

滇西“碱质热液型”金多金属矿床地质特征与找矿模型^{*}

张长青¹, 毛景文^{1,2}, 周云满³, 李其在³, 姜德波¹, 刘欢¹, 王利东³, 郑瑜林¹,
周癸武³, 王瑞³, 孙嘉¹, 李德先¹, 韩润生⁴, 李杨林⁴, 孔志岗⁴

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 中国地质大学(北京), 科学研究院, 北京 100083; 3 云南黄金矿业集团股份有限公司, 云南 昆明 650200;
4 昆明理工大学, 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要 滇西地区地质构造演化复杂, 成矿地质条件优越, 经历了多期次、多类型成矿作用, 形成了多条各具特色的金多金属成矿带。文章通过对区内金沙江-哀牢山金多金属成矿带内北衙、马厂箐、姚安、长安等典型矿床的解剖和对比研究, 发现带内金多金属矿床与经典的斑岩型矿床相比具有显著的差异性, 主要表现是: 成矿岩体岩性以碱性系列为特征, $w(K_2O+Na_2O)$ 超过 8%; 成矿流体碱质含量偏高, 流体阳离子(K^++Na^+) 含量约占流体总量的 87%~95%; 成矿过程中, 除岩浆热液参与成矿外, 岩浆气水热液与围岩间的水岩反应, 是导致矿质沉淀的主体; 自成矿岩体向外依次发育裂隙脉型、矽卡岩型、构造破碎带型和石英硫化物脉型矿化, 组成多位一体。文章基于典型矿床特征的系统总结, 提出了“碱质热液型”金多金属矿床的概念, 并对其成矿作用过程进行了初步探讨。最终, 文章构建了滇西地区碱质热液型金多金属矿地物化遥综合找矿模型, 并指导相关矿床找矿勘查取得了重要进展。

关键词 地质学; 碱质热液型; 矿化蚀变分带; 找矿方法; 金多金属矿床; 滇西
中图分类号: P618.51 **文献标志码**: A

Geological characteristics and exploration model of "alkaline hydrothermal type" gold polymetallic deposits in western Yunnan

ZHANG ChangQing¹, MAO JingWen^{1,2}, ZHOU YunMan³, LI QiZai³, LOU DeBo¹, LIU Huan¹, WANG LiDong³,
ZHENG YuLin¹, ZHOU GuiWu³, WANG Rui³, SUN Jia¹, LI DeXian¹, HAN RunSheng⁴, LI YangLin⁴
and KONG ZhiGang⁴

(1 Ministry of Natural Resources (MNR) Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Yunnan Gold & Mining Group Co. Ltd., Kunming 650200, Yunnan, China; 4 Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract

The evolution of geological structure in western Yunnan has a long and complex history. It has experienced many stages and various types of mineralization. The gold polymetallic metallogenic belt with prominent characteristics was formed in the area. According to the summary and comparative study of the characteristics of typical deposits, such as Beiya, Machangqing, Yao'an, Chang'an, etc. It is found that the gold polymetallic deposits in the belt are significantly different from the classical porphyry and hydrothermal deposits. For example, the rock prop-

^{*} 本文得到国家自然科学基金(编号:41672093)、基本科研业务费(编号:KK2202)、中国地质调查局项目(编号:DD20190182、DD20190815)和云金集团项目“滇西地区金多金属矿成矿规律及成矿系列研究”联合资助

第一作者简介 张长青,男,1975年生,研究员,主要从事岩石学、矿物学、矿床学的研究。Email:zcqchangqing@163.com

收稿日期 2021-11-28;改回日期 2022-06-15。赵海杰编辑。

erties of the ore-forming intrusion are characterized by alkaline series, with $w(K_2O+Na_2O)$ content exceeds to 8%. The alkali content of ore-forming fluid is also high, (K^++Na^+) accounts for 87%~95% of the total number of fluid cations. The water rock reaction between magmatic gas hydrothermal solution and surrounding rock is the key to mineral precipitation during the process of mineralization. In terms of mineralization assemblage, fracture vein type, skarn type, structural fracture zone type and quartz sulfide vein type mineralization assemblage are successively developed from the metallogenic rock mass outward, which form a multi type metallogenic system. Based on the systematic summary of the characteristics of typical deposits, the paper put forward to the concept of "alkaline hydrothermal" gold polymetallic deposit, and discussed its metallogenic process. Furthermore, a geophysical, geochemical and remote comprehensive prospecting model for "alkaline hydrothermal" gold polymetallic deposits in western Yunnan has been constructed to guide the prospecting and exploration of related deposits and made important progress. Finally, the prospecting model of geology, geophysics, geochemistry and remote sensing has been constructed. The model is applied to the prospecting and exploration of "alkaline hydrothermal" gold polymetallic deposits in western Yunnan, and make the obvious effect of exploration.

Key words: geology, alkaline hydrothermal type, mineralization alteration zoning, exploration methods, gold polymetallic deposit, western Yunnan

滇西地区位于特提斯-喜马拉雅成矿域三江成矿带的中南部,地质演化历史悠久,构造复杂。复杂的成矿地质环境形成了多个成矿单元、多期次构造活动和成矿作用,其成矿作用显示了普遍性、多源性、多样性等诸多特色(潘桂堂,2003;李文昌等,2010;邓军等,2012;2013;2016)。目前已知存在有原特提斯阶段、古特提斯阶段、中特提斯阶段、新特提斯阶段、陆内碰撞造山阶段等多个成矿高峰期(王义昭等,2000;邓军等,2016),尤其是新生代的成矿作用具有“后来居上”之势,成为中国西南地区成矿作用的主要特色之一(沈敢富等,2000;骆耀南等,2001;王登红等,2005)。滇西三江地区一直是国内外地质矿床学家研究的热点地区,新理论、新观点、新发现层出不穷(吕伯西等,1993;肖荣阁等,1993;罗君烈等,1994;朱智华等,1996;何科昭等,1996;沈敢富等,2000;段锦荪等,2000;王义昭等,2000;高振敏等,2002;熊德信等,2007;Metcalf, 1996; Hou et al., 2007; Zi et al., 2012; Deng et al., 2014a; 2014b; Metcalf, 2013)。喜马拉雅期碰撞造山期成矿是滇西地区主要的成矿期,尤其是以金沙江-哀牢山带为代表的金多金属矿化带(张玉泉等,1997;邓万明等,1998a;赵振华等,2002),构成了滇西地区一条独具特色的构造-岩浆有色-贵金属成矿带(王登红等,2004;候增谦等,2004;毛景文等,2005;Hou et al., 2007; Mao et al., 2014)。目前带内已陆续发现了北衙金多金属矿床、西范坪铜金矿床、马厂箐(金厂箐)铜铅金矿床、大坪金矿、长安冲-铜厂铜铅金矿等一

批金、铜、钼、铅锌矿床(王登红等,2004;杨志明等,2008;2009;Tran et al., 2014)。然而,经过多年来的研究,周云满等(2017)、Zhou 等(2018)从矿床地质特征、地球化学特征等方面进行了总结分析,发现这些矿床既不同于传统的斑岩型铜金矿床,又与热液型、造山型、IOCG型、卡林型以及火山岩型金矿床存在明显差异,具有独特的成矿作用特征。因此,已有的找矿模式难以高效指导该类矿床的找矿勘查,故作者通过深入解剖成矿带内典型矿床的成矿特征,形成新的成矿认识,进而完善中国西南地区新生代新特提斯-喜马拉雅期造山带成矿理论体系,指导区域找矿勘查。

1 滇西地区金多金属矿床的地质特征

滇西地区金多金属成矿带北始于云南德钦地区,向南延伸到红河州金平县,大体沿着金沙江-哀牢山构造带东西两侧分布,南北向长达1000多km(王登红等,2004;候增谦等,2004;毛景文等,2005;Hou et al., 2007; Mao et al., 2014),带内北段发育有北衙超大型Au-Cu-Pb-Zn矿床,马厂箐、玉龙Cu-Mo矿床,小龙潭和西范坪Cu矿和甬哥、姚安Au矿床,成岩成矿时代为33~37 Ma(王登红等,2004;Lu et al., 2013;和文言等,2013;Deng et al., 2015;Liu et al., 2015;Fu et al., 2015;Li et al., 2016);南段发育大坪、长安Au矿床、哈播、长安冲Cu-Au矿床、铜厂Cu矿床,成岩成矿时代为34~35 Ma(王登红等,2004;

Tran, 2010; Zhu et al., 2013; Tran et al., 2014)。金沙江-哀牢山金多金属成矿带内矿床的总体特征具有一致性,反映它们是在一致的构造背景下,受同一地质作用过程控制。

1.1 成矿地质背景

滇西地区金多金属成矿带位于金沙江-哀牢山构造带内,地处印度板块与欧亚大陆碰撞造山带中的扬子板块西南缘。受印度大陆与欧亚大陆中晚始新世碰撞造山作用的影响,金沙江-红河构造带在始新世之后(35 Ma)发生了明显的滑移较大距离的左行走滑(吕伯西等, 2011),形成了深切岩石圈的断裂构造,在深大断裂两侧形成一系列张性或张剪性的次级断裂,为岩浆熔体上侵提供通道和就位的空间(Deng et al., 1998; Richards, 2003; Jerram et al., 2015; Walker et al., 2021)。

滇西地区在印度-欧亚大陆板块的持续汇聚和南北向挤压背景之下,滞留在软流圈的俯冲板片部分熔融,与俯冲带入软流圈的沉积物混合,形成了区内广泛发育的富碱火山岩和金多金属成矿带。

1.2 富碱火山岩特征

金沙江-哀牢山构造带内发育的新生代火山岩,具有富碱($w(K_2O + Na_2O) > 8\%$)、高钾($w(K_2O) =$

5.00%~8.30%)的特征。岩性从超基性岩、基性岩到酸性岩均有(张玉泉等, 1987),其中与金矿成矿有关的主要是中-酸性岩浅成岩,包括二长斑岩类、正长斑岩类和花岗斑岩类,被称为富碱斑岩(图1,邓万明等, 1998b; 葛良胜等, 2007; 刘显凡等, 2010; 邓军等, 2010)。富碱岩体(脉)在滇西地区发育有近千个(条),一般呈中、小岩基、岩墙、岩株、岩筒、岩脉和岩枝状产出,出露面积通常小于1 km²,常成群产于断裂的交汇部位,构成了金平-绿春、姚安-华坪、巍山、永胜-宁蒗、剑川、中甸甬哥、剑川、祥云-海东、鹤庆等多个岩体群(赖健清等, 1997; 曾普胜等, 2002; 2007)。

富碱斑岩主要包括正长(斑)岩、二长(斑)岩、石英二长(斑)岩、二长花岗(斑)岩、碱长花岗斑岩、碱性正长岩。矿物成分大致相似,主要矿物为石英、钾长石、斜长石、黑云母和角闪石,含有少量辉石、霞石、方钠石、黑榴石等矿物。副矿物有磁铁矿、榍石、磷灰石、锆石、独居石等。化学成分显示,其具有高钾($w(K_2O) = 3.65\% \sim 12.15\%$)、富碱($w(K_2O + Na_2O) = 7.89\% \sim 12.53\%$, 平均9.75%)、高 $f(O_2)$ (高于赤铁矿-磁铁矿(HM)出溶线)、富硫、富含挥发分的特征。根据其高Sr、低Y和Yb(图2, Sr/Y值介于29.8~108.1之间, 平均58.2)、富集大离子亲石元素、亏损高场强

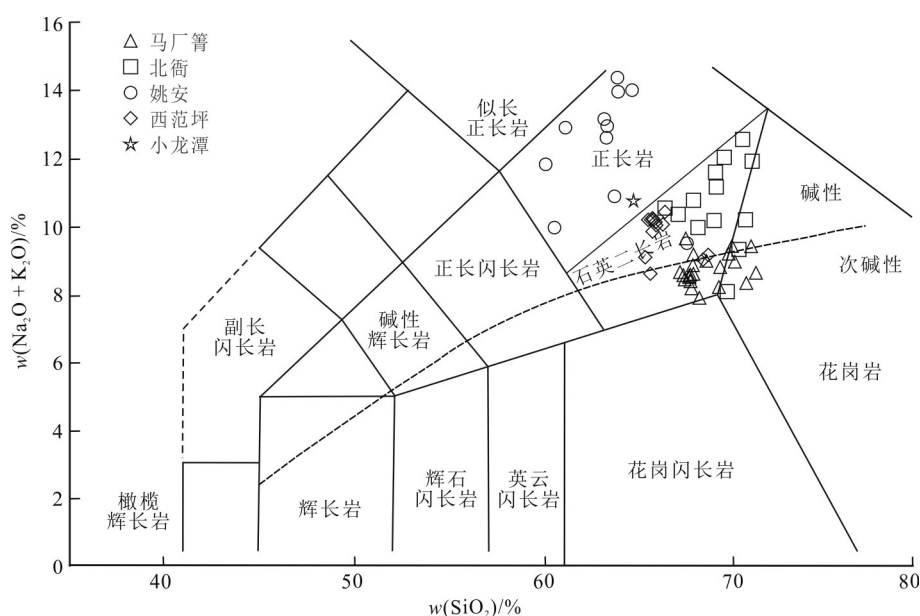


图1 滇西地区典型金多金属矿床与成矿有关侵入岩硅-碱图解(底图据 Middlemost, 1994)

数据来源: Lu et al., 2013; 郭晓东等, 2014; Liu et al., 2015; 张翔, 2015; 孙春迪, 2017; 黄景厚等, 2019; 张谦, 2017

Fig. 1 The total alkalis versus silica (TAS) diagram of intrusion rocks related to mineralization of typical gold polymetallic deposits in western Yunnan (modified from Middlemost, 1994)

Data are from Lu et al., 2013; Guo et al., 2014; Liu et al., 2015; Zhang, 2015; Sun, 2017; Huang et al., 2019; Zhang, 2017

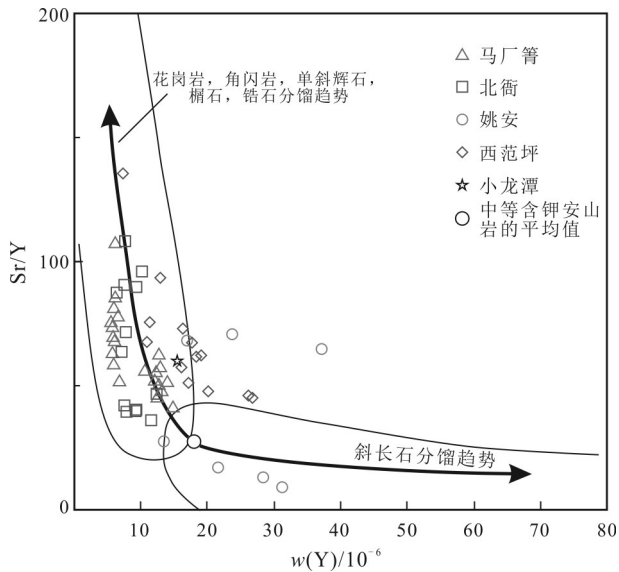


图2 滇西地区典型矿床与成矿有关侵入岩Y-Sr/Y图解(底图据Richards et al., 2007)

数据来源: Lu et al., 2013; 郭晓东等, 2014; Liu et al., 2014; 张翔, 2015; 孙春迪, 2017; 黄景厚等, 2019; 张谦, 2017

Fig. 2 The Y-Sr/Y diagram of intrusion rocks related to mineralization of typical gold polymetallic deposits in western Yunnan (base map after Richards et al., 2007)

Data are from Lu et al., 2013; Guo et al., 2014; Liu et al., 2014; Zhang, 2015; Sun, 2017; Huang et al., 2019; Zhang, 2017

元素,无或者弱的Eu异常等特征,许多学者将其划归至“埃达克岩”或者具有“埃达克质”特征一类(毕献武等, 2005; 2006; 薛传东等, 2008; Lu et al., 2013; 吴伟中等, 2013),但其高钾、低MgO、Cr、Ni特征与埃达克岩又有所差异。这类岩体侵位年龄多集中于31.8~40.4 Ma (Wang et al., 2001; 2003; Spurlin et al., 2005; Liang et al., 2005; 郭利果等, 2006; Jiang et al., 2006; 梁华英等, 2008; 2009; 杨志明等, 2008; 宋忠宝等, 2011; Lu et al., 2012; Huang et al., 2010; Lu et al., 2013; 和文言等, 2013; 2014; Liu et al., 2015)。

