2019年12月
December, 2019

矿 床 地 质
MINERAL DEPOSITS

第38卷 第6期
38 (6): 1365~1378

文章编号: 0258-7106 (2019) 06-1365-14 Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2019. 06. 011

闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素组成对西藏纳如松多铅锌矿床成矿作用的制约*

龚雪婧[1,2],杨竹森[3**],庄亮亮[4],马 旺[4]

(1 中国地质科学院,北京 100037; 2 中国地质调查局—中国地质科学院地球深部探测中心,北京 100037; 3 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿规律与资源评价重点实验室,北京 100037; 4 中国地质科学院地质研究所,北京 100037)

摘 要 西藏纳如松多铅锌矿床是冈底斯北侧 Pb-Zn-Ag-Mo 成矿带中规模最大且最为典型的与斑岩系统相关的铅锌矿床,发育有多种矿化样式。本次研究选取该矿床隐爆角砾岩型矿体中的闪锌矿开展 LA-ICP-MS 微量元素组成研究,发现其中 Fe 含量不高,不属于高温铁闪锌矿,以富集 Cd、Mn、Co,而贫 In、Ga、Ge、Se、Te 为特征。闪锌矿 In/Ga 值、In/Ge 值及 Zn/Cd 值指示纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿体形成于中低温环境,且属于热液型矿床的范畴。闪锌矿原位微量元素特征指示纳如松多铅锌矿床的形成主要受到来自于岩浆热液作用的影响和控制,成矿物质主要来自于深部斑岩岩浆系统。

关键词 地球化学;闪锌矿;微量元素组成;LA-ICP-MS;铅锌矿床;西藏

中图分类号:P618.42; P618.43 **文献标志码**:A

Genesis of Narusongduo Pb-Zn deposit, Tibet: Constraint from in-situ LA-ICP-MS analyses of minor and trace elements in sphalerite

GONG XueJing[1,2], YANG ZhuSen[3], ZHUANG LiangLiang[4] and MA Wang[4]

(1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 SinoProbe Center, Chinese Academy of Geological Sciences and China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3 MNR Key Laboratory and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Narusongduo lead-zinc deposit is the largest and most typical Pb-Zn deposit in the Pb-Zn-Ag-Mo metallogenic belt on the northern side of Gangdise belt. It has multiple mineralization styles. In this study, trace elements in sphalerite of the cryptoexplosion breccia type orebody were analyzed by LA-ICP-MS, and the result shows that the Fe content of sphalerite is not high and hence sphalerite does not belong to Fe sphalerite. The sphalerite is characterized by enrichment of Cd, Mn and Co and poor concentrations of In, Ga, Ge, Se and Te. The In/Ga, In/Ge and Zn/Cd ratios indicate that the deposit is a kind of hydrothermal deposit formed in a middle-low temperature environment. The values and discriminant diagram of the characteristic elements in the analyzed sphalerite show that the formation of Narusongduo deposit was mainly controlled and influenced by magmatic hydrothermal activities and the ore-forming material dominantly came from the porphyry magma system.

Key words: geochemistry, sphalerite, trace elements composition, LA-ICP-MS, Pb-Zn deposit,Tibet

* 本文得到国家重点研发计划"深地资源勘查开采"重点专项(编号:2016YFC0600306)地质调查项目(编号:DD20179172)和国家自然科学基金(编号:41802097)的联合资助

第一作者简介 龚雪婧,女,1988 年生,博士,助理研究员,主要从事矿床学研究。Email:xuejinggong@cags.ac.cn

* * 通讯作者 杨竹森,男,1964 年生,博士,研究员,长期从事矿床学及矿床地球化学研究。Email:yangzhusen@vip.sina.com

收稿日期 2017-09-29;改回日期 2019-09-29。张绮玲编辑。

http://www.kcdz.ac.cn

斑岩型矿床指在时间上、空间上和成因上与浅成或超浅成中酸性斑岩体有关的细脉浸染型矿床。Sillitoe(2010)对斑岩型矿床的概念进行了扩展与提升,将斑岩型矿床范围扩大至斑岩型成矿系统,这个成矿系统不仅包含有传统意义上的斑岩型矿床,还包括近岩体的矽卡岩型矿床、远端的脉状与层状矿体以及一系列浅成低温热液型矿床。已有研究表明,斑岩型矿床的铜-钼、钼、金组合与岩浆性质和来源密切相关(Hedenquist et al., 1998; Richards, 2003; Cooke et al., 2005; 侯增谦等, 2004; 2007; 2009; 2012; 张洪瑞等, 2009),但与斑岩系统相关的铅锌矿床研究程度较为薄弱,与岩浆岩的亲缘关系尚未明确。因此,对斑岩系统中铅锌矿床成因演化的进一步研究及对斑岩相关铅锌矿成矿模型的完善具有重要的科研和生产价值。

西藏纳如松多铅锌矿床是冈底斯北侧Pb-Zn-Ag-Mo成矿带中规模最大且最为典型的与斑岩相关的铅锌矿床,发育有隐爆角砾岩型、矽卡岩型、层状和脉状等矿化样式。前人研究发现,纳如松多矿床隐爆角砾岩型矿体中方铅矿Pb同位素与花岗斑岩体Pb同位素特征基本一致,但与地层Pb同位素组成有一定差别,并由此判定花岗斑岩是成矿金属物质的主要提供者(杨勇,2010);刘英超等(2015)对纳如松多隐爆角砾岩型矿体中方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿样品进行了硫同位素测试,对成矿期石英进行了氧同位素测试,发现纳如松多铅锌矿床隐爆角砾岩型矿化中硫来自发生了H_2S去气作用的斑岩岩浆残余相,成矿流体主要来自于发生了去气作用的岩浆水,并有少量天水加入,也指示成矿物质来自于斑岩岩浆系统,但依然缺少更充分的地球化学数据的支持。

闪锌矿是铅锌矿床中的主要成矿矿物,常含有Fe、Mn、Cd、Ga、Ge、In、Se、Te等元素,不同元素的含量差异得到国内外研究学者的关注,并试图通过成分-成因的研究建立针对闪锌矿特定元素含量的成因判别图解,或追踪成矿信息(Claussen, 1934; Graton et al., 1935; Stoiber, 1940; 刘英俊等, 1984; 李徽, 1986; Zhang, 1987; 张乾, 1987; 韩照信, 1994; 涂光炽等, 2003; Di Benedetto et al., 2005; Monteiro et al., 2006; Gottesmann et al., 2007; Wang et al., 2010)。长久以来对闪锌矿的元素地球化学成分的分析多采用电子探针或单矿物ICP-MS的测试方法进行,前者受检出限的影响而使得测试元素种类较少,后者受单矿物挑选精度以及包体或矿物集合体不同世代叠加生长的影响使测试数据混乱模糊。目前,随着LA-ICP-MS高精度仪器的出现,以及原位硫化物微量元素测试技术的成熟,一些学者开始应用这一测试方法开展矿物和矿床学的研究并取得了较好的成果(Cook et al., 2009; 2011; Ye et al., 2011; 叶霖等, 2012; Belissont et al., 2014; 2016; 胡鹏等, 2014; 曹华文等, 2014; Wohlgemuth-Ueberwasser et al., 2015; 邢波等, 2016),为通过闪锌矿矿物学研究揭示成矿过程、判断矿床成因提供了阶梯。本次研究通过LA-ICP-MS测试技术,对西藏纳如松多铅锌矿床隐爆角砾岩型矿体中的闪锌矿开展微量元素组成特征研究,更加直接地限制了成矿物质来源,并进一步约束了纳如松多矿床隐爆角砾岩型矿体的成因类型。

1 区域及矿区地质概况

纳如松多铅锌矿床地处西藏日喀则谢通门县,位于青藏高原拉萨地块中部的隆格尔—工布江达火山岩浆弧中段(图1a),区域地质演化经历了古生代冈瓦纳大陆北缘海相沉积、中生代雅鲁藏布江洋和班公湖-怒江洋俯冲消减与闭合、新生代印度-亚洲大陆碰撞3个阶段。区域广泛分布新生界和古生界地层,东部零星出露前震旦系念青唐古拉群变质基底,南部零星分布中生界白垩系地层。前震旦系主要为念青唐古拉岩群,主要岩性为片麻岩、石英岩、大理岩、长石石英岩等。古生界自下而上包括整合接触的永珠组(C_1y)、拉嘎组(C_2l)、昂杰组(P_1a)和下拉组(P_2x),属冈瓦纳北侧被动陆缘沉积岩系,其中永珠组、拉嘎组和昂杰组为浅海相碎屑岩,由中细粒长石石英砂岩、细粒石英砂岩、粉砂岩和泥页岩组成,下拉组为一套浅海相碳酸盐岩,主要岩性为灰岩,局部夹粉砂岩。中生界自下而上包括整合接触的塔克那组(K_1t)和设兴组(K_2s),属冈底斯陆缘弧北侧的弧后盆地沉积岩系,其中塔克那组为一套浅海相碳酸盐岩,时代为早白垩世晚期,设兴组为一套海陆交互相细碎屑岩,时代为晚白垩世早中期。新生界自下而上包括典中组(E_1d)、年波组(E_2n)、嘎扎村组(N_2g)和第四系(Q),属印度-亚洲大陆碰撞环境的陆相火山-沉积岩系,其中典中组为一套中基性火山岩,年波组主要为一套中酸性火山岩,嘎扎村组为一套富碱酸性火山岩。

