

# 云南巍山—永平矿集区流体地质填图的理论与实践

王勇<sup>1,2</sup> 莫宣学<sup>1</sup> 董方浏<sup>1,3</sup> 毕先梅<sup>1</sup>  
喻学惠<sup>1</sup> 杨伟光<sup>1,4</sup> 曾普胜<sup>1,5</sup>

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 东华理工学院地球科学系, 江西 抚州 344000;  
3. 云南地质调查院, 云南 昆明 650011; 4. 云南地质矿产勘查开发局, 云南 昆明 650011;  
5. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:** 流体地质填图是一种全新的地质调查及找矿方法。本次研究选择云南巍山—永平矿集区进行流体地质填图试验, 研究了矿集区的控矿地质要素、各种主要的矿床(点)特征、成矿流体子系统及流域、流体的盐度与均一温度、流体的气液相成分、微量元素含量、稳定同位素特征及成矿流体的浓集中心。得到的流体地质图基本反映了本区成矿流体的性质与状态, 反映了两个成矿流体子系统的基本特征, 圈定了 2 个成矿流体子系统的流域范围及 7 个成矿流体浓集中心。这些浓集中心与已知矿化点分布、化探异常及有利的地质条件基本吻合, 成为该区进一步找矿预测的重要依据之一。本项目的实践表明, 流体地质填图不失为一种有效的找矿手段。

**关键词:** 流体地质填图; 地质调查; 成矿流体; 流体包裹体; 巍山县; 永平县; 云南省

**中图分类号:** P623 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2003)01-0073-11

在地质作用过程中, 流体相所扮演的角色是近年来地球科学研究的一个重要课题<sup>[1-4]</sup>。地质流体是地球组成物质中最为活跃的部分, 是一种将地球内部各个系统联系在一起的基本媒介。对成矿作用而言, 它既能汲取、溶解、包含各类成矿物质, 又能使其运移、输导到有利的构造-岩石空间而富集成矿<sup>[5]</sup>。多年来在矿床学界已形成一种共识“没有大量的水很难成矿”, 几乎所有矿床的形成都与流体相的作用有密切关系<sup>[6]</sup>。被圈闭在各种矿物中的流体包裹体是古流体的直接样品, 各种矿化及蚀变则是流体通过岩石并与岩石发生反应的最好记录<sup>[7-9]</sup>, 可以通过它们对“流体流域”进行识别、圈定和填图<sup>[10-12]</sup>。

西南“三江”(金沙江、澜沧江、怒江)地区是寻找有色金属及贵金属矿产的极有利地区, 可望成为中

国 21 世纪最重要的矿产资源基地之一<sup>[13-15]</sup>。

云南巍山—永平铜金多金属矿化集中区位于澜沧江大断裂与金沙江大断裂和哀牢山大断裂之间兰坪盆地南段的巍山—永平盆地, 属于兰坪—思茅 Pb-Zn-Ag-Cu-Sb-钾盐成矿带的一部分<sup>[16]</sup>。区内已知金、铜、钴、锑、汞、砷、铅、锌等矿床及矿化点 140 余处, 达中型规模的矿床 4 处, 还存在着北西向、北西西向呈带状展布的大规模 Au、Sb、Hg、As、Co、Cu、Pb、Zn 等元素的区域化探异常, 预示该区有大的找矿潜力。但是, 该区找矿迄今尚未取得大的突破, 处于“只见满天星星, 未见月亮”的状况。因此, 选择巍山—永平矿化集中区开展成矿流体的研究与填图工作, 不仅有助于该区成矿潜力评价, 而且有利于完善流体地质填图的方法与技术。

收稿日期: 2002-11-11; 改回日期: 2002-12-04

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查综合研究项目(20001020026003)资助。

作者简介: 王勇, 男, 1962年生, 博士, 副教授, 主要从事矿床学与岩浆岩岩石学研究; E-mail: ywangfgl@263.sina.com。

## 1 巍山—永平矿化集中区区域地质矿产概况

云南巍山—永平铜金多金属矿化集中区出露的地层主要有二叠系上统杨八寨组,三叠系上统歪古村组、三合洞组、挖鲁八组和麦初箐组;侏罗系下统漾江组、中统花开左组和上统坝注路组;白垩系下统景星组、南新组、虎头寺组;古近系古新统勐野井组、始新统等黑组,新近系上新统三营组,以及分布于山间盆地之中的第四系。二叠系、三叠系、侏罗系主要为海相台地相、陆棚相、潮汐三角洲相、潮坪相沉积,进入白垩纪以后,结束海相沉积历史,转变为陆相沉积<sup>[17]</sup>。

区域构造主要受西部澜沧江断裂带、东部金沙江—哀牢山断裂带及盆地中轴断裂的控制<sup>[17-19]</sup>,区内主导构造线的方向为北西向展布,晚期发育的北东向断裂切穿了早期北西向断裂。褶皱主要是紫金山地区近南北向的紫金山复式背斜,弥度朵谷地区南北向的朵谷向斜和永平龙街地区的北西向龙街向斜。在南涧公郎地区发育有弧状构造,常称公郎弧构造。紫金山背斜和公郎弧形构造与成矿关系较密切。研究区内岩浆岩主要分布有喜山期莲花山—各救母斑岩群和卓潘碱性岩体。莲花山—各救母斑岩群,主要沿莲花山—大佛山背斜核部断裂贯入,岩体分布稀密不均,密集成群的有大莲花山岩群、白劳山岩群、大佛山岩群等,岩性以正长斑岩和二长斑岩类为主体。其中莲花山岩群最大,并有金矿化。莲花山二长斑岩形成年龄为 $(38.6 \pm 2.5) \text{ Ma}^{[20]}$ 。

卓潘碱性岩体出露于永平弧形断裂南西侧,沿大卓潘背斜侵入于白垩系砂页岩中,呈近东西向产出,出露面积约  $40 \text{ km}^2$ ,为一浅成碱杂岩体,岩脉发育,保留有较多的围岩捕虏体。卓潘碱性岩体可以分为3期,第一期以黑云霓辉碱长正长岩为代表,分布于岩体之中部,占总面积的  $1/4$ ;第二期由霞石正长岩和碱性正长岩等组成,普遍含碱性暗色矿物(主要为碱性辉石),和少许副长石类矿物,出露于第一期周围,面积占  $3/5$ ;第三期以脉岩为主,包括正长岩脉、花岗斑岩脉、糖粒状石英脉和碳酸岩脉等,穿切杂岩体第一、二期岩石。岩体周围有大规模的 Au、U 异常展布。卓潘碱性岩体岩辉石正长岩形成年龄为 $(36.49 \pm 0.43) \text{ Ma}^{[20]}$ 。