关于富碱斑岩的物质来源,一直以来存在较大争议,当前主要有以下几种观点:①富钾的上地壳变质岩(Lu et al., 2012; 2013);②富集地幔或壳/幔过渡带(Chung et al., 1998; Hou et al., 2003; Jiang et al., 2006; 侯增谦等, 2009; 侯增谦, 2010; 邓军等, 2010);③加厚玄武质下地壳或上地幔(薛传东等, 2008);④富集地幔(Hu et al., 2004; 李勇, 2009; 黄行凯, 2009; 肖晓牛等, 2009);⑤被交代的岩石圈地幔(和文言等, 2014; Mao et al., 2017; Hou et al., 2017)。

虽然关于岩浆起源存在争议,但不同斑岩体之间具有相似的地质背景、岩石矿物学特征及地球化学属性,显示出相似的深部来源特征,它们既可以是深部含矿质流体上升的载体,又为成矿作用提供了动力和空间(邓军等, 2010)。

1.3 控矿构造特征

金沙江-哀牢山构造带内深大断裂呈南北向至北西向展布,是控制富碱质岩浆侵位的主导因素,通常在深大断裂两侧的次级近SN向、NW向断裂内发育深源富碱斑岩,深大断裂带是深源熔体和流体上升的通道(侯增谦, 2006; 邓军等, 2010; 和文言等, 2014; Mao et al., 2017; Meng et al., 2018)。

构造对金矿的控制是通过富碱斑岩的控制实现的,区域构造-岩浆组合控制金成矿的特征明显(Deng et al., 2014a; 2014b; Hou et al., 2017; Mao et al., 2017; 和文言等, 2014; 周云满等, 2014; 2021; 王建华, 2017)。断层、褶皱、接触带、层间破碎带等均是控制矿床产出的构造因素。多组断裂、褶皱构造的交汇往往控制大型矿床或岩体的产出,如北衙金多金属矿床受控于马鞍山断裂及其伴生的F₆断裂和北衙向斜;1组或多组不同方向的断裂通常控制着1组或多组矿脉的产出,如长安金矿受董棕河断裂的控制;马厂箐金矿近东西向断裂控制岩体就位,北东向、南北向断裂是控制矿体或者矿脉的构造。褶皱构造的某些部位适合于含矿热液的流动和矿体的定位,成为控制矿体产出的又一构造类型,尤其是当褶皱与其伴生的纵向断裂、裂隙等贯通时,其对矿体的控制作用更为明显,如北衙、马厂箐金矿分别受到北衙向斜和乱洞山-宝兴厂向斜的控制。侵入接触构造是控制多种类型矿体发育的关键,控制矽卡岩、构造破碎带和隐爆角砾岩型矿体的分布,如姚安金矿白马直构造矿段、北衙金矿万洞山矽卡岩矿体、红泥塘矿段隐爆角砾岩型矿体均受接触构造控制。此外,围岩性质对矿体类型有一定的控制作用,当围岩岩性以碳酸盐岩为主体时,岩体内含金属热液容易扩散,与围岩发生充分的交代作用,形成以块状矿石为主的矽卡岩型矿体和脉状、似层状矿石为主体的热液脉状矿体(如北衙金矿);当围岩岩性以碎屑岩为主体时,形成以细脉浸染状矿石为主体的斑岩型矿体(如马厂箐铜铅矿)。

1.4 矿化分带

矿化(体)大多产出于富碱岩体内部、岩体与围岩的内外接触带以及与岩体具有一定距离的围岩中

(葛良胜等,2004)。在同一个矿区内,多种类型矿化可以呈脉状、似层状、透镜状、囊状、浸染状等各种形态共存,构成多位一体的矿化系统。通常矿化围绕着成矿岩体自内而外表现为热液型Cu-Au矿体→矽卡岩型Au-Cu-磁铁矿体+矽卡岩型Au-褐铁矿体→热液型Au-Fe-Pb矿体+热液型Pb-Ag矿体的分带规律,即在岩体内部,形成裂隙脉状和细脉浸染状矿化体,呈面状或者脉状产出,有用组分为自然金、黄铜矿、辉钼矿等,浸染状金矿化品位低,脉状金矿化品位较高;在接触带部位形成矽卡岩型和隐爆角砾岩型矿化体,呈囊状、透镜状产出,有用组分为自然金、磁铁矿、褐铁矿、镜铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等,金矿化品位中等;在围岩中,既可以形成构造破碎带蚀变岩型、层间破碎带型矿化体,又可以产出构造角砾岩型、石英硫化物脉型矿化体,有用组分为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、菱铁矿等,呈透镜状、似层状、脉状产出,金矿化品位变化较大。

这几类矿体类型在一些矿区可以同时出现2种及以上,如在北衙金矿区,裂隙脉型金矿化、矽卡岩型金矿化、层间破碎带型、热液脉型铅锌银矿化共同发育;在马厂箐矿区,斑岩-矽卡岩型铜钼矿化和石英脉型金、铅锌矿化发育;在姚安矿区,裂隙脉型金矿化和热液脉型铅锌银矿化发育。

1.5 蚀变分带

对应于矿化分带,在岩体内部、接触带和围岩中,也存在蚀变分带现象。在岩体内部,蚀变主要有钾化、硅化、绢云母化、黄铁矿化、矽卡岩化等,分带特征并不十分明显。通常在岩体核部,钾化和黏土化普遍发育,硅化、黄铁矿化、黄铜矿化、绢云母化和绿帘石化局部发育。以北衙金矿床为例,岩体内部钾化普遍发育,中心以钾化、黏土化为主,钾长石、绢云母和伊利石、蒙脱石、高岭石、蒙皂石等黏土矿物呈面状均匀分布于岩体内部,构成钾化-黏土化蚀变带(图3,K-Clay);向外在岩体中间部位,绢云母化、硅化发育,可见石英呈脉状穿插于石英正长斑岩内,硅镁石、绿泥石等呈浸染状分布,长石颗粒边缘绢云母化明显,构成钾长石石英绢云母化蚀变带(图3,K-Si-Ser);在岩体外带,石榴子石、绿泥石、透辉石、电气石、蛭石等矿物增加,围绕岩体呈弧状分布,构成了岩体外部硅化-内矽卡岩蚀变带(图3,Si+Py+Cp)。在接触带中,当围岩为碳酸盐时,由内向外,表现为石榴子石矽卡岩→磁铁矿石石榴子石矽卡岩→透辉石石榴子石矽卡岩→绿泥石、绿帘石磁铁矿→金云母

(±硅灰石)、透辉石的变化特征,带内磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿等金属氧化物发育处为矿化部位,构成外矽卡岩化蚀变带(图3,Sk+Mt+Lim);当围岩为碎屑岩时,蚀变分带表现为石英黄铁矿(±黄铜矿)化角岩→黑云母(±石英)化角岩→磁铁矿(±黑云母)化角岩。在围岩中,围岩内分布范围较宽的蚀变晕,主要是大理岩化、方解石化、白云岩化等,同时碳酸盐岩的硅化特征也较明显(图3)。蚀变矿物主要为大理岩、方解石、菱铁矿、菱镁矿和脉状石英,以及与成矿有关的含黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、磁铁矿、赤铁矿、闪锌矿的石英硫化物脉。

虽然不同矿区的蚀变分带存在差异,但总体上由岩体向围岩,蚀变分带表现为岩体内部的钾化带,接触带的矽卡岩化带和围岩中的碳酸盐化的分带规律。

1.6 元素分带

滇西地区金矿床的分带现象不仅表现在矿化类型和蚀变方面,对应于矿化和围岩蚀变,元素的分带性也相当明显。

以北衙金矿区为例,万洞山矿段开展的元素分带特征测量结果显示,围绕成矿岩体,由岩体到接触带,再到蚀变围岩,具有K-Si-Al-S→Si-Al-Fe-Au-Cu-Cl→Pb-Zn-Ca-Mg的元素分带特征(图4)。

根据岩石、矿物特征,对应于岩体内部的钾钠硅酸盐岩和钾化、黏土化蚀变,表现出K-Si-Al-S等的元素富集现象,黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿矿物的发育,具有富集S元素特征;对应于接触带,石榴子石、绿帘石、绿泥石、透辉石金云母等矽卡岩矿物的发育和磁铁矿、褐铁矿、镜铁矿、自然金、黄铜矿等矿石矿物的存在,体现为Si-Al-Fe-Au-Cu等元素富集特征,Cl元素的富集出现在接触带内,反映了接触带是气液最为丰富和活跃的部位;在围岩蚀变带,围岩大理岩、白云岩、灰岩的发育,表现为Ca-Mg的富集现象,铅锌银矿体的发育,体现为Pb-Zn-Ag等元素的富集特征,但由于铅锌银矿脉发育普遍较差,体现出Pb-Zn元素富集不明显特征(图4)。

1.7 成矿流体特征

通常斑岩中具溶蚀港湾状的石英斑晶中的流体包裹体代表了早期从岩浆出溶的流体,岩体内石英脉中的流体包裹体代表了岩浆-热液过渡阶段的流体;石榴子石、石英-磁铁矿组合中的石英、石英-硫化物组合中的石英以及灰岩中方解石为不同热液阶段的产物,其内的流体包裹体分别代表了早矽卡岩阶

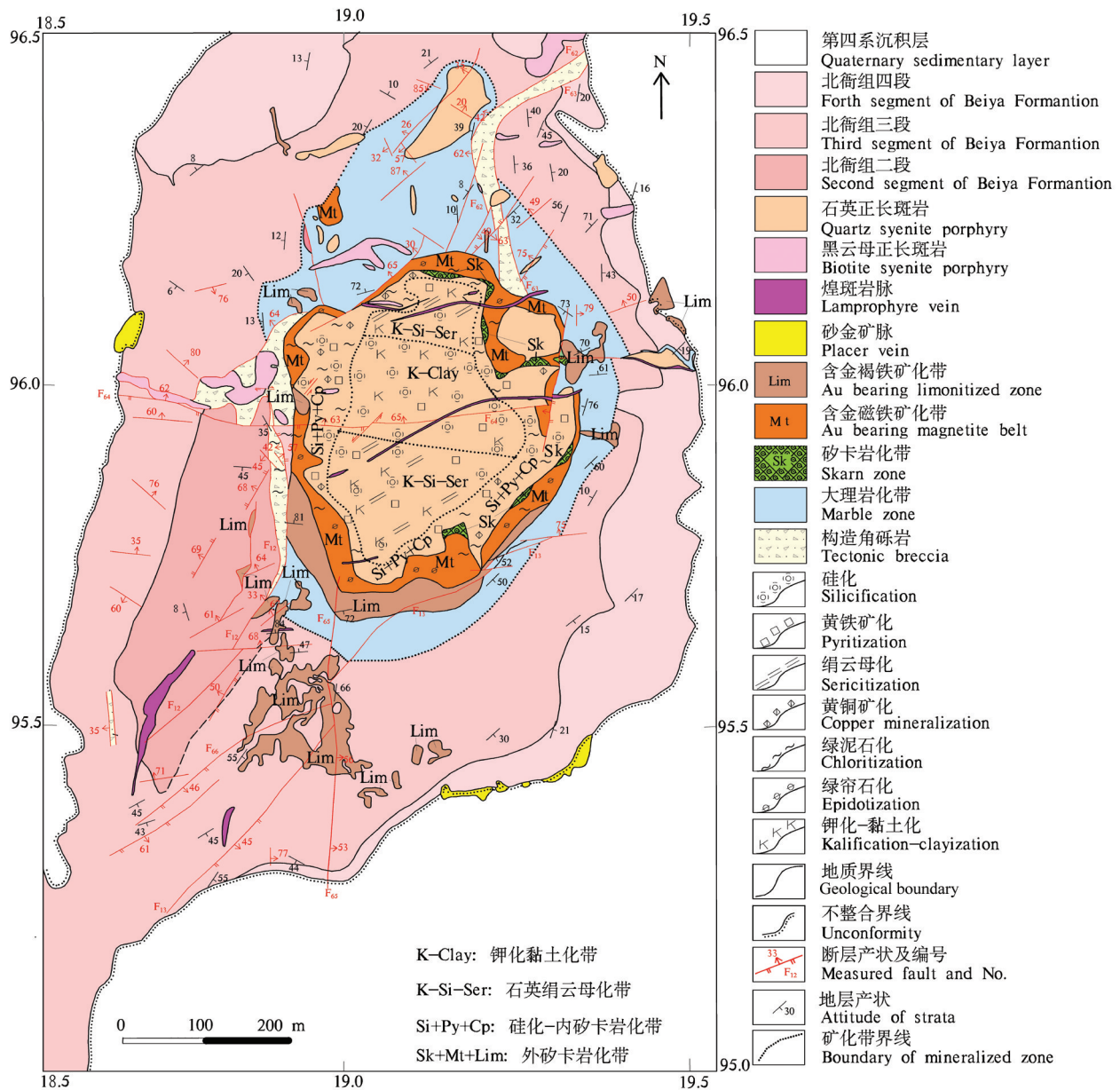


图3 滇西地区北衙金矿床蚀变分带模式图(外框坐标为公里网)

Fig. 3 Alteration zoning model of Beiya gold deposit in western Yunnan (the coordinate of outline border is kilometer network)

段、磁铁矿阶段、石英硫化物阶段以及碳酸盐阶段的流体。可见,石英和方解石为研究滇西地区金多金属矿床成矿流体的对象。

滇西地区与富碱斑岩有关的热液型金多金属矿床石英、方解石中流体包裹体类型比较丰富,包括富液、富气、纯液相、含 CO_2 三相、含子晶多相等多类型包裹体(杨嘉文等,1991;何明友等,1996;毕献武等,1999;钱祥贵等,2000;王勇等,2003;何明勤等,

2004;吴开兴等,2005;葛良胜等,2005)。石英、方解石中流体包裹体均有发育,单个包裹体普遍较小,常小于 $10\text{ }\mu\text{m}$,偶见几十 μm 甚至上百 μm 包裹体,以圆形、椭圆形为主。含子晶多相包裹体常见于石英斑晶样品中,含 CO_2 包裹体见于岩体与围岩接触带石英脉样品中,富液相包裹体则多发育在成矿晚期或近地表的石英、方解石样品中(毕献武等,2000;钱祥贵等,2000;何明勤等,2004;葛良胜等,2005;吴开兴

