

· 非主题来稿 ·

川南普格暗色团块玄武岩中的沥青与自然铜 特征及其成因

张良钜 李鹏飞 阮青锋 梁洁 杨育富 李东升 曾伟来

(桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 沥青、自然铜常常与石英出露于杏仁状玄武岩暗色团块的矿物颗粒间或间隙中。自然铜的晶出是在成矿热液中的有机质几乎裂解为沥青和天然气之后。自然铜与沥青的产出互为负相关关系,即暗色团块中的沥青或沥青与石英越发育,沥青中的自然铜含量越低,其附近或周围的自然铜与石英也越发育,但这两者晶出的时间与空间间隔极短,它们之间形成的先后关系依次为:石英→沥青→自然铜。沥青的碳同位素、化学组成及红外光谱测试表明,暗色团块及裂隙石英脉中玄武岩捕虏体中的沥青是生物成因的石油沥青。包裹体测温与拉曼分析给出,成矿热液中的有机质需在较高温下($>350^{\circ}\text{C}$)才能裂解为沥青与天然气(CH_4),成矿热液温度越高,有机质成熟度就越高,沥青中的有机碳含量也越高,残存在沥青中的自然铜含量就越低。

关键词: 杏仁状玄武岩;暗色团块;沥青和自然铜;川南普格

中图分类号: P578.1⁺1; P588.14⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)06-0925-08

Characteristics and genesis of bitumen and natural copper in Puge dark mass basalt, southern Sichuan

ZHANG Liang-ju, LI Peng-fei, RUAN Qing-feng, LIANG Jie, YANG Yu-fu, LI Dong-sheng and ZENG Wei-lai
(College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Bitumen, natural copper and quartz generally occur in the interstitial site of mineral grains in dark mass in amygdaloidal basalt from Puge County, southern Sichuan. Natural copper formed after the decomposition of organic matter into bitumen and gases. The authors detected that the content of bitumen and that of natural copper exhibit negative correlation. In the dark clumps, the higher the bitumen and quartz, the lower the copper, but the higher the natural copper and quartz in nearby places, and the interval of crystallization time and space between natural copper and bitumen is very short. The commonly recognized sequence is quartz → bitumen → native copper. The carbon isotope and infrared spectrum suggest that bitumen is of biogenesis and originated from the carbonate rocks in Permian strata. The results from the homogenization temperature of inclusions in quartz and Raman spectrum indicate that the organic matter in the hydrothermal fluids can be decomposed into bitumen and natural gas (CH_4) under the temperature $>350^{\circ}\text{C}$; the higher the temperature, the higher the maturity of organic matter, the higher the content of organic carbon in bitumen, the lower the natural copper content in residual bitumen.

Key words: amygdaloidal basalt; dark mass; bitumen and natural copper; Puge County, southern Sichuan

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41562003, 41172054)

收稿日期: 2017-02-03; 接受日期: 2017-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41562003, 41172054)

作者简介: 张良钜(1949-), 男, 教授, 研究方向为矿物形貌-成因矿物学, E-mail: zljggig@glut.edu.cn.

前人对滇黔交界处及滇东北鲁甸县的玄武岩铜矿有过研究报道。毛景文等(2003)、李厚民等(2004a, 2004b)对玄武岩铜矿的有机质组成、结构及成因、碳氧同位素与地球化学特征进行了研究,认为峨眉山玄武岩铜矿成矿作用与盆地流体对流循环及从玄武岩中萃取成矿物质有关,有机质对成矿流体的还原和对成矿物质的吸附作用可能是成矿的重要机制,沥青来自深部原油经热液变质分解而成,自然铜的沉淀与有机质有关,含铜流体经沥青和有机碳富集卸载成矿。张正伟等(2004)对峨眉山玄武岩组铜矿与层位关系的研究认为,滇黔边界铜矿赋存于二叠系峨眉山玄武岩组特定的火山岩层位,形成作用与有机质有关,沥青质铜矿化类型在区域上分布广泛,自然铜、黑铜矿等矿物赋存于硅质沥青中。张良钺等(2013, 2015a, 2015b)通过对川南普格杏仁状玄武岩中的沥青微形貌研究,认为沥青的螺旋纹表明沥青是由热液相或气相的有机质转变为固相,沥青的气孔构造是沥青中的天然气(主要是甲烷)从沥青气孔逸出的佐证,沥青碳同位素特征表明沥青具生物成因,有机质来自下二叠统富含生物的碳酸盐,红外光谱特征显示沥青是原油(石油)受热裂解的产物。对川南普格杏仁状玄武岩中的气孔、水晶-葡萄石、水晶-沥青晶洞内的沥青及自然铜、系列铜矿物与铜矿物球粒的地质产出、特征及成因进行了研究,发现沥青主要产于玄武岩中的气孔、晶洞和裂隙中,少量产于石英晶体的锥状体部位,石英晶体中的流体包裹体中甲烷(CH_4)及固态沥青与自然铜包裹体的存在表明沥青和自然铜形成于石英结晶作用的晚期,且自然铜形成于沥青之后,晶洞中的沥青与系列铜矿物为含有机质成矿热液依次结晶形成,其顺序为:玉髓或石英 \rightarrow 石英、沥青与自然铜 \rightarrow 自然铜与葡萄石 \rightarrow 黑铜矿 \rightarrow 硅孔雀石 \rightarrow 孔雀石 \rightarrow 方解石,铜矿物的演化($\text{Cu}^0 \rightarrow \text{Cu}^{1+} \rightarrow \text{Cu}^{2+}$)与含有机质的成矿热液的氧化还原条件及成分演化密切相关。上述研究成果包括沥青的成分与性质、沥青的来源与成因、铜矿化(床)与沥青的关系等,但有关系列铜矿物与玄武岩晚期火山活动、成矿热液演化的关系及沥青在成矿过程中的作用还需做进一步深入研究。笔者新近在川南普格杏仁状玄武岩的暗色团块中又发现了沥青与自然铜产出在暗色团块玄武岩中矿物颗粒的粒间或间隙中,自然铜呈半月形、镰刀状及泪滴形等,其形态受玄武岩中矿物颗粒间隙的控制,沥青中普遍含有周边玄武岩的矿物碎颗粒或尘点状碎

