

广西天峨坪金矿床硫化物微量元素组成及 铅同位素特征分析

伍 静^{1*}, 苑金涛¹, 罗 阳¹, 农仕华¹,
车 军¹, 韦干华^{1,2}, 张 健³

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 2. 中国人民武装警察部队 黄金部队 第一支队, 黑龙江 牡丹江 157000; 3. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 广西天峨坪金矿床为云开地块新发现具中型规模的金矿床, 主要以浸染状矿化产于博白-岑溪断裂带次级断裂带蚀变岩中。蚀变主要有绢云母化、玉髓状硅化、黄铁矿化及碳酸盐化, 为低温蚀变组合。分析了早矿化阶段($0.1 \leq \text{Au} \leq 1.0 \mu\text{g/g}$)、主矿化阶段($\text{Au} \geq 5 \mu\text{g/g}$)及其中特富矿段($\text{Au} \geq 20 \mu\text{g/g}$)和晚矿化阶段($\text{Au} \leq 1.0 \mu\text{g/g}$)中的黄铁矿和银黝铜矿主元素和微量元素组成以及黄铁矿的 Pb 同位素组成。主矿化阶段黄铁矿 Ni 含量在 0.02%~0.24%之间, 平均 0.07%, Cu 和 As 含量多小于 0.01%; 早晚矿化阶段黄铁矿 Ni 含量多小于 0.01%, Cu 含量平均为 0.13%, As 含量在 0.02%~3.08%之间。主矿化阶段银黝铜矿 Ag 含量大于 17.4%、As 含量小于 0.68%、Cu 含量小于 25%, 而晚矿化阶段银黝铜矿 Ag 含量小于 1.6%、As 含量大于 2.12%、Cu 含量大于 35%。天峨坪金矿床不同矿化阶段黄铁矿的 Co/Ni 比值主要位于热液成因区。主矿化阶段黄铁矿和早及晚矿化阶段黄铁矿 Ni、Co、As 含量在 Co-Ni-As 图上位于不同区域, 主矿化阶段黄铁矿具高 Ni 含量、低 Co/Ni 比值及低 As 和 Cu 含量, 而早及晚矿化阶段黄铁矿则具低 Ni 含量、高 Co/Ni 比值以及高 As 和 Cu 含量。主矿化阶段特富矿段银黝铜矿相对富 Ag 而贫 Cu、As, 而晚矿化阶段银黝铜矿则相对贫 Ag 而富 Cu、As。黄铁矿及银黝铜矿元素组成特征表明, 天峨坪金矿床主矿化阶段流体除更富 Au 外, 还相对富 Ag 和 Ni, 贫 As 和 Cu; 早晚矿化阶段成矿流体相对富 As 和 Cu, 贫 Ni。天峨坪金矿床和云开地块的基底变质岩及其中一些金矿床的 Pb 同位素组成相似, 结合主矿化阶段黄铁矿相对富 Ni 的特征, 暗示主矿化阶段成矿物质主要来自富 Au 及相对富易溶解 Ni 的元古宙基底。

关键词: 天峨坪金矿床; 微量元素; Pb 同位素; 矿床成因; 广西

中图分类号: P595; P597; P612 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2018)06-0649-12

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2018.06.006

Sulfide trace element variation and Pb isotope of the Tian'eping gold deposit, Guangxi

WU Jing^{1*}, YUAN Jin-tao¹, LUO Yang¹, NONG Shi-hua¹, CHE Jun¹, WEI Gan-hua^{1,2} and ZHANG Jian³

1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. No.1 Gold Geological Party of CAPF, Mudanjiang 157000, China;

3. Key Laboratory for Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: The recently discovered Tian'eping medium-sized gold deposit is located in the Yunkai Block, Guangxi Zhuang Autonomous Region. Gold mineralization mainly occurred due to dissemination of the alteration rocks in the second fault of the Bobai-Cenxi fault belt. Hydrothermal alteration mainly includes sericitization, silicification, pyritization, and carbonatization, indicating low temperature alteration and mineralization. Mineralization and alteration characteristics show that the Tian'eping gold deposit could be classified as a low temperature structural altered-rock type gold deposit. The composition of main and trace elements of pyrite and freibergite were analyzed

收稿日期(Received): 2018-04-11; 改回日期(Revised): 2018-06-08; 接受日期(Accepted): 2018-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(41772065, 41372084); 广西大学科研基金(XGZ150264)

作者简介: 伍静(1978-), 男, 博士、副教授, 主要从事成矿规律及成矿预测研究。

* 通讯作者(Corresponding author): WU Jing, E-mail: 417534291@qq.com; Tel: +86-771-3232200

from the main stages of gold mineralization (Au content >5 g/t) and the bonanza zone (Au content >20 g/t), early stage of gold mineralization (Au content <1.0 g/t), and late stage pyrite veins (Au <1.0 g/t). Additionally, the Pb isotope composition of sulfide of the Tian'eping gold deposit was analyzed. Pyrite from the main stage of gold mineralization and bonanza zone had Ni content varying from 0.02% to 0.24%, with an average of 0.07%, and Cu and As content of less than 0.01%. In contrast, pyrite from early stage of gold mineralization and late stage pyrite veins had Ni content less than 0.01%, average Cu content of 0.13% and As content varying from 0.02% to 3.08%. Freibergite from the main stage of gold mineralization had Ag content more than 17.4%, As content less than 0.68%, and Cu content less than 25%. Freibergite from the late stage pyrite veins had Ag content less than 1.61%, As content more than 2.12%, and Cu content more than 35%. Pyrites from different stages of mineralization had Co/Ni values located on the domain of hydrothermal genetic pyrite. Pyrite from the main stage of gold mineralization was located on different domains of the Co-Ni-As triangular plot from the pyrite of early and late stage mineralization. The element variation characteristics of pyrite and freibergite at different mineralization stages show that the sulfides from the main stage of mineralization had much higher concentrations of Ni and Ag and lower concentrations of Cu and As than the early and late stages of mineralization. This suggests that the ore forming fluids of the main stage of gold mineralization had higher concentrations of Au, Ag, and Ni and lower concentration of As and Cu than the ore forming fluids of the early and late stages of mineralization. Pb isotopic composition shows that the Proterozoic basement was one of the main sources of the ore-forming material of the Tian'eping gold deposit

Key words: Tian'eping gold deposit; trace elements; Pb isotope; ore genesis; Guangxi

0 引言

云开地块位于桂东南及粤西地区,是华南地区重要的金矿床分布区,发育一系列大中型金矿床及众多金矿化点。据不完全统计,云开地块约有金-银矿床(点)300多个^[1],较著名的有河台特大型金矿床、新洲金矿床、大沟谷金矿床、黄泥坑金矿床、茶洞金银矿床、高凤金矿床、庞西洞-金山金银矿床等^[2-11]。云开地块金矿床主要产于新元古界-志留系变质细碎屑岩中,可粗略分为下述两种类型:一类产于元古宙变质基底的韧性剪切带或脆性破碎带中,如粤西地区河台特大型金矿床、新洲金矿床;另一类产于侵入岩内外接触带,如广宁县黄泥坑金矿床、金山-庞西洞金银矿床等。金矿床元素组合主要为 Au、Au-Ag 或 Au-Ag-Pb-Zn 等,Au 矿化主要以石英脉充填为主,成矿温度较高,多大于 250 °C^[6-8],部分为构造破碎带蚀变岩型。对基底中金矿床成因有不同看法:一种观点认为与岩浆作用有关^[6];另一种观点认为是变质或变质与后期热液叠加成因^[1,12,13]。云开地块中金矿床同位素定年工作主要集中在河台金矿床及高凤金矿床,河台金矿床富硫化物石英脉的 Rb-Sr 等时线年龄和磁黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄