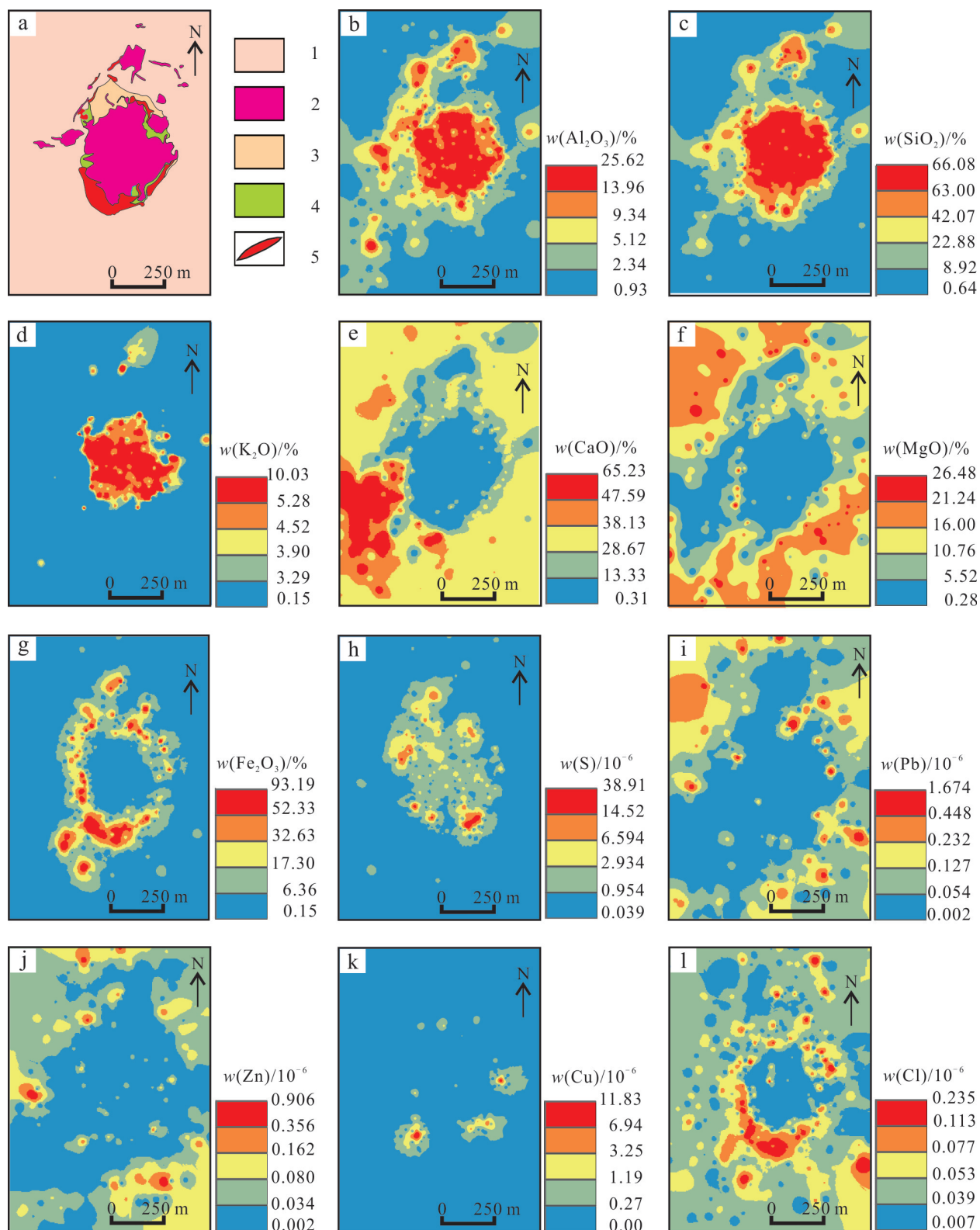


图4 滇西地区北衙万洞山矿段地质图(a)及各元素等值线分布特征图(b~l)

1—三叠系中统北衙组;2—石英正长斑岩;3—大理岩;4—矽卡岩;5—矿体

Fig.4 Geology map (a) and contour curves of elements (b~l) in Wandongshan mining area of Beiya in western Yunnan

1—Beiya Formation of Middle Triassic; 2—Quartz syenite porphyry; 3—Marble; 4—Skarn; 5—Ore body

等,2005)。流体包裹体均一温度变化范围较宽,介于102~550℃之间,主成矿阶段温度集中在230~460℃范围内,例如,北衙金矿的成矿温度主要为220~520℃(王蝶等,2017; Wang et al., 2018);姚安金矿床成矿温度范围为196~260℃(钱祥贵等,2000);马厂箐金矿主成矿阶段温度范围在215~391℃之间(王治华等,2012);长安冲-铜厂铜钼矿主成矿阶段温度范围在280~460℃之间(王蝶等,2017),斑岩中石英斑晶次生包裹体的均一温度范围在297~550℃之间(葛良胜等,2005;吴开兴等,2005;王治华等,2012; Wang et al., 2018)。盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化范围也较大,在0.1%~61.1%之间,主成矿阶段盐度集中在2.0%~46.0%之内,例如,北衙金矿主成矿阶段盐度集中在2.0%~24.0%和32.0%~44.0%两个区间(王蝶等,2017; Wang et al., 2018),姚安金矿床主成矿阶段盐度集中在8.54%~11.95%(钱祥贵等,2002),马厂箐金矿主成矿阶段盐度集中在7.7%~15.2%(王治华等,2012),长安冲-铜厂铜钼矿主成矿阶段盐度集中在2%~22%和30.0%~46.0%两个区间(王蝶等,2017);斑岩石英斑晶次生三相流体包裹体盐度范围在43.4%~49.7%和15.4%~19.2%之间(葛良胜等,2005;吴开兴等,2005;王治华等,2012)。由此可见,金多金属矿床成矿温度变化较大,但主体以中温、中压环境为主,流体盐度变化也较大,主体以中、低盐度为主,从成矿早期到成矿晚期,或从伴随着富碱质岩浆流体从早到晚的演化,成矿温度和盐度具有明显降低的趋势(邓军等,2010;王建华等,2015;周云满等,2017;王蝶等,2017;王璇等,2018)。

流体包裹体的组分结果表明,成矿流体气相成分以 H_2O 、 CO_2 为主,另外含有 N_2 、 H_2 、 O_2 、 CH_4 、 CO 等;液相成分阳离子以 Na^+ 、 K^+ 为主,阴离子以 Cl^- 为主,此外含有 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等(表1),其中 (Na^++K^+) 含量占全部阳离子总量的59.18%~100%,平均占比89.33%;斑岩石英斑晶中流体包裹体 (Na^++K^+) 含量占全部阳离子总量的86.4%~91.7%,平均占比为89.05%,表明斑岩中石英流体包裹体和矿石中石英流体包裹体 K^+ 、 Na^+ 含量较高,且两者比例相近,均具有富碱质流体特征。阴离子以 Cl^- 和或 SO_4^{2-} 为主, $w(\text{Cl}^-)$ 在 1.86×10^{-6} ~ 46.0×10^{-6} 之间,平均值为 15.5×10^{-6} ,占全部阴离子总量的2.2%~99.0%,平均占比51.79%, $w(\text{SO}_4^{2-})$ 在 $0\sim 103\times 10^{-6}$ 之间,平均值为 17.1×10^{-6} ,占全部阴离子总量的0~79.56%,平均占比27.45%;斑岩石英斑

晶中流体包裹体 $w(\text{Cl}^-)$ 在 5.05×10^{-6} ~ 5.79×10^{-6} 之间,平均值为 5.42×10^{-6} ,占全部阴离子总量的17.91%~17.97%,平均占比为17.94%;表明与斑岩中石英流体包裹体相比,矿石中石英流体包裹体 Cl^- 含量变化较大,具有富集硫酸根和卤族元素离子的流体特征(毕献武等,1999;何明勤等,2004;葛良胜等,2005;吴开兴,2005)。此外,Liu等(2018)对北衙金矿石英流体包裹体的微量元素进行了分析,测定其中 $w(\text{Na})$ 、 $w(\text{K})$ 、 $w(\text{Fe})$ 、 $w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Mn})$ 、 $w(\text{Pb})$ 、 $w(\text{Zn})$ 较高,分别为0.67%~1.06%、0.28%~4.47%、 $<0.13\%$ ~2.07%、0.012%~1.01%; $<0.04\%$ ~0.50%、0.005%~0.328%、0.008%~0.218%; $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Cs})$ 、 $w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{Mo})$ 、 $w(\text{Ag})$ 、 $w(\text{Bi})$ 较低,分别为 $<87\times 10^{-6}$ ~ 587×10^{-6} 、 3×10^{-6} ~ 393×10^{-6} 、 6×10^{-6} ~ 691×10^{-6} 、 $<1\times 10^{-6}$ ~ 328×10^{-6} 、 $<2\times 10^{-6}$ ~ 275×10^{-6} 、 $<1\times 10^{-6}$ ~ 22×10^{-6} 、 $<1\times 10^{-6}$ ~ 38×10^{-6} ; $w(\text{Au})$ 仅在少量包裹体中出现,且含量较低,介于 0.2×10^{-6} ~ 5.9×10^{-6} 之间;其中 $w(\text{Na}+\text{K})$ 在0.94%~15.10%之间,占微量元素总量的77.58%~82.07%,其占比超过Grasberg铜金矿床的63.7%(Ulrich et al., 1999)。流体包裹体中微量元素分析结果显示,以北衙为代表的金多金属矿床成矿流体中富含K、Na等碱质组分,属于碱质热液流体。

2 讨论

2.1 “碱质热液型”金多金属矿床概念

碱质岩是化学成分中碱质含量或碱度较高(如 $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})>8\%$;里特曼指数 $\sigma>3\sim 9$)的一类火成岩。研究显示,碱质岩与金矿床存在成因联系,它们不仅直接形成许多斑岩铜金矿床(如蒙古Oyu Tolgoi、印度尼西亚Grasberg、美国Bingham、俄罗斯Peschanka、中国云南北衙和姚安),而且与低温热液型金矿床存在直接成因联系(如美国Cripple Creek、巴布亚新几内亚Ladlam and Porgera、菲律宾Baguio、斐济Emperor),甚至可能与IOCG矿床、卡林型金矿床有一定的联系(Jensen et al., 2000; Muller et al., 2016)。因此,碱质岩与金多金属矿床之间的关系受到矿床学家的普遍关注(Muller et al., 1997; 2000; 2016; 2019; Richards, 1995; 2009; Sillitoe, 2002; Chang et al., 2011; Cooke et al., 2014)。

近年来,在滇西地区及周边发现的一系列与碱性岩(包括辉石正长岩、正长斑岩、石英正长斑岩)有

表 1 滇西地区金多金属矿床流体包裹体离子组分($w(B)/10^{-6}$)分析统计表Table 1 Statistical table of ion content of fluid inclusions ($w(B)/10^{-6}$) in different gold deposits and porphyry in western Yunnan

矿区	样品类型	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	(K ⁺ +Na ⁺)/ Σ 阳离子	Cl ⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻ / Σ 阴离子	资料来源
北衙	石英斑晶	10.5	10.3	1.6	0.3		91.70	5.1	5.3	17.8			17.97	吴开兴,2005
北衙	石英斑晶	11.3	12.0	2.6	1.0		86.40	5.8	5.7	20.8			17.91	吴开兴,2005
北衙	热液石英	15.1	8.3	3.7	2.1		80.20	2.5	7.1	102.5			2.20	吴开兴,2005
北衙	脉石英	1.8	5.6	0.5	0.1		93.50	5.8	2.3	12.1			28.71	徐受民,2007
马厂箐	石英	0.6	1.1	0.7	0.0		69.91	2.2	0.0	0.7			75.86	孙诺,2015
马厂箐	石英	9.1	7.3	6.5	1.0		68.74	4.7	0.0	85.9			5.22	孙诺,2015
马厂箐	石英	4.6	7.4	0.4	0.0		96.66	11.3	0.2	6.1			64.40	孙诺,2015
马厂箐	石英	11.0	42.8	7.7	0.2		87.23	10.7	0.0	14.4			42.63	孙诺,2015
金厂箐	热液石英	6.2	1.0	-	-		100.00	1.9	1.3	3.2			28.93	何明勤等,2004
金厂箐	白云石	1.3	7.1	-	-		100.00	9.9	0.1	-			99.00	何明勤等,2004
金子沟	热液石英	2.6	6.1	1.0	0.1		88.10	11.0	0.4	0.0			96.92	葛良胜等,2005
金子沟	热液石英	3.0	9.6	0.8	0.1		93.30	21.0	0.4	0.0			98.36	葛良胜等,2005
陆家村	热液石英	5.9	12.6	-	0.1		99.50	3.8	0.3	5.7			38.85	葛良胜等,2005
陆家村	热液石英	5.9	15.8	-	0.0		99.80	20.1	0.2	5.6			77.64	葛良胜等,2005
大坪	石英	3.3	24.2	2.2	0.2		92.16	16.8	0.1	51.6	0.1		24.45	张燕,2009
大坪	石英	1.6	12.9	2.3	0.1		85.86	11.3	0.1	17.3	0.1		39.20	张燕,2009
大坪	石英	5.2	21.8	1.8	<0.02		93.58	24.4	<0.02	14.4	0.2		62.59	张燕,2009
大坪	石英	5.1	18.3	0.4	0		98.19	39.1	0.0	1.3	0.4		95.60	葛良胜等,2007
大坪	石英	3.1	19.8	0.7	0		97.00	43.5	0.0	15.2	0.4		73.48	葛良胜等,2007
大坪	石英	3.12	20.1	2.8	0		89.26	32.1	0.0	6.8	0.4		81.72	葛良胜等,2007
大坪	石英	5.6	29.5	2.0	0.3		93.76	42.5	0.0	18.6	0.2		69.35	葛良胜等,2007
大坪	石英	4.1	13.6	0.5	0		97.42	28.0	0.0	10.2	0.8		71.79	葛良胜等,2007
大坪	石英	2.8	7.8	1.1	0		90.79	5.4	0.0	21.8	0.2		19.66	葛良胜等,2007
大坪	石英	0.9	4.1	0.9	0.3		80.33	8.4	0.0	2.0	0.1		79.53	葛良胜等,2007
西范坪	石英	22.4	59.6	7.7	0.7	0.04	90.74	24.5	0.5	0.0		14.5	62.03	肖渊甫等,2000
西范坪	石英	36.0	85.8	14.9	1.1	0.05	88.32	43.0	0.8	5.0		71.5	35.76	肖渊甫等,2000
西范坪	石英	44.7	32.4	21.2	32.0	0.82	58.81	46.0	1.5	35.0		143.0	20.40	肖渊甫等,2000
西范坪	石英	45.7	134.4	13.4	1.1	0.03	92.56	42.5	0.6	5.0		71.5	35.54	肖渊甫等,2000
西范坪	石英	43.6	72.1	10.4	2.3	0.10	89.99	15.5	0.4	10.0		143.0	9.18	肖渊甫等,2000
西范坪	石英	55.6	29.1	10.1	4.8	0.12	84.95	19.0	0.1	10.0		143.0	11.04	肖渊甫等,2000

注:“-”代表未检测出。

关的金多金属矿床,被归属于斑岩型矿床(钟昆明等, 2000; 吴开兴等, 2005; 陆世才等, 2014; 王建华等, 2015; 刘飞等, 2017; 王蝶等, 2017)或者富碱斑岩型矿床(刘显凡等, 2004; 王正海, 2004; 邓军等, 2010; 邓碧平等, 2014)。近期研究发现,这些矿床的成矿岩体、控矿构造特征、成矿流体、矿化分带特征等方面与传统的斑岩型矿床又存在明显差异,尤其是在矿化、蚀变分带特征等方面,除发育少量的斑岩型矿化外,矽卡岩型、热液脉型、构造破碎带型矿化往往构成矿床的主体(和中华等, 2013; 2016; 周云

满等, 2014; 2021; Mao et al., 2017)。因此,现有的斑岩型矿床矿化蚀变模式难以有效指导区内金多金属矿床的找矿勘查工作。

如上文所述,滇西地区金多金属矿床在成矿构造背景、成矿岩体性质、成矿流体属性、矿化分带模式等方面与斑岩型矿床存在不同。

(1) 成矿构造背景差异:众所周知,传统的斑岩矿床主要产于汇聚板块的边界,包括大洋板片俯冲产生的岛弧和陆缘弧环境,也可以形成于陆-陆碰撞造山(特提斯-喜马拉雅带,中亚-蒙古带)环境。滇西

地区的金矿床形成于板块汇聚晚碰撞伸展环境,对应于区域挤压构造应力场的相对松弛阶段,剪切走滑断裂构造系统最为发育的时期(杨立强等,2010)。

(2) 成矿岩体性质不同:斑岩型矿床的形成与具斑状结构的中酸性浅成-超浅成侵入体有关,岩石类型既可以是钙碱性系列也可以是碱性系列,岩石以富K为特征,通常 $w(K_2O+Na_2O)<8$ 和 $w(K_2O)>w(Na_2O)$;而滇西地区金矿床的形成与碱性系列斑状、似斑状结构的中酸性岩有关,岩石以高 $w(K_2O+Na_2O)\geq 8$ 为特征,且具有高Sr、低Y的类埃达克岩特征。

(3) 成矿作用过程差异:斑岩型矿床矿质沉淀是岩浆期后热液活动的产物,温度、压力的降低,以及pH值的变化是矿质发生沉淀、成矿的主因;滇西地区金多金属矿床矿化是通过岩浆热液与围岩之间发生气水热液交代作用而实现的。

