

黔西南卡林型金矿床与古油藏的成因联系:有机岩相学证据

顾雪祥^{1,2}, 章永梅^{1,2}, 吴程赞¹, 彭义伟¹, 李葆华³, 付绍洪⁴, 夏勇⁴, 董树义³

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083
3. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059
4. 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 550002

GU Xuexiang^{1,2}, ZHANG Yongmei^{1,2}, WU Chengyun¹, PENG Yiwei¹, LI Baohua³, FU Shaohong⁴, XIA Yong⁴, DONG Shuyi³

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, WU Chengyun, et al. The genetic relationship between Carlin-type gold deposits and paleo-petroleum reservoirs in SW Guizhou, China: Evidence from organic petrography. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 092-106

Abstract: Two principal types of organic matter are present in the Carlin-type gold deposits in SW-Guizhou: *In situ* alginite and hydrothermally migrated bitumen/pyrobitumen. Autochthonous alginite disseminates in both gold ores and host sedimentary rocks and typically appears as lamellae or bands always parallel to bedding planes. Bitumen appears as discrete grains dispersed in altered and mineralized rocks and is particularly prevalent in proximal zones of high grade ores, but is absent in barren sedimentary rocks. In general, bitumen is intimately associated and/or intergrown with the main stage jasperoidal quartz patches, arsenian pyrite, and arsenopyrite. It also occurs as discrete grains enclosed by the main and late stage quartz, calcite and realgar. Bitumen in gold ores has higher contents of ore-associated trace elements As (4.90%–7.88%) and S (typically 7.48%–15.24%), compared to autochthonous alginite with negligible As and lower S concentrations (2.72%–7.18%). Hydrocarbon fluid inclusions, ranging from those filled only by vapor hydrocarbons (CH₄) to inclusions consisting of a vapor hydrocarbon phase (CH₄) and an aqueous liquid phase, are common in hydrothermal minerals. Bitumen in paleo-petroleum reservoirs is commonly observed filling open spaces (pores and fractures) in Permian reef carbonate rocks, occurring either alone or associated with calcite. It commonly shows fine mosaic texture, suggesting a high thermal maturity. Organic petrographic evidence suggests that gold originated and migrated along with the hydrocarbons in an immiscible, ore-and hydrocarbon-bearing, basinal fluid system. The gold mineralization and hydrocarbon accumulation took place by different depositional and trapping mechanisms.

Key words: petrography; organic matter; pyrobitumen; Carlin-type gold deposit; paleo-oil reservoir; southwest Guizhou

摘 要:黔西南卡林型金矿床中存在两种类型的有机质,一种为具较低反射率的原地藻类体,散布于金矿石

收稿日期:2012-10-16;修回日期:2012-11-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40930423);国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB421003-01);长江学者和创新团队发展计划、高等学校学科创新引智计划项目(B07011)

作者简介:顾雪祥(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事矿床学和地球化学研究。E-mail: xuexiang_gu@cugb.edu.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(1)

和沉积围岩中,多呈层状或条带状平行于层理面产出;另一种为热解沥青/焦沥青,多呈微细粒状产于蚀变及矿化岩石中,尤其是高品位矿石中,与主阶段似碧玉状石英、含砷黄铁矿、毒砂紧密共生或伴生,或呈分散的粒状被主阶段和晚阶段的石英、方解石、雄黄等热液矿物包裹。沥青以含较高的与成矿密切相关的微量元素 As(4.90%~7.88%)和 S(大多为 7.48%~15.24%)区别于原地有机质(不含 As,S 含量 2.72%~7.18%)。金矿石热液矿物中常见气相 CH_4 、气液两相 $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ 等烃类流体包裹体。古油藏沥青多见于二叠系生物礁碳酸盐岩的溶洞、孔隙、裂缝等开放空间中,或单独产出,或与热液方解石伴生,沥青多呈镶嵌结构,显示出高热演化程度的特点。岩相学证据显示,金矿床成矿流体是一种富含金属和碳氢化合物的油水不混溶的盆地流体,金与烃类有机质一起活化、迁移,并通过不同的沉淀和捕获机制成矿、成藏。

关键词:岩相学;有机质;焦沥青;卡林型金矿床;古油藏;黔西南

中图分类号:P618.51;TE122.111 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2013)01-0092-15

卡林型金矿床中富含有机质的现象虽早已为人熟知,但对有机质在金成矿中的作用却一直存在很大争议。由于有机质的存在,卡林型矿石中的金很难用传统的氰化法浸取,因而早期的研究者认为,有机质在成矿过程中主要起还原剂作用,成矿流体中的金通过与围岩中的有机碳反应而沉淀下来^[1-2]。但后来的研究表明,虽然有机碳可以还原吸附氧化性溶液中的金,然而对于形成卡林型金矿床那样的还原性、富含 H_2S 的流体而言,有机碳的还原作用并不是金沉淀的有效机制^[3-4];况且,在美国的许多卡林型金矿床中,有机质在金矿化发生前大多已成熟或过成熟为焦沥青,因此难以对金的还原沉淀起关键作用^[4-5]。然而,Hulen 等^[6-8]则报道了在美国内华达州东北部 Alligator Ridge 地区 Yankee 盆地

的卡林型金矿床中含有丰富的液态碳氢化合物(石油),它们在矿体附近充填于裂隙和空洞,或呈原生、次生包裹体形式产于方解石、雄黄脉中,这些液态烃类被认为作为成矿流体的一部分积极参与了该区卡林型金矿的成矿过程。因此,卡林型金矿床中有机质的作用可能远比人们迄今所认识到的要复杂,不同地区或不同形成演化历史的矿床中有机质对金成矿的制约作用可能也不尽一致。

华南右江盆地西北部的黔西南地区,是我国卡林型金矿床的重要产区之一。包括水银洞、烂泥沟、紫木凶、丫他、板街等在内的众多卡林型金矿床,主要产于二叠系至中三叠统不纯碳酸盐岩和陆源细碎屑岩中,在空间上往往与二叠系生物礁、滩相碳酸盐岩中的古油藏或残余油气、沥青共存或相邻(图 1)。金矿

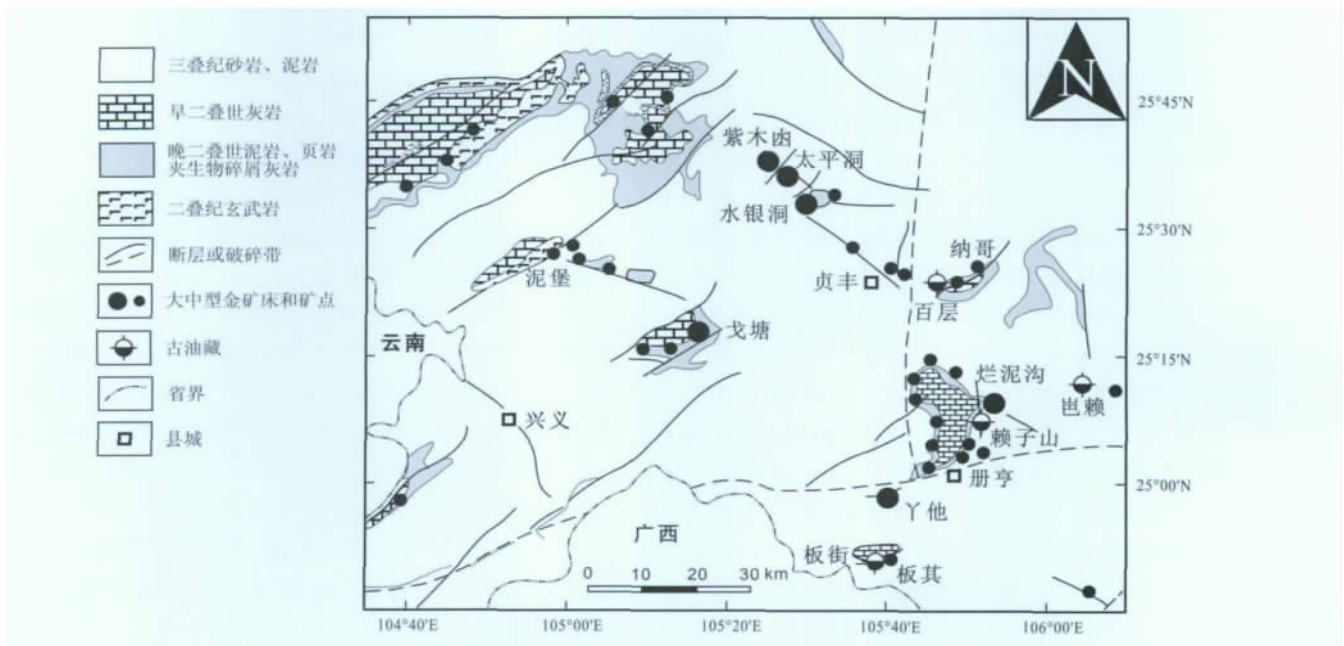


图 1 黔西南地质略图及卡林型金矿床和古油藏分布

(据文献^[9-10]修编)

Fig. 1 Simplified geologic map of southwestern Guizhou showing location of Carlin-type Au deposits and paleo-oil reservoirs

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(1)

床的赋矿围岩和矿石以富含有机质为特征,热液矿物中常含丰富的沥青和烃类有机包裹体,显示出金成矿与油气成藏之间密切的成因联系。本文通过对黔西南卡林型金矿床及伴生古油藏中有机质的岩相学研究,查明不同矿化阶段热液矿物与固体有机质和烃类包裹体的共生组合关系,探讨金成矿与油气的成因联系。