相近,在 172~175 Ma 之间^[12,14],高凤金矿床石英包裹体 Rb-Sr 等时线和 Ar-Ar 年龄约 215 Ma^[3]。

天峨坪金矿床位于桂东南金成矿带中北部,是近年来新发现的,矿化主要产于破碎带蚀变岩中,未见明显石英脉充填,上部见 Sb 矿脉,为 Au-Sb-Ag 组合,矿化特征和元素组合与云开地块的其他金矿床明显不同。本文拟通过不同矿化阶段中黄铁矿和银黝铜矿的主元素和微量元素及黄铁矿 Pb 同位素组成分析,探讨成矿过程和物质来源,以期对更全面地了解云开地块金矿床类型、成矿特征及演化等有所裨益。

1 区域地质背景

云开地块主要由古中元古界中深变质岩系及晋宁期-加里东期混合岩和混合花岗岩、新元古界云开群及下古生界浅变质岩和混合岩组成^[15]。古中元古界基底岩石主要为片麻岩、变粒岩、片岩及少量石英岩、大理岩等;云开群为一套浅变质陆源碎屑岩,以砂泥质岩为主,夹少量碳酸盐岩和基性-酸性火山岩组合。云开地块经历了晋宁期及加里东期区域变质、印支期及燕山期构造岩浆作用,使基底中的金活化、迁移,期后在构造薄弱部位发生富集,形成一

系列矿床及矿化点^[1]。

天峨坪金矿床位于南华准地台云开地块西北缘, 博白-岑溪断裂带中段(图 1a), 经历了加里东旋回、印支旋回和燕山旋回等地质构造运动。博白-岑溪褶皱带发生强烈挤压、褶皱, 形成了较大规模的压碎岩带、构造角砾岩带、韧性剪切带和片岩带。区域上出露地层为中新元古界-奥陶系轻变质岩, 岩性主要为千枚岩、片岩、变粒岩及大理岩等。变质岩呈 NEE 向带状展布, 其原岩为地槽型浅海相碎屑岩和少量碳酸盐、硅质岩^[17]。区域岩浆作用强烈, 主要有加里东期二长花岗岩、花岗片麻岩及燕山期花岗闪长岩。区内矿床(点)发育, 主要有金、铜及铅锌等矿床(点), 多产于基底地层中。

2 矿床地质特征

矿区内出露地层为奥陶系片岩、石英绢云千枚岩及碎屑岩等。矿体赋存于博白-岑溪断裂的次级断裂带 F₁ 内(图 1b), 区内未见岩浆岩。天峨坪金矿床 Au 平均品位为 3.6 μg/g (原生矿), 探明金资源量已超过 5 t, 其深部及边部还未完全控制, 远景有望进一步扩大。

矿区内目前已发现 4 个矿体, 编号为 I、II、III、IV, 矿体走向均为近东西向, 和 F₁ 断裂带走向基本一致。除 I 号矿体为地表出露的氧化矿外, 其余均为新发现隐伏原生矿矿体。I 号矿体沿走向长度超过 800 m, 宽 3~7 m, 主要为地表氧化矿, 氧化深度一般小于 50 m, 矿化不均匀, Au 品位一般小于 1.2 μg/g,

最高为 3.7 μg/g, 含 Ag 较少一般小于 5 μg/g。II 号矿体为矿区内规模最大矿体(II 号矿体探明金金属量超过已探明金金属量的 60%), 其长度大于 160 m, 厚 5~50 m, 走向近东西, 倾向南, 倾角 30°~45°, Au 品位在 1~42 μg/g, 矿体普遍含 Ag, 含量在 3~36 μg/g 之间。III、IV 矿体规模较小, Au 品位一般在 2~11 μg/g 之间。

据矿化蚀变组合及穿插关系, 天峨坪金矿床矿化从早到晚可分 3 个成矿阶段: (1) 早矿化阶段: 绢云母-石英-黄铁矿-自然金及银金矿; (2) 主矿化阶段: (玉髓状烟灰色)石英-碳酸盐-绢云母-黄铁矿-自然金及银金矿; (3) 晚矿化阶段: 石英-硫化物-金。早矿化阶段主要由浅灰绿色绢云母和少量石英组成以及少量黄铁矿组成(图 2a); 石英多为细粒状或为团块状集合体, 粒度较细, 多在 0.1 mm 左右, 黄铁矿呈浸染状分布, 部分呈砂粒状集合体, 黄铁矿颜色较暗, 粒度多小于 0.2 mm, 晶形较好; 早阶段矿化金含量较低, 多小于 1 μg/g; 在钻孔(ZK301)中见早矿化阶段的绢云母-石英-黄铁矿-金蚀变岩石被主矿化阶段的(玉髓状烟灰色)石英-碳酸盐脉胶结(图 2b)。主矿化阶段主要由石英、方解石、绢云母、浸染状黄铁矿(图 2b、2c、2d、2g、2h)及自然金及银金矿组成, Au 含量多在 0.51~11.5 μg/g 之间。主矿化阶段黄铁矿金属光泽较强, 多呈星点状及镶嵌状, 粒径较大, 多在 0.1~0.5 mm 之间, 发育烟灰色含浸染状黄铁矿细粒硅化岩(图 2d、2g、2h)地段形成特富 Au 矿段, Au 含量大于 20 μg/g; 富 Au 矿段黄铁矿粒度极细, 多小于 0.1 mm。晚矿化阶段主要矿物组合为黄铁矿-

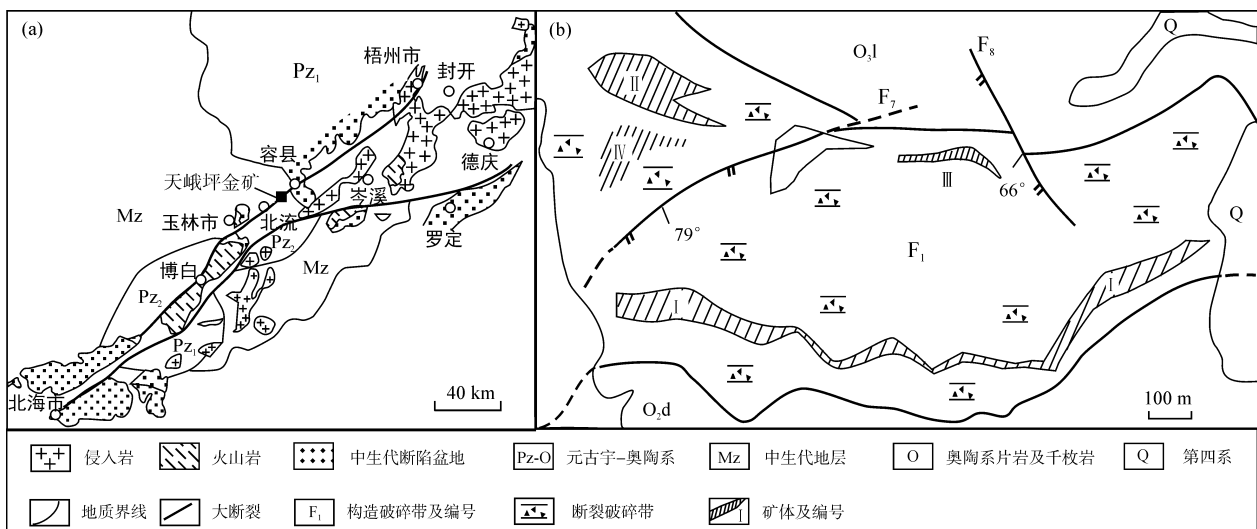


图 1 区域地质图(a, 据罗璋^[16]修改)和天峨坪金矿区地质简图(b)

Fig.1 Regional geological map (a) and geological map (b) of the Tian'eping gold deposit

