

北武夷地区逆冲推覆构造的特征及其控矿作用

余心起, 吴淦国, 张 达, 狄永军, 代堰锴, 邱骏挺

YU Xin-qi, WU Gan-guo, ZHANG Da, DI Yong-jun, DAI Yan-pei, QIU Jun-ting

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

State Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:北武夷地区成矿地质条件优越, 矿产资源分布广泛, 而广泛发育的推覆构造深刻影响着矿床的成生与保存。区域性推覆构造是成矿前、成矿期还是成矿后的构造, 其精细结构特征如何, 是否具有控岩控矿作用, 如果是破矿作用, 是否造成矿体重复增大或者隐伏、缺失等问题, 严重影响着地质找矿的效果。建议开展面积性、追索性的路线地质调查, 查明逆冲推覆构造的区域分布、不同单元的产状和构造样式, 分别采用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 和 $\text{Re}-\text{Os}$ 定年技术测定推覆构造和矿体的形成时代, 结合定量分析及精细构造解析, 研究构造与矿床的成生联系, 预测隐伏矿体可能的位置, 进而为北武夷地区寻找隐伏矿床和扩大矿床远景提供参考。

关键词:推覆构造; $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年; $\text{Re}-\text{Os}$ 定年; 控矿; 破矿; 北武夷地区

中图分类号: P542 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2008)10-1667-11

Yu X Q, Wu G G, Zhang D, Di Y J, Dai Y P, Qiu J T. Thrust nappe structure and its ore-controlling effects in the North Wuyi area, China. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(10):1667-1677

Abstract: The North Wuyi area is characterized by advantageous mineralizing geological conditions and widespread mineral resources, but the formation and conservation of ore deposits are mainly controlled by thrust nappe structure. Many problems seriously affect the results of geological survey and mineral exploration. These problems include: whether regional thrust nappe structure is formed before, during or after mineralization, how about its fine structure characteristics, whether it has rock- and ore-controlling effects, and whether destruction, if any, may cause orebodies to be enlarged or buried or absent. This paper proposes the following: carry out areal and tracing geological reconnaissance, ascertain the regional distribution of thrust nappe structure and attitudes and structural patterns of different units, use $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ and $\text{Re}-\text{Os}$ dating techniques to determine the ages of formation of the thrust nappe structure and orebodies, use quantification analysis and fine structural analysis to study the genetic relations between the thrust and ore deposits and predict the possible location of hidden orebodies, and then further provide reference for looking for hidden ore deposits and enlarging ore prospects in the North Wuyi area.

Key words: thrust nappe structure; $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating; $\text{Re}-\text{Os}$ dating; ore control; ore damage; North Wuyi area

几乎所有的金属矿床均受构造控制。构造既是矿体赋存的部位, 也是控制区域内各种地质体之间耦合关系的主导因素。构造是成矿流体运移的主要驱动力, 与成矿流体构成了一个密切联系的系统。作为重要的构造类型之一, 逆冲推覆构造对于矿床的形成具有重要的控制作用, 成为某些铜、铅锌矿床的

重要控矿要素^[1-3]。同时, 构造活动也会对已形成的矿床产生破坏作用。因此, 通过对构造控矿特征及其构造活动形成的产物(断裂构造岩和充填于断裂构造中的矿脉)的研究, 可以探讨不同性质断裂构造的控矿、容矿和破矿作用, 进而指导在推覆构造发育的成矿带开展找矿工作^[3-6]。

收稿日期: 2008-05-12; 修订日期: 2008-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目《北武夷地区逆冲推覆构造及其对铜铅锌矿床的控制作用》(批准号: 40372050) 资助。

作者简介: 余心起(1962-), 男, 博士, 教授, 构造地质学和沉积大地构造学专业。E-mail: yuxinqi@cugb.edu.cn

“武夷山成矿带”是中国东南部一条重要的铜多金属成矿区带,已被列为全国16个重点成矿区带之一。北武夷地区成矿地质条件优越,矿产资源分布广泛^[1],为地质科研提供了有力的支撑和大量的研究对象。区内构造活动十分活跃,分布有北东向、东西向、北北东向3个系统的深大断裂,推(滑)覆构造广泛发育,深刻影响着矿床的成生与保存。如武夷山隆起带上的江西冷水坑银铅锌矿、永平铜矿、福建金竹坑铅锌矿等均受推覆构造控制。此外,伴随深大断裂带及推(滑)覆构造带的韧性剪切带十分发育,构成重要的控矿构造形迹。区内众多的金矿与韧性剪切带有关,而且铜、铅、锌、锡矿化与韧性剪切带也有一定的关系。

然而,北武夷地区的构造岩浆演化研究工作比较薄弱,构造的控矿、容矿和破矿作用研究均是在已知矿床的成因研究基础上附带进行的,大都在20世纪80年代中期以前已经完成。90年代以后,北武夷地区系统的科研工作基本处于停滞状态,与之相应,地质找矿也没有进展。最近几年来,自相继发现清流洛坑、贵溪冷水坑、会昌岩背、上杭紫金山、建瓯八外洋、尤溪峰岩、丁家山、浦城金竹坑等矿床之后,北武夷地区越来越为地质界所关注。但面积性的构造岩浆演化及构造控矿研究仍处于空白,对推覆构造的表现形式、精细构造组成、形成时代及其对矿床的控制或破坏作用研究甚少,且存在很大争议,严重地影响着地质找矿的效果。

1 国内外研究现状及分析

逆冲推覆构造研究自19世纪晚期以来已有100多年的历史。期间曾掀起过2次高潮。第一次在19世纪末期,以研究造山带内逆冲推覆构造为中心,第二次在20世纪70—80年代,以研究前陆褶皱冲断带为主题。进入90年代,逆冲推覆构造研究已将造山带内结晶基底逆冲构造与造山带外带即前陆褶皱冲断带结合起来,不再区别成并不相关的2类构造带^[8-10]。近年来,多数研究者重视了构造年代学的研究,如用⁴⁰Ar—³⁹Ar法测定不同时代的白云母、角闪石、钾长石等构造矿物的精确年龄^[11-15],其中不乏对逆冲推覆构造及其相关侵入体的精确测年^[16-17]。

20世纪70年代以来,马杏垣等对嵩山重力滑动构造及其伴生的逆冲断层的研究,推动了中国地质界对重力滑动、滑覆构造的深入研究。尤其在

80—90年代,我国在克拉通沉积盖层中发现了许多大型逆冲推覆构造^[18-20],并对这些逆冲推覆构造的类型和特征进行了深入研究,取得了继造山带和前陆逆冲推覆构造研究之后、活动性稳定单元上逆冲推覆构造研究的巨大成就。在构造年代学研究方面,已有多种同位素体系被用来确定造山带内的构造热事件或变质变形事件的准确年代^[21-22],其中⁴⁰Ar—³⁹Ar法应用最广^[23-29],国内现有水平可与国际媲美。由此表明,目前已经具备进一步开展推覆构造及其年代学研究的条件。