1 地质背景

黔西南地区位于右江盆地的西北部。该沉积盆地是在华南板块南缘早古生代基底之上发育起来的,其晚古生代以来的演化大致经历了性质不同的3个阶段,即被动陆缘裂谷盆地(D_1-P_1)、弧后裂陷盆地(P_2-T_2)和前陆盆地(T_3),印支运动最终使海水退出,全区进入隆升剥蚀阶段^[11-12]。泥盆纪至中三叠世,右江盆地内的沉积作用受一系列NW向和NE向伸展断裂(同沉积断裂)控制,形成了“盆—台(地堑—地垒)相间”的沉积构造格局,其中盆地相区主要为深水硅质岩、泥质岩、粉砂岩、微晶灰岩,局部夹凝灰岩,而台地相区则主要为灰岩和生物礁、滩相碳酸盐岩沉积^[13-14]。晚三叠世,右江盆地内主要为一套以砂岩、粉砂岩为主的浊流沉积。

黔西南的卡林型金矿床产于右江盆地西北部盆地边缘碳酸盐岩台地、盆地内孤立台地(台丘)或生物礁、古潜山及其边缘斜坡相带内,含矿岩系主要为二叠系至中三叠统的不纯碳酸盐岩和陆源碎屑岩(浊积岩)。根据矿体产出与地层和构造的关系,金矿床大致可分为主要受地层层位、古岩溶面或不整合面控制的“层控型”、主要受断层破碎带控制的“断控型”以及层控与断控的“复合型”3类。典型的层控型矿床包括水银洞、戈塘、板其等,矿体主要呈整合的层状、似层状、透镜状产于宽缓背斜或穹窿核部及两翼的上二叠统龙潭组含泥质、粉砂质生物碎屑灰岩和钙质粉砂岩中(如水银洞矿床上部矿体,图2a),赋矿岩石的孔隙度和渗透率高,上下通常被低孔隙度和渗透率的泥质岩、粉砂质泥岩所夹持;部分矿体产于中二叠统茅口组灰岩与上二叠统龙潭组泥岩、泥质粉砂岩之间的不整合面(或古岩溶面)附近(水银洞矿床底部矿体和戈塘矿床,图2a、图2c),该不整合面附近岩石常破碎并普遍发育硅化、碳酸盐化和粘土化,也是区域上Au、Sb、As等低温热液矿床的重要含

矿层位,俗称“大厂层”。在板其金矿床中,似层状、透镜状矿体则产于上二叠统吴家坪组灰岩与下三叠统紫云组泥质粉砂岩间的不整合面上(图2b)。断控型矿床以烂泥沟、丫他最为典型,矿体主要呈脉状、透镜状产于宽缓背斜或穹窿两翼高角度的断层破碎带及其两侧蚀变岩石中,赋矿岩石为中、下三叠统粉砂岩和粉砂质泥岩(图2d)。在紫木凶和太平洞金矿床中,主要矿体顺层产于上二叠统龙潭组、长兴组生物碎屑灰岩和钙质粉砂岩中,部分矿体则受下三叠统夜郎组中的断层破碎带控制,显示出层控与断控的复合型特点(图2e)。

无论是层控型、断控型还是复合型,黔西南的卡林型金矿床在容矿岩石、围岩蚀变、矿石物质组成、金的赋存状态等方面都具有相似的特点。容矿岩石以富含有机碳(质量分数最高可达5%^[20])和成岩黄铁矿,孔隙度和渗透率较高的深灰色至灰黑色泥质、粉砂质生物碎屑灰岩和钙质粉砂岩为特征。围岩蚀变以去碳酸盐化、硅化和黄铁矿化为主,局部见有粘土化(伊利石化)和白云石化。矿石中常见的金属矿物为黄铁矿、含砷黄铁矿、白铁矿、毒砂、雄黄、雌黄和辉锑矿,偶见微量的辰砂以及方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等贱金属硫化物;非金属矿物主要为方解石、白云石、石英和伊利石。金主要以不可见的纳米级包裹金或晶格金形式产于含砷黄铁矿和毒砂中^[9,13-14,21-22],偶见微米级的自然金包裹于浸染状或细脉状的含砷黄铁矿中^[23]。

右江盆地内从泥盆纪至中三叠世海相地层中有多套生—储—盖组合,原始成油条件优越,是我国南方海相油气勘探的重要战略区块^[24]。黔西南地区目前所发现的古油藏及油气、沥青显示主要产于二叠纪台地相或生物礁、滩相碳酸盐岩中,并在空间上多与卡林型金矿床伴生或相邻,如板街古油藏与板其、丫他金矿床相邻,百层古油藏与水银洞、太平洞、紫木凶等金矿床相距不远,赖子山古油藏与烂泥沟金矿床相隔仅约700m(图1)。这些古油藏所赋存的生物礁灰岩中发育大量的钙质海绵、水螅、苔藓虫、古石孔藻及**筳**类等生物化石,孔隙度达5%~14%,平均约为10%^[25]。作为油气裂解产物的大量固体沥青单独或与方解石一起充填于生物礁灰岩的孔隙、裂缝、溶洞和压溶缝合线,沥青的热演化程度高,反射率R_s变化于2.2%~4.3%,H/C比值为0.2~0.5,属焦沥青^[26-27]。

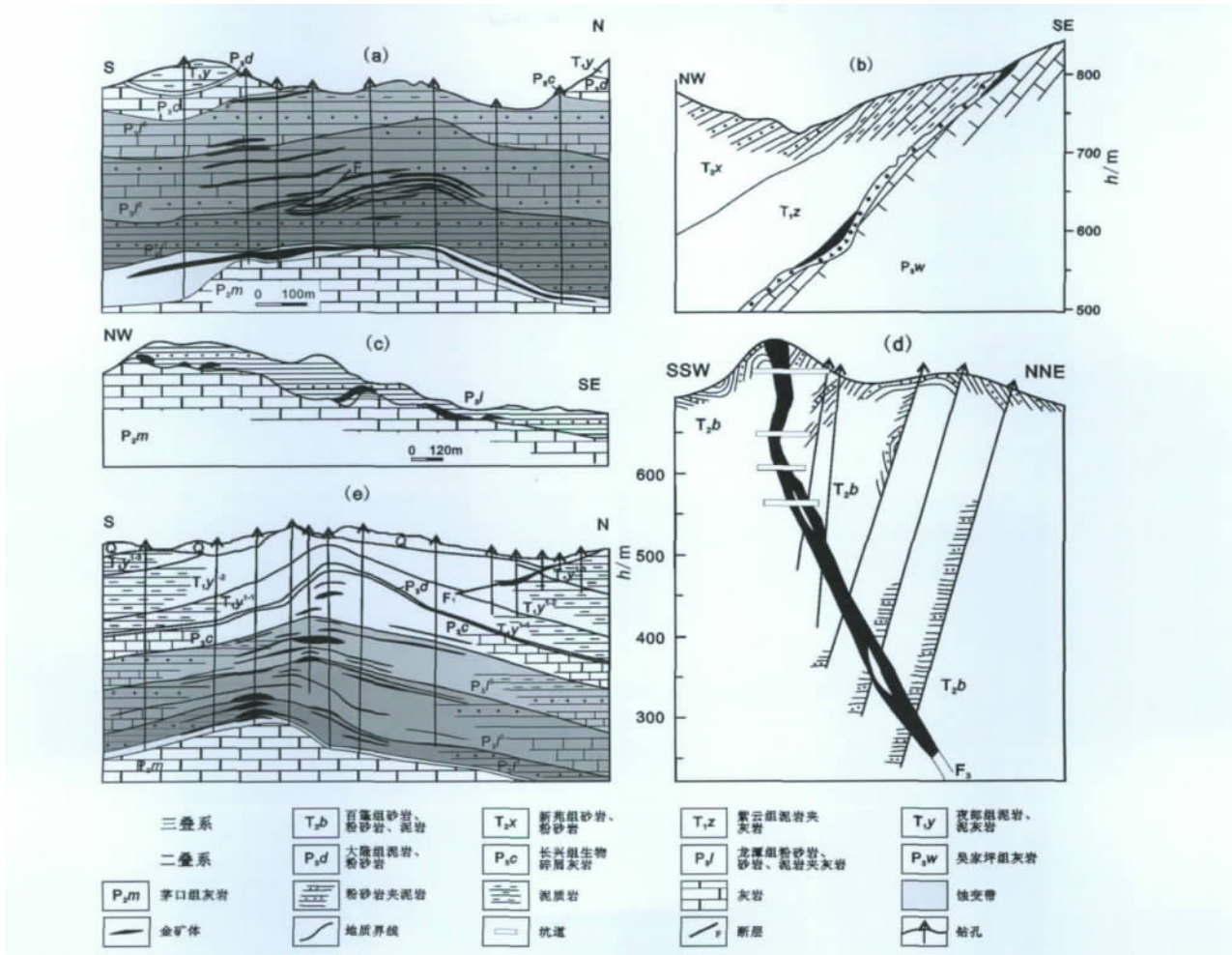


图 2 黔西南典型金矿床地质剖面图

Fig. 2 Cross-sections of typical Carlin-type Au deposits in southwestern Guizhou

a—水银洞金矿床(据文献[15]);b—板其金矿床(据文献[16]修改);c—戈塘金矿床(据文献[17]修改);d—烂泥沟金矿床(据文献[18]);e—太平洞金矿床(据文献[19]修改)。

2 样品采集与研究方法

本次研究对水银洞、太平洞、紫木凶、烂泥沟、丫他等金矿床中富含有机质的矿石、赋矿围岩以及赖子山、板街、百层等古油藏中的沥青开展了岩相学研究,并选择代表性矿物进行了电子探针成分分析。金矿床中的样品均取自钻孔岩心或探矿坑道,古油藏样品取自地表及油气勘探钻井岩心。岩相学观察在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室日产 Olympus BX51 透反射研究级专业偏光显微镜上完成。电子探针分析在核工业北京地质研究院完成,所用仪器为 JEOLJXA-8100 型电子探针分析仪,采用波谱定量分析方法,分析条件为加速电压 20 kV,束流 1×10^{-8} A。

