

滇东南底圩金矿床矿物学与地球化学研究

肖景丹^{1,2} 沈能平^{1*} 苏文超¹ 何兴华^{1,2} 王玮^{1,2}

1. 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, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 位于右江盆地南部的滇东南底圩金矿床是近年来新发现的一处金矿床, 为理清其成因, 对不同类型矿石和赋矿围岩进行了主、微量元素及硫化物的硫同位素分析。结果表明, 相较于赋矿围岩, 矿石中明显富集 Au、As、Sb、Hg、Tl、S、K、C 元素, 应为热液带入; 而 Si、Mg、Fe、Zr 和 Th 在矿石和围岩中变化不大, Fe 主要来源于赋矿围岩。对矿床中的主要金属硫化物黄铁矿和毒砂进行的矿物学和硫同位素分析表明, 载金矿物主要为含砷黄铁矿和毒砂, 金可能主要以 Au⁺ 的形式赋存在含砷黄铁矿和毒砂之中; 含金硫化物具有较高的硫同位素组成 (5.93‰~11.99‰), 表明成矿所需的 S 主要为地壳来源。结合前人对于右江盆地南部相似金矿的研究, 认为印支期造山作用使沉积物脱水形成的变质流体交代玄武岩, 容矿岩石的硫化物化作用是底圩金矿床形成最重要的成矿作用之一。

关键词: 金的赋存状态; 硫同位素; 元素地球化学; 黄铁矿; 毒砂; 底圩金矿床; 滇东南

中图分类号: P618.51 文章编号: 1007-2802(2021)02-0359-12 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.005

Mineralogy and Geochemistry of the Dixu Gold Deposit in the Southeastern Yunnan, China

XIAO Jing-dan^{1,2}, SHEN Neng-ping^{1*}, SU Wen-chao¹, HE Xing-hua^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Dixu gold deposit in the southeastern Yunnan, China is a recently discovered gold deposit located in the southern margin of Youjiang basin. In order to explore the ore genesis of the deposit, major and trace elements of various types of ores and host rocks and sulfur isotope analyses of sulfides have been analyzed in this study. The results show that contents of Au, As, Sb, Hg, Tl, S, K, and C in ores are obviously higher than those in host rocks, suggesting the input of ore-forming fluid, whereas contents of Si, Mg, Fe, Zr, and Th in ores are similar to those in host rocks, and Fe could be mainly derived from the host rocks. Mineralogical and sulfur isotopic analyses of major metallic sulfides including pyrite and arsenopyrite of the deposit indicate that arsenian pyrite and arsenopyrite are the main gold bearing minerals in which gold could be occurred invisibly in the form of Au⁺. The narrow range of relatively high $\delta^{34}\text{S}$ (5.93‰–11.99‰) values of gold-bearing arsenian pyrite and arsenopyrite suggests that the ore-forming sulfur could be mainly derived from a crustal source. Combined with previous studies on similar other gold deposits in the southern margin of Youjiang basin, it is believed that the metasomatism of basalt by metamorphic fluid derived from the dehydration of sedimentary rocks during the Indosinian orogeny could result in the important sulfidation of ore-hosting basalt to form gold-bearing arsenian pyrite and arsenopyrite in the Dixu deposit.

Key words: occurrence state of gold; sulfur isotope; elemental geochemistry; pyrite; arsenopyrite; Dixu gold deposit; southeastern Yunnan

收稿编号: 2020-154, 2020-09-23 收到, 2020-10-28 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772079, 41672080, U1812402); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑[2020]3Y003 号)

第一作者简介: 肖景丹 (1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: xiaojingdan@mail.gyig.ac.cn.

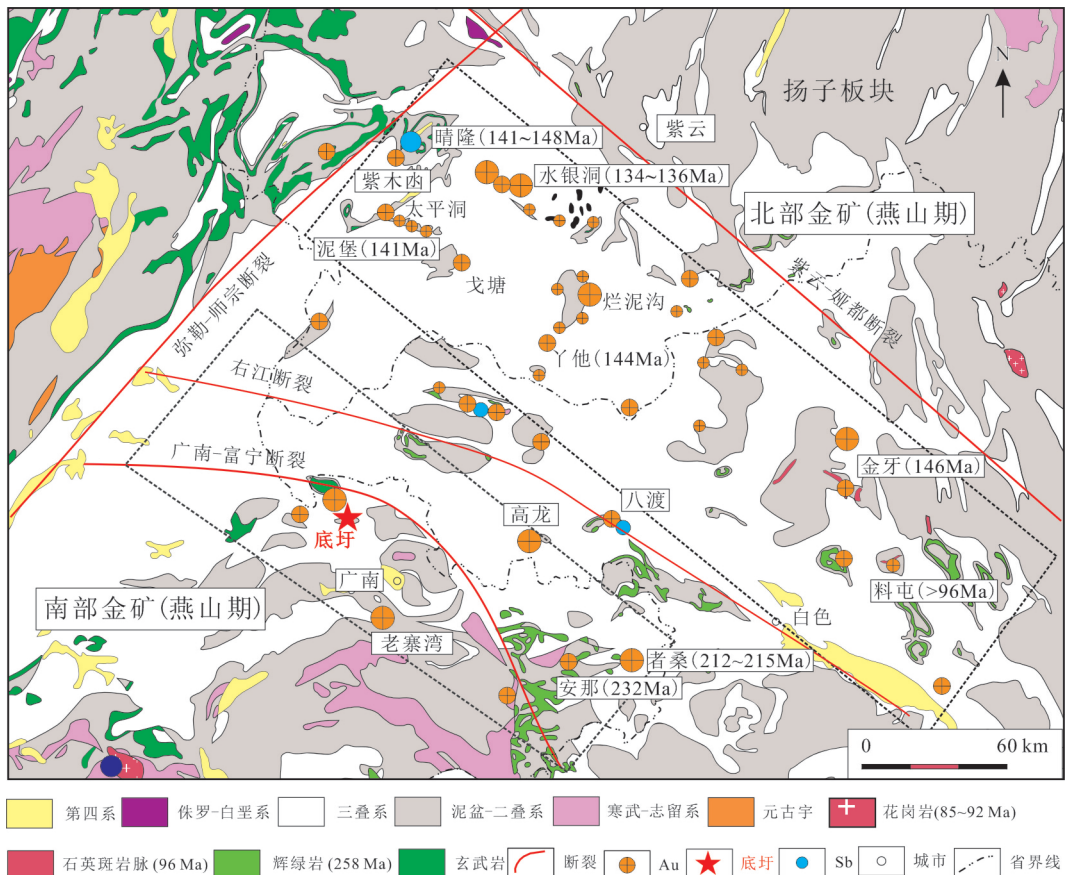
* 通信作者简介: 沈能平 (1979-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: shennengping@vip.gyig.ac.cn.

0 引言

云南、贵州和广西接壤地带的滇黔桂“金三角”是除美国内华达州之外的全球第二大卡林型金矿聚集区 (Muntean and Cline, 2018; Su et al., 2018), 其中产有众多的卡林型金矿。这些金矿主要产于不纯碳酸盐岩、玄武质凝灰岩及细碎屑岩中, 具有去碳酸盐化、黏土化、硫化物化和硅化等热液蚀变特征, 类似于美国内华达州的卡林型金矿 (Hu et al., 2002; Su et al., 2009b, 2018; Cline et al., 2013; Xie et al., 2018)。近年来的勘探工作, 在右江盆地南部新发现了一些产于二叠纪辉绿岩体内部或辉绿岩与沉积岩接触带的金矿 (如八渡和安那等) (董文斗等, 2017; Su et al., 2018), 甚至同一矿区金矿体既产在沉积岩中, 又产于辉绿岩体内部 (如老寨湾和者桑等) (陈翠华等, 2014; 皮桥辉等, 2016; 董文斗, 2017; 高云鹏和黄从俊, 2018)。多种同位素定年结果揭示 (图 1), 右江盆地中产出的这些金矿目前认为有两期成矿, 即印支期 (210~230

Ma) (皮桥辉等, 2016; Pi et al., 2017; 董文斗, 2017; Su et al., 2018) 和燕山期 (134~148 Ma) (Su et al., 2009a, 2018; 高伟, 2018; Chen et al., 2019; Huang et al., 2019), 分别分布在右江盆地南部和北部 (图 1)。