从2005年第八届世界矿床大会、2006年第八届全国矿床大会的规模和成果来看,新一轮全球性找矿高潮显示出强劲的势头,世界范围内对矿产品的需求日益增长。虽然近几年关注的焦点还是成矿理论^[30],但以控矿作用研究方面为主的成果比比皆是,其中不乏对推覆构造控矿的研究^[5,31-35]。国内在推覆构造控矿作用方面的研究程度一直不逊色于国外^[1-5,36-37]。如滇西兰坪盆地发育的与金沙江—哀牢山造山带和澜沧江—昌宁—孟连造山带有关的前陆逆冲推覆构造,构成对冲式构造。金沙江—哀牢山造山带前陆逆冲推覆构造对矿床和矿体的产出有明显的控制作用,其中金顶矿床受控于穹窿状主推覆断层,矿体产于推覆断层及其下盘的层间破碎带中;河西地区的各矿段由推覆前锋带上的冲起构造控制,矿体沿主推覆断层和反冲断层分布^[4]。云南的会泽铅锌矿经由几个找矿单位一起系统地建立了矿床成矿模式—构造控矿模式—构造地球化学场—隐伏矿预测准则,在该矿的麒麟厂矿床深部发现了一隐伏的8号大型铅锌矿体,可使矿山服务年限延长12年^[30]。钟南昌等^[38]对江西萍乡地区的推覆构造进行了研究,表明萍乡地区自中生代以来,北部形成了大规模的逆冲推覆构造,南部形成了复杂的滑覆构造,造成了本区北推、南滑的构造格局,许多推、滑覆体之下掩覆了大片含煤岩系,为寻找隐伏煤田带来了新的希望,同时南、北构造“交汇带”也是钴多金属矿床较理想的找矿靶区。陈爱根等^[39]、周珍琦^[40]对闽西南地区5种类型的推覆构造研究后认为,燕山早期中深层次逆冲推覆构造规模最大,对闽西南地区的隐伏煤田具有重要的控制作用。另外据媒体报道,福建省地矿局闽西地质大队利用推覆构造理论,2006年在以煤炭为勘探目标的大田元沙井田普查中,于缓倾角断裂中发现了铅锌矿体,为武夷山成矿带寻

找隐伏矿床开辟了新的途径。

横穿武夷山地区、始于 20 世纪 80 年代的四川黑水—台湾花莲地学断面地质地球物理探测,先后进行过地质学、地球物理和地球化学等多学科综合研究。蔡学林等^[40]完成了该断面 430 km 深的高分辨率面波层析成像,利用多学科综合分析与研究,编绘出四川黑水—台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构图,结果表明,武夷山地区的地壳与上地幔结构存在明显的不均一性,该区为东南沿海薄的岩石圈(80 km)向西部厚岩石圈(120 km)的过渡地带;武夷山推覆构造带前缘大田附近存在近乎连续的低速高导及低密度。地震测深显示,在台湾中央造山带岩石圈中上部存在楔状构造,楔形体尖端指向华南大陆^[40]。这一现象表明,晚新生代以来,断面通过地带岩石圈存在挤压构造变形,形成地壳上部向西仰冲,地壳下部和上地幔顶部向东俯冲的构造格局^[41-45]。武夷山推覆构造带与这一构造格局密切相关,而地壳与上地幔结构的不均一性为成矿流体的运移提供了一定的条件。

推覆构造在北武夷地区的规模有大有小,主要出露在重要的地质块体界线及其附近,对该区铜、铅、锌矿的形成具有重要的控制作用^[46],大多对早期层状矿化体的后期富集起到了关键作用,永平铜多金属矿、玉水铜铅锌矿及枫林铜硫矿床都有此控制规律。陈坊推覆构造使蓟县系变质岩系逆掩于石炭系—侏罗系之上,沿推覆构造两侧成串分布下湖铅(锌银)矿、牛背脊铅锌矿、铅坑铅锌矿、下汪家铜矿、田棚里铜多金属矿,表明推覆构造对金属矿产同样具有重要的成矿控矿意义。因此,对北武夷地区逆冲推覆构造及其控矿作用的研究非常必要。

2 北武夷地区推覆构造及其控矿作用实例

近几年赣东北、闽北一带地质找矿取得新进展。前人在找矿普查中,笔者等参加的《武夷山成矿带铜多金属矿成矿规律研究》项目进程中,均发现北武夷地区有区域性推覆构造存在。部分矿床的成矿可能与推覆构造造成的深埋有关,这些矿床的绿泥石化、绿帘石化矿化蚀变不是在地表形成的,而是在深埋过程中发生的次生变化。推覆构造既可控矿,又可破矿。

以往针对北武夷地区推覆构造的研究,一般多见于区域性地质调查成果中,如 1:5 万、1:20 万区域

地质调查报告,不涉及具体的矿体或矿床(区)。而对于更大区域如跨省区的北武夷山脉,北坡由北向南推覆、南坡由南向北推覆,是否同时期的对冲,或是不同时期逆冲后保留的“对冲”假象?目前尚无系统的科研成果。区域性(数千米)推覆构造的次级构造(几十至数百米)是否发育,精细结构特征如何,是否成为控岩控矿的空间?等等,还需要进一步的面积性工作和构造解析工作。因此,北武夷地区的推覆构造及其控矿作用仍有大量的选题值得研究。

此前对推覆构造控制具体矿床的研究往往局限于某个矿区或矿体。如 1983—1986 年期间进行的“永平铜矿地质”研究,所涉及的内容仅限于永平铜矿范围内,对整个北武夷地区的代表性有限。近几年对冷水坑矿区开展了构造控矿研究,但矿区出现的逆冲推覆构造是成矿前、成矿期还是成矿后?是否起着控矿、容矿或者破矿作用?破矿作用是否造成矿体重复增大或者隐伏、缺失?目前尚难定论,使得下步找矿方向难以确定。而大多数 90 年代之后的矿区普查,除提交储量要完成简单的报告外,基本上未作详细的研究,或研究不够彻底。

2.1 永平铜矿

永平铜矿位于铅山县城东南 13km 处,属铅山县永平镇和五都乡所辖,面积 16.5 km²,有横南铁路和上分线公路直达矿区,交通方便。永平铜矿系江西铜矿“五朵金花”之一,伴生的钨矿、金矿和银矿均达到大型规模,并可综合回收利用。

永平矿区地处萍乡—广丰深断裂的南侧,在区域近东西向构造背景上,叠加了北东—北北东向褶皱、断裂构造。矿区南侧即是北武夷山花岗岩基北端突起部,区内基底由蓟县系周潭岩组构成,上覆石炭系—三叠系盖层,上、下岩层均有较高的铜、硫、钨背景值,而且经历了华力西—印支、燕山期多次变质作用和构造、岩浆活动,具备优越的成矿条件。

“永平铜矿地质”研究成果表明,北北东向(10°)永平推覆构造由叠瓦式逆掩断层(F1、F2)及其间的岩片组成,由东向西推覆,位移距离 5km 以上,致使周潭岩组混合岩系逆掩于石炭系—二叠系之上,剖面上出现上、下 2 套混合岩系(分别称“上混合岩”和“下混合岩”),还可见及构造窗等,永平铜矿就赋存于中部岩片中(图 1)。伴随推覆活动发生推覆褶皱,形成区域性候家—嵩山倒转复背斜,永平矿区处其东翼,附近发育次级褶皱—天排山背斜和打字坪向

斜,均向西倒转、轴面倾向东,背斜核部矿体增厚、翼部变薄。断裂带的构造岩特征(糜棱岩及构造角砾岩)显示推覆构造具有明显的继承性和多次活动的特点,早期活动有利于矿化富集,在主推覆面附近或次级断裂中(主要在下盘)形成一些矿体,如矿区 I、IV、V、VI 四个矿体(带)就受 F1、F2 推覆断层控制,分布位置、产状与断裂基本一致;沿断裂带产出的花岗质脉岩(石英斑岩、花岗岩、花斑岩)显示晚期再次活动,对矿体起破坏作用(破碎带中常见矿石角砾、碎屑)。因此,推覆构造兼具成矿和破矿 2 个方面的作用,推覆构造作用一方面产生了动力变质热液使矿化进一步富集,另一方面又对矿体产生了破坏作用。