3 金矿床和古油藏岩相学特征

3.1 金矿石岩相学特征

根据矿石中热液矿物的结构特征、共生组合和穿插关系,黔西南卡林型金矿床的热液成矿过程大致可划分为 3 个阶段,即早阶段(I)的石英±黄铁矿、主阶段(II)的石英+含砷富金黄铁矿+毒砂+白铁矿以及晚阶段(III)的石英+方解石+雄黄±雌黄±自然砷±辉锑矿±辰砂±白云石。

早阶段(I)的石英多呈乳白色的短脉或细脉状产出,偶含粒度相对较粗、自形或半自形、镜下显示较高突起、易抛光的黄铁矿。石英和黄铁矿局部破碎,并被主阶段(II)及晚阶段(III)的石英、含砷富金黄铁矿、毒砂、雄黄等矿物胶结或切割(图 3a)。电

子探针分析表明,该阶段的粗粒黄铁矿通常贫金和砷,金含量低于或仅略高于检出限,砷含量通常低于 5%^[28]。

主阶段(II)的石英多为灰色或烟灰色的似碧玉状石英,在矿石中主要呈弥散状或斑点状分布,少量呈细脉状产出。含砷黄铁矿、毒砂和白铁矿通常被似碧玉状石英包裹或与弥散状、斑点状石英密切共生(图 3b),或呈浸染状产于石英细脉中(图 3c)。含砷黄铁矿和白铁矿多为细粒、半自形至他形,直径一般小于 10 μm ,镜下突起相对较低,不易抛光;毒砂常呈针状或针柱状环绕黄铁矿分布(图 3d)。含砷黄铁矿也常围绕不含金的黄铁矿

形成厚度一般 $<2 \mu\text{m}$ 的环带(图 3b、图 3c)。此阶段的含砷黄铁矿和毒砂是金的主要载体矿物,金主要为不可见的次显微金,在极个别的含砷黄铁矿内部或附近见有粒径为 0.1~6 μm 的自然金^[9,23]。电子探针分析结果显示(表 1),含砷黄铁矿 Au 含量为 $(1\ 010\sim 1\ 590)\times 10^{-6}$;环带状黄铁矿中金主要分布于外环,其 Au 含量为 $(1\ 230\sim 2\ 730)\times 10^{-6}$,As 含量为 3.39%~5.63%;环带状黄铁矿内核通常不含金,所测样品中仅一个点高于检出限(Au 含量为 $1\ 200\times 10^{-6}$),As 含量大多 $<1\%$ 。白铁矿的 Au 含量为 $(1\ 060\sim 1\ 300)\times 10^{-6}$,毒砂的 Au 含量为 $(300\sim 1\ 500)\times 10^{-6}$ 。

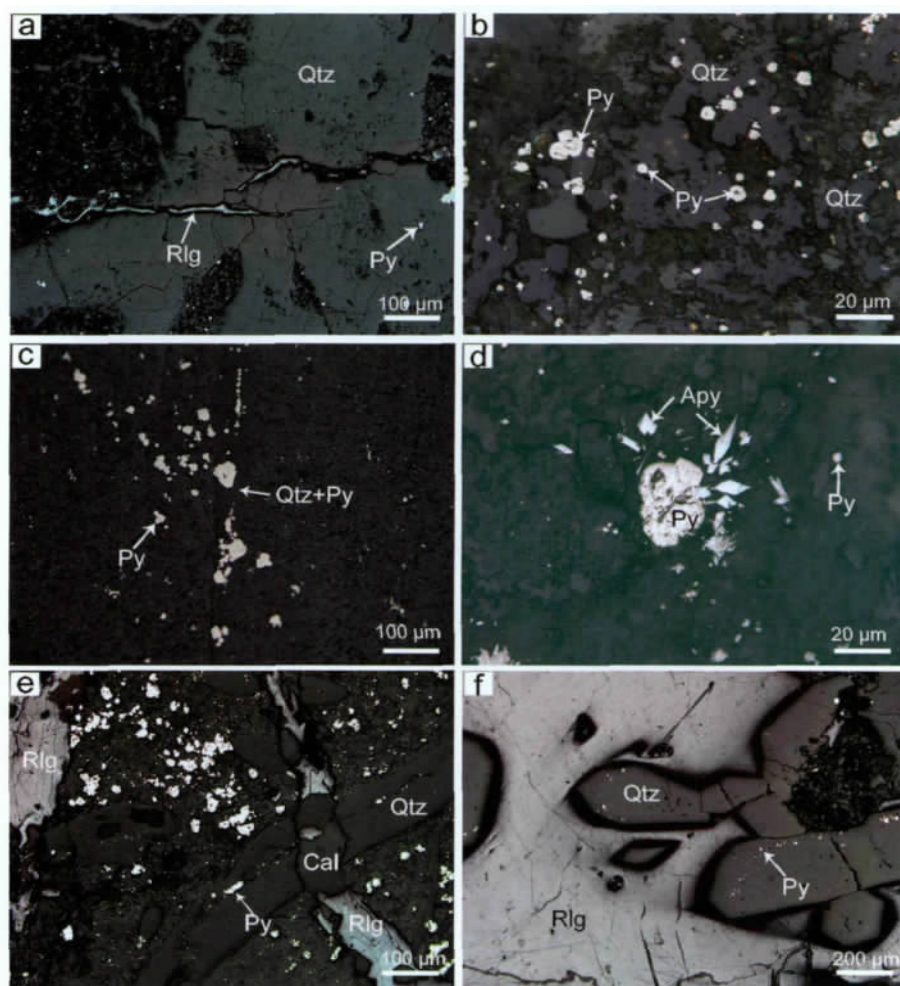


图 3 黔西南卡林型金矿床中热液矿物共生组合关系显微照片

Fig. 3 Photomicrographs showing paragenesis of hydrothermal minerals in the Carlin-type Au deposits in SW-Guizhou
a—Yachi gold deposit in early stage white quartz veins cut by late stage arsenic-bearing pyrite and arsenic-bearing arsenopyrite; b—Shuiyong high-grade (Au content $>100\times 10^{-6}$) gold deposit in main stage arsenic-bearing pyrite showing ring-like structures, and with disseminated, spot-like arsenic-bearing quartz, pyrite mostly with arsenic-rich rings; c—Zimuou gold deposit in main stage arsenic-bearing pyrite and arsenic-bearing arsenopyrite fine veins; d—Shuiyong gold deposit in main stage arsenic-bearing pyrite and arsenic-bearing arsenopyrite showing needle-like or columnar arsenic-bearing arsenopyrite around pyrite; e—Taiping gold deposit in main stage arsenic-bearing pyrite and arsenic-bearing arsenopyrite veins cut by late stage arsenic-bearing arsenopyrite; f—Yachi gold deposit in late stage self-forming quartz crystals, quartz crystals with ring-like structures around pyrite.

表1 黔西南卡林型金矿床中硫化物和有机质电子探针分析结果
Table 1 Microprobe analyses of sulfides and organic matter from the Carlin-type gold deposits in SW-Guizhou

矿区	矿物	样号	$w_i/\%$													$w_B/10^{-6}$				总计
			Fe	S	As	Se	Te	Co	Ni	Pb	Mo	Cu	Zn	Au	Ag	(528)	(178)			
			(0.026)	(0.012)	(0.041)	(0.035)	(0.022)	(0.028)	(0.029)	(0.037)	(0.024)	(0.043)	(528)	(178)						
	核部	2-2	45.96	53.08	0.16	—	—	0.12	—	0.09	0.54	—	—	—	—	—				
	边部	2-3	44.72	50.07	3.85	—	—	0.05	0.03	0.12	0.54	—	—	—	—	—				
	核部	2-6	46.47	51.45	0.05	—	—	0.11	0.03	0.21	0.61	—	—	—	—	—				
	边部	2-5	45.21	50.89	3.85	—	—	0.05	—	0.08	0.68	—	—	—	—	—				
	核部	2-8	46.21	52.25	0.55	0.05	—	0.07	—	0.16	0.67	0.05	—	—	—	—				
	边部	2-7	45.45	48.74	4.70	—	—	0.06	—	0.15	0.63	0.19	—	2 730	—	—				
	边部	2-10	43.71	48.74	5.63	—	—	0.04	0.03	0.08	0.51	0.06	—	1 340	—	—				
		2-4	44.64	49.50	4.10	0.11	—	0.09	0.12	0.10	0.63	0.05	—	—	180	—				
		2-9	45.49	49.25	5.08	—	—	—	—	0.12	0.6	0.09	—	—	—	—				
		2-11	45.94	49.30	4.38	0.04	—	0.09	—	0.09	0.54	0.14	—	1 010	—	—				
	含砷黄铁矿	2-12	44.96	50.41	4.14	—	—	0.04	—	0.08	0.64	—	—	1 390	—	—				
		2-14	43.34	49.11	4.82	—	—	0.37	0.19	0.14	0.58	0.06	—	1 590	—	—				
		12-3	43.96	49.48	6.02	0.06	—	0.07	—	0.08	0.52	0.04	—	—	—	—				
		12-4	44.17	49.36	5.07	—	—	0.10	—	0.10	0.64	0.09	—	—	—	—				
硫	水	12-8	44.03	50.46	3.39	0.07	—	0.08	0.05	0.11	0.72	—	—	1 330	—	—				
化	银	12-14	43.78	50.42	3.88	—	0.04	0.09	0.10	0.18	0.69	—	—	1 060	200	—				
物	洞	12-9	45.63	47.98	4.40	—	0.04	0.05	0.07	0.11	0.55	—	—	—	—	—				
		12-13	43.47	46.01	4.32	0.04	—	0.09	0.06	0.12	0.70	—	—	—	—	—				
		12-16	45.07	47.89	4.12	—	—	0.05	0.09	0.13	0.66	—	—	—	—	—				
		12-1	37.75	22.78	39.36	0.06	—	—	—	—	0.19	—	—	—	—	—				
		12-5	35.67	24.55	39.58	0.10	—	0.05	—	0.10	0.22	—	—	—	—	—				
		12-7	36.99	22.71	39.33	0.09	—	0.04	—	0.05	0.24	—	—	—	—	—				
		12-10	36.89	22.5-	39.86	0.13	—	—	—	—	0.16	—	—	—	390	—				
		12-12	35.09	22.24	40.51	0.19	—	—	—	0.13	0.24	0.07	—	—	—	—				
		12-15	34.28	20.77	42.99	0.19	—	—	—	0	0.29	0.01	—	590	—	—				
		12-17	34.55	22.05	42.80	0.21	—	0.05	0.07	—	0.34	—	—	—	450	—				
	毒砂	syd0352-01*	33.91	24.00	41.54	—	—	0.04	—	—	—	—	—	1 000	—	—				
		syd0352-2	32.41	22.01	42.97	—	—	—	—	—	—	—	—	600	—	—				
		syd0352-3	33.05	22.73	43.20	—	—	0.04	—	—	—	—	—	900	—	—				
		syd0352-5	32.31	21.65	47.22	—	—	0.03	—	—	—	—	—	800	—	—				
		syd0352-10	32.18	21.73	43.09	—	—	0.03	—	—	—	—	—	1 500	—	—				