末,这是沥青与自然铜在川南普格峨眉山玄武岩中的另外一种地质产状,迄今未见相关研究报道。笔者在前人及前期研究基础上,对产出在川南普格杏仁状玄武岩的暗色团块中的沥青与自然铜进行了详细的镜下观察及分析测试,以期确定这种地质产出中的沥青、自然铜与杏仁状玄武岩成因关系及自然铜与沥青的成因联系。该研究对揭示成岩与成矿关系、自然铜与沥青联系、自然铜与玄武岩晚期火山活动、成矿热液的演化、沥青在成矿过程中作用都有重要理论意义,同时对普格杏仁状玄武岩中铜矿化(床)找矿有现实的指导意义。

1 地质概况

川南普格暗色团块状玄武岩产于上二叠统玄武岩组($P_2\beta$)中,其下伏地层为下二叠统(P_1)碳酸盐岩,两者之间呈假整合接触。玄武岩组厚度在1 000 m以上,有4个喷发旋回,每个旋回从底部到顶部,其岩石结构构造从致密状 \rightarrow 斑状 \rightarrow 气孔状或杏仁状呈韵律性变化(张良钺等,2015a)。下二叠统碳酸盐岩是富含有机质的生物灰岩(傅家谟等,1983)。本次研究区位于普格县东山乡东方村新银盘垮山(图1)野外产出的杏仁状玄武岩普遍见气孔、杏仁体、晶隙等由火山作用所形成的气孔构造,气孔均被绿泥石、沥青、石英质、碳酸盐、硅铁灰石与自然铜等矿物充填。显微镜下观察杏仁状玄武岩为斑状玄武岩,其斑晶为斜长石、半自形的辉石及橄榄石,基质具典型的交织和间隐、间粒结构,自形的斜长石搭成的三角架间隙被隐晶质、玻璃质、他形粒状辉石、橄榄石充填。玄武岩中普遍见有板条状定向排列的钛铁矿,含量约为1%,板状斜长石的含量约为50%,辉石约为30%,他形粒状橄榄石约为15%(图2a)。垮山杏仁状玄武岩中产出有暗色玄武岩团块,在团块中有沥青及自然铜产出(图2b、2c)。

2 样品制备、测试方法

2.1 样品制备

分析测试样品采自垮山杏仁状玄武岩野外露头(图2b)。将野外采集的石英、玄武岩、暗色玄武岩团块、共生矿物等标本分别加工成薄片、光片及光薄片。沥青样品主要取自暗色团块玄武岩裂隙或附近的沥青团块中,将其进行破碎分选出纯沥青并粉碎

