

金属矿床深部找矿中的地质研究

叶天竺 薛建玲

(中国地质调查局发展研究中心,北京 100083)

摘要:笔者根据近几年来从事全国重要矿产资源危机矿山接替资源勘查工作并结合深部找矿的实践,探讨了深部找矿的理论和方法。笔者认为地质研究,物探、化探技术应用,钻掘工程施工是深部找矿三项基本要素。地质研究是基础条件,物探、化探是技术支撑条件,钻掘探矿工程是实现条件,构成基本技术路线。全面论述了地质作用特征研究、矿田构造研究、成矿作用标志研究三项重点内容。成矿作用相关的地质作用特征研究是确定找矿思路的基础工作,包括沉积成矿地质作用、岩浆成矿地质作用、火山成矿地质作用、变质成矿地质作用,以及综合成矿地质作用研究等内容。矿田构造研究提出了沉积构造体系、火山构造体系、侵入构造体系、断裂构造体系、褶皱构造体系、复合构造体系、成矿后构造的划分方案及研究内容,及其在深部找矿中的应用。成矿作用标志研究包括成矿特征标志研究及成矿流体物理化学条件标志研究,提出了成矿热液地球化学障理论依据及研究方法及其在深部找矿中的应用。

关键词:深部找矿;成矿地质作用;矿田构造;成矿作用标志

中图分类号:P622 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)05-0855-15

1 前 言

目前找矿勘查学科发展的方向主要体现在两大领域。一是区域成矿规律研究与区域矿产预测,二是隐伏矿床预测和深部找矿。笔者根据近两年来开展的矿山深部找矿工作所取得的初步成果,对深部找矿的有关方法理论问题进行了探讨。

在找矿过程中经常遇到以下情况:(1)成矿地质条件十分有利,也有物探、化探异常,但是经地表及深部工程揭露仅见零星工业矿体;有的地表有大规模蚀变,没有工业矿体,虽然也有物探异常,经少量钻孔验证已达推断深度而未见矿,但又无法给予确切的结论。(2)矿山已知矿体深部延伸找矿,探明矿体已采空,深部是否还有矿体?向下延伸矿体断断续续,能否找到规模矿体;矿体遇到断层后不知去向如何进一步追索等等。这些情况在矿产勘查工作中和矿山开采过程中带有普遍性,也是司空见惯的问题,实质上这就是所谓深部找矿问题。过去在区域矿产勘查工作程度低的地区,一般采用转移策略,一个地方难以突破,转移到另一个地方开展工作。因此深部找矿问题并没有引起人们特别关注。最近几年来,对于中国中东部很多地区,由于区域矿产勘查工作程度越来越高,许多地区已经几进几出,仍然没有多大进展。对于

矿山而言,由于几十年的开发,已探明的矿产资源即将枯竭,无处转移,只能就地深部找矿,因此近几年来深部找矿的话题越来越被人们重视。深部找矿问题对于中国东部和正在开采的矿山而言确实是迫在眉睫的问题,需要地质学家从方法理论层面提出解决方案。

首先,深部找矿问题是探索性很强的实践问题,不是纯理论问题,必须紧密结合找矿实践,边施工、边研究,不断修正对成矿特征的认识,才可能获得像样的找矿成果。其次,具体矿区的深部找矿问题是战术性问题,不是战略,属于找矿勘查学中的微观问题,因此带有很强的实例性、个案性,很难在理论上总结出有规律性的东西,因此很少看到深部找矿的理论性概括。第三,深部找矿问题具有高度的综合性,从理论应用而言,是多学科的高度综合,基本上包括了地质、矿产、勘查技术等相关学科的全部内容。从方法技术而言,必须实现多专业的有机结合,包括地质研究,物探、化探技术应用,探矿工程验证。

现阶段固体矿产的深部找矿指的是地表以下1000~2000 m范围内的找矿,从成矿学的角度分析,属于同一成矿作用系统,其成矿条件、控矿因素、成矿作用没有本质的区别。深部找矿方法理论研究突出的一点在于特别强调三维空间信息

收稿日期:2007-04-12;改回日期:2007-06-21

国家专项:全国危机矿山接替资源找矿项目资助。

作者简介:叶天竺,男,1941年生,教授级高级工程师,现从事区域矿产预测评价研究及矿山深部找矿方法理论研究;E-mail:

ytz@cgs.gov.cn。

的综合研究,以及成矿作用的垂向变化特征的研究。

深部找矿是三维空间找矿信息的综合研究工作。由三大要素构成:第一,地质研究是基础条件;第二,物探、化探是技术支撑条件,尤其是物探工作是关键技术支撑;第三,钻掘探矿工程是实现条件。三要素缺一不可。笔者主要论述地质研究基础工作,同样由三方面重点内容构成。第一,成矿地质作用研究;第二,矿田构造研究;第三,成矿作用标志研究。

成矿作用是地质作用的组成部分,因此研究与成矿作用有关的地质作用是深部找矿地质研究的基础工作,地质作用由地质建造和地质构造两部分内容组成,深部找矿突出其空间特征的研究,尤其是垂向空间变化特征的研究。矿田构造研究同样重要,矿田构造直接控制了矿体三维形态,因此矿田构造研究工作是深部找矿地质研究的核心内容。成矿作用的标志研究是矿床学研究的延伸,是成矿模式直接用于找矿勘查的实现形式,把成矿作用的理论阐述转化为找矿直接标志的研究工作,往往被人们忽略,笔者将对此重点论述。

2 成矿地质作用特征研究

2.1 成矿作用的深度分析

根据目前各种类型矿床成矿作用的研究表明,成矿地质作用的深度有以下几点:

(1)超基性岩铬铁矿:形成深度大于中地壳,20~30 km。以构造侵位形式在浅部就位成矿。

(2)基性超基性岩硫化铜镍矿床:岩体形成最大深度约10 km左右,主要分重力分异岩体底部分凝成矿和动力分异岩浆后期矿浆贯入成矿。

(3)高温热液型矿床(以钨、锡矿为主)岩体侵位深度7~8 km。

(4)矽卡岩型、斑岩型成矿岩体,侵位深度为4~5 km。

(5)火山岩型(包括次火山型)矿床侵位深度小于2 km。

(6)热卤水型成矿作用:和盆地深度有关,一般小于水下2 km。

(7)沉积成矿作用:地表水体底部成矿,和盆地深度有关。

(8)韧性剪切带一般可分浅部韧脆性带,形成深度约2 km左右,温度小于300~450℃;中浅部剪切带,为低绿片岩相,形成深度3~5 km,温度450~600℃;中部带为高绿片岩相,形成深度5~10 km,温度大于600℃;深部带为角闪岩相,形成深度大于10 km,温度600~1000℃以上。成矿作用主要发生在浅部及中浅部,一般在3~5 km。

近年来,有研究者提出造山带成矿,深度达18~20 km,有待进一步研究。

2.2 地质作用特征研究

在矿产预测工作中建立成矿模型及找矿模式,开展类比预测是通用的技术手段,大比例尺预测及深部找矿过程中应用已知或浅部矿段进行类比预测也是常用的方法,因此开展成矿地质作用的研究,判别矿床类型,建立成矿模型,确定找矿思路十分重要,对于深部找矿而言,特别强调工作区自身

成矿地质作用特征的研究工作。

与成矿密切相关的地质作用研究主要分沉积作用、火山作用、岩浆侵入作用、变质作用及综合作用。

(1)沉积作用:除了研究沉积地层时代、岩性、建造等基本特征外,着重研究含矿地层深部延伸、隐伏夹层、水深、盐度、水温、氧化还原环境、酸碱度等特征,以及沉积岩相、古地理、盆地类型、盆内及盆缘构造、盆地同沉积构造等特征。

(2)火山作用:除了研究火山地层时代、岩性组合、矿物成分等特征外,着重研究火山地层特殊夹层、次火山岩体、喷发沉积的物理化学环境以及火山喷发旋回、火山岩相、火山机构、火山构造特征等。

(3)岩浆侵入作用:除了研究侵入岩体形态、产状、岩性组合、矿物成分、期次、时代等基本特征,还要着重研究岩体延伸及隐伏岩体埋深、形态、产状、侵位构造、脉岩带、侵入角砾岩、引爆角砾岩、接触带、围岩构造、捕虏体、岩浆作用影响范围特征等。

(4)变质作用:除了研究变质地层、岩石组合、矿物成分等特征,着重还要研究原岩建造、变质相、成岩年龄、热事件年龄、多期变形构造、变质前原始构造环境等。

(5)综合作用:指上述4种中的某几种地质作用叠加复合作用。

在深部找矿过程中应特别注意以下几点:

(1)沉积作用的研究,首先应特别注意含矿地层层序垂向变化的对比研究,一般存在两种情况,一种是沉积环境的变化,往往出现含矿层位沿走向发生垂向迁移,如扬子陆块北东部位铅锌含矿层位自陕南—神农架—黄陵背斜周缘—湘西发生了垂向向上迁移的情况。另一种,相邻盆地发生含矿层位的垂向向上错层现象,例如阜新盆地和八道壕盆地含煤层出现了错层情况。第二,由于沉积成矿作用严格受沉积物理化学条件控制(氧化还原电位及酸碱度变化等),因此其成矿宽度严格受沉积地球化学条件变换带控制,空间上形成宽度窄,走向长的窄带状分布区,在深部隐伏矿体找矿过程中容易出现因判断矿体平面位置不准确而落空的情况,如云南大姚六苴铜矿床深部找矿过程。