这一成果中对永平铜矿的含矿地层、控矿构造、岩浆演化、矿床分带、矿床成因等均进行了详细的研究,但其区域代表性意义有限。譬如,永平铜矿的东部上沪畈一带,出露多处与永平铜矿赋矿层位一致的石炭系层位,周边被周潭岩组混合岩系包围,构造特征类似于永平铜矿的“楔冲”样式,是否具备与永平一样的成矿条件,目前未见成果报道。

2.2 冷水坑矿区

区域内地层发育不全,分布极不均匀。上元古界震旦系变质岩是本区分布广泛的古老基底地层,其上覆盖层除侏罗系上统分布广泛外,尚有石炭系及第四系零星分布。

冷水坑矿田在区域构造上受广丰-萍乡深断裂及鹰潭-安远断裂带控制。区内震旦系变质岩基底地层紧密线型褶皱强烈,轴向主要为北东向,局部为北西及近东西向。上覆盖层主要为上侏罗统陆相火山岩,构成月凤山、天台山 2 个火山岩断陷盆地,轴向北东。断裂构造是本区重要的构造形式,北北东-北东向断裂系统为区内最主要的控岩控矿构造。北西向断裂系统规模较小。上述褶皱、断裂及火山构造的交叠,构成本区以北东向断裂带为骨干的基本构造格架。区内中生代火山岩主要为上侏罗统打鼓顶组、鹅湖岭组。火山构造盆地是在北东-北北东向构造断陷盆地的基础上,由火山喷发进一步沉陷而形成的。单个盆地常呈北东-北北东向展布,总体排布成近东西向的火山喷发带。

冷水坑矿田位于月凤山火山断陷盆地的西北部边缘。该断陷盆地面积约 500km²,是在早期北北东向构造断陷盆地的基础上,经多次强烈的火山喷发活动,逐渐发展形成的。

矿区褶皱构造不太发育,上侏罗统火山岩组成一走向北东、倾向南东、倾角 10~30°的缓倾单斜构造,在此单斜构造中,局部可见较开阔的轴向北西或北东向的褶曲,呈缓波状起伏。另外在震旦系中亦可见一些褶皱,规模一般不大,从数米至数百米,褶皱轴向多为北东-北北东向。

冷水坑矿区断裂构造很发育,以北东向和北西向 2 组断裂构造为主。

北东向断裂主要有 F1、F2 断裂(图 2)。

F1 断裂:产于矿区南东角,是区域性湖石断裂的中段部分。走向 NE50°左右,倾向北西,倾角 50~75°。沿断裂两侧有数米至数十米的挤压破碎带,断裂带宽数米至数十米不等,带内的构造岩有碎裂岩、角砾岩、碎粉岩、糜棱岩等,构造透镜体发育。在华家、岭西一带,该断裂北西盘一侧百米范围内,剪节理十分发育,可达 5~15 条/m,走向北东,倾向北西,倾角 60°左右。沿断裂有酸性岩脉贯入。冷水坑矿田银铅锌矿产在该断裂的北西盘,东南盘未见工业矿体。据钻孔资料,在断裂产出部位,可见 3~5 条断裂破碎带,单条破碎带宽数米至 26.08 m。F1 断裂活动时间很长,在晚侏罗世火山活动之前就已形成,它控制了区域火山构造的边界,一直延续到区内含矿花岗斑岩形成之后。断裂性质为压性-压扭性,表现为逆断层,并具有先压后扭再张,以压(扭)为主的活动特征。它是冷水坑矿田重要的导岩导矿构造,冷水坑矿田处于 F1 断裂的上盘,到目前为止下盘尚未发现工业矿体。

F2 断裂:分布在矿区中部地区,为区域推覆构造在矿田的出露部分。断裂破碎带宽 10~40 m,带内糜棱岩、断层角砾岩、碎裂岩及构造透镜体发育。据钻探资料,该断裂推覆距离大于 1000 m。总体走向北东 40~60°,遭受剥蚀后在平面上呈不规则状延伸;倾向北西,倾角变化较大:从浅部至深部,呈断坪-断坡-断坪-断坡状变化,即接近地表较缓约 5~20°,中部较陡约 30~45°,深部又变缓约 10~20°,更深部又有变陡的趋势。局部倾角甚至显现近似水平状。震旦系变质岩被该断裂推覆至上侏罗统火山岩之上,断裂破碎带中见有硅化、绿泥石化、碳酸盐化、绢云母化及铅锌银矿化等。糜棱岩带多发育在断裂带较宽部位。由于该断裂近地表倾角较小,在平面上受地形影响,断裂多呈弯曲状、港湾状、弧状等。F2 上盘变质岩厚数十米至数百米不等。

F2 的派生断裂与 F2 同时产生,有北东、北北东、近东西、近南北向及北西向共 5 组,是矿区主要的赋矿断裂。

F2 断裂之下盘地层为正常层序。在矿田之中部钻孔中,-600 m 标高之下见有侏罗系上统火山岩覆盖在石炭系下统梓山组及震旦系下统老虎塘组地层之上。F2 断裂主要形成于晚侏罗世鹅湖岭喷发旋回以后,花岗斑岩侵入前,成岩时和成矿前。花岗斑岩沿断裂带贯入,岩体顶面与变质岩、混合岩直接接触,界面平整清晰,变质岩中见有花岗斑岩岩枝侵入和银铅锌硫化物矿脉充填。花岗斑岩体与银铅锌矿体的产状均明显受到近南北与近东西向 2 组追踪断裂的控制,从

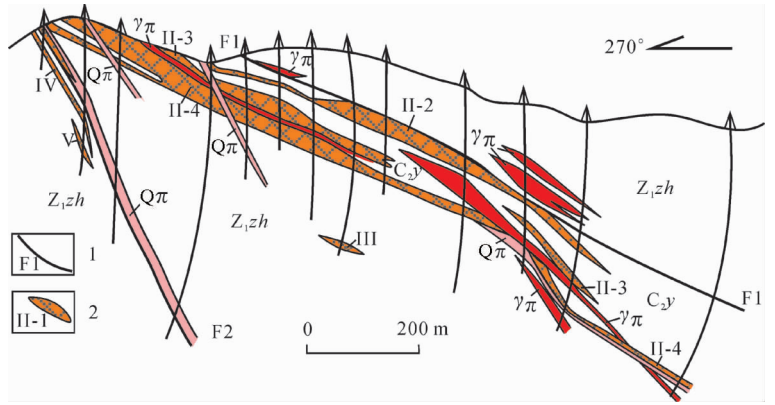


图 1 江西省铅山县永平铜矿 0 线剖面

Fig. 1 Section 0 of the Yongping ore deposit, Yanshan County, Jiangxi

C_{2y}—上石炭统叶家湾组;Z_{1zh}—下震旦统周潭群;γπ—花岗斑岩;

