

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2020.11002

黔西南丫他金矿矿化过程中元素迁移特征研究

吴松洋, 刘书生, 侯 林

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:黔西南册亨县丫他金矿是扬子地块西南缘右江盆地中的重要卡林型金矿之一,产于三叠系巨厚的裂陷槽盆相复理石建造碎屑岩相区中。矿体受控于褶皱断裂带,其形态、规模、产状受高角度断裂带控制。根据典型矿物蚀变组合,可划分三个成矿阶段:铁白云石-黄铁矿阶段、白云石-黄铁矿-似碧玉岩-多金属矿物阶段以及毒砂-雌雄黄-方解石-石英阶段。本文为探究丫他金矿成矿过程中元素的迁移特征,通过采集不同矿化程度的样品,采用 Isocon 图解法对元素质量平衡进行了定量计算,结果显示在成矿作用过程中,伴随着持续的 SiO_2 含量升高以及 CaO 含量的降低,指示硅化与去碳酸盐化与成矿关系密切; K_2O 和 TFe_2O_3 含量虽有变化但过程中有所波动,表现为载金矿物黄铁矿与黏土矿物的沉淀; TiO_2 和 Al_2O_3 含量在各个阶段岩石中变化不大,且显示出较高的平均值。与金矿化密切相关的微量元素是 As、Sb、W、Hg、Ag、Cu、Zn、Tl,随着成矿流体通过与围岩的相互作用成矿过程中发生迁移,在金以 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 或是 $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ 络合物形式进入含砷黄铁矿晶格中的同时沉淀黄铜矿、闪锌矿、硫砷锑汞矿等其他金属矿物。

关键词:元素迁移;成矿过程;Isocon 图解法;丫他金矿;右江盆地

中图分类号:P618.51

文献标识码:A

0 引言

卡林型金矿床(Carlin-type gold deposits)因最初由美国纽蒙特(Newmont)矿业公司在美国内华达州大盆地(Great Basin)中卡林地区发现而得名,其中以呈带状分布的卡林型金矿带(Carlin Trend)最具有代表性。至此开始,内华达州甚至整个美国经历了历史上最大的金矿开采高峰。目前卡林型金矿带上已发现超过40个大型-超大型金矿床,累计已探明储量超过1.471亿盎司(约4575t),已开采约1.078亿盎司(约3353t;Cline et al., 2005; Cline, 2018)。美国现已成为当今世界第三大产金国,其中超过75%的金的产量来源于内华达州,且其中最主要来源于卡林型金矿。

黔西南地区是我国最重要的卡林型金矿矿集区,区内已发现一批大型-超大型金矿,已探明的金资源已超过1500t,其中已探明储量超过650t,但大部分超大型矿床集中于矿集区西北部台地相区。黔西南册亨县丫他金矿作为区内西南部盆地相区

代表性金矿之一,累计查明资源储量13.94吨,其中保有资源储量(122b)+(333)金属量12.5吨,平均品位3.34g/t,且矿山勘查工作一直持续进行。研究者通过将地质、物探、化探、遥感等综合参数转换为成矿预测要素,利用矿产资源评价系统(MRAS),预测在丫他金矿在0~2000m空间仍存在约112.983吨金矿资源潜力(张伟等,2020)。目前针对丫他金矿虽已进行了大量的研究工作,在成矿地质背景、赋矿围岩层位、控矿构造及成矿流体性质等关键性问题上均取得了重要的研究成果(陈懋弘等, 2007a, 2007b; 刘显凡等, 2003; Su et al., 2009a, 2009b, 2012; 王疆丽等, 2014; 刘平等, 2006; Chen et al., 2015a, 2015b; 吴松洋等, 2016; Wu et al., 2019),但是对于成矿精细过程研究相对较少,尤其是成矿过程中相关元素的迁移特征认识不清,制约了对于丫他金矿成矿作用过程的全面认识。

等浓度线法是Grant于1986年所提出,也称之为Isocon图解法,已广泛运用于热液矿床厘定热液蚀变前后元素的迁入与迁出情况(Grant, 1986; 李培

收稿日期:2020-10-27; 改回日期:2020-11-16

作者简介:吴松洋(1989—),男,博士,主要从事区域成矿学和金属矿床的研究工作。E-mail: songyuwu@163.com

资助项目:中国地质调查局项目(DD20190444)资助

等,2011;刘艳鹏等,2015;项新葵等,2015)。基于丫他金矿研究所存在的问题,本文通过系统采集不同矿化程度的样品,利用 Grant 方程定量计算,探究与矿化关系密切的成矿元素以及矿化过程中元素迁移的变化规律,同时结合已有地质资料以及野外地质现象,论述元素迁移的原因并进而讨论矿床成矿过程。

1 区域地质特征

研究区位处上扬子地块西南部右江盆地中,北西以弥勒-师宗断裂、北东以紫云-垭都断裂与扬子板块相邻,南东以凭祥大断裂与华夏地块相邻,南西以红河剪切带与印支地块相邻。区域南部的越北地块在构造演化过程中以逆冲推覆的作用为主(图1)。区内大多数断裂从泥盆纪早期开始发育,在海西期-印支期活动最为强烈,地表构造格架最终定型于燕山期。右江盆地从早古生代开始经历了多次拉张-挤压的构造背景转换,大多数断层在拉张阶段表现为正断层,构造格架以台盆相间

的格局呈现。

右江盆地的地层分布于沉积特点显示出明显的三个地层相区:(1)北西部的以上古生界-中生界浅水台地相碳酸盐岩、不纯碳酸盐岩夹碎屑岩相区(台地相区);(2)南东部的以三叠系巨厚的裂陷槽盆相复理石建造碎屑岩相区(盆地相区);(3)零星分布于两者内的石炭-二叠系孤立台地相碳酸盐岩(孤立台地相区)(图1)。其中,在台地相区分布的被动大陆边缘浅水碳酸盐岩沉积夹少量陆源碎屑岩沉积,和在盆地相区分布的深水碳酸盐岩、硅质岩、以及其后发展起来的陆源碎屑浊积岩,均是右江盆地重要的赋金层序。区域构造演化历史可概括为早期拉张、裂陷、沉降、沉积及晚期的挤压褶皱造山作用和伸展隆升过程(项新葵等,2015)。在早古生代的加里东运动的影响下,研究区成为华南陆块的一部分,并形成了华南褶皱系;大规模地幔物质在海西期的拉张断陷过程中上侵,海盆持续凹陷形成了本区古生界的裂谷沉积建造以及三叠系巨厚的陆源碎屑浊积岩系;晚二叠世,区域西北部

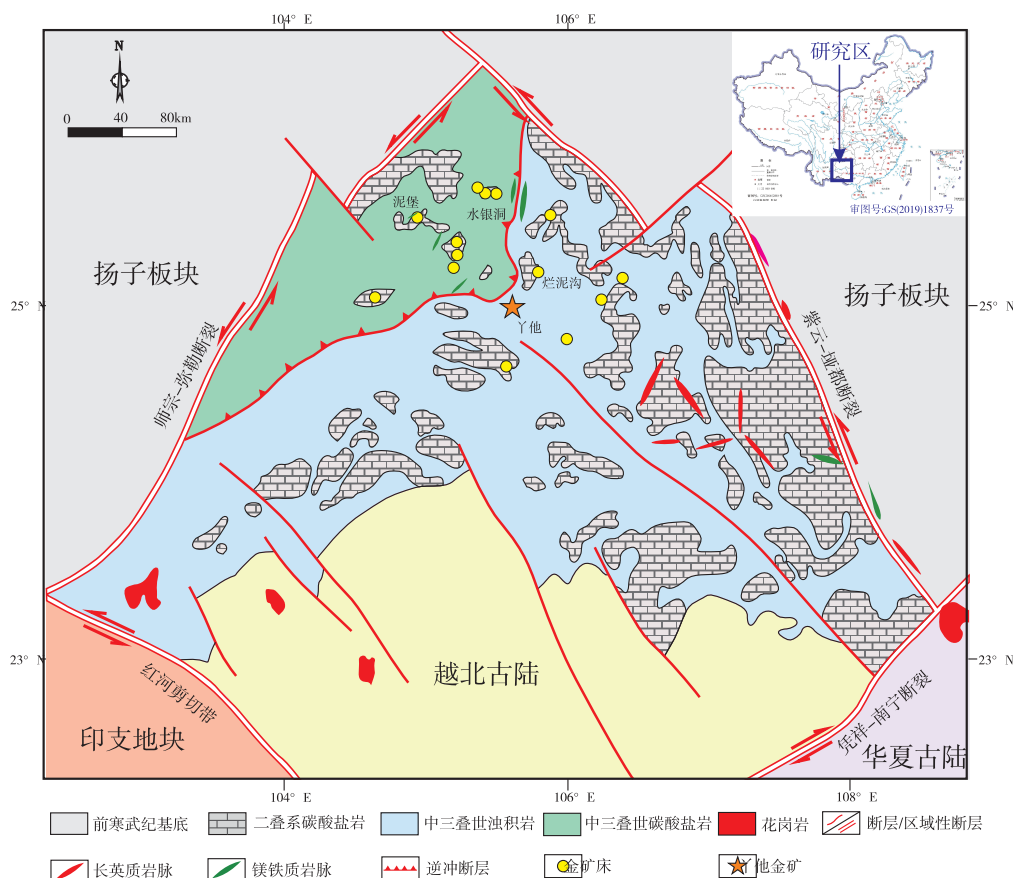


图1 右江盆地地质图(据 Chen et al., 2015a; Hou et al., 2016 修改)