(2)火山作用的研究:首先应注意火山机构,火山喷发的垂向变化特征。一般情况下,陆相火山作用垂向变化较快,火山成矿作用在开放环境下不易形成成矿物质巨量聚集(岩浆型铁矿床、自然硫矿床例外)往往只能形成大规模的强烈气水流体交代岩。因此应特别注意相对封闭环境下的中浅部找矿。第二,次火山相成矿作用是火山岩成矿的主要类型。因此深部找矿也应特别注意加强火山喷发中心(带)的隐伏次火山岩体的空间位置的确定。第三,海相火山作用与陆相火山作用存在一定区别,由于火山岩岩浆喷发间断期的热液流体喷发是海相火山成矿的主要形成阶段,因此海底喷发沉积成矿作用,除了注意研究火山喷发中心(带)剖面变化外,还应特别注重对喷流中心(带)的判断以及火山岩与沉积岩转换界面空间位置的确定,尤其应注意确定火山岩和硅质岩类、碳

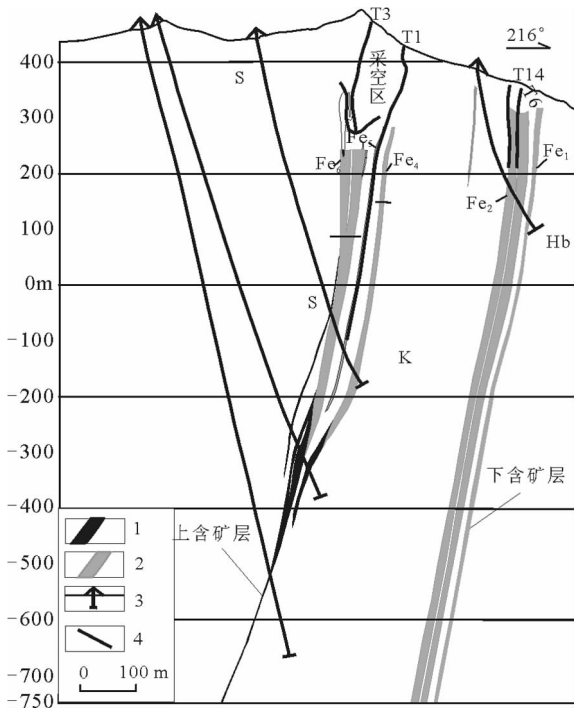


图1 辽宁弓长岭铁矿床二矿区20线剖面图^①

1—富铁矿层;2—贫铁矿层;3—施工钻孔;4—采矿坑道

Fig.1 Geological section of exploratory profile No. 20 of No. 2 mining area of the Gongchangling iron ore deposit, Liaoning

1—High-grade iron ore bed; 2—Low-grade iron ore bed; 3—Currently drilled borehole; 4—Underground workings

酸盐岩类夹层或变换界面在深部的分布情况。

(3) 岩浆侵入作用的研究:首先注意多期侵入岩体物质组分、岩石组构的垂向变化及其与成矿作用的关系。应研究其矿体与深部岩体的确切成因关系。以判断其属于矿头或矿尾,指导深部找矿。第二,研究并推断侵入岩体的热流体影响空间范围,定量推断隐伏岩体的垂向埋深位置,以及判断其热流体活动中心的浅部或地表标志。第三,着重研究岩体三维空间形态,特别是侵入岩体物质成分,岩石组构的垂向变化,接触带的垂向空间形态的变化,岩体倾伏方向,岩浆侵位方向,基性超基性岩体的侵入管道位置等等,直接指示深部找矿方向。

(4) 变质作用的研究:第一,在中等变质岩区应着重研究原岩建造和原始成矿物质的关系,判断原始含矿层位深部可能存在的位置,判断多期变形的转折端及倒转地层在垂向上的位置。第二,在高级变质岩区应着重研究多期变形构造,判断向型或背型构造及其与成矿作用的位置关系,对于完全置

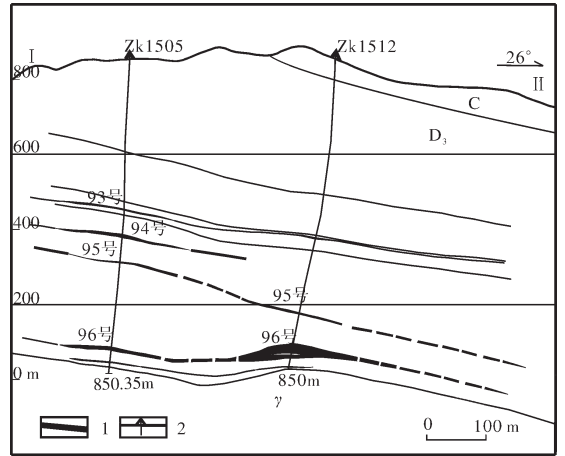


图2 广西南丹铜坑锡矿1号线剖面图^②

D₃—泥盆系上统泥灰岩及灰岩;C—石炭系砂岩;γ—黑云母花岗岩;1—矿体及其编号;2—钻孔

Fig.2 Geological section of exploratory profile No. 1 of the Nandantongkeng tin ore deposit, Guangxi.

D₃—marlstone and limestone; C—Carboniferous sandstone; γ—biotite granite; 1—Orebody and its number; 2—Borehole

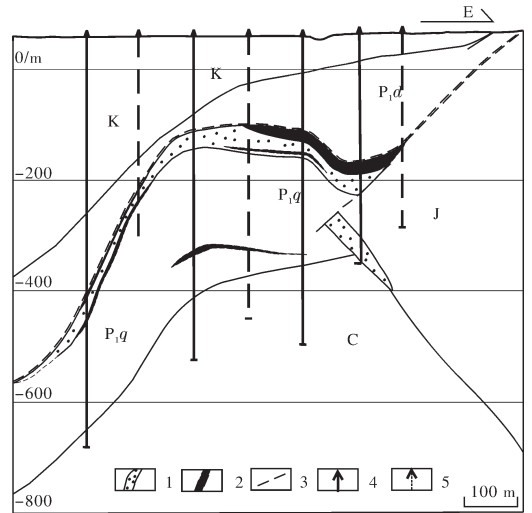


图3 湖南康家湾铅锌矿147线剖面图^③

K—白垩系碎屑岩;J—侏罗系碎屑岩;P_{1d}—二叠系下统当冲组;P_{1q}—二叠系下统栖霞组灰岩;C—石炭系白云质灰岩;1—含矿破碎蚀变带;2—铅锌矿体;3—断层;4—已施工钻孔;5—设计钻孔

Fig.3 Geological section of exploratory profile No. 147 of the Kangjiawan lead-zinc ore deposit, Hunan

K—Cretaceous clastic rock; J—Jurassic clastic rock; P_{1d}—Lower Permian Dangchong Formation; P_{1q}—Lower Permian Xixia Formation limestone; C—Carboniferous dolomitic limestone; 1—Ore-bearing fractured alteration zone; 2—Lead-zinc orebody; 3—Fault; 4—Previously drilled ore hole; 5—Designed bore

① 据辽宁弓长岭铁矿接替资源勘查项目组资料改编, 2006.

② 据广西铜坑锡矿接替资源勘查项目组资料改编, 2006.

③ 据湖南康家湾铅锌矿接替资源勘查项目组资料改编, 2006.

换了的同斜褶皱构造应判别其可能的深部枢纽变化位置,例如辽宁弓长岭铁矿(图1)。第三,注意研究变质热作用中心及其与成矿作用的关系(破坏或富集),判断深部找矿方向。

(5)综合作用研究:在上述几种具体的成矿地质作用研究工作基础上,必须开展成矿地质条件的综合研究工作,根据矿床(田)在区域地质构造中的时空位置开展综合成矿地质作用的研究。首先,研究成矿地质建造及原始成岩构造的综合关系,例如沉积含矿层位与盆地构造、岩相古地理的关系,侵入岩岩体与侵入构造的综合成矿关系。第二,研究各类地质作用的综合成矿关系,例如层控砂卡岩矿床的成矿作用。第三,研究建造、原始构造、变形构造与成矿的复合关系,如层控砂卡岩型矿床往往受地层、侵入岩、褶皱、断裂综合控制。例如广西铜坑锡矿大树脚地区在笼箱盖隐伏岩体与大厂

隐伏岩体与NE向黑衣沟断裂与大厂断裂交汇处,EW向次级褶皱及NE向挠曲交汇区层间破碎带控矿,经验证找到大型锌矿(图2)。又如湖南康家湾北段隐伏倒转背斜深部及推覆构造之上层间破碎带控制成矿(图3)。

3 矿田构造研究

矿田构造研究是直接研究矿体三维空间变化的主要手段,是深部找矿理论方法的核心内容。

3.1 构造体系分类及主要研究内容

矿田构造体系分为沉积构造体系、火山构造体系、侵入岩体构造体系、褶皱构造体系、断裂构造体系、复合构造体系6大类别,此外还包括成矿后构造。

(1)沉积构造体系:进一步可以划分为两类,第一类为单一沉积矿床类型,一般在没有确切边界的水域内沉积成矿,主要研究岩相特征,包括沉积相、沉积相岩石组合、沉积体系类型、生物相等内容,古地理特征包括古地理类型、沉积中