续表

矿区	矿物	样号	$w_i/\%$											$w_i/10^{-6}$			总计				
			Fe (0.026)	S (0.012)	As (0.041)	Se (0.035)	Te (0.022)	Co (0.028)	Ni (0.029)	Pb (0.037)	Mo (0.024)	Cu (0.035)	Zn (0.043)	Au (528)	Ag (178)						
水银洞		sy0352-13	34.96	23.59	44.84	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	800	—	103.5	
		sy0352-14	34.47	24.24	42.95	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	300	—	101.73	
		sy03-2-1*	36.00	23.26	45.2	0.03	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	—	104.56	
		sy03-2-9	33.75	21.88	43.54	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	800	—	99.29	
		sy03-2-20	34.17	23.62	43.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	—	101.04	
		sy05-1-8*	32.00	22.29	45.10	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 100	—	99.53	
硫化物	核部	8-1	41.09	47.45	0.29	—	—	0.3	0.18	0.05	0.61	0.05	—	—	—	—	—	—	—	90.01	
	边部	8-2	44.95	49.78	3.17	—	—	0.06	0.01	0.06	0.61	0.04	—	—	—	—	—	—	—	98.67	
	核部	8-6	45.29	52.21	0.97	—	—	0.06	0.04	0.18	0.51	—	—	—	—	—	—	1 200	—	99.39	
	边部	8-7	44.58	50.26	3.63	—	—	0.05	—	0.05	0.60	0.10	—	—	—	—	—	1 230	370	99.43	
	中带	8-11	45.62	52.70	0.10	0.04	—	—	0.35	0.08	—	0.68	0.11	—	—	—	—	—	—	99.67	
	边部	8-12	45.30	50.98	3.41	—	—	—	0.08	0.11	0.62	0.15	—	—	—	—	—	—	—	100.69	
	边部	8-4	45.60	51.05	2.95	—	—	—	0.04	—	0.69	0.20	—	—	—	—	—	—	—	100.61	
	边部	8-5	45.54	50.09	3.66	—	—	—	0.06	—	0.54	0.19	—	—	—	—	—	—	—	100.21	
	边部	8-13	44.28	51.77	3.14	0.05	—	—	0.11	—	0.14	0.19	—	—	—	—	—	—	—	100.32	
	边部	8-14	44.25	50.73	3.04	0.05	—	—	0.04	0.04	0.15	0.19	—	—	—	—	—	—	—	99.06	
	含砷黄铁矿	5-1	44.66	52.5	1.58	0.05	—	0.06	—	—	0.11	0.56	—	—	—	—	—	—	—	99.53	
	水银洞原地有机质	2-13	0.07	2.72	—	—	—	—	—	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	2.86
		8-3	2.10	7.18	0.75	—	—	—	—	—	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.12
		8-8	0.10	3.92	—	—	—	—	—	—	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.07
8-9		—	4.00	—	—	—	—	—	—	0.04	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	4.11	
有机质	5-3	0.99	0.18	6.49	0.07	—	—	—	—	0.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.87	
	5-4	0.09	9.23	6.56	0.07	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—	300	16.07	
	5-5	—	9.35	6.15	—	—	—	—	—	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15.61	
	5-7	0.03	7.48	4.90	—	—	—	—	—	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12.52	
	5-10	6.79	15.24	7.88	0.06	—	0.16	—	—	0.09	0.14	0.04	0.21	—	—	—	—	—	—	30.61	

注:元素符号下括号中的数字代表该元素的检出限;标注*的数据引自文献[29]。

晚阶段(Ⅲ)的热液矿物主要为石英、方解石和雄黄,次为雌黄、辉锑矿和自然砷,偶见微量的辰砂、闪锌矿、方铅矿和黄铜矿。这些矿物多充填于溶孔、裂隙等开放空间,常穿切或包裹Ⅰ、Ⅱ阶段的矿物组合(图3e)。充填于开放空间的石英自形程度好,常发育于孔洞或裂隙的壁部,向中心被方解石和雄黄充填或增生。少数情况下,沿自形石英晶体内部的生长环带分布有自形至半自形的细粒黄铁矿(粒径通常小于 $5\mu\text{m}$;图3f),指示金矿化可能延续到了该阶段的早期。除偶尔包裹Ⅰ、Ⅱ阶段的黄铁矿和白铁矿外,方解石和雄黄中一般不含硫化物。在Ⅲ阶段的矿物组合中,微量的雌黄、辉锑矿、自然砷和辰砂常与雄黄共生或被雄黄包裹。

除上述金属和非金属矿物外,金矿床中还存在着不同赋存形式、不同成熟度的有机质。镜下主要识别出两种类型的有机质,一种为原地藻类体,另一种为热解沥青/焦沥青。原地藻类体散布于金矿石和沉积围岩中,多呈层纹状或条带状平行于层理面产出,反光镜下为灰色,无内反射,均质到弱非均质(图4a)。此类有机质广泛分布于围岩和金矿石中,是原地受热降解、未经二次运移的藻类残留体^[30]。热解沥青(焦沥青)多呈微细粒状散布于蚀变及矿化岩石中,尤其是高品位矿石中,部分充填于热液(细)脉的开放空间内,但在不含矿的围岩中未见。沥青主要为次棱角状至次圆状,反光镜下呈棕灰色,均质到弱非均质,反射率略高于藻类残留体。它们常与Ⅱ、Ⅲ阶段的矿物共生或伴生,空间上或与Ⅱ阶段的弥散状石英、脉状石英、含砷黄铁矿和毒砂密切共生(图4b、图4c),或产于Ⅱ、Ⅲ阶段的石英、方解石、雄黄、辉锑矿或雌黄细脉内(图4d—4f),在Ⅰ阶段石英脉中少见。电子探针分析表明(表1),原地有机质和热解沥青均不含金,但两者在微量组分As、S的含量上存在明显区别,原地残留的藻类体几乎不含As、S含量较低(2.72%~7.18%),而沥青中的As含量为4.90%~7.88%,S含量除一个点较低(0.18%)外,多数变化于7.48%~15.24%。

3.2 古油藏沥青岩相学特征

宏观上,古油藏沥青大多见于生物礁碳酸盐岩的溶洞、孔隙、裂隙等开放空间中,或单独产出,或与热液方解石伴生(图5a—5c),有时也见沥青呈薄膜状沿碳酸盐岩的缝合线分布(图5d)。若沥青与方解石伴生,它或附着于孔洞、裂隙的壁部并向内被方

解石增生、充填,或充填于方解石内部的晶隙或晶洞(图5b、图5c、图5e、图5f),指示了两者可能近于同时沉淀。

微观上,沥青多呈粒状镶嵌结构(图6a),少量呈含中间相小球的球状结构、复合球状结构以及流动结构(图6b、图6c),显示出高热演化程度的结构特点。部分沥青碎裂并发育气孔状构造(图6d),这些气孔是沥青过成熟时发生热解脱气的产物,气孔有时被“球形”方解石所充填。在与块状沥青伴生的溶孔、裂隙充填的方解石中,见大量直径从小于 $1\mu\text{m}$ 到 $1\sim 2\text{mm}$ 的固体沥青包裹物,其数量从与块状沥青的接触面向外逐渐减少(图6e)。这些固体沥青包裹物多呈球状或滴状,并在空间上多与方解石中的烃类和气液水等流体包裹体密切共/伴生(图6f)。

3.3 包裹体岩相学特征

在金矿床各成矿阶段的石英、方解石等热液矿物中,流体包裹体数量相对较多,个体较大,直径一般为 $5\sim 60\mu\text{m}$,多数 $10\sim 30\mu\text{m}$;形态多样,有负晶形、椭圆形、长条形、正方形、菱形、针状及不规则状等。包裹体多为原生包裹体,沿石英、方解石的生长环带发育,或呈散状随机分布于寄主矿物中。次生包裹体沿微裂隙发育,多为扁圆形或不规则状。

按室温下($25\text{ }^\circ\text{C}$)包裹体的成分、相态特征以及冷冻过程中的相态变化,金矿石中的包裹体以液相或气液两相 H_2O 包裹体(图7a)、气相或气液两相 CO_2 包裹体(图7b)、三相 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体为主(图7c),并常见气相 CH_4 包裹体、气液两相 $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体和固相沥青包裹体(图7d、图7e)。Ⅰ阶段的石英中主体为 H_2O 包裹体,其他类型包裹体少见;Ⅱ和Ⅲ阶段的石英和方解石中,除主要发育 H_2O 包裹体外,富含 CO_2 和烃类的其他类型包裹体也普遍发育。有趣的是,在个别气相烃类包裹体的壁部见有一圈厚小于 $2\mu\text{m}$ 的浅棕色液态石油(图7f、图7g),这可能是在包裹体捕获后由于温度和压力降低,部分气态烃类凝析为液态石油所致。此外,固态沥青包裹体也常见于Ⅱ、Ⅲ阶段的石英和方解石中,或孤立出现,或作为固相出现于液相水包裹体中。