Qπ—石英斑岩;1—断裂及编号;2—矿体及编号

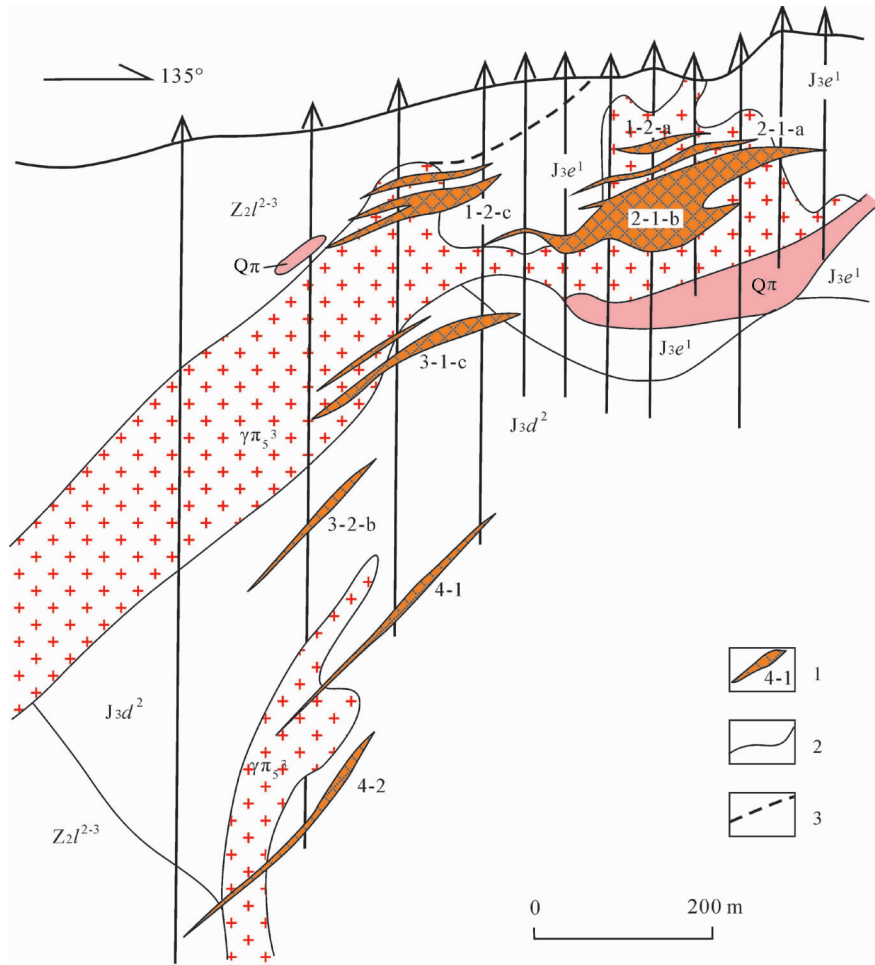


图 2 江西省贵溪市冷水坑矿区 124 勘探线地质剖面

Fig. 2 Section 124 of the Lengshuikeng ore deposit, Guixi City, Jiangxi Province

J_{3e}¹—鹅湖岭组下段;J_{3d}²—打鼓顶组上段;Z_{2l}²⁻³—老虎塘组中上段;γπ₃—花岗斑岩;

Qπ—石英斑岩;1—银矿体及编号;2—地质界线;3—断层

而显示 F2 控制了岩体侵位与储矿空间。震旦系上统变质岩被该断裂推覆至侏罗系上统火山岩之上,具屏蔽作用。由于 F2 上盘变质岩的良好封闭条件,形成含矿热液在屏蔽环境中充分交代充填成矿。F2 断裂及其派生断裂是本区重要的控岩控矿构造。

银路岭—银珠山赋矿花岗斑岩沿该断裂薄弱部位运移上侵定位,而后赋矿岩体携带的矿液沿其运移,并在次级断裂裂隙及岩体、岩层薄弱界面附近充填交代形成银铅锌工业矿体。赋矿岩体的主体及重要工业矿体在平面上处于 F2 断裂向北西“弓”形突出的“弓箭”部位,赋矿岩体及工业矿体产状在剖面上也随 F2 断裂呈缓—陡—缓—陡起伏而有规律地变化,说明 F2 断裂的控岩控矿作用非常明显。层控叠生型银铅锌矿产于 F2 断裂下盘的上侏罗统火山岩中。F2 断裂对层控叠生型银铅锌矿的控矿作用也是明显的,主要表现在其上盘变质岩的良好屏蔽作用,沿 F2 断裂上升的成矿热液沿火山岩地层中的层间破碎带(铁锰碳酸盐层)交代成矿,表现为靠近 F2 断裂层控叠生型银铅锌矿变厚变富。

2.3 金竹坑矿区

金竹坑地区处于闽西北隆起带和闽东火山断拗带接触部位、浦城—宁德三都澳北西向断裂带与浦城至南平南北向断裂带的交会处,政和—大埔深大断裂从本区南东侧通过。自早元古代以来地质构造活动强烈,具有长期、多次活动的特点;区内基底地层为下元古界大金山组和南山组,主要岩性为黑云斜长变粒岩夹斜长角闪片岩、条带状黑云母(二云母)石英片岩夹黑云斜长变粒岩。原岩以砂泥岩为主,局部为富碳高铝质岩石夹基性火山岩。缺古生代地层。盖层主要有侏罗系梨山组、漳平组、长林组、下渡组和白垩系寨下组、沙县组等,多为断陷式或上叠式盆地产出,主要为一套陆相中酸性火山—沉积岩。矿区地层主要出露下元古界麻源群大金山组下段(Pt_1d')、下侏罗统梨山组下段(J_1l')。

从加里东期至燕山期,区域上岩浆活动强烈。燕山期是区内主要的岩浆活动期,也是主成矿期,其中酸(偏碱)性侵入岩多数为成矿岩体,成矿元素富集系数普遍较高。而且在空间分布上与矿床、矿点关系十分密切,沿岩体接触带常形成成矿元素的地球化学异常带。接近矿区的东北部出露小范围的肉红色高坑超单元洋后单元少斑中细粒正长花岗岩,其附近围岩蚀变较弱,未见明显矿化。沿断裂带及其附近

出露花岗斑岩、斜长花岗斑岩、花岗闪长岩、石英斑岩和闪长玢岩等岩脉,走向以北北东向为主,其次为北西向,常见互相穿插,脉体出露大小不一,其两侧常见有硅化、绿泥石化和绿帘石化等蚀变。岩浆活动还具有多期次的特征,北东向脉体较早,北西向较晚。在岩性上闪长玢岩脉侵入稍晚。在矿(化)体边上及其附近常见有脉岩体出露,因此推断与矿化关系较为密切。

区域断裂构造十分发育,北东向、北北东向和北西向 3 组断裂交会控制了该地区中生代盆地的展布。矿区构造以北东、北西向的断裂为主,规模大小不一,具有多期次活动的特征。控矿构造以北东向断裂为主,共有 7 条,其中 F5 断裂为推覆构造(图 3)。

F5 断裂位于矿区南部,为“C”形半环状出露的推覆构造,在地表可见沿推覆面断续出露的构造破碎带,带中构造角砾明显,呈次棱角—次圆状,弱硅化蚀变。该推覆构造物探测量反映较好,初期曾认为是重要的控矿构造。经硃探及钻探验证,为大金山组推覆在梨山组之上,且推覆方向由南往北,推覆面较平直,倾角 30~50°。但推覆构造主断裂面上破碎带挤压明显,未见矿化(体)充填,II 号矿体仅赋存在该推覆构造前缘片体之中^①。

由此可见,推覆构造(F5)是后期主要的破矿构造(图 4),推覆面上破碎带挤压明显,但未见矿化现象。这表明成矿期在梨山组沉积之后、推覆构造形成之前,即该推覆构造将赋存在大金山组中的 II 号矿体上部,推覆在梨山组之上,使得品位较富的 II 号矿体只剩下赋存在前缘片体上的一小部分,而其根部(图 4 的西端下方较远处)可能隐藏着规模巨大、品位更高的铅锌矿体。

