

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

刘英超¹, 纪现华², 侯增谦¹, 田世洪³, 李振清³, 赵晓燕⁴, 周金胜¹, 马旺⁴,
杨竹森³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 河北省地质调查院, 河北石家庄 050081; 3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:通过对西藏纳如松多铅锌矿床4套矿化型式的系统梳理,根据地质事实和相关同位素证据,初步建立了一个独立的和岩浆作用相关的热液铅锌成矿系统模式。纳如松多铅锌矿化和石英正长斑岩密切相关,目前已发现了产在斑岩外围的古新世中组凝灰岩地层中的隐爆角砾岩型矿化、产在斑岩与二叠纪下拉组灰岩接触带上的矽卡岩型矿化、产在斑岩外围中组凝灰岩与二叠纪昂杰组砂板岩岩性分界面上的矿层型矿化以及产在凝灰岩或砂板岩内部先存裂隙中的脉型矿化等4种铅锌矿化型式。它们均以绿帘石绿泥石化、硅化绢云母化和碳酸盐化为主要围岩蚀变类型,矿石矿物为方铅矿+闪锌矿,主要脉石矿物为黄铁矿+黄铜矿+石英+绢云母+方解石,蚀变和矿物组合特征指示它们发育在同一矿化系统中,但成矿热液温度逐渐降低。隐爆角砾岩型和矽卡岩型矿化成矿流体 δD_{V-SMOW} 值分布范围较大($-177\text{‰} \sim -118\text{‰}$ 和 $-164\text{‰} \sim -139\text{‰}$), $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值分布范围较小($-2.76\text{‰} \sim 3.29\text{‰}$ 和 $-5.46\text{‰} \sim -4.58\text{‰}$),反映其主要来自发生了去气作用的岩浆水,并混合了少量大气降水。4种矿化型式的S同位素值按照隐爆角砾岩型(4.15‰)、矽卡岩型(7.92‰)、矿层型(8.49‰)和脉型(8.80‰)的顺序逐渐增大,反映其主要来自发生了 H_2S 去气作用的残余岩浆相。矿区成矿斑岩与冷水坑斑岩型铅锌矿床的成矿斑岩极为相似,推测矿区深部也有斑岩型铅锌矿化的可能。一个独立的和岩浆作用相关的铅锌成矿系统模式由此建立,它包括了发育在挤压环境中所有和岩浆作用相关的铅锌矿化类型,可简述如下:新特提斯洋壳俯冲回转,地幔楔及上覆地壳部分熔融,纳如松多独具特色的斑岩岩浆形成;岩浆上升侵位, H_2O 及 H_2S 去气,流体初溶,岩浆内部和顶部分别汇集了富氧化性质S和金属物质及富还原性质S和金属物质的残余岩浆流体;岩浆进一步侵位,温度降低,矿物结晶, SO_2 水解,斑岩型铅锌矿化形成;岩浆侵位到凝灰岩地层中,凝灰岩高压致爆,硫化物沉淀,隐爆角砾岩型铅锌矿化形成;富成矿物质残余岩浆水向外运移,伴随 H_2S 进一步去气,矽卡岩型、矿层型、脉型铅锌矿化在不同岩性地层和构造位置中形成。

关键词:隐爆角砾岩型铅锌矿化;矽卡岩型铅锌矿化;矿层型铅锌矿化;脉型铅锌矿化;与岩浆作用相关的铅锌成矿系统;纳如松多铅锌矿床;西藏

中图分类号: P618.4; P612

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)04-0539-18

The establishment of an independent Pb-Zn mineralization system related to magmatism: A case study of the Narusongduo Pb-Zn deposit in Tibet

LIU Ying-chao¹, JI Xian-hua², HOU Zeng-qian¹, TIAN Shi-hong³, LI Zhen-qing³, ZHAO Xiao-yan⁴,
ZHOU Jin-sheng¹, MA Wang⁴ and YANG Zhu-sen³

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Hebei Institute of Geological Survey, Shijiazhuang 050081, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2015-01-16

基金项目: 国家973资助项目(2011CB403104); 中国地质调查项目(1212011220908); 国家自然科学基金(41320104004, 41403043); 国际地质对比计划(IGCP/SIDA-600); 科技部创新方法工作专项项目(2010IM031100)

作者简介: 刘英超(1982-), 女, 汉族, 博士, 助理研究员, 主要从事铅锌矿床研究, E-mail: lyhappy@126.com; 通讯作者: 杨竹森(1964-), 男, 汉族, 博士, 研究员, 长期从事区域成矿学研究, E-mail: yangzhusen@vip.sina.com。

Abstract: In the compressive environment, intrusion-related Pb-Zn mineralization includes porphyry, cryptoexplosive breccia, skarn, manto, and vein types. However, examples of all of them occurring in the same mineralization system are less known. Narusongduo is a superlarge Pb-Zn deposit in the Gangdise metallogenic belt, Tibet. Except porphyry type, all Pb-Zn mineralization types mentioned above have been found in this deposit, which makes this deposit an excellent case to study the scientific question mentioned above. In this study, the authors present a preliminary description about the four Pb-Zn mineralization types and oxygen, hydrogen and sulfur isotopic analyses, and establish a descriptive and genetic model that involves all the mineralization types in an independent Pb-Zn mineralization system related to magmatism. The Pb-Zn mineralization in the Narusongduo deposit has close relationship with the quartz syenite porphyry. Four Pb-Zn mineralization types have been found, i. e., cryptoexplosive breccia type formed in the tuff strata of the Dianzhong Formation in Paleocene, skarn type formed in the contact between limestone of the Xiala Formation in Permian and quartz syenite porphyry, manto type formed in the contact between sandstone and slate in the Angjie Formation in Permian and tuff in the Dianzhong Formation, and vein type formed in pre-existing fractures in tuff and sandstone-slate strata. Epidotization, chloritization, silicification, sericitization and carbonation are main alteration types for the four mineralization types, galena and sphalerite are ore minerals, and pyrite, chalcopyrite, quartz, sericite and calcite are main gangue minerals. In accordance with the order of cryptoexplosive type, skarn type, manto type and vein type, the host rock alteration becomes weaker, the epidote, chlorite, quartz, sericite and chalcopyrite decrease and eventually disappear, and the carbonate increases. These characteristics indicate a cooling evolution in a unified mineralization system. As for the fluids of cryptoexplosive breccia type and skarn type Pb-Zn mineralization, the δD_{V-SMOW} values have large ranges ($-177\text{‰} \sim -118\text{‰}$ and $-164\text{‰} \sim -139\text{‰}$, respectively) and the $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ values have narrow ranges ($-2.76\text{‰} \sim 3.29\text{‰}$ and $-5.46\text{‰} \sim -4.58\text{‰}$, respectively). These data suggest that the ore fluids were derived from magmatic hydrothermal fluid which had undergone degasification in an open system and was mixed with meteoric water. The $\delta^{34}S$ values vary in a narrow range and become larger in order of cryptoexplosive type (4.15‰), skarn type (7.92‰), manto type (8.49‰) and vein type (8.80‰), which indicates that the sulfur came from magmatic hydrothermal fluid which had undergone H_2S degasification in an open system, and the degasification degree became stronger and stronger. The chemical geology of the quartz syenite porphyry is similar to that of porphyry hosting the Lengshuikeng porphyry Pb-Zn deposit, so the authors infer that some porphyry-type Pb-Zn mineralization might have also occurred in the depth of the Narusongduo porphyry. On such a basis, an independent Pb-Zn mineralization system, which includes all the Pb-Zn mineralization types related to magmatism occurring in compressed environment, has been built. The model can be described as follows: With the subduction and revolution of the Neo Tethys oceanic crust, the mantle wedge and the overlying crust became melted, forming the Narusongduo porphyry magma with unique chemical geology. With the magma ascending, H_2O and H_2S became degassing, the fluid became exsolved, oxidized magmatic fluid with oxidized S and metals was concentrated in the center of the magma, and reduced magmatic fluid with reduced S and metal was concentrated on the top of the magma. With further ascending, the temperature of the magma decreased, the magma crystallized, SO_2 became hydrolytic, and the porphyry Pb-Zn mineralization occurred. When the magma ascended into the tuff strata, the compact rocks caused the pressure of the hydrothermal fluid to be higher than the rocks, which led to the cryptoexplosion of the tuff, and the cryptoexplosive type Pb-Zn mineralization occurred. At the same time, with the stronger H_2S degasification, magmatic fluid rich in metal and sulfur also moved to the host rocks far away from the magma, and then skarn-type, manto-type and vein-type Pb-Zn mineralization occurred in different locations with different lithologies and structures.