(4) 蚀变和矿化分带存在区别:斑岩型矿床典型的蚀变分带模式为钾化带、石英-绢云母化带、泥化带和青磐岩化带,对应的矿化分带模式为浸染状低品位钾化核、浸染+微细脉状Cu-Mo-Au主矿带、浸染+细脉状黄铁矿带、细脉状贫黄铁矿带,多数矿体产在斑岩体内部,少量产在围岩中;滇西地区金矿床蚀变分带主要为钾化带、石英-绢云母化带、矽卡岩化带、碳酸盐化(大理岩化)带,对应的矿化分带模式为无矿钾化核、裂隙脉状或浸染状-细脉状金黄铜矿矿化带、似层状金磁铁矿褐铁矿化带、细脉状金银铅石英硫化物矿化带,多数矿体产于斑岩体以外,有时也可以产于岩体内。滇西地区金多金属矿床的找矿目标主体为矽卡岩型和石英-硫化物脉型金多金属矿体,其次为层间破碎带型和裂隙脉型矿体。而斑岩型矿床的找矿目标主体为斑岩体,其次为斑岩体上部或顶部的接触带。

(5) 热液流体性质差异:斑岩型矿床成矿流体演化分2个阶段,早期为岩浆流体,盐度 $w(NaCl_{eq})=30\%\sim 60\%$ 、温度为 $400\sim 600^\circ\text{C}$,均较高,晚期为与天水混合流体,盐度 $w(NaCl_{eq})<15\%$ 、温度下降为 $200\sim 400^\circ\text{C}$ (Kerrick et al., 2000),含矿石英流体包裹体中阳离子以 K^+ 为主,其次为 Na^+ , $w(K^++Na^+)$ 占阳离子总量在 $56.1\%\sim 81.8\%$ 之间, $w(K^+/Na^+)$ 平均值在 $1.1\sim 2.4$ 之间;滇西地区金多金属矿床成矿流体以中温($230\sim 460^\circ\text{C}$)为主,盐度分为2个区间,高盐度 $w(NaCl_{eq})=30.0\%\sim 46.0\%$,中、低盐度 $w(NaCl_{eq})=2.0\%\sim 24.0\%$ 。含矿石英包裹体中阳离子以 Na^+ 和 K^+ 为主, $w(K^++Na^+)$ 占阳离子总量在 $86.4\%\sim 91.7\%$ 之间,平均占比

为 89.05% ,个别石英流体包裹体中还含有一定量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子,可能与脉体靠近碳酸盐或/和辉绿岩脉,成矿热液流经围岩发生物质交换有关(葛良胜等,2005), K^+/Na^+ 平均值在 $0.21\sim 1.00$ 之间。北衙金矿床流体包裹体微量元素分析结果显示,流体中 $w(Na+K)$ 最高可达 15.10% ,占元素总量比例为 $77.58\%\sim 82.07\%$,表明成矿流体中富含K、Na等碱质组分,属于碱质流体。

文章列举了滇西地区与富碱斑岩有关的金矿床与典型斑岩型矿床的特征,两者之间的特征对比详见表2。不难看出,滇西地区金多金属矿床成矿的主要特征有伸展环境的成矿背景,富碱性的成矿岩体,特有的矿化蚀变分带,碱质富集的成矿流体以及水岩交代的成矿过程,这些与传统的斑岩型矿床之间存在一定差异。因此,为了进一步突出其成矿作用过程的独特性,尤其是为了表述矿化蚀变分带性特征,有效指导区域找矿勘查,本文提出“碱质热液型”金矿床的概念,即将在时间、空间及物质成分上与富碱斑岩岩浆热液活动有关的一类金矿床定义为“碱质热液型”金矿床,成矿热液流体通常具有富K、Na等碱质组分特征。“碱质热液型”矿床的显著特征为富碱斑岩侵位是成矿的驱动力,矽卡岩型、裂隙脉型、热液脉型、构造破碎带型多种矿化类型共存,碱质热液流体活动是多类型矿体就位的主导因素。

2.2 富碱斑岩与成矿的关系

(1) 岩体与金矿化的关系

矿床在时空关系上,富碱斑岩与滇西地区碱质热液型金多金属矿化关系密切。空间上,金多金属矿体与岩体形影相随,不同矿化类型的矿体围绕岩体呈环带分布,矿体既产于外接触带围岩之中,也产于斑岩体内,一般分布在距岩体 $1\sim 5\text{ km}$ 的范围内。岩体产状变化控制着金矿化的强度,岩体缓倾斜于地层的侵入接触方式,热量和矿液不容易散失,有利于接触交代作用发生,接触带产状由陡变缓部位或岩体接触形成的凹陷带有利于成矿,如在万洞山矿段接触带缓倾部位发育厚大金铁多金属矿体,而岩体接触带产状较陡立处,矿体一般变薄(周云满等,2021)。时间上,主要成矿斑岩的成岩年龄($31.8\sim 40.4$)Ma,与成矿年龄为($32.1\sim 37.9$)Ma基本一致(王登红等,2004;吴冉,2011;胥磊落,2010;和文言等,2011;祝向平,2010;张翔,2015;高学泉,2017;周洁,2017;罗晨皓等,2019;严清高,2019)。

表 2 碱质热液型金多金属矿床与经典斑岩型矿床的特征对比表

Table 2 Comparison of characteristics between alkali hydrothermal gold polymetallic deposit with classical porphyry deposit

对比项目	斑岩型矿床	碱质热液型矿床
构造背景	汇聚板块的边界,包括大洋板片俯冲产生的岛弧和陆缘弧环境,也可以形成于陆-陆碰撞造山	板块汇聚晚碰撞伸展环境,对应构造应力场的相对松弛阶段,剪切走滑断裂构造系统最为发育的时期
成矿岩体性质	斑状结构的中酸性岩,钙碱性系列或碱性系列,富 K,通常 $w(K_2O+Na_2O)<8\%$, $w(K_2O)>w(Na_2O)$	富碱斑岩,斑状-似斑状结构中酸性岩,碱性系列,通常 $w(K_2O+Na_2O)>8\%$,高 Sr/Y 值
主要矿种	Cu-Mo 和 Cu-Au 矿床	Au-Ag-Pb、Au-Fe 和 Au-Cu 矿床
矿化类型	斑岩型矿化为主,角岩型、矽卡岩型矿化为辅	矽卡岩型和热液脉型矿化为主,斑岩型、裂隙脉型矿化为辅
蚀变分带	钾化带、石英-绢云母化带、泥化带和青磐岩化带,岩体内部脉体发育	钾化带、石英-绢云母化带、矽卡岩化带、碳酸盐化(大理岩化)带,岩体内部脉体发育不强
矿化分带	浸染状低品位钾化核、浸染+微细脉状 Cu-Mo-Au 主矿带、浸染+细脉状黄铁矿带、细脉状贫黄铁矿带,多数矿体产在斑岩体内部,少量产在围岩中	无矿钾化核、裂隙脉状或浸染状-细脉状金黄铜矿矿化带、似层状金磁铁矿褐铁矿化带、细脉状金银铅石英硫化物矿化带,多数矿体产于斑岩体以外,有时也可以产于岩体内
元素分带	K、Si-Cu-(Au、Mo)-S、Si-Al-Au-S 富集带	K-Si-Al-S、Si-Fe-S-Cl、Fe-Au-Cu-Cl 和 Ca-Mg-Pb-Zn-Ag 富集带
流体性质	早期为岩浆流体,盐度 $w(NaCl_{eq})=30\%\sim 60\%$ 、温度 $(400\sim 600^\circ C)$ 均较高,晚期为与天水混合流体,盐度 $(w(NaCl_{eq})<15\%)$ 、温度下降为 $200\sim 400^\circ C$,含矿石英流体包裹体中阳离子以 K^+ 为主,其次为 Na^+ , $w(K^++Na^+)$ 占阳离子总量 $56.1\%\sim 81.8\%$, K^+/Na^+ 平均值在 $1.1\sim 2.4$ 之间	成矿流体以中温 $(230\sim 460^\circ C)$ 为主,盐度分为高盐度区间, $w(NaCl_{eq})=30.0\%\sim 46.0\%$, 和中、低盐度区间, $w(NaCl_{eq})=2.0\%\sim 24.0\%$, 含矿石英包裹体中阳离子以 Na^+ 和 K^+ 为主, $w(K^++Na^+)$ 占阳离子总量 $86.4\%\sim 91.7\%$, 平均占比为 89.05% , K^+/Na^+ 平均值为 $0.2\sim 1.0$
成矿过程	岩浆期后热液活动的产物,温度、压力的降低,以及 pH 值的变化是矿质发生沉淀、成矿的主因	岩浆热液与围岩之间发生气水热液交代作用是矿质沉淀的主因

注:斑岩矿床特征据 Sillitoe, 1991; Kerrich et al., 2000; 侯增谦等, 2007; 江迎飞, 2009; Sillitoe, 2010; 毛景文等, 2014 整理。

(2) 富碱斑岩提供成矿物质

富碱斑岩微量元素分析结果显示,与成矿有关的富碱岩体中 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo 等元素一般高于中国正长岩和花岗岩平均值数倍至数十倍,平均在 5 倍以上(表 3),说明其具有成矿的物质基础。滇西地

区同位素地球化学特征显示,碱质热液型金矿床硫化物的 $\delta^{34}S$ 值为 $-2.4\%\sim -4.5\%$ (陆世才等, 2014),不同矿区之间的硫同位素组成相似性较高;与成矿有关岩体的 $\delta^{34}S$ 为 $0.32\%\sim 2.73\%$,接近岩浆硫说明富碱斑岩中硫同位素系未发生明显同位素分馏的原生硫(李光斗

表 3 滇西地区典型金多金属矿床成矿岩体成矿元素含量统计表

Table 3 Statistical table of metal element content of metallogenic porphyry in typical gold polymetallic deposit in western Yunnan

矿区名称	相关岩体岩性	$w(B)/10^{-9}$		$w(B)/10^{-6}$				数据来源
		Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	
万洞山	石英正长斑岩	167.20 (20)	1844 (20)	147.91 (13)	116.65 (18)	59.26 (13)	14.30 (13)	杨剑等, 2015; Deng et al., 2015; Liu et al., 2015
红泥塘	石英正长斑岩	7.04 (15)	3513 (15)	63.94 (5)	320.83 (8)	34.76 (5)	5.88 (15)	杨剑等, 2015; Deng et al., 2015; Liu et al., 2015
大沙地	石英二长斑岩	9430 (6)	630 (6)	411.48 (9)	27.76 (2)	97.22 (9)	10.52 (9)	王建华等, 2016; 和文言, 2014
姚安	石英正长斑岩	21.3 (36)	2300 (36)	2647.11 (5)	1584.18 (5)	1955.18 (5)	64.14 (5)	李光斗等, 2010; 孙春迪, 2017
马厂箐	斑状花岗岩+二长斑岩	7.5 (4)	92.5 (4)	65.63 (4)	37.85 (4)	62.20 (4)		李光斗等, 2010
小龙潭	石英正长斑岩		1040 (278)	385.70 (278)	82.72 (278)	116.00 (278)	13.73 (278)	薛步高, 2002
中国正长岩平均值		0.53	57	15	31	76	0.9	鄯明才等, 1996

注:()中数值为样品数。

等,2010;张道红等,2013)。矿石中硫化物的硫同位素组成与岩体硫同位素组成一致,说明与富碱斑岩中的硫化物具有同源性,矿石硫化物中硫同位素组成范围略大于岩体硫,可能是成矿流体中有围岩硫的混入。矿床中硫化物的铅同位素组成比较稳定, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于18.35~18.69之间, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于15.51~15.85之间, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于38.42~39.71之间(吴冉,2011;王建华,2017;刘显凡等,2004),与成矿有关岩体中长石铅同位素组成更为集中, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于18.07~19.73之间, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于15.57~15.73之间, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于38.13~39.25之间(Lu et al., 2013;徐受民, 2007),岩体中长石和矿体硫化物之间铅同位素组成相似,表明碱性岩浆和蚀变流体在铅同位素组成上是一致的,表征富碱斑岩中长石铅和矿石铅演化特征相似,富碱斑岩与成矿存在着密切的物质联系。

(3) 富碱斑岩提供成热液

热液石英流体包裹体成分分析显示,区内金矿床成矿流体性质和斑岩石英斑晶中的流体相似,两者均具有富K、Na的特点。成矿流体温度、盐度较岩体斑晶中流体略低,系流体运移和扩散过程中温度下降和矿质沉淀所致,总体上成矿流体具有岩浆热液特征,与岩浆流体具有相似来源。单个流体包裹体中成矿元素Ag、Cu、Mo、Pb、Zn含量较高,也表明成矿流体与岩浆分异作用有关(王蝶等,2017;Liu et al., 2018)。在一些与成矿有关的富碱斑岩中,斜长石斑晶具正长石环边和绢云母蚀变边、钠长石的环带结构、石英边部的溶蚀结构(王奖臻等,2002;李学仁,2014;郭钰心玥,2015),这些蚀变结构说明富碱性岩浆在成岩过程中分异出独立的流体相,期间钾长石化作用不仅可以使Au等成矿元素活化、运移,而且钾质沉淀可以引起成矿流体pH值降低,导致Au等成矿元素运移能力降低,最终Au沉淀成矿。然而,富碱斑岩中钾长石化现象并不明显,多以蚀变边、环带、溶蚀等结构形式存在,岩石内部缺乏大面积的、强烈的面状、脉状钾化蚀变,表明成矿流体与岩体之间的水岩交换强度并不十分强烈。因此,相比于典型的钙碱性斑岩型Cu-Mo-Au成矿系统(Sillitoe, 2010),这类矿床矿化和蚀变面积要小得多,在岩体内部多形成薄且贫石英的高品位矿脉,这种类型的矿化不容易被发现。

3 碱质热液型矿床矿化蚀变分带模式

碱质热液型金多金属矿床的成矿地质体为富碱

斑岩,矿床的蚀变和矿化分带通常围绕呈环状、带状分布。与成矿有关的富碱斑岩以富碱质组分、富含金和铜等元素为特点,岩浆源区埋藏较深,可能源于受交代岩石圈或残留洋壳板片。深源富碱岩浆在走滑拉分应力作用下,沿深大断裂系统向上侵位,当到达玄武岩层时,两者接触发生热交换,导致玄武岩退色(红化),并沿着裂隙发生流体交代,产生绿帘石化和绿泥石化,相伴形成少量的自然铜、孔雀石。岩浆继续侵位,当到达碎屑岩层时,由于细碎屑岩岩石致密,两者接触主要发生热交换,导致地层角岩化;当侵位至碳酸盐岩时,由于碳酸盐岩的孔隙度、渗透率较大,岩石中矿物活动性较强,易发生交代变质,两者接触主要发生物质交换,导致碳酸盐岩发生矽卡岩化和大理岩化,形成以石榴子石、透辉石、硅灰石等为代表的矽卡岩和大理岩。岩浆侵位至近地表,岩浆温度、压力降低,岩浆中的热液大量溶离聚集至岩浆顶部或者边部,导致隐爆或沸腾作用的发生或者发生流体与围岩的交代反应,当围岩为碎屑岩和玄武岩时,由于两种岩石的渗透性较差,流体与围岩之间的物质交换能力弱,两者之间主要发生热交换,形成角岩化蚀变(图5中A),随后伴随着流体沸腾或隐爆作用的发生,在岩体内部形成以浸染状、细脉状斑岩型铜钼矿化(图5中B),在近接触带内形成热液脉状石英硫化物金(化)体(图5中C);当岩浆侵位于碳酸盐岩时,流体与围岩之间的物质交换能力较强,两者在接触带内形成了以绿泥石、绿帘石、磁铁矿、阳起石等为代表的矽卡岩,伴随着矽卡岩的结晶,尤其是赤铁矿、磁铁矿的结晶,体系氧逸度、pH值变化破坏了含金络合物的稳定性,致使金等矿质沉淀析出,在接触带附近形成了以矽卡岩型金铁矿矿化(图5中D);随着温度和压力的持续降低,热液流体进入到围岩裂隙和层间破碎带中,在天水混入的影响下,围岩中Mg、Fe离子的加入以及流体体系中温度、 pH 、 $f(\text{O}_2)$ 等条件的变化,流体中的 S^{2-} 或 S^{-} 与金属离子发生反应沉淀,在围岩中形成了石英硫化物脉型或者构造破碎带型脉状金铅锌银矿化(图5中E);原生矿体形成之后,受到后期构造运动的影响,区内岩层隆升、剥蚀,原有的金、铁、铅锌等矿体经风化、剥蚀、搬运,形成了红土型金、铁多金属矿体(图5中F)。

根据成矿过程分析,碱质热液型金多金属矿床具有“一源多体”的成矿模式,形成了以富碱斑岩为源,斑岩型、裂隙脉型、矽卡岩型、热液脉型、构造破碎带型多种矿化类型共生的成矿系统,相应划分为4