http://www.kcdz.ac.cn/

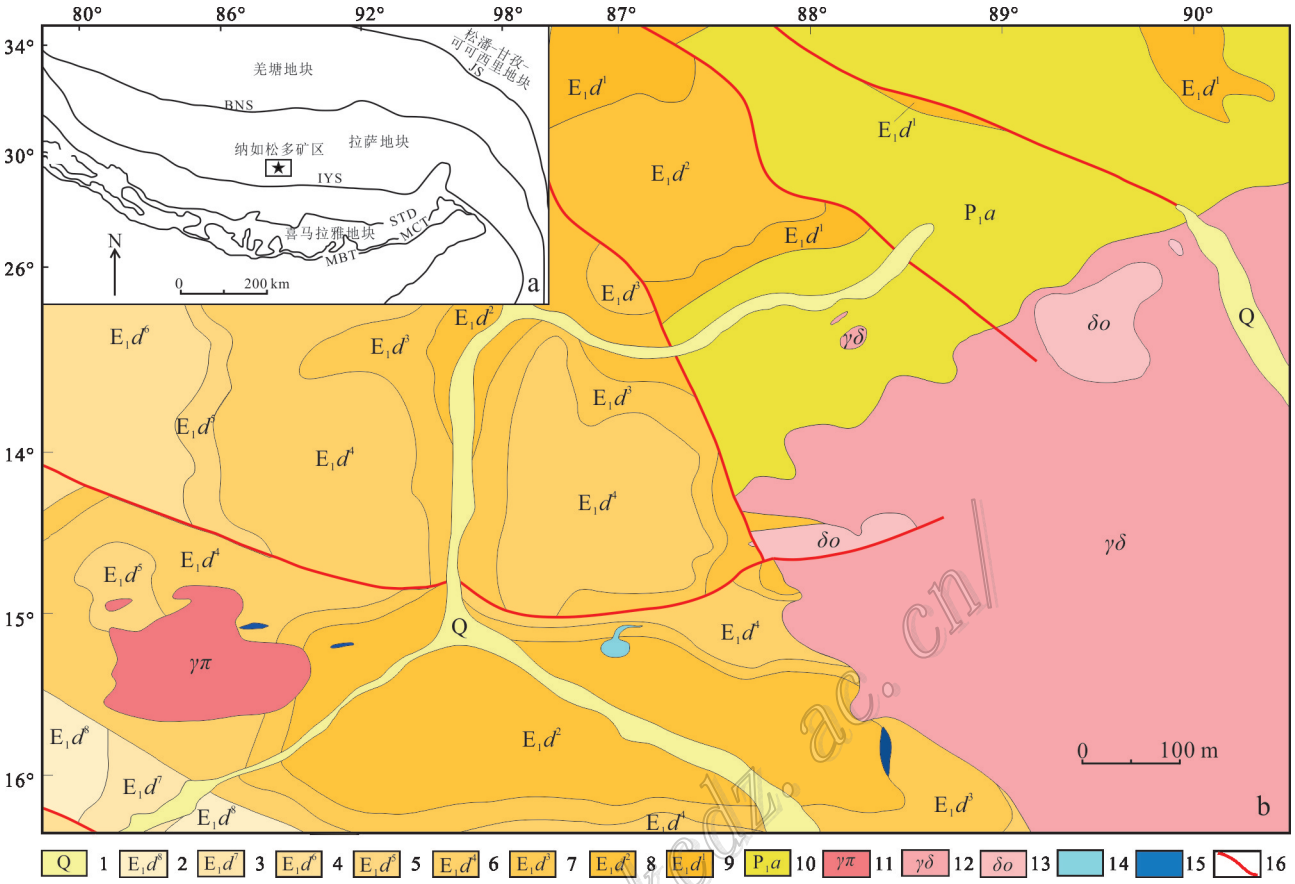


图 1 青藏高原碰撞造山带构造格架(a, 据纪现华等,2012)及纳如松多矿区东段地质图(b, 据杨竹森未发表资料)

1—第四系松散堆积层;2—古新统典中组第八段安山岩;3—古新统典中组第七段凝灰质砂砾岩;4—古新统典中组第六段安山岩、凝灰岩;5—古新统典中组第五段凝灰质砂砾岩;6—古新统典中组第四段英安岩、凝灰岩;7—古新统典中组第三段砂砾岩;8—古新统典中组第二段凝灰岩;9—古新统典中组第一段砂砾岩;10—下二叠统昂杰组板岩;11—花岗斑岩;12—花岗闪长岩;13—石英闪长岩;14—闪长玢岩;15—铅锌矿体;16—断裂

STD—藏南拆离系;MCT—主中央逆冲断裂;MBT—主边界逆冲断裂;JS—金沙江缝合线;BNS—班公湖-怒江缝合带;IYS—雅鲁藏布江缝合带

Fig. 1 Tectonic framework of the Tibetan collisional orogenic belt (a, after Ji et al., 2012) and geological map of the eastern Narusongduo mining area (b, after Yang, unpublished)

1—Quaternary accumulation layer; 2—8th member of Palaeocene Dianzhong Formation: andesite; 3—7th member of Palaeocene Dianzhong Formation: tuffaceous glutenite; 4—6th member of Palaeocene Dianzhong Formation: andesite and tuff; 5—5th member of Palaeocene Dianzhong Formation: tuffaceous glutenite; 6—4th member of Palaeocene Dianzhong Formation: dacite and tuff; 7—3rd member of Palaeocene Dianzhong Formation: glutenite; 8—2nd member of Palaeocene Dianzhong Formation: tuff; 9—1st member of Palaeocene Dianzhong Formation: glutenite; 10—Permian Angjie Formation: slate; 11—Granite porphyry; 12—Granodiorite; 13—Quartz diorite; 14—Diorite porphyrite; 15—Lead-zinc orebody; 16—Fracture

STD—South Tibetan Detachment System; MCT—Main Central Trust; MBT—Main Boundary Trust; JS—Jinsha River Suture; BNS—Bangong Co-Nujiang Suture; IYS—Indus-Yarlung Suture

本区历经中生代新特提斯洋壳的俯冲增生与新生代印度-亚洲大陆碰撞造山,发生了多期次、大规模的火山-岩浆活动和构造活动,根据目前发表的高质量的年代学数据,将拉萨地块中部岩浆活动分为晚三叠世—中侏罗纪(215~175 Ma)、晚侏罗世—白垩纪(160~80 Ma)、古新世—始新世(70~40 Ma)、渐新世—中新世(33~10 Ma)4个阶段。其中古新世—始新世是冈底斯岩浆活动最剧烈时期,在 52 Ma左右达到岩浆活动的峰期(Zhu et al.,2011)。该期花岗岩和巨厚林子宗火山岩系构成了冈底斯岩浆岩带的主体。构造及岩浆活动为成矿提供了有利条件,先后发育有中生代弧盆环境 Fe-Cu-Au 成矿系统、主

http://www.kcdz.ac.cn/

碰撞期(65~41 Ma)Pb-Zn-Ag-Mo-Fe成矿系统、晚碰撞期(40~25 Ma)Mo-Cu-Au成矿系统和后碰撞期(24 Ma以后)Cu-Mo-Au-Cs成矿系统,形成拉萨地块中部Fe-Cu成矿带、冈底斯北侧Pb-Zn-Ag-Mo成矿带、冈底斯南侧Mo-Cu-Au成矿带和冈底斯斑岩Cu-Mo成矿带。

纳如松多铅锌矿床是冈底斯北侧Pb-Zn-Ag-Mo成矿带中的典型矿床之一,矿区内出露的地层主要为下二叠统昂杰组砂板岩(P_1a_1)、中二叠统下拉组灰岩(P_2x_2)、古新统典中组火山岩(E_1n)和全新统松散堆积物(Q_4)。矿区内岩浆活动强烈,以大面积分布的典中组火山岩最为瞩目,与之相伴的还有中酸性侵入岩株和岩脉,分布于矿区东部、中部和西南部。典中组内至少有4次大规模的火山喷发,形成一套以中基性火山岩为主体的岩石组合,主要岩石类型有玄武安山岩、安山岩、英安岩、安山质凝灰熔岩、英安质(角砾)凝灰熔岩、熔结(角砾)凝灰岩、安山质(英安质)熔结火山角砾岩、英安质(含角砾)岩屑晶屑凝灰岩等,其中第二次喷发的英安岩锆石U-Pb年龄为(63.2±0.6)Ma(杨竹森未刊资料)。火山活动间歇期形成沉凝灰岩、凝灰质(粉、细)砂岩和凝灰质(砂)砾岩等。矿区内侵入岩主要为一套中酸性岩,岩性有石英闪长岩、花岗闪长岩、细斑花岗斑岩、粗斑花岗斑岩和闪长玢岩等。石英闪长岩和花岗闪长岩呈岩株状侵入于矿区东部下二叠统昂杰组砂板岩中,其中石英闪长岩侵位稍早,呈残留体状分布于花岗闪长岩岩株西北部(图1b)。岩株被北西向和近东

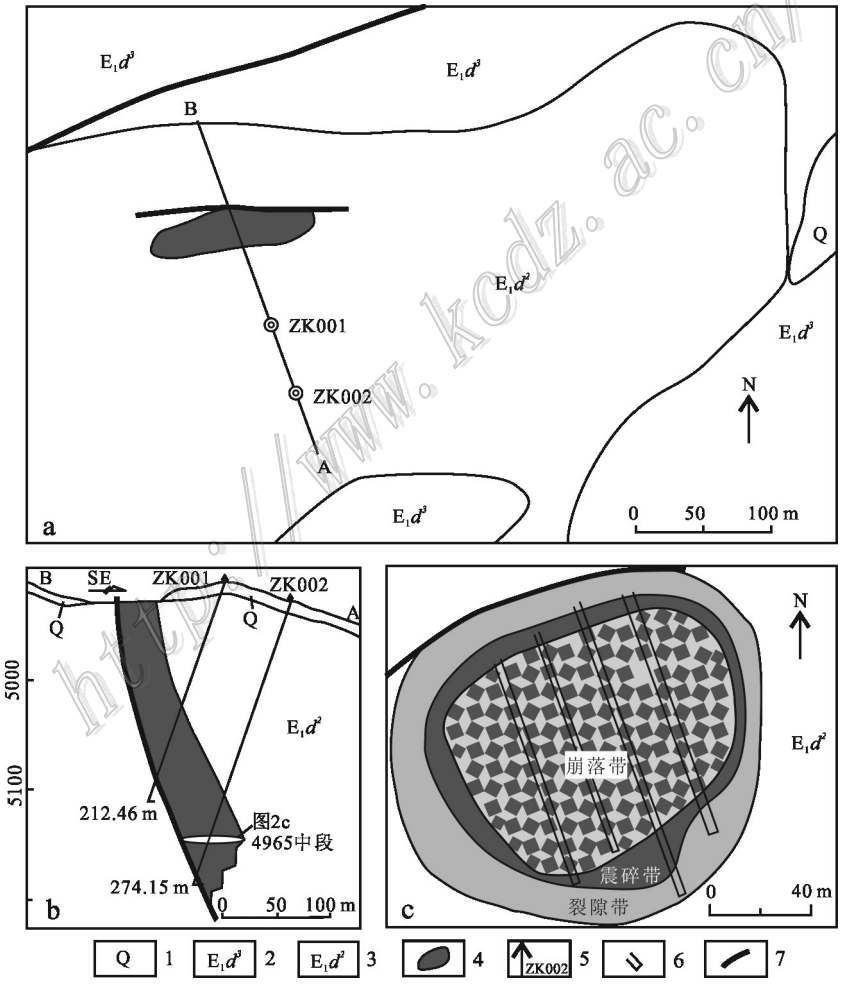


图2 纳如松多铅锌矿床隐爆角砾岩型矿化平面(a)、剖面(b)及矿体岩相分带(c)简图(据刘英超等, 2015)