Key words: cryptoexplosive breccia-type Pb-Zn mineralization; skarn-type Pb-Zn mineralization; manto-type Pb-

Zn mineralization; vein-type Pb-Zn mineralization; magmatism-related Pb-Zn mineralization system; Narusongduo Pb-Zn deposit; Tibet

铅锌矿是自然界固体矿产中的重要矿产,它所提供的金属资源在世界工业用量上仅次于铁、铝和铜,分列于第4位(锌)和第5位(铅)(戴自希等, 2005)。由于具相同的物质来源和相似的地球化学行为,在自然界中,铅和锌多产于同一矿床内,一般作为同一矿化系统进行研究。鉴于其分布的普遍性和经济价值的重要性,在矿床学研究历史上,铅锌矿床一直是矿床学家们关注的重点和深入研究的对象。对于铅锌矿床的分类,除去非硫化物(铅)矿床(Boni, 2003; 杨永强等, 2010),其它矿床可按照和岩浆活动的关系,简单分为与岩浆作用无关的沉积岩容矿铅锌矿床和与岩浆作用有关的热液铅锌矿床。前者主要包括以碎屑岩为主要赋矿围岩的铅锌矿床(elastic-dominated lead-zinc ores, 简称为CD矿床)和以碳酸盐岩为主要赋矿围岩的铅锌矿床(carbonate-dominated lead-zinc ores, 简称为MVT矿床)两类(Leach *et al.*, 2005, 2010); 后者则包括6类,分别为火山成因块状硫化物铅锌矿床(VMS)(Franklin *et al.*, 2005)、斑岩型铅锌矿床(罗诒爵, 1985; 左力艳等, 2009)、矽卡岩型铅锌矿床(Meinert *et al.*, 2005)、隐爆角砾岩型铅锌矿床(邓绍明, 1991; 张会琼等, 2012)、矿层型(Monto)铅锌矿床(Canet *et al.*, 2009; Bonsall *et al.*, 2011)和与岩浆热液有关的脉状铅锌矿床(Macdonald *et al.*, 1986; Voudouris *et al.*, 2008)。分析这6类与岩浆作用有关的热液铅锌矿床可以发现,在产出环境上,VMS矿床一般可自成系统,发育在相对伸展的弧后扩张、裂谷或大洋中脊环境(Franklin *et al.*, 2005),其他5类矿床则都可以发育在板块汇聚背景下的相对挤压环境中,也即从理论上来说,这5类矿床可以同时产出在同一个成矿系统中。但是,由于斑岩型铅锌矿床和隐爆角砾岩型铅锌矿床在国际上发现极少,故很少被提及,到目前为止,仅矽卡岩型、矿层型和热液脉状铅锌矿床被系统归纳在斑岩型铜金钼成矿系统之中(Sillitoe, 2010)。那么,是否存在一个独立的铅锌成矿系统,可以将这5种产于挤压环境中的矿化型式囊括其中呢? 如果确实存在这样一个系统,它的形成机制又是怎样的?

青藏高原拉萨地块冈底斯成矿带北缘发育了一条铅锌(铁铜钼)成矿带,带内多个铅锌矿床都和喜山期的花岗岩体有关,它们集中发育在印度-欧亚大陆碰撞主碰撞阶段,具有隐爆角砾岩型、矽卡岩型、矿层型和脉状等多种类型,为研究上述科学问题提供了良好的素材(李光明等, 2009; 唐菊兴等, 2012)。其中,纳如松多铅锌矿床发育在该成矿带内西侧,探明铅锌金属量超过125万吨,矿区内发育了成矿带中的全部铅锌矿化型式,是研究上述科学问题的难得实例。前人曾对纳如松多矿区的成矿岩体(杨勇等, 2010a; 纪现华等, 2012)和成矿物质来源(杨勇等, 2010b)进行了初步研究,但这些研究都尚未注意到矿区内4种铅锌矿化型式的内在关系和存在意义。因此,以对“挤压环境中与岩浆作用有关的独立铅锌成矿系统”的探索为指导思想,笔者对纳如松多铅锌矿区4种矿化型式进行了系统梳理,厘定了四者之间的相互关系,初步建立了一个独立的和岩浆作用有关的热液铅锌成矿系统模式,并对其成矿机制进行了简单探讨。

1 区域地质背景

纳如松多铅锌矿床位于西藏自治区谢通门县境内,它所在的冈底斯成矿带在地理位置上位于西藏自治区中部,西起狮泉河、冈仁波齐,向东经念青唐古拉,延伸至伯舒拉岭;在大地构造位置上位于青藏高原南部冈底斯-喜马拉雅构造区,介于北侧的班公湖-怒江缝合带与南侧的印度河-雅鲁藏布江缝合带之间,大体为近东西向展布的狭长块体(潘桂棠等, 2006),范围与拉萨地块相当(图1a)。冈底斯带内有多个地层分区,其中纳如松多矿区所在的隆格尔-南木林分区总体以火山-沉积建造为主,地层从老到新依次为中新元古界由火山-沉积建造变质而来的念青唐古拉岩群,古生界的浅海相到海陆交互相碎屑岩、碳酸盐岩以及中生界到新生界的火山碎屑岩、火山岩和少量灰岩、沉积碎屑岩(西藏自治区地质调查院, 2002^①)。带内岩浆活动极为活跃,其大体发育在215~175、160~80、70~40和33~10 Ma这4个高

① 西藏自治区地质调查院. 2002. 1:25万日喀则市幅区域地质图.

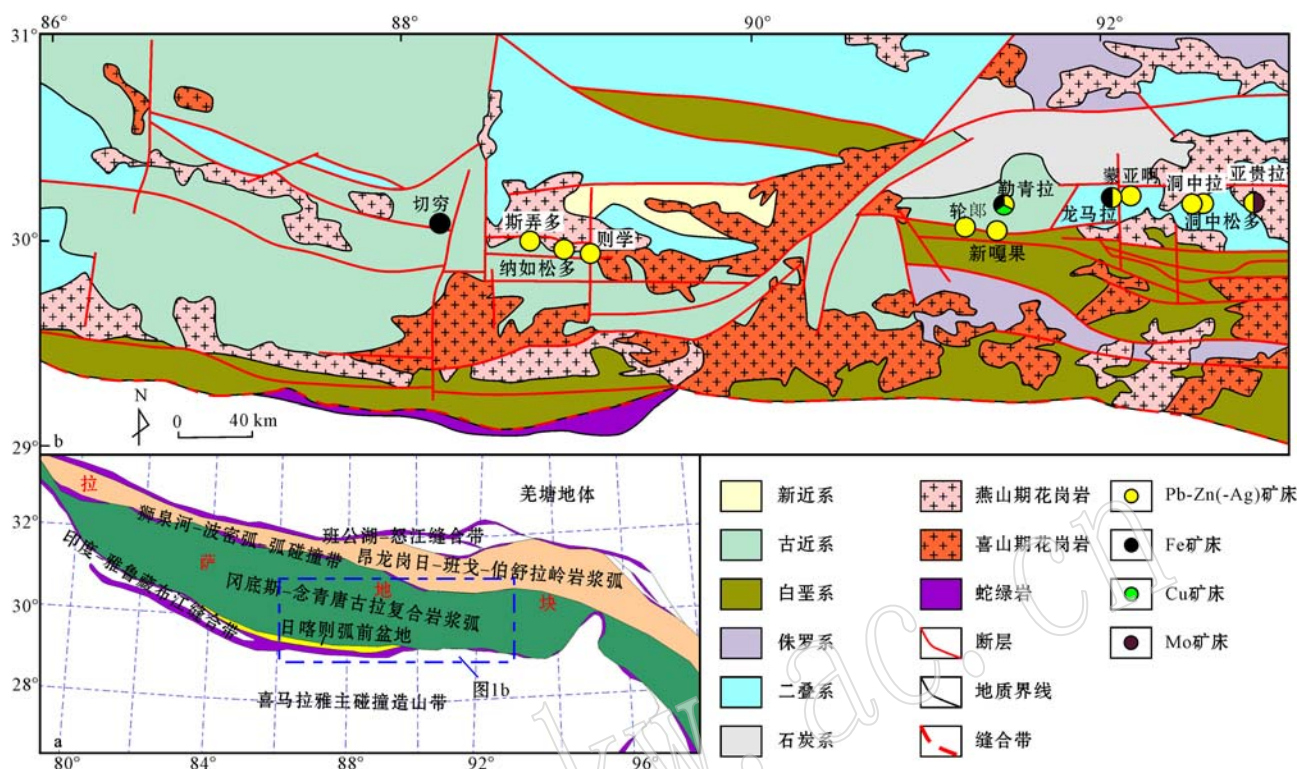


图 1 冈底斯带与岩浆作用相关的 Pb-Zn(-Fe-Cu-Mo)成矿带地质背景简图

Fig. 1 Geological setting of the Gangdise region for the magmatism-related Pb-Zn (-Fe-Cu-Mo) metallogenic belt