综上所述,金竹坑矿区的 II 号富矿体受到由南向北的推覆构造的破坏,仅在推覆片体前缘残留了一小部分,而其根部可能存在的大矿体则成为盲矿。所以,推覆构造的破坏影响了金竹坑铅锌矿的规模和找矿成果。

2.4 其他矿区推覆构造的控矿作用

其他矿区如铁砂街、簧碧、洋锡洞、铁山、黄柏坑、蔡家坪、王坞、东坑、金竹坪等,还没有足够资料表明它们的成矿作用与推覆构造有必然的联系,但不排除断裂构造的控矿作用,而且有可能是主要作用。

2.4.1 铁砂街铜矿区

铁砂街铜矿位于弋阳县城南 17 km 的旭光乡,

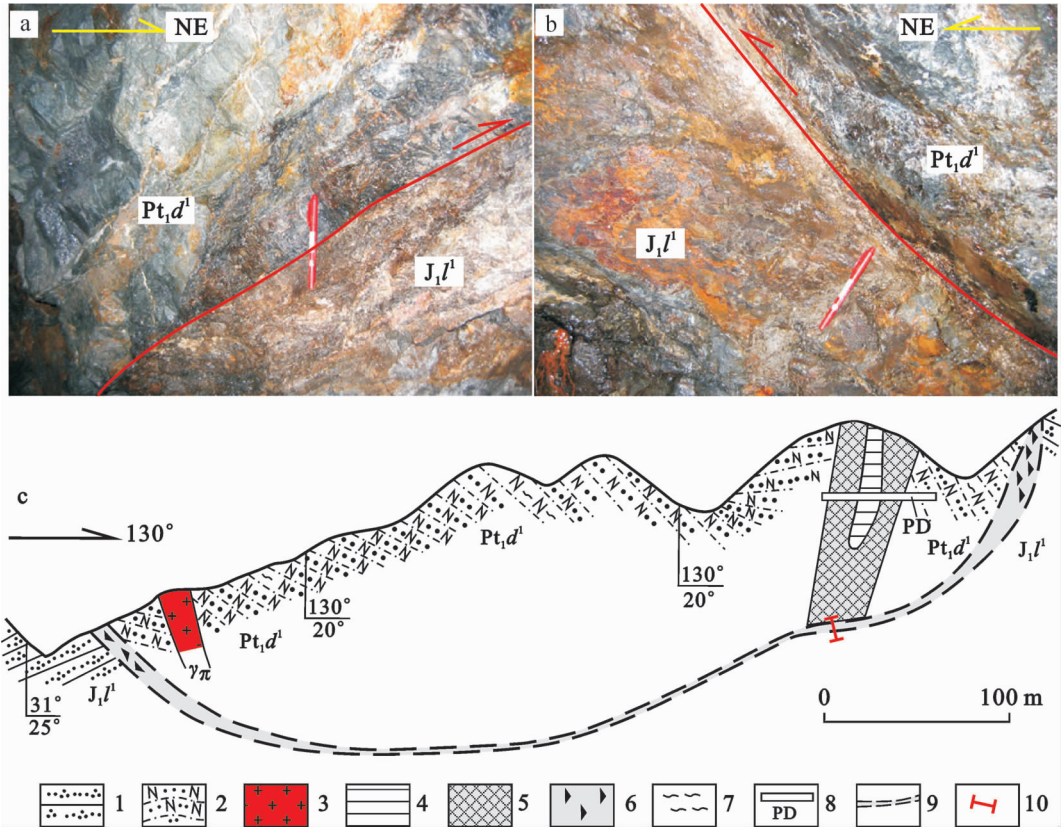


图 3 福建省浦城金竹坑铅锌矿区 12 线横切推覆体地质剖面(据参考文献[47]修改)

Fig. 3 Geological section 12 across the thrust nappe of the Jinzhukeng Pb-Zn deposit, Pucheng County, Fujian

a—12 线北侧 PD3 主坑道左壁,早侏罗世梨山组下段无矿化;b—12 线北侧 PD3 主坑道右壁,早侏罗世梨山组下段无矿化;c—12 线横切推覆体地质剖面;J₁l¹—早侏罗世梨山组下段;Pt₁d¹—早元古代麻源群大金山组下段;
 1—石英砂岩;2—黑云斜长变粒岩;3—花岗斑岩;4—铅锌矿化体;5—铅锌矿体;6—碎裂岩;7—绢云岩化/褐铁矿化;8—探矿及编号;9—推覆构造带(F5);10—照片拍摄处

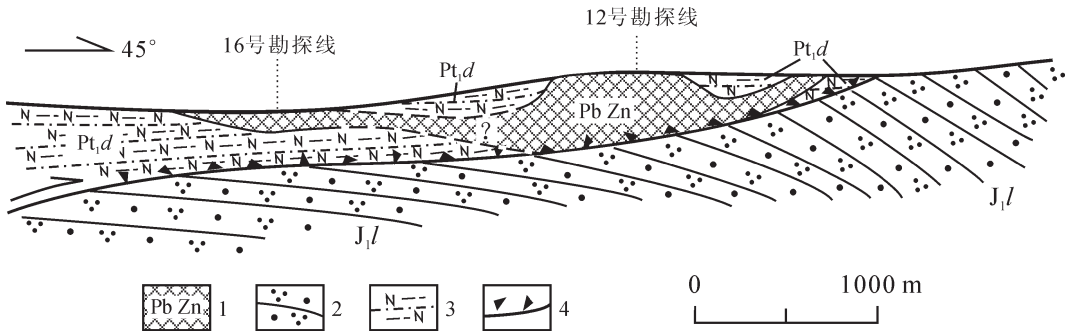


图 4 福建省浦城县金竹坑矿区推覆构造剖面(按照 12、16 号勘探线剖面钻孔资料绘制)

Fig. 4 Possible thrust section of the Jinzhukeng Pb-Zn deposit, Pucheng County, Fujian

J₁l—早侏罗世梨山组;Pt₁d—元古代大金山组;1—铅锌矿体(II 号富矿体);
 2—(石英)砂岩;3—黑云斜长变粒岩;4—破碎带(F5)

面积约 10 km²。区内出露地层主要有中元古界铁砂街岩组、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系等。

铜矿区地处萍乡—广丰深断裂南侧,饶南拗陷与陈坊—永平断陷接壤处,先后受加里东、燕山等各期构

造运动的影响,构造型式复杂。在区域近东西向构造背景上,叠加北东—北北东向褶皱、断裂。中元古界变质岩系不断上升隆起,长期裸露地表,走向近东西,倾角陡立;盖层不整合于变质基底之上。构造线方向主要有2组,一组为近东西向,一组为近南北向。

矿区南部发育内沙溪—傅家背斜,轴部为铁砂街组变质岩组成,轴向近东西,两翼有侏罗系砂砾岩出露,北翼倾角较陡,达 70° 以上,南翼倾角平缓,为 $20\sim 30^\circ$ 。与沙溪—傅家背斜轴向平行的地堑式断层——沙子窝走向断层(F2)西起草坪坞,东至张家垅、秋家以东,产生于侏罗系砂砾岩与前震旦系千枚岩接触带中(图5),全长约7 km,倾向北,倾角 50° 以上。自西而东,走向由东西渐变为南南东。构成地堑式的2条断层间距并不一致,于锈水坞一带间距约为20 m左右,于火麻坞与秋家一带则为50~150 m。据目前所获资料,此断层为区内最大的断层,属成矿后断层,对矿体影响不大。