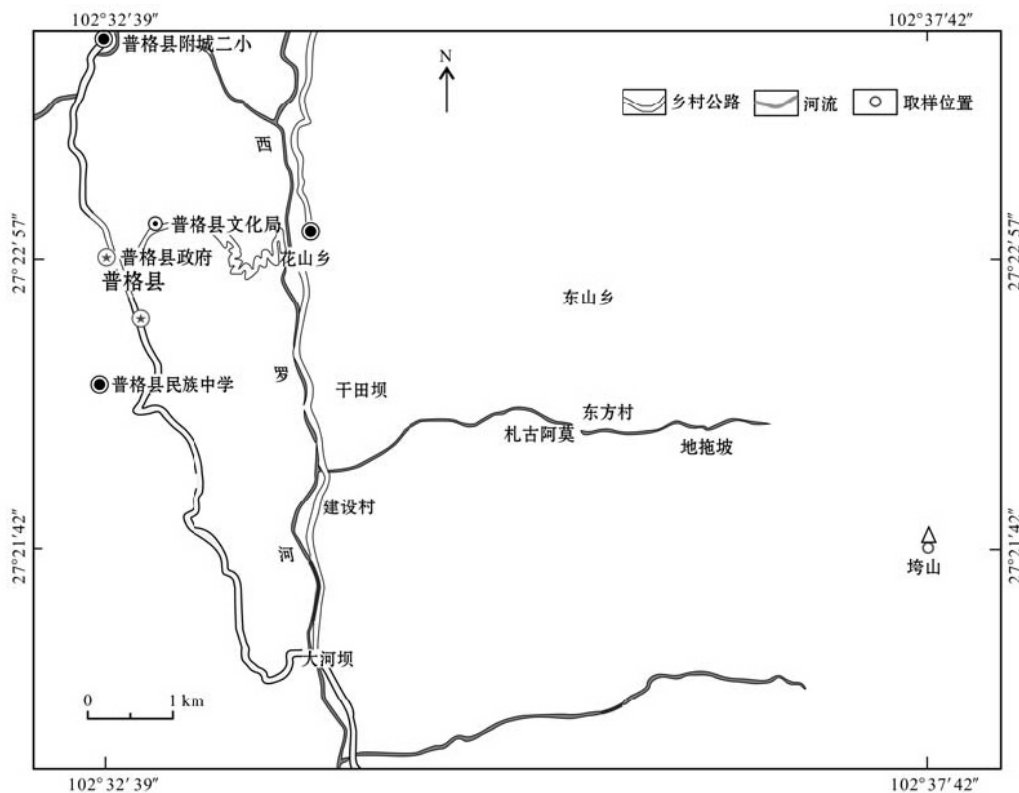


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location of the study area

至100目左右,用于沥青的有机成分、红外光谱及碳同位素测试。石英的光薄片用于包裹体测温与拉曼光谱分析,玄武岩及暗色玄武岩团块的薄片、光薄片主要用于偏光显微镜、宝石显微镜及扫描电镜下对矿物成分、结构、构造以及沥青与自然铜成因关系及光薄片相关矿物相的成分研究。玄武岩及暗色玄武岩团块粉碎至200目,用于化学成分分析,特别是岩石中的有机碳及铜含量的分析。

2.2 测试方法

红外光谱测试在桂林理工大学化生学院的美国 Nicolet 公司 iS10 型傅里叶变换红外光谱分析仪上采用溴化钾压片法进行,波数范围 $4\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 。

沥青的 C、H、S、N 等有机组成测试在桂林理工大学化生学院的 PE2400 元素分析仪(日本岛津 XP6 型)上进行,由于分析仪的条件限制,未进行氧元素分析,但 EDS 分析表明沥青中都含一定量的氧。

沥青的同位素分析在桂林岩溶地质资源环境监督检测中心的 MAT253 型稳定同位素质谱仪上进行,测试温度 $24.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度 45% ,依据 DZ/T0184.1-0184.22-1997 同位素地质样品分析方法。

激光拉曼测试在桂林理工大学地球科学学院测试中心采用 Renishaw inVia 型显微共聚焦激光拉曼光谱仪进行,514.5 nm 氦离子激光器,物镜 $50\times$,光谱扫描范围 $100\sim 3\ 200\text{ cm}^{-1}$,环境温度 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度 $<50\%$ 。

矿物样品的化学成分采用两种测试方法:一是在桂林理工大学地球科学学院测试中心采用日本 JXA-8230 型电子探针显微分析仪完成,加速电压 15 kV ,探针束流 20 nA ,束斑 $5\text{ }\mu\text{m}$,测试过程按照国家标准(GB/T15617-2002)进行;二是在中国有色桂林矿产地质研究院测试中心采用化学分析法分析,环境温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度 40% ,检验方法 GB/T14506-2010 等。

岩石样品化学成分和样品形貌分布特征在桂林理工大学地球科学学院测试中心采用英国卡尔-蔡司显微镜有限公司的 Σ IGMA 型场发射扫描电子显微镜、二次电子及背散射电子成像与 EDS 分析完成。

石英的光薄片两相流体包裹体测温在浙江大学地球科学学院采用 Linkam-THMSG600 型冷热台完成,温度范围为 $-196\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,误差范围为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