滇东南底圩金矿床位于右江盆地南部 (图 1), 其金矿体主要产于二叠纪峨眉山玄武岩和玄武质凝灰岩中。该矿床的地质地球化学特征、找矿标志、物化探异常、成矿规律等前人已进行了较多研究 (刘继顺等, 2007; 李凤军, 2009; 吴韦玄等, 2011; 和浪涛, 2016; 李炆霞和李玉光, 2017), 但对元素迁移特征、含金硫化物矿物学与地球化学、金赋存状态及成矿物质来源等矿床成因研究却较为薄弱。本文在前人研究基础上, 采用电子探针、岩石化学和硫同位素地球化学方法, 系统开展了矿石的显微岩相学结构、热液蚀变、矿物学和地球化学及金的赋存状态等研究, 探讨了右江盆地南部玄武岩容矿型金矿的成矿规律和成矿机制, 以期对深入剖析该类金矿的成因及指导找矿勘探有一定的理论和实践作用。



金矿床成矿年龄数据来源: 彭建堂等 (2003); Su 等 (2009a, 2018); 靳晓野 (2013); 王泽鹏 (2013); 陈懋弘等 (2014); 皮桥辉等 (2016); Hu 等 (2017); 高伟 (2018); Chen 等 (2019)。底图据 Su 等 (2018) 修改

图 1 滇黔桂“金三角”区域地质图

Fig. 1 Regional geologic map of the Dian-Qian-Gui “golden triangle”

1 区域与矿床地质特征

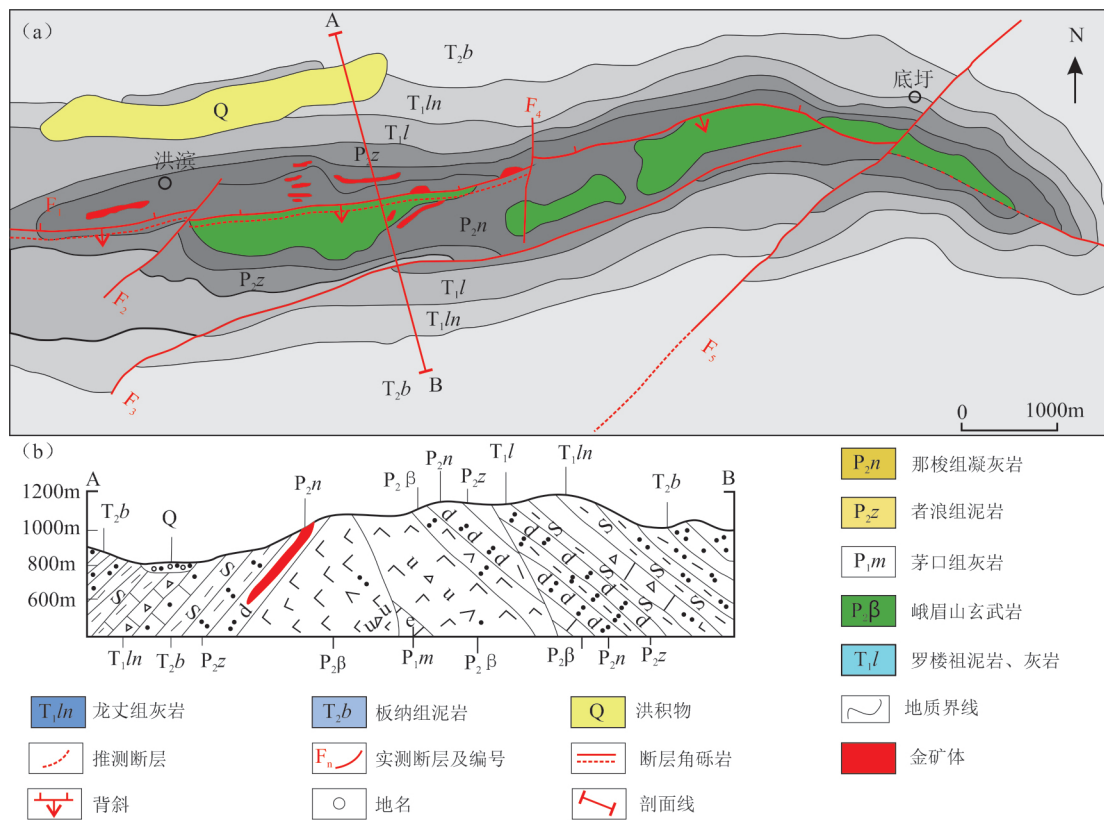
滇黔桂“金三角”中的金矿大多产于右江盆地中(图1)。在大地构造位置上,右江盆地处于扬子地块西南部,南接越北古陆,并通过哀牢山-松马缝合带与印支地块相连,西部毗邻三江褶皱带,东与华南加里东褶皱带接壤,是一个在早古生代褶皱基底上晚古生代再裂陷的大陆边缘盆地,其经历了早泥盆世裂谷、早石炭-早三叠世被动大陆边缘和中三叠世前陆盆地的构造演化(杜远生等,2013)。

滇黔桂“金三角”区域主要出露地层有寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系,其中寒武系和奥陶系主要分布在开远-丘北以南,隆林、那坡等地,通常构成背斜的核部,主要为泥质条带状灰岩夹页岩和粉砂岩等;泥盆-石炭系主要为深水相沉积硅质岩、泥岩及浅水相碳酸盐岩;二叠-三叠系分布广泛,主要为生物碎屑泥晶灰岩,三叠系主要为泥质灰岩、砂岩和粉砂质泥岩等。区域内的岩浆活动主要以基性岩浆活动为主,表现为基性-超基性岩浆的浅成侵入和大规模的陆相喷发,包括二叠纪辉绿岩、峨眉山玄武岩及火山碎屑岩等。

滇东南底圩金矿床位于右江盆地南部,隶属于云南省广南县。矿区位于向北突出的广南-富宁逆推覆体前端(图1),主要出露地层为二叠-三叠系(图2),其中二叠系是金的主要赋矿层位,主要为中二叠统致密块状峨眉山玄武岩($P_2\beta$)、那梭组(P_2n)凝灰岩夹粉砂岩和泥岩,构成背斜核部;背斜两翼地层主要为下三叠统罗楼组(T_1l)和龙丈组(T_1ln)泥岩及中三叠统板纳组(T_2b)粉砂质泥岩(吴韦玄等,2011)。

矿区主要发育近东西向底圩背斜和近东西向、北东向断裂带。底圩背斜西出洪滨,东至底圩,呈东西向舒缓波状展布(刘继顺等,2007)。背斜轴长近8 km,南北宽0.5~1 km。整个背斜被一组高角度的逆断层(F_1)切穿,主断面与背斜轴面基本一致,同属于逆冲推覆构造体系作用下的产物(周余国,2009)。矿体严格受东西向 F_1 断裂破碎带控制(图2),呈似层状或透镜状产于峨眉山玄武岩和凝灰岩中,长约800 m,厚约0.67~35.1 m,平均品位 $0.5\times 10^{-6}\sim 3.51\times 10^{-6}$ (吴韦玄等,2011)。