Fig. 1 Regional geological map of Youjiang basin (modified after Chen et al., 2015a; Hou et al., 2016)

地区在峨眉山地幔柱的影响下发生了大规模的玄武岩喷发,发育大陆溢流拉斑玄武岩和辉绿岩,并自西北至东南逐渐尖灭(Xu et al., 2004);晚三叠世,由于印支板块向华南板块俯冲,二者沿 SongMa 缝合带发生碰撞拼接,古特提斯洋关闭(Metcalf, 2011),同时区域的沉积构造格局也定型于该时期;本区在燕山期经历了从挤压到伸展的构造运动过程,偏碱性基性-超基性岩脉发生侵位,同时伴随大规模的热液活动以及成矿元素的迁移。研究区独特的大地构造位置以及长期复杂的构造演化历史,是本区发生大规模成矿作用的重要前提(夏勇等,2009),并形成了独具特色的 Au-Sb-Hg-Tl-U-Mo-As 成矿系列(刘平等,2006)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

丫他金矿所在地区的构造以东西向的褶皱及断层发育为特征(图 2A)。褶皱主要由册亨向斜、坡脚背斜、巧马背斜等褶皱组成近东西向构造带,轴部多为二叠系、三叠系组成;区内主要断裂经过加里东-燕山期的多期次活动,不但对本区的成矿具有控制作用,同时控制形成了南北不同的构造背景和沉积相区,致使产生背斜两侧发生地层缺失、新老地层不正常接触且岩性厚度差异明显。

区内广泛出露中三叠世浅水槽盆相和深水槽盆相之类复理石建造,主要有三叠系中统新苑组(T_2x)、边阳组(T_2b),是区内重要赋金层位,最厚约 500 m(图 2B、C、图 3A)。边阳组根据岩性特征可分为两段,边阳组一段(T_2b^1)上部为灰色薄至中厚黏土岩夹中厚层状砂岩,下部为灰色厚层至块状砂岩夹灰色薄层黏土岩,砂岩和黏土岩中见有星散状黄铁矿,在断层带附近的裂隙中常见有石英脉、石英团块;边阳组二段(T_2b^2)上部为灰色薄至中厚层状黏土岩与中厚层至厚层至块状砂岩互层。其间夹黑色页岩,下部为灰色、灰黄色厚层至块状砂岩夹灰色薄层状黏土岩。新苑组同样也分为两段,新苑组一段(T_2x^1)为深灰色薄层泥晶灰岩夹钙质粉砂岩及钙质黏土岩,是矿区出露最老地层;新苑组二段(T_2x^2)中、上部以灰色薄至中厚层黏土岩,钙质黏土岩为主,夹少量薄至中厚层细砂岩或钙质砂岩;下部为深灰色薄层钙质黏土岩夹少量钙质砂岩及薄层或透镜状泥灰岩;底部为一层灰黄色钙质细砂岩。

矿区构造以东西向展布的褶皱及断层发育为特征(图 2)。主要褶皱有巧马复式背斜(矿区内称为磺厂背斜),呈东西向穿越矿区中部,次级褶皱北有尾勒向斜,南有磺厂向斜,磺梁子背斜,它们相互平行;相伴发育的断裂构造有东西走向的 F1、F2、F3、F4 等控矿断层以及北西、北东向断层;褶皱与断层共同构成了丫他金矿的基本构造格局,控制了矿区金矿体群东西向展布,构成矿区内金矿成矿带的方向和范围。

2.2 矿体及矿石特征

丫他金矿区金矿体为典型的断控型矿体,均受控于褶皱断裂带,矿体的形态、规模、产状受高角度断裂带控制。赋存于规模大的断层破碎带中的矿体形态一般较复杂,呈似板状或透镜状产出(图 3B),其厚度无论沿走向和倾向有增厚减薄现象;受简单褶皱和断裂构造控制的矿体,形态则较简单,一般呈透镜状或脉状出现,延伸也不大,矿体产状和控制成矿的构造产状基本一致(图 2B、C)。已查明的金矿体分布在长 1700m,宽 800m 的范围内,矿体规模、产状变化较大,矿体沿走向长度 50 ~ 690m、倾向沿深 20 ~ 230m,真厚度 0.80 ~ 6.25m,平均品位 $(1.50 \sim 10.73) \times 10^{-6}$ 。其中 2 号矿体是丫他金矿的主要矿体,出露于磺厂背斜南翼,平均长度 690m、倾向延深约 181m。矿体形态为似板状,赋矿地层为三叠系边阳组;另外 20 号矿体具有小而富的特点,是丫他金矿区平均品位最高的小矿体,平均厚度 2.95m,平均品位为 10.73×10^{-6} 。

2.3 围岩蚀变及矿物组合

丫他金矿主要围岩蚀变有硅化、黄铁矿化、去碳酸盐化、白云石化、黏土化等。高品位矿石通常伴随强烈硅化作用,具体可细分为石英交代碳酸盐矿物,形成似碧玉岩(图 3J);另外还常可见石英交代基质中的铁白云石。碳酸盐化一般为成矿后期产物,与金矿关系不太密切,主要为白云石化和铁白云石方解石化,以自形-半自形晶的方解石与铁白云石组合成脉状充填于断裂构造或褶皱破碎带中,有时见重晶石化与之共存。黏土化主要表现在中-高品位矿石中的围岩中呈细小鳞片状的伊利石集合体产出,且常与成矿期黄铁矿共生。矿区内赋矿围岩基本上都经历了黏土化,常与金矿化密切相伴。丫他矿石普遍具强烈白云石化,表现为白云石交代方解石等碳酸盐岩矿物,地球化学特征上表现为钙含量明显减少,镁含量增加。另外在高品位

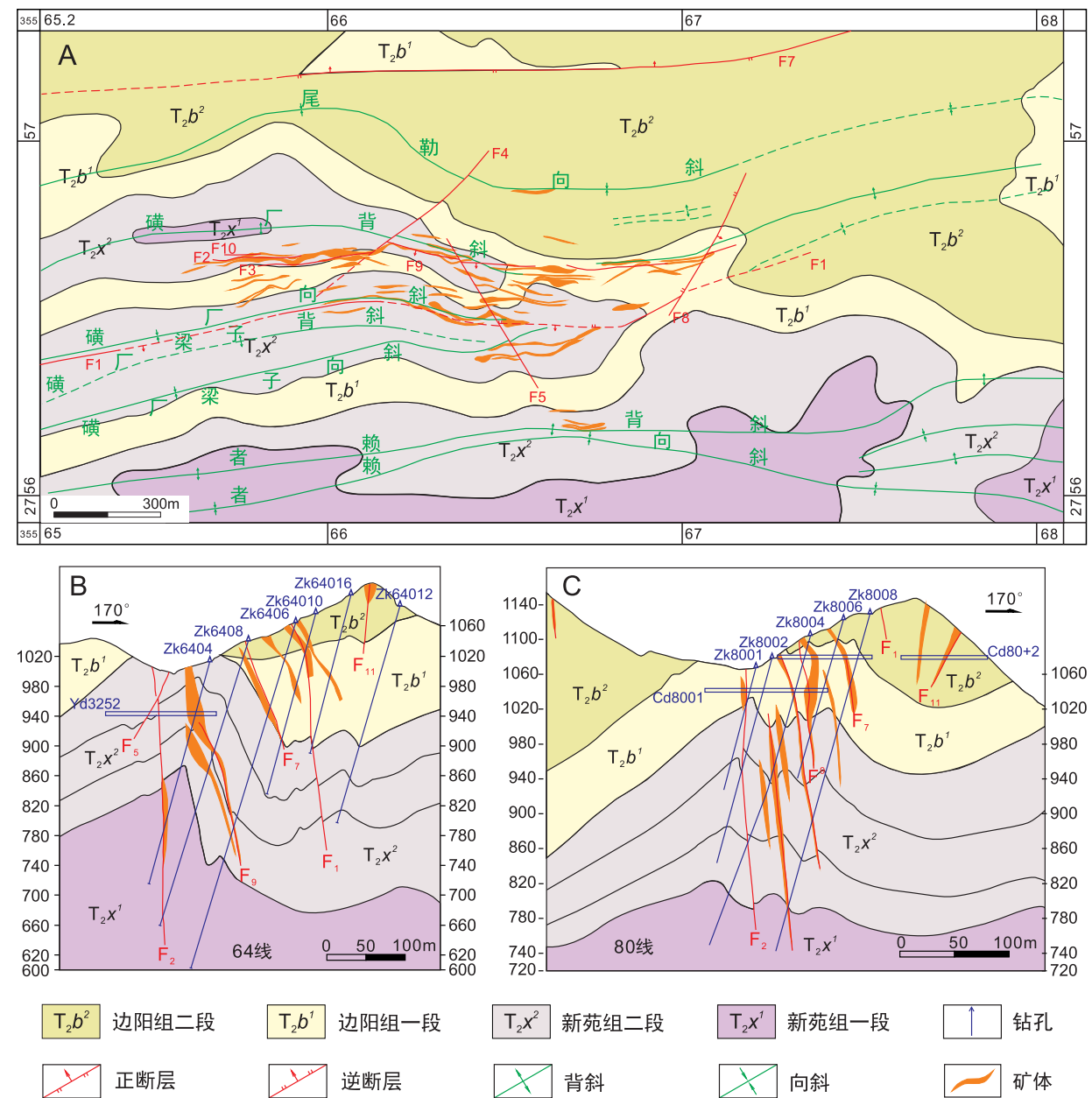


图2 丫他矿区地质图(A)及典型剖面图(B、C)(据 Chen et al., 2015a; Hou et al., 2016 修改)