a—冈底斯带构造分区(据潘桂棠等, 2006); b—成矿带区域构造、岩浆岩、地层及矿床分布特征(据侯增谦等, 2006)

a—tectonic subdivisions for the Gangdise orogenic belt (modified after Pan Guitang *et al.*, 2006); b—structures, intrusion rocks, strata and deposits distribution in the region (modified after Hou Zengqian *et al.*, 2006)

峰阶段(杨竹森等未刊资料), 并尤以 70~40 Ma 的古新世-始新世岩浆活动最为强烈(Schärer *et al.*, 1984; 莫宣学等, 2003; Ji *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2010)。这期岩浆活动由新特提斯板片熔融机制诱发(Mo *et al.*, 2008), 形成巨厚的林子宗火山岩系和侵入岩类, 并最终构成了冈底斯岩浆岩带的主体。其中, 林子宗火山岩系喷发于 65~40 Ma (Zhou *et al.*, 2004), 厚度超过 5 000 m, 具有典型的陆缘弧岩浆岩地球化学特征(莫宣学等, 2003); 侵入岩类则在冈底斯南部产出, 侵位活动于 50 Ma 达到高峰, 产出从基性岩类到酸性岩类在内的多种岩石类型(莫宣学等, 2009), 其中酸性侵入岩及相邻的含钙地层内发育一系列与以上岩浆活动相关的 Pb-Zn(-Fe-Cu-Mo)矿床(图 1b)(臧文栓等, 2007; 唐菊兴等, 2012; 张遵遵等, 2013)。这套矿床总体呈东西向展布, 集中发育在 65~50 Ma (唐菊兴等, 2012), 资源储量巨大, 是青藏高原腹地著名铅锌(铁铜钼)成矿带的主体。纳如松多铅锌矿床位于该带中部, 形成于 57

Ma 左右(纪现华等, 2014)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

纳如松多铅锌矿区由老至新出露下二叠统昂杰组、中二叠统下拉组和古新世典中组 3 套地层(图 2)。昂杰组出露于矿区中部和西北部, 由于构造作用而不连续, 岩性主要为灰色变质粉砂岩、粉砂质板岩与灰黑色板岩互层, 局部夹灰岩。昂杰组与上覆下拉组整合接触, 与典中组则为断层或角度不整合接触。下拉组分布在矿区中西部, 总体呈东西向展布, 由灰-深灰色灰岩构成, 局部见板岩, 下部含燧石结核, 产有丰富的珊瑚、腕足、菊石等化石。下拉组与上覆典中组整体角度不整合接触, 局部断层接触。典中组发育广泛, 是矿区的主体地层, 从矿区西部到东部连续分布, 其岩性复杂, 包括英安岩、英安质凝灰岩、含火山角砾凝灰质砂岩、玄武岩等多种火山岩

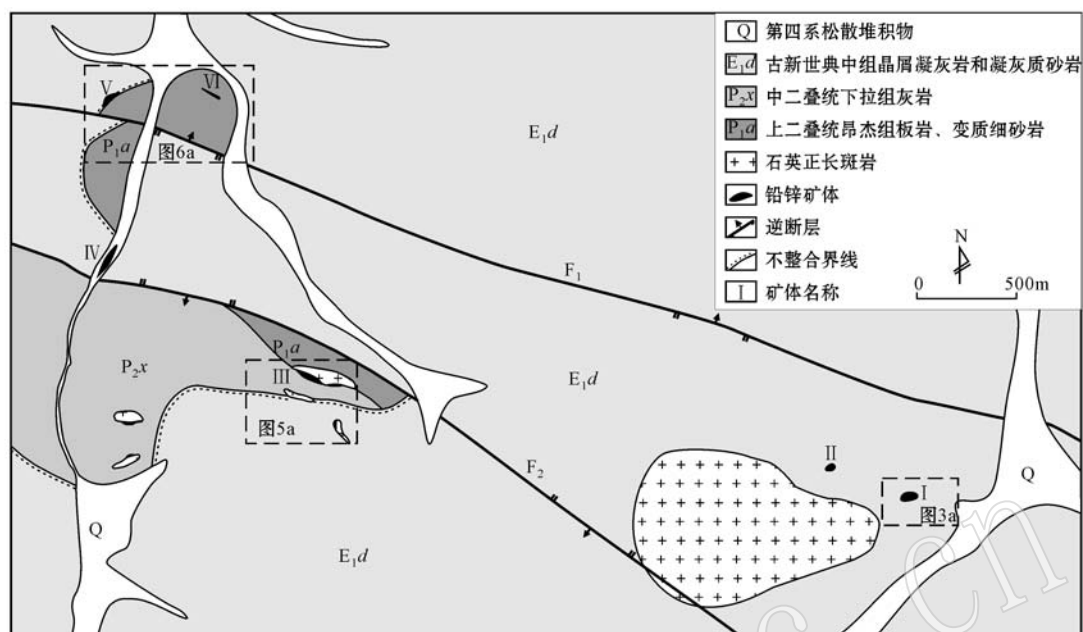


图2 纳如松多铅锌矿床地质简图(据纪现华等,2012)

Fig. 2 Geological sketch map of the Narusongduo Pb-Zn deposit (modified after Ji Xianhua *et al.*, 2012)

和火山碎屑岩,岩石多具似层状、层状构造,倾向为北东向。就已完成的地质填图工作来看,矿区3套地层中都有不同形式铅锌矿化的存在,也即均为赋矿围岩,但根据目前所揭露的金属量来看,其含矿的优选性按照典中组凝灰岩、下拉组灰岩、昂杰组砂板岩的顺序逐渐降低。

矿区以NW-SE为主构造线方向,并以此为走向发育两条倾向相背的逆断层(图2)。其中 F_1 断层发育在矿区中北部,为区域上罗拉-甲嘎逆冲断层的一部分,断层面产状为 $(190^\circ \sim 230^\circ) \angle (45^\circ \sim 60^\circ)$ 。在矿区东部, F_1 断层两侧岩性色调明显不同,北侧紫灰色与南侧灰黄色的分界极为显著;在矿区西部,断层南侧灰岩形成较陡的高山,山脊次棱状,北侧的火山岩则多呈浑圆的中低山地貌;此外, F_1 断层作用也导致两侧地层产状出现明显不同。 F_2 断层发育在矿区中南部,断层面产状 $40^\circ \angle 45^\circ$,断层岩石破碎程度较小且断层带狭窄,断层上下两盘岩石发生明显错动。两条断层的破碎带内都未见铅锌矿化,仅见灰白色、灰褐色粘土矿物充填,反映出两条逆断层都可能为成矿期后构造,对矿化起着后期改造作用。矿区次级构造主要为裂隙及破碎带,并以各向裂隙最为发育。在岩石剥露较好地段,常可见到不同程度的裂隙成群出现,其形态复杂,产状紊乱,反映出矿区构造活动的多期性和复杂性。与成矿关系密切的主要