矿化集中区内目前已发现贵金属、有色金属、黑色金属及非金属矿床(点)150余处。其中金、铜(钴)、铋、汞、铅锌、铁等金属矿床(点)140余处,中型矿床4个。非金属矿床主要为食盐、石膏、水晶等。

区内金矿床(点)主要分布于紫金山背斜两翼、莲花山二长斑岩体及卓潘碱性岩体等地,矿床类型以独立型金矿为主,如扎村金矿,规模已达中型,其他为伴生金矿,如田口村砷金矿点。与岩浆岩有关的金矿点——莲花山二长斑岩金矿化可能为热液型蚀变为主,卓潘碱性岩体及其周边的金矿化,目前成因不清,但分布有较多的砂金矿点。区内广泛分布着众多的铜及铜多金属矿床(点),但有一定规模的铜矿床仅分布在厂街、水泄和二郎等地,成因类型主要为热液蚀变岩型。砷铋汞等矿床(点)主要分布于紫金山背斜地区,达中型规模的有石岩村铋矿和笔架山铋矿等,成因类型为热液蚀变岩型。食盐、石膏等沉积矿产主要分布于云龙等地的新生代盆地内。

## 2 流体地质填图的理论依据

流体地质填图从本质上来说,就是将地质流体(特别是成矿流体)的研究,从矿床尺度扩大到区域尺度,并且转化为实际找矿手段。以下几点可以作为流体地质填图的理论依据:

(1)金属矿床是有用金属元素异常高度的富集,而这种富集是通过流体来实现的。正是由于含有丰富成矿物质的流体在合适的外部条件下卸载,形成了矿床和矿体。形象地说,运动着的成矿流体,就像大大小小的河流,成矿流体经过的地区就像河流的流域。很显然,成矿流体流域越大,成矿流体的数量规模也越大,形成大矿的潜力也越大。另一方面,流体中成矿物质的浓度越高,能够提供的成矿物质也越多,形成大矿的潜力也越大。总起来说,形成大矿的潜力,一取决于成矿流体流域的大小,二取决于流体中成矿物质的浓度。

(2)成矿流体的卸载过程,就是矿体、矿床与矿集区形成的过程。引起成矿流体卸载的原因,是由于流体子系统条件的突然改变。例如,两种不同性质流体的混合,流体的氧化还原条件(Eh值)、酸碱度(pH值)的突然改变,减压诱发的流体沸腾等等。显然,寻找成矿流体运动过程中,由于外界条件的突变而引起流体发生卸载作用的时间(成矿时间)和地点(浓

集中心),对于找矿实践是十分关键的。

(3)成矿流体运动的轨迹是可以识别的,因为流体在其活动的地区会留下自己的记录。这些记录包括:包含在各种矿物中的流体包裹体,蚀变岩石及其矿物组合,矿化岩石和矿石及其矿物组合,各种热液脉,成岩矿物及后生矿物等。然而,要小心地识别这些流体记录中所包含的信息的不同含义。例如,有的反映流体的早期活动,有的反映流体的晚期活动;有的代表流体的原始状态,有的则代表已经与围岩发生过反应的或已经卸载了的流体;有的代表含矿流体,而有的代表不含成矿物质的流体。通过对能够收集到的所有不同含义的信息的全面详细的综合分析,就可以追溯出成矿流体的轨迹与演化。当然,在一个地区不可能发育上述所有的流体活动记录,要因地制宜。

### 3 流体地质填图的任务

总的来说,流体地质填图的任务是对地质历史上地质流体活动留下的记录进行调查,研究流体的性质、成分、物理化学条件、稳定同位素特征、输导系统及聚集过程。在此基础上,将性质、成分、物理化学性质相近、活动时间相同、具有成生联系的流体归并为一个流体系统,进而圈定流体的流域,从而实现对流体流域进行识别、圈定和填图,判断流体系统的成矿潜力。具体有以下几项任务:

(1)测定流体的性质及各种参数,确定填图区内流体的类型。

(2)确定填图区内流体的活动期次及与地质事件的关系和序次。期次划分的详细程度取决于比例尺。对于矿区的大比例尺填图,不但要划出成矿期,而且要划分成矿阶段;对于区域中、小比例尺填图,可以只划出成矿期,不需再进一步划分成矿阶段。

(3)在上述基础上,划分成矿流体系统,以便找到填图区内各种矿床、矿化的内在联系。

(4)填出流体系统的流域范围与边界,以提供评价区域成矿潜力的依据。

(5)确定成矿流体的浓集中心及聚集中心。这对于找矿很重要,但其难度更大,不仅需要地球化学资料与知识,而且需要流体动力学的资料与知识。

在一个地区进行流体地质填图,能否圆满地完成上述所有任务,一取决于工作程度,二取决于流体活动的地质记录是否完全。

### 4 研究方法

本次在巍山—永平矿集区的流体地质填图采用的比例尺为1:25万,设计书中制定的取样控制密度为平均每10 km<sup>2</sup> 1个样。在实际工作中,由于流体地质填图工作的特殊性,各种脉体多沿着断裂及破碎带分布,其分布具不均匀性,因而实际采集的流体样品的分布也是不均匀的。在设计1000 km<sup>2</sup>范围内沿断裂及破碎带或含矿层位采集了125件流体样品,基本达到了设计的采样密度要求。在采集流体样品的同时还采集了流体样品周围的岩石样品,用于确定其蚀变类型。选择有代表性的、未经风化、新鲜的样品进行采样,质量1~2 kg。采样时记录脉体的产状、出露长度、宽度及产出地层与位置,同时记录围岩的岩性、产状与蚀变情况。