在二叠系生物礁灰岩古油藏的方解石胶结物和溶孔、裂隙充填的方解石中,包裹体大小一般为 $5\sim 15\mu\text{m}$,多数为负晶形(多为菱形)的原生包裹体,少量为长条状、针状或不规则状沿微裂隙分布的

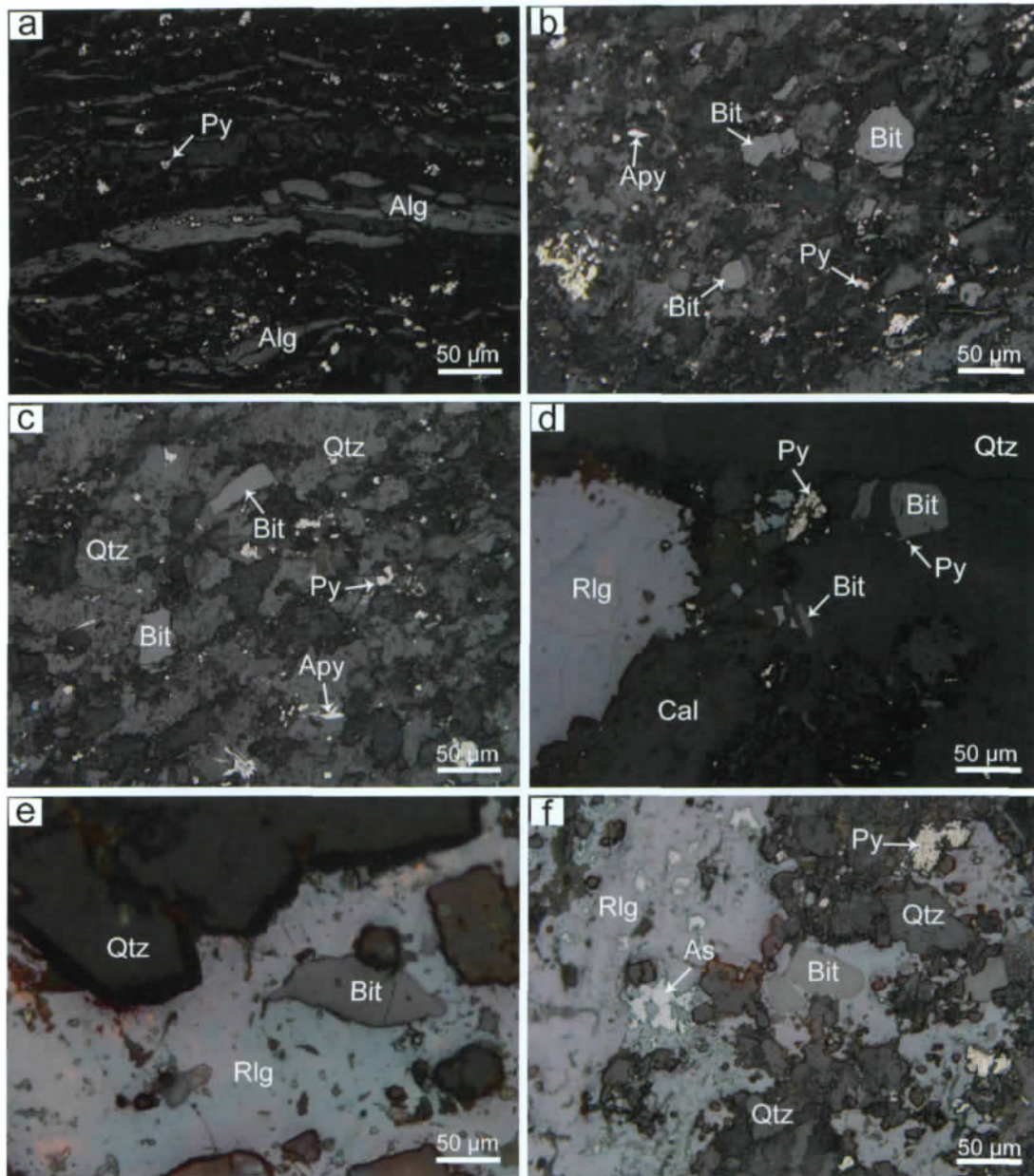


图4 黔西南卡林型金矿床中有机质的显微岩相学特征

Fig. 4 Micropetrography of organic matter in the Carlin-type Au deposits in SW-Guizhou

a—太平洞金矿床赋矿围岩(钙质粉砂岩)中的原地藻类体呈层纹状、条带状平行于层理面产出;b、c—水银洞高品位(Au含量 100×10^{-6})金矿石中浸染状产出的沥青颗粒呈次棱角状至次圆状,与主阶段似碧玉状石英、含砷黄铁矿、毒砂共生,沥青相对于原地藻类体具较高的反射率;d—太平洞金矿石主阶段石英—黄铁矿细脉中的沥青颗粒呈浸染状产出,晚阶段方解石和雄黄充填于矿石的开放空间;e—太平洞金矿石中晚阶段自形石英晶体被含沥青颗粒的雄黄所增生;f—太平洞金矿石中充填于破碎开放空间的晚阶段石英、方解石、雄黄、自然砷和沥青。Alg—藻类体;Bit—沥青;Py—黄铁矿;Apy—毒砂;Rlg—雄黄;As—自然砷;Qtz—石英;Cal—方解石。照片均在反射单偏光镜下拍摄。

次生包裹体。古油藏中的包裹体,除经常出现液相烃类(C_2H_6)包裹体外,其他常见的包裹体类型与金矿石中相似(图7h—7j)。古油藏中常见三期溶孔、裂缝充填方解石,其中包裹体的类型和组合特征各不相同^[31-32]。第一期方解石中以液相水包裹体和气液水包裹体为主,含少量液相有机质

(C_2H_6)包裹体;第二期方解石中的包裹体主要为液相 C_2H_6 包裹体,次为气相 CH_4 包裹体、气液两相 CH_4-H_2O 包裹体、气液水包裹体和固体沥青包裹体;第三期方解石以含大量的气相 CH_4 包裹体为特征。油气充注成藏的高峰出现于后两期方解石的沉淀时期。

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(1)

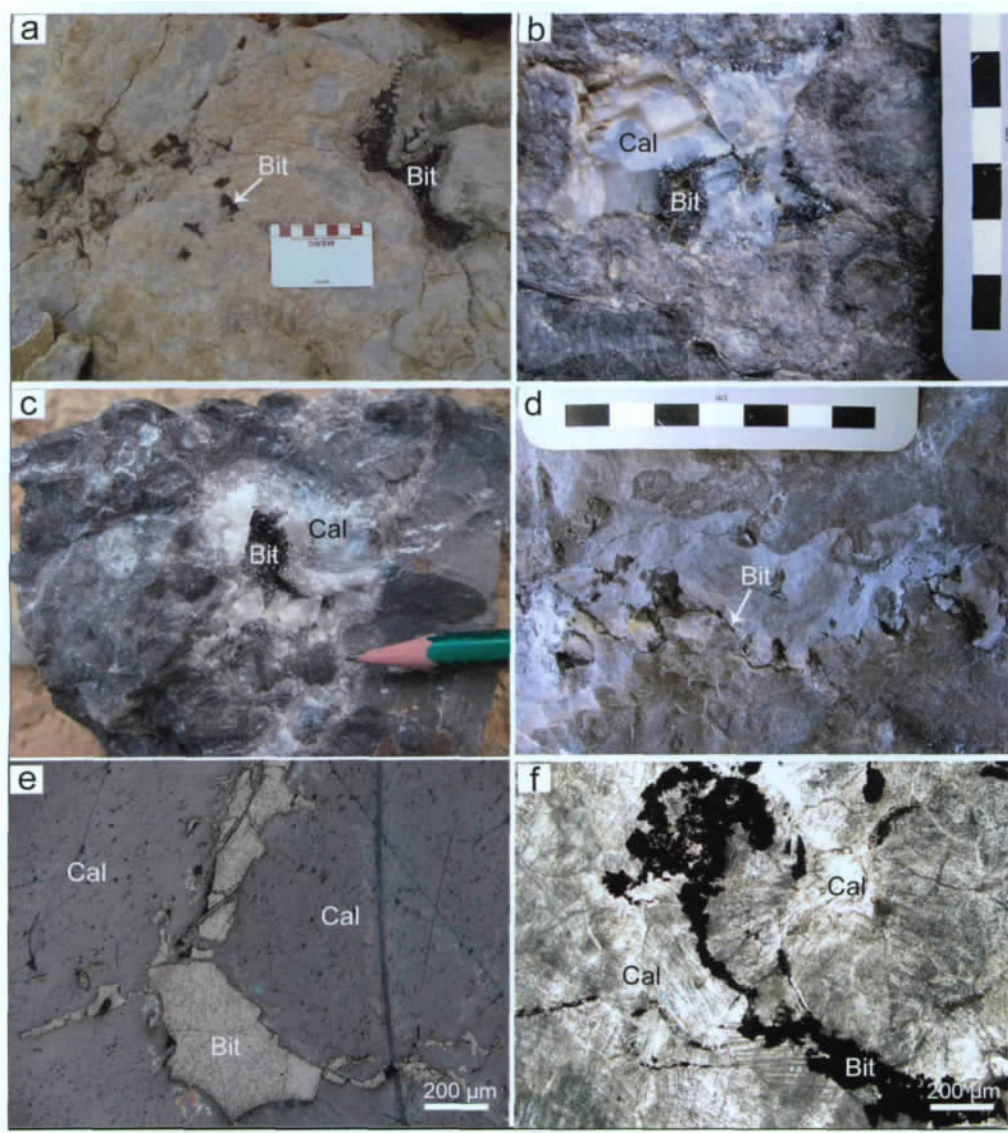


图5 黔西南二叠系生物礁古油藏中沥青的产出特征

Fig. 5 Bitumen in the Permian reef paleo-oil reservoirs in SW-Guizhou

a—赖子山古油藏生物碎屑灰岩中溶孔—裂缝充填的沥青; b—板街古油藏生物碎屑灰岩溶孔中充填的沥青和方解石, 沥青产于溶孔壁和方解石内部; c—板街古油藏生物碎屑灰岩溶孔中充填的沥青和方解石, 沥青产于溶孔的中心; d—板街古油藏中沿生物碎屑灰岩缝合线充填的沥青; e—百层古油藏溶孔充填方解石中具粒状镶嵌结构的沥青; f—平绕古油藏溶孔充填方解石中的沥青。Bit—沥青; Cal—方解石。照片 e 在反射单偏光镜下拍摄, 照片 f 在透射单偏光镜下拍摄。