1—第四系松散堆积层;2—古新统典中组第三段砂砾岩;3—古新统典中组第二段凝灰岩;4—铅锌矿体;5—钻孔及编号;6—穿脉平硐;7—断层

Fig.2 Geological map of crytoexplosive breccia-type orebody(a), its cross section(b) and facies zonation(c) in the Narusongduo deposit(modified after Liu et al., 2015)

1—Quaternary accumulation layer; 2—3rd member of Palaeocene Dianzhong Formation glutenite; 3—2nd member of Palaeocene Dianzhong Formation tuff; 4—Lead-zinc orebody; 5—Drill hole and its serial number; 6—Adit; 7—Fault

http://www.kcdz.ac.cn/

西向逆断层所切割,沿断裂发生的热液蚀变和铅锌矿化显示,石英闪长岩和花岗闪长岩岩株侵位于铅锌成矿之前。细斑和粗斑花岗斑岩呈岩株、岩枝和岩脉状侵入于矿区中西部二叠系沉积岩和古新统火山岩中,两种斑岩间呈涌动侵入接触关系,其锆石U-Pb年龄分别为(62.47±0.91)Ma和(62.54±0.77)Ma(纪现华等,2012)。

矿区内发育隐爆角砾岩型、矽卡岩型、层控型和脉型4种矿化样式,本次研究集中于纳如松多矿区最特征、最具经济价值的隐爆角砾岩型铅锌矿体中。目前已发现2个隐爆角砾岩型铅锌矿化岩筒,即Ⅰ号和Ⅱ号矿体,两矿体相邻分布于矿区东部花岗斑岩体外围典中组凝灰岩中,角砾岩筒内部具有清晰的角砾岩相分带特征,从岩筒中心向外分为崩落带、震碎带和裂隙带3个相带(图2c)。隐爆角砾岩型矿体的矿物组合:矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿(图3c~f),另见少量的铅次生矿物白铅矿、铅钒;脉石矿物主要为石英、长石、绢云母。主要产出角砾型矿石(图3a),角砾为典中组火山岩,以方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等热液矿物为胶结物,并在整个矿体中分布,此外,角砾状矿化相对较弱的位置常发育有脉状矿石,矿体局部偶见浸染状矿化。矿区内围岩蚀变作用普遍发育,外围典中组凝灰岩主要发育硅化-高岭土化,而向角砾岩筒内部,则依次发育绿泥石-绿帘石-碳酸盐化、铁锰碳酸盐化和石英绢云母化,其外围蚀变在蚀变中心均可见叠加现象。矿床为一期多阶段成矿,包括绿泥石-绿帘石-硫化物阶段、硫化物-石英-方解石阶段、黝铜矿阶段。其中硫化物-石英-方解石阶段是主要的铅锌成矿阶段,3阶段矿化在空间上相互叠加,无明显分带现象。纪现华等(2014)通过矿体内成矿阶段热液绢云母^{40}Ar-^{39}Ar坪年龄,将成矿年龄限定为(57.81±0.66)Ma,略晚于花岗斑岩的成岩年龄,显示花岗斑岩与铅锌成矿密切相关。

2 样品采集与测试方法

在详细的野外地质调查工作的基础上,笔者采集了纳如松多矿床东矿段6个钻孔中硫化物-石英-方解石阶段的10个闪锌矿样品进行了67个测点分析,所有样品均属于隐爆角砾岩型矿体。将采集的样品制成光薄片,在显微镜下鉴定后,分别进行电子探针和激光剥蚀等离子质谱测试分析。

电子探针成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,测试仪器为JEOL-JXA-8230,工作条件为:加速电压15 kV;电流20 nA;束斑直径5 μm。激光剥蚀等离子质谱实验在武汉上谱分析科技有限责任公司实验室进行。矿床中闪锌矿以深棕色-黑色为主,测试前将测试样品磨制成0.2 mm的探针片,选定测试矿物。采用LA-ICP-MS对其进行微区微量元素的分析。采用193 nm激光剥蚀系统联接Agilent HP-7700 Quadripole ICPMS完成,测试所用束斑直径为32 μm。测试过程中首先遮挡激光束进行空白背景采集20 s,然后进行样品连续剥蚀采集55 s,停止剥蚀后继续吹扫55 s清洗进样系统,单点测试分析时间130 s。测试数据采用内标和外标相结合的方法,内标采用Zn元素,外标采用NIST610和MASS-1标样进行标定,每隔5个测试点进行1个NIST610标样和2个MASS-1标样的标定测试。样品测试结果采用ICPMSDataCal (Liu et al., 2008)软件进行样品信号处理,计算测试值、测试误差和元素检出限。根据检出限的判断分析获得了P、S、Ti、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、As、Sr、Ag、Cd、In、Sn、Sb和Pb等元素的有效数据。

3 测试结果

闪锌矿的电子探针分析测试结果如表1所示,纳如松多隐爆角砾岩型矿体闪锌矿中w(Fe)变化于0.26%~8.22%之间,大多数集中于1%~8%,但均小于10%,表明其不属于Fe闪锌矿;Zn和S含量变化范围较小,w(Zn)集中于58.81%~67.11%之间,w(S)变化于32.21%~34.11%之间。

闪锌矿微量元素原位LA-ICP-MS分析结果如表2和图4所示,可以看出闪锌矿微量元素含量变化范围较大,总体具有以下特征:

(1) Cd含量相对较高,w(Cd)在1915.97×10^{-6}~3966.11×10^{-6}之间,平均为2741.76×10^{-6},其含量明显低于MVT型铅锌矿床中的闪锌矿(如四川天宝山铅锌矿床,叶霖等,2016)和受晚期改造作用有关的喷流沉积铅锌矿床中的闪锌矿(如云南澜沧老厂铅锌矿床,叶霖等,2012);

(2) Cu和Pb含量变化范围较宽,w(Cu)变化范围为1.04×10^{-6}~23821.41×10^{-6},绝大多数低于350×10^{-6},且集中于0~50×10^{-6}之间;w(Pb)变化范围为0.09×10^{-6}~$65\ 026.20\times10^{-6}$,绝大多数小于10×10^{-6},且

http://www.kcdz.ac.cn

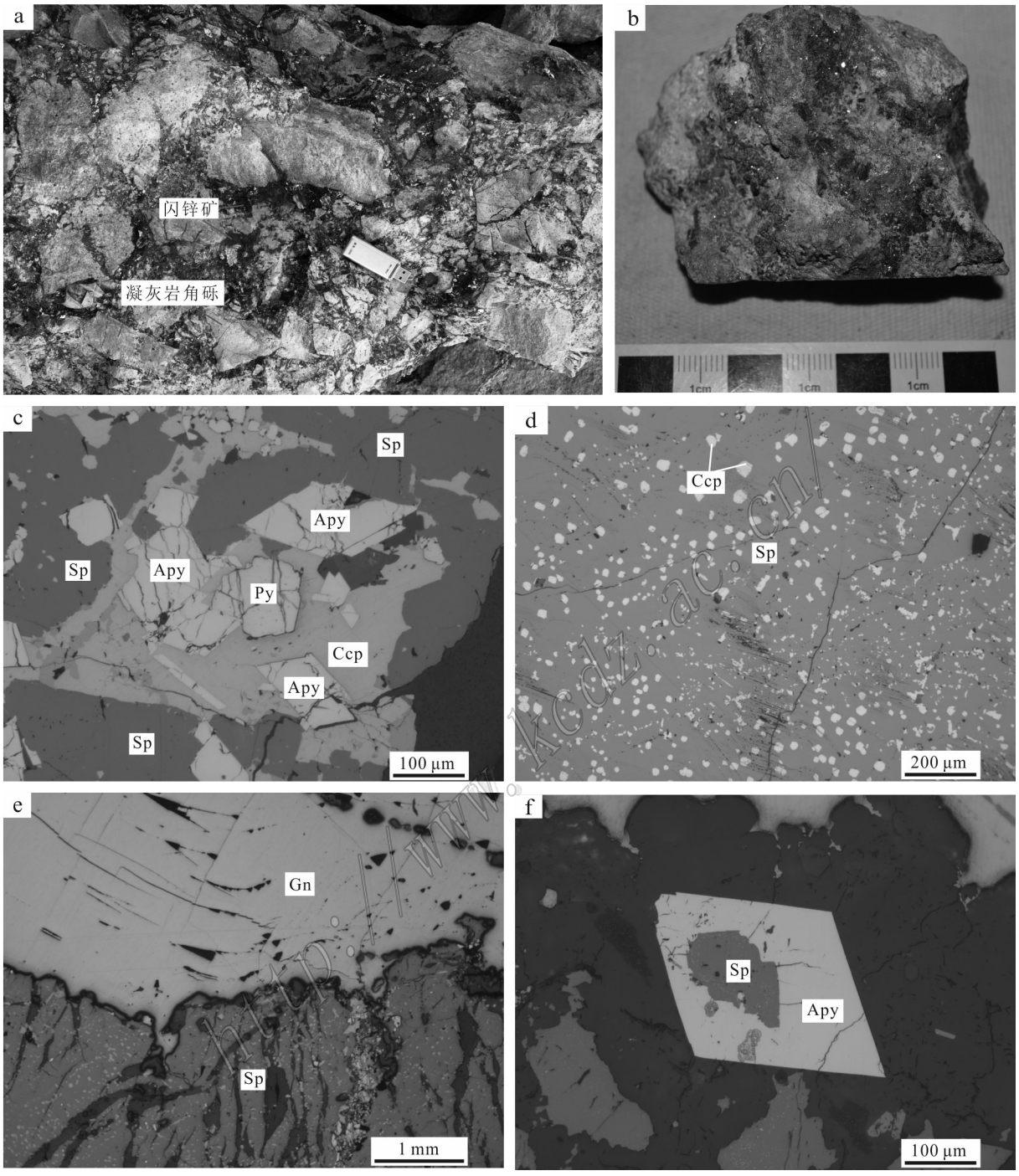


图3 纳如松多矿床部分代表性矿石野外照片(a)、手标本照片(b)及其显微照片(c~f)

a.纳如松多隐爆角砾岩型矿体崩落带角砾岩相;b. 石英方铅矿闪锌矿脉c.方铅矿闪锌矿黄铁矿黄铜矿矿石;d. 闪锌矿中的黄铜矿"病毒";e. 方铅矿闪锌矿矿石;f. 闪锌矿交代毒砂