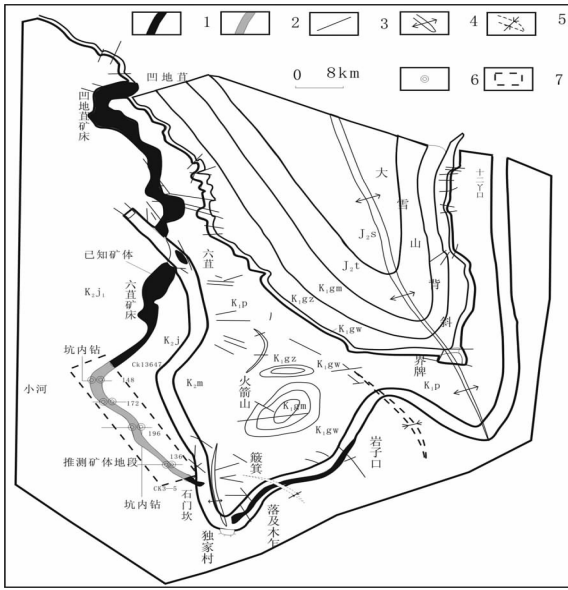


图4 云南大姚六直铜矿地质略图①

1—矿体;2—推测矿体;3—断层;4—背斜轴;5—向斜轴;6—本次施工见矿钻孔;7—接替资源勘查区范围;K_{2j1}—江底河组;K_{2m}—马头山组;K_{1p}—普昌河组;K_{1gw}—高峰寺组凹地直段;K_{1gz}—高峰寺组者纳么段;K_{1gm}—高峰寺组美宜坡段;J_{2t}—妥甸组;J_{2s}—蛇甸组

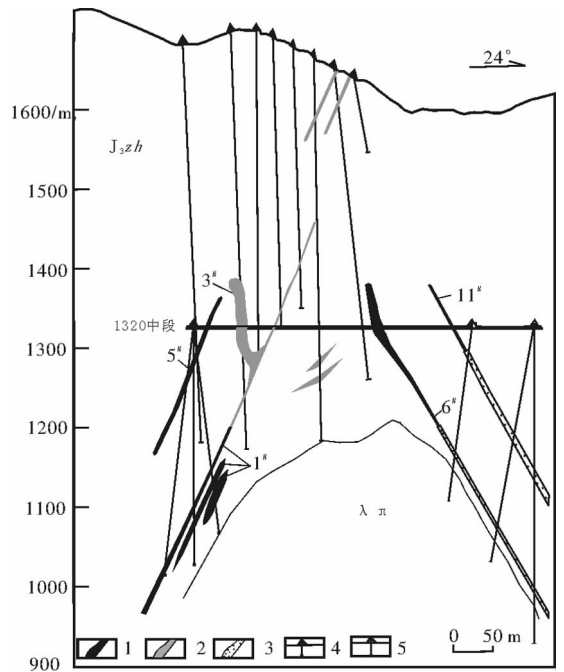


图5 山西支家地6号勘查线剖面图②

1—新发现矿体;2—已知矿体;3—预测矿体;4—以往施工钻孔;5—本次施工钻孔;J_{3zh}—上侏罗统火山岩;λ π—石英斑岩

Fig.5 Geological section of exploratory profile No. 6 of the Zhijiadi lead-zinc-silver ore deposit, Shanxi

1—New orebody;2—Known orebody;3—Predicted orebody;4—Previously drilled borehole;5—Currently drilled borehole; J_{3zh}—Upper Jurassic lava; λ π—quartz porphyry

①据云南大姚六直铜矿接替资源勘查项目组资料改编, 2006.

②据山西支家地铅锌银矿接替资源勘查项目组资料改编, 2006.

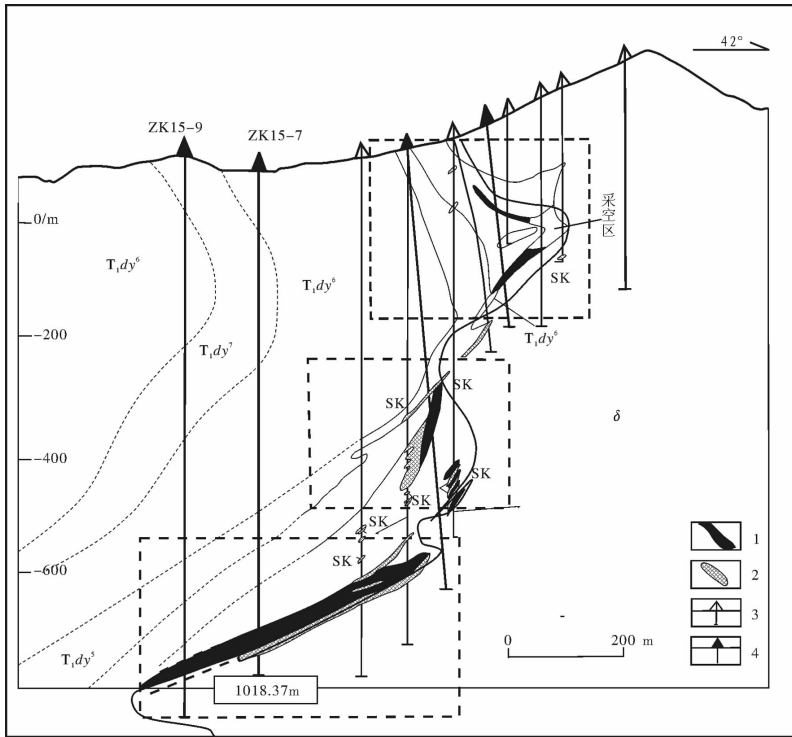


图6 湖北大冶铁矿床15勘探线设计剖面图①

1—铁矿体;2—砂卡岩;3—以往施工钻孔;4—本次施工钻孔;T₁dy⁵—下三叠统大冶群灰岩第5段; T₁dy⁶—下三叠统大冶群灰岩第6段;T₁dy⁷—下三叠统大冶群灰岩第7段;δ—闪长岩;SK—砂卡岩

Fig.6 Designed geological section of exploratory profile No. 15 of the Daye iron ore deposit, Hubei
1—Iron orebody;2—Skarn;3—Previously drilled borehole;4—Currently drilled borehole;T₁dy⁵—Fifth Member of limestone of the Lower Triassic Daye Group;T₁dy⁶—Sixth Member of limestone of the Lower Triassic—Daye Group; T₁dy⁷—Seventh Member of limestone of the Lower Triassic—Daye Group; δ—diorite;SK—skarn

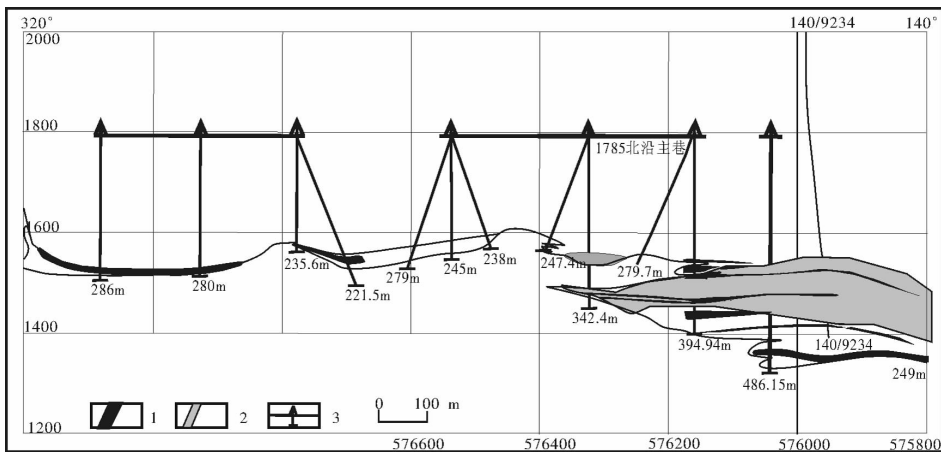


图7 云南个旧老厂D10线地质剖面图②

1—硫化矿;2—玄武岩;3—钻孔

Fig.7 Geological section of exploratory profile No. D10 of the Gejiulaochang copper-tin deposit, Yunnan
1—Sulfide;2—Basalt;3—Borehole

①据湖北大冶铁矿接替资源勘查项目组资料改编, 2006.

②据云南个旧老厂铜锡矿接替资源勘查项目组资料改编, 2006.