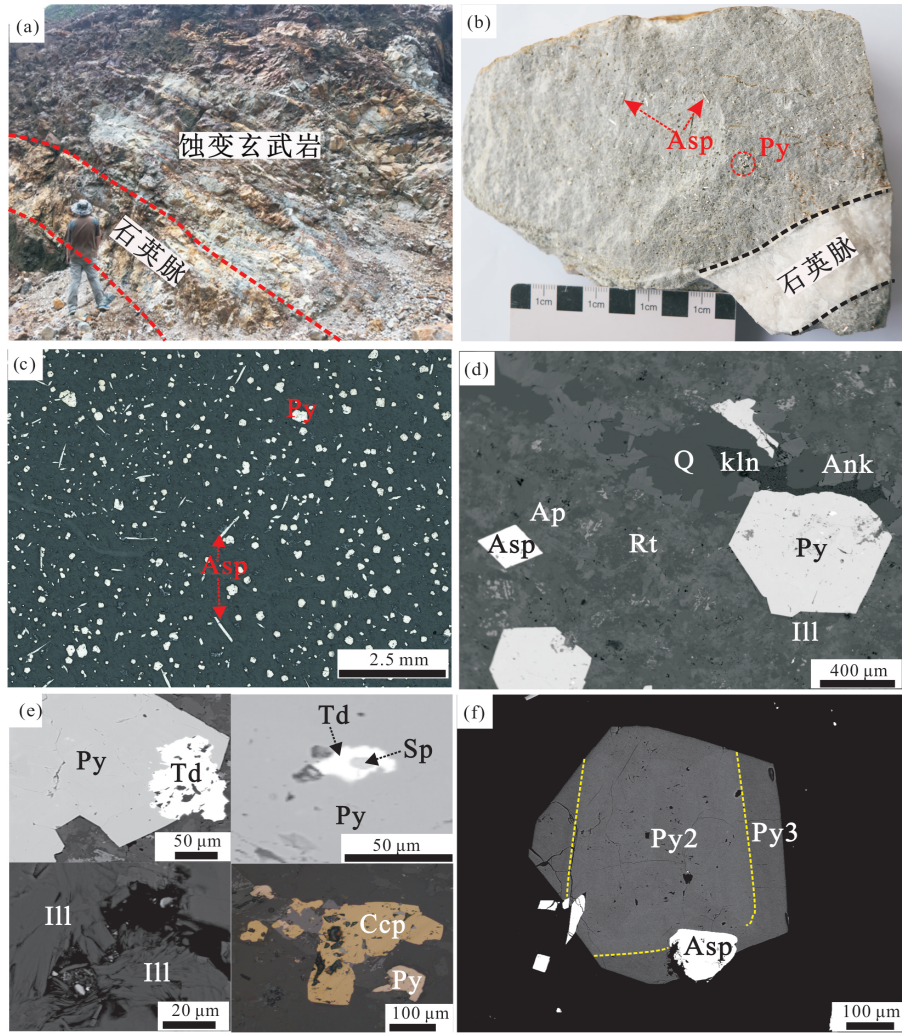
矿区内石英脉十分发育(图3a、3b),金矿化与石英脉呈一一对应关系,即金矿化通常产于石英脉两侧



据刘继顺等(2007)修改

图2 底圩金矿床地质图

Fig. 2 Geological map of the Dixu gold deposit



(a) 石英脉充填于玄武岩中,石英脉两侧的蚀变玄武岩即为金矿体;(b) 玄武岩容矿型矿石标本;(c) 玄武岩容矿型矿石中黄铁矿和毒砂呈浸染状分布;(d) 玄武岩容矿型矿石中毒砂的碎裂结构;(e) 玄武岩容矿型矿石中的矿石矿物和脉石矿物;(f) 玄武岩容矿型矿石中的两期弱环带的黄铁矿。矿物符号:Py-黄铁矿;Asp-毒砂;Ank-铁白云石;Ill-伊利石;Rt-金红石;Q-石英;Sp-闪锌矿;Ccp-黄铜矿;Td-黝铜矿

图3 底圩金矿床野外照片、矿石标本及显微照片

Fig. 3 Photographs of orebody in field and ore of hand specimen , photomicrographs of thin sections of ores from the Dixu gold deposit

的玄武岩和凝灰岩中,蚀变玄武岩和凝灰岩即为金矿体。根据容矿岩石类型,将矿石分为玄武岩容矿型矿石和沉积岩(玄武质凝灰岩)容矿型矿石两大类。矿石矿物主要为黄铁矿和毒砂及少量的黝铜矿和闪锌矿等硫化物(图3c、3d、3e);脉石矿物主要为石英、铁白云石等(图3d),具有硅化、硫化物化、伊利石化、绿泥石化和碳酸盐化等热液蚀变特征,其中硫化物化及伊利石化与金矿化密切相关(图4b、4c)。

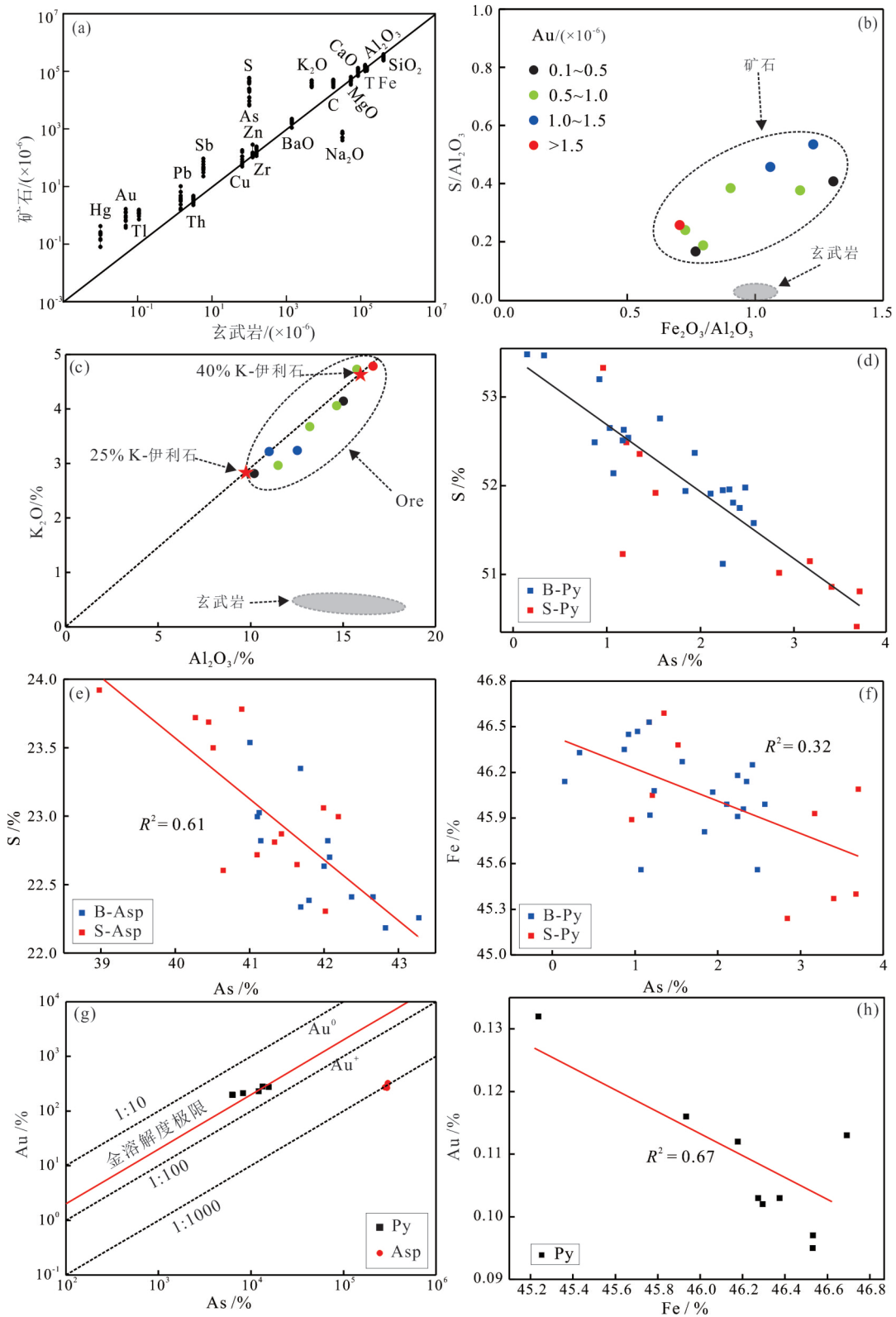
2 样品特征和分析方法

2.1 样品特征

样品为采自底圩金矿床露天采场的玄武岩容

矿型矿石和沉积岩(玄武质凝灰岩)容矿型矿石,本次共挑选出代表性的矿石样品9件,玄武岩型样品1件(已有轻微蚀变,镜下可见绿泥石)。

玄武岩容矿型矿石含有大量的石英脉(图3b),镜下可见含砷黄铁矿(B-Py)呈自形-半自形,颗粒大小从数微米到数毫米不等,具有两期弱环带或无环带(Py2、Py3),呈脉状和浸染状分布,均为热液期黄铁矿(图3c、3f);毒砂(B-Asp)呈自形-半自形,颗粒大小从数微米到数毫米不等,呈浸染状分布(图3c)。少量矿石中可见碎裂状毒砂,晶型完好的毒砂碎裂成不规则状,以微细粒弥散分布在含砷黄铁矿周围,或包裹于含砷黄铁矿之中。



(a) 矿石对玄武岩的等值线图; (b) (c) 矿化蚀变图; (d) (e) 玄武岩容矿和沉积岩容矿型矿石中黄铁矿和毒砂的 As-S 关系图(EPMA); (f) 两种容矿型矿石中黄铁矿的 Fe-As 关系图(EPMA); (g) 两种容矿型矿石中黄铁矿和毒砂的 Au-As 关系图(EPMA), 其中金溶解度极限引自 Reich 等(2005); (h) 黄铁矿中的 Au-Fe 关系图