南台寺一带发育平移断层(南台寺断层,F1),断层范围南起金鸡峰,北至南台寺采石场以北,可见长度约1.5 km,断层线走向近南北,倾向南东 110° ,倾角 70° 。断层证据乃沟谷两侧硫化矿矿床氧化带石英斑岩,碳酸盐类和侏罗纪地层等呈明显不连续现象,于侏罗系砂砾岩中见断层面及断层角砾岩。力之方向自南而来,往北推去,至断层线东侧岩层往北推进,两侧岩层相对往南移动,错距约300 m,因构造变动过程中东侧伴有上升作用,碳酸盐岩及部分流纹岩多被剥蚀。本断层属成矿后断层,由于此断层之结果,促使锈水坞矿带及火麻坞—大石坞矿带遭受破坏互不连接。

2.4.2 篁碧矿区

位于铅山县城南方向约45 km,面积约 49 km^2 。大地构造位于武夷山隆起带北段之冷水坑—梨子坑近东西向中生代陆相火山盆地的东端,地处篁碧—徐家厂中心式火山盆地的西部。

矿区内最为明显的断裂走向为北北东,倾向南东东,倾角 $66\sim 84^\circ$,长千余米,宽 $3.50\sim 20\text{ m}$,断裂面呈缓波状,具斜列擦

痕,接触带由构造角砾岩、挤压透镜体等组成。有大量绿泥石脉、碳酸盐微脉充填,具较强的磁黄铁矿化、方铅矿、闪锌矿及黄铜矿化。其两侧次一级的北东东向、北西向或北北东向断裂带较发育。这一条主要断裂是否为区域性推覆构造,生米坑铅锌矿点与该断裂的成因关系如何,目前尚未定论。推测次级断裂(或裂隙)为后期铅锌矿化的主要赋矿空间。而成矿热液(含矿岩浆)的上侵,一方面有可能使推覆构造面变陡,另一方面使上覆岩层破碎,形成其他方向的矿化。

邹家坞矿段是受断裂控制的块状铜铅锌矿脉,向下无根,但其蚀变组合是一套矽卡岩蚀变矿物组合,出现了阳起石和磁铁矿,矿脉向下很快尖灭,可能是由于成矿后的逆冲推覆构造破坏了矿体,根还在原地。

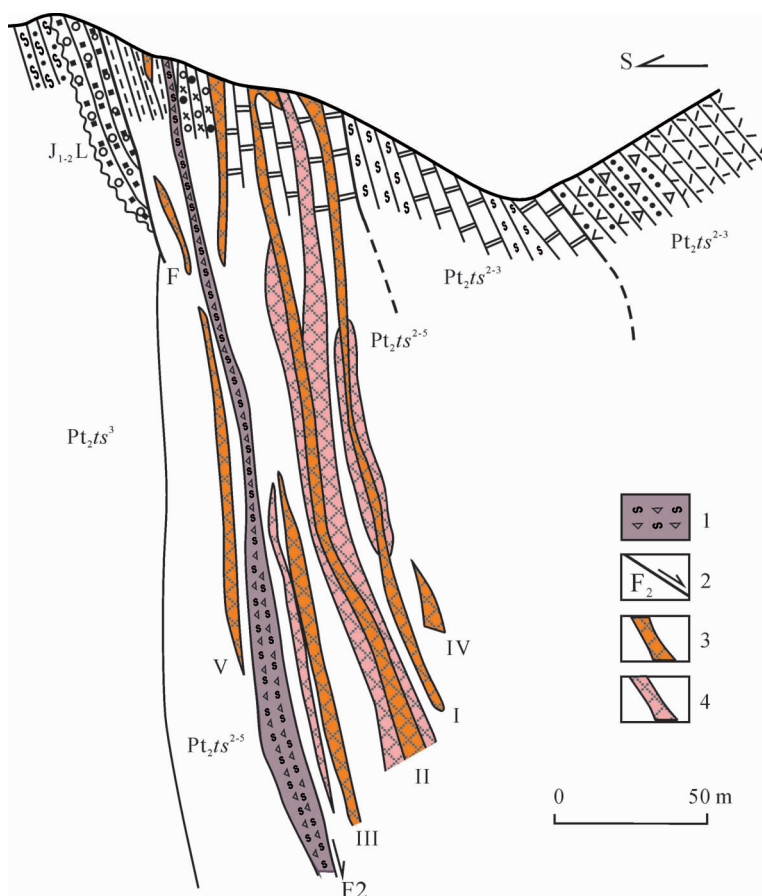


图5 江西省弋阳县铁砂街铜金矿床锈水坞0线剖面

Fig. 5 Section 0 of Xiushuiwu in the Tieshajie

Cu-Au deposit, Yiyang County, Jiangxi

$J_{1-2}L$ —下、中侏罗统林山群; Pt_{2ts}^{2-3} —中元古界铁砂街岩组中段第3亚段; Pt_{2ts}^{2-4} —铁砂街岩组中段第4亚段; Pt_{2ts}^{2-5} —铁砂街岩组中段第5亚段; Pt_{2ts}^3 —铁砂街岩组上段; 1—断层角砾岩; 2—正断层; 3—铜矿体; 4—菱铁矿体

2.4.3 王坞—洋锡洞矿区

位于铅山县城南约 32 km,面积约 10 km²。出露地层主要为蓟县系周潭岩组(J_{xzt}),其次为石炭系上统藕塘底组(C_{2o})及侏罗系水北组(J_{1s})。

断裂构造主要有北东向和近东西向断裂 2 组,以北东向断裂规模较大。王坞一带北东向断裂构造属区域性断裂构造,为 F1、F2 断层,分布于评价区北部。F1、F2 断层近于平行展布,相距 400~600 m。F1、F2 区域性断裂形成陆相断陷盆地,控制着侏罗系水北组地层的分布。

洋锡洞附近 F3 断层为近东西向断裂构造,倾向北或北西,倾角 40~56°,断面呈舒缓波状。断面两侧围岩裂隙发育,尤其下盘岩石普遍破碎,并常具有较强的硅化作用。区内蓟县系周潭岩组与石炭系藕塘底组(下覆)以 F3 断层相接触,据此,生产单位和有关部门推断 F3 断层是一条具有一定规模的区域性逆断层,王坞和洋锡洞之间可能隐藏着大面积的含矿层位石炭系藕塘底组(C_{2o})。但经实地考察,洋锡洞矿区石炭系藕塘底组(C_{2o})应为风化剥蚀后残留在蓟县系周潭岩组之上的顶盖,系断层与风化剥蚀共同作用的结果。

3 讨 论

矿床是一定地质作用的产物,一个矿床的形成需要多方面的有利地质因素的综合,构造是其中的重要因素,在具有成矿物质和含矿流体的前提下,构造对成矿起到基本甚至是主导的作用。逆冲推覆构造提供了矿液运移、聚集、沉淀的空间。推覆构造以不同的方式,从不同的构造部位控制了矿床主、次矿体的产出和分布,使得推覆断裂系统、推覆体系统、掩复体系统的控矿作用表现出较大的差异性。在横剖面上推覆构造系统中的构造带组合类型越齐全,则不同的构造带、构造部位成矿和控矿的作用等类型较多;当同一断裂切过不同物理化学性质的岩石时,可有不同的成矿方式:在化学性质活泼的碳酸盐岩层中发生交代作用,而稳定砂页岩中则以裂隙充填为主;此外成矿方式还与断裂本身具有断层泥、不透水岩石、不透水覆盖层有关^[48]。另外,逆冲推覆构造系统中,不同级次的构造是逆冲推覆构造演化过程中逐次形成的,时间上略有先后,其成生的力学机制相同,即共同处于一个构造应力场之下。岩层在逆冲断层扩展时发生应变,在软弱部位引起褶皱或小