将流体样品磨制成0.05~0.2 mm厚的双面抛光包裹体片,在普通显微镜下观察、记录主矿物特征、包裹体的大小、形态、分布、类型、充填度。照相、定位后,送LinKam TH600冷热台,对NaCl-H<sub>2</sub>O包裹体测定了充填度(F)、冰点(T<sub>m(ice)</sub>)和液-气均一温度(Th);对CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O包裹体测定了CO<sub>2</sub>充填度(F)、CO<sub>2</sub>固相的熔化温度(T<sub>m(CO<sub>2</sub>)</sub>)、CO<sub>2</sub>水合物溶解温度(T<sub>m(clathrate)</sub>)、CO<sub>2</sub>液气均一温度(Th(CO<sub>2</sub>))和CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O完全均一温度(Th);对含子矿物多项包裹体测定了充填度(F)、液-气均一温度(Th)和子矿物熔化温度(T<sub>m(dms)</sub>)。

做成分分析的样品,碎至40~60目,在双目镜下挑选单矿物5~15 g,使单矿物的纯度达到99.9%以上。将样品作前处理后,用RG202四极质谱仪测定包裹体中气相成分;液相成分则在日本岛津公司(SHIMADZU)生产的离子色谱仪(HIC-6A型,C-R5A色谱处理机)上测定;包裹体中稀土元素及重金属元素分析在Finnigan MAT公司生产的ICP-MS ELEMENT仪器上测定; $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均在MAT 251 EM质谱计上完成。

蚀变岩石样品常量元素化学分析采用XRF法,痕量元素化学分析采用ICP-MS与ICP-AES法,稀土元素化学分析采用ICP-AES法。矿化剂B元素测定用ICP-AES,F元素选择电极测定(PXST-216)Cl元素样品经H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>分解蒸馏,用HgNO<sub>3</sub>容量法测定。

设计书规定流体地质填图分两阶段进行,第一



阶段围绕已知矿床作较详细的研究,以指导面上填图,第二阶段再面上展开。但在实施时由于测试工作滞后,两个阶段有些重叠,造成在面上展开时某些工作带有一定的盲目性。笔者体会到,第一阶段较深入的流体和地质研究是极重要的,必须走在前面。

## 5 流体地质图内容

流体地质图应该是个什么模样,目前还没有一个十分清晰的答案。国内外有不少地学研究单位在进行这方面的努力,如蒙义峰等<sup>[21]</sup>在安徽铜陵进行的“铜陵矿集区流体蚀变填图与示踪研究”项目。笔者认为,流体地质图至少应反映流体子系统及流域分布范围、流体的性质、状态、成分、各种控矿地质要素(流体的输导系统)、各种矿化(矿床、矿点)与蚀变类型等内容(图1)。巍山—永平矿集区总体上蚀变甚弱,难于圈定,因此本次研究主要以古流体的直接样品——流体包裹体作为重点研究对象展开工作。巍山—永平矿集区流体地质图包括以下主要内容:控矿地质要素(输导系统)、各种主要的矿床(点)、成矿流体系统及流域、流体的盐度与均一温度、流体中的As、Cu、Co、Sb等重金属元素的含量与成矿流体的浓集中心。

### 5.1 控矿地质要素

巍山—永平矿集区控矿地质要素主要有:矿源层、岩性界面、氧化还原界面、构造、变质作用、岩性透水能力及岩浆活动等。

(1)可能的矿源层。本区为中生代凹陷区,习称滇西红层盆地,除巍山歪古村有少量二叠系上统出露外,主要由三叠系中统一白垩系及古近系、新近系组成。据本区各地层水系沉积物主要元素含量统计显示,Au、As、Sb、Hg、Co等元素高丰度值主要出现在三叠系中,Cu、Pb、Zn等元素高丰度值分布除三叠系外,还有侏罗纪地层,W、Sn、Mo、Bi等元素高丰度值主要分布于南部三叠纪地层的靠花岗岩体部位,F、B、Ba等元素的高丰度值主要分布于三叠纪和侏罗纪地层中。As、Sb、Hg等元素高于中国陆壳丰度的几倍甚至几十倍。三叠系是本区成矿元素高丰度值部位,是可能的矿源层。

(2)岩性界面控制。巍山—永平矿化集中区地层的岩性主要是碎屑岩系,仅三叠纪地层中的三合洞组为碳酸盐岩沉积。三合洞灰岩与上下泥岩之间的接触界面是一个重要的化学界面,它控制了本区大

部分锑矿的产出,如石岩村锑矿、罗旧村后山锑矿、笔架山锑矿等。

(3)氧化还原界面控制。盆地中三叠纪地层为黑色岩系,含有机质、甚至沥青质的黑色页岩,代表还原环境。而侏罗系到古近系和新近系为红层盆地沉积,含有在蒸发条件下形成的膏盐层,代表氧化环境。两者之间的界面是重要的氧化还原界面,控制本区主要有色金属矿产的分布。如厂街水泄铜钴矿、拥翠铜矿点、紫金山金矿点、田口村金矿点、扎村金矿等。

(4)构造控制。构造是成矿的重要控制条件,构造系统既是成矿热液运移的通道,又是矿体赋存的空间。

巍山—永平矿化集中区区域构造主要受西部澜沧江断裂带、东部金沙江—哀牢山断裂带及盆地中轴断裂的控制<sup>[17-19]</sup>,区内主导构造线的方向为北西向展布,晚期发育的北东向断裂切穿了早期北西向断裂。主导构造制约了盆地发展,对造成超大型规模的Pb、Zn成矿和大型钾盐成矿起着重大作用,并有幔源岩浆和流体活动的直接显示。区内次级断裂系统主要有南北向构造、北东向(北东东向)构造、东西向构造等。南北向线性构造主要分布于紫金山及其以西地区,控制了紫金山地区矿床的产出,是重要的控矿断裂。北东向(北东东向)断裂与紫金山地区金矿化关系密切。公郎弧形构造外带为一系列推覆断层,由南向北依次为回龙山推覆断层、拥翠推覆断层、新街推覆断层和石垭口推覆断层。拥翠铜钴矿化带就产于拥翠推覆断层中。

紫金山复式背斜、黑惠江断裂等是重要的金矿锑汞控矿构造,石岩村锑矿、姆沙科锑矿点、黑后箐锑矿点、扎村金矿、黑龙潭汞矿、茶雷村、五里巷金矿点等均受其控制。

总之,盆地周边向盆地内部的逆冲推覆及弧形构造,使盆地形成圈闭—半圈闭条件,避免矿液的逃逸;盆地内以三叠系为轴的背斜构造及相关断裂系统、盆地边缘弧形构造等是矿田尺度的控矿构造;多组断裂的交叉、层间破碎带是形成矿体的有利部位。