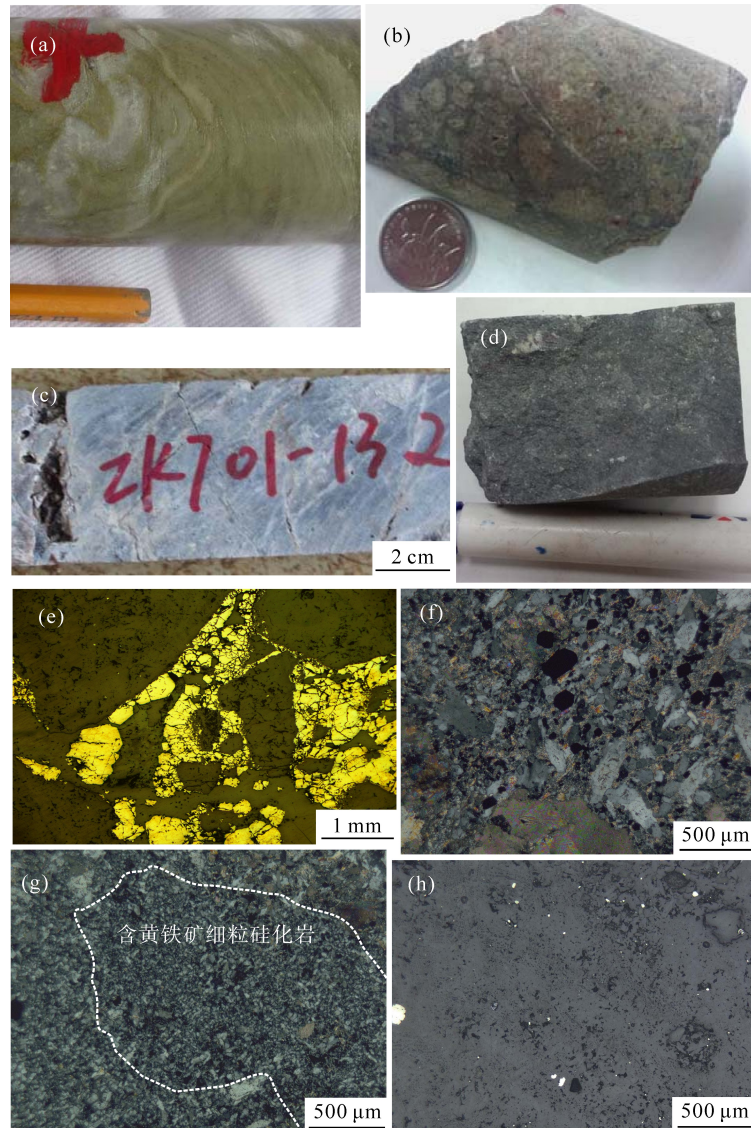


图 2 天峨坪金矿床矿化特征

Fig.2 Photos showing features of different stages of mineralization of the Tian'eping gold deposit

(a) 早矿化阶段矿石, 主要由绢云母、石英和少量黄铁矿组成; (b) 主矿化阶段胶结早矿化阶段; (c) 主矿化阶段矿石; (d) 主矿化阶段局部富 Au 矿段矿石; (e) 晚矿化阶段黄铁矿-石英脉(反光镜); (f) 主矿化阶段显微特征, 主要由硅化、碳酸盐、黄铁矿及绢云母组成(单偏光); (g) 主矿化阶段中富(高品位)矿石, 为含浸染状黄铁矿的细粒硅化岩(单偏光); (h) 为(g)照的反光照片, 细粒黄铁矿浸染状分布于细粒硅化岩中。

石英和辉锑矿-石英细脉(脉宽多在 0.5~2 cm 左右), 黄铁矿-石英脉主要见于矿化带下部, 呈小细脉状, 脉幅多小于 1 cm, 穿插在早期围岩中; 辉锑矿石英脉主要发育于矿化带顶部。该矿化阶段规模较小, Au 含量多小于 1 μg/g, 该矿化阶段黄铁矿粒度较大, 多大于 0.5 mm。

矿石矿物主要有自然金、银金矿、黄铁矿(褐铁矿)、辉锑矿、银黝铜矿和少量方铅矿, 脉石矿物主要为石英、绢云母和方解石。富烟灰色玉髓状石英段叠加细粒黄铁矿部位 Au 含量特别高, 显示细粒黄铁矿与金矿关系密切; 银黝铜矿多分布于黄铁矿的边部(图 3)。天峨坪金矿床矿体产于构造断裂带蚀

变岩中, 围岩蚀变强烈, 主要有玉髓状烟灰色硅化、绢云母化, 黄铁矿化及碳酸盐化等; 其中黄铁矿化、硅化及碳酸盐化与金矿化关系密切。

3 分析方法及结果

本文分析了早矿化阶段($0.1 \leq \text{Au} \leq 1.0 \mu\text{g/g}$)、主矿化阶段(富金, $\text{Au} \geq 5 \mu\text{g/g}$)及其中特富金矿段($\text{Au} \geq 20 \mu\text{g/g}$)和晚矿化阶段脉状矿化($\text{Au} \leq 1.0 \mu\text{g/g}$)黄铁矿主元素和微量元素组成, 富金矿段和晚矿化阶段黄铁矿-石英脉中银黝铜矿主元素和微量元素组成和黄铁矿原位 Pb 同位素组成。

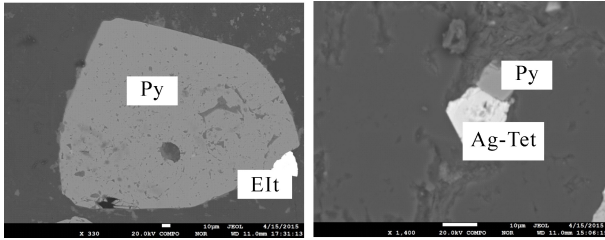


图 3 天峨坪金矿床中和黄铁矿共生金银矿、银黝铜矿 (Py-黄铁矿; Elt-金银矿; Ag-Tet-银黝铜矿)

Fig.3 Photos showing the distribution of electrum and freibergite associated with pyrite

硫化物微区电子探针分析在中国科学院广州地球化学研究所完成, 采用 JEOL JXA-8230 电子探针, 电压 20 kV, 电流 20 nA, 束斑 1 μm , 分析误差优于 3%, 使用美国标样委员会提供的标样对测试结果进行校正。

黄铁矿 Pb 同位素质谱分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 采用飞秒激光剥蚀多接收等离子体质谱(LA-MC-ICPMS)微区原位分析法, 具体分析方法参见袁洪林等^[18]。

不同矿化阶段黄铁矿主元素和微量元素组成有一定的差异(表 1), 早阶段矿化、主矿化阶段金矿体及其中特富金矿段和晚矿化阶段中的黄铁矿含量都较低, 多数分析点 Au 含量小于 0.01%。

主矿化阶段及其中特富金矿段 42 个黄铁矿分析点中除 5 个点 Ni 含量小于 0.01%外, 其余点含量在 0.02%~0.24%之间, 平均 0.07%, Cu 和 As 含量多小于 0.01%, 显示相对富 Ni, 贫 Cu 和 As 特征。早矿化阶段(贫金)黄铁矿 22 个分析点 Ni 多小于 0.01%, As 平均含量达 1.33%, Cu 分析点中除 2 个点含量小于 0.01%外, 其余 20 个分析点 Cu 平均 0.17%, 显示贫 Ni, 富 Cu 和 As 特征。晚矿化阶段黄铁矿 19 个分析点中 Ni 多小于 0.01%, As 平均 0.67%, Cu 分析点中除 1 个点含量小于 0.01%外, 其余 18 个点平均 0.09%, 晚矿化阶段黄铁矿微量元素含量与早矿化阶段具相似性, 也具有贫 Ni, 富 Cu 和 As 特征。

主矿化阶段中富 Au 矿段和晚矿化阶段银黝铜矿的成分有明显差异(表 2)。主矿化阶段富 Au 矿体中银黝铜矿具高 Ag (17.70%~20.70%)、贫 Cu (22.48%~24.67%)及 As (0.25%~0.68%)特征, 而晚矿化阶段脉状矿化中的银黝铜矿相对贫 Ag (1.25%~1.53%)、富 Cu (35.95%~37.82%)和 As (2.12%~3.09%)。