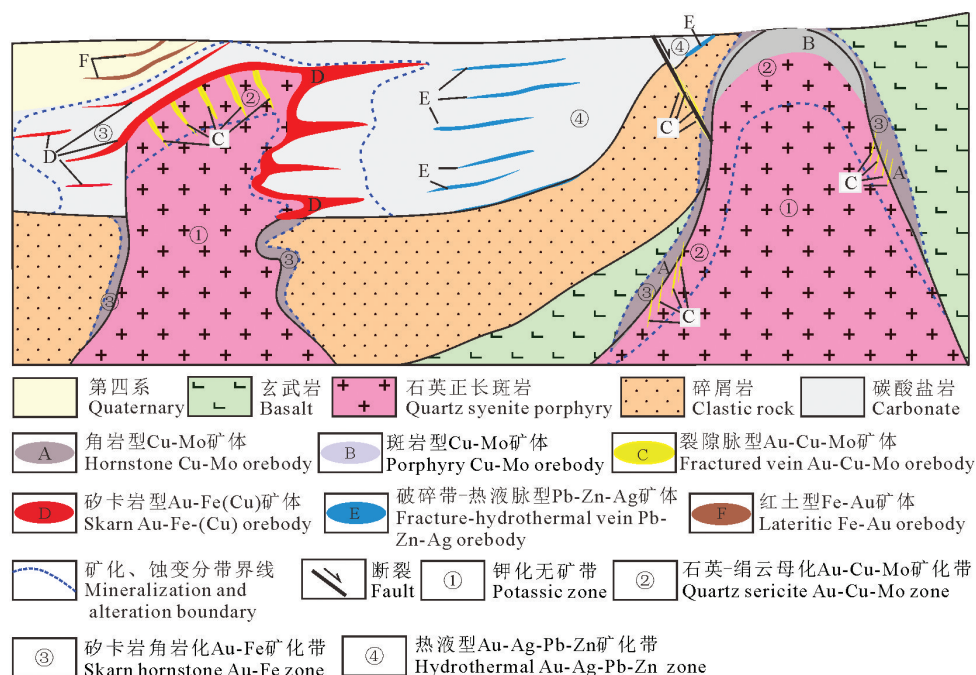


图5 碱质热液型金多金属矿床矿化蚀变分带模式图(据Mao et al., 2017修改)

Fig. 5 Mineralization and alteration zoning model of alkaline hydrothermal gold polymetallic deposits in western Yunnan

个矿化、蚀变、元素分带(图5中①~④),分别是①内带为以钾化黏土化带,无矿或发育贫金铜钼矿化,元素以K-Si-Al-S等富集为主;②向外为石英-绢云母化带,发育裂隙脉状或浸染状-细脉状金黄铜矿矿化,元素以Si-Fe-S-Cl富集为特征;③再向外为矽卡岩化带,发育似层状金-磁铁矿-褐铁矿化,元素以Fe-Au-Cu-Cl富集为特征;④最外带为碳酸盐化(大理岩化)带,发育带状、细脉状金银铅石英硫化物矿化,元素以Ca-Mg-Pb-Zn-Ag等富集为特征。值得一提

的是,不是所有矿区均出现以上蚀变、矿化、元素分带现象,在同一矿区以上几种分带现象可以同时出现2种及以上,具体需要根据岩体发育特征和围岩性质分析判断。

4 找矿方法及其勘查意义

4.1 找矿方法组合

基于“一源多体”的碱质热液型金矿床蚀变-矿

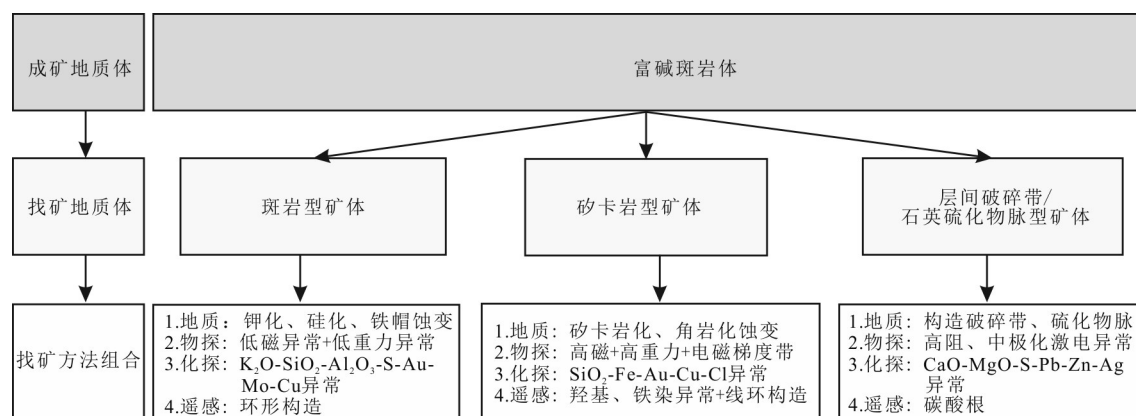


图6 滇西地区碱质热液型金多金属矿床找矿方法组合

Fig. 6 The combination exploration methods for alkaline hydrothermal gold polymetallic deposits in western Yunnan

化-元素分带模式,建立以识别和发现富碱斑岩和矿化蚀变目标的找矿方法,是实现碱质热液型金多金属矿床找矿突破的有效途径。找矿方法包括成矿岩体和各类矿化体的有效识别,地质、物探、化探、遥感方法相结合是实现岩体和矿体定位的有效手段。

针对斑岩体及斑岩型矿化,低密度、低磁化率的中酸性岩为重力、磁法探测提供了基础;岩体中硅酸盐矿物、钾化蚀变的发育及含金、铜、钼、铁硫化物发育为化探组合异常的选择提供了依据;与成矿有关的富碱斑岩体与围岩之间存在侵入接触构造,环形构造的解译识别是遥感识别侵入体的传统方法。因此,采用“重力低异常+磁法负异常+化探K-Si-Al-S-Au-Mo-Cu组合异常+遥感环形构造+蚀变(钾化、硅化、铁帽)填图”方法组合是寻找和发现成矿岩体和斑岩型、裂隙脉状矿化的有效手段(图6)。

针对矽卡岩型矿体,矽卡岩带石榴子石、透辉石、磁铁矿、赤铁矿及硫化物等重矿物、磁性矿物出现,为用电磁法和重力异常识别矽卡岩带提供了条件;带内矽卡岩矿物、铁氧化物、硫化物及绿泥石、绿帘石等矿物的发育,为化探异常找矿方法提供了依据;含水的绿帘石、绿泥石、绢云母等蚀变矿物和含铁氧化物的发育,以及矽卡岩呈带状分布的特征,为解译羟基、铁染蚀变和识别环形构造遥感方法的选择奠定了基础。因此,“重力局部高异常+磁正异常+可控源音频大地电磁测深异常梯度带+蚀变(矽卡岩化、硅化、退化蚀变、方解石化)填图+化探Si-Fe-Au-Cu-Cl组合异常+遥感羟基、铁染及环形构造解译”方法组合是识别矽卡岩型矿体的有效方法。

针对构造破碎带型或裂隙脉状矿化体,金属硫化物的发育是导致围岩中激电异常的因素,石英和围岩高阻特性是采用激发极化法的主要依据;方解石、白云石、大理石等含碳酸根矿物的发育,是遥感解译的前提,碳酸盐岩地层中金属硫化物的发育,是Ca-Mg-S-Pb-Zn-Ag化探异常选择的依据。因此“高阻中极化激电异常+蚀变(硅化、方解石化)+构造带、热液脉填图”方法组合是寻找构造破碎带型或裂隙脉状矿体的方法。

4.2 找矿效果

应用建立的碱质热液型金矿床找矿方法组合,在滇西地区的北衙、长安等矿区开展了区域成矿预测和矿区矿体定位预测。在北衙金矿区,分别圈定了大沙地隐伏岩体及矽卡岩、硫化物脉型矿化预测区,万铜山深边部及构造破碎带型矿化预测区,红泥塘深、边部石英硫化物脉型矿化预测工作区;在长安

金矿区,圈定了深部石英硫化物脉型矿化预测区,

经过10余年的连续工程勘探,找矿效果显著,实现了新增资源储量金金属169 t,铜金属42万t,铁矿石3674万t,伴生银金属7299 t,铅金属258万t,锌金属78万t的找矿进展,同时在区域上,引领了鹤庆芹河金铅锌矿区、保山黑牛凹金矿区、香格里拉洛吉矿区的找矿应用,找矿效果有待验证。

5 结 论

滇西地区沿金沙江-哀牢山构造带发育一批与富碱斑岩有关的金多金属矿床,这类矿床具有成矿岩体富碱性,成矿流体碱质组分高,矿化-蚀变-元素分带模式复杂,成矿过程以热液交代作用为主等特点,为突出该类矿床的独特特征,提出了“碱质热液型”金多金属矿床的概念,是与富碱质岩浆活动有关的以热液成矿作用为主的矿床。

在总结矿化、蚀变和元素分带特征的基础上,作者建立了碱质热液型金多金属矿床的分带模式:①内带为以钾化带,无矿或发育贫金铜钼矿化,化学组分以K-Si-Al-S等富集为主;②向外为石英-绢云母化带,发育裂隙脉状或浸染状-细脉状金黄铜矿矿化,化学组分以Si-Fe-S-Cl富集为特征;③在向外为矽卡岩化带,发育似层状金-磁铁矿-褐铁矿化,化学组分以Fe-Au-Cu-Cl富集为特征;④最外带为碳酸盐化(大理岩化)带,发育带状、细脉状金银铅石英硫化物矿化,化学组分以Ca-Mg-Pb-Zn-Ag等富集为特征。

以矿化、蚀变和元素分带模式为基础,针对斑岩型、矽卡岩型、构造破碎带型和热液脉型矿体,作者分别集成了地质、物探、化探、遥感等找矿方法组合,并通过实际应用在北衙和长安等矿集区范围内取得了显著的找矿效果。

References

- Bi X W, Hu R Z, Ye Z J and Shao S X. 1999. Study on the relationship between A-type granites and copper mineralization—A case study of Machangqing copper deposit[J]. Science in China(series D), 29 (6): 489-495(in Chinese).
- Bi X W, Hu R Z and Comell D H. 2000. REE geochemistry and its evolution of ore-forming fluid in Yao'an gold deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 19(4): 263-265(in Chinese with English abstract).
- Bi X W, Hu R Z, Peng J T, Wu K X, Su W C and Zhan X Z. 2005. Geo-

- chemical characteristic of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 113-124(in Chinese).
- Bi X W, Hu R Z, Mungll J E, Hanley J J, Peng J T, Wu K X and Li H L. 2006. Mineral chemistry studies of Cu and Au mineralization alkaline intrusions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(4): 377-386 (in Chinese with English abstract).
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia J, Gemmell J B, McKnight S and Cuison A L. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines[J]. *Econ. Geol.*, 106(8): 1365-1398.
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y Q, Xie Y W, Li X H, Wang K L and Wang P L. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago[J]. *Nature*, 394: 769-773.
- Cooke D R, Hollings P, Wilkinson J J and Tosdal R M. 2014. Geochemistry of porphyry deposits[A]. In: Heinrich D, Holland and Karl K T, eds. *Treatise on Geochemistry (Second edition)*[M]. Kidlington: Elsevier Ltd., 357-381. (ISBN 978-0-08-098300-4 [Research Book Chapter] <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01116-5>)
- Deng B P, Liu X F, Zhu J J, Lu Q X, Zhao F F, Chu Y T and Li C H. 2014. Noble gas isotope and silicon isotope evidences of crust-mantle mixing ore formation mechanism: Exemplified by the alkali-rich porphyry polymetallic deposits in western Yunnan, China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 44(6): 1856-1868(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Luo Z H, Zhao H L, Zhao G C, Dai S Q, Cao Y Q and Xu X Z. 1998. Trachyte and syenite: Petrogenesis constrained by the petrological phase equilibrium[A]. Ed. by Li M. *Collected works of international symposium on geological science by department of geology*[C]. Peking University. Beijing: Seism Publishing House: 745-7577.
- Deng J, Yang L Q, Ge L S, Yuan S S, Wang Q F, Zhang J, Gong Q J and Wang C M. 2010. Character and post-ore changes modifications and preservation of Cenozoic alkali-rich porphyry gold metallogenic system in western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1633-1645(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang C M and Li G J. 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1347-1361(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Ge L S and Yang L Q. 2013. Tectonic dynamic system and compound orogeny: Additionally discussing the temporal spatial evolution of Sanjiang orogeny, southwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1099-1114(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang Q F, Li G J, Li C S and Wang C M. 2014a. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26(2): 419-437.
- Deng J, Wang Q F, Li G J and Santosh M. 2014b. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 138: 268-299.
- Deng J, Wang Q F, Li G J, Hou Z Q, Jiang C Z and Danyushevsky L. 2015. Geology and genesis of the giant Beiya porphyry-skarn gold deposit, northwestern Yangtze Block, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 457-485.
- Deng J, Wang Q F and Li G J. 2016. Superimposed orogeny and composite metallogenic system: Case study from the Sanjiang Tethyan belt, SW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2225-2247(in Chinese with English abstract).
- Deng W M, Huang X and Zhong D L. 1998a. Alkali rich porphyry in the northern segment of Jinshajiang belt in western Yunnan and its relationship with intraplate deformation[J]. *Science in China(Series D)*, 28(2): 111-117(in Chinese).
- Deng W M, Huang X and Zhong D L. 1998b. Petrological characteristics and genesis of Cenozoic alkali-rich porphyry in West Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 33(4): 31-44(in Chinese with English abstract).
- Duan J S, Sun G and Bai J. 2000. Late Paleozoic rifting and mineralization in western Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese), 1-130.
- Fu Y, Sun X M, Lin H, Zhou H Y, Li X, Ouyang X Q, Jiang L Y, Shi G Y and Liang Y H. 2015. Geochronology of the giant Beiya gold-polymetallic deposit in Yunnan Province, southwest China and its relationship with the petrogenesis of alkaline porphyry[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 138-149.
- Gao X Q. 2017. Constraints of magmatic oxidation state on mineralization in the Beiya alkali-rich porphyry gold deposit, western Yunnan, China(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Yang L Q. Beijing: China University of Geosciences, 1-55(in Chinese with English abstract).
- Gao Z M. 2002. Mineralization and prospecting of main types of gold deposits in Yunnan Guizhou region[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-243(in Chinese).
- Ge L S, Zhou Y L, Xin J B, Wang Z H and Guo X D. 2004. Gold mineralization system related to alkali-rich porphyries in Himalayan, the northwestern part of Yunnan[J]. *Gold Geology*, 10(1): 39-47 (in Chinese with English abstract).
- Ge L S. 2005. Alkali rich porphyry and gold mineralization in north-west Yunnan[M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1-190.
- Ge L S, Deng J, Yang L Q, Xin J B and Yuan S S. 2017. Geology and geochemistry of Daping super larger gold polymetallic deposit in Yunnan Province, China[J]. *Geology and Prospecting*, 43(3): 17-24(in Chinese with English abstract).
- Guo L G, Liu Y P, Xu W, Zhang X C, Qing K Z, Li T S and Shi Y R. 2006. Constraints to the mineralization age of the Yulong porphyry copper deposit from SHRIMP U-Pb zircon data in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1009-1016(in Chinese with English abstract).
- Guo X D, Li J W, Xia R, Che Y F, Wang L, Wang Z H and Lu Q. 2014. Study on forming mechanism of Machangqing alkali-rich intru-