心、沉积厚度、物源、水源、古气候、水温、物理化学环境等。第二类以盆地沉积、热卤水沉积为主的矿床类型,除上述内容以外,还要研究盆地构造特征;包括盆地类型、盆内及盆缘构造、同沉积构造,以及热液活动等特殊岩类标志产物。例如云南大姚六直铜矿在平面上形成300 m左右宽度呈带状展布的砂岩铜矿(图4)。因后期褶皱构造改造,向南产状转陡。

(2)火山构造体系:可进一步划分为陆相和海相两种火山矿床类型,主要应研究火山原生构造、火山基底构造、火山岩相构造。研究中应突出火山机构和次火山相,海相火山岩则应突出火山沉积盆地。例如山西支家地铅锌银矿,地表为北西向断裂带和爆破角砾岩筒复合控制矿体,深部次火山岩体接触带控矿(图5)。

(3)侵入构造体系:可分为侵入岩体构造体系和侵入接触构造体系。前者主要形成岩浆型铬、铜镍矿床,应对岩体平面、剖面形态、产状、侵位、空间组合、岩相带界面等特征进行研究。后者主要形成于高温热液型、斑岩型、矽卡岩型矿床,除研究岩体特征外,重点研究接触带构造(接触面、接触裂隙带)、围岩构造、捕虏体、爆破角砾岩等成矿构造特征,例如大冶铁矿受膝状接触构造控矿(图6)。安徽铜陵铜山铜矿接触带转折处控制成矿,云南个旧锡矿在位于花岗岩接触带的低洼处成矿(图7)。

(4)断裂构造体系:包括一切类型的破裂不连续面,这是最常见的矿田构造体系,主要研究断裂构造类型、规模、产状、强度、力学性质、期次、运动方式、物质成分、组合关系、构造体系等特征。例如山东玲珑金矿床浅部矿体和深部矿体倾向相反,说明其控矿构造产状深部变化(图8)。

(5)褶皱构造体系:一般和变质成矿作用有关,主要研究褶皱构造类型、规模、产状、形态、空间组合、叠加及多期褶皱等特征。

(6)复合构造体系:一般情况下,大中型矿床都是复合构造体系控制成矿,最常见复合构造是断裂和其他4种矿田构造体系的叠加,意义十分重大,往往形成大型、超大型矿床。

在叠加成矿作用过程中还存在一种空间上叠加,时间上属于不同构造旋回(或阶段)的叠加成矿构造,对成矿意义十分重大,但不属于复合构造体系的,称之为叠加构造体系或多期成矿构造。

(7)成矿后构造:一是断裂,二是褶皱。断裂构造根据与矿体空间位置的关系可分为两类:顺矿构造,主要是后期构造沿矿体复合叠加活动;顺走向切断矿体。此外常见大型推覆构造形成隐伏矿床或隐伏煤盆地。二是断矿构造,沿矿体横向切断矿体。主要研究其规模、产状、力学性质、运动方式。成矿后褶皱构造在沉积变质型矿床中十分常见,对找矿意义重大,不可忽视。此外,沉积矿产经常受后期褶皱构造改造,例如四川省宝鼎煤矿,过去施工钻孔过浅,后来施工深孔见厚大矿体(图9)。

3.2 成矿构造研究的一般特征

(1)成矿作用过程中,构造活动和成矿物质沉淀一般都是同时的,因此成矿构造一般指成矿同时活动的构造。所谓成矿前构造虽然存在,但无法识别,因此采用成矿构造的概念。成矿作用过程是流体三维空间渗滤作用过程,矿体、矿脉、矿带的存在代表了含矿流体的物理化学条件变换界面,即地球化学障的空间表达。成矿过程不是如自来水管道的作用,因此“导矿构造”、“容矿构造”的概念,除了矿浆成矿作用

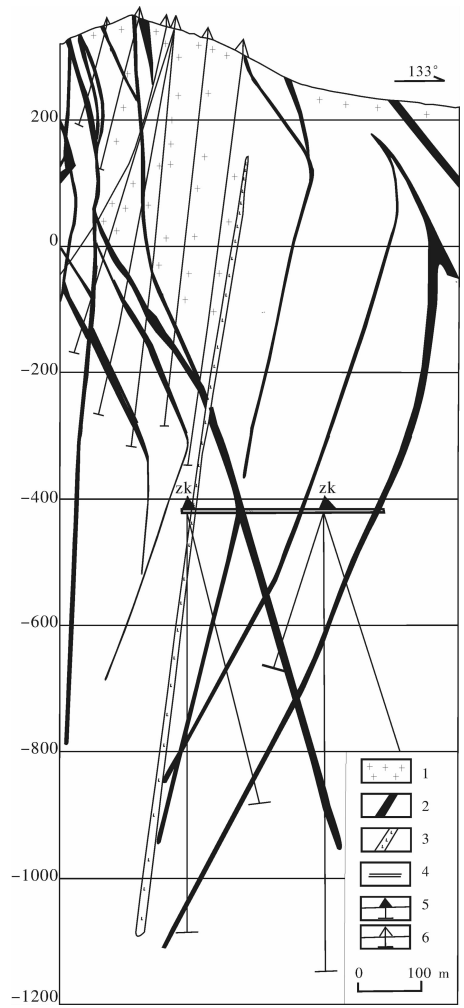


图8 山东玲珑金矿175号群脉71线剖面图^①

- 1—花岗岩;2—金矿脉;3—绢英岩化花岗质碎岩;
- 4—坑道;5—本次施工钻孔;6—以往施工钻孔

Fig.8 Geological profile No.71 of the 175 veins of Linglong gold ore deposits in Shandong

- 1—Granite;2—Gold vein;3—Phyllic-altered granitic cataclastic rocks;4—Underground workings;
- 5— Currently drilled borehole;6— Previously drilled borehole

^①据山东玲珑金矿接替资源勘查项目组资料改编,2006。

大,往往以密集裂隙结构面为常见成矿构造。所谓“大脉带”,从总体上讲仍然属于密集裂隙带。因此不论何种结构面类型,深部找矿都应判别是否是主要结构面,一般情况,深部矿体主要受主构造结构面控制,此类主构造结构面,有的形成延深很大的主压结构面,有的则形成延深很大的裂隙带,虽然其中每条裂隙规模不大,但是总体上裂隙带规模较大,主压结构面延伸也较大。对于深部找矿而言,主压结构面的识别意义十分重大。广东××矿床位于北东、北西、南北向3组构造交汇处,南北向主压结构面控矿,经验证深部矿体延伸很大(图10)。

(2) 判别两组构造交汇部位对确定深部矿体位置十分重要:构造交汇分为两种:一种是同一构造体系同序次交汇和不同序次交汇;另一种是两个不同构造体系交替活动,两种构造体系活动痕迹往往反映在同一矿体上,对于两种构造体系活动标志的识别就深部找矿而言意义更为重要,一般能形成规模较大的矿体。

(3) 结构面运动方式,对判别矿体垂向延伸十分重要,矿体垂向侧伏对深部找矿意义重大,主要取决于结构面运动方式,因此应认真研究主成矿期的结构面力学性质和运动方式。一般矿体侧伏方向受结构面运动的轴向方向控制。

(4) 构造垂向组合方式十分重要,根据垂向构造(不同结构面)组合可以判别深部矿体位置,构建构造体系可以判断成矿构造组合方式。

(5) 构造多期活动,尤其是主成矿期后的后期或末期成

矿作用掩盖了主成矿期构造作用,造成无矿假象。应注意认真判别,避免误判。

(6) 成矿后构造研究对深部找矿意义十分重大:对断矿构造研究一般都很重视,而顺矿构造的破坏作用往往易被忽略,这样就直接影响深部工程施工部署,其规模、性质、与矿体的空间关系十分重要。近于相同标高见矿零星,往往由于顺矿构造的破坏引起,应注意沿垂向大胆追索。在深部找矿中,推覆体构造对寻找层状矿体意义十分重大。通过成矿后构造研究扩大矿床远景的情况十分常见。辽宁红透山铜、锌矿在-827 m中段东侧矿体受F8断裂影响发生位移,后根据构造性质判别位移方向,找到右侧矿体(图11)。河北迁安铁矿,成矿后断裂造成矿体下落,过去钻孔未到位,本次工作经施工见到矿体向下延伸(图12)。

4 成矿作用标志研究

矿床成矿特征研究是成矿规律研究工作的基本内容。主要包括成矿时代、矿体空间分布特征、成矿物质成分、成矿期次、成矿作用标志研究等。

深部找矿一般是在两种情况下进行,第一种是在已知矿体深部进行找矿。第二种是在尚未发现规模矿体的地区进行深部找矿。上述两种情况的研究内容存在很大的区别。在第一种情况下强调已知矿体成矿特征的综合研究。

以下是成矿作用标志研究在深部找矿中的重点:(1)矿体物质组分及其空间分布特征、特别是垂向变化特征研究;