天峨坪金矿床铅同位素组成稳定, 黄铁矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 18.594~18.998, 平均 18.762; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.686~15.839, 平均 15.762; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 38.840~39.296, 平均 39.154 (表 3)。

表 1 不同矿化阶段黄铁矿主微量元素含量(%)

Table 1 Major and trace element concentrations (%) of pyrite from different stage mineralization

矿化阶段	分析号	Fe	S	As	Au	Co	Ni	Cu	total
	a-1	45.37	50.99	2.22	< 0.01	0.05	0.03	0.39	99.05
	a-1-4	45.17	52.16	1.36	< 0.01	0.04	< 0.01	0.09	99.35
	a-1-5	45.18	51.63	1.82	0.05	0.05	< 0.01	0.16	98.89
	a-2-10	46.33	52.35	0.68	0.05	0.08	0.02	0.02	99.53
	a-2-11	46.30	51.96	1.38	< 0.01	0.05	< 0.01	0.05	99.74
	a-2-12	46.62	52.40	0.64	< 0.01	0.05	< 0.01	0.02	99.73
	a-2-13	45.91	52.44	1.10	< 0.01	0.06	< 0.01	0.03	99.54
	a-2-14	45.83	51.16	3.08	< 0.01	0.05	< 0.01	0.10	100.22
	a-2-2	46.18	52.81	0.67	0.03	0.05	< 0.01	0.04	99.78
	a-2-4	45.97	51.83	0.70	< 0.01	0.06	< 0.01	0.08	98.64
早矿化阶段: Au 1.0 $\mu\text{g}/\text{g}$	a-2-4	45.81	52.43	0.72	< 0.01	0.10	0.01	0.05	99.12
	a-2-6	43.76	49.38	3.68	0.02	0.05	0.01	< 0.01	96.90
	a-2-7	46.34	53.52	0.44	0.02	0.04	0.01	< 0.01	100.37
	a-2-8	45.45	51.41	0.98	0.03	0.05	0.02	0.03	97.97
	a-2-9	43.71	51.87	1.09	< 0.01	0.07	0.01	0.05	96.80
	a-3-2	45.75	52.91	0.15	< 0.01	0.09	< 0.01	0.09	98.99
	a-4-1	44.67	50.90	2.31	< 0.01	0.02	< 0.01	0.49	98.39
	a-4-2	44.30	51.76	1.38	< 0.01	0.07	0.02	0.41	97.94
	a-5-1	46.01	52.18	1.39	0.02	0.06	< 0.01	0.19	99.85
	a-5-2	45.33	52.32	1.09	< 0.01	0.05	< 0.01	0.08	98.87
	a-6-1	46.07	52.18	1.00	0.02	0.05	< 0.01	0.07	99.39
	a-6-3	44.50	51.24	1.36	0.04	0.08	0.06	1.08	98.36

(续表 1)

矿化阶段	分析号	Fe	S	As	Au	Co	Ni	Cu	total	
	b-1-3	45.59	53.17	0.01	< 0.01	0.14	0.18	0.02	99.11	
	b-1-5	46.34	53.54	0	0.03	0.06	0.06	< 0.01	100.03	
	b-2-2	46.47	53.27	0.01	0.03	0.09	0.05	< 0.01	99.92	
	b-2-4	46.77	52.80	0	0.02	0.06	0.08	< 0.01	99.73	
	b-3-3	46.68	53.72	0.02	< 0.01	0.06	0.02	0.02	100.52	
	b-4-1	46.78	53.04	0	< 0.01	0.08	0.12	< 0.01	100.02	
	b-4-2	46.79	53.50	0	< 0.01	0.05	0.02	< 0.01	100.36	
	b-5-1	47.10	53.32	0	< 0.01	0.06	0.04	< 0.01	100.52	
	b-5-2	46.61	53.63	0	< 0.01	0.09	0.17	< 0.01	100.50	
	b-7-1	46.86	53.47	0	< 0.01	0.09	0.09	0.03	100.54	
主矿化阶段 特富 Au 段: Au 20 μg/g	b-8-3	46.63	52.9	0	0.03	0.04	< 0.01	< 0.01	99.60	
	b-8-4	47.13	53.36	0	< 0.01	0.05	0.05	< 0.01	100.59	
	b-8-11	46.47	53.44	0	< 0.01	0.06	0.06	< 0.01	100.03	
	b-8-18	46.06	52.89	0	< 0.10	0.09	0.09	< 0.01	99.13	
	b-8-19	46.45	52.66	0.01	0.035	0.07	0.06	< 0.01	99.285	
	b-8-20	46.36	52.17	0	0.024	0.05	0.03	< 0.01	98.634	
	b-8-21	46.61	52.82	0	< 0.01	0.04	< 0.01	< 0.01	99.47	
	b-8-22	46.51	53.46	0	< 0.01	0.06	0.03	0.03	100.09	
	b-8-23	46.69	52.86	0	< 0.01	0.03	0.02	< 0.01	99.60	
	b-8-24	46.44	52.97	0	< 0.01	0.06	0.05	< 0.01	99.52	
	b-8-25	46.06	52.69	0	< 0.01	0.05	< 0.01	< 0.01	98.80	
	b-8-26	46.53	52.51	0	0.031	0.04	0.05	< 0.01	99.161	
		c-1-1	46.28	52.61	0	< 0.01	0.06	0.09	< 0.01	99.04
		c-1-2	46.94	53.29	0	0.03	0.05	0.03	0.02	100.36
	c-2-1	46.92	52.84	0	< 0.01	0.07	0.04	0.02	99.89	
	c-2-2	46.58	53.30	0	< 0.01	0.08	0.04	< 0.01	100.00	
	c-3-1	46.77	53.65	0	0.02	0.08	0.06	0.03	100.61	
	c-3-2	46.80	53.87	0.02	< 0.01	0.11	0.24	0.02	101.06	
	c-3-4	47.01	53.08	0	0.03	0.06	0.05	< 0.01	100.23	
	c-3-5	46.96	53.60	0.02	0.06	0.06	0.03	< 0.01	100.73	
	c-3-6	46.75	52.76	0	0.03	0.09	0.19	< 0.01	99.82	
主矿化阶段: Au 5.0 μg/g	c-3-7	46.77	53.26	0	< 0.01	0.09	0.23	< 0.01	100.35	
	c-3-8	46.15	51.86	0.03	0.01	0.05	0.05	< 0.01	98.15	
	c-3-9	47.12	53.30	0	0.02	0.07	0.04	0.01	100.56	
	c-4-1	46.87	53.68	0.03	< 0.01	0.06	0.05	< 0.01	100.69	
	c-4-2	46.65	53.19	0	< 0.01	0.06	0.08	< 0.01	99.98	
	c-5-1	46.98	52.93	0	< 0.01	0.05	0.03	< 0.01	99.99	
	c-5-2	47.01	53.18	0	0.02	0.06	0.07	0.05	100.39	
	c-5-3	46.86	53.23	0	0.01	0.10	0.07	0.02	100.29	
	c-6-1	46.72	52.90	0	< 0.01	0.05	< 0.01	0.01	99.68	
	c-6-2	46.74	53.53	0	< 0.01	0.04	< 0.01	0.01	100.32	
	c-7-1	47.12	53.44	0.02	< 0.01	0.03	0.04	< 0.01	100.65	
晚矿化阶段 脉矿: Au 1.0 μg/g	f-1-1	46.01	52.41	0.71	< 0.01	0.07	< 0.01	0.03	99.23	
	f-2-2	46.15	52.00	1.01	< 0.01	0.06	< 0.01	0.02	99.24	
	f-3-1	46.72	53.19	0.01	0.02	0.04	< 0.01	0.02	100.00	

(续表 1)