图 4 底圩金矿床岩石化学及黄铁矿和毒砂的地球化学关系图解

Fig. 4 Diagrams showing geochemical relationships of various elements in ores and host rocks and those of arsenian pyrites and arsenopyrites from the Dixu gold deposit

沉积岩容矿型矿石中的黄铁矿(S-Py)通常具有环带结构(图5a),其Py1为砷含量极低的黄铁矿,背散射图像颜色较暗,可能为沉积期黄铁矿;Py2具有较高的砷含量,背散射图像颜色较亮;Py3的砷含量及亮度均介于Py1和Py2之间,这两期含砷黄铁矿均为热液成因。毒砂(S-Asp)呈菱形、针状和板片状,粒度细小,晶型完好,常呈浸染状分布。

2.2 分析方法

对这两类原生矿石进行切片,磨制成光薄片(厚30~50 μm)及激光片(厚80~100 μm),在光学显微镜下进行矿物鉴定,并对载金硫化物进行初步分类,确定扫描电镜和电子探针的分析区域及载金硫化物。切片剩下的样品一部分用于主、微量元素含量测试,一部分用于硫同位素组成测试。

全岩主量和微量元素含量测试分析由澳实分析检测(广州)有限公司完成。样品为过200目筛的矿石粉末样品,采用X射线荧光分析(XRF)方法测定主量元素;采用Leco仪进行全碳(C)、全硫(S)分析,采用原子荧光进行As含量分析,采用火试金法测定Au含量,Hg、Zr、Th、Tl、Cu、Ba、Pb、Zn含量则用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)测定。

采用扫描电镜(SEM)对样品中的黄铁矿和毒砂进行背散射(BSE)拍照和能谱(EDS)分析,以

此来确定载金硫化物的环带结构及与周围矿物的关系。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。热场发射扫描电子显微镜的型号为JSM-7800F,测试电压为10~15 kV、电流为10 nA,束斑直径1 μm。为后续工作做铺垫。

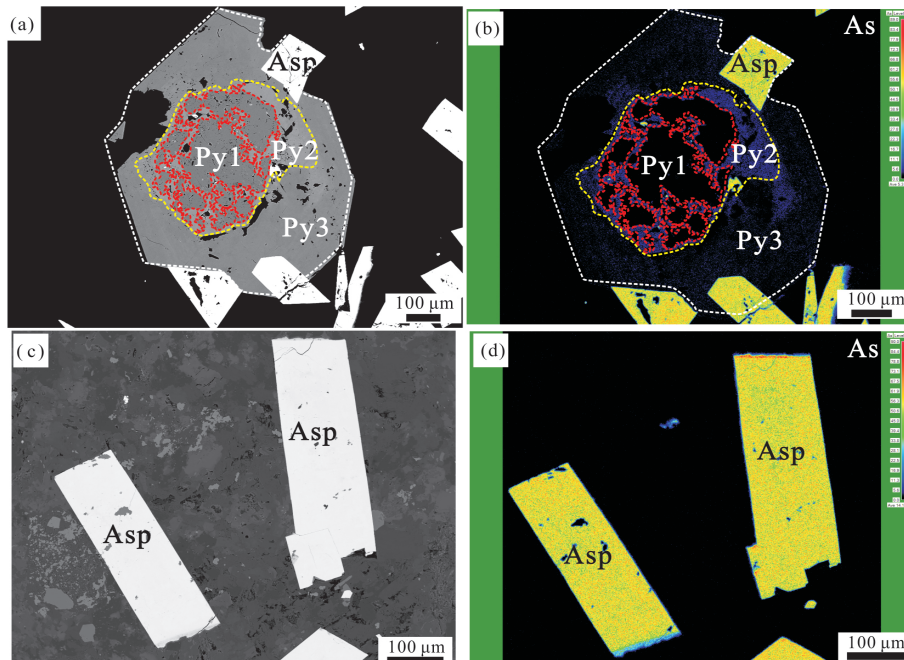
采用电子探针(EPMA)进行元素面扫及主量元素Fe、As、S含量,微量元素Au、Co、Ni、Zn、Cu、Tl、Sb、Pb、Hg含量分析。分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,所用仪器为日本岛津所生产的JXA-8230,测试波谱电压为25 kV、电流10 nA,能谱电压为25 kV、电流18 nA,束斑直径1~10 μm。

样品的硫同位素分析在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室完成。将硫化物在1020℃下制备SO₂,然后将其通入MAT 253质谱仪进行硫同位素组成测定(Giesemann et al., 1994)。以GBW04415、GBW0441的Ag₂S作内标,相对标准用V-CDT,相对误差小于0.2%。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学特征

矿石和赋矿围岩的主、微量元素含量分析结果见表1,主、微量元素对比图见图4a。由表1、图4可



(a) (b) 沉积岩容矿型矿石中的三期环带状黄铁矿及电子探针As元素面扫图; (c) (d) 沉积岩容矿型矿石毒砂的背散射照片及电子探针As元素面扫图。矿物符号:Py-黄铁矿;Asp-毒砂

图5 底圩金矿床矿石标本扫描电镜及电子探针图

Fig. 5 SEM and EPMA of ores from the Dixu gold deposit

表 1 底圩金矿床矿石和赋矿围岩的主量和微量元素含量分析结果
Table 1 Analytical results for contents of major and trace elements in ores and host rocks from the Dixu gold deposit

样品号	类型	Au	Sb	Hg	Cu	Ba	Pb	Zn	Tl	Zr	Th	S	C	As	Al ₂ O ₃	CaO	TFeO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	烧失量	总计
DX-902		0.372	47.8	0.26	111	1040	1.72	149	1.39	211	4.52	2.48	3.26	7140	14.90	6.95	11.44	4.14	3.76	0.07	38.94	2.34	0.17	0.90	11.83	99.97
DX-903		1.315	22.6	0.23	72	1030	3.44	123	1.17	115	2.26	5.88	5.02	12350	11.00	12.75	13.49	3.22	6.32	0.05	25.79	1.44	0.22	0.40	18.44	105.10
DX-904		0.670	58.6	0.24	111	878	1.55	144	1.20	164	3.49	2.48	4.04	9260	13.17	9.88	10.49	3.69	4.75	0.07	35.54	1.99	0.21	0.87	14.99	101.73
DX-905		0.835	42.4	0.08	87	1630	4.75	135	1.55	231	4.04	3.78	4.37	21800	15.74	11.25	11.44	4.73	5.25	0.05	24.82	2.21	0.17	0.68	17.26	102.63
DX-910	矿石	1.645	92.4	0.14	49	1950	3.12	104	1.47	241	4.43	4.29	3.67	47200	16.64	9.46	11.72	4.84	4.46	0.07	23.88	2.22	0.15	0.58	15.76	101.91
DX-911		0.639	30.6	0.08	64	862	2.35	108	0.94	145	3.00	4.34	4.61	19650	11.52	11.90	13.54	2.96	4.72	0.05	28.85	1.80	0.18	0.67	16.81	102.74
DX-912		0.950	74.0	0.42	159	1050	3.98	284	1.23	238	4.72	5.64	2.82	23200	14.66	7.94	13.26	4.06	3.46	0.04	32.14	3.30	0.11	1.07	13.87	102.26
DX-913		1.230	37.7	0.15	59	858	10.20	104	1.14	195	3.63	5.73	4.34	12050	12.52	11.30	13.26	3.24	5.05	0.08	26.90	3.21	0.19	0.51	16.97	102.45
DX-914		0.430	44.4	0.21	181	800	6.49	134	0.72	135	2.70	4.12	5.08	6520	10.16	12.95	13.26	2.83	4.97	0.07	29.08	2.02	0.22	0.48	18.24	102.59
DX-906	赋矿围岩	0.048	5.9	0.01	67	81	1.65	169	0.11	158	3.17	0.01	1.83	101	13.15	8.46	14.60	0.48	5.43	3.21	40.99	2.42	0.14	0.70	9.67	98.68

注:主量元素含量为质量百分数(%),微量元素含量为质量分数($\times 10^{-6}$);主量元素及Cu、Ba、Zn、元素检测限为0.01%;微量元素检测限:As为0.001 $\times 10^{-6}$,Sb为0.05 $\times 10^{-6}$,Hg为0.01 $\times 10^{-6}$,Tl为0.02 $\times 10^{-6}$,Zr为0.01 $\times 10^{-6}$,Th为0.01 $\times 10^{-6}$,Pb为0.01 $\times 10^{-6}$ 。