- sive rock in western Yunnan[J]. Geological Review, 60(1): 125-137(in Chinese with English abstract).
- Guo Y X Y. 2015. Zoning regularities of mineralization and relation and prospecting direction for the Beiya gold polymetallic deposit northwestern Yunnan, China(dissertation for Master degree) [D]. Supervisor: Han R S. Kunming: Kunming University of Technology, 1-83.
- He K Z, Zhao C H and He H S. 1996. Intracontinental rifting and orogeny in western Yunnan: Post Indosinian tectonic evolution in western Yunnan[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1-138(in Chinese).
- He M Q, Yang S Y, Liu J J and Li C Y. 2004. Characteristics of ore-forming fluids and their origin in Jinchangqing gold(copper) ore deposits in Xiangyun, Yunnan[J]. Mineralogy and Petrology, 24(2): 35-40(in Chinese with English abstract).
- He M Y and Hu R Z. 1996. A study on the Au-bearing fluid source and its properties of the Laowangzhai gold deposit, Yunnan Province, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 15(1): 36-39(in Chinese with English abstract).
- He W Y, Mo X X, Yu X H, Li Y, Huang X K and He Z H. 2011. Geochronological study of magmatic intrusions and mineralization of Machangqing porphyry Cu-Mo-Au deposit, western Yunnan Province[J]. Earth Science Frontiers, 18(1): 207-215(in Chinese with English abstract).
- He W Y, Mo X X, Yu X H, He Z H, Dong G C, Liu X B, Su G S and Huang X F. 2013. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Beiya gold-polymetallic deposit in the western Yunnan Province and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(4): 1301-1310(in Chinese with English abstract).
- He W Y, Mo X X, Yu X H, Dong G C, He Z H, Huang X F, Li X W and Jiang L L. 2014. Genesis and geodynamic settings of lamprophyres from Beiya, western Yunnan: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(11): 3287-3300(in Chinese with English abstract).
- He Z H, Zhou Y M, He W Y, Su G S, Li W H and Yang S W. 2013. Genetic types and metallogenic regularity of Beiya superlarge gold polymetallic deposit, northwestern Yunnan[J]. Mineral Deposits, 32(2): 244-258(in Chinese with English abstract).
- He Z H, Guan D R, He W Y, Zhou Y M, Fu D G, Yang S W, Lv Y Z, Wang L D, Li W H, Su G S and Yang R. 2016. Exploration model of Beiya super-large gold-polymetallic deposit in northwestern Yunnan[J]. Mineral Deposits, 35(2): 261-282(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Ma H W, Zaw K and Zhang Y Q. 2003. The Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet[J]. Econ. Geol., 98(1): 125-145.
- Hou Z Q, Zhong D L and Deng W M. 2004. A tectonic model for porphyry copper molybdenum gold metallogenic belts on the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geology in China, 31(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Mo X X, Gao Y F, Yang Z M, Dong G C and Ding L. 2006. Early processes and tectonic model for the Indian-Asian continental collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese igneous rocks in Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1233-1248(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zaw K, Pan G T, Mo X X, Xu Q, Hu Y Z and Li X Z. 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in SW China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. Ore Geology Reviews, 31(1): 48-87.
- Hou Z Q and Yang Z M. 2009. Porphyry deposits in continental settings of China: Geological characteristics, magmatic hydrothermal system, and metallogenic model[J]. Acta Geologica Sinica, 83(12): 1779-1817(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q. 2010. Metallogenesis of continental collision[J]. Acta Geologica Sinica, 84(1): 30-58(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Pan X F, Yang Z M and Qu X M. 2017. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposit related to oceanic slab subduction: Example from Chinese porphyry deposits in continental settings[J]. Geoscience, 21(2): 332-351(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zhou Y, Wang R, Zheng Y C, He W Y, Zhao M, Evans N J and Weinberg R F. 2017. Recycling of metal-fertilized lower continental crust, origin of non-arc Au-rich porphyry deposits at cratonic edges[J]. Geology, 45(6): 563-566.
- Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Pen J T, Su W C and Wu K X. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China[J]. Chemical Geology, 203(3): 305-317.
- Huang J H, Zhou Q, Zhang J R, Wang H, Wang S W, Zhu S B and Liu Y J. 2019. Petrogenesis analysis of the Oligocene ore-bearing monzonite porphyry in Xifanping of Yunnan, Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 93(3): 622-632(in Chinese with English abstract).
- Huang X K. 2009. Petrologic and geochemical characteristic and function in gold mineralization of alkali-rich porphyries of the Beiya area in western Yunnan Province(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Yu X H. Beijing: China University of Geosciences. 1-62(in Chinese with English abstract).
- Huang X L, Niu Y L, Xu Y G, Chen L L and Yang Q J. 2010. Mineralogical and geochemical constraints on the petrogenesis of post-collisional potassic and ultrapotassic rocks from western Yunnan, SW China[J]. Journal of Petrology, 51(8): 1617-1654.
- Jensen E P and Barton M D. 2000. Gold deposits related to alkaline magmatism[J]. Reviews in Economic Geology, 13: 279-314.
- Jiang Y F. 2009. Progress of research on the characteristics and genesis of gold-rich porphyry-type copper deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 83(12): 1997-2017(in Chinese with English abstract).
- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F and Dai B Z. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, East Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints[J]. Earth and Planetary Science Letters, 241(3): 617-633.

- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D I and Garwin S. 2000. The geodynamics of world-class gold deposits: Characteristics, space-time distribution, and origins[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 501-544.
- Lai J Q, Peng S L, Wang H and Shao Y J. 1997. On the regional metallogenetic conditions of the alkali-rich porphyries in central Yunnan[J]. *Geological Exploration for Nonferrous Metals*, 6(5): 2-7 (in Chinese with English abstract).
- Li G D. 2010. Metallogenic conditions and prospecting prospects of alkali rich porphyry Cu-Au polymetallic deposits in the western margin of the Yangtze Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-301
- Li S C, Li F, Wu J, Wang R, Fan Z G and Dao Y. 2014. S, Pb isotopic characteristics of alkaline-rich porphyry deposits in western Yunnan and the geological significance[J]. *Contribution to Geology and Mineral Resources Research*, 29(4): 552-557(in Chinese with English abstract).
- Li W C. 2010. Metallogenic theory and exploration technology of "Sanjiang" multi island arc basin collision orogeny in southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-491.
- Li W C, Wang J H, He Z H and Dou S. 2016. Formation of Au-polymetallic ore deposits in alkaline porphyries at Beiya, Yunnan, southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 241-252.
- Li X R. 2014. Petrological characteristics and ore potentiality of Lianhuashan alkali-rich porphyry in Weishan, West of Yunnan(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Sun Y. Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-70(in Chinese with English abstract).
- Li Y. 2009. The metallogenic geochemistry and significance of prospecting of gold polymetallic ore concentration area in Beiya in western Yunnan Province(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Yu X H. Beijing: China University of Geosciences. 1-47 (in Chinese with English abstract).
- Liang H Y, Sun W D and Zhang Y Q. 2008. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of potassic alkaline porphyry in the Honghe Ailaoshan fault zone and their geological significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(S): 318-319(in Chinese with English abstract).
- Liang X Q and Li X H. 2005. Late Permian to Middle Triassic sedimentary records in Shiwandashan basin: Implication for the Indosinian Yunkai orogenic belt, South China[J]. *Sedimentary Geology*, 177(3): 297-320.
- Liang Y H, Mo J H, Sun W D, Zhang Y Q, Zeng T, Hu G Q and Charlote A. 2009. Study on geochemical composition and isotope ages of the Malasongduo porphyry associated with Cu-Mo mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 385-392(in Chinese with English abstract).
- Liu B, Liu H, Zhang C Q, Mao Z H, Zhou Y M, Huang H, He Z H and Su G S. 2015. Geochemistry and geochronology of porphyries from the Beiya gold-polymetallic orefield, western Yunnan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 69: 360-379.
- Liu F, Wang L, Han R S, Guo Y X Y, Wang M Z and Tan W. 2017. Ore field structural system and its ore controlling process of the Beiya porphyry gold polymetallic deposit in northwestern Yunnan, China[J]. *Earth Sciences Frontiers*, 24(6): 208-224(in Chinese with English abstract).
- Liu H Q, Bi X W, Lu H Z, Hu R Z, Lan T G, Wang X S and Huang M L. 2018. Nature and evolution of fluid inclusions in the Cenozoic Beiya gold deposit, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 161: 35-56.
- Liu X F, Liu J Z, Zhang C J, Yang Z X and Wu D C. 2004. Isotopic geochemistry of rock mass and ore-vein from alkali-rich porphyry type deposits in western Yunnan, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 32-39(in Chinese with English abstract).
- Liu X F, Cai Y W, Lu Q X, Tao Z, Zhao F F, Cai F Y, Li C H and Song X F. 2010. Actual traces of mantle fluid from alkali-rich porphyries in western Yunnan and associated implications to metallogenesis[J]. *Earth Sciences Frontiers*, 17(1): 114-136(in Chinese with English abstract).
- Lu Y J, Kerrich R, Cawood P A, McCuaig T C, Hart C J R, Li Z X, Hou Z Q and Bagas L. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of potassic felsic intrusions in western Yunnan, SW China: Constraints on the relationship of magmatism to the Jinsha suture[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 737-747.
- Lu Y J, Kerrich R, Kemp A I S, McCuaig T C, Hou Z Q, Hart C J R, Li Z X, Cawood P A, Bagas L, Yang Z M, Cliff J, Belousova E A, Jourdan F and Evans N J. 2013. Intracontinental Eocene-Oligocene porphyry Cu mineral systems of Yunnan, western Yangtze Craton, China; compositional characteristics, sources, and implications for continental collision metallogeny[J]. *Econ. Geol.*, 108(7): 1541-1576.
- Luo C H. 2018. The geochronology, geochemistry characteristics and petrogenesis of the alkali-rich porphyry in Yaoan, West Yunnan Province(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Hou Z Q. Beijing: China University of Geosciences. 1-77(in Chinese with English abstract).
- Luo J L, Yang Y H and Zhao H. 1994. Evolution of Tethys in western Yunnan and mineralization of major metal deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-313.
- Luo Y N and Yu R L. 2001. Orogenic evolution and metallogenic time-space distribution in Jinshajiang-Lancangjiang-Nujiang region, Southwest China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 21(3): 153-159(in Chinese with English abstract).
- Lü B X, Duan J Z, Tan B H, Qian X G and Zhang Y F. 2011. Cenozoic intracontinental deformation, magmatism and mineralization in Sanjiang area, western Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1-163.
- Lü B X, Wang Z and Zhang N D. 1993. Granitoids and their metallogenic specificity in Sanjiang area[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-328.
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, Zhang Z H and Wang Y T. 2005. Geodynamic process and metallogeny: History and present research

- trend with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China[J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 193-205(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Luo M C, Xie G Q, Liu J and W S H. 2014. Basic characteristics and new advance in research and exploration on porphyry copper deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2153-2175(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Pirajno F, Lehmann B, Luo M C and Berzina A. 2014. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 576-584.
- Mao J W, Zhou Y M, Liu H, Zhang C Q, Fu D G and Liu B. 2017. Metallogenic setting and ore genetic model for the Beiya porphyry-skarn polymetallic Au orefield, western Yunnan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 21-34.
- Meng X Y, Mao J W, Zhang C Q, Zhang D Y and Liu H. 2018. Melt recharge, fO_2 -T conditions, and metal fertility of felsic magmas: Zircon trace element chemistry of Cu-Au porphyries in the Sanjiang orogenic belt, southwest China[J]. *Mineralium Deposita*, 5: 649-663.
- Metcalfe I. 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 605-623.
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1-33.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- Mo X X, Lu F X and Shen S Y. 1993. Sanjiang Tethys volcanism and mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-252.
- Mtiller D and Groves D I. 1997. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization[M]. 2nd Edition. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1-225.
- Mtiller D and Groves D I. 2016. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization[M]. 4th Edition: Springer International Publishing Switzerland, 1-296.
- Mtiller D and Groves D I. 2019. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization[M]. 5th Edition: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 1-398.
- Pan G T, Xu Q, Hou Z Q, Wang L Q, Du D X, Mo X X, Li D M, Wang M J, Li X Z, Jiang X S and Hu Y Z. 2003. Metallogenic system and resource evaluation of "Sanjiang" multi island arc orogeny in Southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-420.
- Pu C J and Wang L S. 1996. Au occurrence state and technological characteristics of Jinchangqing Au deposit, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 15(1): 62-67(in Chinese with English abstract).
- Qian X G and Li Z W. 2000. Geological and geochemical characteristics of the Yaoangold ore deposit in central Yunnan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(S1): 31-36(in Chinese with English abstract).
- Qian X G, Li Z W and Bo J. 2002. A preliminary study on the genetic mechanism of Yaoan Au deposit[J]. *Yunnan Geology*, 21(1): 42-49(in Chinese with English abstract).
- Ren Z J, Zhu Z H and Zhao C S. 1996. Terrane tectonics and mineralization in Yunnan[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 1-180.
- Richards J P. 1995. Alkaline-type epithermal gold deposits—A review[M]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 23(17): 367-400.
- Richards, J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Econ. Geol.*, 98(8): 1515-1533.
- Richards J P and Kerrich R. 2007. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis[J]. *Econ. Geol.*, 102(4): 537-576.
- Richards J P. 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits; products of remelting of subduction-modified lithosphere[J]. *Geology*, 37(3): 247-250.
- Shen G F and Lv B X. 2000. Diagenesis and mineralization of Cenozoic intrusion in Sanjiang area, Southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-141.
- Sillitoe R H, McKee E H, and Vila T. 1991. Reconnaissance K-Ar geochronology of the Maricunga gold-silver belt, northern Chile[J]. *Econ. Geol.*, 86(6): 1261-1270.
- Sillitoe R H. 2002. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration[J]. *Mineralium Deposita*, 37(1): 4-13.
- Sillitoe R H, Tolman J and Van K G. 2013. Geology of the Caspiche porphyry gold-copper deposit, Maricunga Belt, northern Chile[J]. *Econ. Geol.*, 108(4): 585-604.
- Song Z B, Jia Q Z, Chen X Y, Chen B, Zhang Y L, Zhang X F, Quan S C and Li Y Z. 2011. The petrogenic age of Narigongma granite diorite porphyry in the northern part of the Sanjiang region and its geological implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 32(2): 154-162(in Chinese with English abstract).
- Spurlin M S, Yin A, Horton B K, Zhou J Y and Wang J H. 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syncollisional igneous activity, east-central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9-10): 1293-1317.
- Storti F, Holdsworth R E and Salvini F. 2003. Intraplate strike-slip deformation belts[M]. London: Geological Society, Special Publications, 210(1): 1-14.
- Sun C D. 2017. Petrological and geochemical characteristics of Yaoan alkali-rich porphyry and its metallogeny in Yunnan Province(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Wu P. Kunming University of Technology. 1-122(in Chinese with English abstract).
- Sun N. 2015. The metallogenic model of the typical deposits in JinshaRiver-Ailaoshan alkali-rich porphyry belt(dissertation for Doctoral degree)[D]. Supervisor: Deng J. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-133(in Chinese with English abstract).
- Tran M D, Liu J L, Nguyen Q L, Chen Y, Tang Y, Song Z J, Zhang Z C