(5)岩性透水能力对成矿的控制。根据岩性的透水能力将区内地层划分为3个等级,即局部透水的、透水性好的和隔水的。在流体地质图中,具体表示为含盐局部透水层(Q、E、K、J<sub>3b</sub>),占盆地沉积的大部分;局部透水层(J<sub>2h</sub>J<sub>1y</sub>),主要分布于紫金山背斜与公郎

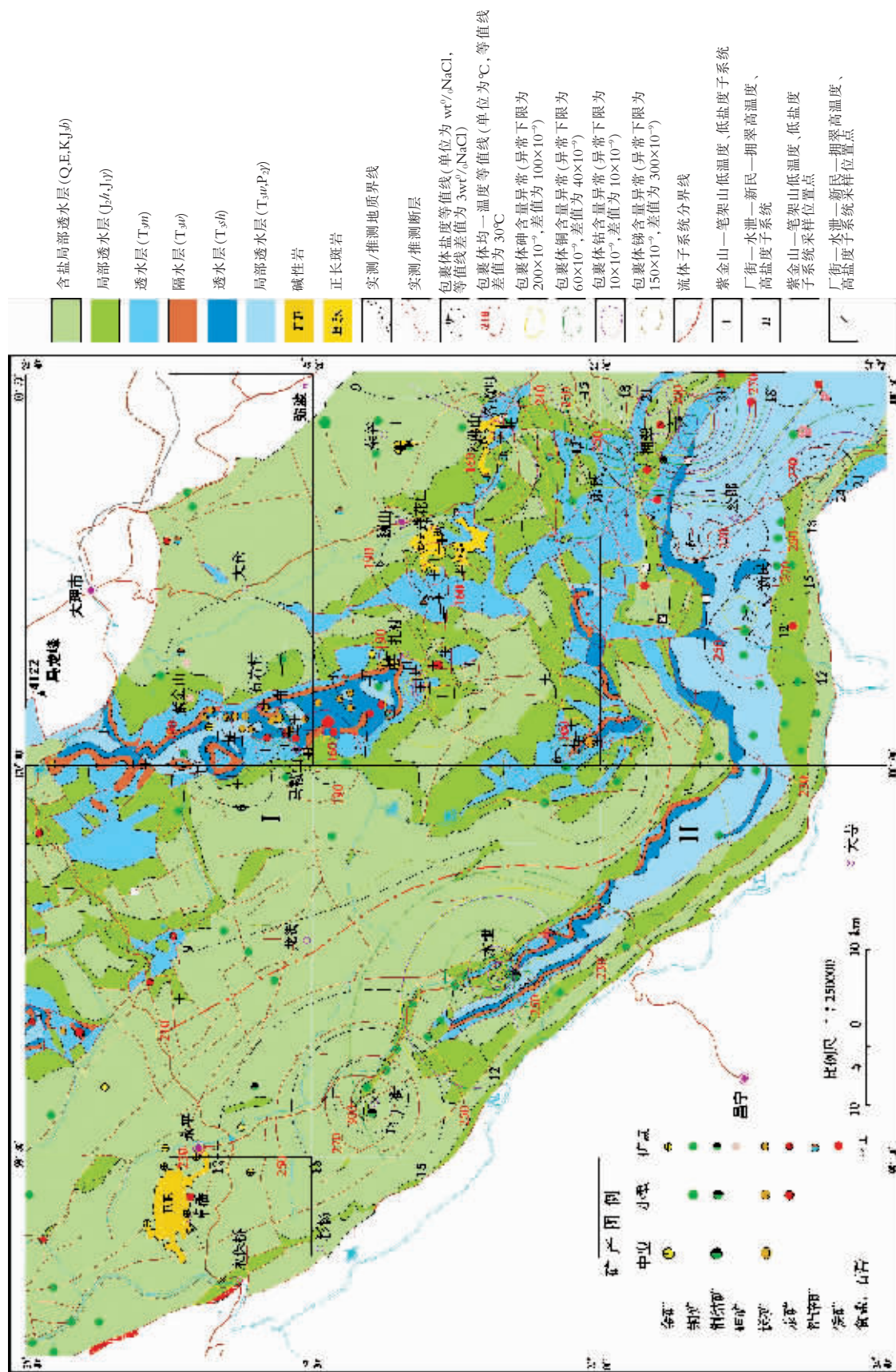


图 1 云南巍山—永平地区流体地质图

Fig. 1 Fluid-geological map of the Weishan-Yongping district, Yunnan



弧形构造带的外侧;透水层  $T_{3m}$  和透水层  $T_{3sh}$  构成紫金山背斜的主体和公郎弧构造带的外围,隔水层  $T_{3wl}$  主要分布于透水层  $T_{3m}$  与  $T_{3sh}$  的中间,起到一个很好的隔挡作用;局部透水层( $T_{3w}, P_{2y}$ )主要分布于公郎弧形构造带,少量分布于紫金山背斜核部。透水层与隔水层的相间排列,形成有效的圈闭,在二者之间的接触面,是有利的成矿部位。

(6) 岩浆活动对成矿的控制。巍山—永平矿集区新生代岩浆活动主要有莲花山—各救母石英二长斑岩、正长斑岩群和永平卓潘碱性辉石岩、辉石正长岩、霞石正长岩及脉岩等组成的碱性杂岩体。岩浆岩中金属元素 Au、矿化剂元素 F、Cl 含量较高,局部见到金矿化。

莲花山石英二长斑岩及卓潘碱性斑岩的 Ar—Ar 年龄分别为 38.6 Ma 与 36.5 Ma<sup>[20]</sup>, 与整个兰坪—思茅盆地、昌都盆地及两侧的斑岩及相关火山岩一致,代表喜马拉雅运动第一幕(兰坪运动)重要构造—岩浆—成矿事件。莲花山岩体周围接触带蚀变岩中伊利石 K—Ar 年龄为 38.6 Ma<sup>[20]</sup>, 代表了本矿集区成矿年龄下限。参考玉龙铜矿带和哀牢山金矿带的主要成矿期(分别为 30 Ma 左右及 26 Ma)<sup>[22-23]</sup>, 推测本矿集区成矿年龄的上限为 20 Ma 左右,可能与哀牢山—红河断裂由左旋转为右旋的时间相当。本区成矿作用时间与区域构造—岩浆—成矿事件时间的一致性,说明灾变(突变)性地质事件对成矿作用的控制。所以莲花山石英二长斑岩与卓潘碱性斑岩岩浆活动对本区成矿有重要作用,既是重要的矿源和流体来源,又是驱动成矿流体循环的主要热源。