见,矿石中的 Al₂O₃ (10.16% ~ 16.64%)、MgO (3.46% ~ 6.32%)、MnO (0.15% ~ 0.22%)、P₂O₅ (0.40% ~ 1.07%)、TFeO (10.49% ~ 13.54%)、Zr (115 $\times 10^{-6}$ ~ 238 $\times 10^{-6}$)及 Th (2.26 $\times 10^{-6}$ ~ 4.72 $\times 10^{-6}$)与赋矿围岩中的 Al₂O₃ (13.15%)、MgO (5.43%)、MnO (0.14%)、P₂O₅ (0.70%)、TFeO (14.60%)、Zr (158 $\times 10^{-6}$)和 Th (3.17 $\times 10^{-6}$)含量相差不大。与赋矿围岩相比,矿石明显富集 Au (0.372 $\times 10^{-6}$ ~ 1.645 $\times 10^{-6}$)、As (6520 $\times 10^{-6}$ ~ 47200 $\times 10^{-6}$)、Sb (22.6 $\times 10^{-6}$ ~ 92.4 $\times 10^{-6}$)、Hg (0.08 $\times 10^{-6}$ ~ 0.42 $\times 10^{-6}$)、Tl (0.72 $\times 10^{-6}$ ~ 1.47 $\times 10^{-6}$)、S (2.48% ~ 5.88%)、K₂O (2.83% ~ 4.84%)和 C (2.82% ~ 5.08%)且烧失量 (LOI) 也较高,弱富集 Cu (49 $\times 10^{-6}$ ~ 181 $\times 10^{-6}$)、Pb (1.55 $\times 10^{-6}$ ~ 10.20 $\times 10^{-6}$)、Zn (104 $\times 10^{-6}$ ~ 284 $\times 10^{-6}$)、Ba (800 $\times 10^{-6}$ ~ 1950 $\times 10^{-6}$)和 CaO (6.95% ~ 12.95%)。

3.2 硫化物主、微量元素含量

底圩金矿床含金硫化物主要为毒砂和含砷黄铁矿,其电子探针分析结果列于表 2 和表 3。可以看出,两类矿石中毒砂的 Fe、As 和 S 含量变化不大,分别为 34.50% ~ 35.38%、38.98% ~ 43.28% 和 22.18% ~ 23.92%,均含有 Co (0.01% ~ 0.11%) 和 Sb (0.05% ~ 0.23%),其它微量元素如 Cu、Pb、Zn、Tl、Hg 含量均低于仪器检测限(表 2)。

沉积岩容矿型矿石中黄铁矿 (S-Py) 的 Fe 和 S 含量分别为 44.84% ~ 46.97% 和 50.35% ~ 54.01%。在其扫描电镜图像上,具有环带结构(图 5a),其中 Py1 的 As 和 Au 含量很低(或低于仪器检测限),而 Py2 和 Py3 的 As 含量较高 (0.15% ~ 3.70%),Au 含量大多低于仪器检测限,部分测点接近或高于检测限,为 1000 $\times 10^{-6}$ ~ 1300 $\times 10^{-6}$ (表 3)。

玄武岩容矿型矿石黄铁矿 (B-Py) 中的 Fe 和 S 含量分别为 45.56% ~ 46.53% 和 51.12% ~ 53.48%,含有 As (0.15% ~ 2.57%)、Co (0.03% ~ 0.12%) 和 Ni (0.054% ~ 0.13%) 等微量元素,Cu、Pb、Zn、Tl、Hg 含量均低于仪器检测限(表 3),Au 含量大多低于仪器检测限,部分测点接近或高于检测限,为 1000 $\times 10^{-6}$ ~ 1400 $\times 10^{-6}$ (表 3)。

3.3 硫同位素组成

底圩金矿床含金黄铁矿和毒砂的硫同位素分析结果见表 4 和图 6。结果显示,玄武岩容矿型矿石中的含砷黄铁矿和毒砂的硫同位素组成较高,其 $\delta^{34}\text{S}$ 分别为 10.76‰ ~ 11.73‰ (平均 11.02‰) 和 10.14‰ ~ 11.99‰ (平均 10.95‰);而沉积岩容矿

表2 底圩金矿床矿石中毒砂电子探针分析结果

Table 2 Electron probe microanalysis (EPMA) results of arsonpyrites from the Dixu gold deposit (%)

样品号	类型	Fe	Zn	Ni	Co	Cu	Tl	As	S	Au	Sb	Pb	Hg	总计
DX-912J1		35.04	—	—	0.04	—	—	40.51	23.50	—	0.16	—	—	99.31
DX-912J2		34.91	—	—	0.03	—	—	41.33	22.81	—	—	—	—	99.15
DX-912J3		34.99	—	—	0.05	—	—	42.02	22.31	—	—	—	—	99.50
DX-912J4		34.79	—	—	0.04	—	—	42.19	23.00	—	0.05	—	—	100.08
DX-913J1		35.21	—	—	0.06	—	—	42.00	23.06	—	—	—	—	100.45
DX-913J2	沉积岩	35.32	—	—	0.04	—	—	40.89	23.78	—	0.17	—	—	100.23
DX-913J3	容矿	34.90	—	—	0.04	—	—	41.43	22.87	—	—	—	—	99.32
DX-913J4		35.11	—	—	0.04	—	—	40.45	23.69	—	0.13	—	—	99.47
DX-913J5		35.38	—	—	0.03	—	—	40.27	23.72	0.10	0.16	—	—	99.70
DX-914J1		34.62	—	—	0.03	—	—	40.64	22.60	—	—	—	—	97.98
DX-914J2		34.50	—	—	0.05	—	—	41.10	22.72	—	0.12	—	—	98.71
DX-914J3		34.86	—	—	0.06	—	—	38.98	23.92	—	0.23	—	—	98.11
DX-914J4		34.76	—	—	0.05	—	—	41.64	22.65	—	0.13	—	—	99.33
DX-902J1		34.89	—	—	0.05	—	—	41.80	22.38	—	—	—	—	99.24
DX-902J2		34.83	—	—	0.05	—	—	42.00	22.63	—	—	—	—	99.58
DX-902J3		34.75	—	—	0.01	—	—	42.66	22.41	0.12	—	—	—	100.05
DX-903-1		34.71	—	—	0.05	—	—	42.37	22.41	—	—	—	—	99.62
DX-903-2		34.52	—	—	0.04	—	—	42.08	22.70	—	—	—	—	99.43
DX-903-3	玄武岩	34.93	—	—	0.03	—	—	41.15	22.82	0.11	—	—	—	99.13
DX-904J1	容矿	34.71	—	—	0.05	—	—	42.83	22.18	—	—	—	—	99.80
DX-904J3		35.10	—	—	0.06	—	—	41.13	23.03	—	—	—	—	99.45
DX-905J1		34.60	—	0.10	0.11	—	—	43.28	22.26	—	—	—	—	100.41
DX-905J2		34.69	—	—	0.04	—	—	41.69	22.34	—	—	—	—	98.88
DX-905J3		34.81	—	—	0.06	—	—	41.68	23.35	—	—	—	—	99.99
DX-905J4		34.94	—	—	0.06	—	—	42.05	22.82	0.10	—	—	—	100.06
DX-910-1		35.08	—	—	0.04	—	—	41.00	23.54	—	—	—	—	99.84
DX-910-2		35.06	—	—	0.03	—	—	41.11	23.00	—	0.17	—	—	99.53

注:元素 Fe、Ni、Co、As、Au、Pb、Hg 检测限为 0.03% Zn、Cu、Sb 为 0.04% Tl 为 0.3% S 为 0.01%; “—”表示低于检测限。

表3 底圩金矿床黄铁矿电子探针分析结果

Table 3 Electron probe microanalysis (EPMA) results of pyrites from the Dixu gold deposit (%)