Fig. 2 Geological map (A) and typical section map (B, C) of Yata deposit (modified after Chen et al., 2015a; Hou et al., 2016)

矿石中,可见大量的白云石交代铁白云石现象,在铁白云石中形成交代残余结构(图3K)。

丫他金矿中主要的金属矿物包括黄铁矿、毒砂、辉锑矿、雄黄、雌黄等。脉石矿物包括石英、白云石、方解石、黏土矿物等。黄铁矿常是矿区主要的载金矿物,一般呈浸染状分布于矿石和近矿围岩中,不同矿化阶段黄铁矿各有不同,成矿早期的黄铁矿多为成岩期的黄铁矿重结晶而成,呈立方体、不规则状或球粒状等结合体(图3E);成矿期的黄铁矿多以微细浸染型分布于矿石中,肉眼很难分辨

晶型,镜下可见明显分带,以早期黄铁矿内核生长(图3H-J);晚期黄铁矿自形程度高,多以自形晶为主,与方解石脉共生(图3F)。毒砂主要呈针状、菱形片状、菱柱状,浸染状分布于后期低品位矿石中,且高品位矿石普遍含毒砂较少,常见毒砂包裹成矿后期黄铁矿(图3L)。金属矿物还包括少量黄铜矿以及硫砷铜矿(图3K)。黏土矿物主要为伊利石为主,其次为高岭石,常见于高品位矿石中(图3J)。石英和方解石常共生呈细脉状产出,成矿后期石英方解石晶体明显变大且晶型良好。

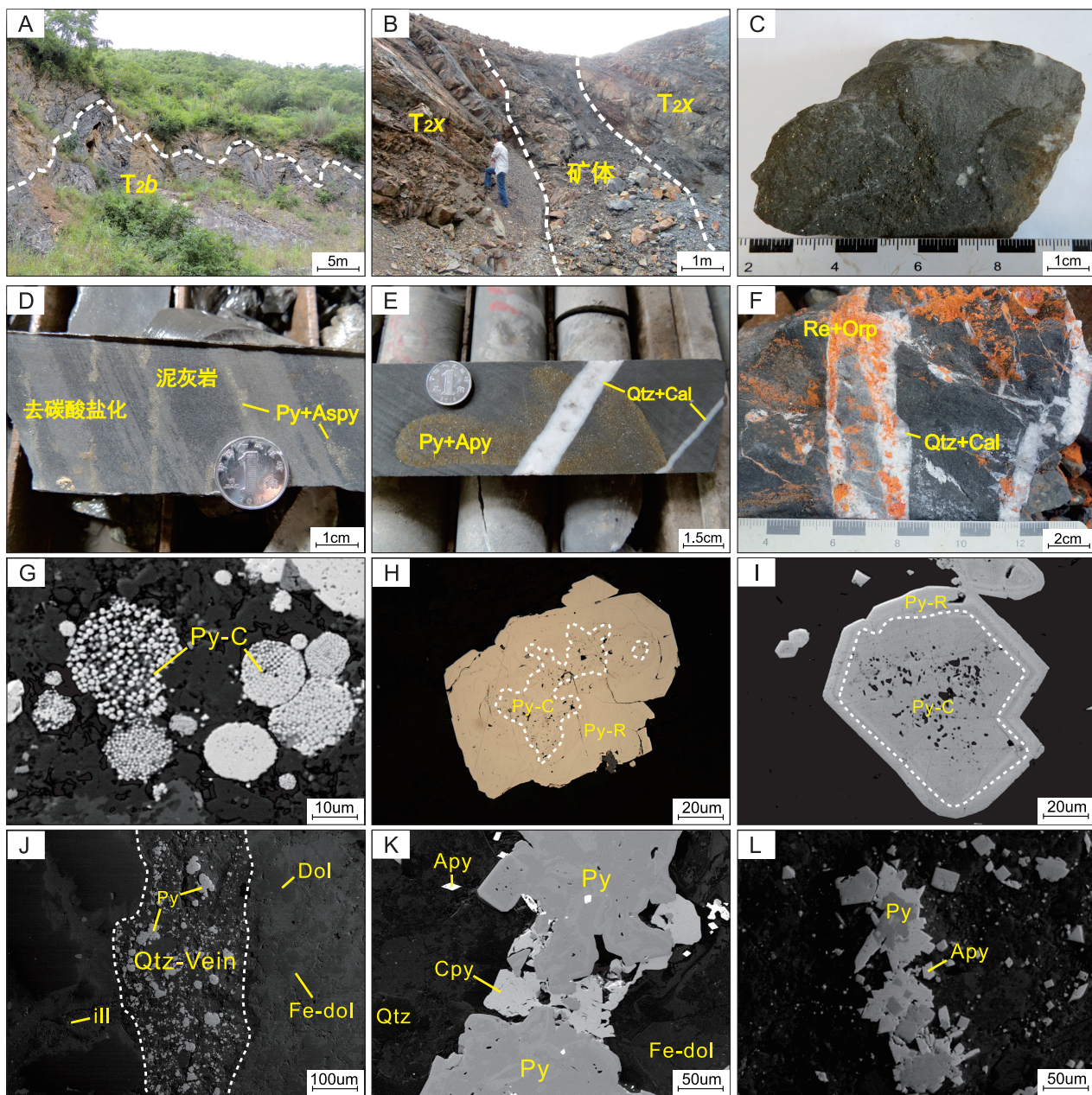


图3 丫他金矿野外地质特征及典型矿物手标本/镜下照片

A. 边阳组地层中存在大量揉皱; B. 1号采场矿体与围岩接触带; C. 矿石手标本; D. 泥灰岩发育去碳酸盐化; E. 黄铁矿毒砂与石英方解石脉共生; F. 后期雌雄黄与石英方解石脉共生; G. 沉积期草莓状黄铁矿; H. 黄铁矿外带围绕黄铁矿内核生长; I. 两期黄铁矿共生关系背散射照片; J. 黄铁矿与石英脉共生, 围岩中可见白云石交代铁白云石以及伊利石; K. 黄铜矿与黄铁矿共生; L. 毒砂围绕后期黄铁矿生长
Py-黄铁矿; Py-C-黄铁矿内核; Py-R-黄铁矿外带; Apy-毒砂; Cpy-黄铜矿; Qtz-石英; Cal-方解石; Re-雌雄黄; Orp-雌黄; Dol-白云石; Fe-dol-铁白云石; ill-伊利石;

Fig. 3 Photos showing attitude of orebody and ore minerals in Yata gold deposit

A. Bianyang Formation with widespread folds; B. Boundary between orebody and host rock in No. 1 open pit; C. Ore hand specimen; D. Marlstone with decarbonation; E. Quartz and calcite veins coexist with pyrite and arsenopyrite; F. Late ore stage realgar and orpiment coexist with quartz and calcite veins; G. Sedimentation framboidal pyrite; H. Pyrite core overgrowth with pyrite rim; I. BSE image of intergrowth two generation pyrite; J. intergrowth of pyrite and quartz veins, illite and dolomite replace Fe. dolomite can be observed in the host rock; K. intergrowth of pyrite and chalcopyrite; L. arsenopyrite overgrowth with late ore stage pyrite;
Py-pyrite; Py-C-pyrite core; Py-R-pyrite rim; Apy-Arsenopyrite; Cpy-chalcopyrite; Qtz-quartz; Cal-calcite; Re-realgar; Orp-orpiment; Dol-dolomite; Fe-dol-Fe-dolomite; ill-illite

2.4 成矿期次划分

经过详细的野外地质调查以及对不同品位矿石的手标本及薄片镜下观察,可将丫他金矿划分为成矿前期(铁白云石-黄铁矿阶段)、主成矿期(白云石-黄铁矿-似碧玉岩-多金属矿物阶段)以及成矿后期(毒砂-雌雄黄-方解石-石英阶段)(图4)。在成矿前期,可见大量发育铁白云石、黄铁矿、伊利石,局部可见发育磷灰石、高岭石以及金红石,故可将成矿前期归纳为铁白云石-黄铁矿-石英阶段。主成矿期中的铁白云石被石英交代形成白云石以及似碧玉岩,可见大量交代边;黄铁矿发育含砷环带,含砷环带经过分析可知同样也含金,但不可见明金;含金黄铁矿围岩中发育伊利石为代表的黏土矿物;在含砷黄铁矿周围也可见黄铜矿以及铜砷锑矿物;方解石矿物仅可见细脉或是与石英共生,故可将主成矿期归纳为白云石-含砷黄铁矿-似碧玉岩-多金属硫化物阶段。成矿后期主要发育低温矿物,包括雄雌黄、萤石、辉锑矿,石英主要以晶簇状产出,方解石主要为大脉,故可将成矿后期归纳为毒砂-雄雌黄-方解石-石英阶段。相比