矿化阶段	分析号	Fe	S	As	Au	Co	Ni	Cu	total
	f-4-1	46.53	52.76	0.09	< 0.01	0.05	< 0.01	0.02	99.45
	f-5-2	46.51	53.20	0.37	< 0.01	0.04	< 0.01	0.03	100.15
	f-6-1	46.32	52.17	0.58	0.02	0.03	< 0.01	0.03	99.15
	f-7-2	46.55	53.51	0.14	< 0.01	0.05	< 0.01	0.17	100.42
	f-7-3	46.55	52.59	0.21	< 0.01	0.06	< 0.01	0.03	99.44
	f-8-1	45.97	51.93	1.02	< 0.01	0.04	< 0.01	0.15	99.11
	f-9-2	45.77	52.01	1.74	< 0.01	0.05	0.03	< 0.01	99.60
晚矿化阶段 脉矿:	f-7-1	46.10	52.25	0.18	0.01	0.06	< 0.01	0.33	98.93
Au 1.0 μg/g	f-8-2	46.28	52.93	0.42	< 0.01	0.06	0.02	0.11	99.82
	f-9-2	45.57	51.45	2.07	< 0.01	0.04	< 0.01	0.03	99.16
	f-9-3	44.55	50.27	0.83	0.02	0.08	0.02	0.04	95.81
	f-9-4	45.45	51.95	1.54	< 0.01	0.07	< 0.01	0.02	99.03
	f-9-3-1	45.92	52.10	1.72	0.03	0.06	0.03	0.04	99.90
	f-7-5	46.05	52.71	0.03	< 0.01	0.04	< 0.01	0.21	99.04
	f-7-6	46.07	53.09	0.02	< 0.01	0.04	< 0.01	0.15	99.37
	f-7-7	46.23	53.08	0.08	< 0.01	0.04	< 0.01	0.20	99.63

表 2 天峨坪金矿床富 Au 矿体和晚矿化阶段银黝铜矿的成分(%)

Table 2 Major and trace element concentrations (%) of Ag-tetrahedrit associated with pyrite from gold rich ore bodies and late stage pyrite veins

矿化阶段	分析点	Fe	S	As	Ag	Cu	Zn	Sb	Mo	Cd	Total
	f-7-8	2.14	24.88	2.55	1.39	35.99	7.57	24.60	0.53	0.42	100.07
	f-7-4	1.54	24.53	2.12	1.49	36.58	7.38	24.73	0.27	0.18	98.81
晚矿化阶段脉 状矿化	f-2-1-1	0.13	25.00	3.12	1.25	37.77	7.55	24.47	0.30	0.18	99.78
	f-5-1-1	1.24	24.40	2.91	1.39	36.32	7.50	23.72	0.25	0.45	98.17
	f-7-1-1	1.55	24.65	2.97	1.38	35.95	7.32	24.49	0.40	0.18	98.90
	f-9-1-1	0.14	24.45	3.09	1.53	37.82	7.61	24.36	0.01	0.42	99.43
	b-9-1	0.13	22.80	0.36	18.35	24.39	6.93	26.49	0.33	0.28	100.05
主矿化阶段中 特富 Au 矿段	b-1-2-1	0.30	22.16	0.30	20.63	22.69	6.84	27.03	0.03	0.29	100.27
	b-3-2-1	1.71	22.29	0.68	20.70	22.48	6.66	25.53	0.17	0.31	100.53
	b-9-3	0.10	23.03	0.25	17.70	24.67	7.12	26.92	0.14	0.29	100.20

表 3 天峨坪金矿床铅同位素组成

Table 3 Pb isotope composition of Tian'eping gold deposit

样号	矿物	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ
ZK301-1-2		38.900	0.095	15.686	0.038	18.594	0.045
ZK301-1-3		38.840	0.030	15.716	0.012	18.998	0.017
ZK301-1-5		39.216	0.120	15.839	0.048	18.738	0.058
ZK301-1-6		39.212	0.012	15.765	0.005	18.981	0.006
ZK301-13-1		39.266	0.068	15.785	0.027	18.780	0.033
ZK301-13-5		39.296	0.042	15.812	0.017	18.850	0.020
ZK301-13-7	黄铁矿	39.199	0.129	15.782	0.052	18.773	0.062
ZK301-6-1		39.219	0.003	15.765	0.001	18.710	0.001
ZK301-6-3		39.112	0.034	15.729	0.014	18.663	0.016
ZK301-6-4		39.205	0.008	15.762	0.003	18.708	0.004
ZK301-6-5		39.167	0.024	15.751	0.010	18.702	0.012
ZK301-6-6		39.185	0.039	15.760	0.016	18.706	0.018
ZK301-6-7		39.182	0.031	15.754	0.013	18.702	0.015

4 讨论

4.1 天峨坪金矿床特征及其与云开地块其他金矿床差异

云开地块中金矿床多为金或金银矿床, 矿化主要为石英硫化物脉充填于变质岩破碎带中, 元素组合主要为 Au、Au-Ag 或 Au-Ag-Pb-Zn, 多为硅化-黄铁矿化、碳酸盐化和较弱的绢云母化, 显示相对高温的蚀变矿物组合, 包裹体测温表明成矿温度多高于 250℃^[6-8]。天峨坪金矿床产于断裂带硅化蚀变岩中, 未见石英脉充填, 顶部见 Sb 矿脉, 具 Au-Sb-Ag 组合, 和云开地块其他金矿床的矿化元素组合有一定差异。天峨坪金矿床富 Au 矿化与玉髓状烟灰色细粒硅化岩紧密共生, 碳酸盐化较强, 显示低温蚀变矿物组合特征, 明显低于云开地块中其他金矿床的矿化温度(250℃)。矿体主要分布于 F₁ 主断裂带内的次级断裂中, 走向与 F₁ 断裂带一致, 都为近东西向, 但倾向和主断裂相反, F₁ 主断裂倾向北, 而控矿断裂则倾向南。天峨坪金矿床矿化特征表明其为断裂带控制的低温蚀变岩型金矿床, 与云开地块其他金矿床的矿化特征、成矿温度和成矿元素组合都有所不同, 是云开地块的新类型金矿床。该矿床的发现, 对云开地块金矿找矿工作有重要意义。

4.2 不同矿化阶段黄铁矿和银黝铜矿微量元素特征

天峨坪金矿床主矿化阶段和早晚矿化阶段黄铁矿的 Ni 和 Co 含量有一定差异。早矿化阶段黄铁矿 Co 含量在 0.02%~0.10%之间, 平均 0.06%; 晚矿化阶段黄铁矿 Co 含量在 0.03%~0.08%之间, 平均 0.05%; 而主矿化阶段黄铁矿 Co 含量(0.03%~0.14%, 平均 0.07%)略高于早晚矿化阶段(表 1 和图 4)。主矿化阶段黄铁矿 Co 和 Ni 具有正相关关系(相关系数 $R^2 = 0.53$)。早晚矿化阶段黄铁矿的 Co 和 Ni 相关性不明显(相关系数 $R^2 = 0.007$)。不同矿化阶段黄铁矿 Co/Ni 比值多为 1 左右, 分布于热液成因区域(图 4)。此外, 在 Ni-Co/Ni 图上(图 5), 主矿化阶段黄铁矿多位于高 Ni 含量、低 Co/Ni 值区域, 而早晚两矿化阶段黄铁矿则分布于低 Ni 含量、高 Co/Ni 值区域。在 Co-Ni-As 三角图上(图 6), 主矿化阶段黄铁矿和早晚矿化阶段黄铁矿也明显分布于不同区域: 前者贫 As, 后者特别富 As。此外, 主矿化阶段黄铁矿还相对贫 Cu (多小于 0.01%), 而早晚矿化阶段黄铁矿相对富