样品号	类型	Py	Fe	Zn	Ni	Co	Cu	Tl	As	S	Au	Sb	Pb	Hg	总计
DX-912-1			45.61	—	0.78	0.06	—	—	—	53.70	—	—	—	—	100.27
DX-912-4			46.56	—	0.24	0.06	—	—	—	53.79	—	—	—	—	100.73
DX-912-6			46.69	—	—	0.03	—	—	—	54.01	0.11	—	—	—	100.86
DX-913-2			46.30	—	0.17	0.06	—	—	—	53.62	0.10	—	—	—	100.30
DX-913-4		Py1	46.54	—	0.22	0.06	—	—	—	53.73	—	—	—	—	100.63
DX-913-5			46.04	—	0.60	0.03	—	—	—	53.91	—	—	—	—	100.64
DX-913-6			46.21	—	0.14	0.03	—	—	—	53.83	—	—	—	—	100.23
DX-913-11			44.84	—	0.92	0.06	—	—	—	53.11	—	—	—	—	99.09
DX-913-13	沉积岩		46.21	—	0.38	0.09	—	—	—	53.95	—	—	—	—	100.77
DX-912-5	容矿		45.37	—	0.17	0.06	—	—	3.4	50.86	—	—	—	—	99.91
DX-912-2			45.24	—	—	0.04	—	—	2.84	51.02	0.13	—	—	—	99.30
DX-913-3		Py2	46.09	—	—	0.04	—	—	3.7	50.81	—	—	—	—	100.65
DX-913-9			45.93	—	0.04	0.07	—	—	3.17	51.15	0.12	—	—	—	100.51
DX-913-10			45.40	—	—	0.05	—	—	3.67	50.35	—	—	—	—	99.67
DX-913-7			46.53	—	—	0.07	—	—	1.17	51.23	0.10	—	—	—	99.14
DX-913-8			46.05	—	—	0.05	—	—	1.21	52.49	—	—	—	—	99.84
DX-912-3		Py3	45.89	—	0.22	0.09	—	—	0.96	53.33	—	—	—	—	100.54
DX-913-1			46.38	—	—	0.05	—	—	1.52	51.92	0.10	—	—	—	100.00
DX-913-12			46.59	—	—	0.07	—	—	1.35	52.36	—	—	—	—	100.38
DX-902J1			46.25	—	—	0.07	—	—	2.42	51.75	—	—	—	—	100.57
DX-902J2	玄武岩	Py2	46.18	—	—	0.05	—	—	2.24	51.95	0.11	—	—	—	100.55
DX-902J3	容矿		46.14	—	0.13	0.11	—	—	2.35	51.81	—	—	—	—	100.62

续表3

样品号	类型	Py	Fe	Zn	Ni	Co	Cu	Tl	As	S	Au	Sb	Pb	Hg	总计
DX-902J4			45.99	—	—	0.06	—	—	2.11	51.91	—	—	—	—	100.12
DX-903-4			45.56	—	—	0.05	—	—	2.48	51.98	0.14	—	—	—	100.24
DX-905J4		Py2	45.99	—	—	0.04	—	—	2.57	51.58	—	—	—	—	100.22
DX-905J5			45.96	—	0.04	0.05	—	—	2.31	51.96	—	—	—	—	100.39
DX-910J2			45.91	—	—	0.03	—	—	2.24	51.12	—	—	—	—	99.48
DX-903-3			46.08	—	0.12	0.07	—	—	1.23	52.54	—	—	—	—	100.06
DX-903-5	玄武岩		46.33	—	0.08	0.12	—	—	0.33	53.47	—	—	—	—	100.35
DX-903-6	容矿		46.14	—	0.09	0.08	—	—	0.15	53.48	—	—	—	—	100.02
DX-905J1			45.81	—	—	0.06	—	—	1.84	51.94	—	—	—	—	99.72
DX-905J2			46.07	—	—	0.05	—	—	1.94	52.37	—	—	—	—	100.54
DX-905J3		Py3	46.27	—	—	0.05	—	—	1.57	52.76	0.10	—	—	—	100.76
DX-903-1			45.92	—	—	0.06	—	—	1.18	52.63	—	—	—	—	99.84
DX-903-2			45.56	—	—	0.05	—	—	1.07	52.14	—	—	—	—	98.88
DX-905J6			46.53	—	—	0.05	—	—	1.17	52.51	0.10	—	—	—	100.49
DX-910J1			46.47	—	—	0.05	—	—	1.03	52.65	—	—	—	—	100.23
DX-910J3			46.45	—	—	0.07	—	—	0.92	53.20	—	—	—	—	100.72
DX-910J4			46.35	—	—	0.06	—	—	0.87	52.49	—	—	—	—	99.81

注: 元素 Fe、Ni、Co、As、Au、Pb、Hg 检测限为 0.03% ,Zn、Cu、Sb 为 0.04% ,Tl 为 0.3% ,S 为 0.01%; “—”表示低于检测限。

表 4 底圩金矿床载金硫化物硫同位素组成

Table 4 Sulfur isotopic compositions of gold-bearing pyrites and arsenopyrites from the Dixu gold deposit

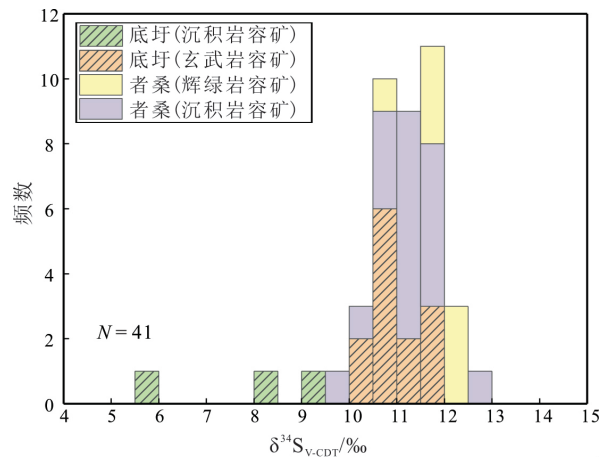
矿石类型	样品号	矿物类型	$\delta^{34}S_{V-CDT}/\text{‰}$
沉积岩容矿	DX-912		8.04
	DX-913	黄铁矿	9.24
	DX-914		5.93
玄武岩容矿	DX-902		10.85
	DX-903		11.73
	DX-904	黄铁矿	11.07
	DX-905		10.90
	DX-910		10.83
	DX-911		10.76
	DX-902		11.26
	DX-903		11.99
	DX-904		10.96
	DX-905	毒砂	10.59
DX-910		10.14	
DX-911		11.55	
DX-912		10.17	

型矿石中的黄铁矿则具有相对较低的硫同位素组成,其 $\delta^{34}S$ 为 5.93‰~9.24‰,平均为 7.74‰。

4 讨论

4.1 矿化过程中的元素迁移与围岩蚀变

卡林型金矿矿体与围岩没有明显的界限,矿石的化学成分既有热液带入组分又包含围岩组分。采用矿石与围岩的主、微量元素含量对比图解,可以确定在热液蚀变和矿化过程中元素的迁移过程(Grant,1986)这在卡林型金矿成矿过程研究中已有广泛应用(Stenger et al.,1998; Cail and Cline,2001; Emsbo and Hofstra,2003; Kesler et al.,2003;



者桑数据引自董文斗(2017)

图 6 底圩和者桑金矿床硫化物硫同位素组成直方图

Fig. 6 Histograms of sulfur isotope compositions of sulfides from the Dixu, Zhesang gold deposits

Yigit and Hofstra 2003; Su et al., 2018)。

本文采用同样方法,结合矿石的显微岩相学观察,探讨底圩金矿成矿过程中的元素迁移与围岩蚀变的关系。由图 4a 可以看出,矿石和围岩中的 Al_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 CaO 、 BaO 、 P_2O_5 、 $TFeO$ 、 Zr 及 Th 含量没有明显变化(表 1),在元素比值图解中位于 1:1 等值线上,表明这些元素在热液蚀变过程中为不活动元素;而矿石中明显富集 Au 、 As 、 Sb 、 Hg 、 Tl 、 S 、 K_2O 、 C 且烧失量高(LOI),弱富集 Cu 、 Pb 、 Zn 和 CaO (表 1),在元素比值图解中位于 1:1 等值线之上(图 4a),为热液带入元素。 K 在矿石中明显富集,与矿石中大量出现的伊利石相一致(图 3d、3e)。