矿物	成矿前期	主成矿期	成矿后期
	铁白云石-黄铁矿阶段	白云石-黄铁矿-似碧玉岩-多金属矿物阶段	毒砂-雄雌黄-方解石-石英阶段
铁白云石			
贫砷黄铁矿			
伊利石			
石英			
高岭石			
金红石			
白云石			
含砷黄铁矿			
似碧玉岩			
黄铜矿			
硫砷锑矿			
毒砂			
方解石			
石英晶簇			
萤石			
雄黄			
雌黄			

图4 丫他金矿各成矿阶段划分及共生矿物

Fig. 4 Paragenetic minerals and mineralization stages of Yata gold deposit

区域其他金矿,雄雌黄在丫他金矿中相对发育,萤石含量明显偏少。

3 样品采集及分析方法

3.1 样品采集

本次研究共采集29件组合样品用于全岩主微量地球化学分析,均采集于矿区见主要矿钻孔ZK84-08和ZK84-10中。从丫他勘探线剖面图中可见(图2),钻孔所控制的矿体分布较密,故从浅到深间隔20m进行系统采样,结合已有钻孔编录资料,在控矿地段根据具体情况加密至5~10m。29件样品包括新鲜围岩5件,轻微矿化样品8件,中等矿化样品11件,矿体5件。

3.2 全岩主微量地球化学分析

岩石组合样品碎样及主量元素和微量稀土元素分析工作均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行。全岩的研磨在无污染杯式振动磨样机P9中进行,磨至200目以下,在105℃条件下预干燥2~4小时,最后置于干燥容器中冷却至室温。

主量元素的分析采用PW2404型X荧光光谱仪(XRF),FeO和烧失量(LOI)采用标准湿法化学分析,试样用无水四硼酸锂熔融,以硝酸铵为氧化剂,加氟化锂和溴化锂作助熔剂和脱模剂,试样与熔剂以1:8比例分配,在1150~1250℃条件下熔融,制成玻璃样片。实验过程中,额定功率为3.0kW,X射线管电压为50kV,电流为50mA,元素测定精度可达0.01%,分析误差<5%。详细测试方法和依据根据GB/T14506.28—93(硅酸盐岩石化学分析方法X射线荧光光谱法测定主、次元素量)国家标准。

微量元素采用酸溶法(硝酸+氢氟酸+高氯酸敞开容器分解法与硝酸+氢氟酸密闭容器消解法)在电感耦合等离子质谱(ICP-MS)仪器上测定,测试所用的仪器为德国Finnigan-MAT公司生产ELEMENT I型离子体质谱仪(HR-ICP-MS),并用国家标准物质GBW07106和GBW07312进行质量监控,详细的执行标准可参考DZ/T0223—2001(电感耦合等离子体质谱ICPMS方法通则)。微量元素含量大于10μg/g时相对误差小于5%,小于10μg/g时相对误差小于10%。

4 分析结果及数据处理

4.1 主量元素特征

丫他金矿中所采集的组合分析样品主量元素

分析结果见表1、图5。

从未矿化围岩到矿体,随着矿化强度的增加, SiO_2 平均含量从58.69%上升至62.45%,指示在矿化过程中硅化蚀变逐渐明显; CaO 含量与 SiO_2 含量趋势相反,从未矿化样品到矿化样品含量逐步降低,平均值分别为6.47%、5.26%、4.09%、3.88%,指示碳酸盐矿物在成矿过程中减少,广泛发育去碳酸盐化,表现为硅质矿物交代碳酸盐矿物,从而形成似碧玉岩。

相比于 SiO_2 和 CaO 含量, K_2O 的含量在组合样品中随着矿化进行有少量的升高,最高为4.24%,最低为3.85%,说明矿化与黏土岩化有一定关系,这与镜下所观察到的少量伊利石或高岭石特征一致; TFe_2O_3 和 Al_2O_3 含量在各个阶段岩石中均显示出较高的平均值,且变化不大。

4.2 微量元素特征

微量元素测试结果列于表2。通常认为,与Au成矿相关的元素包括As、Sb、Hg、Tl、Ag、Cu、Zn。这些元素在丫他各类样品中的平均含量分别为新鲜围岩(As:54.02 $\mu\text{g/g}$; Sb:4.18 $\mu\text{g/g}$; Hg:0.82 $\mu\text{g/g}$; Tl:1.71 $\mu\text{g/g}$; Ag:80.70 $\mu\text{g/g}$)、轻微矿化(As:325.63 $\mu\text{g/g}$; Sb:6.62 $\mu\text{g/g}$; Hg:2.65 $\mu\text{g/g}$; Tl:1.69 $\mu\text{g/g}$; Ag:71.25 $\mu\text{g/g}$)、中等矿化(As:578.09 $\mu\text{g/g}$; Sb:10.13 $\mu\text{g/g}$; Hg:4.32 $\mu\text{g/g}$; Tl:1.70 $\mu\text{g/g}$; Ag:367.09 $\mu\text{g/g}$)、矿体(As:647.60 $\mu\text{g/g}$; Sb:47.77 $\mu\text{g/g}$; Hg:7.66 $\mu\text{g/g}$; Tl:1.79 $\mu\text{g/g}$; Ag:935.80 $\mu\text{g/g}$)。

4.3 数据定量计算方法

本文采取的计算方法是Grant于1986年所提出的等浓度线法(Grant, 1986),也可称之为Isocon图解法。该方法是在Gresens于1967年首先提出的岩石蚀变成分-体积关系法(Gresens R L, 1967)的基础上加以改良所提出的,相对于Gresens法更加简洁,且一般不需要考虑岩石的相对体积质量这一参数,所得出的等浓度图可以一目了然地看出热液蚀变前后元素的迁入与迁出情况。

Isocon图解法的经典公式为 $\Delta C_{k0-A} = (M^A/M^0) \times C_{kA} - C_{k0}$,其中K为某一组分、C为组分K的含量、M为组分K的质量。假设组分i在地质过程中为不活动组分,即该组份在这一过程中没有质量的变化,即 $\Delta C_{k0-A} = 0$,可得到 $C_{iA} = (M^0/M^A) C_{i0}$ 。该公式表现在在 C^0-C^A 二元图上,是一条经过原点的直线,直线的斜率为 M^0/M^A ,这条直线就是所谓

的Isocon。凡是落在该直线上的组分表示在蚀变过程中没有发生迁出或者迁入。若落在该直线以下(所得直线斜率小于Isocon),说明在蚀变过程中该元素迁出;若落在该直线以上(所得直线斜率大于Isocon),说明在蚀变过程中该元素迁入。元素迁移的程度可以根据偏离Isocon的远近判断。另外值得一提的是,通常情况下,一个体系中会存在多个不活动组分,如果地球化学行为不同的几个组分能够表现出相同的迁移程度,即投点形成一条穿过原点的直线,则代表这几个组分在地质过程中都没有发生明显的迁入和迁出。因此,Grant认为如果在处理数据的过程中存在几个组分能够拟合出一条穿过原点的线,这也可把这条线用作于Isocon(Grant, 1986)。在不活动组分的选择上面,需要非常谨慎,要正确认识地质过程以及基于不能违背野外和室内观察的现象。

需要提出的是,为了使得出的二元图解更为美观,在进行作图之前,会重新将新鲜样品中的不同组分含量适当放大或缩小,依次固定逐渐变化值(从72到0),再根据实际的迁出或迁入指数计算得出蚀变后样品中的修正值,最后进行Isocon图解投图(表3;图6)。为了使具体变化一目了然,根据蚀变元素变化比例,进行元素-变化比例图解(图6)。

5 讨论

5.1 全球典型卡林型金矿Isocon研究

前人针对全球卡林型金矿的蚀变矿化过程进行了大量的元素迁移研究工作(表4),已探求在地质过程中具体的不活动组分,从而确定Isocon线。Daliran et al(2018)针对伊朗Takab地区的Agdarreh金矿中的硅化矿石-未蚀变灰岩进行Isocon分析,发现在矿化蚀变的过程中 Al_2O_3 未发生明显的迁出迁入,在运用Isocon分析过程中可作为不活动组分看待;Palinkas et al(2018)以马其顿Vardar地区的Allchar金-砷-锑矿床为研究对象,针对主要矿化围岩硅化白云岩以及新鲜白云岩进行元素分析,结果发现 TiO_2 在反应前后未发生明显迁移,可作为不活动组分;Fithianetal(2018)在美国Battle Mountain地区,选取Marigold典型矿床,采集蚀变玄武岩与新鲜玄武岩进行Isocon分析,发现在蚀变过程中的不活动组分包括 Al_2O_3 、 TiO_2 以及Zr,Isocon可以通过这三个组份确定;在相对早期阶段,该方法首先运用于内华达典型卡林型金矿的研究中,其中包括Hofstra