有两组张节理:一组近东西走向,北倾,倾角 $30^\circ \sim 46^\circ$;另一组近南北走向,东倾,倾角 31° 左右。二者常被铅锌矿脉充填形成脉状铅锌矿化,是矿区的主要容矿构造。

矿区岩浆岩零星出露,主要发育一套石英正长斑岩,以细斑和粗斑两种形式产出,并在矿区3套地层中以岩株产状侵位。其中,细斑斑岩为岩体主体,它主要产出在斑岩体的外围,呈浅灰色至浅肉红色,以石英、钾长石为斑晶,斑晶粒度在2 mm左右,基质为隐晶质;粗斑斑岩与细斑斑岩呈过渡关系,主要在斑岩体近中心和顶部位置产出,其颜色及岩石结构同细斑斑岩一致,但斑晶粒度多大于5 cm,基质为细斑质。斑岩多发生泥化,局部绢云母化,粗斑斑岩中有约10%~20%的黄铁矿存在(杨勇等,2010a)。石英正长斑岩体和铅锌矿化关系密切,在地表可见它产在隐爆角砾岩型矿体外围约100 m的位置,并和矽卡岩型矿体直接接触。已有的研究表明,它的侵位时代在62 Ma左右(纪现华等,2012),和隐爆角砾岩型矿化发生时间(~ 57 Ma)基本相当(纪现华等,2014)。

2.2 铅锌矿化型式

矿区现已发现隐爆角砾岩型、矽卡岩型、矿层型和脉型4种铅锌矿化形式,其各自具有鲜明的矿化特征,并分别赋存于不同岩性地层内。

2.2.1 隐爆角砾岩型铅锌矿化

隐爆角砾岩型铅锌矿化是纳如松多矿区最特征也是最具经济价值的矿化形式,目前已发现两个矿化岩筒(I号和II号矿体),二者相邻分布于矿区东南部最大的石英正长斑岩体外围典中组凝灰岩地层中(图2)。其矿石品位极高并极具开采价值,就现有工程控制,铅最高品位达到31.28%,平均7.63%;锌最高品位达到12.27%,平均2.41%。铅锌金属总量已达到大型规模。

两个隐爆角砾岩型矿体形态及矿化特征彼此相似,以I号隐爆角砾岩筒为例,它在地表(图2、图3a)大致呈椭圆状,展布方向为近东西向,向下则以桶状延深,南东倾向,倾角在 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 左右,并有变大趋势(图3b)。角砾岩筒内部具有清晰的角砾岩相分带特征(图4a),根据角砾大小、形状、可拼合性等特点,从岩筒中心向外可分为3个相带:崩落带→震碎带→裂隙带,各带特征如下:

(1)崩落带(图4b):为热液内压大于外压而引起

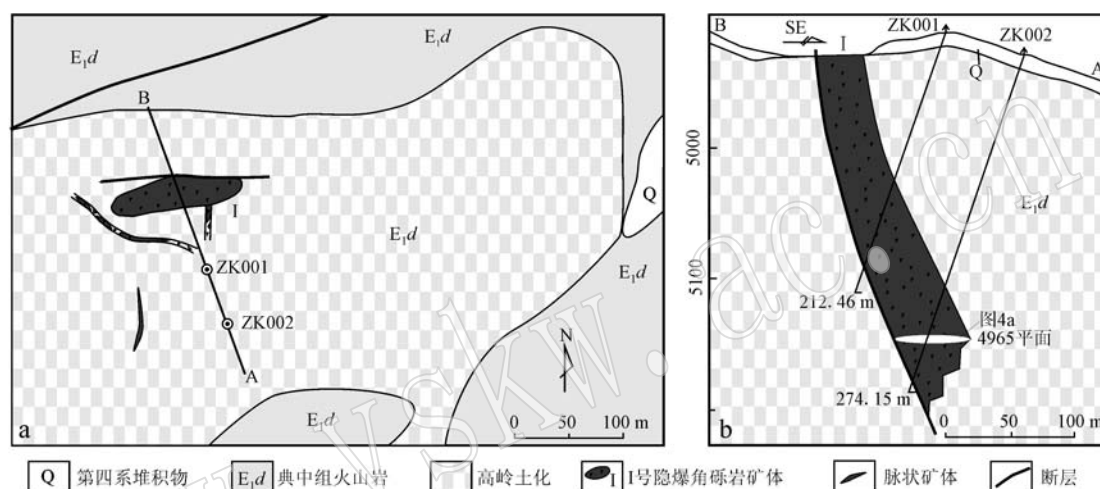


图3 纳如松多铅锌矿床隐爆角砾岩型矿化平面(a)及剖面(b)地质简图(平面图位置见图2)

Fig. 3 Geological map of crytoexplosive breccia-type orebody in the Narusongduo deposit (a) and its cross section (b) (for the location see Fig. 2)

的隐爆作用导致岩石破碎并崩落形成的角砾岩带,角砾大小混杂,直径2~3 cm,多呈次棱角状,不具拼合性,角砾成分主要为地层中的晶屑安山岩、凝灰岩和凝灰质砂岩,其边缘由内向外发育粘土化、绿泥石-绿帘石化、绢云母化、硅化,角砾均由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、石英、方解石等一系列热液矿物相胶结。该带为矿体内的富矿地段。

(2)震碎带(图4c):为隐爆作用将岩石震碎而形成的角砾岩带,平面上分布于崩落带外围,角砾为棱角状,大小多为2~3 cm,并常见大的构造角砾间含小角砾现象,整体可拼合性强,角砾成分及胶结物与崩落带相同。由于相对崩落带容矿空间较小,该带总体铅锌品位较低。

(3)裂隙带(图4d):为隐爆作用将岩石震裂但不形成角砾的裂隙发育带,分布于震碎带的外围,在裂隙中发育少量石英、方解石、方铅矿、闪锌矿、紫红色蛋白石细脉,脉宽1~5 cm,脉两侧发育宽约5~

10 mm的灰黄色退色蚀变边。该带不具工业价值。

隐爆角砾岩型铅锌矿化型式简单,在矿物组合上,硫化物主要发育方铅矿、闪锌矿,并有部分黄铜矿、黄铁矿、黝铜矿产出;非硫化物则包括石英、绢云母、方解石、绿帘石、绿泥石等。在矿石类型上,主要产出角砾型矿石,它以典中组火山(碎屑)岩为角砾,以方铅矿、闪锌矿、黄铁矿及其它少量上述热液矿物为胶结物,并在整个矿体中分布。此外,脉状和浸染状矿石也有存在,前者常发育在角砾相对弱的位置,后者则在矿体局部可见。在围岩蚀变上,外围典中组凝灰岩主要发育硅化(燧石化)-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。在成矿期次上,可简要分为3个阶段,包括:①绿泥石-绿帘石-硫化物阶段(绿泥石、绿帘石、石英、方铅矿、闪锌矿);②硫化物-石英-方解石阶段(方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、石