Sp—闪锌矿;Ccp—黄铜矿;Apy—毒砂;Py—黄铁矿;Gn—方铅矿

Fig. 3 Photos of field (a), hand specimen (b) and microphotopraphs (c~f) of some ore samples from the Narusongduo deposit

a. Breccia rock in caving zone of crytoexplosive breccia-type orebody in Narusongduo; b. Quartz-galena-sphalerite vein; c. An ore composed of galena, sphalerite, pyrite and chalcopyrite; d. Sphalerite with 'chalcopyrite disease'; e. An ore composed of galena and sphalerite; f. Arsenopyrite replaced by sphalerite

Sp—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite; Apy—Arsenopyrite; Py—Pyrite; Gn—Galena

表 1 西藏纳如松多铅锌矿床闪锌矿电子探针测试成分表

Table 1 Electron microprobe analysis (EPMA) results for sphalerite from the Narusongduo Pb-Zn deposit, Tibet

样品编号	w(B)/%												
	Fe	S	Ni	Se	As	Ge	Pb	Bi	Cu	Zn	Co	Sb	总和
zk-9-14-11-1	4.40	33.79	0	0	0.05	0.03	0	0	0.01	61.75	0.05	0.01	100.09
zk-9-14-11-2	5.22	33.56	0	0.07	0	0	0	0.09	0	61.98	0.01	0	100.93
zk-9-14-11-3	5.02	33.04	0.02	0	0	0	0	0.05	0	61.77	0.02	0	99.92
zk-9-14-11-4	2.18	32.68	0.02	0	0	0.02	0.03	0	0.03	65.14	0	0.01	100.11
zk-9-14-11-5	0.66	33.38	0.02	0.01	0	0	0.04	0.03	0.02	67.05	0	0.02	101.23
zk-9-14-11-6	0.53	32.30	0	0	0	0	0	0	0	65.72	0	0	98.55
zk-9-14-11-7	0.83	32.51	0.01	0.06	0	0.01	0	0	0.20	66.70	0	0	100.32
zk-9-14-11-8	0.58	32.42	0.01	0	0	0	0	0.02	0	65.74	0	0	98.77
zk-9-14-11-9	0.26	32.45	0	0	0	0	0	0	0.01	66.61	0	0	99.33
zk-9-14-11-10	2.63	32.82	0	0.02	0	0	0	0.03	0	64.32	0.04	0	99.86
zk-9-14-11-11	7.55	33.34	0	0	0.04	0	0	0.03	0	59.91	0	0.01	100.88
zk-9-14-11-12	5.15	33.30	0.01	0	0	0	0.04	0	0	61.23	0.02	0.02	99.77
zk-9-14-11-13	3.77	32.69	0	0	0	0.01	0.02	0	0.01	62.52	0.01	0	99.03
zk-9-14-11-14	3.66	33.88	0.01	0	0	0	0.01	0.07	0.01	62.54	0.06	0	100.24
zk-9-14-11-15	4.79	33.25	0	0.03	0	0.02	0	0	0	62.73	0.02	0	100.84
zk-9-12-23-1	4.76	32.55	0	0.01	0	0	0	0	0	62.50	0.01	0	99.82
zk-9-12-23-2	4.69	32.52	0	0	0	0	0	0	0	61.20	0.02	0	98.43
zk-9-12-23-3	5.04	33.38	0	0.03	0	0.06	0.01	0.12	0	62.90	0.03	0	101.57
zk-9-12-23-4	4.93	33.54	0.01	0	0	0	0	0.02	0	62.54	0.02	0	101.06
zk-9-12-23-5	4.78	33.66	0	0.01	0	0.01	0.04	0	0	63.08	0.03	0	101.61
zk-9-14-10-1	0.89	33.32	0.01	0	0.01	0	0.04	0	0	65.80	0.05	0	100.112
zk-9-14-10-2	1.22	33.56	0.03	0.01	0	0	0.04	0.02	0	65.42	0.03	0.01	100.34
zk-9-14-10-3	0.95	32.81	0	0.01	0.06	0	0	0	0	65.15	0.03	0.01	99.02
zk-9-14-10-4	1.71	32.77	0.04	0	0	0	0.05	0	0	66.53	0.03	0	101.13
zk-9-14-10-5	1.09	32.64	0.01	0.06	0.02	0.06	0	0.01	0	66.18	0	0	100.07
zk-9-15-17-1	6.20	32.43	0	0.01	0	0.07	0	0	0.37	59.41	0.02	0	98.51
zk-9-15-17-2	6.50	32.92	0	0	0.05	0	0	0	0.16	60.89	0.03	0	100.55
zk-9-15-17-3	6.75	33.49	0.02	0	0	0	0	0	0.01	59.12	0.04	0.02	99.45
zk-9-15-17-4	7.16	33.86	0	0	0	0.01	0.06	0	0.02	59.02	0.01	0	100.14
zk-9-15-17-5	7.68	33.13	0.01	0	0	0	0.05	0.07	0.05	59.64	0.05	0	100.68
zk-9-11-22-2-1	7.91	33.24	0.02	0	0	0.07	0.02	0.07	0	59.68	0.04	0.01	101.06
zk-9-11-22-2-2	7.92	33.06	0.02	0	0	0	0	0	0	59.89	0.06	0	100.95
zk-9-11-22-2-3	7.87	33.22	0.01	0.02	0.01	0	0.19	0	0	59.88	0.04	0	101.24
zk-9-11-22-2-4	8.05	33.84	0.01	0	0	0	0	0	0	60.04	0.05	0	101.99
zk-9-11-22-2-5	8.22	33.21	0.01	0	0.02	0	0.03	0	0	59.66	0.02	0.02	101.19
zk-9-11-22-2-6	7.70	33.42	0.01	0	0.04	0.01	0	0	0	60.09	0.03	0	101.30
zk-9-11-22-2-7	7.85	33.36	0	0	0	0	0	0	0	59.45	0.04	0.03	100.73
zk-9-11-22-2-8	7.53	33.41	0.02	0	0	0	0.03	0.01	0	58.81	0.05	0.02	99.88
zk-9-11-22-2-9	7.66	32.90	0	0	0	0	0	0	0.02	60.44	0.05	0	101.07
zk-9-11-22-2-10	7.06	33.43	0	0.04	0.06	0.09	0.01	0	0.02	60.32	0.01	0	101.04
zk-9-13-29-1	4.05	33.59	0	0	0.04	0.01	0.03	0	0	63.63	0.04	0	101.39
zk-9-13-29-2	4.01	33.78	0	0	0	0	0	0	0	63.72	0.06	0	101.57
zk-9-13-29-4	3.08	33.45	0.01	0	0.03	0	0	0.03	0	64.53	0.04	0	101.17
zk-9-13-29-5	2.97	33.83	0.01	0	0	0	0.10	0	0	64.08	0.04	0	101.03
zk-9-13-26-1	0.91	33.01	0.02	0.03	0.05	0	0.07	0	0	67.11	0.09	0	101.29
zk-9-13-26-3	1.53	33.34	0.01	0	0	0.01	0	0	0	66.63	0.05	0	101.57
zk-9-13-26-4	1.03	32.74	0.01	0	0	0	0.14	0.04	0	66.43	0.05	0	100.44
zk-9-13-26-5	1.03	32.48	0	0	0	0	0	0	0.01	66.57	0.07	0.02	100.18

http://www.kcdz.ac.cn/

续表 1

Continued Table 1

样品编号	w(B)/%												
	Fe	S	Ni	Se	As	Ge	Pb	Bi	Cu	Zn	Co	Sb	总和
zk-9-11-22-1-1	4.62	32.79	0	0	0	0.01	0	0	0	62.71	0.04	0	100.17
zk-9-11-22-1-2	5.81	32.88	0.02	0.02	0	0	0	0	0	61.37	0.05	0.01	100.16
zk-9-11-22-1-3	3.28	32.92	0	0.06	0	0	0	0.02	0	63.78	0.01	0	100.07
zk-9-11-22-1-4	3.93	32.94	0	0.01	0.02	0.01	0.06	0	0.03	64.62	0.04	0	101.66
zk-9-11-22-1-5	2.83	33.46	0	0	0	0.02	0	0.08	0	66.07	0.03	0	102.49
zk-9-1'-10-2	5.16	34.11	0.01	0	0	0	0	0	0	62.65	0.04	0	101.97
zk-9-1'-10-4	4.98	32.42	0	0	0	0	0	0	0	60.64	0.04	0	98.08
zk-9-1'-10-5	6.12	33.15	0	0.04	0.06	0	0.06	0	0	59.97	0.02	0	99.42
zk-9-12-24-1	2.63	33.19	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	65.36	0.02	0	101.23
zk-9-12-24-2	2.75	33.50	0.02	0.01	0	0	0	0	0.03	65.40	0.02	0.01	101.74
zk-9-12-24-3	2.90	33.48	0	0	0	0.01	0.02	0	0	65.33	0.03	0	101.77
zk-9-12-24-4	2.73	33.21	0	0	0	0	0	0	0.02	65.26	0.02	0	101.24
zk-9-12-24-5	2.53	33.35	0	0.02	0	0	0	0	0	64.32	0.01	0.01	100.24
zk-9-12-24-6	2.45	32.21	0	0.02	0	0.01	0	0.01	0.04	64.78	0	0	99.52
zk-9-12-24-7	2.75	33.25	0	0.03	0.01	0.01	0	0.06	0.06	65.75	0.02	0	101.94
zk-9-12-24-8	2.59	33.28	0	0	0	0.03	0.11	0	0	64.77	0.02	0	100.80
zk-9-12-24-9	2.70	33.69	0	0.01	0	0.05	0	0	0	65.32	0.03	0	101.80
zk-9-12-24-10	2.60	33.55	0	0.02	0	0	0	0	0	65.33	0.01	0	101.51