表1 丫他金矿样品主量元素分析结果表 (%)

Table 1 Concentrations of major elements for samples from Yata gold deposit (%)													
样品编号	样品类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TF ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI	Total
ZK84-08 HT-02	新鲜围岩	59.00	14.09	5.55	5.06	1.81	3.82	0.03	0.68	0.14	0.10	9.32	99.60
ZK84-08 HT-03		57.05	17.27	5.06	3.36	1.87	4.77	0.05	0.67	0.11	0.08	9.17	99.46
ZK84-08 HT-04		52.91	17.81	5.24	4.82	2.15	4.87	0.05	0.71	0.11	0.10	10.78	99.55
ZK84-08 HT-05		70.08	10.56	3.03	3.87	1.38	2.96	0.00	0.51	0.13	0.05	7.10	99.67
ZK84-08 HT-06		54.39	16.36	5.20	5.24	2.09	4.60	0.03	0.69	0.12	0.08	10.69	99.50
ZK84-08-Y11		54.21	17.10	5.38	4.83	2.08	4.67	0.03	0.70	0.12	0.09	10.41	99.62
ZK84-08 HT-07	轻微矿化	54.27	16.74	6.73	4.10	1.88	4.63	0.03	0.74	0.11	0.09	10.41	99.73
ZK84-08 HT-08		60.28	14.34	3.40	4.90	2.14	3.96	0.03	0.63	0.13	0.10	9.78	99.69
ZK84-08 HT-09		51.95	17.01	5.21	5.70	2.17	4.75	0.01	0.72	0.12	0.10	11.84	99.57
ZK84-08 HT-10		54.65	14.85	4.91	6.08	2.31	4.21	0.00	0.74	0.13	0.09	11.59	99.57
ZK84-10-Y1		55.46	15.21	5.12	5.24	2.40	4.22	0.01	0.64	0.12	0.09	11.22	99.73
ZK84-10-Y82		57.00	17.04	3.48	4.44	2.10	4.84	0.02	0.70	0.12	0.07	9.83	99.65
ZK84-10 HT-10	中等矿化	49.34	9.22	2.91	26.76	2.67	2.61	0.01	0.38	0.08	0.04	5.61	99.63
ZK84-08 HT-01		70.14	16.67	2.22	0.44	0.42	4.43	0.04	0.83	0.13	0.05	3.57	98.93
ZK84-08-Y13		49.56	17.05	5.94	7.00	2.33	4.75	0.01	0.62	0.10	0.09	12.19	99.64
ZK84-08-Y86		59.37	13.22	8.76	3.37	1.79	3.44	0.01	0.64	0.14	0.07	8.98	99.79
ZK84-08-Y93		64.21	10.81	8.42	3.15	1.53	3.01	0.01	0.53	0.18	0.06	7.89	99.80
ZK84-08-Y94		67.11	10.08	5.08	4.45	1.70	2.89	0.04	0.54	0.13	0.08	7.70	99.80
ZK84-10-Y11	矿体	63.91	11.36	4.51	4.55	1.95	2.93	0.00	0.52	0.13	0.08	9.77	99.71
ZK84-10 HT-09		55.94	13.74	5.13	6.12	2.38	3.83	0.01	0.64	0.13	0.09	11.54	99.56
ZK84-10-Y17		52.64	17.06	5.69	4.85	2.23	4.79	0.02	0.67	0.11	0.09	11.53	99.68
ZK84-10-Y32		52.52	16.37	6.20	5.06	2.30	4.47	0.00	0.67	0.12	0.10	11.92	99.73
ZK84-10-Y99		55.64	16.19	5.58	4.24	2.08	4.59	0.01	0.66	0.13	0.07	10.50	99.70
ZK84-10-Y115		72.51	11.13	3.88	1.80	0.91	3.10	0.00	0.46	0.09	0.02	6.01	99.91
ZK84-08-Y29	矿体	79.67	4.77	3.16	4.40	0.86	1.25	0.03	0.24	0.07	0.05	5.44	99.93
ZK84-08-Y62		59.12	15.51	5.21	3.74	2.19	4.30	0.01	0.67	0.12	0.09	8.88	99.84
ZK84-08-Y127		68.63	12.58	2.96	3.08	1.59	3.58	0.03	0.63	0.14	0.07	6.56	99.85
ZK84-10-Y47		59.48	15.54	6.80	6.31	2.76	4.30	0.00	0.64	0.15	0.14	3.53	99.65
ZK84-10-Y65		55.34	20.76	5.05	1.89	1.43	5.81	0.03	0.83	0.15	0.04	8.51	99.84

表2 丫他金矿样品微量元素分析结果表 (μg/g)
Table 2 Concentrations of trace elements for samples from Yata gold deposit (μg/g)

样品编号	样品类型	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co	Cd	Li	Rb	W	Mo	As	Sb	Bi	Hg	Nb	Zr	Ti	Ag
ZK84-08 HT-02	新鲜围岩	31.50	23.80	102.00	66.80	34.10	28.40	0.25	4.12	92.10	1.49	3.76	42.90	7.13	0.49	0.81	9.71	173.00	1.56	113.00
ZK84-08 HT-03		32.70	18.20	89.80	81.00	25.00	11.60	0.13	4.00	153.00	2.22	0.16	41.00	3.21	0.66	0.70	9.81	177.00	1.89	42.00
ZK84-08 HT-04		44.60	14.20	81.00	80.20	44.00	36.50	0.12	3.70	147.00	3.17	0.22	67.30	4.63	0.68	0.60	10.90	186.00	2.06	78.00
ZK84-08 HT-05		19.80	9.28	96.90	50.40	18.60	7.76	0.16	3.94	100.00	1.32	0.22	29.40	1.73	0.25	0.88	8.12	136.00	1.22	26.50
ZK84-08 HT-06		26.50	26.20	78.30	72.30	34.20	23.90	0.13	4.60	95.50	1.87	1.14	89.50	4.18	0.59	1.10	10.60	168.00	1.81	144.00
ZK84-08-Y11		33.80	19.30	107.00	73.80	31.90	18.90	0.15	5.24	113.00	3.05	0.74	271.00	5.66	0.59	2.83	10.00	172.00	1.93	122.00
ZK84-08 HT-07	轻微矿化	59.80	24.30	79.50	78.00	24.40	13.00	0.10	5.74	127.00	5.24	0.24	232.00	14.60	0.60	5.80	11.20	182.00	2.00	63.00
ZK84-08 HT-08		14.80	3.92	70.20	58.50	10.60	5.91	0.07	5.99	71.90	3.11	0.25	388.00	5.31	0.18	4.25	7.26	124.00	1.29	33.00
ZK84-08 HT-09		76.80	11.40	91.20	74.40	26.70	11.80	0.24	4.02	97.30	2.62	0.42	64.70	5.70	0.50	2.26	10.10	180.00	1.96	120.00
ZK84-08 HT-10		47.90	8.29	77.60	67.30	15.10	6.01	0.11	3.99	102.00	2.28	0.10	339.00	4.27	0.46	1.56	9.91	162.00	1.61	36.00
ZK84-10-Y1		31.10	15.30	98.70	68.10	28.50	16.50	0.13	5.33	106.00	5.49	0.22	1130.00	7.26	0.39	1.80	9.33	155.00	1.83	50.00
ZK84-10-Y82		16.10	7.06	58.10	74.90	20.20	10.90	0.12	8.54	124.00	3.37	0.17	155.00	6.26	0.34	1.17	10.30	154.00	1.84	71.00
ZK84-10 HT-10	中等矿化	17.70	10.80	49.10	48.90	15.80	7.90	0.17	6.00	102.00	1.44	1.00	25.30	3.91	0.34	1.54	6.32	101.00	1.09	75.00
ZK84-08 HT-01		17.40	19.90	43.10	70.30	16.70	22.00	0.05	4.64	152.00	2.34	0.10	160.00	4.06	0.45	0.51	12.90	230.00	1.83	24.00
ZK84-08-Y13		38.40	24.30	98.50	80.30	42.40	21.90	0.23	6.05	118.00	4.82	0.18	1060.00	15.40	0.40	7.52	9.76	156.00	2.21	472.00
ZK84-08-Y86		33.90	39.30	87.40	65.70	29.30	12.10	0.58	10.20	62.00	8.30	0.17	870.00	19.30	0.38	8.71	9.46	159.00	1.79	435.00
ZK84-08-Y93		25.80	35.90	96.80	50.80	26.00	12.50	0.12	4.94	71.50	4.68	0.18	1950.00	8.57	0.30	5.03	7.98	132.00	1.33	78.00
ZK84-08-Y94		12.80	10.20	59.00	50.60	18.70	5.48	0.14	4.79	91.00	7.22	0.16	137.00	7.18	0.17	1.87	8.19	134.00	1.23	268.00
ZK84-10-Y11	中等矿化	26.50	24.30	85.00	53.10	26.70	14.60	0.18	9.89	94.90	6.14	<0.1	673.00	7.42	0.35	3.85	8.11	117.00	1.35	515.00
ZK84-10 HT-09		27.00	9.91	112.00	67.00	28.70	12.00	0.20	5.57	135.00	5.40	0.22	146.00	5.39	0.30	3.72	9.48	158.00	1.76	59.00
ZK84-10-Y17		32.50	23.40	76.70	79.30	24.90	11.70	0.10	7.35	129.00	3.31	0.12	277.00	6.89	0.68	1.35	10.60	164.00	2.00	285.00
ZK84-10-Y32		27.40	16.40	49.20	74.30	27.70	14.90	0.19	7.98	80.40	8.20	0.50	278.00	8.75	0.37	2.82	10.20	165.00	2.02	916.00
ZK84-10-Y99		25.70	17.40	92.00	72.20	28.90	15.80	0.14	9.44	110.00	7.00	0.13	238.00	13.00	0.56	4.26	10.00	153.00	1.82	234.00
ZK84-10-Y115		18.20	6.78	56.00	45.30	13.40	7.76	0.55	9.50	88.40	8.18	0.28	570.00	15.50	0.15	7.86	7.02	105.00	1.35	752.00
ZK84-08-Y29	矿体	44.00	18.80	57.80	26.50	9.62	3.66	0.68	13.00	40.00	3.66	0.13	766.00	153.00	2.05	8.88	3.24	53.30	0.69	1300.00
ZK84-08-Y62		29.80	11.80	75.30	70.90	19.50	9.48	0.45	10.70	143.00	10.50	0.12	913.00	12.00	0.23	9.49	10.20	176.00	2.14	476.00
ZK84-08-Y127		44.60	5.09	81.10	62.90	15.10	9.33	0.26	6.42	98.40	8.40	0.10	393.00	5.91	0.15	5.86	8.97	150.00	1.55	543.00
ZK84-10-Y47		82.50	26.60	105.00	79.00	39.10	21.70	0.28	8.82	124.00	9.26	0.36	867.00	18.50	0.39	6.13	11.20	166.00	2.12	1130.00
ZK84-10-Y65		143.00	13.40	104.00	86.20	29.90	13.90	0.32	10.40	188.00	11.70	0.25	299.00	47.80	0.66	7.94	12.70	219.00	2.45	1230.00