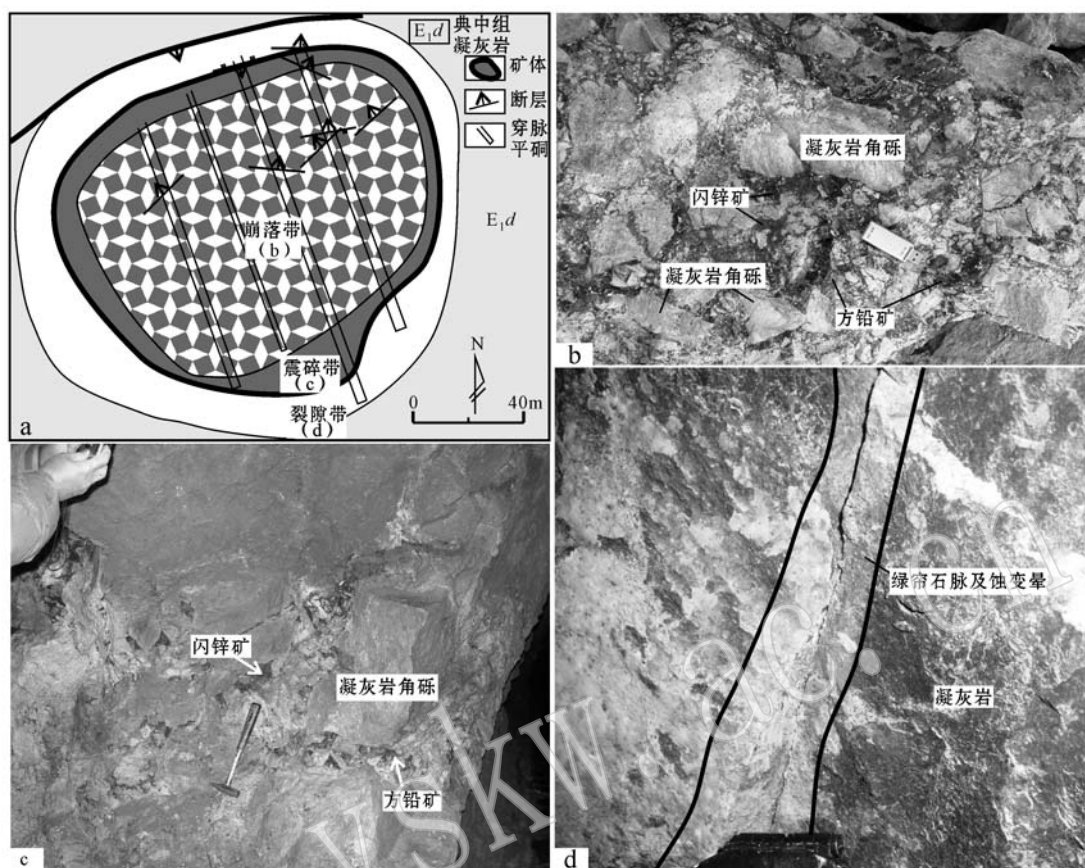


图4 纳如松多铅锌矿床隐爆角砾岩型矿化I号矿体岩相分带简图(位置见图3b)

Fig. 4 Facies zonation of the cryptoexplosive breccia-type orebody (No. 1) in the Narusongduo deposit (for the location see Fig. 3b)

a—角砾岩带分带平面图; b—崩落带角砾岩相; c—震碎带角砾岩相; d—裂隙带岩相

a—facies zonation of the cryptoexplosive breccia-type; b—breccia rock in caving zone; c—breccia rock in earthquake belt; d—rock in fracture zone

英、绢云母、方解石); ③ 黝铜矿阶段(黝铜矿)。其中第②阶段是主要的铅锌成矿阶段。3期矿化在空间上相互叠加,无明显分带现象。

2.2.2 矽卡岩型矿化

矽卡岩型铅锌矿化是纳如松多矿区的第2大矿化型式,目前已发现矽卡岩型铅锌矿体两个(Ⅲ号和Ⅳ号),二者相邻分布在矿区西北部(图2)。其中Ⅲ号矿体在地表可见,发育在下拉组灰岩和细斑石英正长斑岩的接触带上;Ⅳ号矿体通过钻孔工程控制,发育在典中组凝灰岩下伏的下拉组灰岩中。就目前工程控制程度来看,矽卡岩型矿化的铅锌金属资源储量已达到中型规模。

矽卡岩型铅锌矿体形态不规则,地表可见其紧邻细斑石英正长斑岩,呈长条状分布在灰岩内的矽卡岩带中,并在局部出现蜂窝状富集(图5a、5b)。在围岩蚀变上主要表现为接触交代作用所产生的的矽

卡岩化和大理岩化。不同热液阶段,矽卡岩型矿体中出现不同的矿物组合:

(1) 矽卡岩阶段:在细斑石英正长斑岩与大理岩接触带上发生矽卡岩化,发育石榴子石、阳起石、蔷薇辉石、透闪石、绿帘石、绿泥石等干、湿矽卡岩矿物组合(图5c~5f)。

(2) 石英-方解石-硫化物阶段:主要发育方铅矿、闪锌矿和少量的黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、石英、方解石、绿泥石等,这些矿物多呈浸染状或团块状分布在早期矽卡岩及围岩中(图5d~5f)。该阶段是矽卡岩型铅锌矿化的主要成矿阶段。

(3) 方解石-石膏阶段:发育在铅锌矿化之后,多沿矿后裂隙充填形成细脉状方解石和石膏。

2.2.3 矿层型矿化

矿层型矿化为纳如松多矿区第3种铅锌矿化型式,目前仅发现一处矿体(V号,图2),位于矿区西北

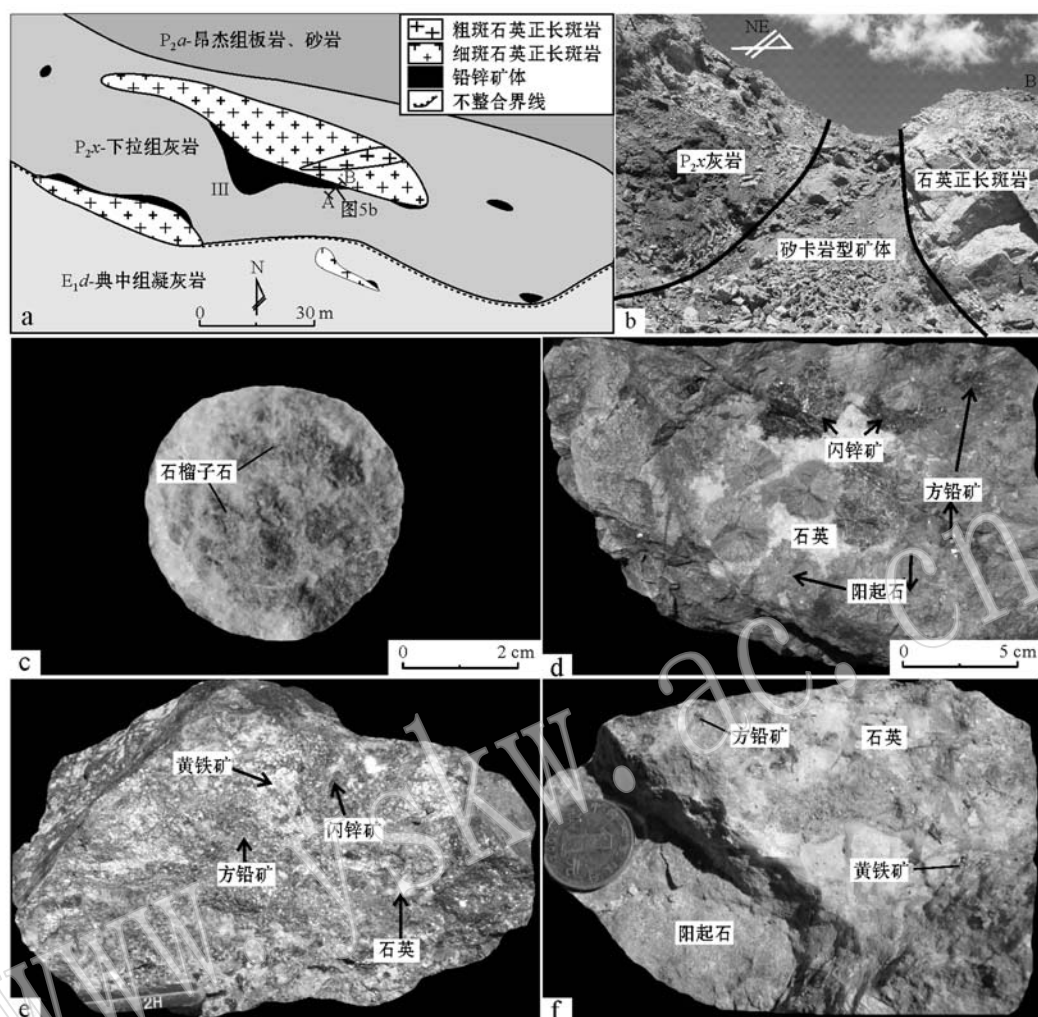


图5 纳如松多铅锌矿床砂卡岩型铅锌矿化Ⅲ号矿体平面图[据杨勇等(2010a)修改,位置见图2]及典型砂卡岩型矿石类型
Fig. 5 Geological map of skarn-type orebody (No. III) in the Narusongduo deposit (modified after Yang Yong *et al.*, 2010a, for the location see Fig. 2) and its typical ores