4 讨论

黔西南卡林型金矿床和古油藏的岩相学特征、有机质与热液矿物的共生关系以及流体包裹体组合特征等, 为揭示成矿与成藏关系提供了诸多重要信息。金矿床中, 矿化与有机质的空间关系密切, 容矿岩石以富含有机碳为显著特征。作为油气裂解产物的固体沥青出现于蚀变和矿化的主岩中, 尤其是高

品位的金矿石中, 但在正常的新鲜围岩中未见。金矿石中的沥青与主阶段似碧玉状石英、含砷黄铁矿、毒砂紧密共生或伴生(图 4b、图 4c), 或呈分散的粒状被主阶段和晚阶段的石英、方解石、雄黄等热液矿物包裹(图 4d—7f), 偶尔也见于早阶段乳白色石英脉中。这些特征表明, 金矿化与沥青的沉淀密切相关, 烃类作为成矿流体的一部分参与了蚀变、矿化的全过程。一些与热液矿物共伴生或被包裹的沥青颗粒呈浑圆状, 暗示其裂解沉淀前在水溶液中可能呈

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2013, 20(1)

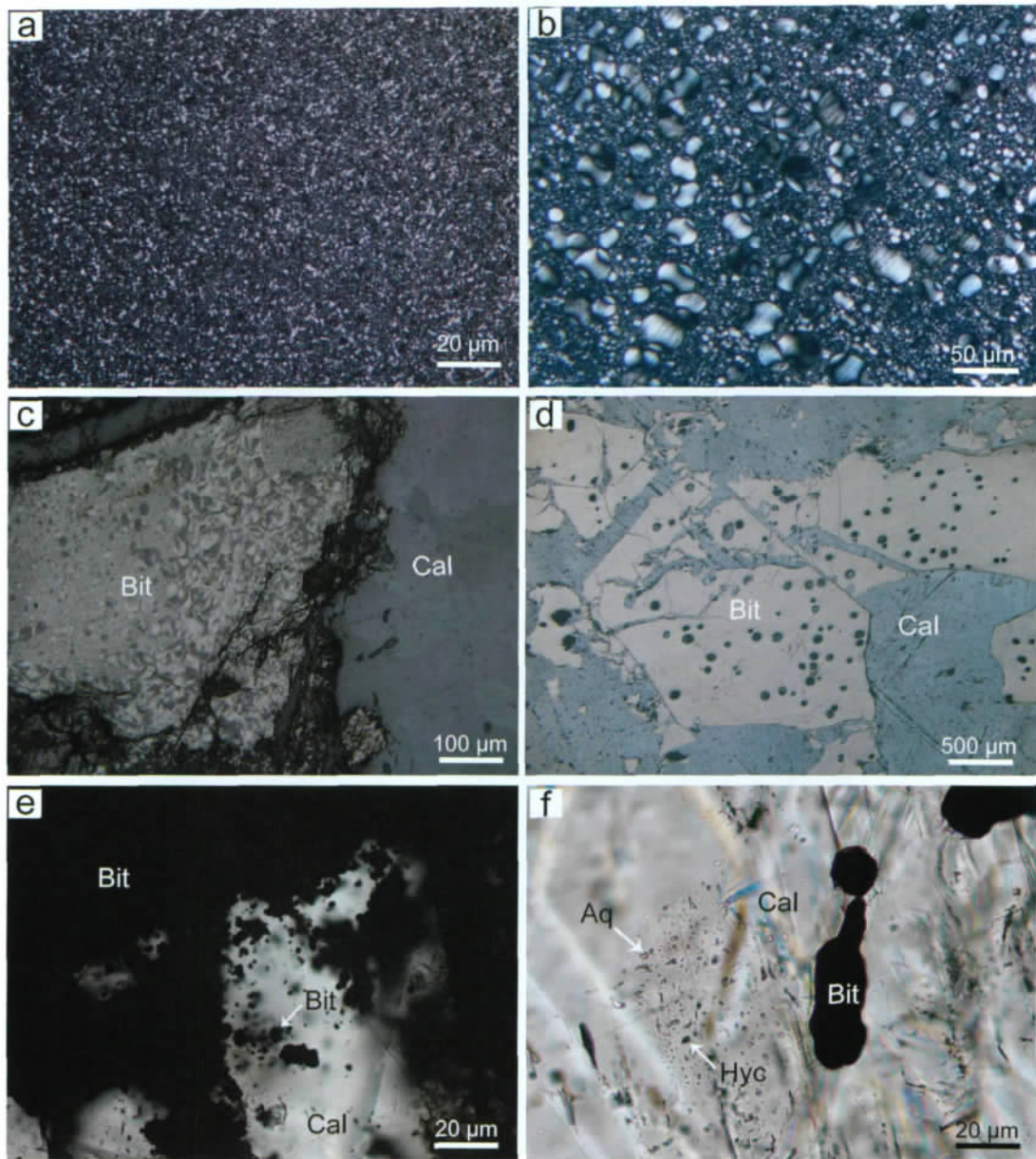


图6 黔西南古油藏沥青的显微岩相学特征

Fig. 6 Micropetrography of bitumen from paleo-oil reservoirs in SW-Guizhou

a—百层古油藏中沥青呈粒状镶嵌结构;b—赖子山古油藏中沥青的球状、流动结构;c—赖子山古油藏中沥青的球状、复合球状结构;d—赖子山古油藏中沥青的气孔状构造;e—板街古油藏生物碎屑灰岩溶孔中充填的沥青和方解石,方解石中含圆球状、滴状的固体沥青包裹体;f—平绕古油藏溶孔充填方解石中圆球状、滴状的固体沥青包裹体以及烃类和气液水包裹体.Bit—沥青;Cal—方解石;Hyc—烃类包裹体;Aq—气液水包裹体。照片 a、b 为反射正交偏光镜下拍摄,照片 c、d 为反射单偏光镜下拍摄,照片 e、f 为透射单偏光镜下拍摄。

不混溶的油滴发生迁移。

气相 CH_4 、气液两相 $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ 等烃类流体包裹体常见于主阶段和晚阶段的石英、方解石脉中,少量见于早阶段乳白色石英脉中。烃类包裹体多与 CO_2 包裹体、 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 三相包裹体和气液水包裹体共生,表明导致金矿化的热液流体很可能由水溶液和不混溶的烃类组成^[26-27,33-34]。张志坚和张文

淮^[35-37]通过对烂泥沟、戈塘、紫木凶金矿床流体包裹体有机地球化学研究,证实了成矿流体中的有机质主要为成熟度较高的芳香烃和杂原子化合物,它们以与水不混溶的液相形式迁移;并认为在这种温度、盐度较低的有机成矿流体中,金以可溶有机络合物的形式搬运,在成矿阶段较高温度的作用下,有机质发生裂解并向更成熟、更小的分子(如 CH_4)转

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(1)