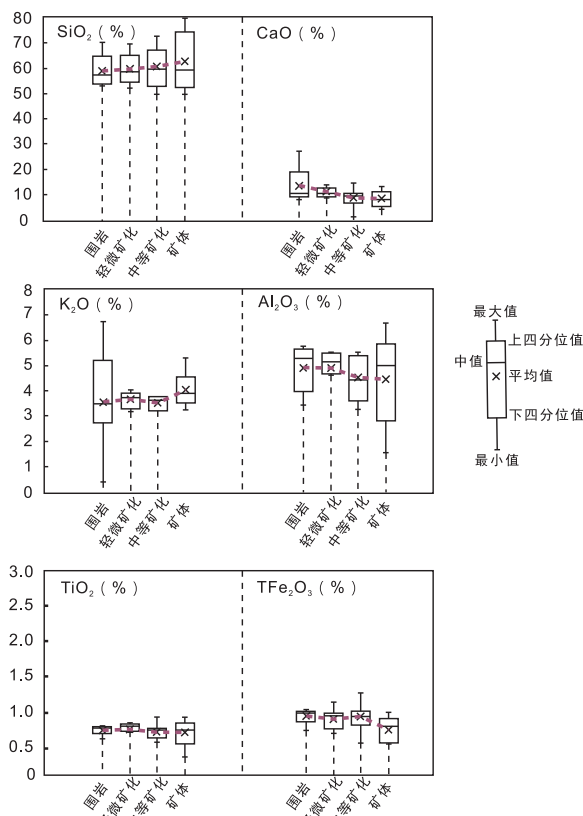


图5 丫他金矿主量元素变化趋势

Fig. 5 Variation trends for major elements in Yata gold deposit

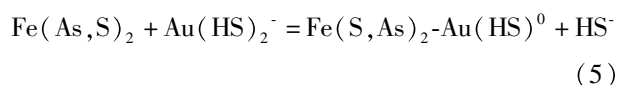
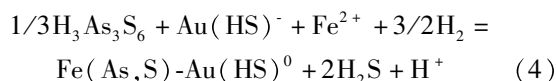
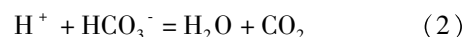
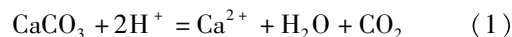
and Cline(2000)选取内华达中北部的 Jerritt Canyon 矿床中的蚀变灰岩和新鲜灰岩为研究对象,发现 Al_2O_3 和 TiO_2 是不活动组分;另外, Cail and Cline (2001)针对同样是内华达州中北部的 Getchell 金矿床,采取蚀变矿石-未蚀变围岩组合样品,进行全岩元素分析,经过蚀变过程发现 Al_2O_3 、 TiO_2 、Zr、Th 四个成分为不活动组分。总的来说,根据不同卡林型金矿床的分析结果,可以看出尽管赋矿围岩类型有所差异,但是不活动组分都基本相同,不活动主量元素包括 Al_2O_3 和 TiO_2 ,不活动微量元素是 Zr 和 Th 这两个高场强元素。

5.2 元素迁移特征及指示意义

主量元素方面,与大多数卡林型金矿相同的是,通过数据计算处理发现丫他金矿蚀变矿化过程中 Al_2O_3 没有发生明显的组分迁入和迁出,可用作 Isocon 分析过程中的不活动组分,作为对比项分析其他更多组分的变化。 SiO_2 含量的升高以及 CaO 含量的减少指示了硅化以及去碳酸盐化是矿化过程中最重要的热液蚀变。与内华达典型卡林型金矿不同的是,黔西南典型卡林型金矿的赋矿围岩包括大量的铁白云岩,许多研究者认为在成矿过程中酸

性偏中性的热液流体携带 H_2S 与 Fe 白云岩发生水岩反应,释放了围岩中的 Fe 且与 S 结合形成载金铁硫化物(例如黄铁矿),但是由于 Fe 释放以及黄铁矿沉淀发生速度较快,所以在 Isocon 计算中没有发现明显的迁入和迁出特征。另外,通过野外工作以及钻孔样品观察,在丫他金矿中没有发现褐铁矿或是硫酸盐,也证实了丫他金矿含 H_2S 的中酸性成矿流体的存在以及 Au 主要是以 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 或是 $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ 络合物的形式存在于含矿热液中。在成矿流体与围岩发生水岩反应形成载金铁硫化物的同时,伴随的硅化(SiO_2 含量增加)以及去碳酸盐化(CaO 含量降低)造成成矿流体系统的 pH 值发生波动,是导致丫他金矿 Au 沉淀的重要机制(Bowers T S, 1991; Loucks R R and Mavrogenes J A, 1999)。

相关的化学反应式如下:



反应(1)代表了在成矿过程中伴随的去碳酸盐化,导致 Ca^{2+} 的减少,随着伴随的反应(2)、(3)的进行, H^+ 离子逐渐被消耗,并释放了 CO_2 和 H_2S ,也加速了反应(4)、(5)向左进行,同时促使了含砷黄铁矿和 Au 从流体中的析出。

微量元素方面,结合 Isocon 图解和元素变化比例图解(图6)可以看出,矿化过程中伴随 W、As、Sb、Hg、Ag 五个元素迁入,Cd 和 Li 也表现出迁入特征但程度不高。反之,随着矿化的逐渐发生,Mo 明显迁出。丫他金矿的不同矿化程度的岩石,除了上述的元素表现出明显的迁移特征之外,其他元素无明显的迁出迁入特征,轻微的变化可能是受到围岩元素本身含量或其他影响因素的影响,无法确定是否与热液蚀变矿化相关。总体来看,与金矿化密切相关的元素是 As、Sb、W、Hg、Ag、Cu、Zn、Tl,元素随着成矿流体通过与围岩的相互作用成矿过程中迁入。其中,As、W、Hg 是三类矿体成矿过程中都大量迁入的元素,而 Cu、Zn、Ag、Tl 的迁入程度有所波动。其他元素在成矿过程中未观察到明显的变化趋势,迁入迁出特征波动不定,可能是由于受到其他因素的干扰。值得特别说明的是,W 在热液成矿

表3 丫他金矿Isocon定量计算结果表

Table 3 Quantitative calculation results of Isocon mass balance method for samples from Yata gold deposit