## 5.2 流体子系统及流域的划分

根据成矿类型、矿床(矿化)点的分布、流体包裹体中重金属元素在区域上的分布特征、地球化学异常特征、构造环境、典型矿床流体包裹体均一温度、成矿压力、气液成分、稳定同位素等特征,在云南巍山—永平地区铜金多金属矿集区划分出紫金山背斜与公郎弧两个成矿流体子系统,并依据两个流体子系统的外围点用内插法确定两个流体子系统之间的边界(图 1)。

公郎弧成矿流体子系统流域主要沿澜沧江大断裂分布在拥翠、公郎、新民、水泄、厂街地区,主要出现铜、铜钴、铅锌、铁及少量盐类矿床或矿化点。紫金山背斜成矿流体子系统流域主要沿紫金山背斜分布

于笔架山、大佛山、莲花山、扎村、马鞍山、石岩村、紫金山等地区,主要出现金、铋、汞、砷、铅锌、铜矿床或矿化点。从表 1<sup>[24]</sup>中可以看出:

(1) 两个成矿流体子系统均含有 NaCl—H<sub>2</sub>O 包裹体与 CO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O 包裹体,此外,紫金山背斜成矿流体子系统出现了富液相包裹体(I a)、富 H<sub>2</sub>O 相包裹体(II a)及少量富气相包裹体(I c);公郎弧成矿流体子系统出现了富液相包裹体(I a)、富 H<sub>2</sub>O 相包裹体(II a)、富 CO<sub>2</sub> 包裹体(II b)和含子矿物的多相包裹体(III)。

(2) 公郎弧成矿流体子系统的均一温度为 190~340℃,高于紫金山背斜成矿流体子系统的 130~280℃。

(3) 公郎弧成矿流体子系统的盐度为 (22~26) wt%NaCl, (30~35) wt%NaCl, 远高于紫金山背斜成矿流体子系统的 (0.1~18) wt%NaCl。

(4) 气相成分均以 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 为主,含微量 CH<sub>4</sub>、CO、N<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和 Ar。紫金山背斜成矿流体子系统的液相成分阴离子以 Cl<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主,属 Cl<sup>-</sup>(F<sup>-</sup>)-(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)型,阳离子以 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 为主,属 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-(K<sup>+</sup>)型;公郎弧成矿流体子系统的阴离子以 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主,属于 Cl<sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>型,阳离子以 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 为主,属 Na<sup>+</sup>-(Ca<sup>2+</sup>)型。

(5) 两个流体子系统 REE 分配形式均为轻稀土富集型,均具不同程度的负铈异常,紫金山背斜成矿流体子系统的  $\delta Eu$  多为负异常,而公郎弧成矿流体子系统的  $\delta Eu$  多为正异常。

(6) 紫金山背斜成矿流体子系统的成矿元素组合为 As—Sb—Cu—Ni—U, Co/Ni < 0.1, 总体上具较高的 Sb、As 含量,区域化探异常为 Au—Sb—Hg—As 组合;公郎弧成矿流体子系统的成矿元素组合为 Cu—Co—As—Ni—Ag, Co/Ni > 0.5, 总体上具较高的 Cu、Co、As 含量,区域化探异常为 Cu—Co—Au—Sb—Hg—As 组合。

(7) 紫金山背斜矿石中流体包裹体  $\delta^{13}C$ 、 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  水在  $\delta D$ — $\delta^{18}O$  图上<sup>[25]</sup>投影点落在原生岩浆水下方靠近原生岩浆水的区域上,在  $\delta^{13}C$ — $\delta^{18}O$  图解上<sup>[26]</sup>,主要落入岩浆—地幔源区及沉积有机物氧化作用趋势线上,表明热液来源于岩浆水与大气降水、地层水的混合,并以大气降水、地层水为主,部分矿石中流体发生了强烈的氧漂移<sup>[24]</sup>。公郎弧成矿流体子系统在  $\delta D$ — $\delta^{18}O$  关系图上<sup>[25]</sup>,热液的投影点主要落

入原生岩浆水的区域,在  $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$  图解上<sup>[26]</sup>,落入岩浆—地幔源区及附近,显示矿床中  $\text{CO}_2$  的岩浆—地幔源特征<sup>[24]</sup>。

(8) 公郎弧成矿流体子系统的 pH、 $f_{\text{O}_2}$  总体上略高于紫金山背斜成矿流体子系统。据  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  包裹体显微测温数据推算,公郎弧成矿流体子系统具有较高的成矿温压与成矿深度。

通过两个流体子系统的识别,笔者确认公郎弧以 Cu、Co 为特征的矿化带,同紫金山背斜以 Au、Sb、Hg 为特征的矿化带是两个不同的矿化系统,并揭示了各个矿化带内部不同矿床(点)之间的内在联系。流体地质填图的这种功能,是一般化探扫面工作

所不具备的。

由于时间和经费所限,填图的面积还不够大,整个填图区(1000  $\text{km}^2$ )还落在成矿流体流域之内,所以没有圈定成矿流体流域的外边界。但从另一个角度来看,巍山—永平地区成矿流体流域是有相当规模的。

### 5.3 流体温度、盐度及其他特征

(1) 流体均一温度分布特征:在流体地质图中,根据均一温度  $210^\circ\text{C}$  线,将区内流体系统划分为中高温流体子系统和低温流体子系统。中高温流体子系统主要分布于厂街—水泄—新民—拥翠地区,与公郎弧构造带重叠,其中高温高值点分别是:厂街

表 1 巍山—永平铜多金属矿化集中区紫金山背斜成矿流体子系统与公郎弧成矿流体子系统特征对比

Table 1 Comparison of the characteristics between the Zijinshan anticline and Gonglang arc structure ore-forming fluid sub-systems in the Weishan—Yongping copper-gold-polymetallic mineralization district, Yunnan Province