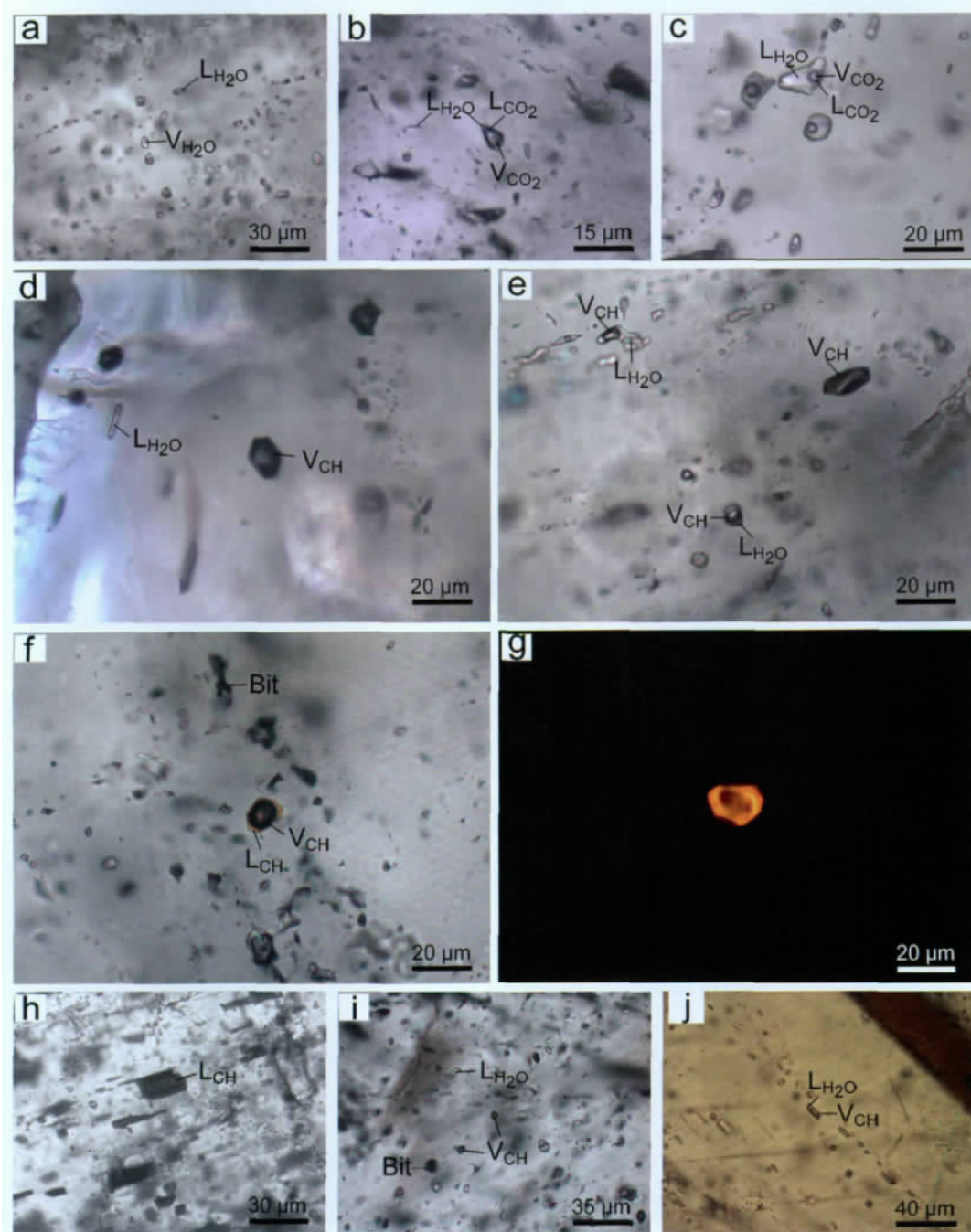


图 7 金矿床和古油藏中流体包裹体显微岩相学特征

Fig. 7 Micropetrography of fluid inclusions from Carlin-type Au deposits and paleo-oil reservoirs

a—石英中的液相和气液两相 H₂O 包裹体, 丫他金矿床; b—石英中的气相和气液两相 CO₂ 包裹体, 水银洞金矿床; c—石英中的 CO₂-H₂O 三相包裹体, 水银洞金矿床; d—石英中的气相 CH₄ 包裹体, 水银洞金矿床; e—石英中的气相 CH₄ 包裹体和气液两相 CH₄-H₂O 包裹体, 太平洞金矿床; f、g—石英中壁部见有浅棕色液态石油的气相烃类包裹体及其荧光特征, 太平洞金矿床; h—方解石中的液相烃类(C₂H₆)包裹体, 石头寨古油藏; i—方解石中的气相 CH₄ 包裹体、气液 H₂O 包裹体和固体沥青包裹体, 板街古油藏; j—方解石中的气液两相 CH₄-H₂O 包裹体和气液 H₂O 包裹体, 石头寨古油藏。L_{H₂O}—液相 H₂O; V_{H₂O}—气相 H₂O; L_{CO₂}—液相 CO₂; V_{CO₂}—气相 CO₂; L_{CH₄}—液相烃类(C₂H₆); V_{CH₄}—气相烃类(CH₄); Bit—固体沥青。除照片 g 是在荧光显微镜下拍摄外, 其余均为透射单偏光镜下拍摄。

化,同时由于络合物的破坏,金的载体瓦解,导致金的沉淀。

电子探针分析结果表明(表 1),金矿石中热解焦沥青含较高的与成矿密切相关的 As、S 等微量元

素,显著区别于不含 As 且 S 含量较低的原地沉积有机质,进一步指示了矿石中的沥青是在富含原油的成矿流体中裂解沉淀下来的。

岩相学证据还显示,固体沥青和烃类流体包裹体在主阶段及晚阶段的热液矿物组合中较为常见,而在早阶段的石英脉中少见。一种可能的解释是,成矿流体演化到主阶段和晚阶段时变得更为富含烃类;另一种可能的解释是,烃类更容易在晚期较低温度下沉淀的热液矿物中保存,因为在较高的温度条件下,沥青大量转化为易于迁移流失的低分子化合物而难于保存下来^[33]。

根据黔西南卡林型金矿床与古油藏密切共伴生的空间关系以及上述岩相学证据,作者认为,富含金属等成矿组分和碳氢化合物的盆地流体是链接金成矿与油气成藏的纽带和桥梁,在这种油水不混溶的流体中,金与烃类有机质一起活化、迁移和沉淀。成矿与成藏间可能的成因联系示于图 8 中。

在晚古生代至中三叠世的被动陆缘裂谷盆地(D—P₁)和弧后裂陷盆地(P₂—T₂)演化阶段,右江盆地西北部的黔西南地区由一系列的孤立碳酸盐岩台地(台丘或生物礁)和次级盆地组成,形成了“盆—台(地堑—地垒)相间”的沉积构造格局,分隔次级盆地与台地的是 NW 向和 NE 向的高角度伸展断裂(同沉积断裂)。在盆地相区沉积的富含金属(Au、As、Hg、Sb 等)和有机质的泥质岩、粉砂岩和微晶灰岩等,为随后的成矿、成藏提供了良好的矿源和烃源

条件;在孤立台地相区和盆地边部沉积的浅水碳酸盐岩、生物礁灰岩和少量陆源碎屑岩,孔隙和裂缝发育,为随后的成矿、成藏提供了良好的容矿和储集空间;盆地边缘或分隔台地与次级盆地的高角度同沉积断裂,为后期成矿—成藏流体向储集地的运聚提供了主要通道。

在埋藏成岩过程中,盆地相区富含金属和有机质的泥质单元在压实作用下排出孔隙水、原油和金属组分,进入到相对高孔隙度和渗透率的砂质单元(初次运移),然后沿这种高渗透性的单元由盆地中心向盆地边缘、由次级盆地相区向孤立台地或生物礁等相对高地处侧向运移(二次运移),并在到达盆地或次级盆地边缘后沿同生断裂向上迁移。在富含金属和有机质的盆地流体运移过程中及到达盆地边部和碳酸盐岩台地后,金属与油气通过不同的沉淀或捕获机制发生成矿、成藏作用,形成空间上既密切伴生又有一定程度分离的金矿床和油气藏。油气聚集的主要场所为封盖性较好的各类物理圈闭(构造、岩性或地层圈闭),且成藏过程中要求环境条件的变化尽可能小。因此,油气主要储集于溶蚀孔隙、生物构架孔隙以及成岩裂缝发育的生物礁灰岩、台地碳酸盐岩等地层中。与此不同的是,金属成矿过程则要求物理化学条件(温度、压力、pH、Eh 等)的急剧变化,矿化富集部位通常是具有地球化学障的岩性、岩相带或断裂破碎带。对于卡林型金矿化而言,赋矿地层既需要有较高的孔隙度和渗透率,以利

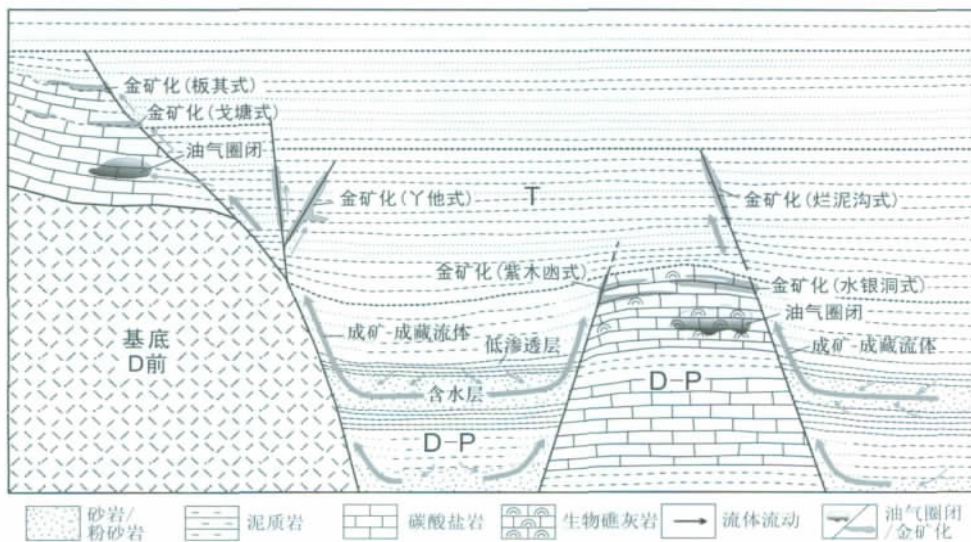


图 8 黔西南卡林型金成矿与油气成藏关系示意图

Fig. 8 Schematic presentation showing genetic linkage between Carlin-type gold mineralization and hydrocarbon accumulation in southwestern Guizhou

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(1)

于成矿流体的渗滤和交代,同时要求有较高含量的易于交代的组分(如钙质)和活性铁(reactive iron),以使溶液中的硫与地层活性铁结合形成黄铁矿、毒砂等硫化物的同时,金的硫氢络合物(如 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$)分解,析出的金以次显微或超显微的形式被硫化物包裹或吸附。因此,富含有机质和成岩黄铁矿且孔隙度和渗透率较高的泥质、粉砂质生物碎屑灰岩和钙质粉砂岩等,是卡林型金矿床的最主要容矿岩石,而纯净的碳酸盐岩或生物礁灰岩虽然孔隙和裂缝可能较为发育,但由于缺乏活性铁而难于成为金的良好赋矿围岩。