部昂杰组砂板岩和典中组凝灰岩的不整合面上。该套矿化仅在地表可见,并沿接触面稳定延伸,但其南侧由于后期断层作用被切断(图2),推测矿体在深部尚有保存。目前地表矿体已开采完毕,深部矿体正在勘探,其铅锌金属量至少达到小型规模。

矿层型铅锌矿体形态规则(图6a),成层状赋存在两套岩性之间(图6b),产状与底板昂杰组砂板岩基本一致(图6c)。围岩蚀变较弱,仅见少量高岭土化。矿物组合上较上述两种矿化类型缺失了黄铜矿,硫化物主要发育方铅矿、闪锌矿,并见少量黄铁矿,非硫化物为石英、方解石、绿泥石、雄黄和雌黄。成矿阶段相对简单,主矿化阶段发育方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、绿泥石、石英,成矿之后则有少量方解石、雌黄和雄黄的出现。总体来看,这套矿化的矿石

呈条带状(图6c)或团块状(图6d)产出。

2.2.4 脉状矿化

脉状矿化在矿区多处发育(图3a、图6a)。这种矿化对地层岩性并无明显选择性,目前达到可开采价值的脉状矿体发育在昂杰组板岩中(Ⅵ号,图6a),但其铅锌资源量相对较小,仅具小型规模或以下。

脉状矿化矿体总体呈脉状,铅锌硫化物等热液矿物沿着早期区域断裂多次活动(图6e)或岩浆隐爆过程中(图3a)留下的束状裂隙充填,围岩基本不发育蚀变。矿物组合上不但缺失黄铜矿,石英含量也急剧减少,其硫化物组合主要包括方铅矿、闪锌矿和黄铁矿,非硫化物则以白云石为主,见少量石英。成矿阶段总体为一期,但在同一矿脉内部,黄铁矿+白云石组合一般在脉壁发育,方铅矿+闪锌矿+白云

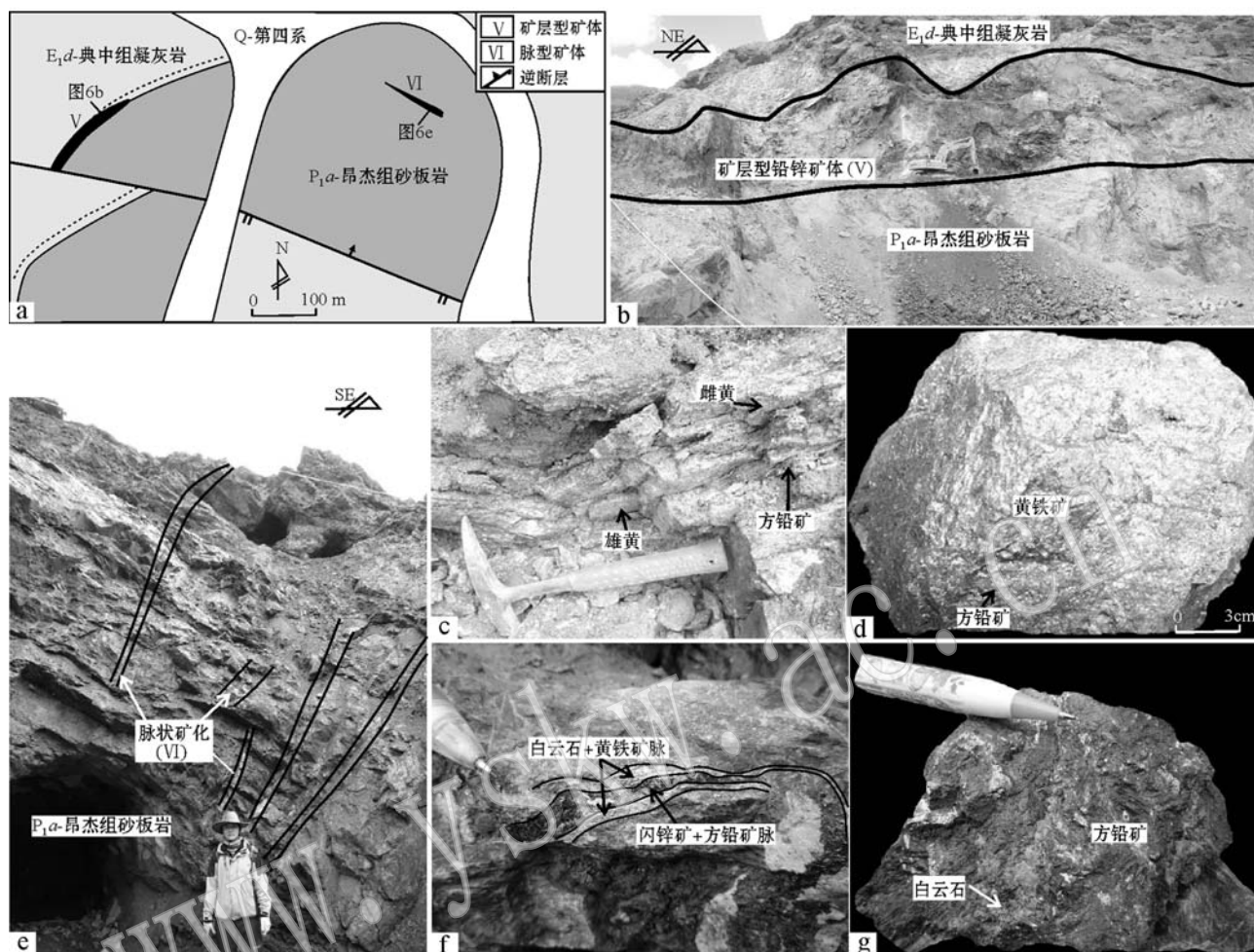


图6 纳如松多铅锌矿床矿层型矿化(V号)和脉状矿化(VI号)矿体平面图(位置见图2)及两类矿化典型矿石

Fig. 6 Geological map of manto-type orebody (No. V) and vein-type orebody (No. VI) in the Narusongduo Pb-Zn deposit (for the location see Fig. 2) and their typical ores

a—矿层型矿化和脉状矿化地质简图; b—矿层型矿化产状; c、d—矿层型矿化典型矿石; e—脉状矿化产状; f、g—脉状矿化典型矿石
a—geological map; b—geological attitude of manto-type orebody; c, d—typical ores of manto-type mineralization; e—geological attitude of vein-type orebody; f, g—typical ores of vein-type mineralization

石组合在脉体中心发育。其矿石类型总体以脉状(图6f)为主,局部呈团块状发育(图6g)。

3 同位素地球化学特征

3.1 氢氧同位素地球化学特征

为了进一步判断纳如松多矿区铅锌矿化的成矿机制,本次工作进一步选择了隐爆角砾岩型和矽卡岩型两种矿化形式的相关样品进行了氢氧同位素分析,具体包括隐爆角砾岩型矿化的硫化物-石英-方解石阶段的13件石英样品、矽卡岩型矿化石英-方解石-硫化物阶段的4件石英样品和2件方解石样

品。实验在国土资源部同位素地质重点实验室MAT-251EM型质谱计上完成,其中氧同位素分析采用100%正磷酸法(McCrea, 1950),分析精度(2σ)为 $\pm 0.2\text{‰}$;氢同位素分析采用400℃爆裂法取水,锌法制 H_2 ,分析精度(2σ)为 $\pm 2\text{‰}$ 。

氢氧同位素测试结果(表1)表明,隐爆角砾岩型矿化石英样品中流体包裹体所圈闭的成矿流体 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值变化较大,分布在 $-177\text{‰} \sim -118\text{‰}$ 之间,结合石英氧同位素及流体包裹体实测温度峰值计算获得的流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值变化范围则较小,介于 $-2.76\text{‰} \sim 3.29\text{‰}$ 之间。矽卡岩型矿化石英及方解石样品中流体包裹体所圈闭的成矿流体 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$

表 1 纳如松多矿区铅锌主成矿阶段热液矿物及成矿流体氢氧同位素组成

Table 1 H and O isotope composition of hydrothermal minerals and fluids from main mineralization stages in the Narusongduo deposit

