States [J]. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1997, 2146-J: 127~133.
- [21] Carlos J, Bradley R H. Experimental investigation of laumontite-wairakite- H_2O : A model diagenetic reaction[J]. *American Mineralogist*, 1997, 82: 781~789.
- [22] Lefebure D V, Church B N. Volcanic redbed Cu[A]. In: Lefebure D V. *British Columbia Ministry of Employment and Investment (ed.). Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1-Metallic Deposits*[C]. Open File, 1996, 13: 5~7.
- [23] Shumlyansky L V, Bezugla M V, Gornostayev S S, et al. Peculiarities of the chemical composition of ore mineralization in Vendian traps of the Volyno-Podolian region, Ukraine[A]. In: *Proceedings of the Institute of Fundamental Studies, Kyiv, "Znannay"*[C]. 1999, 130~138.
- [24] Nicholson S W, Cannon W F, Schulz K J. Metallogeny of the Mid-continent rift system of North America [J]. *Precambrian Research*, 1992, 58: 355~386.
- [25] Mossman D J. Solid bitumens: an assessment of their characteristics, genesis, and role in geological processes[J]. *Terra Nova*, 1995, 8: 114~128.
- [26] 陈根文, 夏斌, 钊志洪, 等. 滇中地区砂岩铜矿矿物分带特征及其成因意义[J]. 地质地球化学, 2002, 30(1): 41~45.
Chen Genwen, Xia Bin, Zhong Zhihong, et al. Characteristics and genetic significance of metal mineral zonation of sandstone-hosted copper deposits in Chuxiong, Central Yunnan [J]. *Geology-Geochemistry*, 2002, 30 (1): 41~45 (in Chinese with English abstract).

On mineral exploration in the Emeishan flood basalt province

ZHU Bing-quan

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Global correlation indicates that there occur three relatively complete magmatic–hydrothermal minerogenic series in the Emeishan flood basalt province. The outpouring conduits for fissure eruption of the Emeishan basalt was controlled by the discontinuity of the lithospheres revealed by the geochemical boundary. The preservation of a complete rock association of paleovolcanic vent facies in these districts provides an important clue to mineral exploration. There were three magmatic fractionation trends in magma chambers: sulfur–poor, low–oxygen fugacity magma, sulfur–poor, high–oxygen fugacity magma and sulfur–rich magma, which produced three magmatic minerogenic series (Cu–Ni–PGE, Cu–Ag–Pd and Fe–Ti–V). Synvolcanic–hydrothermal activity gave rise to copper minerogenic series from low greenschist and prehnite to zeolite facies (from 400°C to 100°C). Hydrothermal fluids of different compositions controlled the formation of native copper, copper oxides and copper sulfides. Comparison of the vitrinite reflectance R_0 indicates that bitumen that played an important role in controlling native copper precipitation was derived from hydrothermal pyrolysis of organic matter at the P_2 – T_1 boundary and that organic matter was at the mature stage for oil genesis. Therefore, a package exploration for Cu, Ni, Pt–Pd and petroleum can be launched, as is the case with the Midcontinent Rift in Michigan, United States.

Key words: flood basalt; geochemical steep gradient zone; Cu, Ni, Pt–Pd mineralization