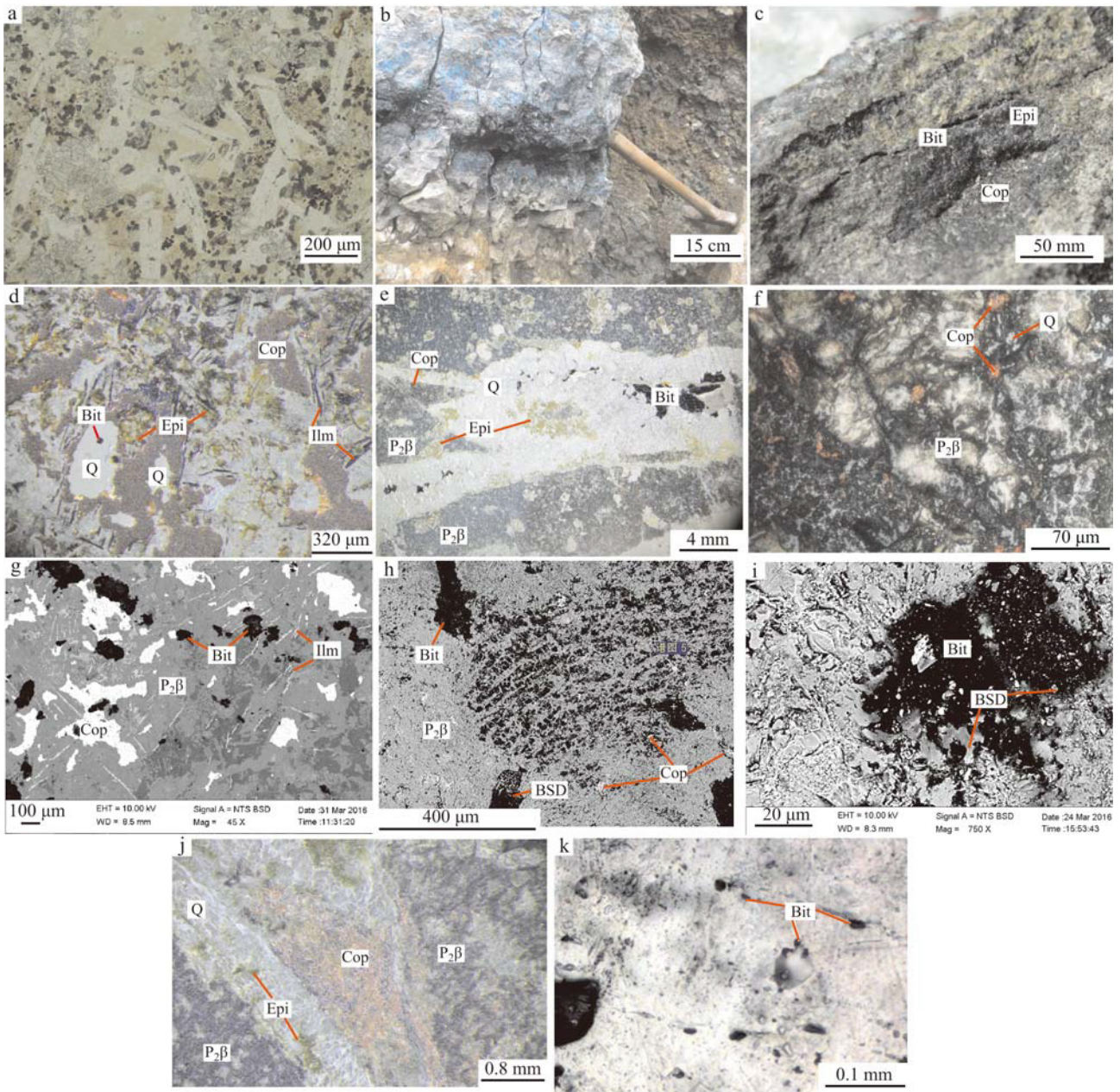


图2 沥青及自然铜照片

Fig. 2 Explanation of photos for bitumen and natural copper

a—玄武岩 (P₂β); b—暗色团块的地质产出; c—玄武岩中的暗色团块; d—暗色团块玄武岩中的石英 (Q)、自然铜 (Cop)、钛铁矿 (Ilm) 及绿帘石 (Epi); e—石英脉中的沥青 (Bit) 与玄武岩扑虏体; f—玄武岩矿物粒间中的自然铜; g—玄武岩中的自然铜与沥青及钛铁矿; h—玄武岩中的沥青与自然铜; i—沥青中的包裹体 (BSD); j—玄武岩扑虏体中的自然铜; k—石英中两相流体与沥青包裹体 (单偏光)

a—basalt (P₂β) (plainlight); b—geological occurrence of the dark mass; c—dark mass in basalt; d—quartz (Q), epidote (Epi) and ilmenite (Ilm) in the dark mass in basalt; e—bitumen (Bit) and trapped body of basalt in quartz-vein; f—inter-grain natural copper in basalt; g—natural copper, bitumen and ilmenite in basalt; h—natural copper and bitumen in basalt; i—inclusions (BSD) in bitumen; j—natural copper in trapped body of basalt; k—bitumen and two-phase fluid inclusions in quartz (plainlight)

玄武岩及暗色玄武岩团块的薄片、光薄片主要在桂林理工大学地球科学学院测试中心及珠宝教育

测试中心采用德国蔡司的 Axio Scope A1 偏反光显微镜及经改装的日本微分干涉显微镜或宝石显微镜

进行观察,用于对物相鉴定、岩石结构构造、矿物共生组合、矿物变化以及矿物之间关系的研究。微分干涉显微镜或宝石显微镜通过调节暗场或亮场或顶光照明或它们之间不同组合照明用于矿物中的包裹体研究及其照相。