样品编号	矿物名称	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{\text{fluid}}/\text{‰}$	$t/^{\circ}\text{C}$	矿化型式
CM6-5	石英	-177	9.4	2.14	290	隐爆角砾岩型矿化
CM8-4	石英	-175	7.0	-0.26	290	
CM10-4	石英	-170	6.7	-0.56	290	
CM2-5	石英	-163	4.5	-2.76	290	
CM6-10	石英	-147	8.5	1.24	290	
NRSDI-3-2	石英	-129	7.8	0.54	290	
NRSDI-4-4	石英	-119	7.5	0.24	290	
ZK9-2-5	石英	-161	5.0	-1.21	320	
ZK9-2-42	石英	-118	7.5	1.29	320	
ZK9-2-58	石英	-135	8.1	1.89	320	
ZK9-3-105	石英	-158	5.8	-0.41	320	
ZK9-7-6	石英	-157	9.5	3.29	320	
ZK-10-3	石英	-149	8.4	2.19	320	
NRSDⅢ-1-4	石英	-141	2.0	-5.26	290	矽卡岩型矿化
NRSDⅢ-1-5	石英	-156	1.8	-5.46	290	
NRSDⅢ-1-6	石英	-149	2.1	-5.16	290	
NRSDⅢ-4-3	石英	-139	2.3	-4.96	290	
NRSDⅢ-1-3	方解石	-153	0.8	-4.58	290	
NRSDⅢ-4-2	方解石	-164	0.2	-5.18	290	

注：石英与流体分馏采用 $1\,000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 t^{-2} - 3.40$ (Clayton *et al.*, 1972) 计算；方解石与流体分馏采用 $1\,000\ln\alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6 t^{-2} - 3.39$ (O'Neil *et al.*, 1969) 计算；温度采用实测均一温度峰值。

值和隐爆角砾岩型相当，介于 $-164\text{‰} \sim -139\text{‰}$ 之间，但 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值则相对较小，集中分布在 $-5.46\text{‰} \sim -4.58\text{‰}$ 之间。

3.2 硫同位素地球化学特征

结合对成矿物质来源判定的需要，系统选择了纳如松多矿区 4 种铅锌矿化型式硫化物沉淀主要阶段的 57 件方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿样品进行了硫同位素测试。具体实验工作在国土资源部同位素地质重点实验室 MAT-251EM 型质谱计上完成，样品以 Cu_2O 为氧化剂制备 SO_2 进行硫同位素测试，分析精度 (2σ) 为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。分析结果 (表 2) 表明，不同矿化型式所沉淀的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值呈逐渐增大趋势，其中隐爆角砾岩型介于 $0.6\text{‰} \sim 4.7\text{‰}$ 之间，矽卡岩型介于 $3.3\text{‰} \sim 8.2\text{‰}$ 之间，矿层型介于 $5.4\text{‰} \sim 10.1\text{‰}$ 之间，脉型介于 $6.3\text{‰} \sim 9.4\text{‰}$ 之间。

4 讨论

4.1 成矿流体来源

水是成矿流体的基本组分，研究成矿流体中水的来源是揭示矿床成因的关键。形成矿床的成矿流体可能来自大气降水、海水、初生水、岩浆水、变质水

和封存水等 (陈骏等, 2004)，而成矿流体的氢氧同位素组成则是区分水的不同来源并示踪其演化历史的重要示踪剂。本次实验分析结果表明，在纳如松多铅锌矿区，不管是隐爆角砾岩型矿化流体还是矽卡岩型矿化流体，都具有特征的氢氧同位素组成。

从隐爆角砾岩型矿化流体分析数据来看，其 δD 值变化范围较 $\delta^{18}O$ 值显著增大，它们在 $\delta D - \delta^{18}O$ 图 (图 7) 原生岩浆水左下方呈现出明显的近垂直 δD 轴并向 δD 减小方向演化的趋势，且在该演化趋势下方有轻微的平行 $\delta^{18}O$ 轴并向 $\delta^{18}O$ 值减小方向 (也即西藏雨水线) 演化的趋势 (图 7)。矽卡岩型矿化流体的 $\delta D - \delta^{18}O$ 值相互关系和隐爆角砾岩型相似，但它的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值都相对更为集中， $\delta^{18}O$ 值则明显较隐爆角砾岩型流体小 (图 7)。显然，这种氢氧同位素特征远不能被海水和封存水来源的流体所支持，而且，也难以确定变质水和初生水在成矿流体形成中是否发挥了作用。但是，这种同位素变化特征却明显表现出了残余岩浆水 (经历过去气作用之后的岩浆水) 并混合了大气降水的特征。在岩浆体系去气脱水过程中，D 和 ^{18}O 随去气作用离开岩浆热液，由于 D:H 质量比值相差 100%，而 $^{18}O:^{16}O$ 质量比值仅相差 12.5%，在分馏过程中二者的分馏系数相差极

表 2 纳如松多铅锌矿区硫化物 S 同位素组成
Table 2 S isotope composition of sulfide from the Narusongduo Pb-Zn deposit

样品编号	矿化型式	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	样品编号	矿化型式	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
ZK9-2-1		方铅矿	0.8	NRSDⅢ-1-1		黄铁矿	7.5
ZK9-2-10		闪锌矿	4.5	NRSDⅢ-1-1		方铅矿	3.4
ZK9-2-10		方铅矿	4.1	NRSDⅢ-1-5		方铅矿	3.3
ZK9-2-26		闪锌矿	3.2	NRSDⅢ-1-6		方铅矿	4.0
ZK9-2-26		方铅矿	1.7	NRSDⅢ-4-1		方铅矿	6.9
ZK9-2-42		方铅矿	0.6	NRSDⅢ-4-1	矽卡岩型	闪锌矿	7.5
ZK9-2-47		闪锌矿	3.8	NRSDⅢ-4-2		黄铁矿	8.2
ZK9-2-47		方铅矿	4.5	NRSDⅢ-4-2		闪锌矿	6.5
ZK9-2-66		黄铁矿	4.7	NRSDⅢ-4-2		方铅矿	6.6
ZK9-2-92		方铅矿	3.2	NRSDⅢ-4-3		方铅矿	4.9
ZK9-3-1		闪锌矿	3.8	NRSDⅢ-4-3		闪锌矿	6.5
ZK9-3-11		闪锌矿	4.2	NRSD11-4-1		黄铁矿	10.1
ZK9-3-11		方铅矿	2.5	NRSD11-4-2		方铅矿	7.8
ZK9-3-13		闪锌矿	3.8	NRSD11-4-2		黄铁矿	8.2
ZK9-3-13		方铅矿	1.6	NRSD11-4-3	矿层型	方铅矿	5.4
ZK9-3-29	隐爆角砾岩型	闪锌矿	4.0	NRSD11-4-3		黄铁矿	7.2
ZK9-3-29		方铅矿	3.0	NRSD11-4-4		方铅矿	8.5
ZK9-10-3		闪锌矿	4.2	NRSD11-20-1		方铅矿	7.1
ZK9-10-3		方铅矿	2.9	NRSD11-20-1		黄铁矿	8.7
ZK9-10-12		方铅矿	3.2	NRSD11-20-2		方铅矿	7.6
ZK9-10-15		方铅矿	2.7	NRSD11-20-1		黄铁矿	9.4
ZK9-10-22		闪锌矿	3.5	NRSD11-20-3		闪锌矿	8.4
ZK9-10-35		闪锌矿	2.7	NRSD11-20-4	脉型	方铅矿	7.1
ZK9-10-35		方铅矿	1.7	NRSD11-20-4		闪锌矿	8.1
ZK9-10-41		闪锌矿	4.2	NRSD11-20-5		方铅矿	7.3
ZK9-10-41		方铅矿	3.7	NRSD11-20-6		方铅矿	6.3
ZK9-10-63		闪锌矿	3.4	NRSD11-20-6		黄铁矿	9.1
ZK9-10-63		方铅矿	1.8				
ZK9-10-73		黄铜矿	2.9				
ZK9-10-96		黄铁矿	3.2				