热液中 S 含量明显高于 Au 、 As 、 Hg 、 Tl 等元素,

表明这些成矿元素是在富含 H_2S 的流体中进行搬运迁移的 (Hofstra and Cline ,2000; Su et al. ,2009a)。与赋矿围岩(玄武岩和沉积岩)相比,矿石中的 Fe 没有明显增加(图 4a),说明成矿流体没有带入 Fe,而 Au 沉淀富集又需要 Fe 的参与,形成含金黄铁矿和毒砂等硫化物。结合矿石的岩相学观察,我们认为成矿所需的 Fe 主要来源于赋矿围岩本身,通过热液交代玄武岩中的含钛辉石和钛铁矿等含铁矿物的形式释放 Fe^{2+} ,铁的硫化物化过程可能是底圩金矿成矿的最重要机制之一,类似于右江盆地辉绿岩容矿的金矿(如安那等)(董文斗,2017; Su et al. ,2018)。

4.2 Au 的赋存状态与流体演化

电子探针波谱分析表明,含砷黄铁矿和毒砂是底圩金矿床的主要载金矿物。两种容矿岩石矿石中的含砷黄铁矿和毒砂的 As 和 S 呈明显的负相关(图 4d、4e),表明 As 以 As^- 的形式替代 S 进入黄铁矿和毒砂晶格。在 Au-As 关系图解中(图 4g),两种矿石中的含砷黄铁矿中的 Au 和 As 均落在金在含砷黄铁矿的溶解度极限曲线附近或之上(Reich et al. ,2005),而毒砂中的 Au 和 As 则全部位于该曲线之下的 Au^+ 区域,表明含砷黄铁矿中的 Au 除少数存在纳米金颗粒(Au^0)外,含砷黄铁矿和毒砂中金主要以晶格金(Au^+)形式存在(Reich et al. ,2005)。

含砷黄铁矿中 Au、As 与 Fe 呈弱负相关(图 4f、4h),可能有部分 As 以 As^{3+} 替代 Fe 进入含砷黄铁矿晶格。As 的价态变化与成矿流体的氧化还原状态有关(Reich et al. ,2013; Morishita et al. ,2018)。由此推测,在成矿流体演化的早期阶段,As 可能主要以还原性的 As^- 形式替代 S 进入黄铁矿晶格,并在黄铁矿中形成点缺陷,使 Au^+ 进入含砷黄铁矿的结构或 Au^0 赋存在点缺陷(Fleet and Mumin ,1997);而在成矿流体演化的晚期阶段,可能由于大气降水的混入,氧化流体使部分 As 转化为 As^{3+} 。由于 As^{3+} 的离子半径(0.058 nm)与 Fe^{2+} (0.061 nm)相近,使 Au^+ 伴随着 As^{3+} 一起进入黄铁矿的结构,即 $As^{3+} + Au^+ \rightleftharpoons 2Fe^{2+}$ (Fleet and Mumin ,1997)。

4.3 硫的来源及其成矿过程

岩相学观察和电子探针背闪射图像显示,玄武岩容矿型矿石中的含砷黄铁矿无环带或弱环带,毒砂无环带结构(图 5c、5d),应为热液成因,因此硫化物单矿物的硫同位素组成基本可以代表成矿期的硫同位素组成;而沉积容岩型矿石中的黄铁矿具有明显的环带结构(图 5a、5b),其单矿物的硫同位素组成不能完全代表成矿期的硫同位素组成,但可与

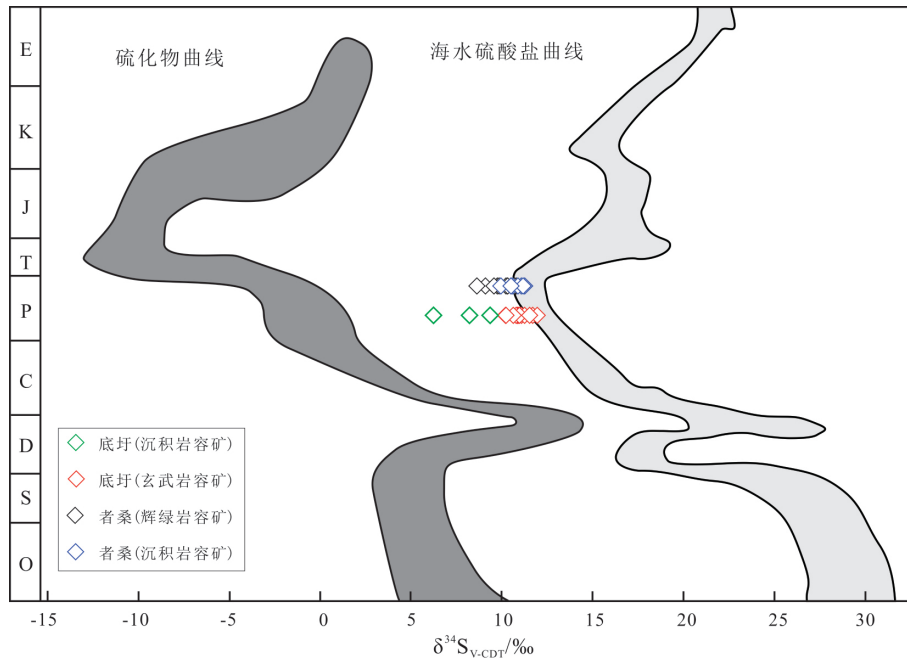
成矿期的硫同位素组成进行对比。由于矿石中缺少重晶石和石膏等硫酸盐矿物,硫化物的硫同位素组成可用来指示成矿流体来源(Ohmoto ,1972)。

单矿物硫同位素分析结果表明,底圩金矿床玄武岩容矿型矿石中的含砷黄铁矿和毒砂具有较高的 $\delta^{34}S$ 值(平均值分别为 11.02‰和 10.95‰),而沉积岩容矿型矿石中的黄铁矿则具有相对较低的 $\delta^{34}S$ 值(平均为 7.74‰),具有地壳硫的地球化学特征。这些硫同位素组成类似于右江盆地南部的者桑金矿床,该矿床金矿体主要赋存在上二叠统吴家坪组和辉绿岩之中,辉绿岩容矿矿石中的黄铁矿和毒砂的 $\delta^{34}S$ 平均值分别为 11.16‰和 11.51‰,沉积岩容矿矿石中的黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 平均值为 11.85‰(图 6)(董文斗,2017; Su et al. ,2018)。底圩金矿床成矿期硫化物的硫同位素组成位于二叠纪海水硫酸盐演化曲线上或其附近,表明硫可能主要来源于地层(图 7)。

流体包裹体和氢氧同位素研究表明,底圩金矿床成矿流体以富含 CO_2 和高 $\delta^{18}O_{H_2O}$ (未发表数据)为主要特征,也与右江盆地南部的者桑和安那等金矿类似(董文斗,2017; Su et al. ,2018),具有变质流体性质。同位素年代学研究进一步揭示,右江盆地南部金矿形成于印支期(210~230 Ma),如安那金矿床伊利石的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为(232±5) Ma(董文斗,2017; Su et al. ,2018),者桑含金硫化物的 Rb-Sr 等时线年龄为(212±9) Ma(董文斗,2017; Su et al. ,2018),者桑伊利石的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为(215±2) Ma(皮桥辉等,2016; Pi et al. ,2017),以及越南北部的 Khung Khoang 和 Hat Han 金矿的伊利石 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄,分别为(212±2) Ma 和(209±2) Ma(Nevolko et al. ,2017)。这些金矿的形成与印支板块在印支期向北逆冲推覆的构造背景有关(Su et al. ,2018)。虽然目前没有获得底圩金矿精确的成矿年龄,但它与右江盆地南部的其它金矿均具有相似的地质地球化学特征,我们认为底圩金矿床可能形成于相似的地质背景。印支期的造山作用使沉积物脱水形成变质流体而交代玄武岩,容矿岩石的硫化物化过程是形成底圩金矿床最重要的成矿过程之一。

5 结论

(1) 底圩金矿床成矿流体富含 Au、As、Sb、Hg、Tl、Cu、Pb、S 等成矿元素,而贫 Fe。含金硫化物中的 Fe 主要来源于赋矿围岩,Fe 的硫化物化过程是金沉淀富集最重要机制之一,同时伴有伊利石化、



底图据 Chang 等(2008); 者桑数据引自董文斗(2017)

图 7 右江盆地南部典型金矿硫同位素组成对比

Fig. 7 Comparison of $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfides from the representative gold deposits in the southern margin of Youjiang basin

硅化、碳酸盐化等热液蚀变。

(2) 含金硫化物具有较高的硫同位素组成 ($\delta^{34}\text{S}$ 为 7.74‰ ~ 11.02‰), 成矿硫主要来源于沉积地层。

(3) 含砷黄铁矿和毒砂是底圩金矿床的主要载金矿物, 金可能主要以 Au^+ 的形式赋存在含砷黄铁矿和毒砂晶格中。

致谢: 野外工作得到云南广南县隆兴矿业有限公司刘科龙董事长的无私帮助, 样品分析测试得到中国科学院地球化学研究所董少花、蔡佳丽、郑文勤、李响工程师的帮助, 在此一并致以衷心感谢。