集中于0~3×10^{-6}之间，在LA-ICP-MS时间分辨率剖面图中，Cu和Pb元素呈现变化幅度较大的不规则曲线（图5）；

（3）富集Mn、Co，且二者含量相对稳定，w(Mn)变化范围在4.64×10^{-6}~15131.48×10^{-6}之间，平均值为2481.93×10^{-6}（n=66）。w(Co)变化范围在0.28×10^{-6}~370.27×10^{-6}之间，平均值为149.55×10^{-6}（n=66）；

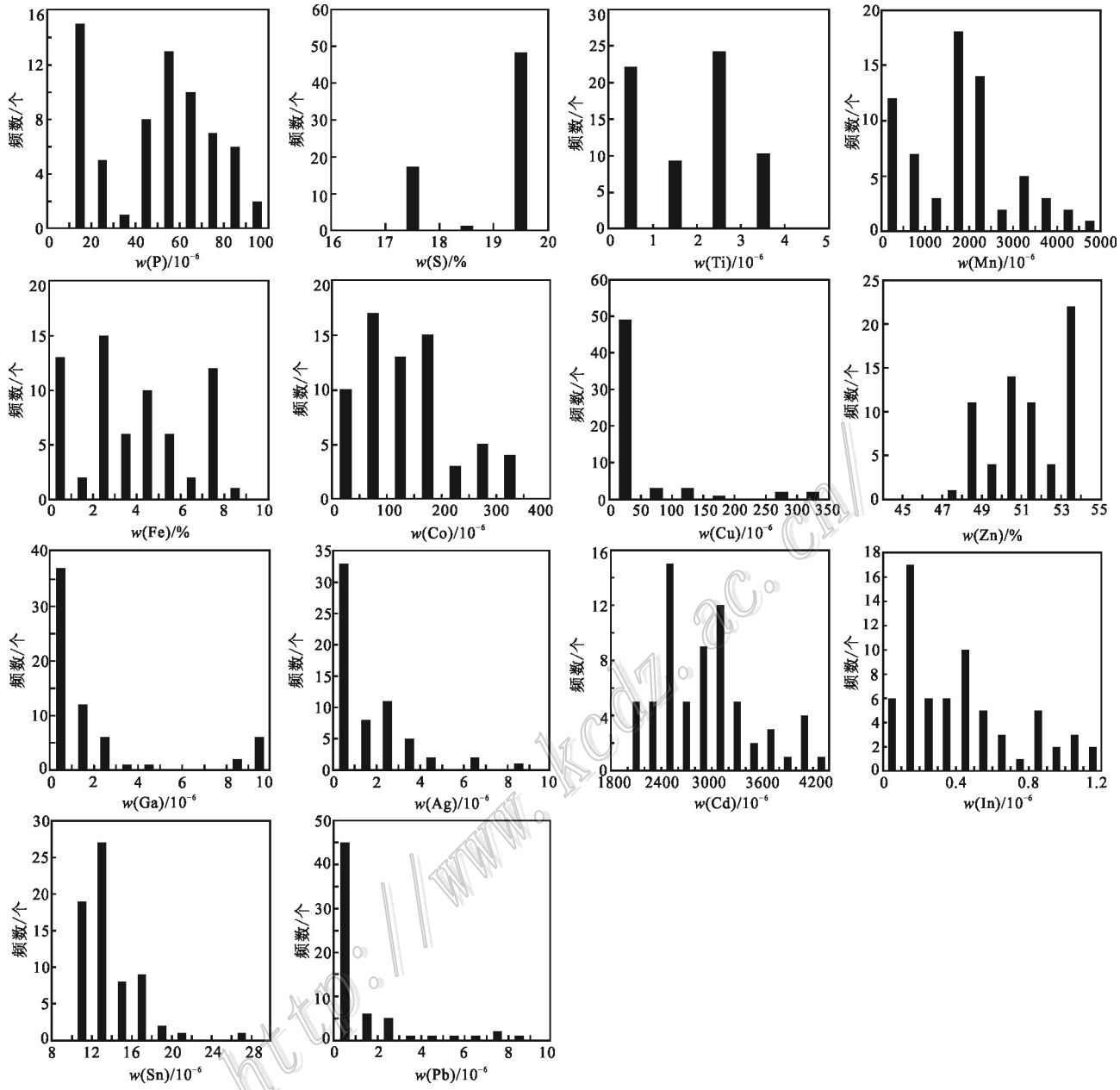
（4）In、Sn和Ga含量较低，其中w(In)最低，变化范围在0.11×10^{-6}~3.55×10^{-6}之间，且大多数小于1×10^{-6}，w(Sn)和w(Ga)分别为13.20×10^{-6}~35.58×10^{-6}和0.07×10^{-6}~16.62×10^{-6}。此外，Ni、Ge、As、Sr等微量元素含量极低，多低于检出限。

4 讨 论

4.1 成矿温度指示

闪锌矿中微量元素对于形成温度具有特征的反映，研究表明高温条件下形成闪锌矿富集Fe、Mn、In、Se和Te等元素，并且具有较高的In /Ga比值，而低温条件下形成闪锌矿则相对富集Cd、Ga、Ge等元素，并且具有较低In/Ge比值（刘英俊等，1984; 韩照信，1994; 蔡劲宏等，1996），而Fe和Mn对于矿物形成温度具有更为良好的指示作用，温度较高时往往形成铁闪锌矿（刘英俊等，1984；叶霖等，2012）。如前所述，本矿床中w(Fe)为0.26%~8.22%，平均为4.11%（n=66），远小于10%，不属于高温铁闪锌矿，并以富集Mn（4.64×10^{-6}~15131.48×10^{-6}，平均2481.93×10^{-6}），而贫In（0.11×10^{-6}~3.55×10^{-6}）、Ga（0.07×10^{-6}~16.62×10^{-6}）、Ge（0.20×10^{-6}~1.11×10^{-6}，且多数低于检出限）、Se（低于检出限）、Te（低于检出限）为特征。纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿Fe、Mn含量特征明显低于中-高温热液矿床（如云南保山核桃坪矽卡岩型铅锌矿床中闪锌矿矿物中w(Fe)为2%~10%，w(Mn)为1273×10^{-6}~5115×10^{-6}，Ye et al.，2011）和中温热液矿床（如云南澜沧老厂铅锌矿床闪锌矿w(Fe)为12.1%~15.4%，w(Mn)为2626×10^{-6}~4111×10^{-6}，叶霖等，2012）。经计算，本矿床闪锌矿In/Ga比值介于0.01~12.22之间，In/Ge比值为0.19~5.96，比值均较低，明显低于高温热液矿床（如湖南芙蓉锡矿田狗头岭矿区产出的闪锌矿In/Ga比值为149.8~792.7，In/Ge比值为2091~16923，蔡劲宏等，1996）和中温热液矿床（如云南澜沧老厂铅锌矿床闪锌矿In/Ga

http://www.kcdz.ac.cn/



http://www.kcdz.ac.cn/

图4 纳如松多铅锌矿床闪锌矿微量元素组成直方图

Fig. 4 Histogram of trace elements for sphalerite of the Narusongduo Pb-Zn deposit

比值为0.88~99.65,In/Ge比值为11~1689,叶霖等,2012),暗示纳如松多铅锌矿床形成于较低温度环境。

闪锌矿中的常量元素Zn与微量元素Cd的比值对矿物形成温度也具有指示意义(刘英俊,1984),即高温Zn/Cd比值>500,中温Zn/Cd比值约为250,低温Zn/Cd比值<100。经计算,纳如松多隐爆角砾岩型矿体中闪锌矿Zn/Cd比值介于118.82~252.12之间,平均值为181.67(n=66),暗示其形成温度为中低温。杨勇(2010)对纳如松多Ⅰ号矿区矿石石英流体包裹体的研究获得均一温度为188~372℃,均值为287℃;笔者通过隐爆角砾岩型矿石石英中流体包裹体测试获得均一温度为138~441℃,均值为285℃,这与闪锌矿Zn/Cd比值估算的结果一致,指示纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿体形成温度应以中低温为主。

表 2 西藏纳如松多铅锌矿床闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素测试结果

Table 2 Trace element analysis (LA-ICP-MS) results for sphalerite from the Narusongduo Pb-Zn deposit, Tibet