- and Zhao Z D. 2014. Cenozoic high-K alkaline magmatism and associated Cu-Mo-Au mineralization in the Jinping-Fan Si Pan region, southeastern Ailao Shan-Red River shear zone, southwestern China-northwestern Vietnam[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 858-872.
- Tran M D. 2010. Tectonomagmatic evolution and metallogenesis in the Cenozoic Jinping-Fan Si Pan metallogenic Province, southeastern Tibet(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Liu J L. Beijing: China University of Geosciences, 1-68(in Chinese with English abstract).
- Ulrich T, Günther D and Heinrich C A. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits[J]. *Nature*, 399: 676-679.
- Wang D H, Qu W J, Li Z W, Ying H L and Chen Y C. 2004. Metallogenic concentration period of porphyry Cu Mo deposits in Jinshajiang Honghe metallogenic belt: Re-Os isotopic dating[J]. *Science in China (Series D)*, 34(4): 345-349(in Chinese).
- Wang D H, Chen Y C, Xu Y, Zhou T R, Xue C J, Luo J L, Luo Y N, Wu G Y, Li Z W, Yu J J, Yan S H, Yang J M, Fu X J, Fu X F, Fu D M, Chu Y S, Wei L and Li X Y. 2005. Cenozoic mineralization in China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-853(in Chinese).
- Wang D, Bi X W, Lu H Z and Liu Z R. 2017. Study of ore-forming fluid associated with alkali-rich porphyries in the Jinshajiang-Red river in continental tectonic setting[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(1): 91-107(in Chinese with English abstract).
- Wang D, Bi X W, Lu H Z, Hu R Z, Wang X S and Xu L L. 2018. Fluid and melt inclusion study on mineralized and barren porphyries, Jinshajiang-Red river alkali-rich intrusive belt, and significance to metallogenesis[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 184: 28-39.
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhang Y Q and Xie G H. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 123-133.
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhou J Y, Zhang Y Q and Xie G H. 2003. Thermochronological constraints on two pulses of Cenozoic high-K magmatism in eastern Tibet[J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 46(7): 719-729.
- Wang J H, Li W C, Wang K Y, Yin G H, Wu S and Jiang W T. 2015. The characteristics and evolution of the ore-forming fluids in the Beiya porphyry Au-polymetallic deposit, western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3269-3280(in Chinese with English abstract).
- Wang J H and Li W C. 2016. Study on gold polymetallic metallogenic system of alkali rich porphyry in Beiya, Heqing, western Yunnan[A]. In *The 13th National Conference on mineral deposits*[C]. Hefei: 119-120.
- Wang J H. 2017. Study on gold polymetallic metallogenic system of alkali rich porphyry in Beiya, Heqing, western Yunnan(dissertation for Doctoral degree)[D]. Supervisor: Li W C. Kunming: Kunming University of Technology. 1-130(in Chinese with English abstract).
- Wang J Z, Li C Y, Sun Y and Li Z Q. 2002. K-feldspar rapakivi texture and its implications, Xifanping porphyry copper deposit, Sichuan[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(4): 418-421(in Chinese with English abstract).
- Wang X, Yang L, Deng J, Li H J, Yu H Z and Dong C Y. 2018. Identification of multistage hydrothermal mineralizations in the Beiya gold deposit: Evidence from geology, petrography, fluid inclusion, H-O-S isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1299-1311(in Chinese with English abstract).
- Wang Y H, Ge L S, Guo X D, Wang L, Yuan S S and Yang L Q. 2012. Epithermal-porphyry Cu-Mo-Au polymetal metallogenic system in Machangqing ore field, Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1425-1437(in Chinese with English abstract).
- Wang Y Z, Li X L, Duan L L, Huang Z X and Cui C L. 2000. Geotectonics and mineralization in the southern part of Sanjiang area[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-123.
- Wang Y, Mo X X, Dong F L, Bi X M and Yu X H. 2003. Fluid geological mapping in the Weishan-Yongping mineralization district, Yunnan-theory and practice[J]. *Geology in China*, 30(1): 73-83(in Chinese with English abstract).
- Wang Z H. 2004. The integrated information exploring model and prediction and assessments of Beiya alkali porphyry gold deposit in Heqing Yunnan(dissertation for Doctoral degree) [D]. Supervisor: Hu G D. Beijing: China University of Geosciences. 1-130(in Chinese with English abstract).
- Wu K X, Hu R Z, Bi X W, Peng J T, Su W Q and Chen L. 2005. Study of the fluid inclusions in altered porphyries in the Beiya gold deposit, western Yunnan[J]. *Mineralogy and Petrology*, 25(2): 20-26 (in Chinese with English abstract).
- Wu K X. 2005. The Cenozoic alkali-rich igneous rocks, western Yunnan and their relation with metallogenesis of gold(dissertation for Doctoral degree)[D]. Supervisor: Hu R Z. Chinese Academy of Sciences. 1-118(in Chinese with English abstract).
- Wu R. 2011. Genesis analyse for series mineralization of Machangqing Mo-Cu-Au deposit in Yunnan, China(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Liu X F. Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-67(in Chinese with English abstract).
- Wu W Z, Xia B, Zhang Y Q, Dong B H and Xia Z X. 2013. Geochemical characteristics and metallogenic mechanism of the porphyry Cu-Mo deposit in the Yulong ore belt, eastern Tibet: A case study of the Yulong and Duoxiasongduo porphyries[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(3): 440-454(in Chinese with English abstract).
- Xiao R G, Chen B Q and Yuan J Q. 1993. Meso-Cenozoic geology and mineral resources in Yunnan[M]. Beijing: Ocean Press. 1-204.
- Xiao X N, Yu X H, Mo X X, Yang G L, Li Y and Huang X K. 2009. Geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb dating and origin of alkali-rich porphyries in Beiya area, North Erhai Lake, western Yunnan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1786-1803(in Chinese with English abstract).
- Xiao Y F, Sun Y, Lu Y, Wang J Z and Wen C Q. 2000. Geochemical characteristics of fluid inclusions in the Xinfanping porphyry cop-

- per deposit, Sichuan, China[J]. *Geology Geochemistry*, 28(1): 52-57(in Chinese with English abstract).
- Xiong D X, Sun X M, Shi G Y. 2007. Geochemistry and metallogenic model of Himalayan orogenic gold deposit in Ailao Mountain, Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-250.
- Xu L H, Bi X W and Tang Y Y. 2010. Metallogenic chronological characteristics and geological significance of porphyry Cu-Mo deposits in the southern segment of Jinshajiang Honghe metallogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 525-526(in Chinese with English abstract).
- Xu S M. 2007. Metallogenic modeling of the Beiya gold deposit in western Yunnan and its relation to the Cenozoic alkali-rich porphyries(dissertation for Doctoral degree)[D]. Supervisor: Mo X X. China University of Geosciences. 1-115(in Chinese with English abstract).
- Xue B G. 2002. Geological characteristics of Xiaolongtan porphyry copper deposit in Binchuan and its prospects for exploration[J]. *Mineral Resources and Geology*, 16(2): 82-86(in Chinese with English abstract).
- Xue C D, Hou Z Q, Liu X, Yang Z M, Liu Y Q and Hao B W. 2008. Petrogenesis and metallogenesis of the Beiya gold polymetallic ore district, northwestern Yunnan Province, China: Response to the Indo-Asian collisional process[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 457-472(in Chinese with English abstract).
- Yan M C, Chi Q H, Gu T X and Wang C S. 1996. Abundance and distribution of chemical elements of igneous rocks in China[J]. *Geochimica*, 25(5): 409-424(in Chinese with English abstract).
- Yan Q G. 2019. Digenetic metallogenic mechanism and its related temporal special sequence of Yaoan alkaline volcano plutonic complex in intra-plate of Yangtze craton, central Yunnan Province(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Jiang X J. Kunming University of Technology. 1-90(in Chinese with English abstract).
- Yang J W, Li Y B and Yu L W. 1991. Geological characteristics of Zhacun gold ore deposit[J]. *Yunnan Geology*, 10(1): 71-104(in Chinese with English abstract).
- Yang J, Tang F W, Wang Q and Wang Y H. 2015. Geochemistry and ore-prospecting targeting in Beiya area, Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 42(6): 1989-1999(in Chinese with English abstract).
- Yang L Q, Liu J T, Zhan C, Wang Q F, Ge L S, Wang Z L, Zhang J and Gong Q. 2010. Super imposed orogenesis and metallogenesis: An example from the orogenic gold deposits in Ailaoshan gold belt, southwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1723-1739(in Chinese with English abstract).
- Yang Z M and Hou Z Q. 2009. Porphyry Cu deposits in collisional orogenic setting: A preliminary genetic model[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 515-538(in Chinese with English abstract).
- Yang Z M, Hou Z Q, Yang Z S, Wang S X, Wang G R, Tian S H, Wen D Y, Wang Z L and Liu Y C. 2008. Genesis of porphyries and tectonic controls on the Narigongma porphyry Mo(-Cu) deposit, southern Qinghai[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 489-502(in Chinese with English abstract).
- Zeng P S, Mo X X and Yu X H. 2002. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of the alkaline rich porphyries in western Yunnan and its compression strike-slip setting[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(3): 231-241(in Chinese with English abstract).
- Zhang D H, Zhang X S, Yang Y, Yan J and Yang P. 2013. Petrogeochemical characteristics and ore-hunting prospect of alkali-rich porphyries on the western margin of the Yangtze platform[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(S1): 167-176(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q. 2017. Geochemical characteristics and metallogenic regularity of Xifanping deposit, Yanyuan, Sichuan(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Xu Z Q. Chengdu University of Technology. 1-70(in Chinese with English abstract).
- Zhang X. 2015. The geochemistry and chronology of alkali-rich intrusions in Xiaolongtan area, Dali, China(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Huang Z L. Kunming: Kunming University of Technology. 1-59(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q, Xie Y W and Tu G Z. 1987. Preliminary studies of the alkali-rich intrusive rocks in the Ailaoshan-Jinshajiang belt and their bearing on rift tectonic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(1): 17-26(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q and Xie Y W. 1997. Chronology and Nd, Sr isotopic characteristics of alkali rich intrusive rocks in Ailaoshan-Jinshajiang[J]. *Science in China(Series D)*, 27(4): 289-293(in Chinese).
- Zhang Y. 2009. Geochemistry and metallogenic mechanism of the Daping Himalayan collisional orogenic gold deposit in Ailaoshan, Yunnan(dissertation for Doctoral degree)[D]. Supervisor: Sun X M. Guangzhou: Sun Yat-sen University. 1-165(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Xiong X L, Wang Q, Bao Z W, Zhang Y Q, Xie Y W and Ren S K. 2002. Alkali rich igneous rocks and related large and superlarge gold copper deposits in China[J]. *Science in China(Series D)*, 32(S1): 1-10(in Chinese).
- Zhong K M and Yang S Y. 2000. Tectonic geochemical metallogenic prediction criteria of Beiya gold deposit, Yunnan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 393-394(in Chinese).
- Zhou J. 2017. Study on the mineralized intrusion features and tectonic setting of Cu polymetallic deposits in the Bishashan-Fenshuiling, western Yunnan Province(dissertation for Doctoral degree)[D]. Supervisor: Wang G H. Beijing: China University of Geosciences. 1-158(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y M, Mao J W, Fu D G, He Z H, Zhang C Q, Zhao C F, Liu H, Peng H J, Wang L D, Lou D B, Wang Q H, Liu J, Mei W Z, Li W H, Li B L, Zhou G W, Li J X, Li J R, Yang C H, Hua H, Tian G, Liu B, Kong Z G, Wu Y, Meng X Y, Jia F D, Cheng Y B, Sun J, Yang H, Zhang W T, Liu C F and Ji X X. 2017. Study on typical gold copper lead zinc deposits and metallogenic regularity in western Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-528(in

- Chinese).
- Zhou Y M, Zhang C Q, He Z H, Liu H, Zhou G W, Sun J and Liu B. 2018. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Beiya gold-polymetallic ore deposit, northwestern Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 1841-1861(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y M, Zhou G W, Zhang C Q, Wang L D, Yu H P, Li W H and Liu Z L. 2021. Characteristics of metallogenic structures in the Beiya gold-polymetallic deposit in northwestern Yunnan Province and geological and exploration applications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(2): 308-326(in Chinese with English abstract).
- Zhu X P. 2010. Geological characteristics and metallogenesis in Habo porphyry Cu-Mo-Au deposit, Yunnan, China(dissertation for Doctoral degree)[D]. Supervisor: Mo X X. Beijing: China University of Geosciences. 1-150(in Chinese with English abstract).
- Zhu X P, Mo X X, White N C, Zhang B, Sun M X, Wang S X, Zhao S L and Yang Y. 2013. Petrogenesis and metallogenic setting of the Habo porphyry Cu-(Mo-Au) deposit, Yunnan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 188-203.
- Zi J, Cawood P A and Fan W. 2012. Generation of Early Indosinian enriched mantle-derived granitoid pluton in the Sanjiang orogeny (SW China) in response to closure of the Paleo-Tethys[J]. *Lithos*, 140-141: 166-182.
- ### 附中文参考文献
- 毕献武, 胡瑞忠, 叶造军, 邵树勋. 1999. A型花岗岩类与铜成矿关系研究——以马厂箐铜矿为例[J]. *中国科学(D辑)*, 29(6): 489-495.
- 毕献武, 胡瑞忠, Cornell D H. 2000. 姚安金矿床成矿流体形成演化的稀土元素地球化学[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 263-265.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴, 苏文超, 战新志. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征[J]. *岩石学报*, 21(1): 113-124.
- 毕献武, 胡瑞忠, Mungl J E, Hanley J J, 彭建堂, 吴开兴, 李鸿莉. 2006. 与铜、金矿化有关的富碱侵入岩矿物化学研究[J]. *矿物学报*, 26(4): 377-386.
- 邓碧平, 刘显凡, 朱建军, 卢秋霞, 赵甫峰, 楚亚婷, 李春辉. 2014. 壳幔混染成矿机制的稀有气体同位素及硅同位素证据——以滇西富碱斑岩型多金属矿区为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(6): 1856-1868.
- 邓军, 杨立强, 葛良胜, 袁士松, 王庆飞, 张静, 龚庆杰, 王长明. 2010. 滇西富碱斑岩型金成矿系统特征与变化保存[J]. *岩石学报*, 26(6): 1633-1645.
- 邓军, 王长明, 李龚健. 2012. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. *岩石学报*, 28(5): 1349-1361.
- 邓军, 葛良胜, 杨立强. 2013. 构造动力体制与复合造山作用——兼论三江复合造山带时空演化[J]. *岩石学报*, 29(4): 1099-1114.
- 邓军, 王庆飞, 李龚健. 2016. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例析[J]. *岩石学报*, 32(8): 2225-2247.
- 邓万明, 黄萱, 钟大赉. 1998a. 滇西金沙江带北段的富碱斑岩及其与板内变形的关系[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 28(2): 111-117.
- 邓万明, 黄萱, 钟大赉. 1998b. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因[J]. *地质科学*, 33(4): 31-44.
- 段锦荪, 侯增谦, 张罡, 柏坚, 杨开辉, 唐良栋. 2000. 滇西地区晚古生代裂谷作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-130.
- 高学泉. 2017. 滇西北衙金矿床富碱斑岩岩浆氧逸度对成矿的制约(硕士论文)[D]. 导师: 杨立强. 北京: 中国地质大学. 1-55.
- 高振敏, 李红阳, 杨竹森, 陶琰, 罗泰义, 刘显凡, 夏勇, 饶文波. 2002. 滇黔地区主要类型金矿的成矿与找矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-243.
- 葛良胜, 邹依林, 邢俊兵, 王治华, 郭晓东. 2004. 滇西北与喜马拉雅期富碱斑岩有关的金矿成矿系统[J]. *黄金地质*, 10(1): 39-47.
- 葛良胜, 王文成, 李汉光, 梁绪树, 向永生, 郭晓东. 2005. 滇西北富碱岩体与金矿成矿[M]. 北京: 地震出版社. 1-190.
- 葛良胜, 邓军, 杨立强, 邢俊兵, 袁士松. 2007. 云南大坪超大型金多金属矿床地质地球化学特征[J]. *地质与勘探*, 43(3): 17-24.
- 郭利果, 刘玉平, 徐伟, 张兴春, 秦克章, 李铁胜, 石玉若. 2006. SHRIMP 锆石年代学对西藏玉龙斑岩铜矿成矿年龄的制约[J]. *岩石学报*, 22(4): 1009-1016.
- 郭晓东, 李建文, 夏锐, 陈永福, 王梁, 王志华, 鹿青. 2014. 滇西马厂箐富碱侵入岩体形成机制研究[J]. *地质论评*, 60(1): 125-137.
- 郭钰心玥. 2015. 滇西北北衙金多金属矿床矿化蚀变分带规律及找矿方向(硕士学位论文)[D]. 导师: 韩润生. 昆明理工大学. 1-83.
- 何科昭, 赵崇贺, 何浩生, 帅开业. 1996. 滇西陆内裂谷与造山作用: 滇西地区印支期后的构造演化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-138.
- 何明勤, 杨世瑜, 刘家军, 李朝阳. 2004. 云南祥云金厂箐金(铜)矿床的成矿流体特征及流体来源[J]. *矿物岩石*, 24(2): 35-40.
- 何明友, 胡瑞忠. 1996. 云南老王寨金矿床含矿流体来源及其特性研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 15(1): 36-39.
- 和文言, 莫宣学, 喻学惠, 李勇, 黄行凯, 和中华. 2011. 滇西马厂箐斑岩型铜钼(金)矿床成岩成矿时代研究[J]. *地质前缘*, 18(1): 207-215.
- 和文言, 莫宣学, 喻学惠, 和中华, 董国臣, 刘晓波, 苏纲生, 黄雄飞. 2013. 滇西北衙金多金属矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(4): 1301-1310.
- 和文言, 莫宣学, 喻学惠, 董国臣, 和中华, 黄雄飞, 李小伟, 姜丽莉. 2014. 滇西北辉煌斑岩的岩石成因及动力学背景: 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 30(11): 3287-3300.
- 和中华, 周云满, 和文言, 苏纲生, 李万华, 杨绍文. 2013. 滇西北衙超大型金多金属矿床成因类型及成矿规律[J]. *矿床地质*, 32(2): 244-258.
- 和中华, 官德任, 和文言, 周云满, 符德贵, 杨绍文, 吕永增, 王利东, 李万华, 苏纲生, 杨锐. 2016. 滇西北衙超大型金多金属矿床勘查模型[J]. *矿床地质*, 35(2): 261-282.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 杨志明, 董国臣, 丁林. 2006. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. *地质学报*, 80(9): 1233-1248.
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿[J].