3 暗色团块玄武岩特征

3.1 杏仁状玄武岩中的暗色团块

研究区的青灰色杏仁状玄武岩中产出有暗色玄武岩团块,其颜色多为暗褐色至绿黑色,并夹杂有浸染状铜红色自然铜及星点或浸染状黑色沥青(图2b

~2d、2f~2i) 暗色团块多为不规则状,大小在(5~7) cm × (8~10) cm 之间。偏光显微镜下观察到杏仁状玄武岩具有典型的间隐、间粒结构(图2a),岩石蚀变明显,普遍绿帘石化,主要矿物为自形的板条状斜长石,斜长石颗粒间所搭成的三角形间隙为隐晶质、玻璃质以及他形粒状辉石和橄榄石所充填,辉石多蚀变为绿帘石(表1,图2c、2d中的Epi)。杏仁体主要为红色玉髓或绿泥石所充填。岩石中常常见到后期的石英团块,并伴随有自然铜或沥青的产出(图2d)。化学成分分析表明,暗色团块玄武岩中的铜和沥青中的有机碳含量要比青灰色杏仁状玄武岩高出10~15倍(表2),由暗色团块往外至青灰色杏仁状玄武岩,其中的铜及有机碳含量逐渐减少。

表1 绿帘石化学成分的EPMA分析结果
Table 1 EPMA analyses of epidote

$w_B/\%$

样号	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	NiO	MnO	CoO	FeO	Cr ₂ O ₃
lsk-2-b-01	0.13	42.53	18.64	0.00	26.43	0.00	0.06	0.00	5.51	0.00
lsk-2-b-04	0.05	43.07	21.29	0.01	26.79	0.03	0.03	0.04	1.87	0.02
lsk-49-01	0.54	43.99	19.65	0.01	26.21	0.00	0.00	0.00	5.17	0.01
lsk-49-04	0.32	43.28	19.84	0.00	26.16	0.00	0.05	0.00	4.72	0.37

表2 玄武岩化学分析结果
Table 2 Chemical compositions of basalt

$w_B/\%$

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	C	Cu	产状
wks-hd	50.89	10.5	3.74	5.74	6.72	8.53	4.68	0.37	0.12	2.80	0.05	0.26	青灰色玄武岩
xwks-qt	58.16	8.26	0.00	4.59	12.19	3.49	0.59	0.26	0.12	2.05	0.32	5.62	暗色团块玄武岩
lsk-2a			0.65	3.56						1.52	0.29	7.95	暗色团块玄武岩
lsk-2d			4.94	2.61						2.68	0.20	0.36	青灰与暗色过渡

3.2 石英脉中的暗色玄武岩团块捕虏体与沥青

杏仁状玄武岩与水晶-葡萄石晶洞接触部位洞壁的石英(玉髓)脉中(图2e中的Q),有杏仁状玄武岩捕虏体产出,呈暗铜色的尖棱三角状或绿黑色的暗色团块,显然是脉侧的玄武岩被俘虏在石英脉中,捕虏体中产出浸染状铜红色自然铜与星点状黑色沥青(图2j),石英脉中的石英颗粒间则产出大量形状各异的片状沥青,偶见有铜红色自然铜,即沥青主要产于石英脉中的石英颗粒的粒间,自然铜则主要产出在石英脉中的玄武岩捕虏体内(图2e、2j中的Q、Bit及Cop)。

4 自然铜和沥青的特征

4.1 自然铜

自然铜常与石英出露于暗色团块杏仁状玄武岩的矿物颗粒的粒间或间隙中。自然铜呈半月形、镰

刀状及泪滴形等,其形态受玄武岩中矿物颗粒间隙的控制(图2d、2f、2g)。石英常被自然铜所包裹,局部可见自然铜穿插玄武岩中的矿物颗粒或沿矿物颗粒的解理、裂隙中(图2d、2g)。在沥青中也可见少量的星点状自然铜,其成分见表3。由表3知,暗色团块杏仁状玄武岩中的自然铜的铜含量高,平均达97.58%,并有微量的Fe、As、S等成分。

4.2 沥青

沥青产出在石英脉中的石英颗粒间(图2e),或暗色团块杏仁状玄武岩中石英与自然铜接触部位的石英颗粒的边缘(图2d),或自然铜的周边(图2g)或矿物颗粒间、裂隙或解理中(图2g、h、i)。暗色杏仁状玄武岩团块中的沥青普遍含有周边玄武岩的矿物碎颗粒或尘点状碎末(图2h、2i)。在玄武岩或裂隙石英脉中,凡有石英与沥青产出的部位,其周围玄武岩中的矿物粒间、裂隙或解理中必有各种形貌的自然铜产出(图2d、2e、2j),同时被自然铜包裹的玄武岩中

表3 自然铜化学成分的EPMA分析结果

 $w_B / \%$

Table 3 EPMA analyses of copper

编号	Cu	Fe	Cr	As	Ca	S	Si	总量
PT-1-1	97.97	0.04	0.03					98.04
PT-1-2	96.89	0.09	0.04					97.02
GB-1-1	98.66	0.17		0.15	0.04	0.03	0.10	99.15
GB-1-2	96.80	0.21		0.23	0.19	0.16	0.10	97.69