	紫金山背斜成矿流体子系统	公郎弧成矿流体子系统
包裹体类型	富液相包裹体(I a)、富 $\text{H}_2\text{O}$ 相包裹体(II a)及少量富气相包裹体(I c)	富液相包裹体(I a)、富 $\text{H}_2\text{O}$ 相包裹体(II a)、富 $\text{CO}_2$ 包裹体(II b),和含子矿物的多相包裹体(III)
均一温度/ $^\circ\text{C}$	130~280	190~340
盐度/ wt%NaCl	0.1~18	22~26, 30~35
液相成分	$\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$
F <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>	0.0006~0.33	0.0001~0.24
Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.4~424	0.54~26.88
Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup>	1.2~44.3	4.24~17.45
气相成分	$\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 为主,含微量 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、Ar	$\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 为主,含微量 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、Ar
$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$	0.01~0.29	0.03~0.14
$(\text{CH}_4+\text{CO})/\text{CO}_2$	0.004~0.49	0.008~0.041
体系	NaCl-H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub>	NaCl-H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub>
$\Sigma\text{REE}/10^{-12}$	219~3581	211~9134
$\Delta\text{Ce}$	0.26~0.93	0.07~0.92
$\Delta\text{Eu}$	0.74~1.37,多为负异常	0.4~214,多为正异常
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	3.2~44.45	3.28~126
流体成矿元素组合	As-Sb-Cu-Ni-U	Cu-Co-As-Ni-Ag
Sb/ $10^{-9}$	0.31~2674	4.15~25.77
Co/ $10^{-9}$	0.07~8.01	0.48~123
Cu/ $10^{-9}$	1.31~116	64~447
As/ $10^{-9}$	33.3~405	216~779
Co/Ni	<0.1	>0.5
$\delta\text{D}/\text{‰}$	-117.4~-78	-83.8~-71
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	4.15~32.3	4.17~9.99
$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	-26.4~-1.5	-3.9~4.4
pH	5.29~7.09	6.67~7.93
Eh/ V	-0.11~2.84	-0.83~0.12
$f_{\text{O}_2}/10^5\text{ Pa}$	0~0.20	0.32~7.37
成矿压力/ MPa	30~130	100~225
成矿温度/ $^\circ\text{C}$	228~255	317~346
成矿深度/ km	1.05~6.67	3.51~7.89

注:表中均一温度、盐度、 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  由中国地质科学院矿产资源研究所测试;气液相成分、微量元素由中国科学院矿物资源探查中心测试。

为 347.1℃;水泄为 263.93℃;新民分别是 293.48℃、251.83℃;公郎为 347.1℃和 286.33℃;拥翠为 389.2℃、295.1℃、299.6℃、263.5℃、293.9℃<sup>[24]</sup>。

按 230℃均一温度线圈定,将本区分割为厂街水泄地区和新民拥翠地区;按 250℃均一温度线圈定,表现为公郎—拥翠地区规模最大,厂街地区次之,所以单从成矿均一温度分布推测,拥翠地区是成矿有利的地区之一。

中低温流体子系统主要分布于紫金山背斜、笔架山和莲花山地区,按 190℃均一温度线圈定,分为紫金山地区、马鞍山地区和笔架山莲花山等 3 个地区;其中 160℃均一温度线圈定区域主要是笔架山到莲花山的中间部分和马鞍山的小部分。

(2) 流体盐度分布特征:流体地质图中,与 210℃均一温度线相近的盐度线是 9 wt% NaCl,据此分为厂街、拥翠中高盐度地区和紫金山、莲花山低盐度地区。

厂街、拥翠中高盐度地区,以 12 wt% NaCl 线将此区分割为厂街高盐度地区和拥翠高盐度地区,其中厂街高值点为 33.07 wt% NaCl;公郎高值点为 28.2 wt% NaCl;拥翠高值点为 32.3 wt% NaCl, 31.92 wt% NaCl, 和 22.07 wt% NaCl<sup>[24]</sup>;规模以拥翠地区最大。

紫金山、莲花山低盐度地区以 6 wt% NaCl 盐度圈定出石岩村、莲花山西、各教母和笔架山等区域,3 wt% NaCl 盐度主要分布在莲花山西小部分地区内。

#### 5.4 巍山—永平铜金多金属矿化集中区成矿元素浓集中心

根据流体包裹体中 Cu、Co、As、Sb 元素含量及分布情况<sup>[24]</sup>,巍山—永平铜金多金属矿化集中区存在紫金山、扎村、石岩村、笔架山、水泄、新民、拥翠等 7 个成矿元素浓集中心(图 1)。从图 1 可以看出,Cu 的浓集中心位于水泄、拥翠和公郎,田口村附近也有富集的显示。水泄铜钴矿区矿石中流体 Cu 含量高达  $431.16 \times 10^{-9}$ ,非矿石中流体仅为  $2.79 \times 10^{-9} \sim 40.03 \times 10^{-9}$ ;拥翠和公郎地区 Cu 高值区间为  $220.21 \times 10^{-9} \sim 447.15 \times 10^{-9}$ ,一般  $2.52 \times 10^{-9} \sim 119.93 \times 10^{-9}$ ;田口村样品 Cu 含量为  $159.34 \times 10^{-9}$ ,新民铜矿区流体中 Cu 含量为  $63.97 \times 10^{-9} \sim 113.25 \times 10^{-9}$ ,其余样品则分布于  $2.31 \times 10^{-9} \sim 47.84 \times 10^{-9}$ 。

Co 的浓集中心位于拥翠、水泄、扎村附近,也显

示出 Co 的富集。拥翠地区 Co 含量高值区间为  $114.64 \times 10^{-9} \sim 134.3 \times 10^{-9}$ ,一般为  $0.19 \times 10^{-9} \sim 6.94 \times 10^{-9}$ ;水泄 Co 含量为  $54.38 \times 10^{-9}$ ,其他样品仅为  $0.06 \times 10^{-9} \sim 0.91 \times 10^{-9}$ ;扎村地区高值点为  $36.36 \times 10^{-9}$ ,一般样品仅为  $0.07 \times 10^{-9} \sim 8.01 \times 10^{-9}$ 。