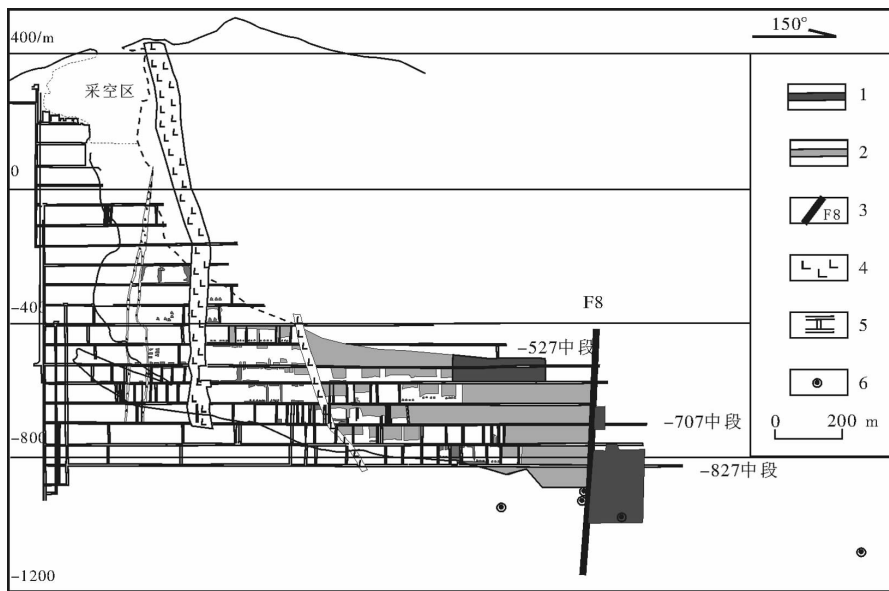


图11 辽宁红透山铜锌矿床3号矿体垂直纵投影图①

1—新发现矿体;2—已知矿体;3—成矿后断层;4—脉岩;5—坑道;6—已施工钻孔

Fig.11 Vertical longitudinal projection of orebody No. 3 of the Hongtoushan copper-zinc deposit, Liaoning

1—New orebody; 2—Known orebody; 3—Post-ore faulting; 4—dike rock; 5—Underground workings; 6— Previously drilled borehole

①据辽宁红透山铜锌矿接替资源勘查项目组资料改编, 2006.

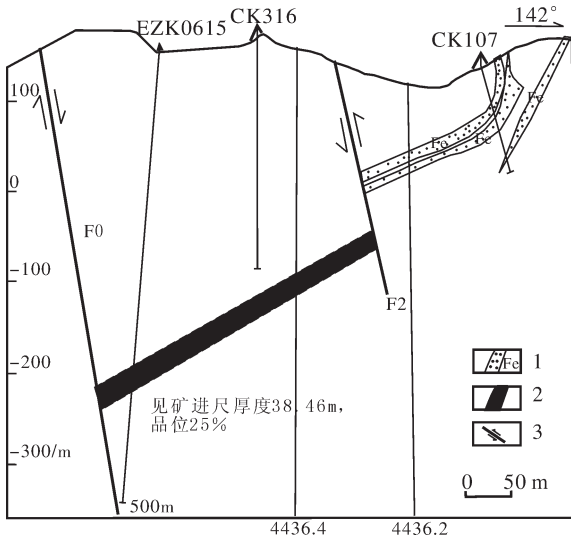


图12 河北迁安铁矿二马铁矿床N200勘探线剖面图^①
 1—已知矿体;2—新发现矿体;CK—以往施工钻孔;
 ZK—本次施工钻孔;5—断层

Fig.12 Geological profile of No. N200 of Erma iron orebody of Qian'an iron deposits in Hebei

1—Known orebody;2—New orebody;CK—Previously drilled borehole;ZK—Currently drilled borehole;5—Fault

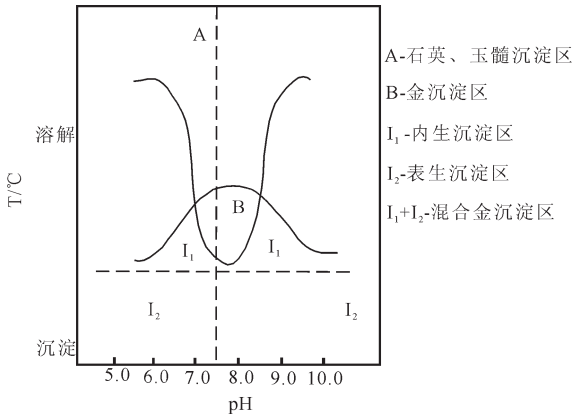


图13 金沉淀温度与酸碱度关系(据陈光远,1986)

Fig.13 Relation between temperatures and pH for gold precipitation (after Chen, 1986)

(2)成矿期次及多期次成矿物质组合的变化及其空间分布特征研究;(3)成矿流体物理化学条件标志研究。

关于矿体物质组分和多期次成矿物质组合的空间分布方面研究工作,着重研究主元素、共伴生元素在空间上的分布特征,一般有以下几种情况:同一成矿元素沿三维空间品位变化规律的研究;共伴生元素沿三维空间组合方式的变化

规律研究;同一成矿系统在同一矿田或不同尺度成矿带,不同主元素矿产地的空间分带变化规律的研究。采用同地已知区推测未知区的方法或应用已知矿床模型进行异地类比的方法都可以达到深部预测的目的。

应用原生晕研究方法判断矿体的空间分布,尤其在剖面上预测深部延伸及尖灭再现具有重要的作用。

由于矿石物质组分空间分布规律研究工作仅仅适用于已知矿体深部找矿,并不适用于尚未发现规模矿体情况下的深部找矿,因此成矿物理化学条件标志研究对于深部找矿更加具有普遍意义。

成矿流体物理化学条件标志研究是根据成矿作用过程中流体的物理化学条件的物质组分表达转变为直接找矿标志的研究工作。据此直接判别深部矿体的大体位置,确定隐伏矿体找矿方向。这是深部找矿地质研究工作的重要内容。笔者选择的技术路线是通过研究流体作用过程的矿物来实现上述目标,基本上属于找矿矿学的范畴。

4.1 流体成矿作用的一般特征

从成矿作用的角度讨论,沉积型矿床、热(卤)水型矿床、“内生”热液型矿床、岩浆型矿床都是在流体作用过程中形成的。可以看作不同流体成矿作用类型的连续变化过程。区别在于流体的水源、成分、气相和液相比比例不同,流体成矿的物理化学过程是完全一样的。

(1)流体中水源特征:除岩浆型矿床以外,从沉积型矿床和岩浆热液型矿床两个端元对应了天水和岩浆水两个端元,中间的各种矿床类型,都是天水和岩浆水相混合的过渡类型,混合比例主要取决于成矿作用的深度,据科拉半岛超深钻资料,天水已达地表以下10 km,中国东海大陆科学钻资料也已证明天水可以达地表以下5 km深度。如前所述:除超镁铁质有关的铬铁矿及基性超基性岩铜镍矿床以外,各类成矿作用的成矿深度也就是10 km以内。大多数矿床类型成矿深度3~5 km,少数达8 km左右,因此大多数成矿流体都有天水加入。近30年来无数矿床研究资料表明,一般成矿流体都是天水和岩浆水的混合水,区别在于相互比例多少而已。流体中天水所占的比例主要受成矿地质作用的形成深度所控制。一般情况下,天水的pH值偏酸性,岩浆水的pH值偏碱性。

(2)气相和液相比比例特征:流体由气相和液相组成,气相和液相的比例受流体物理化学条件控制,当成矿作用深度不同时,其流体气液比例也不同,一般“内生”热液矿床成矿越浅气相比比例越高。

(3)物质组分特征:流体中物质组分主要与流体运移和聚集过程中母体及接触的地质体的物质成分有关。

(4)流体成矿作用过程,实质上是流体中金属元素溶解、迁移、集聚、沉淀的过程,一般情况下都是在强酸、强碱、高温高压,强氧化环境下溶解、迁移,在低压低温、偏中性环境下沉淀。因此成矿作用过程就是流体物理化学条件的变化过

①据河北迁安铁矿接替资源勘查项目组资料改编,2006。

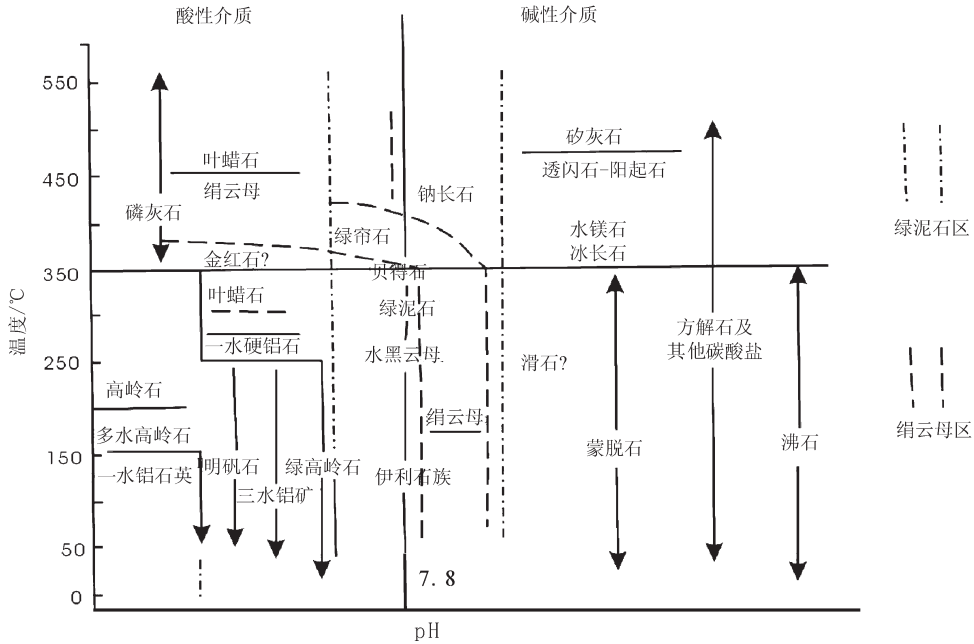


图14 温度与pH值的关系(据陈光远,1987)