- 现代地质, 21(2): 332-351.
- 侯增谦, 杨志明. 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型[J]. 地质学报, 83(12): 1779-1817.
- 侯增谦, 钟大赉, 邓万明. 2004. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式[J]. 中国地质, 31(1): 1-14.
- 侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论[J]. 地质学报, 84(1): 30-58.
- 黄景厚, 周清, 张锦让, 王宏, 王生伟, 朱斯豹, 刘宇杰. 2019. 四川盐源西范坪渐新世含矿二长斑岩成因浅析[J]. 地质学报, 93(3): 622-632.
- 黄行凯. 2009. 滇西北衙地区新生代富碱斑岩的岩石学及地球化学特征及与金成矿的关系(硕士学位论文)[D]. 导师: 喻学惠. 北京: 中国地质大学. 1-62.
- 江迎飞. 2009. 富金斑岩铜矿床研究进展[J]. 地质学报, 83(12): 1997-2017.
- 赖健清, 彭省临, 王核, 邵拥军. 1997. 云南中部富碱斑岩区域成矿条件[J]. 有色金属矿产与勘查, 6(5): 2-7.
- 李光斗, 念红, 张道红, 王峰, 孙德瑜, 严健. 2010. 扬子地台西缘富碱斑岩铜金多金属矿床成矿条件及找矿前景[M]. 北京: 地质出版社. 1-301.
- 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 莫宣学, 王立全, 丁俊, 徐强, 李兴振, 李定谋, 杜德勋, 江新胜, 胡云中, 吕庆田, 杨伟光, 卢映祥, 范玉华, 杨夕辉, 沈上越, 徐启东, 朱勤文, 周耀军, 李晓明, 郭远生, 张翼飞, 罗君烈, 任治机, 曾普胜, 杨岳清, 汪民杰, 尹光侯. 2010. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社. 1-491.
- 李学仁. 2014. 滇西巍山大莲花山富碱斑岩岩石特征及含矿性(硕士学位论文)[D]. 导师: 孙燕. 成都: 成都理工大学. 1-70.
- 李勇. 2009. 滇西北衙金多金属矿集区成矿地球化学特征及找矿意义(硕士学位论文)[D]. 导师: 喻学惠. 北京: 中国地质大学. 1-47.
- 梁华英, 莫济海, 孙卫东, 张玉泉, 曾提, 胡光黔, Charlotte A. 2009. 玉龙铜矿带马拉松多斑岩体岩石学及成岩成矿系统年代学分析[J]. 岩石学报, 25(2): 385-392.
- 梁华英, 孙卫东, 张玉泉. 2008. 红河-哀牢山断裂带钾质碱性岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(增): 318-319.
- 刘飞, 王雷, 韩润生, 郭钰心玥, 王明志, 谭威. 2017. 滇西北北衙斑岩型金多金属矿田构造体系及其控矿作用[J]. 地学前缘, 24(6): 208-224.
- 刘显凡, 蔡永文, 卢秋霞, 陶专, 赵甫峰, 蔡飞跃, 李春辉, 宋祥峰. 2010. 滇西地区富碱斑岩中地幔流体作用踪迹及其成矿作用意义[J]. 地学前缘, 17(1): 114-136.
- 刘显凡, 刘家铎, 张成江, 阳正熙, 吴德超. 2004. 滇西富碱斑岩型矿床岩体和矿脉同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(1): 32-39.
- 陆世才, 李峰, 吴静, 王蓉, 范柱国, 刀艳. 2014. 滇西喜马拉雅期斑岩型矿床硫、铅同位素特征及地质意义[J]. 地质找矿论丛, 29(4): 552-557.
- 罗晨皓. 2018. 滇西姚安富碱斑岩年代学、地球化学特征及岩石成因(硕士学位论文)[D]. 导师: 侯增谦. 北京: 中国地质大学. 1-77.
- 罗君烈, 杨友华, 赵淮, 陈吉琛, 杨荆舟. 1994. 滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用[M]. 北京: 地质出版社. 1-313.
- 骆耀南, 俞如龙. 2001. 西南三江地区造山演化过程及成矿时空分布[J]. 矿物岩石, 21(3): 153-159.
- 吕伯西, 段建中, 谭筱红, 钱祥贵, 张翼飞. 2011. 滇西三江地区新生代陆内变形、岩浆活动和成矿作用[M]. 昆明: 云南科技出版社. 1-163.
- 吕伯西, 王增, 张能德, 段建中, 高子英, 沈致富, 潘长云, 姚鹏. 1993. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性[M]. 北京: 地质出版社. 1-328.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张作衡, 王义天. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用[J]. 矿床地质, 24(3): 193-205.
- 毛景文, 罗茂澄, 谢桂青, 刘军, 吴胜华. 2014. 斑岩铜矿床的基本特征和研究勘查新进展[J]. 地质学报, 88(12): 2153-2175.
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 朱勤文, 侯增谦, 杨开辉. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-252.
- 潘桂棠. 2003. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社. 1-420.
- 普传杰, 王利山. 1996. 云南金厂箐金矿金的赋存状态及工艺特性研究[J]. 云南地质, 15(1): 62-67.
- 钱祥贵, 李志伟. 2000. 滇中姚安金矿床地质地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 24(S1): 31-36.
- 钱祥贵, 李志伟, 柏坚. 2002. 姚安金矿床成因机制研究[J]. 云南地质, 21(1): 42-49.
- 任治漂, 朱智华, 赵重顺. 1996. 云南地体构造与成矿作用[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1-180.
- 沈致富, 吕伯西. 2000. 西南三江地区新生代侵入岩的成岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-141.
- 宋忠宝, 贾群子, 陈向阳, 陈博, 张雨莲, 张晓飞, 全守村, 栗亚芝. 2011. 三江北段纳日贡玛花岗闪长斑岩成岩时代的确定及地质意义[J]. 地球学报, 32(2): 154-162.
- 孙春迪. 2017. 云南姚安富碱斑岩体岩石学、地球化学及其成矿效应(硕士学位论文)[D]. 导师: 吴鹏. 昆明: 昆明理工大学. 1-122.
- 孙诺. 2015. 金沙江-哀牢山富碱斑岩成矿带典型矿床成矿模式(博士学位论文)[D]. 导师: 邓军. 北京: 中国地质大学. 1-133.
- 王登红, 屈文俊, 李志伟, 应汉龙, 陈毓川. 2004. 金沙江-红河成矿带斑岩铜钼矿的成矿集中期: Re-Os 同位素定年[J]. 中国科学(D 辑), 34(4): 345-349.
- 王登红, 陈毓川, 徐珏, 邹天人, 薛春纪, 罗君烈, 骆耀南, 伍广宇, 李志伟, 余金杰, 闫升好, 杨建民, 傅旭杰, 付小方, 傅德明, 楚萤石, 魏琳, 李晓焰. 2005. 中国新生代成矿作用[M]. 北京: 地质出版社. 1-853.
- 王蝶, 毕献武, 卢焕章, 刘张荣. 2017. 金沙江-红河富碱侵入岩带斑岩型铜、金矿床的成矿流体研究[J]. 大地构造与成矿学, 41(1): 91-107.
- 王建华, 李文昌, 王可勇, 尹光侯, 吴松, 姜文涛. 2015. 滇西北衙斑岩型金多金属矿床成矿流体特征及其演化[J]. 岩石学报, 31(11): 3269-3280.
- 王建华, 李文昌. 2016. 滇西鹤庆北衙富碱斑岩金多金属成矿系统研究[A]. 第十三届全国矿床会议[C]. 合肥. 119-120.
- 王建华. 2017. 滇西鹤庆北衙富碱斑岩金多金属成矿系统研究(博士

- 学位论文[D]. 导师:李文昌. 昆明:昆明理工大学. 1-130.
- 王奖臻, 李朝阳, 孙燕, 李泽琴. 2002. 四川盐源西范坪斑岩铜矿的钾长环斑结构及其意义[J]. 成都理工学院学报, 29(4): 418-421.
- 王璇, 杨林, 邓军, 李华健, 于华之, 董超一. 2018. 北衙金矿多期热液成矿作用识别:来自地质、岩相学、流体包裹体和H-O-S同位素证据[J]. 岩石学报, 34(5): 1299-1311.
- 王义昭, 李兴林, 段丽兰, 黄志勋, 崔春龙. 2000. 三江地区南段大地构造与成矿[M]. 北京:地质出版社. 1-123.
- 王勇, 莫宣学, 董方浏, 毕先梅, 喻学惠. 2003. 云南巍山——永平矿集区流体地质填图的理论与实践[J]. 中国地质, 30(1): 73-83.
- 王正海. 2004. 云南鹤庆北衙富碱斑岩型金矿综合信息找矿模型及预测评价(博士学位论文)[D]. 导师:胡光道. 北京:中国地质大学. 1-102.
- 王治华, 葛良胜, 郭晓东, 王梁, 袁士松, 杨立强. 2012. 云南马厂箐矿田浅成低温热液-斑岩型Cu-Mo-Au多金属成矿系统[J]. 岩石学报, 28(5): 1425-1437.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 苏文超, 陈龙. 2005. 滇西北衙金矿蚀变斑岩中的流体包裹体研究[J]. 矿物岩石, 25(2): 20-26.
- 吴开兴. 2005. 滇西新生代富碱火成岩及其与金成矿关系研究(博士学位论文)[D]. 导师:胡瑞忠. 贵阳:中国科学院研究生院. 1-118.
- 吴冉. 2011. 云南马厂箐铜钼金多金属矿床系列成矿成因分析(硕士学位论文)[D]. 导师:刘显凡. 成都:成都理工大学. 76.
- 吴伟中, 夏斌, 张玉泉, 董冰华, 夏中曦. 2013. 西藏玉龙成矿带斑岩Cu-Mo矿床地质地球化学特征及成矿机制探讨——玉龙和多霞松多对比研究[J]. 大地构造与成矿学, 37(3): 440-454.
- 肖荣阁, 陈卉泉, 袁见齐. 1993. 云南中新生代地质与矿产[M]. 北京:海洋出版社. 1-204.
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学, 杨贵来, 李勇, 黄行凯. 2009. 滇西洱海北部北衙地区富碱斑岩的地球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 定年及成因[J]. 地质通报, 28(12): 1786-1803.
- 肖渊甫, 孙燕, 陆彦, 王奖臻, 温春齐. 2000. 西范坪斑岩铜矿床流体包裹体地球化学特征[J]. 地质地球化学, 28(1): 53-57.
- 熊德信, 孙晓明, 石贵勇. 2007. 云南哀牢山喜马拉雅期造山型金矿带矿床地球化学及成矿模式[M]. 北京:地质出版社. 1-250.
- 胥磊落, 毕献武, 唐永永. 2010. 金沙江-红河成矿带南段斑岩铜钼矿成矿年代学特征及地质意义[J]. 矿床地质, 29(S1): 525-526.
- 徐受民. 2007. 滇西北衙金矿床的成矿模式及与新生代富碱斑岩的关系(博士学位论文)[D]. 导师:莫宣学. 北京:中国地质大学. 1-115.
- 薛步高. 2002. 宾川小龙潭斑岩铜矿地质特征及找矿远景探讨[J]. 矿产与地质, 16(2): 82-86.
- 薛传东, 侯增谦, 刘星, 杨志明, 刘勇强, 郝百武. 2008. 滇西北衙金多金属矿田的成岩成矿作用:对印-亚碰撞造山过程的响应[J]. 岩石学报, 24(3): 457-472.
- 鄯明才, 迟清华, 顾铁新, 王春书. 1996. 中国火成岩化学元素的丰度与分布[J]. 地球化学, 25(5): 409-424.
- 严清高. 2019. 滇中姚安板内富碱火山-侵入杂岩体时空演化序列及成岩-成矿机制研究(硕士学位论文)[D]. 导师:江小均. 昆明:昆明理工大学. 1-90.
- 杨嘉文, 李有本, 余莉雯. 1991. 扎村金矿床地质特征[J]. 云南地质, 10(1): 71-104.
- 杨剑, 唐发伟, 王桥, 王永华. 2015. 云南北衙地区成矿地球化学特征及找矿方向[J]. 中国地质, 42(6): 1989-1999.
- 杨立强, 刘江涛, 张闯, 王庆飞, 葛良胜, 王中亮, 张静, 龚庆. 2010. 哀牢山造山型金成矿系统:复合造山构造演化与成矿作用初探[J]. 岩石学报, 26(6): 1723-1739.
- 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 王淑贤, 王贵仁, 田世洪, 温德银, 王召林, 刘英超. 2008. 青海纳日贡玛斑岩钼(铜)矿床:岩石成因及构造控制[J]. 岩石学报, 24(3): 489-502.
- 杨志明, 侯增谦. 2009. 初论碰撞造山环境斑岩铜矿成矿模型[J]. 矿床地质, 28(5): 515-538.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠. 2002. 滇西富碱斑岩带的Nd、Sr、Pb同位素特征及其挤压走滑背景[J]. 岩石矿物学杂志, 21(3): 231-241.
- 张道红, 张书学, 杨艳, 严健, 杨平. 2013. 扬子地台西缘富碱斑岩的岩石地球化学特征及找矿前景[J]. 地球学报, 34(S1): 168-176.
- 张谦. 2017. 四川盐源西范坪铜矿地球化学特征及成矿规律研究(硕士学位论文)[D]. 导师:徐争启. 成都:成都理工大学. 1-70.
- 张翔. 2015. 云南大理小龙潭地区富碱斑岩体的地球化学特征与年代学研究(硕士学位论文)[D]. 导师:黄智龙. 昆明:昆明理工大学. 1-68.
- 张燕. 2009. 云南哀牢山大坪喜马拉雅期碰撞造山型金矿床地球化学及成矿机制(博士学位论文)[D]. 导师:孙晓明. 广州:中山大学. 1-165.
- 张玉泉, 谢应雯, 涂光炽. 1987. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究[J]. 岩石学报, 3(1): 17-26.
- 张玉泉, 谢应雯. 1997. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩年代学和Nd、Sr同位素特征[J]. 中国科学(D辑), 27(4): 289-293.
- 赵振华, 熊小林, 王强, 包志伟, 张玉泉, 谢应雯, 任双奎. 2002. 我国富碱火成岩及有关的大型超大型金铜矿床成矿作用[J]. 中国科学(D辑), 32(S1): 1-10.
- 钟昆明, 杨世瑜. 2000. 云南北衙金矿构造地球化学成矿预测标志[J]. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 393-394.
- 周洁. 2017. 云南省永胜分水岭—大理笔架山铜多金属矿床成矿岩体特征及构造背景研究(博士学位论文)[D]. 导师:王根厚. 北京:中国地质大学. 1-158.
- 周云满, 张家良, 董文伟, 普家忠. 2014. 哀牢山南段长安金矿深部找矿新进展[J]. 地质找矿论丛, 29(2): 185-191.
- 周云满, 毛景文, 符德贵, 和中华, 张长青, 赵成峰, 刘欢, 彭惠娟, 王利东. 2017. 滇西地区金铜铅锌矿典型矿床及成矿规律研究[M]. 北京:地质出版社. 1-582.
- 周云满, 周癸武, 张长青, 王利东, 余红平, 李万华, 刘张荣. 2021. 滇西北衙金多金属矿床成矿构造特征及地质勘查意义[J]. 大地构造与成矿学, 45(2): 308-326.
- 祝向平. 2010. 云南哈播斑岩型铜(-钼-金)矿床地质特征与成矿作用研究(博士学位论文)[D]. 导师:莫宣学. 北京:中国地质大学. 1-150.