褶曲,常形成一定的扩容空间,当矿液沿断裂主通道(主滑面)向上运移时(主推覆断层导矿),易于在此部位聚集淀积成为矿体,或者定位于不同级别的次级断层带,以及岩石较破碎、孔隙较发育的地层和层间破碎带中。

北武夷地区的研究现状和矿区实例表明,一个矿区的逆冲推覆构造是成矿前、成矿期还是成矿后,在缺乏精细构造解析的情况下,推覆构造是否起着控矿、容矿或者破矿作用,破矿作用是否造成矿体重复增大或者隐伏、缺失等问题一直困扰着地质找矿工作,影响了找矿效果。

冷水坑矿区,F2 断裂为区域推覆构造在矿田的出露部分。目前普遍认为,F2 断裂及其派生断裂是本区重要的控岩控矿构造,即主要形成于晚侏罗世—早白垩世鹅湖岭喷发旋回以后,花岗斑岩侵入之前,早于成矿期。以往据钻探工程控制,判断 F2 断裂推覆距离大于 1000 m,总体走向北东 40~60°,倾向北西,倾角从浅部至深部呈断坪—断坡—断坪—断坡状交替变化,震旦系变质岩被推覆至晚侏罗世—早白垩世火山岩之上。但这一认识尚有分歧,特别是推覆体前缘即近地表出现了“倒冲”现象(图 2),震旦系变质岩中的眼球状片麻岩被推覆上来,其下盘有无矿化尚不能肯定。而从成矿系统的观点来看,现在矿体向下将会依次出现铅锌成矿带、铜铅锌成矿带、铜成矿带和铁成矿带,其主要证据是赣东北地区的铅锌银矿床的蚀变以绿泥石化为主,而赋矿围岩不能提供绿泥石化所需的 Fe、Mg,推测这是由深部偏基性岩浆提供的。眼球状片麻岩是角闪岩相,即是在中地壳形成的,有可能在推覆构造作用下参与了矿化蚀变作用。目前来看,这种“倒冲”现象是否可能为另一次构造作用造成的,或者说前缘伸展作用的结果,只有对推覆构造进行分带解剖,结合⁴⁰Ar—³⁹Ar法定年,将推覆构造的年代与成矿年代对比,结合其他地质证据,才能推知构造与成矿时间的先后、控矿或破矿作用的方式和结果,进而帮助解决深部找矿或矿区扩大储量等现实问题。由于矿权让度等原因,实地勘察工作受到诸多限制,难以完成对推覆构造分带的精细解剖,目前正在等待年代学测试结果以解决上述问题。

冷水坑矿区另一条重要的 F1 断裂,很可能为成矿带的南界断裂,走向 NE50°左右,往北东延伸至上马石—长寿源一带,在其北东方向的洪山铁矿附近

没有追索到相应的构造形迹。

对于推覆构造破坏矿体的情况,也存在不同认识。如浦城金竹坑铅锌矿床,普查初期认为推覆构造带有利于成矿即为控矿容矿构造,但经坑道验证为破矿构造,推覆构造形成于成矿之后,矿区所见仅是推覆体前缘保留的一小段矿体,大矿体可能隐伏在其根部,只有在确定推覆的方向、规模和产状变化后,才有可能找到根部的隐伏矿体。再如赣东北篁碧矿区,邹家坞矿段是受断裂控制的块状铜铅锌矿脉,向下无根,但其蚀变组合是一套矽卡岩蚀变矿物组合,出现了阳起石和磁铁矿,矿脉向下很快尖灭,可能是由于成矿后的逆冲推覆构造破坏了矿体,根还在原地。

对于区域上的推覆构造,尚需开展一些面积性的路线地质调查研究,查明北武夷地区逆冲推覆构造的分布和产出特征,对出露情况较好的地段进行精细的构造解析,采用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年技术测定推覆构造的形成时代,进而分析出北武夷地区逆冲推覆构造不同单元及其次级构造的分布和活动规律。在成矿作用和成矿规律研究的基础上,以具体矿区的控矿作用为对象和实例,研究推覆构造与矿床的成生联系。如永平铜矿的东部上泸畈一带,出露多处与永平铜矿赋矿层位一致的石炭系层位,周边被基底岩系周潭岩组包围,构造特征类似于永平铜矿的“楔冲”样式。但是否具备与永平铜矿一样的成矿条件,目前尚无法定论。

总之,就已经获得的地质资料来看,北武夷地区推覆构造的精细结构及其控岩控矿特征还没有查清,尚需进一步开展详细的野外调查工作。

4 结 论

综上所述,北武夷地区成矿地质条件优越,矿产资源分布广泛。在前期大量的地质找矿、科研工作的基础上,已经具备进一步开展推覆构造及其年代学研究的条件。同时,将推覆构造研究与构造控矿研究结合起来,有利于将纯理论研究 with 具体的找矿实践相结合,为应用构造地质学学科提供有益的补充。因此,通过翔实的野外面积性的路线观察和构造解析,查明逆冲推覆构造及其不同单元的区域分布和产出特征,进行逆冲推覆的运动速率及其变化、运动方位及其变化、运移距离的定量化研究,采用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年技术测定推覆构造的形成时代,开展推覆构造

与矿床的成生联系研究,进而探讨推覆构造特别是矿区的逆冲推覆构造是成矿前、成矿期还是成矿后的构造,是否分别具有控矿、容矿或者破矿作用,破矿作用是否造成矿体重复增大或者隐伏、缺失等问题。在此基础上,研究武夷山成矿带中生代推覆构造对铜多金属矿的控制机理,分析铜多金属矿床的有利形成地段;结合找矿普查中钻井、坑道等验证资料,预测隐伏矿体可能的位置,为下一步找矿取得更大突破,特别是寻找隐伏矿床和矿体扩大远景提供科学依据。

致谢:研究过程中得到江西省地勘局赣东北地质大队张家菁总工、罗平副总工和912地质大队刘建光总工及诸多地质同行们的帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献:

- [1]苏运波.德兴推覆构造地质特征及与成矿关系[J].黄金地质,1995,1(4):19-24.
- [2]翟裕生.关于构造—流体—成矿作用研究的几个问题[J].地学前缘,1996,3(3/4):230-236.
- [3]朱大岗,孟宪刚,彭少梅,等.粤西推覆构造系统对金银及多金属矿床的控制[J].地质力学学报,2001,7(1):22-32.
- [4]何龙清,陈开旭,余凤鸣,等.云南兰坪盆地推覆构造及其控矿作用[J].地质与勘探,2004,40(4):7-12.
- [5]刘建光,万禄进,董光裕,等.推覆断裂假倒冲现象分析——以冷水坑矿田控矿推覆断裂F2为例[C]//陈毓川,等.矿床学研究面向国家重大需求:新机遇与新挑战.第八届全国矿床会议论文集.北京:地质出版社,2006:582-587.
- [6]周珍琦.闽西南地区推覆构造特征[J].石油实验地质,2006,28(1):38-41.
- [7]李培铮,邓国萍,陶红,等.赣东北壳体构造演化与铜(金)多金属成矿系列[J].大地构造与成矿学,1999,23(4):300-307.
- [8]Davis G A. Challenging some widely held beliefs about thrust fault geometries—from field studies in the U.S. Cordillera and Northern China[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 49-66.
- [9]吴运高,李继亮,樊敬亮.造山带逆冲推覆构造研究的主要新进展[J].地球科学进展,2000,15(4):426-433.
- [10]Chattopadhyay A, Huin A K, Khan A S. Structural Framework of Deolapar Area, Central India and its Implications for Proterozoic Nappe Tectonics[J]. Gondwana Research, 2003, 6(1): 107-117.
- [11]Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. Highly precise and accurate Re—O sages form olynbdenum from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China[J]. Economic Geology, 1997, 98: 75-180.
- [12]Glasmacher U A, Reynolds P, Tschernoster R, et al. Ar/Ar thermochronology of slates and muscovite in the northern Linksrheinisches Schiefergebirge[J]. Beih. z. Eur. J. Min. 1997, 9: 125.