的矿物颗粒都普遍发生绿帘石化(图2d中的Epi)。

为探讨研究沥青的来源、成因及其与自然铜的关系,对赋存在玄武岩暗色团块中的沥青进行了红外光谱、碳同位素分析。

红外光谱测试结果(图3)表明,沥青在3419、3240 cm^{-1} 处出现缔合状态的—OH伸缩振动吸收峰,2925 cm^{-1} 处为亚甲基—CH₂—反对称伸缩振动吸收峰,2870 cm^{-1} 处为亚甲基—CH₂—对称伸缩振动吸收峰,1731 cm^{-1} 处为C=O伸缩振动吸收峰,1637和1400 cm^{-1} 处为C=O键的振动吸收峰,1455 cm^{-1} 为甲基C—CH₃中C—H面内伸缩振动

(变角振动)和—CH₂—中C—H面内伸缩振动(弯曲振动)吸收峰,1384 cm^{-1} 处为—CH₃对称变角振动(剪式振动)吸收峰,1236、1105 cm^{-1} 处为C—C骨架振动吸收峰,698 cm^{-1} 处为苯环上=C—H一面外摇摆振动吸收峰。样品的红外光谱图与沥青的标准图谱(彭文世等,1982)基本一致,与理论分析的石油沥青红外光谱特征(徐寅生,2007;边岩庆等,2010;李伟光等,2012)基本相符。因此,可以断定样品为原油(石油)经热裂解而产生的沥青,与张良钅等(2015a)中的沥青成因一致,只是在吸收峰的位置上有所差异。

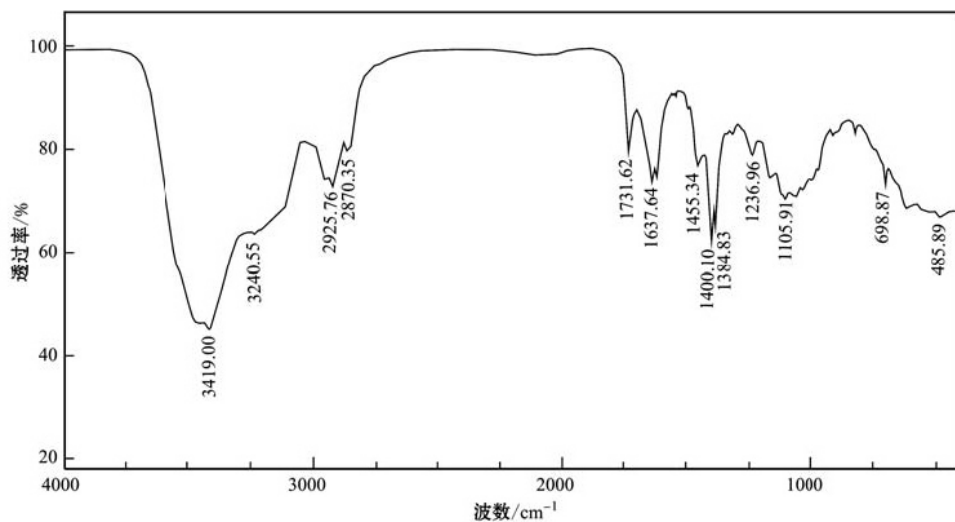


图3 沥青红外吸收光谱

Fig. 3 Infrared absorbed spectra of bitumen

沥青中碳同位素分析结果表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值的分布范围在 $-28.81\text{‰} \sim -29.99\text{‰}$ 之间(表4),与毛景文等(2003)、李厚民等(2004)的碳同位素值基本一致。生物物质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 一般为 $-20\text{‰} \sim -30\text{‰}$, 平均 $-26\text{‰} \pm 7\text{‰}$ (毛景文等,2003),说明本次研究的沥青为生物成因。上二叠统玄武岩的下伏地层下二叠统(P_1^3)富含生物化石的红藻亮晶灰岩是重要的生油岩碳酸盐岩,其碳同位素组成为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} -25.6\text{‰} \sim -30.1\text{‰}$ (傅家谟等,1983)。

表4 沥青的碳同位素组成

Table 4 Carbon isotopic composition of bitumen

样品号	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} / \text{‰}$	备注
TW-1	-29.99	玄武岩中水晶-沥青杏仁体中的沥青
TW-5	-28.81	暗色团块玄武岩中的沥青

4.3 沥青的有机元素组成

沥青的有机元素组成分析结果(表5)显示沥青中碳含量为 $58\% \sim 60\%$, H/C(原子比) ≈ 0.78 。H/

C(原子比)值及碳含量与有机质的热裂解温度有关,有机质受热温度越高,有机质裂解出的沥青越多,沥青中的碳含量越高,相应H/C值越低;相反,

H/C值越大。分析结果表明研究区的裂隙脉及暗色团块玄武岩中的沥青是成矿热液中的有机质在较高温度下裂解的产物。

表5 沥青的C、H、N、S元素含量

 $w_B/\%$

Table 5 The content of carbon, hydrogen, sulfur and nitrogen in bitumen

样品号	C	H	S	N	H/C(原子比)	备注
LSK-1	60.97	3.98	1.02	0.27	0.78	暗色团块玄武岩中的沥青
LSR-2	58.04	3.79	0.94	0.24	0.78	玄武岩裂隙中脉状沥青