Fig.14 Relation between temperatures and pH (after Chen, 1987)

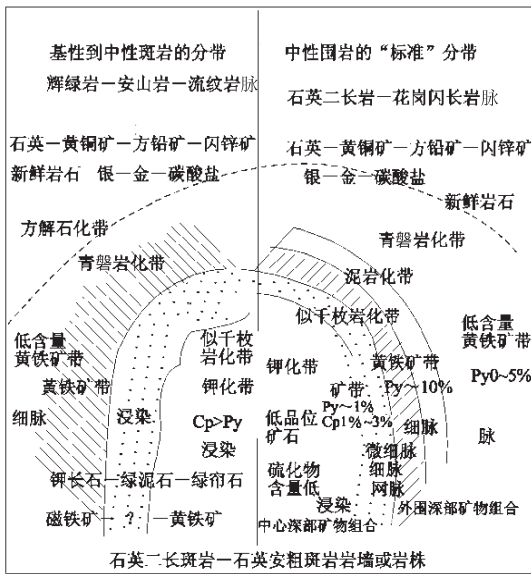


图15 斑岩铜矿的蚀变模式(引自胡惠民,1992)
Fig.15 Alteration model of porphyry copper deposits
(after Hu, 1992)

程。例如金沉淀温度与酸碱度的关系是典型实例(图13)

4.2 地球化学障研究

(1)地球化学障的概念:该概念是由前苏联别列尔曼于1968年提出,在流体成矿作用过程中,无论是沉积成矿作用还是热液成矿作用,地球化学障在成矿作用中起到了决定性

作用。沉积地球化学障空间位置就是沉积金属矿物的富集沉淀区,主要为氧化还原界面及酸碱度急剧变化界面。例如:云南金顶铅锌矿床其矿体位于氧化还原转换界面,而且有大量膏盐的层位中。热液流体成矿作用属于高温水岩地球化学系统,情况复杂得多,温度、压力、酸碱度、氧化还原条件的变化,4种因素既相互影响,又直接控制金属元素的聚集沉淀。不论何种因素,其结果是成矿物质大量在温度变换、压力变换、酸碱度变换、氧化还原条件变换的界面附近聚集和沉淀,而各种物理化学交换界面就是热液地球化学障,属于一种地球化学动力学界面。

(2)地球化学障的识别^[1,2]

沉积流体成矿作用主要通过岩性成分、岩石颜色、特种矿物沉积岩(例如膏盐建造等)来判别地球化学障的空间位置。热液流体成矿作用主要通过判别反映物理化学环境的标志矿物,即蚀变矿物来判断热液地球化学障的存在(图14)。

- ①强碱性环境:花岗岩类的钾长石化;酸性火山岩:沸石化;碳酸盐类的铁白云石化、白云岩化、碳酸盐化。
- ②强酸性环境:花岗质岩类的次生石英岩化、高岭石化、蛋白石化;酸性火山岩的叶腊石化、明矾石化;基性岩类的黑云母化。
- ③中性环境:绢云母化、硅化、绿泥石化、钠长石化、绿帘石化、伊利石化、水云母化。
- ④强氧化环境:赤铁矿化。
- ⑤还原环境:黄铁矿化,等等。

例1:斑岩铜矿的蚀变模式,从上到下或从外到内分别为青磐岩化、泥岩化、石英绢云母化、钾化。实际上表示了弱酸性-中性-强碱性的物理化学环境,根据垂向剖面分析,浅部

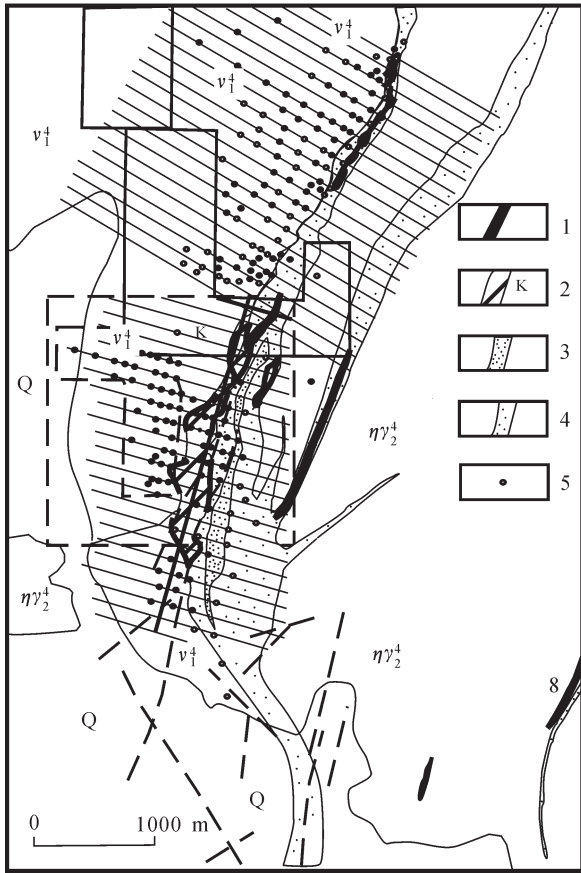


图16 山东焦家金矿带南段综合地质图^①

Q—第四系; $\eta\gamma_2$ —二长花岗岩; V_1 —变辉长岩;
 1—金矿体; 2—钾化花岗岩; 3—黄铁绢英岩化碎裂岩;
 4—黄铁绢英岩化花岗岩; 5—钻孔位置

Fig.16 Generalized geological map of south ore block of Jiaojia gold ore belt in Shandong

Q—Quaternary; $\eta\gamma_2$ —monzogranite; V_1 —metagabbro;
 1—Gold orebody; 2—Potash granite; 3—Pyritized and phyllic-altered cataclastic rocks; 4—Pyritized and phyllic-altered granite; 5—position of borehole

以天水为主,相对低温,内带为岩浆水,相对高温,中带含矿。黄铜矿赋存于石英绢云母化带,为中性环境。这是一个标准中温,3~5 km 侵位环境下的热液地球化学障模式(图15)。

例2:胶东金矿带,每一个金矿床都存在以下蚀变分带,成矿构造带中黄铁绢云岩化带和金矿体在空间上紧密产出。属于酸碱度为中性、中低温环境。在附近广泛出现钾长石化,分布范围大小不等,但总是在矿体附近出现,属于强碱性,高温环境。因此这是中低温蚀变构造带型矿床的热液地球化学障的标志。山东焦家南段寺庄金矿床,全隐伏矿床,地表存在在钾化,深部验证后见矿(图16~17)。安徽姚家岭铜铅锌矿等全隐伏矿床,地表只见高岭石化,偶见爆破角砾岩,钻孔岩心,

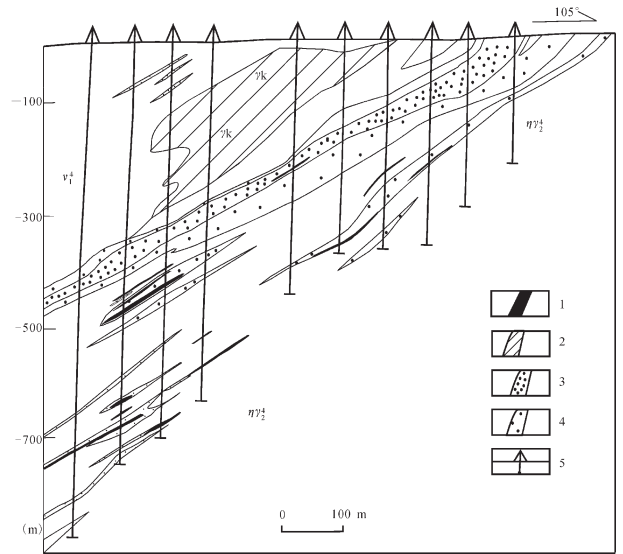


图17 山东寺庄矿区280勘探线地质剖面图^①

1—金矿体; 2—钾化花岗岩; 3—黄铁绢英岩化碎裂岩; 4—黄铁绢英岩化花岗岩; 5—钻孔; $\eta\gamma_2$ —二长花岗岩; V_1 —变辉长岩

Fig.17 Geological section of exploratory profile No. 280 of the Sizhuang gold deposit, Shandong

1—Gold orebody; 2—Potash granite; 3—Pyritized and phyllic-altered cataclastic rocks; 4—Pyritized and phyllic-altered granite; 5—Borehole; $\eta\gamma_2$ —monzogranite; V_1 —metagabbro

可见强烈钾化,深部见矿良好(图18~19)。

例3:紫金山铜金矿属于火山岩型低温热液矿床,这是一个低温低压环境下浅成热液铜矿床的热液地球化学障模式,顶部为硅质淋滤带,向下为石英明矾石带,到底部为石英绢云母化带。深部岩体为英安质次火山岩,外带为石英迪开石带。反映了从上到下由强酸至中性环境。推断成矿深度为300~2400 m,石英明矾石带温度220~240℃的铜矿物的形成接近于沉积型和内生热液型过渡类型条件下酸性氧化环境。在石英明矾石带中赋存了蓝辉铜矿、铜蓝、硫砷铜矿为主的铜矿物。这是一个低温近地表超浅成火山机构—次火山型矿床的热液地球化学障模式(图20~21)。