- [13] Wilson J, Dallmeyer R D, Grocott J. New $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dates from the Las Tazas complex, northern Chile: Tectonic significance[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2000, 13: 115-122.
- [14] Hanmer S, Hamilton M A, Crowley J L. Geochronological constraints on Paleoproterozoic thrust-nappe and Neoproterozoic accretionary tectonics in southern West Greenland[J]. *Tectonophysics*, 2002, 350: 255-271.
- [15] Wang Y J, Zhang Y H, Fan W M, et al. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27: 985-998.
- [16] Toteu S F, Rose Yongue Fouateu, Joseph Penaye. U - Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonic in southern Cameroon: consequence for the Pan-African orogenic evolution of the central African fold belt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 44: 479-493.
- [17] Kirkland C L, Daly J S, Eide E A. The structure and timing of lateral escape during the Scandian Orogeny: A combined strain and geochronological investigation in Finnmark, Arctic Norwegian Caledonides[J]. *Tectonophysics*, 2006, 425: 159-189.
- [18] 郑亚东, 王士政, 王玉芳. 中蒙边界区新发现的特大型推覆构造及伸展变质核杂岩[J]. *中国科学(D辑)*, 1990, (12): 1300-1305.
- [19] 郑亚东, Davis G A, 王琮, 等. 内蒙古大青山大型逆冲推覆构造[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(4): 289-295.
- [20] 朱志澄. 逆冲推覆构造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 1-98.
- [21] 沈传波, 梅廉夫, 凡元芳. 磷灰石裂变径迹热年代学研究的进展与展望[J]. *地质科技情报*, 2005, 24(2): 57-63.
- [22] 朱文斌, 万景林, 舒良树, 等. 裂变径迹定年技术在构造演化研究中的应用[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(4): 593-600.
- [23] 胡世玲, 郝杰. 江西广丰田里片岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄及有关问题讨论[C]//李继亮. 东南大陆岩石圈结构与地壳演化. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 145-148.
- [24] 汪屹华, 王世成, 康铁笙. 闽西南里田推覆构造带锆石和磷灰石的裂变径迹分析[J]. *科学通报*, 1994, 39(8): 723-726.
- [25] 杨巍然, 简平. 构造年代学——当今构造研究的一个新学科[J]. *地质科技情报*, 1996, 15(4): 39-43.
- [26] 王瑜. 构造热年代学——发展与思考[J]. *地质前缘*, 2004, 11(4): 435-443.
- [27] 朱光, 刘国生, Dunlap V J, 等. 郟庐断裂带同造山走滑运动的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学证据[J]. *科学通报*, 2004, 29(2): 190-198.
- [28] 李大明, 李齐, 郑德文. K-Ar 和 Ar-Ar 方法的精细测年及其检验[J]. *地震地质*, 2005, 27(4): 609-604.
- [29] Zhu G, Wang Y S, Liu G S, et al. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan - Lu fault zone, East China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27: 1379-1398.
- [30] 滕艳, 徐峙. 我们怎样追赶世界的脚步——访中国科学院院士翟裕生、中国工程院院士裴荣富. 国土资源网, 2005 年 8 月 25 日. http://www.clr.cn/front/china_Resource/reed/news-info.asp? ID: 64301.
- [31] Yakubchuk A, Cole A, Seltmann R, et al. Tectonic setting, characteristics, and regional exploration criteria for gold mineralization in the Altaid orogenic collage: The Tien Shan province as a key example[J]. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 2002, 9: 177-201.
- [32] Stephens J R, Mair J L, Oliver N H S, et al. Structural and mechanical controls on intrusion-related deposits of the Tombstone Gold Belt, Yukon, Canada, with comparisons to other vein-hosted ore-deposit types[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(6/7): 1025-1041.
- [33] Feybesse J, Billa M, Guerrot C, et al. The paleoproterozoic Ghanaian province: Geodynamic model and ore controls, including regional stress modeling[J]. *Precambrian Research*, 2006, 149(3/4): 149-196.
- [34] 余心起, 吴建设, 狄永军, 等. 福建政和夏山铅锌矿区构造控矿作用研究[C]//陈毓川, 等. 矿床学研究面向国家重大需求: 新机遇与新挑战. 第八届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2006: 628-631.
- [35] 张达, 吴淦国, 余心起. 闽中铅锌多金属矿床构造控矿特征[C]//陈毓川, 等. 矿床学研究面向国家重大需求: 新机遇与新挑战. 第八届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2006: 632-634.
- [36] 周庆德, 张湖. 江西铁砂街地区变质构造初步研究[J]. *江西地质*, 1995, 9(4): 292-298.
- [37] 翟裕生, 吕古贤. 构造动力体制转换与成矿作用[J]. *地球学报*, 2002, 23(2): 97-102.
- [38] 钟南昌, 黄金喜, 诸宝森, 等. 江西宜丰-乐平推覆构造特征及找矿研究[J]. *江西地质*, 1991, (5)(增刊): 1-116.
- [39] 陈爱根, 吴正文. 闽西地区逆冲推覆构造格局及其演化[J]. *中国区域地质*, 1996, (4): 335-343.
- [40] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 四川黑水-台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(5): 441-451.
- [41] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1989: 40-68.
- [42] Huang Chiyue. Structural evolution from Paleogene extension to latest Miocene-Recent arc-continent collision offshore Taiwan: Comparison with on land geology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001, 19: 619-639.
- [43] Lallemand S, Font Y, Bijwaard H, et al. New insights on 3-D Plates interaction near Taiwan from tomography and tectonic implications[M]. *Tectonophysics*, 2001, 355: 229-253.
- [44] 郭令智. 华南板块构造[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 192-215.
- [45] 彭阜南, 叶银灿, 施斌, 等. 台湾海峡隧道地质与地震条件分析[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(2): 175-188.
- [46] 梅勇文. 武夷山造山带及其成矿作用[J]. *江西地质*, 1998, 12(2): 109-115.
- [47] 刘乃忠, 刘诗光. 福建浦城金竹坑铅锌矿床地质特征及成因初探[J]. *福建地质*, 2004, 23(2): 59-66.
- [48] 翟裕生, 秦长兴. 关于成矿系列和成矿模式问题[C]//刘云从. 矿床学参考书(下). 地质出版社, 1987: 214-227.
- ① 余心起. 闽中地区构造演化特征及其控矿作用研究. 中国地质大学(北京)博士后研究报告, 2006.