样品编号	$w(B)/10^{-6}$															
	P	Ti	Mn	Co	Ni	Cu	Ga	Ge	As	Sr	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Pb
zk-9-14-11-1	56.43	2.81	607.07	47.34	-	1.56	0.08	-	-	-	0.25	1917.90	0.62	17.26	-	0.36
zk-9-14-11-2	73.64	2.83	4958.50	4.68	-	11.69	6.67	-	-	0.01	1.14	2379.91	0.25	19.86	0.08	0.75
zk-9-14-11-3	108.42	1.76	3148.29	0.28	0.65	28.17	2.14	1.11	1.12	0.01	0.94	2569.93	0.48	19.42	3.53	1.64
zk-9-14-11-4	57.01	3.97	571.49	128.45	-	4.90	0.34	-	-	0.02	0.70	2273.23	1.36	16.06	1.25	1.46
zk-9-14-11-5	99.70	2.35	4.64	14.86	-	2.53	-	-	-	0.03	0.07	2848.49	0.54	16.62	0.21	0.92
zk-9-14-11-6	69.97	2.84	12.39	3.63	-	2.71	0.47	-	-	-	0.20	2635.90	0.34	14.78	1.22	0.70
zk-9-14-11-7	80.32	2.75	11.86	3.36	-	6.47	3.77	-	0.52	-	0.66	2364.45	0.62	15.53	1.57	1.46
zk-9-14-11-8	76.57	2.10	72.64	1.98	-	165.83	2.98	-	-	-	2.55	2368.03	0.68	14.87	4.70	8.61
zk-9-14-11-9	70.67	3.62	33.17	1.96	-	10.31	2.81	-	0.58	-	2.27	2470.82	1.58	15.15	2.86	2.20
zk-9-14-11-10	67.10	3.10	93.95	6.21	-	46.98	0.28	-	-	-	0.51	2637.48	3.55	15.55	1.50	1.19
zk-9-14-11-11	76.25	3.29	2429.17	157.56	-	4.30	1.34	0.63	-	-	0.86	2362.14	0.57	16.58	-	0.65
zk-9-14-11-12	74.96	2.45	3775.02	65.39	0.49	123.57	3.85	0.72	-	-	0.93	2384.69	0.12	15.81	-	0.53
zk-9-14-11-13	69.67	1.58	3466.03	59.72	-	715.36	6.03	-	-	-	3.54	2435.16	0.43	24.69	0.49	3.03
zk-9-14-11-14	73.39	2.58	857.46	159.28	-	30.76	4.34	0.43	-	0.04	1.00	2229.89	0.96	35.58	1.45	3.11
zk-9-14-11-15	67.64	2.12	560.92	149.15	-	2.76	1.09	-	-	-	0.13	2749.16	0.41	14.61	-	1.56
zk-9-12-23-1	63.11	3.68	3002.99	206.58	1.92	1.34	0.07	-	-	-	3.41	2785.55	0.46	16.46	-	2.16
zk-9-12-23-2	60.82	3.68	3076.78	173.61	1.97	1.14	-	-	0.41	-	2.16	2827.51	0.17	15.50	-	0.32
zk-9-12-23-3	63.41	2.09	2130.36	166.50	1.64	2.88	-	0.43	-	-	6.99	2642.89	0.11	16.49	-	7.60
zk-9-12-23-4	68.72	2.35	2163.06	153.08	1.68	2.64	0.17	-	-	-	4.70	2688.45	0.56	17.30	-	0.73
zk-9-12-23-5	69.11	2.09	2158.28	157.16	1.48	30.64	0.20	-	-	-	8.23	2666.48	0.50	16.41	-	3.46
zk-9-14-10-1	67.58	2.75	771.30	333.85	5.22	1.76	0.64	-	-	-	0.06	2183.86	0.32	15.77	-	0.54
zk-9-14-10-2	61.00	2.46	895.16	315.15	6.23	1.55	0.31	-	-	0.02	0.10	2249.92	0.53	15.48	-	0.68
zk-9-14-10-3	61.72	2.28	939.04	311.16	7.87	9.19	2.15	-	-	-	0.67	2298.03	0.30	15.15	-	1.42
zk-9-14-10-4	62.93	2.46	1084.97	309.49	8.04	6.73	2.66	-	0.38	-	0.08	2429.21	0.25	14.73	-	0.80
zk-9-14-10-5	64.55	2.72	726.57	338.24	5.17	1.13	0.16	-	-	-	-	2162.24	0.16	15.34	-	1.05
zk-9-15-17-1	86.43	2.15	4606.34	97.34	-	61.06	0.35	0.88	-	0.05	8.73	2487.13	0.72	14.11	-	0.88
zk-9-15-17-2	86.09	3.32	5752.80	120.00	-	7130.46	3.49	0.74	1.04	7.79	30.58	2448.56	0.69	17.12	1.06	25.74
zk-9-15-17-3	72.17	3.81	5179.40	104.37	-	3471.43	1.95	0.46	-	0.02	37.06	2394.79	0.57	15.27	0.16	11.79
zk-9-15-17-4	79.50	2.69	4361.20	151.01	-	71.41	0.11	0.68	0.60	0.35	3.73	2444.79	0.24	16.67	0.66	121.10
zk-9-15-17-5	46.14	3.55	5087.20	135.37	0.57	1217.11	0.21	1.07	-	0.01	6.62	2509.06	0.45	14.28	0.11	19.00
zk-9-11-22-2-1	78.81	3.76	2708.48	193.26	1.65	5.95	0.84	0.64	-	-	7.65	2729.48	0.77	22.50	-	3.52
zk-9-11-22-2-2	79.52	2.19	2595.97	186.50	-	1.78	-	-	-	0.05	10.47	2765.22	1.14	21.00	-	14.88
zk-9-11-22-2-3	80.36	2.75	2659.51	193.19	1.62	4.34	0.27	0.73	0.30	-	11.99	2843.59	1.59	20.18	-	20.82
zk-9-11-22-2-4	64.71	1.43	2587.23	197.84	4.46	19.16	0.24	0.69	0.50	-	8.85	2771.56	1.29	22.10	0.25	8.99
zk-9-11-22-2-5	73.66	2.98	2596.29	194.21	2.62	7.34	0.12	-	0.46	-	6.40	2747.20	0.76	20.37	-	1.03
zk-9-11-22-2-6	68.19	2.43	2798.80	203.13	2.87	9.92	0.29	0.50	-	0.02	9.67	2779.10	0.74	20.74	0.20	16.62
zk-9-11-22-2-7	57.80	2.46	2745.13	201.53	2.30	45.35	0.27	0.65	0.57	0.02	16.72	2773.29	0.66	18.90	1.69	4.12
zk-9-11-22-2-8	83.33	2.17	2635.98	195.30	2.58	3.95	0.30	0.81	0.45	-	7.65	2690.55	1.36	19.09	-	1.02
zk-9-11-22-2-9	71.65	3.01	2744.53	203.68	2.35	6.23	0.19	1.10	-	-	9.60	2816.80	1.34	19.80	-	1.30
zk-9-11-22-2-10	66.91	2.72	2653.98	203.33	1.46	26.58	0.10	-	-	-	11.11	2720.41	0.62	19.99	-	4.00
zk-9-13-29-1	70.31	3.45	2146.91	254.18	3.85	221.53	0.10	0.55	0.53	0.08	0.78	1915.97	0.90	17.40	0.94	4.40
zk-9-13-29-2	88.71	3.43	2244.51	268.23	4.19	3.78	0.17	-	-	-	0.14	1928.13	1.39	17.34	-	0.09
zk-9-13-29-4	71.95	3.56	2106.20	145.70	2.43	4.97	0.51	-	-	-	0.21	2145.48	0.99	15.79	-	0.11
zk-9-13-29-5	82.90	2.74	1937.57	164.45	3.16	23821.41	0.11	0.56	-	-	2.62	2228.58	1.15	17.12	-	9.26
zk-9-13-26-1	55.38	3.23	660.42	370.27	11.03	1.45	0.13	-	-	-	0.09	2301.83	0.94	16.44	-	0.91
zk-9-13-26-3	65.59	2.77	610.13	362.40	11.48	1.04	0.08	-	-	-	0.13	2299.81	0.72	16.46	-	1.23
zk-9-13-26-4	69.55	2.84	646.31	357.97	10.63	21.40	2.02	-	-	-	0.67	2264.50	0.91	15.93	-	1.83
zk-9-13-26-5	77.69	1.12	674.46	359.36	11.43	39.30	3.04	0.20	-	-	0.68	2340.83	1.27	16.21	-	8.41

http://www.kcdz.ac.cn/

续表 2

Continued Table 2

样品编号	$w(B)/10^{-6}$															
	P	Ti	Mn	Co	Ni	Cu	Ga	Ge	As	Sr	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Pb
zk-9-11-22-1-1	72.04	2.80	4414.64	109.02	-	7.62	2.56	0.41	-	-	2.51	3797.79	0.12	19.44	-	0.29
zk-9-11-22-1-2	89.18	3.33	4252.44	104.79	-	17.73	1.84	-	-	-	4.18	3641.21	0.17	18.31	-	0.50
zk-9-11-22-1-3	65.49	3.21	4666.61	116.47	-	11.43	2.24	0.51	-	-	0.38	3817.18	0.14	25.90	-	0.67
zk-9-11-22-1-4	66.54	2.23	4737.41	116.52	-	10.52	1.84	-	-	-	2.34	3966.11	0.18	20.59	0.09	2.59
zk-9-11-22-1-5	59.49	2.73	4757.30	114.92	-	99.02	2.20	-	1.00	-	18.35	3942.45	0.26	22.87	2.55	26.53
zk-9-1'-10-2	-	25.31	15131.48	156.30	-	522.27	6.11	-	-	12.53	79.06	2733.74	3.41	22.39	17.50	65026.20
zk-9-1'-10-4	62.16	45.21	2725.35	182.36	-	26.68	1.27	-	0.91	0.40	95.81	2838.17	1.64	16.05	5.26	414.50
zk-9-1'-10-5	83.59	7.55	2312.52	166.25	-	322.43	1.59	0.50	0.44	0.44	113.93	2736.76	1.70	16.17	10.85	6637.19
zk-9-12-24-1	59.04	1.87	1870.70	70.88	-	345.86	13.84	-	0.65	-	3.95	3265.27	0.20	14.44	1.67	21.01
zk-9-12-24-2	57.74	3.86	1881.21	69.68	-	27.80	14.43	-	-	-	1.07	3255.81	0.22	14.40	0.14	4.93
zk-9-12-24-3	77.49	1.60	1935.36	66.44	-	59.50	12.94	-	-	-	1.54	3455.28	0.25	14.70	0.24	3.26
zk-9-12-24-4	72.54	3.08	2021.05	66.45	-	15.50	12.38	-	-	-	0.51	3431.73	0.25	14.17	0.12	1.38
zk-9-12-24-5	77.49	3.21	1573.77	64.41	-	22.15	14.61	-	-	-	2.36	3191.66	0.14	14.54	0.05	2.39
zk-9-12-24-6	79.22	2.12	1892.77	70.82	-	241.59	14.40	-	-	-	3.62	3318.91	0.26	13.20	1.67	23.43
zk-9-12-24-7	54.27	2.32	2038.19	63.01	-	13.69	14.06	-	0.35	-	0.17	3573.73	0.17	14.91	-	0.42
zk-9-12-24-8	88.05	2.49	2122.29	60.82	-	13.94	13.89	0.75	-	-	0.28	3623.60	0.21	14.55	-	1.97
zk-9-12-24-9	57.72	3.01	2506.71	66.19	-	17.05	14.98	-	0.25	0.01	0.18	3674.31	0.18	13.91	-	1.88
zk-9-12-24-10	73.76	3.25	2677.04	73.74	-	17.04	16.62	-	0.12	-	0.13	3784.60	0.21	14.53	0.07	1.68