As 的浓集中心位于扎村、紫金山、水泄、拥翠—公郎—新民,紫金山仅显示出较小的异常。扎村 As 的高值区间为  $160.36 \times 10^{-9} \sim 1399.91 \times 10^{-9}$ ,紫金山样品为  $181.18 \times 10^{-9}$ ,一般样品为  $3.94 \times 10^{-9} \sim 78.06 \times 10^{-9}$ ;水泄高值区间为  $559.37 \times 10^{-9} \sim 591.64 \times 10^{-9}$ ,一般样品仅为  $16.29 \times 10^{-9} \sim 44.51 \times 10^{-9}$ ;拥翠—公郎—新民地区高值区间为  $215.64 \times 10^{-9} \sim 779.25 \times 10^{-9}$ ,一般样品为  $12.41 \times 10^{-9} \sim 105.17 \times 10^{-9}$ 。

Sb 的浓集中心位于石岩村,成矿流体中 Sb 的含量高达  $2673.95 \times 10^{-9}$ ,其余样品仅为  $0.01 \times 10^{-9} \sim 164.83 \times 10^{-9}$ ;笔架山锑矿未采到可供测试重金属元素的样品,推测笔架山锑矿区也应是锑的浓集中心。

本次在巍山—永平地区流体地质填图,主要依据流体中成矿元素的浓度圈定了上述几个浓集中心,而流体动力学方面的详细研究基本未做,所以只能定性地判断流体的流向和聚集中心。

## 6 主要认识

(1) 云南巍山—永平地区铜金多金属矿化集中区存在 2 个成矿流体子系统:即紫金山背斜成矿流体子系统与公郎弧成矿流体子系统。公郎弧成矿流体子系统主要沿澜沧江断裂带分布于拥翠、公郎、新民、水泄、厂街地区;紫金山成矿流体子系统主要沿紫金山背斜分布于莲花山、扎村、石岩村、紫金山、笔架山地区。Sb 的浓集中心位于石岩村、笔架山;Co 的浓集中心位于拥翠、水泄,扎村附近也显示出 Co 的富集;Cu 的浓集中心位于水泄、拥翠和公郎,田口村附近也有富集的显示;As 的浓集中心位于扎村、水泄、拥翠、紫金山。

(2) 紫金山背斜成矿流体子系统包裹体类型主要为富液相包裹体(Ia)、富 H<sub>2</sub>O 相包裹体(IIa)及少量富气相包裹体(Ic);均一温度为 130~280℃;盐度为(0.1~18)wt%NaCl。气相成分以 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 为主;液相成分中阴离子以 Cl<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主;阳离子以 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 为主,属 NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 体系。流体中成矿元素组合为 As-Sb-Cu-Ni-U,总体上具较高的 Sb、As 含量;稳定同位素特征表明成矿溶液



主要来自岩浆水与大气降水、沉积盆地地层水的混合。紫金山背斜成矿流体子系统成矿压力大约为30~130 MPa, 相应的形成温度大约为228~255℃, 成矿深度为1.05~6.67 km。

(3) 公郎弧成矿流体子系统包裹体类型主要有富液相包裹体(I a)、富H<sub>2</sub>O相包裹体(II a)、富CO<sub>2</sub>包裹体(II b)和含子矿物的多相包裹体(III); 均一温度为190~340℃与370~410℃; 盐度为(22~26) wt%NaCl, (30~35) wt%NaCl。气相成分以H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>为主。液相成分中阴离子以Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为主; 阳离子以Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>为主, 属NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>体系。流体中成矿元素组合为Cu-Co-As-Ni-Ag, 总体上具较高的Cu、Co、As含量。稳定同位素特征表明成矿溶液主要来源于岩浆水, 并受到大气降水及地层水的混合。公郎弧成矿流体子系统成矿压力大约为100~225 MPa, 成矿温度为317~346℃, 成矿深度约为3.51~7.89 km。

(4) 巍山—永平矿集区成矿年龄下限为38.6 Ma, 成矿年龄的上限约为20 Ma左右。本矿集区成矿年龄下限、上限与两次重要的构造事件——兰坪运动的起始时间及哀牢山—红河断裂由左旋转为右旋的时间相当。

(5) 在盆地两侧挤压推覆构造应力及岩浆作用热力驱动下, 紫金山背斜和公郎弧两个流体子系统的流体在盆地中运动, 当遇到氧化还原界面或遭受流体混合、相分离及断裂诱发的减压沸腾时, 因物理化学条件发生重大变化而导致成矿作用的发生。

## 7 结语

地质流体与成矿效应是当代地学的重大前沿研究领域。在更大尺度上, 研究区域流体的流体域分布、来源组成、运移机制、输导系统及聚集过程, 可能是解决成矿集聚过程和成矿机制问题, 从而指导找矿的有效途径。本研究项目作为首次流体地质填图试验, 较好地完成了将流体地质理论应用于找矿实践的尝试, 基本上是成功的。本次研究得到的巍山—永平矿集区流体地质图, 反映了该区成矿流体的性质与状态, 反映了2个成矿流体子系统的基本特征, 圈定了2个成矿流体子系统的流域范围及7个成矿流体浓集中心(紫金山、扎村、石岩村、笔架山、水泄、新民、拥翠)。这些浓集中心与已知矿化点分布、化探异常及有利的地质条件基本吻合, 成为该区进一步

找矿预测的重要依据之一。实验证明, 流体地质填图不失为一种有效的找矿手段。本次实践所积累的经验教训, 将为今后更加完善流体地质填图方法提供具体的借鉴。

致谢: 本项目从立项到实施过程, 得到中国地质调查局叶天竺原局长、张洪涛副局长、王瑞江主任、陈仁义副主任、薛迎喜处长, 国土资源部高咨中心黄崇轲研究员, 成都地质矿产研究所潘桂棠原所长、丁俊所长, 云南地质调查院李文昌副院长及秦德厚高级工程师、颜景耀高级工程师、周耀军高级工程师、王宝禄高级工程师, 云南地质矿产局第三地质大队和中华总工程师、赵维军工程师, 中国地质科学院矿产资源研究所侯增谦研究员, 中国科学院地质与地球物理研究所刘建明研究员, 中国地质大学(北京) 翟裕生院士、邓军教授、杜杨松教授、顾德林教授、万晓樵教授、田明中教授及很多领导和专家的支持, 在此表示衷心的感谢。