矽卡岩型矿床,严格限定于侵入岩接触带及其附近,就流体作用而言,前期矽卡岩形成的矿物不具挥发份,不具附加阴离子,俗称“干”矽卡岩,因此无矿,后期流体作用下形成的矽卡岩矿物,含挥发份并具阴离子,俗称“湿”矽卡岩,为主要成矿期,这是矽卡岩矿床的热液地球化学障模式。

4.3 成矿作用标志在深部找矿中的应用

(1)区分标志成矿物质运移的矿物组合,与标志成矿物质沉淀的矿物组合十分重要,一般情况下沉积流体或热卤水流体是在温度、压力相对稳定的条件下判别成矿条件,因此,

①据山东省地勘局第六勘查院寺庄金矿详查报告改编, 2006。

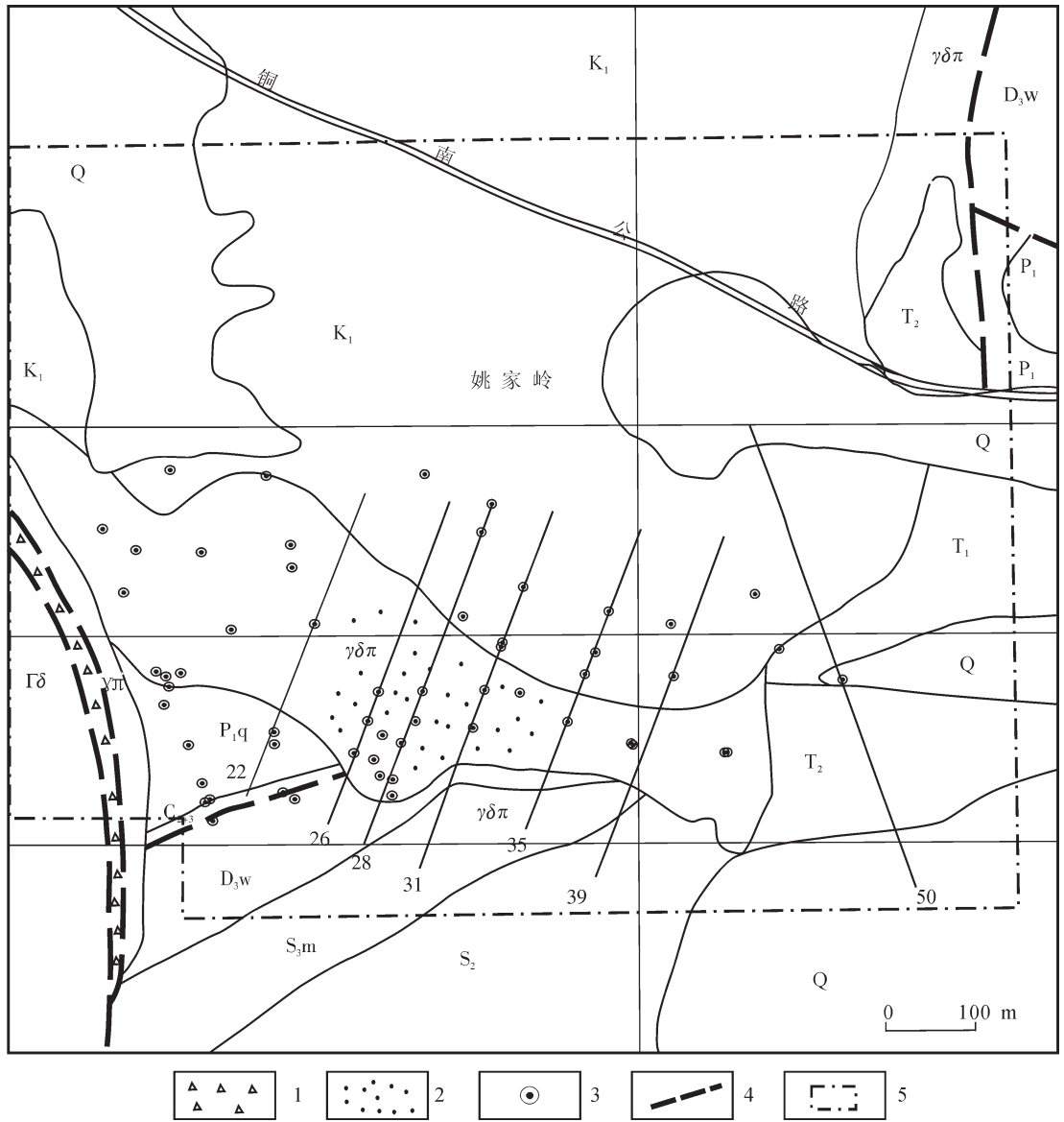


图18 安徽姚家岭铜铅锌矿地质平面图(据蒋其胜,2006)

Q—第四系沉积物;K₁—下白垩统火山岩;T₁—下三叠统灰岩;T₂—中三叠统白云质灰岩;P_{1q}—下二叠统栖霞组灰岩;

C₂₊₃—石炭系白云质灰岩;D_{3w}—上泥盆统石英砂岩;S₂,S_{3m}—中上志留统砂页岩;γδπ—燕山期花岗闪长斑岩;

γπ—燕山期花岗岩;1—构造角砾岩带;2—褐铁矿化蚀变;3—施工钻孔;4—断层;5—勘查区范围

Fig.18 Geological plan map of the Yaojialing copper-lead-zinc (iron) deposit, Anhui

Q—Quaternary sediments;K₁—Lower Cretaceous lava;T₁—Lower Triassic limestone;T₂—Middle Triassic dolomitic limestone;

P_{1q}—Lower Triassic Xixia Formation limestone;C₂₊₃—Carboniferous limestone;D_{3w}—Upper Devonian quartzose sandstone;

S₂,S_{3m}—Middle—Upper Silurian sandshale;γδπ—Yanshanian granodiorite porphyry;γπ—Yanshanian granodiorite;

γπ—Yanshanian granite—porphyry;1—Pressure breccia belt;2—Limonitization;3—Current drilled borehole;4—Fault;5—Exploration target range

主要判别酸碱度及氧化还原条件标志就可以了。从氧化环境向还原环境追索其过渡带,或者从酸性环境向碱性环境追索转换带。热液成矿流体往往比较复杂,由于不同的成矿深度、成矿构造面等等作用,情况比较复杂,往往是温度、压力、氧化还原条件、酸碱度4种因素综合作用的结果。研究认为,还

是有规律可循。一般情况下热液成矿流体显示成矿物质运移的矿物组合范围广,标志明显,也容易识别。标志成矿物质沉淀的矿物组合范围小,和矿体在空间上紧密伴生。从深部找矿的角度,识别前者意义更大。

一般情况下,成矿作用在形成深度相似的环境下流体作

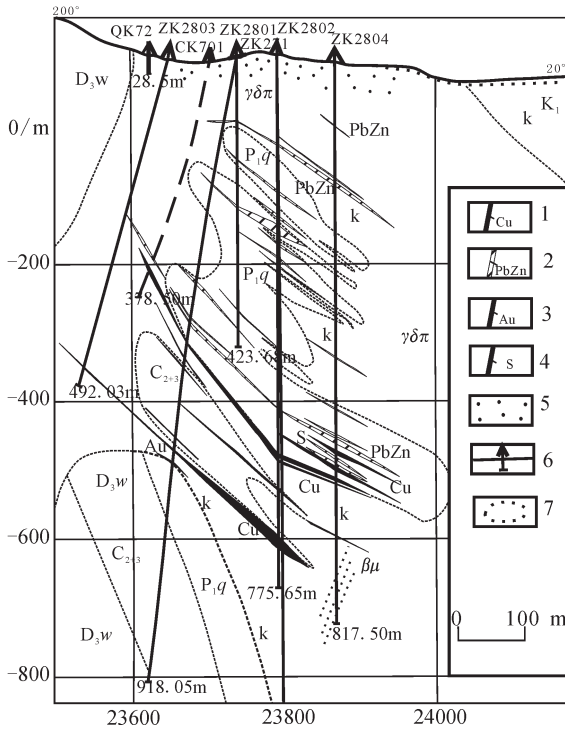


图19 安徽姚家岭铜铅锌矿28线剖面图(据蒋其胜,2006)
 1—铜矿体;2—铅锌矿体;3—金矿体;4—硫矿体;5—高岭石化、黄铁矿化;k—钾长石化;6—钻孔;7—推测地质界线;K₁—下白垩统火山碎屑岩;P₁q—下二叠统栖霞组灰岩;C₂₊₃—中上石炭统灰岩;
 D₃w—上泥盆统五通组砂岩;γδπ—花岗闪长斑岩

Fig.19 Geological section of exploratory profile No. 28 of the Yaojialing copper-lead-zinc deposit, Anhui (after Jiang, 2006).
 1—Copper orebody;2—Lead-zinc orebody;3—Gold orebody;4—Sulfur orebody;5—Kaolinization and pyritization;k—K-feldspar alteration;6—Borehole;7—Inferred geological boundary; K₁—Lower Cretaceous Kedou Formation pyroclastic rocks; P₁q—Lower Permian Xixia Formation limestone; C₂₊₃—Middle-Lower Carboniferous limestone; D₃w—Upper Devonian Wutong Formation sandstone; γδπ—granodiorite porphyry