注:"-"为低于检测线。

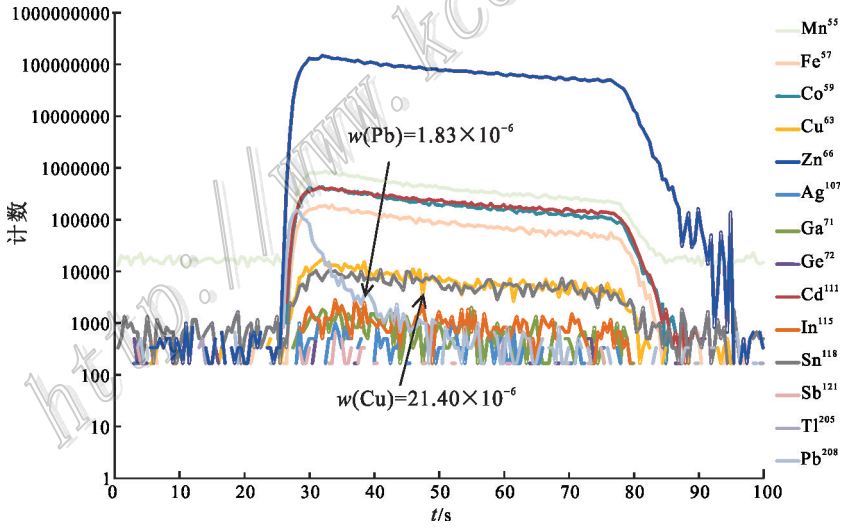


图 5 纳如松多铅锌矿床闪锌矿 LA-ICP-MS 时间分辨率剖面图

Fig. 5 Representative time-resolved depth profiles for sphalerite analysed by LA-ICP-MS of the Narusongduo Pb-Zn deposit

4.2 成矿类型指示

闪锌矿含有的特征元素可以反映其成矿类型,其中同属于铜型离子的 Fe、Cd、Ga、In、Sb 和 Bi 可替代 Zn;Mn 在一定程度上也可以替代 Zn;Se 和 Te 可以类质同象代替 S(Zhang, 1987)。Song(1984)根据 Zn/Cd 比值初步总结了其与矿床成因类型的联系,获得火山沉积型矿床中闪锌矿 Zn/Cd 比值为 417~531,沉积变质型和碳酸盐岩为围岩的层控闪锌矿中 Zn/Cd 比值为 252~330,热液型矿床中 Zn/Cd 比值为 102~214。如前述纳如松多隐爆角砾岩型矿体闪锌矿 Zn/Cd 比值,表明其属于热液型成因矿床的范畴。纳如松多隐爆角砾岩型矿体闪锌矿 w(Cd) 为

2033.70×10^{-6}~4244.08×10^{-6}，高含量的Cd代表了典型岩浆热液矿床的特征（Zhang, 1987）。Zhang（1987）根据60个不同类型铅锌矿床中闪锌矿成分特征，建立了Fe-Cd-Mn闪锌矿成因类型判别图解，在Fe-Cd-Mn图解（图6）中，大部分样品点均投入到岩浆热液区域中，少量投入到沉积热液改造的区域中，这可能是受到测试过程中检出限的影响，未能得到这部分样品Mn元素含量的原因所致。综合分析，纳如松多隐爆角砾岩型矿体中的闪锌矿具有岩浆热液成因的特征，但其中部分样品又受到了来自沉积地层的影响。

此外，Co/Ni比值也多用于简单的成因判别，该比值大于1为岩浆作用强烈，小于1为沉积或地层物质影响强烈。受本次测试检出限的影响，只获得了纳如松多铅锌矿床隐爆角砾岩型矿体中部分闪锌矿的Ni含量，其Co/Ni比值为22.22~464.15，平均值为117.00，远远大于1，表明在成矿过程中岩浆流体参与并发挥了重要的作用。综上所述，笔者倾向性地认为：纳如松多铅锌矿床的形成主要受到来自于岩浆热液作用的影响和控制，成矿物质主要来自于斑岩岩浆系统。

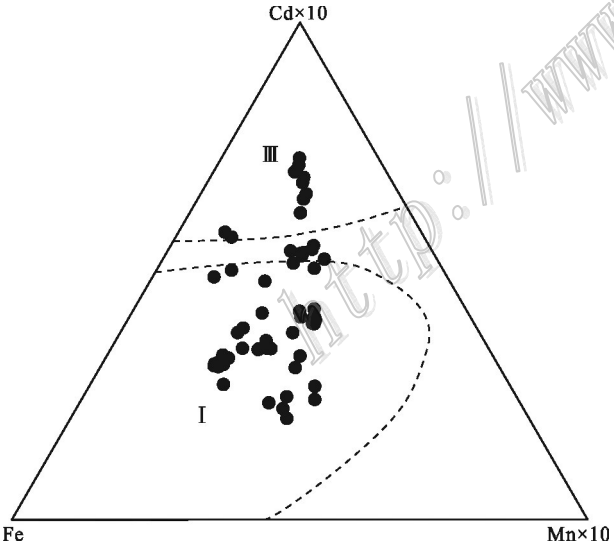


图6 纳如松多铅锌矿床闪锌矿Fe-Cd-Mn成因判别图解（底图据张乾，1987）

Ⅰ—岩浆热液型矿床；Ⅲ—沉积改造型矿床

Fig. 6 Discriminant diagram of Fe-Cd-Mn formation in sphalerite of the Narusongduo Pb-Zn deposit (base map after Zhang, 1987)

Ⅰ—Magmatic-hydrothermal deposit; Ⅲ—Sedimentary modified deposit

5 结 论

（1）西藏纳如松多铅锌矿床隐爆角砾岩型矿体中闪锌矿以富集Mn、Cd、Co，贫In、Ga、Ge、Se、Te为特征，Cu和Pb含量变化范围较大，Fe含量不高，不属于Fe闪锌矿。

（2）本矿床闪锌矿In/Ga比值、In/Ge比值均较低，明显低于典型的高温热液矿床和中温热液矿床，Zn/Cd比值为118.82~252.12，平均值为181.67（n=66），介于中温热液矿床Zn/Cd比值（约为250）与低温热液矿床Zn/Cd比值（约＜100）之间，指示纳如松多铅锌矿床形成于中低温环境。

（3）纳如松多隐爆角砾岩型矿体闪锌矿Zn/Cd比值，指示其属于热液型成因矿床的范畴。Co/Ni比值为22.22~464.15，平均值为117.00，远远大于1，表明在成矿过程中岩浆流体参与并发挥了重要的作用。闪锌矿原位微量元素特征指示纳如松多铅锌矿床的形成主要受到来自于岩浆热液作用的影响和控制，成矿物质主要来自于斑岩岩浆系统。

致 谢 野外工作中得到了西藏宝翔矿业有限公司工作人员的大力支持，中国地质科学院矿产资源研究所的陈小丹博士在实验和数据处理过程中给予了许多支持，中国地质科学院地质研究所的刘英超副研究员在文章修改过程中提供了许多帮助，审稿人对本文进行了详细的审阅并提出了宝贵的修改建议，在此一并表示衷心的感谢。

http://www.kcdz.ac.cn

References

Belissont R, Boiron M, Luais B and Cathelineau M. 2014. LA-ICP-MS analyses of minor and trace elements and bulk Ge isotopes in zoned Ge-rich sphalerites from the Noailhac-Saint-Salvy deposit (France): Insights into incorporation mechanisms and ore deposition processes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 126: 518-540.

Belissont R, Munoz M, Boiron M C, Luais B and Mathon O. 2016. Distribution and oxidation state of Ge, Cu and Fe in sphalerite by μ-XRF and K-edge μ-XANES: Insights into Ge incorporation, partitioning and isotopic fractionation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 177: 298-314.

Cai J H, Zhou W N and Zhang J Z. 1996. Typomorphic characteristics of sphalerites in the Yinshan copper, lead and zinc polymetallic deposit, Jiangxi[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 16

(4): 370-375(in Chinese with English abstract).

Cao H W, Zhang S T, Zheng L, Liu R P, Tian H H, Zhang X H and Li J J. 2014. Geochemical characteristics of trace element of sphalerite in the Zhongyuku (Pb)-Zn deposit of the Luanchuan, southwest of China[J]. J. Mineral Petrol., 34(3): 50-59(in Chinese with English abstract).

Claussen G E. 1934. Spectroscopic analysis of certain galenas, sphalerites, and pyrites[J]. American Mineralogist, 19: 221-224.

Cook N J, Ciobanu C L, Pring A, Skinner W, Shimizu M, Danyushevsky L, Saini-Eidukat B and Melcher F. 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICP-MS study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 73: 4761-4791.

Cook N J, Ciobanu C L and Williams T. 2011. The mineralogy and mineral chemistry of indium in sulphide deposits and implications for mineral processing[J]. Hydrometallurgy, 108(3-4): 226-228.