元素	围岩	轻微矿化样品		中等矿化样品		矿体	斜率	迁入/迁出		比例	新鲜样品		轻微矿化样品		中等矿化样品		矿体
	C _i ^O	C _i ^L	C _i ^M	C _i ^A	C _i ^A /C _i ^O	ΔC _i /C _i ^O		C _i ^O S	C _i ^S		C _i ^O S	C _i ^S	C _i ^M S	C _i ^A S			
SiO ₂ (%)	58.69	52.15	60.41	62.45	1.064	0.06	1.23	72	63.98	74.12	76.62						
Al ₂ O ₃	15.22	15.19	13.97	14.83	0.975	-0.03	4.60	70	69.87	64.26	68.22						
TF _{e2} O ₃	4.82	4.64	5.58	4.64	0.963	-0.04	14.12	68	65.55	78.83	65.46						
CaO	4.47	7.06	3.49	2.88	0.645	-0.35	7.38	33	52.09	25.79	21.29						
MgO	1.86	2.22	1.78	1.67	0.896	-0.10	34.41	64	76.34	61.37	57.32						
K ₂ O	4.20	4.24	3.84	3.85	0.915	-0.08	14.75	62	62.48	56.62	56.75						
Na ₂ O	0.03	0.02	0.01	0.02	0.554	-0.45	1785.71	60	31.67	24.68	33.21						
TiO ₂	0.65	0.66	0.62	0.64	0.985	-0.02	88.96	58	58.38	54.83	57.11						
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.13	0.13	1.031	0.03	459.02	56	53.42	57.84	57.74						
MnO	0.08	0.08	0.07	0.08	0.933	-0.07	671.64	54	56.33	48.36	50.37						
LOI	9.41	12.59	9.24	8.58	0.912	-0.09	5.52	52	69.54	51.03	47.43						
Cu (μg/g)	31.02	37.25	25.96	68.78	2.217	1.22	0.81	25	30.02	20.92	55.43						
Pb	18.34	12.55	20.71	15.14	0.826	-0.17	2.62	48	32.84	54.21	39.63						
Zn	89.60	78.93	77.79	84.64	0.945	-0.06	0.51	46	40.52	39.94	43.45						
Cr	70.14	67.99	64.45	65.10	0.928	-0.07	0.63	44	42.65	40.43	40.84						
Ni	31.18	21.65	25.76	22.64	0.726	-0.27	1.35	42	29.16	34.70	30.50						
Co	21.63	11.37	13.70	11.61	0.537	-0.46	1.85	40	21.02	25.34	21.48						
Cd	0.16	0.14	0.23	0.40	2.519	1.52	196.20	31	26.83	44.23	78.09						
Li	4.07	5.61	7.30	8.07	1.981	0.98	8.84	36	49.56	64.58	71.33						
Rb	117.52	105.40	102.93	118.68	1.010	0.01	0.29	34	30.49	29.78	34.34						
W	2.01	3.33	5.96	8.70	4.322	3.32	8.44	17	28.07	50.33	73.47						
Mo	1.10	0.39	0.20	0.19	0.175	-0.83	27.27	30	10.70	5.56	5.24						
As	54.02	325.63	578.09	647.60	11.988	10.99	0.09	5	30.14	53.51	59.94						
Bi	0.53	0.43	0.37	0.70	1.303	0.30	44.94	24	19.10	16.79	31.28						
Hg	0.82	2.65	4.32	7.66	9.364	8.36	2.44	2	6.48	10.56	18.73						
Ba	288.80	265.00	226.45	230.32	0.798	-0.20	0.06	18	16.52	14.11	14.36						
Zr	168.00	153.75	152.09	152.86	0.910	-0.09	0.07	12	10.98	10.86	10.92						
Tl	1.71	1.69	1.70	1.79	1.048	0.05	4.68	8	7.93	7.96	8.38						
Ag	80.70	71.25	367.09	935.80	11.596	10.60	0.07	6	5.30	27.29	69.58						

表 4 全球典型卡林型金矿蚀变过程元素迁移

Table 4 Element migration during alteration in global typical Carlin-type gold deposits

地区	矿床	研究对象	不活动性元素	元素运移特征	参考文献
Takab	Agdarreh 金矿	硅化矿石-未蚀变灰岩	Al ₂ O ₃	迁入元素: Au, Hg, Sb, Zn, Fe, Tl, Ba, As, Mn, W, Cd, Pb, K, S, Se, Te, Ni, Cu 迁出元素: CaO	(Daliran et al., 2018)
Vardar	Allchar 金 - 锑 - 铋矿床	硅化白云岩 - 新鲜白云岩	TiO ₂	迁入元素: SiO ₂ , K ₂ O, Fe ₂ O ₃ , Rb, As, Tl, Pb, Sb, Hg, Cr 迁出元素: CaO, MgO, Na ₂ O, MnO, Sr	(Palinkas et al., 2018)
Battle Mountain	Marigold 矿床	蚀变玄武岩 - 新鲜玄武岩	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , Zr	迁入元素: Au, As, Sb 迁出元素: Ba	(Fithian et al., 2018)
内华达中北部	Jerritt Canyon 矿床	蚀变灰岩 - 新鲜灰岩	Al ₂ O ₃ , TiO ₂	迁入元素: Au, As, Sb, Hg, Tl, Se, S, Ag, Zn, Ni 迁出元素: CO ₂ , Ca, Sr, Mg, Mn	(Hofstra and Cline, 2000)
内华达州中北部	Getchell 矿床	蚀变矿石 - 未蚀变围岩	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , Zr, Th	迁入元素: Au, As, Hg, Sb, Se, SiO ₂ , Te, Tl, Cs, W, S 迁出元素: CaO, Sc, Sr, Ba, Mn, K ₂ O	(Cail and Cline, 2001)

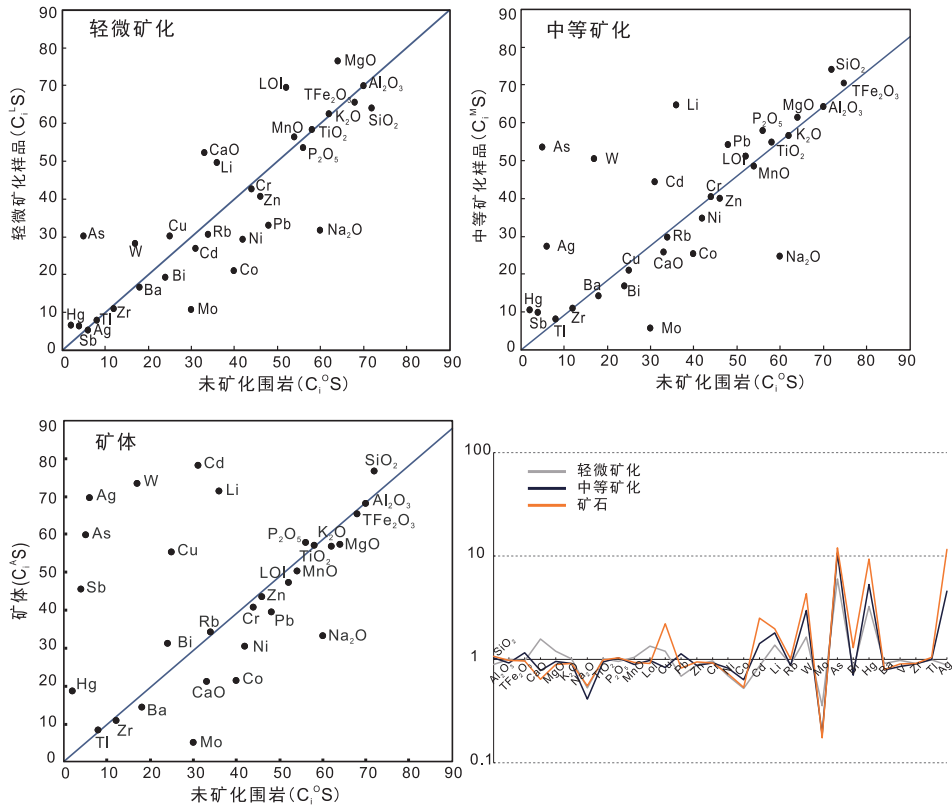


图 6 丫他金矿元素迁移特征分析图

Fig. 6 Element migration graphics of Yata gold deposit

系统中属于中高温元素,一般不容易与 Au 共生,但前人对美国内华达 Getchell 进行 Isocon 研究时同样存在 W、Mo 等高温元素与 Au 共生的现象,其解释为 Osgood 花岗闪长岩与围岩的交代作用所造成。虽然目前黔西南地区由于沉积盖层过厚导致除在泥堡金矿之外未发现与成矿相关岩浆岩露头(Wu et

al., 2019),但前人对于区内典型金矿载金黄铁矿进行了微区 S 同位素分析,结果显示成矿期黄铁矿 S 同位素值位于 0 值附近,显示出明显的岩浆 S 特征,认为区域岩浆作用对于金成矿具有重要贡献(Hou et al., 2016),故作者认为丫他金矿所存在的 W 与 Au 呈正相关关系的原因可能与区内深部岩浆作用

有关。根据针对丫他含金黄铁矿微区微量元素研究可知,As 与 S 呈明显负相关关系,而 Au 和 As 呈正相关关系(吴松洋,2019),指示含砷黄铁矿的形成过程中,主要机制是热液中的 As 取代黄铁矿中的 S。一般来说,As 取代 S 的过程中,会造成黄铁矿内部结构的变形,导致具有较大离子体积的 Au^+ 可以顺利进入黄铁矿中形成含金砷黄铁矿(Deditius et al., 2008),同时镜下观察到黄铜矿、闪锌矿、硫砷锑汞矿等金属矿物的存在,代表成矿流体中的 Cu、Zn、Ag、Tl、W、Hg 等元素主要也是通过此过程随 Au 迁入矿化蚀变围岩。

6 结论

(1)丫他金矿成矿过程中,硅化和去碳酸盐化与矿化关系最为密切,表现为持续的 SiO_2 的升高以及 CaO 含量的降低; K_2O 和 TFe_2O_3 含量虽有变化但过程中有所波动,推测由于围岩 Fe 释放以及黄铁矿沉淀发生速度较快有关,表现为载金矿物黄铁矿与黏土矿物的沉淀; TiO_2 和 Al_2O_3 含量在各个阶段岩石中变化不大,且显示出较高的平均值。

(2)与金矿化密切相关的元素是 As、Sb、W、Hg、Ag、Cu、Zn、Tl,元素随着成矿流体通过与围岩的相互作用成矿过程中迁入。其中,As、W、Hg 是三类矿体成矿过程中都大量迁入的元素,而 Cu、Zn、Ag、Tl 的迁入程度有所波动。上述迁入元素在金以 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 或是 $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ 络合物形式进入含砷黄铁矿晶格中的同时沉淀黄铜矿、闪锌矿、硫砷锑汞矿等其他金属矿物。其他元素在成矿过程中未观察到明显的变化趋势,迁入迁出特征波动不定,可能是由于受到其他因素的干扰。

致谢:野外工作得到了贵州省有色金属和核工业地质勘查局的大力帮助,在此谨致谢意!