用强度越大,成矿规模越大。因此,标志成矿物质转移的矿物组合的空间范围大小能够指示深部规模型矿床是否存在。

(2) 判别成矿物质运移蚀变组合和矿体的空间关系:成矿流体运移的空间范围远远大于成矿物质卸载的空间范围。在地球化学障两侧或上下,成矿流体环境的变化是渐变过渡的,只有到了界面附近才出现突变。因此流体中的各种阳离子自界面向两侧一般出现依次沉淀的现象。因此正常情况下,反映不同物理化学环境的流体中阳离子的沉淀,一般强酸、强碱类矿物主要沉淀在地球化学障界面的两侧、上下、或左右,由于边界条件的不均一性,情况是多变的,但总体上位于矿体周缘,和近矿围岩蚀变相接构成分带。实际工作中常见两种情况,一种为同一成矿阶段,而形成显著的空间分带,例如斑岩铜矿蚀变分带。规律性十分明显,第二种情况成矿作用不同阶

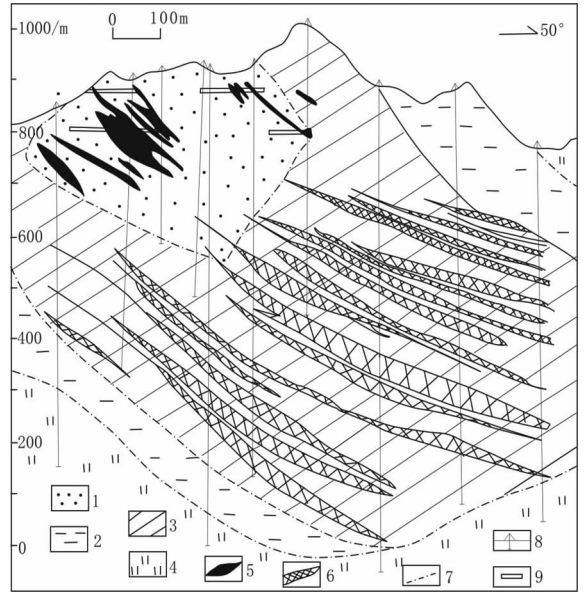


图20 福建紫金山铜金矿3线蚀变岩分带地质剖面图
 1—硅质交代岩带;2—石英迪开石蚀变岩带;3—石英明矾石蚀变岩带;4—石英绢云母蚀变岩带;5—金矿体;6—铜矿体;
 7—蚀变岩界线;8—钻孔;9—穿脉坑道

Fig.20 Geological section of alteration zoning along exploratory profile No. 3 of the Zijinshan copper-gold deposit, Fujian (after Zhang, et al., 1992)

- 1—Siliceous replacement zone;2—Quartz-dickite alteration zone;3—Quartz-alunite alteration belt;
- 4—Quartz-sericite alteration zone;5—Gold orebody;
- 6—Copper orebody;7—Boundary of altered rocks;
- 8—Borehole;9—Transverse drift

段不同物理化学环境下的矿物组合,在空间上叠加,标志沉淀的蚀变带和矿体叠加在反映运移的蚀变体之中。热卤水成矿作用还会出现不同矿物地(岩)层的剖面分带。

由于反映流体运移的蚀变范围较大,在矿床勘查过程中,有时在地表填图范围内容易被忽略,造成误判。因此对于深部找矿而言,加强对反映流体运移的蚀变矿物组合的研究意义十分重大,对于显示强酸、或强碱环境,或者强氧化环境下的蚀变组合的研究应密切注意。

5 结论

(1) 深部找矿指的是深度1500~2000 m以浅的找矿,多数矿床类型成矿作用研究空间为5~10 km以浅。

(2) 深部找矿三要素:地质研究是基础,物探技术是主要技术支持,钻掘工程是实现条件。通过地质研究工作建立明确的深部找矿思路,通过物探、化探推断深部矿体位置、施工钻掘工程,实现找矿突破,这是深部找矿的基本技术路线。

(3) 成矿地质研究基础工作在深部找矿中主要突出与成矿

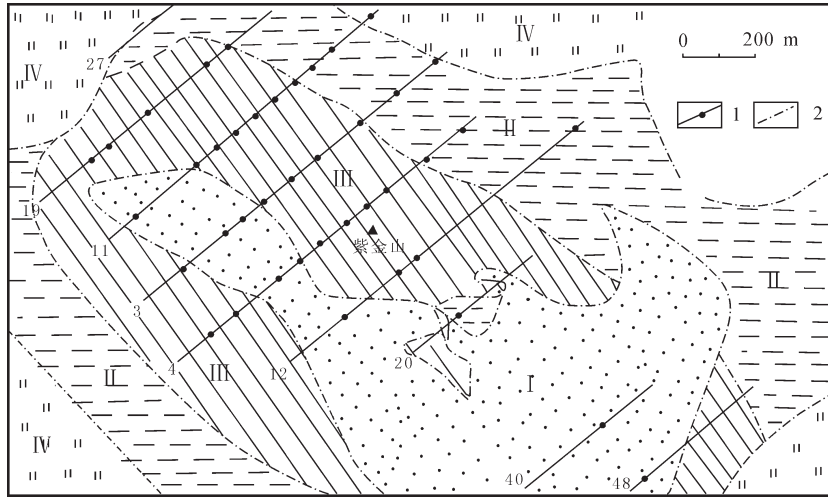


图21 福建紫金山铜金矿床蚀变岩分带地质平面图

I—硅质交代岩带；II—石英迪开石蚀变岩带；III—石英明矾石蚀变岩带；IV—石英绢云母蚀变岩带；
1—勘探线及钻孔；2—蚀变岩界线

Fig.21 Geological plan map showing the alteration zoning of the Zijinshan gold deposit, Fujian

I—Siliceous replacement zone; II—Quartz-dickite alteration zone; III—Quartz-alunite alteration belt;
IV—Quartz-sericite alteration zone; 1—Exploratory line and borehole; 2— Boundary of altered rocks

地质作用、矿田构造、成矿作用标志三方面研究。成矿地质作用研究建立深部找矿思路，矿田构造研究是推断深部找矿赋存空间位置，成矿作用标志研究是判断深部是否存在规模型矿体的主要标志。这些都是深部找矿地质基础的研究工作。

参考文献(Reference):

- [1] 赵伦山, 张本仁. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1988:213-283.
Zhao Lunshan, Zhang Benren. Geochemistry[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1988:213-283(in Chinese).
- [2] 韩吟文, 马振动. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2003:119-138.
Han Yinwen, Mazhendong. Geochemistry [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2003:119-138(in Chinese).
- [3] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆:重

庆出版社, 1987:451.

Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Huian. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy [M]. Chongqing:Chongqing Publishing House, 1987:451(in Chinese).

- [4] 张德全, 李大新, 赵一鸣, 等. 紫金山铜金矿床蚀变和矿化分带 [M]. 北京:地质出版社, 1992.
Zhang Dequan, Li Daxin, Zhao Yiming, et al. Alteration and Mineralization Zoning of the Zijinshan Copper-Gold Deposit[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1992(in Chinese).
- [5] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等. 金顶铅锌矿床地质-地球化学[J]. 矿床地质, 2002, 21(3):270-278.
Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, et al. Jinding Pb-Zn deposit:geology and geochemistry[J]. Mineral Deposits, 2002,21(3): 270-278(in Chinese with English abstract).

Geological study in search of metallic ore deposits at depth

YE Tian-zhu, XUE Jian-ling

(*Development of Research Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China*)

Abstract: The paper discusses the methods and theories of mineral search at depth on the basis of the experience obtained by the authors in exploration of succession mineral resources in crisis-facing mines of important mineral resources in China and the practice of mineral search at depth in recent years. The authors think that geological research, applications of geophysical and geochemical exploration techniques and drilling and tunneling are three basic factors of mineral search at depth. Geological research is the basic condition, geophysical and chemical prospecting is the technical support condition and drilling and tunneling is the condition for realization. They constitute the basic technical line. The paper discusses in an all-round way the studies of the characteristics of geological processes, ore field structure and indications for ore-forming processes. The study of the characteristics of geological processes related to ore-forming processes is basic work for determining the idea of mineral search. These geological processes include deposition, magmatism, volcanism, metamorphism and integrated ore-forming geological processes. The study of ore field structure puts forward the sedimentary structure system, volcanic structure system, intrusive structure system, fault structure system, fold structure system, compound structure system and post-ore structure system, as well as their applications in mineral search at depth. The study of indications of ore-formation processes includes studies of the indications of ore-forming characteristics and indications of physical-chemical conditions of ore fluids. The authors also put forward the theoretical basis of geochemical barriers to ore hydrothermal fluids and their research methods and application in search of mineral resources at depth.

Key words: mineral search at depth; ore-forming geological processes; ore field; indication of ore-forming processes

About the first author: YE Tian-zhu, male, born in 1941, professor and senior geologist, engages in studies of regional mineral resources survey and methods and theory of mineral resources survey in Depth; E-mail: ytz@cgs.gov.cn.