参考文献 (References):

Cail T L, Cline J S. 2001. Alteration associated with gold deposition at the Gatchell Carlin-type gold deposit, North-Central Nevada. *Economic Geology*, 96(6): 1343-1359

Chang Z S, Large R R, Maslennikov V. 2008. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 36(12): 971-974

Chen M H, Bagas L, Liao X, Zhang Z Q, Li Q L. 2019. Hydrothermal apatite SIMS Th-Pb dating: Constraints on the timing of low-temperature hydrothermal Au deposits in Nibao, SW China. *Lithos*, 324-325: 418-428

Cline J S, Muntean J L, Gu X X, Xia Y. 2013. A comparison of Carlin-type gold deposits: Guizhou Province, golden triangle, southwest China, and northern Nevada, USA. *Earth Science Frontiers*, 20

(1): 1-18

Emsbo P, Hofstra A H. 2003. Origin and significance of postore dissolution collapse breccias cemented with calcite and barite at the Meikle gold deposit, northern Carlin trend, Nevada. *Economic Geology*, 98(6): 1243-1252

Fleet M E, Mumin A H. 1997. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis. *American Mineralogist*, 82(1-2): 182-193

Giesemann A, Jaeger H J, Norman A L, Krouse H R, Brand W A. 1994. Online sulfur-isotope determination using an elemental analyzer coupled to a mass spectrometer. *Analytical Chemistry*, 66(18): 2816-2819

Grant J A. 1986. The isocon diagram: a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81(8): 1976-1982

Hofstra A H, Cline J S. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13: 163-220

Hu R Z, Su W C, Bi X W, Tu G Z, Hofstra A H. 2002. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China. *Mineralium Deposita*, 37(3-4): 378-392

Hu R Z, Fu S L, Huang Y, Zhou M F, Fu S H, Zhao C H, Wang Y J, Bi X W, Xiao J F. 2017. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 9-34

Huang Y, Hu R Z, Bi X W, Fu S L, Peng K Q, Gao W, Oyebamiji A, Zhaanbaeva A. 2019. Low-temperature thermochronology of the Carlin-type gold deposits in southwestern Guizhou, China: Implications for mineralization age and geological thermal events. *Ore Geology Reviews*, 115: 103178

Kesler S E, Fortuna J, Ye Z, Alt J C, Core D P, Zohar P, Borhauer J,

- Chryssoulis S L. 2003. Evaluation of the role of sulfidation in deposition of gold, Screamer section of the Betze-Post Carlin-type deposit, Nevada. *Economic Geology*, 98(6): 1137-1157
- Morishita Y, Shimada N, Shimada K. 2018. Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan: Significance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite. *Ore Geology Reviews*, 95: 79-93
- Muntean J L, Cline J S. 2018. Diversity of Carlin-style gold deposits. *Society of Economic Geologists, Incorporated*
- Nevolko P A, Hoa T T, Redin Y O, Anh T T, Phuong N T, Vu Hoang L, Dultsev V F, Pham Thi D, Huong N T. 2017. Geology, mineralogy, geochemistry and $\delta^{34}\text{S}$ of sedimentary rock-hosted Au deposits in Song Hien structure, NE Vietnam. *Ore Geology Reviews*, 84: 273-288
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67(5): 551-578
- Pi Q H, Hu R Z, Xiong B, Li Q L, Zhong R C. 2017. In situ SIMS U-Pb dating of hydrothermal rutile: Reliable age for the Zhesang Carlin-type gold deposit in the golden triangle region, SW China. *Mineralium Deposita*, 52(8): 1179-1190
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, Palenik C S, Chryssoulis S L, Ewing R C. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781-2796
- Reich M, Deditius A, Chryssoulis S, Li J W, Ma C Q, Parada M A, Barra F, Mittermayr F. 2013. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104: 42-62
- Stenger D P, Kesler S E, Peltonen D R, Tapper C J. 1998. Deposition of gold in Carlin-type deposits; the role of sulfidation and decarbonation at Twin Creeks, Nevada. *Economic Geology*, 93(2): 201-215
- Su W C, Hu R Z, Xia B, Xia Y, Liu Y P. 2009a. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China. *Chemical Geology*, 258(3-4): 269-274
- Su W C, Heinrich C A, Pettke T, Zhang X C, Hu R Z, Xia B. 2009b. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids. *Economic Geology*, 104(1): 73-93
- Su W C, Dong W D, Zhang X C, Shen N P, Hu R Z, Hofstra A H, Cheng L Z, Xia Y, Yang K Y. 2018. Carlin-type gold deposits in the Dian-Qian-Gui "Golden Triangle" of southwest China. *Reviews in Economic Geology*, 20: 157-185
- Xie Z J, Xia Y, Cline J S, Koenig A, Wei D T, Tan Q P, Wang Z P. 2018. Are there Carlin-type gold deposits in China? A comparison of the Guizhou, China, deposits with Nevada, USA, deposits. *Reviews in Economic Geology*, 20: 187-233
- Yigit O, Hofstra A H. 2003. Litho-geochemistry of Carlin-type gold mineralization in the Gold Bar district, Battle Mountain-Eureka trend, Nevada. *Ore Geology Reviews*, 22(3-4): 201-224
- 陈翠华, 赵德坤, 顾雪祥, 代鸿章. 2014. 云南老寨湾金矿床成矿物质来源探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 33(1): 23-30
- 陈懋弘, 张延, 蒙有言, 陆刚, 刘苏桥. 2014. 桂西巴马料屯金矿床成矿年代上限的确定: 对滇黔桂“金三角”卡林型金矿年代学研究的启示. *矿床地质*, 33(1): 1-13
- 董文斗, 苏文超, 沈能平, 朱路艳, 蔡佳丽. 2017. 广西八渡金矿床含金硫化物矿物学与地球化学研究. *矿物学报*, 37(1-2): 16-28
- 董文斗. 2017. 右江盆地南缘辉绿岩容矿金矿床地球化学研究. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所
- 杜远生, 黄虎, 杨江海, 黄宏伟, 陶平, 黄志强, 胡丽沙, 谢春霞. 2013. 晚古生代-中三叠世右江盆地的格局和转换. *地质论评*, 59(1): 1-11
- 高伟. 2018. 桂西北卡林型金矿成矿年代学和动力学. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所
- 高云鹏, 黄从俊. 2018. 云南者桑卡林型金矿成矿流体特征及其对Au成矿的指示意义. *矿物岩石地球化学通报*, 37(6): 1062-1073
- 和浪涛. 2016. 云南罗平-开远成矿带金矿地质特征与找矿预测. *矿产与地质*, 30(3): 398-405
- 靳晓野. 2013. 黔西南泥堡、水银洞和丫他金矿床的成矿作用特征与矿床成因研究. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学
- 李凤军. 2009. 云南省广南底圩金矿床地质特征及找矿标志. *吉林地质*, 28(1): 36-39
- 李炆霞, 李玉光. 2017. 广南底圩金异常区地质特征及找矿预测. *世界有色金属*, (18): 103, 105
- 刘继顺, 周余国, 韩海涛, 高启芝, 林家勇, 刘德利, 郭军. 2007. 滇东南底圩金矿地质特征及找矿预测. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(4): 652-658
- 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪. 2003. 萤石 Sm-Nd 同位素体系对晴隆梯矿床成矿时代和物源的制约. *岩石学报*, 19(4): 785-791
- 皮桥辉, 胡瑞忠, 彭科强, 吴建标, 韦朝文, 黄勇. 2016. 云南富宁者桑金矿床与基性岩年代测定: 兼论滇黔桂地区卡林型金矿成矿构造背景. *岩石学报*, 32(11): 3331-3342
- 王泽鹏. 2013. 贵州省西南部低温矿床成因及动力学机制研究: 以金、锑矿床为例. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所
- 吴韦玄, 陈远东, 钟金发, 卢德义, 施建斌. 2011. 云南底圩卡林型金矿初探. *矿产勘查*, 2(3): 265-271
- 周余国. 2009. 滇东南卡林型金矿地质地球化学与成矿模式. 博士学位论文. 长沙: 中南大学

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)