参考文献(References):

- Bowers T S, 1991. The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 2417–2434.
- Cail T L, Cline J S, 2001. Alteration associated with gold deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, north-central Nevada [J]. *Economic Geology*, 96(6): 1343–1359.
- Chen M H, Mao J W, Li C, et al., 2015a. Re-Os isochron ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi “golden triangle”, southwestern China [J]. *Ore Geology Review*, 64: 316–327.
- Chen M H, Zhang Z Q, Santosh M, et al., 2015b. The Carlin-type gold deposits of the “golden triangle” of SW China: Pb and S isotopic constraints for the ore genesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 115–128.
- Cline J S, Hofstra A H, Muntean J L, et al., 2005. Carlin-type gold deposit in Nevada: critical geologic characteristics and viable model [J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 451–484.
- Cline J S, 2018. Nevada’s Carlin-type gold deposits: What we’ve learned during the past 10 to 15 years [J]. *Reviews in Economic Geology*, 20: 7–37.
- Daliran F, Hofstra A H, Walther J, et al., 2018. Ore genesis constraints on the Agdarreh and Zarshouran Carlin-type gold deposits in the Takab region of northwestern Iran [J]. *Reviews in Economic Geology*, 20: 299–333.
- Deditius A P, Utsunomiya S, Renock D, et al., 2008. A proposed new type of arsenian pyrite: composition nanostructure and geological significance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 2919–2933.
- Fithian M T, Holley E A, Kelly N M, 2018. Geology of gold deposits at the Marigold mine, Battle Mountain district, Nevada [J]. *Reviews in Economic Geology*, 20: 121–155.
- Grant J A, 1986. The isocon diagram—a simple solution to Gresens’ equation for metasomatic alteration [J]. *Economic Geology*, 81(8): 1976–1982.
- Gresens R L, 1967. Composition-volume relationships of metasomatism [J]. *Chemical Geology*, 2: 47–65.
- Hofstra A H, Cline J S, 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits [J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 163–220.
- Hou L, Peng H J, Ding J, et al., 2016. Texture and in-situ chemical and isotopic analyses of pyrite, Huijiangbao Trend, Youjiang Basin, China: Implications for paragenesis and source of S [J]. *Economic Geology*, 111: 331–353.
- Loucks R R, Mavrogenes J A, 1999. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions [J]. *Science*, 284: 2159–2163.
- Metcalfe I, 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland [J]. *Gondwana Research*, 19(1): 3–21.
- Palinkas S S, Hofstra A H, Percival T J, et al., 2018. Comparison of the All char Au-As-Sb-Tl deposits, Republic of Macedonia, with Carlin-type gold deposits [J]. *Reviews in Economic Geology*, 20: 335–363.
- Su W C, Heinrich C A, Pettke T, et al., 2009a. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluid [J]. *Economic Geology*, 104: 73–93.
- Su W C, Hu R Z, Xia B, et al., 2009b. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type Au deposit, Guizhou, China [J]. *Chemical Geology*, 258: 269–274.
- Su W C, Zhang H T, Hu R Z, et al., 2012. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposits, Guizhou, China: Implication for gold

- depositional processes [J]. *Mineralium Deposita*, 47: 653–662.
- Wu S Y, Hou L, Jowitt S M, et al., 2019. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Late Triassic dolerite associated with Nibao gold deposit, Youjiang Basin, southwestern China: implications for post-collisional magmatism and its relationships with Carlin-like gold mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 111: 102971.
- Xu Yigang, He Bin, Chung Sunlin, et al., 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province [J]. *Geology*, 32(10): 917–920.
- 曾允孚, 刘文均, 陈洪德, 等, 1995. 华南右江复合盆地的沉积构造演化[J]. *地质学报*, 69(2): 113–124.
- 陈懋弘, 毛景文, Uttley P J, 等, 2007a. 贵州锦丰(烂泥沟)超大型金矿床构造解析及构造成矿作用[J]. *矿床地质*, 26(4): 380–396.
- 陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 等, 2007b. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义[J]. *地质论评*, 53(3): 371–382.
- 李培, 邓小虎, 陈守余, 等, 2011. 个旧蚀变岩型铜多金属矿床围岩蚀变过程中元素迁移定量研究[J]. *地质找矿论丛*, 26(2): 176–181.
- 刘平, 杜芳应, 杜昌乾, 等, 2006. 从流体包裹体特征探讨泥堡金矿成因[J]. *贵州地质*, 23(1): 44–50.
- 刘平, 雷志远, 叶德书, 等, 2006. 贵州泥堡金矿地质地球化学特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 26(4): 78–85.
- 刘显凡, 吴德超, 刘远辉, 等, 2003. 黔西南低温成矿域中不同层位同类型金矿的内在统一成矿机制探讨[J]. *沉积与特提斯地质*, 23(3): 93–101.
- 刘艳鹏, 马生明, 朱立新, 等, 2015. 安徽兆吉口热液型铅锌矿元素迁移量三维地球化学勘查模型[J]. *地学前缘*, 22(4): 141–151.
- 王疆丽, 林方成, 于远山, 等, 2014. 右江沉积盆地印支–燕山期金矿成矿系统研究[J]. *地质与勘探*, 50(1): 105–113.
- 吴程赞, 顾雪祥, 刘丽, 等, 2012. 贵州丫他卡林型金矿床流体包裹体特征及其成矿意义[J]. *现代地质*, 26(2): 277–285.
- 吴松洋, 2019. 黔西南卡林型金矿构造–岩浆–热液成矿模式研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 吴松洋, 侯林, 丁俊, 等, 2016. 黔西南卡林型金矿田控矿构造类型及成矿流体特征[J]. *岩石学报*, 32(8): 2407–2424.
- 夏勇, 张瑜, 苏文超, 等, 2009. 黔西南水银洞层控超大型卡林型金矿床成矿模式及成矿预测研究[J]. *地质学报*, 83(10): 1473–1482.
- 项新葵, 尹青青, 丰成友, 等, 2015. 赣北石门寺钨多金属矿床花岗闪长岩蚀变带元素、流体迁移规律及其对成矿作用的制约[J]. *地质学报*, 87(7): 1273–1287.
- 张伟, 季国松, 廖国忠, 等, 2020. 黔西南“断控型”金矿床的找矿模式与勘探评价方法—以丫他金矿床为例[J]. *地质学报*, 95, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.20211005.
- 朱赖民, 刘显凡, 金景福, 等, 1998. 滇–黔–桂微细浸染型金矿床时空分布与成矿流体来源研究[J]. *地质科学*, 33(4): 463–474.

Elements' migration during ore-forming process, Yata gold deposit, Southwestern Guizhou, China

WU Songyang, LIU Shusheng, HOU Lin

(Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: Located at Youjiang basin, southwest margin of Yangtze block, the Yata gold deposit is a Carlin-type gold deposit hosted by a series of Triassic thick basin-face flysch formation and controlled by the high angle thrust-fault system. Based on detailed study of relationship of ore minerals and alteration, the ore-forming process of Yata gold deposit can be divided into three stages, including the Fe-dolomite-pyrite stage, the dolomite-pyrite-jasperoid-polymetallic minerals stage, and the arsenopyrite-orpiment-realgar-calcite-quartz stage. In order to figure out the elements' migration during ore-forming process, we have collected samples with different degrees of mineralization and conducted mass balance quantitative calculation using Isocon graphic method. The results show that mineralization is accompanied by clear increase of SiO_2 content and decrease of CaO content, which represents the existence of ore-related silification and decarbonation. The contents of K_2O and TFe_2O_3 change with slight fluctuation, suggesting the deposition of gold-bearing pyrite and clay minerals. The average contents of TiO_2 and Al_2O_3 are stable and relatively high in different stages. As, Sb, W, Hg, Ag, Cu, Zn, and Tl have showed intimate relationship in mineralization while trace elements migrate between host rock and ore-fluid during fluid-host rock reaction, polymetallic minerals e. g. chalcopyrite, sphalerite, routhierite are deposited while gold entered the crystal framework of As-pyrite as $\text{Au}(\text{HS})^0$ or $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$.

Key words: elements migration; mineralization process; Isocon graphic method; Yata gold deposit; Youjiang basin