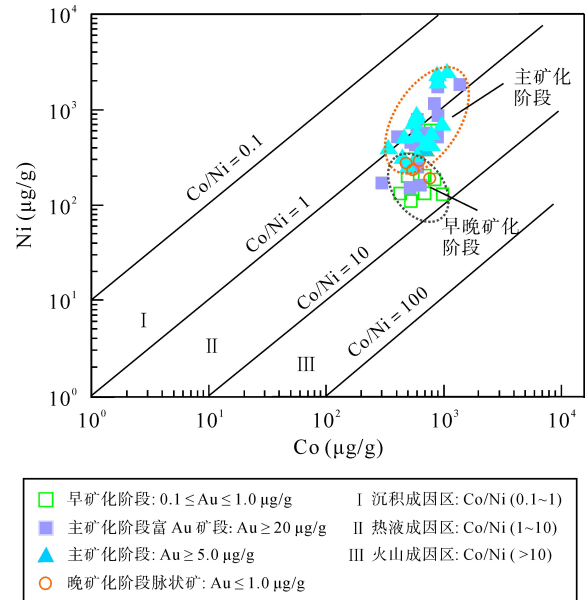


图 4 天峨坪金矿床不同矿化阶段黄铁矿 Ni-Co 关系(据文献[19])

Fig.4 Ni vs. Co diagram of pyrite from different stages of mineralization of the Tian'eping gold deposit (modified after reference [19])

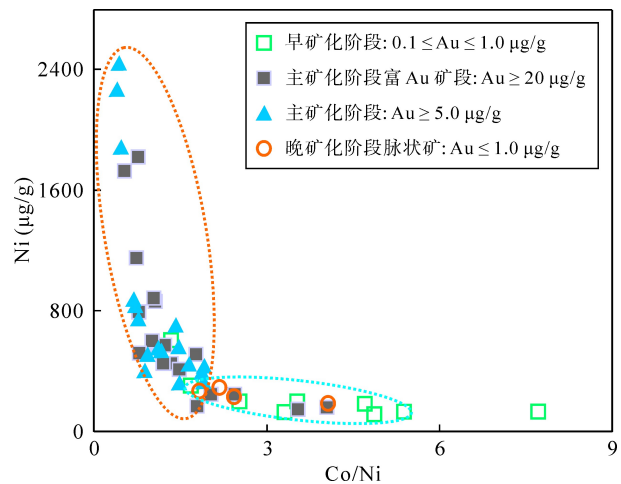


图 5 天峨坪金矿床不同矿化阶段黄铁矿 Ni-Co/Ni 关系图

Fig.5 Ni vs. Co/Ni of pyrite from different stages of mineralization of the Tian'eping gold deposit

Cu (早阶段平均含量为 0.17%, 晚阶段平均含量为 0.09%) (表 1)。主矿化阶段银黝铜矿也相对贫 As (0.30%~0.68%)和 Cu (22.48%~24.67%), 而晚矿化阶段银黝铜矿则相对富 As (2.12%~3.12%)和 Cu (35.95%~37.82%), 与主矿化阶段和早晚矿化阶段黄铁矿的 As 和 Cu 元素特征一致。

黄铁矿中的元素含量高低受矿物析出时热液的物理化学条件和热液中微量元素含量、元素价态、离子半径等因素影响, 而热液中微量元素价态则受热液物理化学条件的影响。天峨坪金矿床主矿化阶

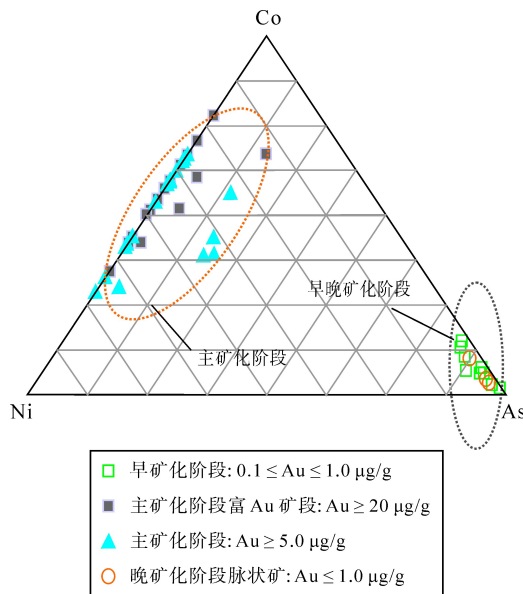


图 6 天峨坪金矿床不同矿化阶段黄铁矿
Co-Ni-As 三角图

Fig.6 Co-Ni-As triangular diagram for pyrite from different stages of mineralization of the Tian'eping gold deposit

段和早晚矿化阶段蚀变矿物组合差异不大, 两者形成温度都较低, 表明主矿化阶段和早晚矿化阶段成矿氧化还原条件和温度应差异不大, 因此, 矿物晶格中微量元素含量应主要和热液中微量元素含量高低或离子活度大小有关。Ni、Co、As 主要以类质同像形式进入黄铁矿晶格中^[20], 天峨坪金矿床主矿化阶段黄铁矿相对富 Ni、贫 As 和 Cu, 而早晚矿化阶段黄铁矿则相对贫 Ni、富 As 和 Cu; 主矿化阶段银黝铜矿相对富 Ag, 贫 As 和 Cu, 晚矿化阶段银黝铜矿则相对贫 Ag、富 As 和 Cu。这表明天峨坪金矿床主矿化阶段成矿流体相对富 Au、Ni 和 Ag, 贫 As 和 Cu, 早晚矿化阶段流体相对贫 Au、Ag 和 Ni, 富 As 和 Cu。

Co 在热液中溶解度和迁移能力远大于 Ni^[21]。中低盐度地质流体中镍硫化物的溶解度很低, 多小于 0.3 $\mu\text{g/g}$ ^[21], 因此, 成矿流体中 Ni 含量一般比较低。和同一矿源区反应的成矿流体不同阶段一般不会导致成矿流体中 Ni 含量明显增加或 Co/Ni 值降低, 因此来自同一源区矿床黄铁矿在 Co-Ni-As 图上多位于同一区域^[22]。此外, 同一成矿流体的演化难以导致早晚矿化阶段成矿流体相对富 As 和 Cu, 而主矿化阶段却相对贫 As 和 Cu。因此, 天峨坪金矿床主矿化阶段流体和早晚矿化阶段成矿流体 Co、Ni 和 As 等微量元素组成差异应该不是同一源区成矿物质及成矿流体演化所致, 而可能与其溶解成矿物质的源区不同有关。主矿化阶段成矿物质可能来自相

对富 Au、Ag 和富含易溶解 Ni 的源区, 而早晚矿化阶段成矿物质可能来自相对不富含易溶解 Ni 的源区。桂中南地区基底地层中发现了含再沉积形成的浸染状红砷镍矿层, 红砷镍矿经低温流体改造形成特富 Ni 的矿脉^[23], 这表明桂中南地区基底中相对富易溶解及迁移的镍元素。主矿化阶段成矿流体相对富 Ni 暗示主矿化阶段成矿物质源可能与基底地层有关。

4.3 天峨坪金矿床成矿物质来源分析

本文分析了天峨坪金矿床中黄铁矿的 Pb 同位素组成, 并结合云开地块产于变质基底银金矿床中黄铁矿的 Pb 同位素组成, 来讨论天峨坪金矿床的物质来源。由于黄铁矿中 U 含量很低, 黄铁矿结晶析出后, 其本身放射成因 Pb 积累可忽略不计, 而源区地层会继续积累放射成因 Pb, 开展不同地质体 Pb 同位素组成对比时, 理论上应该扣除黄铁矿形成后源区地层新积累的放射成因 Pb。但由于云开地块变质岩中 U 含量不高^[4, 5, 24], 中生代以后放射成因 Pb 积累不多, 是否进行放射成因 Pb 校正影响不大。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 7)上, 天峨坪金矿床投点与产于基底的庞西洞银金矿床、产于古生代地层的长坑金矿床及云开地块基底的 Pb 同位素投点位于同一区域, 在地壳演化线及其附近, 表明主要为地壳来源。而与侵入基底岩浆岩的 Pb 同位素组成位于不同的区域。这一特征支持天峨坪金矿床成矿物质主要来自基底变质岩, 并和主成矿阶段成矿流体相对富 Ni 与源区和基底地层有关的认识一致。云开地块为一套巨厚(> 5000 m)的浅变质陆源碎屑岩夹