Cooke D R, Holling P and Walshe J L. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. Econ. Geol., 100: 801-818.

Di Benedetto F, Bernardini G P, Costagliola P, Plant D and Vaughan D J. 2005. Compositional zoning in sphalerite crystals[J]. American Mineralogist, 90: 1384-1392.

Gottesmann W and Kampe A. 2007. Zn /Cd ratios in calcsilicate-hosted sphalerite ores at Tumurtijn-Ovoo, Mongolia[J]. Chemie der Erde, 67: 323-328.

Graton L C and Harcourt G A. 1935. Spectrographic evidence on origin of ores of Mississippi Valley type[J]. Econ. Geol., 30(7): 800-824.

Han Z X. 1994. The typomorphic characteristics of the sphalerite in the Qinling Devonian system lead-zinc metallogenic belt[J]. Journal of Xi'an College of Geology, 16(1): 12-17(in Chinese with English abstract).

Hedenquist J W, Arriba A J and Reynolds T J. 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines[J]. Econ. Geol., 93: 373-404.

Hou Z Q, Gao Y F, Meng X J, Qu X M and Huang W. 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogeny[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 239-248(in Chinese with English abstract).

Hou Z Q, Pan X F, Yang Z M and Qu X M. 2007. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposits not related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings[J]. Geoscience, 21: 332-351(in Chinese with English abstract).

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):1780-1817(in Chinese with English abstract).

Hou Z Q, Zheng Y C, Yang Z M and Yang Z S. 2012. Metallogenesis of continental collision setting: Part Ⅰ. Gangdese Cenozoic porphyry Cu-Mo system in Tibet[J]. Mineral Deposits, 31(4): 647-670(in Chinese with English abstract).

Hu P, Wu Y, Zhang C Q and Hu M Y. 2014. Trace and minor elements in sphalerite from the Mayuan lead-zinc deposit, northern margin of the Yangtze Plate: Implications from LA-ICP-MS analysis[J]. Acta Mineralogica Sinica, 34(4): 461-468(in Chinese with English abstract).

Ji X H, Yang Z S, Yu Y S, Shen J F, Tian S H, Meng X J, Li Z Q and Liu Y C. 2012. Formation mechanism of magmatic rocks in Narusongduo lead-zinc deposit of Tibet: Evidence from magmatic zircon[J]. Mineral Deposits, 31(4): 758-774(in Chinese with English abstract).

Li H. 1986. Characteristics and geological significance of impurity elements in sphalerite[J]. Geology and Exploration, 10: 42-46(in Chinese).

Liu Y C, Ji X H, Hou Z Q, Tian S H, Li Z Q, Zhao X Y, Zhou J S, Ma W and Yang Z S. 2015. The establishment of an independent Pb-Zn mineralization system related to magmatism: A case study of the Narusongduo Pb-Zn deposit in Tibet[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34(4):539-556(in Chinese with English abstract).

Liu Y J, Cao L M, Li Z L, Wang H N, Chu T Q and Zhang J R. 1984. Elemental geochemistry[M]. Beijing: Science Press.1-548(in Chinese).

Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257(1-2):34-43.

Monteiro L V S, Bettencourt J S, Juliani C and Oliveira T F D. 2006. Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante nonsulfide and Ambro'sia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil[J]. Ore Geology Reviews, 28: 201-234.

Richards J P . 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. Econ. Geol., 98:1515-1533.

Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. Econ. Geol., 105(1): 3-41.

Song Xuexin. 1984. Minor elements and ore genesis of the Fankou lead-zinc deposit, China[J]. Mineralium Deposita, 19: 95-104.

Stoiber R E. 1940. Minor elements in sphalerite[J]. Econ. Geol., 35(4): 501-519.

Tu G C, Gao Z M, Hu R Z, Zhang Q, Li C Y, Zhao Z H, Zhang B G, et al. 2003. Decentralized elemental geochemistry and mineralization mechanism[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-424 (in Chinese).

Wang C M, Deng J, Zhang S T, Xue C J, Yang L Q, Wang Q F and UN X. 2010. Sediment-hosted Pb-Zn deposits in southwest Sanjiang Tethys and Kangdian area on the western margin of Yangtze Craton[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 84(6): 1428-1438.

Wohlgemuth-Ueberwasser C C, Viljoen F, Petersen S and Vorster C. 2015. Distribution and solubility limits of trace elements in hydrothermal black smoker sulfides: An in-situ LA-ICP-MS study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 159: 16-41.

Xing B, Zheng W, Ouyang Z X, Wu X D, Lin W P and Tian Y. 2016.

http://www.kcdz.ac.cn/

Sulfide microanalysis and S isotope of the Miaoshan Cu polymetallic deposit in western Guangdong Province, and its constraints on the ore genesis[J]. Acta Geologica Sinica, 90(5): 971-986(in Chinese with English abstract).

Yang Y. 2010. Study on geochemical characteristics of Narusongduo silver-lead-zinc deposit, Tibet(Ph. D. thesis)[D]. Tutors: Huang Z L and Luo T Y. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 134p(in Chinese with English abstract).

Ye L, Cook N J, Ciobanu C L, Liu Y P, Zhang Q, Liu T G, Gao W, Yang Y L and Danyushevskiy L. 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study[J]. Ore Geology Reviews, 39(4): 188-217.

Ye L, Gao W, Yang Y L, Liu T G and Peng S S. 2012. Trace elements in sphalerite in Laochang Pb-Zn polymetallic deposit, Lancang, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(5): 1362-1372(in Chinese with English abstract).

Ye L, Li Z L, Hu Y S, Huang Z L, Zhou J X, Fan H F and Danyushevskiy L. 2016. Trace elements in sulfide from the Tianbaoshan Pb-Zn deposit, Sichuan Province, China: A LA-ICPMS study[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(11): 3377-3393(in Chinese with English abstract).

Zhang H R, Hou Z Q, Song Y C, Li Z, Yang Z M, Wang Z L, Wang X H and Wang S X. 2009. The temporal and spatial distribution of porphyry copper deposits in the eastern Tethyan metallogenic domain: A review[J]. Acta Geologica Sinica, 83(12): 1818-1837(in Chinese with English abstract).

Zhang Q. 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb-Zn ore deposits[J]. Geochemistry, 6(2): 177-190.

Zhang Q. 1987. Distinguishing the genetic type of lead-zinc deposits by using trace elements diagram of galena and sphalerite[J]. Geology-Geochemistry, (9): 64-66(in Chinese).

Zhu D C, Zhao Z D and Niu Y L . 2011. The Lhasa Terrane: Records of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. Earth and Planetary Science Letters, 301: 241-255.

附中文参考文献

蔡劲宏,周卫宁,张锦章. 1996. 江西银山铜铅锌多金属矿床闪锌矿的标型特征[J]. 桂林工学院学报, 16(4):370-375.

曹华文,张寿庭,郑硌,刘瑞萍,田浩浩,张旭晃,李军军. 2014. 河南栾川矿集区中鱼库(铅)锌矿床闪锌矿微量元素地球化学特征[J]. 矿物岩石, 34(3): 50-59.

韩照信. 1994. 秦岭泥盆系铅锌成矿带中闪锌矿的标型特征[J]. 西安地质学院学报, 16(1):12-17.

侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲晓明, 黄卫. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因与构造控制[J]. 岩石学报, 20: 239-248.

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: 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): 1780-1817.

侯增谦, 郑远川, 杨志明, 杨竹森. 2012. 大陆碰撞成矿作用: Ⅰ. 冈底斯新生代斑岩成矿系统[J]. 矿床地质, 31(4): 647-670.

胡鹏,吴越,张长青,胡明月. 2014. 扬子板块北缘马元铅锌矿床闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素特征与指示意义[J]. 矿物学报,34(4):461-468.

纪现华, 杨竹森, 于玉帅, 申俊峰, 田世洪, 孟祥金, 李振清, 刘英超. 2012. 西藏纳如松多铅锌矿床成矿岩体形成机制: 岩浆锆石证据[J]. 矿床地质, 31(4): 758-774.

李徽. 1986. 闪锌矿中杂质元素的特征及地质意义[J]. 地质与勘探,(10):42-46.

刘英超, 纪现华, 侯增谦, 田世洪, 李振清, 赵晓燕, 周金胜, 马旺,杨竹森. 2015. 一个与岩浆作用有关的独立铅锌成矿系统的建立——以西藏纳如松多铅锌矿床为例[J]. 岩石矿物学杂志, 34(4): 539-556.

刘英俊,曹励明,李兆麟,王鹤年,储同庆,张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社. 1-548.

涂光炽,高振敏,胡瑞忠,张乾,李朝阳,赵振华,张宝贵,等. 2003. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京:地质出版社. 1-424.

邢波, 郑伟, 欧阳志侠, 吴晓东, 林玮鹏, 田云. 2016. 粤西庙山铜多金属矿床硫化物原位微区分析及S同位素对矿床成因的制约[J]. 地质学报,90(5):971-986.

杨勇. 2010. 西藏纳如松多银铅锌矿床地球化学特征研究(博士学位论文)[D]. 导师:黄智龙,罗泰义. 贵阳:中国科学院地球化学研究所. 134页.

叶霖,高伟,杨玉龙,刘铁庚,彭绍松. 2012. 云南滇沧老厂铅锌多金属矿床闪锌矿微量元素组成[J]. 岩石学报, 28(5): 1362-1372.

叶霖,李珍立,胡宇思,黄智龙,周家喜,樊海峰,Danyushevskiy Leonid. 2016. 四川天宝山铅锌矿床硫化物微量元素组成:LA-ICPMS研究[J]. 岩石学报, 32(11): 3377-3393.

张洪瑞, 侯增谦, 宋玉财, 李政,杨志明,王召林,王晓虎,王淑贤. 2009. 斑岩铜矿床在东特提斯成矿域中的时空分布特征[J]. 地质学报, 83(12): 1818-1837.

张乾. 1987. 利用方铅矿、闪锌矿的微量元素图解法区分铅锌矿床的成因类型[J]. 地质地球化学,(9):64-66.

http://www.kcdz.ac.cn