金矿化体的产出形式取决于构造与有利地层岩性的匹配关系。成矿流体在沿高角度断裂向浅部运移过程中,当遇有上下被不透水的泥质岩、粉砂质泥岩所夹持的有利岩性时,或遇有渗透性好且含有易交代组分和活性铁的古岩溶面或不整合面时,则会发生顺层侧向流动和交代,形成受地层层位、古岩溶面或不整合面控制的“层控型”矿体(图8中的“水银洞式”和“板其式”、“戈塘式”)。当疏导成矿流体向上运移的断裂破碎带本身含有足够数量的易交代组分和活性铁,并且断裂两侧有利岩性的上下缺乏不透水层的适当围限时,流体的交代和金的沉淀作用可能主要发生在断层破碎带内,形成“断控型”矿体(“烂泥沟式”、“丫他式”,图8)。倘若矿化作用在疏导断裂及其两侧有利岩性层位同时进行,则可形成层控与断控“复合型”矿体(“紫木函式”,图8)。

5 结论

右江盆地西北部的黔西南卡林型金矿床主要产于盆地边缘碳酸盐岩台地、盆地内孤立台地或生物礁、古潜山及其边缘斜坡相带内,在空间上多与二叠系古油藏伴生或相邻。容矿岩石以富含有机碳和成岩黄铁矿,孔隙度和渗透率较高的泥质、粉砂质生物碎屑灰岩和钙质粉砂岩为特征。作为油气裂解产物的固体焦沥青出现于各热液阶段蚀变和矿化主岩中,尤其是高品位的金矿石中,与主阶段似碧玉状石英、含砷黄铁矿、毒砂紧密共生或伴生。沥青中含较高的与成矿密切相关的 As、S 等微量元素。热液矿物中常见气相 CH_4 、气液两相 CH_4 - H_2O 等烃类流体包裹体。岩相学特征表明,金矿化与沥青的沉淀密切相关,烃类作为成矿流体的一部分参与了蚀变、

矿化的全过程。

在埋藏成岩过程中,地层中的 Au、As、Hg、Sb 等成矿金属组分与水、碳氢化合物一起排放进入到盆地流体中。当富含金属和有机质的盆地流体运移至盆地边部和碳酸盐岩台地及其周缘后,金属与油气通过不同的沉淀和捕获机制发生成矿、成藏作用。油气主要储集于孔隙、裂缝发育的生物礁灰岩、台地碳酸盐岩等地层中,而金则主要在富含有机质和成岩黄铁矿且孔隙度和渗透率较高的泥质、粉砂质生物碎屑灰岩和钙质粉砂岩中卸载成矿,形成了主要受地层层位、古岩溶面或不整合面控制的“层控型”、主要受断层破碎带控制的“断控型”以及层控与断控“复合型”3类金矿床。

感谢《地学前缘》编辑部和主编的约稿!研究工作得到了文中提到的有关金矿区以及中石化南方勘探开发分公司领导和专家的大力帮助与支持,谨此致谢!

参考文献

- [1] Hausen D M, Kerr P E. Fine gold occurrence at Carlin, Nevada[C]// Ridge J D. Ore Deposits of the United States, 1933-1967, Crato-Sales Volume, Part 1. New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1968: 908-940.
- [2] Radtke A S, Scheiner B J. Studies of hydrothermal gold deposition (I). Carlin gold deposit, Nevada: The role of carbonaceous materials in gold deposition[J]. Economic Geology, 1970, 65: 87-102.
- [3] Christensen O D. Carlin trend geologic overview[C]// Christensen O D. Gold Deposits of the Carlin Trend, Nevada. Society of Economic Geologists Guidebook Series, No. 18. Littleton: Society of Economic Geologists, 1993: 12-26.
- [4] Hofstra A H, Cline J S. Characteristics and model for Carlin-type gold deposits[J]. Reviews in Economic Geology, 2000, 13: 163-220.
- [5] Emsbo P, Hofstra A H, Lauha E A, et al. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the Meikle and neighboring Carlin-type deposits, northern Carlin trend, Nevada[J]. Economic Geology, 2003, 98: 1069-1105.
- [6] Hulen J B, Pinnell M L, Nielson D L, et al. The Yankee mine oil occurrence, Alligator Ridge district, Nevada: An exhumed and oxidized, paleogeothermal oil reservoir [C]// Schalla R W, Johnson E H. Oil Fields of the Great Basin. Nevada Petroleum Society, 1994: 131-149.
- [7] Hulen J B, Collister J W, Stout B, et al. The exhumed "Carlin-type" fossil oil reservoir at Yankee basin[J]. Journal of

- Minerals, Metals and Material Society, 1998, 50 (12): 30-34.
- [8] Hulen J B, Collister J W. The oil-bearing, Carlin-type gold deposits of Yankee basin, Alligator Ridge district, Nevada [J]. *Economic Geology*, 1999, 94: 1029-1050.
- [9] Su W C, Heinrich C A, Pettke T, et al. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids[J]. *Economic Geology*, 2009, 104: 73-93.
- [10] 顾雪祥, 章永梅, 李葆华, 等. 沉积盆地中金属成矿与油气成藏的耦合关系[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 83-105.
- [11] 曾允孚. 华南右江盆地沉积构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-102.
- [12] 曾允孚, 刘文均, 陈洪德, 等. 华南右江复合盆地的沉积构造演化[J]. *地质学报*, 1995, 69(2): 113-124.
- [13] Liu J M, Ye J, Ying H L, et al. Sediment-hosted micro-disseminated gold mineralization constrained by basin paleo-topographic highs in the Youjiang basin, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 517-533.
- [14] Peters S G, Huang J Z, Li Z P, et al. Sedimentary rock-hosted Au deposits of the Dian-Qian-Gui area, Guizhou, and Yunnan provinces, and Guangxi district, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31: 170-204.
- [15] 刘建中, 刘川勤. 贵州水银洞金矿床成因探讨及成矿模式[J]. *贵州地质*, 2005, 22(1): 9-13.
- [16] 陈潭钧. 册亨板其金矿床地质特征及成因初探[J]. *贵州地质*, 1986, 9(4): 321-339.
- [17] 陶长贵. 黔西南微细浸染型金矿床成矿条件及找矿标志[J]. *地质与勘探*, 1990, 26(8): 9-15.
- [18] 罗孝桓. 贵州贞丰烂泥沟金矿床地质特征、成矿机理及找矿[C]//刘东升, 谭运金, 王建业, 等. 中国的卡林型金矿床. 南京: 南京大学出版社, 1994: 100-115.
- [19] 刘丽, 顾雪祥, 彭义伟, 等. 贵州太平洞金矿床流体包裹体特征及流体不混溶机制[J]. *岩石学报*, 2012, 28(5): 1568-1576.
- [20] 林青, 刘德汉. 黔西南金矿有机地球化学研究[J]. *地球化学*, 1995, 24: 402-40.
- [21] 张明发, 王砚耕, 王琨, 等. 黔西南卡林型金矿床地质[C]//王砚耕, 索书田, 张明发, 等. 黔西南构造与卡林型金矿. 北京: 地质出版社, 1994: 57-84.
- [22] Hu R Z, Su W C, Bi X W, et al. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 378-392.
- [23] Su W C, Xia B, Zhang H T, et al. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for the environment and processes of ore formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33: 667-679.
- [24] 周明辉. 南盘江拗陷油气系统研究[J]. *云南地质*, 1999, 18(3): 248-265.
- [25] 侯明才, 陈洪德, 田景春. 晚古生代右江盆地生物礁储层特征研究[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2005, 32(3): 231-238.
- [26] 赵孟军, 张水昌, 赵陵, 等. 南盘江盆地古油藏沥青地球化学特征及成因[J]. *地质学报*, 2006, 80(6): 893-901.
- [27] Zhao M J, Zhang S C, Zhao L, et al. Geochemical features and genesis of the natural gas and bitumen in paleo-oil reservoirs of Nanpanjiang basin, China[J]. *Science in China: Series D*, 2007, 50: 689-701.
- [28] 付绍洪, 顾雪祥, 王乾, 等. 黔西南水银洞金矿床载金黄铁矿标型特征[J]. *矿物学报*, 2004, 24(1): 75-80.
- [29] 张弘强, 苏文超, 田建吉, 等. 贵州水银洞卡林型金矿床金的赋存状态初步研究[J]. *矿物学报*, 2008, 28(1): 17-24.
- [30] Glikson M, Mastalerz M, Golding S D, et al. Metallogenesis and hydrocarbon generation in northern Mount Isa Basin, Australia: Implications for ore grade mineralization [C]//Glikson M, Mastalerz M. *Organic Matter and Mineralization: Thermal Alteration, Hydrocarbon Generation and Role in Metallogenesis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000: 149-184.
- [31] 顾雪祥, 李葆华, 徐仕海, 等. 贵州石头寨二叠系古油藏油气成藏期分析: 流体包裹体与 Sm-Nd 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2279-2286.
- [32] 顾雪祥, 李葆华, 徐仕海, 等. 右江盆地含油气成矿流体性质及其成藏一成矿作用[J]. *地学前缘*, 2007, 14: 133-146.
- [33] Peabody C E. The association of cinnabar and bitumen in mercury deposits of the California Coast Ranges[C]//Parnell J, Kucha H, Landais P. *Bitumen in Ore Deposits*. Berlin: Springer-Verlag, 1993: 178-209.
- [34] Sherlock R. The association of gold-mercury mineralization and hydrocarbons in the coast ranges of northern California [C]//Glikson M, Mastalerz M. *Organic Matter and Mineralization: Thermal Alteration, Hydrocarbon Generation and Role in Metallogenesis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000: 378-399.
- [35] 张志坚, 张文淮. 滇黔桂地区低温矿床有机成矿流体及与矿化的关系[J]. *矿物学报*, 1997, 17(4): 483-490.
- [36] 张志坚, 张文淮. 贵州省烂泥沟金(汞、锑)矿床有机成矿流体研究[J]. *矿床地质*, 1998, 17(4): 343-354.
- [37] 张志坚, 张文淮. 黔西南卡林型金矿成矿流体性质及其与矿化的关系[J]. *地球科学*, 1999, 24(1): 74-78.