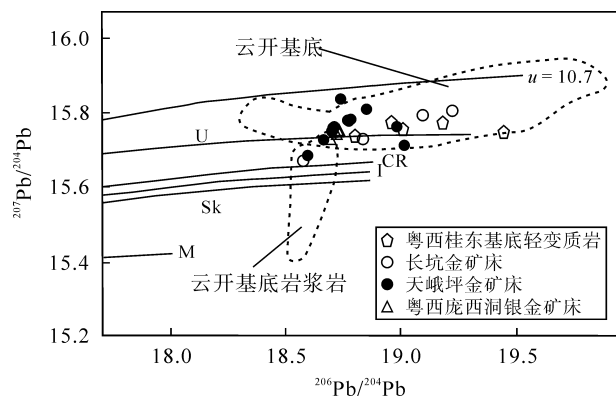


图 7 天峨坪金矿床铅同位素组成

Fig.7 Pb isotope composition of the Tian'eping gold deposit 云开基底及岩浆岩铅同位素组成变化范围据陈好寿等^[4]、陈毓蔚等^[25]、陆建军等^[26]、张志兰等^[24]。U—上地壳演化线; CR—Cuming-Richard 上地壳演化线^[27]; SK—Stacey-Kramers 上地壳演化线^[28]; I—造山带演化线; M—地幔演化线。

火山碎屑岩、熔岩及热水沉积岩^[1]。多个剖面超过1000个样品的Au、Ag元素含量分析表明,云开地块Au含量较高,多在3~9 ng/g之间,可为Au矿床的形成提供物质基础^[29]。云开地块发生过多期次构造地质作用及Au成矿作用,基底地层普遍发生了轻变质^[30]。轻变质可使Au从沉积岩中的难活化状态转变为变质后的易活化状态或发生初步富集^[29-30],提高Au的活化率,为后期Au的活化迁移提供良好的条件,有利于Au在后期地质作用下活化、迁移和富集形成Au矿床^[31]。由于目前未获得该矿床形成的精确同位素年龄,难以确定矿化与哪一期地质构造事件有关。已有研究^[3, 14, 32]显示云开地块Au矿床的同位素年龄主要为燕山期或印支期。

5 结 论

(1) 天峨坪金矿床产于云开地块构造破碎带硅化蚀变岩中,具Au-Ag-Sb组合,为云开地块未见报导的断裂构造控制低温蚀变岩型金矿床。

(2) 天峨坪金矿床主成矿阶段黄铁矿和早晚矿化阶段黄铁矿微量元素组成不同,主成矿阶段黄铁矿具较高Ni含量和低Co/Ni值,早晚矿化阶段黄铁矿具低Ni含量和高Co/Ni值,反映主成矿阶段成矿物质和早晚成矿阶段成矿物质源区可能不同。

(3) 天峨坪金矿床主成矿阶段成矿物质主要来自云开地块变质基底。

参考文献(References):

- [1] 周永章,张恩,陈炳辉,杨小强,杨海生. 华南云开变质地体基底与成矿[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 323-325.
Zhou Yong-zhang, Zhang En, Chen Bing-hui, Yang Xiao-qiang, Yang Hai-sheng. Basement and its mineralization of Yunkai metamorphic block, South China [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(Suppl): 323-325 (in Chinese with English abstract).
- [2] 彭少梅. 粤北新洲地区推覆断裂系统中的碎裂钠长石岩型金矿床[J]. 地质找矿论丛, 1991, 6(4): 40-51.
Peng Shao-mei. The cataclastical-bite-rock typed gold deposit in the thrust-nappe fault system in Xinzhou area of the northern Guangdong Province [J]. Contrib Geol Mineral Resour Res, 1991, 6(4): 40-51 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李献华,桂训唐,程景平,阴国渠. 广东高凤金矿形成时代的Rb-Sr、⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄测定[J]. 矿床地质, 1992, 11(4): 367-373.
Li Xian-hua, Gui Xun-tang, Cheng Jing-ping, Yin Guo-qu. Rb-Sr and ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of the Gaofeng gold deposit, Guangdong Province [J]. Mineral Deposits, 1992, 11(4):

- 367-373 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陈好寿,余养成,杨开渠,张伟坚,钟金带,雷禹文. 广东新洲-河台金矿带同位素地球化学研究[J]. 中国地质科学院院报, 1988 (18): 117-137.
Chen Hao-shou, Yu Yang-cheng, Yang Kai-qu, Zhang Wei-jian, Zhong Jin-dai, Lei Yu-wen. Isotope geochemical study on the Xinzhou-Hetai gold belt in Guangdong province [J]. Bull Chinese Acad Geol Sci, 1988 (18): 117-137 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张乾,张宝贵,潘家永,曹裕波,洪笃豪,杨谦举. 粤西茶洞银金矿床矿质来源的同位素示踪研究[J]. 矿床地质, 1993, 12(4): 349-357.
Zhang Qian, Zhang Bao-gui, Pan Jia-yong, Cao Yu-bo, Hong Du-hao, Yang Qian-ju. An isotope tracing study of the mineral source of the Chadong silver-gold polymetallic deposit in western Guangdong Province [J]. Mineral Deposits, 1993, 12(4): 349-357 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘腾飞. 桂东金矿床的成因矿物学研究[J]. 广西地质, 1996, 9(3): 45-54.
Liu Teng-fei. Study on genetic mineralogy of gold deposit of eastern Guangxi [J]. Guangxi Geol, 1996, 9(3): 45-54 (in Chinese with English abstract).
- [7] 周永章,张海华,卢焕章,Guha J, Chown E H. 粤西河台金矿床的流体包裹体及成矿流体[J]. 矿物学报, 1995, 15(4): 411-417.
Zhou Yong-zhang, Zhang Hai-hua, Lu Huan-zhang, Guha J, Chown E H. Fluid inclusions and hydrothermal fluids of the Hetai gold deposit, western Guangdong, China [J]. Acta Mineral Sinica, 1995, 15(4): 411-417 (in Chinese with English abstract).
- [8] 潘家永,张乾,张宝贵,洪笃豪,李世云. 粤西茶洞银金矿床矿物流体包裹体地球化学研究[J]. 矿物学报, 1995, 15(1): 47-54.
Pan Jia-yong, Zhang Qian, Zhang Bao-gui, Hong Du-hao, Li Shi-yun. A geochemical study of fluid inclusion in minerals from the Chadong silver-gold deposit in western Guangdong Province [J]. Acta Mineral Sinica, 1995, 15(1): 47-54 (in Chinese with English abstract).
- [9] 毋瑞身. 我国金矿床的主要成因类型及找矿方向几个问题的探讨[J]. 中国地质科学院院报沈阳地质矿产研究所分刊, 1981, 1(1): 20-40.
Wu Rui-shen. The main genetic types of Chinese gold deposits and their prospecting [J]. Bull Shenyang Inst Geol Min Res Chinese Acad Geol Sci, 1981, 1(1): 20-40 (in Chinese with English abstract).
- [10] 钱建平,谢彪武,陈宏毅,白艳萍,吴小雷. 广西金山金银矿区成矿构造分析和构造地球化学找矿[J]. 现代地质, 2011, 25(3): 531-544.
Qian Jian-ping, Xie Biao-wu, Chen Hong-yi, Bai Yan-ping, Wu Xiao-lei. Analysis of ore-controlling structure and prospecting of tectono-geochemistry in Jinshan Au-Ag mining area, Guangxi [J]. Geoscience, 2011, 25(3): 531-544 (in Chinese with English abstract).
- [11] 徐燕君,罗义付,肖光铭,罗大略,胡耀国. 粤西黄泥坑金