## 参考文献(References):

- [1] Fyfe W S, Price N N, Thompson A B. Fluid in the Earth's Crust [M]. Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.
- [2] 卢焕章, 李秉伦, 沈昆, 等. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1990. Lu Huanzhang, Li Binglun, Shen kun, et al. Fluid Inclusion Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990 (in Chinese).
- [3] 卢焕章. 成矿流体. 北京: 北京科学技术出版社, 1997. Lu Huanzhang. The Ore-Forming Fluids[M]. Beijing: Beijing Sciences and Technology Publishing House, 1997 (in Chinese with English Abstract).
- [4] 卢焕章, 郭迪江. 流体包裹体研究的进展和方向[J]. 地质论评, 2000, 46(4): 385~392. Lu Huanzhang, Guo Dijiang. Progress and trends of researches on fluid inclusions[J]. Geological Review. 2000, 46(4): 385~392 (in Chinese with English abstract).
- [5] Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997. 657~68.
- [6] 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. Zhai Yusheng, Deng Jun, Li Xiaobo. Essentials of Metallogeny. Beijing: Geological Publishing House, 1999 (in Chinese with English abstract).
- [7] Sorby H C. On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks[J]. Geol. Soc. London Quart. J., 1858, 14: 453~500.
- [8] Roedder E. Fluid inclusion[J]. Reviews in Mineralogy, 1984, 12: 102~115, 253~266.
- [9] Smith T J, Kesler S E. Relation of fluid inclusion geochemistry to wall rock alteration and lithogeochemical zonation at the Hollinger-McIntyre gold deposit, Timmins, Ontario, Canada [J]. Can. Inst.

- Mim. Metall., 1985,34:35~94.
- [10] 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等.壳幔物质与深部过程[J].地质前缘, 1998,5(3):67~75.  
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al., Crust-mantle materials and deep processes. Earth Science Frontiers, 1998,5(3):67~75. (in Chinese with English abstract).
- [11] 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等.岩石圈/软流圈系统的大灾变与巨型矿集区形成[A].见:裴荣富等主编.深部构造作用与成矿[C].北京:地质出版社,1999.  
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al. Catastrophe in lithosphere /asthenosphere and the formation of giant mineralization districts[A] In:Pei Rongfu, et al (eds). Deep Structural Processes and Mineralization[C]. Beijing: Geological Publishing House ,1999 (in Chinese).
- [12] 徐启东,莫宣学.三江中段新特提斯阶段区域流体的性质与状态[J], 岩石学报,2000, 16(4):639~648.  
Xu Qidong, Mo Xuanxue. Characteristics and state of regional fluids in middle portion of Sanjiang region during the Neo-Tethyan stage[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000,16(4): 639~648 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘增乾,李兴振,叶庆同,等.三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律[M].北京:地质出版社,1993.  
Liu Zengqian, Li Xingzhen, Ye Qingtong, et al. Division of Tectono-magmatic Zones and the Distribution of Deposits in the Sanjiang Area[M]. Beijing: Geological Publishing House ,1993 (in Chinese with English abstract).
- [14] 莫宣学,路凤香,沈上越,等.三江特提斯火山作用与成矿[M].北京:地质出版社,1993.  
Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, et al. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House,1993(in Chinese with English abstract).
- [15] 莫宣学,沈上越,朱勤文,等.三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿[M].北京:地质出版社,1998.  
Mo Xuanxue, Shen Shangyue, Zhu Qinwen, et al. Volcanic Rocks and Ophiolites and Related Mineralization in Middle-southern Sanjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈毓川.中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M].北京:地质出版社,1999.  
Chen Yuchuan. Mineral resources prospect evaluation of the major metallogenic belts in China [J]. Beijing: Geological Publishing House, 1999 (in Chinese with English abstract).
- [17] 云南省地矿局.云南省区域地质志[M].北京:地质出版社,1990.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. Regional Geology of Yunnan Province [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1990 (in Chinese).
- [18] 杨嘉文,李有本,余莉雯.扎村金矿床地质特征[J].云南地质, 1991,10(1):71~104.  
Yang Jiawen, Li Youben, Yu Liwen. Geological characteristics of Zacun gold deposit[J]. Yunnan Geology, 1991, 10(1):71~104.
- [19] 王宝禄,李文昌.维西—景洪裂陷带初步研究[J].云南地质, 2001,20(1):39~45 (in Chinese with English abstract).  
Wang Baolu, Li Wenchang. Preliminary study of Weixi—Jinghong rift belt[J]. Yunnan Geology, 2001,20(1):39~45.
- [20] 董方浏.云南巍山—永平矿化集中区铜金多金属矿床成矿条件及成矿潜力研究.北京:中国地质大学,2002.  
Dong Fangliu. Study on Metallogenic Condition and Potentiality of Copper-Gold-Polymetallic Deposits in Weishan-Yongping Mineralization District, Yunnan. Beijing:China University of Geosciences,2002.
- [21] 蒙义峰,徐文艺,杨竹森,等.流体地质填图:一种新的地质调查方法.地质通报,2002.21(3):181~182.  
Meng Yifeng, Xu Wenyi, Yang Zhusen, et al., 2002. Fluid-geological mapping—a new method for geological survey. Geological Bulletin of China, 21(3):181~182 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张玉泉,谢应雯.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),1997,27:289~293.  
Zhang Yuquan, Xie Yingwen. Chronology and Nd, Sr isotopic characteristics of alkaline-rich intrusive rocks along Ailaoshan—Jinshajiang zone. Science in China, Ser D, 1997, 27:289~293 (in Chinese).
- [23] 黄崇轲,白冶,朱裕生,等.中国铜矿床[M].北京:地质出版社,2001.  
Huang Chongke, Bai Ye, Zhu Yusheng, et al. Copper deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House ,2001(in Chinese).
- [24] 王勇.云南巍山—永平铜金多金属矿化集中区成矿流体特征及流体地质填图研究[D].北京:中国地质大学,2002.  
Wang Yong. Study on the Characteristics of Metallogenic Fluids and Fluid-Geological Mapping in the Weishan-Yongping Copper-Gold-Polymetallic Mineralization District, Yunnan [D]. Beijing:China University of Geosciences Press,2002.
- [25] Heaman L, Ludden J N. Applications of radiogenic isotope systems to problems in geology. MAC Short Course, 1991, (19):498.
- [26] 刘建明,刘家军.滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J].矿物学报,1997,17(4):448~456.  
Liu Jianming, Liu Jiajun. Basin fluid genetic model of sediment-hosted micro-disseminated gold deposits in the gold-triangle area between Guizhou, Guangxi and Yunnan [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1997,17(4): 448~456 (in Chinese with English abstract).