5 水晶晶体特征

玄武岩的暗色团块中产出与沥青、自然铜共生的石英(图2d),在暗色团块中有沥青产出时则必有石英,与其共同产出,且在石英的尖锥端部位(菱面体单形晶面)或近六方柱的晶面部位常产出有沥青(图2k)包裹体(张良钺等,2015a,2015b)。图2k的石英中产出两相流体及片状黑色沥青包裹体,沥青产出在两相流体包裹体的周边、附近及石英的裂隙或缝隙中,表明两相流体包裹体为最早形成,而沥青形成在两相流体包裹体之后,大致形成石英结晶晚期或石英结晶之后(图2k),在少数石英的尖锥端部位还产出有自然铜包裹体(张良钺等,2015a,2015b)。石英中两相流体包裹体测温结果(表6)表明,成矿(主要为铜)热液中的有机质受热裂解为沥青的温度达到高温气化(均值363.4℃)阶段,有机质受热温度越高,裂解出的沥青越多,同时有机质受热降解出天然气(主要是 CH_4)越多,两相流体包裹体的拉曼测试也表明石英中的两相流体包裹体含有较多的天然气 CH_4 (图4中的 2917 cm^{-1} 峰),因此水晶晶体两相流体包裹体中的甲烷(CH_4)与沥青包裹体,再一次证明了成矿热液中的有机质是原油,这与沥青的红外吸收光谱(图3)特征是一致的。原油

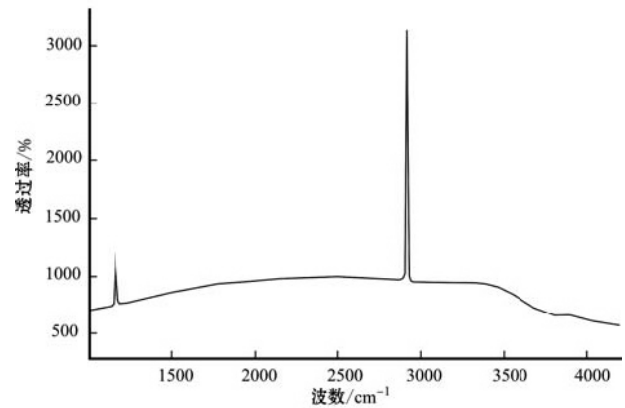


图4 石英中流体包裹体的拉曼光谱

Fig. 4 Laser Raman spectra of fluid inclusions in quartz

(石油)受热演化的温度越高,热降解为天然气与固体沥青就越多(张良钺等,2013),成矿环境也不断向还原环境演化,导致成矿热液中的铜还原为自然铜。同时,成矿热液也促使玄武岩中的辉石发生蚀变形形成绿帘石化。根据暗色团块玄武岩中的石英、沥青、自然铜与绿帘石的产出及矿物组合关系,确定其形成的先后关系为:玄武岩→构造应力→含有机质的成矿热液侵入→石英→沥青→自然铜的形成和辉石的绿帘石化。

6 结论

(1) 沥青的碳同位素、有机元素组成和红外光谱分析表明,川南普格杏仁状玄武岩暗色团块及裂隙石英脉中玄武岩捕虏体的沥青是生物成因,为石油沥青,有机质来自下二叠统碳酸盐岩的生油层。

(2) 据沥青的有机元素组成及水晶晶体的流体包裹体测温数据研究,成矿热液中的有机质需在较高温度下(通常 $>350^\circ\text{C}$)才能裂解为沥青,温度越高

表6 石英晶体中两相流体包裹体的温度与盐度

Table 6 Temperature and salinity of two-phase fluid inclusions in quartz crystal

编号	包裹体类型	点号	气液比	完全均一温度/℃	盐度 [$w(\text{NaCl})/\%$]
Lsk-3	L+V	1	15%	329.3	8.68
	L+V	2	20%	341.3	8.14
	L+V	3	20%	389.2	7.17
	L+V	4	20%	393.8	7.59
平均				363.4	7.89

有机质成熟度越高,沥青中的有机碳含量越高,残存在沥青中的自然铜含量越低。

(3) 自然铜与沥青为负相关关系,自然铜的晶出是在成矿热液中的有机质几乎裂解为沥青和天然气之后。虽然自然铜晶出在沥青之后,但这两者晶出的时间间隔极短。自然铜通常产出在沥青或沥青与石英产出的附近或周边。水晶、沥青与自然铜形成的先后关系依次为:石英→沥青→自然铜。

(4) 据石英中的流体包裹体测温(均一法)数据,成矿热液中的有机质裂解为沥青的温度由暗色团块玄武岩中的沥青→水晶-沥青晶洞中的沥青→水晶-葡萄石晶洞中的沥青,由高依次不断降低。

(5) 玄武岩中的应力构造断裂或裂隙附近周围的暗色团块产出部位是寻找研究地区铜矿化(床)的重要标志。暗色团块中的沥青或沥青与石英越发育,其附近或周围的自然铜也越发育。