- 矿床地质特征及成因浅析[J]. 华南地质与矿产, 2012, 28(4): 369-375.
- Xu Yan-jun, Luo Yi-fu, Xiao Guang-ming, Luo Da-lue, Hu Yao-guo. Geological characteristics and ore genesis of Huangnikeng gold deposit in western Guangdong Province, South China [J]. Geol Mineral Resour South China, 2012, 28(4): 369-375 (in Chinese with English abstract).
- [12] 翟伟, 袁桂邦, 李兆麟, 黄栋林, 文拥军. 粤西河台金矿床富硫化物含金石英脉锆石 U-Pb 测年及成矿意义[J]. 地质论评, 2005, 51(3): 340-346.
- Zhai Wei, Yuan Gui-bang, Li Zhao-lin, Huang Dong-lin, Wen Yong-jun. U-Pb isotope age of zircons in gold-bearing quartz veins from the Hetai gold deposit, western Guangdong, China: Constraints on the time of gold metallogenesis [J]. Geol Rev, 2005, 51(3): 340-346 (in Chinese with English abstract).
- [13] 朱江建, 陈广浩, 龚贵伦, 易金, 蔡建新, 龚朝阳, 黄栋林, 曾乔松, 林舸. 广东河台金矿糜棱岩化过程构造-流体成矿研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 67-77.
- Zhu Jiang-jian, Chen Guang-hao, Gong Gui-lun, Yi Jin, Cai Jian-xin, Gong Chao-yang, Huang Dong-lin, Zeng Qiao-song, Lin Ge. Structure-fluid related mineralization during the mylonitization process in the Hetai goldfield, Guangdong Province [J]. Earth Sci Front, 2011, 18(5): 67-77 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王成辉, 张长青, 王永磊, 邱小平, 龚朝阳. 广东高要河台金矿同位素年代学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(3): 427-433.
- Wang Cheng-hui, Zhang Chang-qing, Wang Yong-lei, Qiu Xiao-ping, Gong Chao-yang. Chronological research of the Hetai gold mine in Gaoyao County, Guangdong Province [J]. Geotecton Metallogen, 2012, 36(3): 427-433 (in Chinese with English abstract).
- [15] 钟增球, 游振东, 周汉文, 韩郁菁. 两广云开隆起区基底的组成演化及其基本结构格局[J]. 中国区域地质, 1996 (1): 36-42.
- Zhong Zhen-qiu, You Zhen-dong, Zhou Hai-wen, Han Yu-jing. Composition and evolution of the Yunkai massif and the structure pattern in the Guangdong and Guangxi [J]. Reg Geol China, 1996 (1): 36-42 (in Chinese).
- [16] 罗璋. 广西博白-岑溪断裂带地质特征与构造演化[J]. 广西地质, 1990, 3(1): 25-34.
- Luo Zhang. The geological features and tectonic evolution in Bobai-Cenxi deep fault zone, Guangxi [J]. Geol Guangxi, 1990, 3(1): 25-34 (in Chinese with English abstract).
- [17] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1-409.
- The Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Bureau. Regional Geology of the Guangxi Zhuang Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 409 (in Chinese with English abstract).
- [18] 袁洪林, 陈开运, 包志安, 宗春蕾, 戴梦宁, 范超, 殷琮. 飞秒激光剥蚀多接收等离子体质谱准确分析地质样品中的铅同位素组成[J]. 科学通报, 2013, 58(33): 3440-3449.
- Yuan Honglin, Chen Kaiyun, Bao Zhian, Zong Chunlei, Dai Mengning, Fan Chao, Yin Zong. Determination of lead isotope compositions of geological samples using femtosecond laser ablation MC-ICPMS [J]. Chinese Sci Bull, 2013, 58(33): 3440-3449 (in Chinese).
- [19] 王奎仁. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1989: 1-544.
- Wang Kui-ren. Earth and Cosmogenic Minerals [M]. Hefei: Anhui Education Press, 1989: 1-544 (in Chinese with English abstract).
- [20] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-370.
- Han Yin-wen, Ma Zhen-dong. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-370 (in Chinese).
- [21] Liu W H, Migdisov A, Williams-Jones A. The stability of aqueous nickel (II) chloride complexes in hydrothermal solutions: Results of UV-Visible spectroscopic experiments [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2012, 94: 276-290.
- [22] 宋学信, 张景凯. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1986 (2): 166-175.
- Song Xue-xin, Zhang Jing-kai. Minor elements in pyrites of various genetic type deposits in China [J]. Bull Inst Mineral Deposit Chinese Acad Geol Sci, 1986 (2): 166-175 (in Chinese with English abstract).
- [23] Liang H Y, Wu J, Huang W T, Zhou Y Q, Sun W D. Longhua quartz vein Ni-Co-Bi-Au deposit in Guangxi Zhuang Autonomous region, China: A new type of hydrothermal Ni deposits [J]. Goldschm Abst, 2014: 1454.
- [24] 张志兰, 张树发, 袁海华. 广东河台金矿的硫铅同位素特征[J]. 广东地质, 1989, 4(1): 29-41.
- Zhang Zhi-lan, Zhang Shu-fa, Yuan Hai-hua. Lead and sulfur isotopic characteristics of Hetai gold ore in Guangdong [J]. Guangdong Geol, 1989, 4(1): 29-41 (in Chinese with English abstract).
- [25] 陈毓蔚, 毛存孝, 朱炳泉. 我国显生代金属矿床铅同位素组成特征及其成因探讨[J]. 地球化学, 1980, 9(3): 215-229.
- Chen Yu-wei, Mao Cun-xiao, Zhu Bing-quan. Lead isotope composition and genesis of Phanerozoic metal deposit in China [J]. Geochimica, 1980, 9(3): 215-299 (in Chinese with English abstract).
- [26] 陆建军, 王鹤年, 沈渭洲, 戴爱华. 河台金矿同位素地质研究[J]. 地质找矿论丛, 1990, 5(1): 84-92.
- Lu Jian-jun, Wang He-nian, Shen Wei-zhou, Dai Ai-hua. Study on isotope geology of Hetai gold deposit [J]. Contrib Geol Mineral Resour Res, 1990, 5(1): 84-92 (in Chinese with English abstract).
- [27] Cuming G L, Richard J R. Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth [J]. Earth Planet Sci Lett, 1975, 28(2): 155-171.
- [28] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model [J]. Earth Planet Sci Lett, 1975, 26(2): 207-221.
- [29] 潘家永, 张乾, 张宝贵, 张玉学, 邵树郎. 粤西金、银矿床成矿规律探讨[J]. 矿床地质, 1996, 15(3): 257-266.
- Pan Jia-yong, Zhang Qian, Zhang Bao-gui, Zhang Yu-xue,

- Shao Shu-xun. Metallogenic regularity of gold and silver deposit in western Guangdong [J]. *Mineral Deposits*, 1996, 15(3): 257–266 (in Chinese with English abstract).
- [30] Liang H Y, Xia P, Wang X Z, Liu C Q. Geology and geochemistry of the adjacent Changkeng gold and Fawang silver deposits, Guangdong Province, South China [J]. *Ore Geol Rev*, 2007, 31(1): 304–318.
- [31] 王秀璋, 程景平, 梁华英, 夏萍, 单强. 变质细碎屑岩型金矿床的三阶段成矿模式[J]. *矿床地质*, 1995, 14(4): 322–328. Wang Xiu-zhang, Cheng Jing-ping, Liang Hua-ying, Xia Ping, Shan Qiang. Three-stage metallogenic model for gold deposits of metamorphosed fine-clastic rock type [J]. *Mineral Deposits*, 1995, 14(4): 322–328 (in Chinese with English abstract).
- [32] 翟伟, 李兆麟, 黄栋林, 文拥军. 粤西河台金矿床富硫化物石英脉 Rb-Sr 等时线年龄讨论[J]. *地球学报*, 2004, 25(2): 243–247. Zhai Wei, Li Zhao-lin, Huang Dong-lin, Wen Yong-jun. Rb-Sr isochron age of sulfide-rich quartz veins in the Hetai gold deposit, western Guangdong [J]. *Acta Geosci Sinica*, 2004, 25(2): 243–247 (in Chinese with English abstract).