References

- Bian Yanqing and Tao Wen. 2010. The molecular structure changes of resin and asphaltene during the degradation of crude oil [J]. *Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit)*, 7(1): 177 ~ 179 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jiamo, Wang Benshan, Shi Jiyang, *et al.* 1983. Evolution of organic matter and origin of sedimentary ore deposits—(1) Origin and evaluation of crude oil and gas [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1(3): 51 ~ 57 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Mao Jinwen, Zhang Changqing, *et al.* 2004. Isotope geochemistry of Emeishan basalt copper deposits in the Northeastern Yunnan and Western Guizhou [J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 232 ~ 240 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Mao Jinwen, Zhang Changqing, *et al.* 2004. The composition, texture and origin of organic matter in basalt-type copper deposits in the Northeastern Yunnan-Western Guizhou area [J]. *Acta Geologica Sinica*, (4): 519 ~ 526 (in Chinese with English abstract).
- Li Weiguang, Duan Yanhong, Yan Luke, *et al.* 2012. Study on measuring method of asphalt use infrared spectrum characteristic of petroleum pitch [J]. *Petroleum Asphalt*, 26(4): 9 ~ 14 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jinwen, Wang Zhiliang, Li Houmin, *et al.* 2003. Carbon and oxygen isotope components in the Permian basalt-hosted copper deposit in Ludian Area, Yunnan: Implication for the mineralization process [J]. *Geological Review*, 49(6): 610 ~ 616 (in Chinese with English abstract).
- Peng Wenshi and Liu Gaokui. 1982. ERD Picture Collection of Mineral [M]. Beijing: Science Publishing House, 15, 94, 97, 352 (in Chinese).
- Xu Yinsheng. 2007. The analysis of infrared spectrum for modified as-

phalty [J]. *Anhui Chemical Industry*, 33(1): 62 ~ 64 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Liangu, Hu Huiyi, Zeng Weilai, *et al.* 2015a. Study on the bitumen and Cu-bearing mineral spherulite from basaltic druse in south Sichuan [J]. *Geological Journal of China Universities*, 21(2): 177 ~ 185 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangu, Qin Minfeng, Zeng Weilai, *et al.* 2015b. The mineralogy and genesis of bitumen and Cu-bearing minerals in amygdaloid basalt from south Sichuan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(2): 127 ~ 135 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangu, Zeng Nanshi, Ruan Qingfeng, *et al.* 2013. Study on the genesis and characteristics of micro-morphologies for bitumen in amygdaloidal basalt at Southern Sichuan-Northern Yunnan area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 523 ~ 528 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhengwei, Cheng Zhandong, Zhu Bingquan, *et al.* 2004. The relationship between the horizon of the Emeishan Basalt formation and copper mineralization [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(5): 503 ~ 508 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 边岩庆,陶文. 2010. 石油的微生物降解过程中胶质沥青质的分子结构变化 [J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 7(1): 177 ~ 179.
- 傅家谟,汪本善,史继扬,等. 1983. 有机演化与沉积矿床成因(I)——油气成因与评价 [J]. *沉积学报*, 1(3): 51 ~ 57.
- 李厚民,毛景文,张长青,等. 2004a. 滇黔交界地区玄武岩铜矿同位素地球化学特征. *矿床地质*, 23(2): 232 ~ 240.
- 李厚民,毛景文,张长青,等. 2004b. 滇黔交界地区玄武岩铜矿有机质的组成、结构及成因 [J]. *地质学报*, (4): 519 ~ 526.
- 李炜光,段炎红,颜录科,等. 2012. 利用石油沥青红外光谱图谱特征测定沥青的方法研究 [J]. *石油沥青*, 26(4): 9 ~ 14.
- 毛景文,王志良,李厚民,等. 2003. 云南鲁甸地区二叠纪玄武岩中铜矿床的碳氧同位素对成矿过程的指示 [J]. *地质评论*, 49(6): 600 ~ 616.
- 彭文世,刘魁. 1982. *矿物红外光谱图集* [M]. 北京: 科学出版社.
- 徐寅生. 2007. 改性沥青红外光谱分析 [J]. *安徽化工*, 33(1): 62 ~ 64.
- 张良钜,胡蕙驿,曾伟来,等. 2015a. 川南玄武岩晶洞中的沥青与铜矿物球粒研究 [J]. *高校地质学报*, 21(2): 177 ~ 185.
- 张良钜,覃敏锋,曾伟来,等. 2015b. 川南杏仁状玄武岩中沥青与铜矿物的矿物学特征及其成因 [J]. *矿物学报*, 35(2): 1127 ~ 1135.
- 张良钜,曾南石,阮青锋,等. 2013. 川南滇北交界处杏仁状玄武岩中的沥青微形貌特征与成因研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 523 ~ 528.
- 张正伟,程占东,朱炳泉,等. 2004. 峨眉山玄武岩组铜矿化与层位关系研究 [J]. *地球化学*, 25(5): 503 ~ 505.