大,表现为氢同位素较氧同位素分馏显著、 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值较 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的变化大的多的特征(Shmulovich *et al.*, 1999)。实验工作(Hedenquist *et al.*, 1998; Shmulovich *et al.*, 1999; Harris and Golding, 2002)表明,在 350~600℃ 的封闭体系下,形成斑岩型铜矿床的岩浆水因去气作用发生气、液相分离,在液相+气相+石盐曲线上最大可以产生气相和残余液相之间的 28‰ 的 D/H(V-L)和 2‰ 的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 分馏,而在开放体系下,去气作用(瑞利分馏)则能够产生更大的 δD 分馏(Shmulovich *et al.*, 1999)。分析纳如松多铅锌矿床成矿流体 δD 值变化趋势(图 7)可以发现,其大约分别需要 60‰~100‰ 和 40‰~90‰ 的 D/H(V-L)分馏才能够匹配隐爆型矿化和矽卡岩型矿化的现有分析结果,而如此大的 δD 分馏通过在封闭体系下岩浆热液的去气作用是难以实现的。鉴于在开放体系去气作用中残余岩浆体系中 δD 亏损至

少可以达到 50%~80%(Taylor, 1986)的事实,笔者认为,纳如松多成矿流体主要来源最有可能是开放体系下发生过去气作用的残余岩浆水。另一方面,从 $\delta^{18}\text{O}$ 值分析结果来看,隐爆角砾岩型矿化流体较原生岩浆水范围具有向西藏雨水线偏移的趋势,而矽卡岩型矿化流体则向雨水线方向偏移距离更大(图 7),这一演化趋势明显反映了大气降水对成矿流体的参与,且相比较而言,矽卡岩型矿化流体中混合了更多的大气降水成分。实际上,已经完成的流体包裹体显微测温工作(纪现华未刊资料)也表明,隐爆角砾岩型矿化流体的均一温度峰值在 290~320℃,盐度[$\omega(\text{NaCl})/\%$,下同]峰值在 4.65%,矽卡岩型矿化流体的均一温度峰值则出现 290℃ 和 190℃ 两个峰值,盐度也相对更低,峰值为 3.06%,总体也反映出原生岩浆水向温度降低的方向演化并外来低盐度流体(推测为大气降水)加入的趋势。

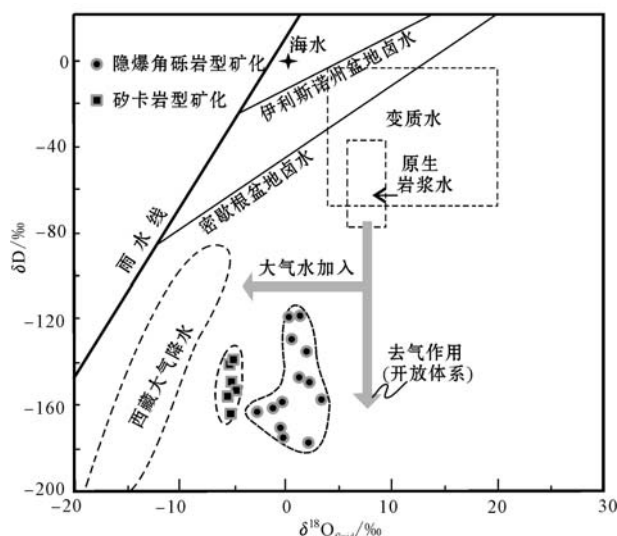


图7 纳如松多铅锌矿床成矿流体 $\delta D - \delta^{18}O_{\text{fluid}}$ 相关图解

Fig. 7 Diagram of δD versus $\delta^{18}O_{\text{fluid}}$ of ore-forming fluid in the Narusongduo Pb-Zn deposit

海水据 Sheppard (1986); 原生岩浆水范围据 Taylor (1974); 变质水范围据 Giggenbach (1992); 西藏大气降水范围据王军等 (2000); 伊利诺斯诺盆地卤水和密歇根盆地卤水范围据 Kesler 等 (1997)

Seawater isotopic composition referring to SMOW after Sheppard (1986); fields of primary magmatic water, metamorphic water, meteoric water in Tibet region and lines for Illinois basin and Michigan basin brines after Taylor (1974), Giggenbach (1992), Wang Jun *et al.* (2000) and Kesler *et al.* (1997), respectively

4.2 成矿物质来源

对于金属硫化物矿床而言,成矿物质主要涉及到硫和金属物质,而 S、Pb 同位素特征则是判断这两种物质来源的重要指示剂。研究表明,热液体系所淀积硫化物的硫同位素一般为体系总硫发生分馏之后的产物,因此在实际进行硫同位素讨论之前往往需要辨别出成矿热液的总硫特征。获得成矿热液总硫的方法有多种,一般在共生矿物对达到硫同位素平衡的情况下,选择平克尼-拉夫特图解法(如图8内嵌散点图)(Pinckney and Rafter, 1972)进行分析。观察纳如松多矿区4种矿化型式硫化物的S同位素组成发现,每种矿化的硫同位素数据都相对集中,且除了少数几个样品外,基本都满足硫同位素平衡状态下的分馏特征(即 $\delta^{34}S_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}S_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}S_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}S_{\text{方铅矿}}$)(图8),推测在流体体系中硫同位素分馏近于平衡。进一步总硫分析表明,几种矿化型式的热液总硫一般都和同种矿化中的黄铁矿硫同位素组成接近,并按照隐爆角砾岩型($\delta^{34}S_{\text{总硫}} = 4.15\text{‰}$)、

矽卡岩型($\delta^{34}S_{\text{总硫}} = 7.92\text{‰}$)、矿层型($\delta^{34}S_{\text{总硫}} = 8.49\text{‰}$)和脉型($\delta^{34}S_{\text{总硫}} = 8.80\text{‰}$)的顺序呈现逐渐增大趋势(图8)。如果硫化物矿床的 $\delta^{34}S$ 值在大于0的范围内分布时,一般可考虑其来自于有机质对硫酸盐的热还原作用(TSR)或岩浆硫来源。其中,TSR过程产生的硫同位素分馏(0~15‰)虽然可以和本次数据分析结果相匹配,但其实这一过程却往往难以达到硫同位素分馏的平衡状态(Ohmoto and Rye, 1979),和本次研究结果中硫同位素分馏基本平衡的事实不符。而实际上,这种相对集中的、平衡的硫同位素特征更多反映了单一的、岩浆硫的来源特征。正常情况下,若硫来自于岩浆,它的 $\delta^{34}S$ 数值一般会介于 $-0.3\text{‰} \sim +2.5\text{‰}$ 之间(Taylor, 1986),但是,如果当岩浆在形成岩浆岩的过程中发生了去气作用,其残余相的 $\delta^{34}S$ 值就会发生变化。研究认为,在高氧逸度条件下(即氧化环境中),岩浆在开放体系下的 SO_2 去气作用可以导致残余相的 $\delta^{34}S$ 值正向分馏达5‰,而 H_2S 的去气作用可以使残余相的 $\delta^{34}S$ 值正向分馏达14‰;在低氧逸度条件下(即还原环境中),岩浆在开放体系下的 SO_2 或 H_2S 去气作用都会导致残余相的 $\delta^{34}S$ 值发生负向分馏(Zheng, 1990)。因此,纳如松多矿区不同矿化型式的硫同位素特征其实都可以用来自于岩浆在开放体系中进行 H_2S 去气作用后的残余相来解释,且按照隐爆角砾岩型、矽卡岩型、矿层型和脉型的顺序,去气程度逐渐加深。这种对岩浆去气作用的认识和成矿流体氢氧同位素指示的信息一致,也与矽卡岩型矿化相关的斑岩的氧化性质($Fe_2O_3/FeO \approx 1.6$, 杨竹森未刊资料)一致。

前人曾对矿区隐爆角砾岩型矿化产出的方铅矿、矿区出露的石英正长斑岩以及矿区地层进行过Pb同位素特征对比(杨勇等, 2010b),对比结果发现成矿金属物质Pb同位素和斑岩Pb同位素基本一致,但和地层Pb同位素组成有一定差别,由此认为斑岩也是金属物质的主要提供者。另一方面,在地质事实上,斑岩与矽卡岩型矿化也有直接关系,故推测其金属物质也应来自于斑岩。

4.3 岩浆作用与几种铅锌矿化之间的关系

目前纳如松多矿区地表仅出露石英正长斑岩一套岩体,它和矽卡岩型铅锌矿化相接触(图5a),为矽卡岩型矿化的成矿岩体。虽然该套岩体在地表并未表现出和其它矿化型式的直接关系,但是它与各类

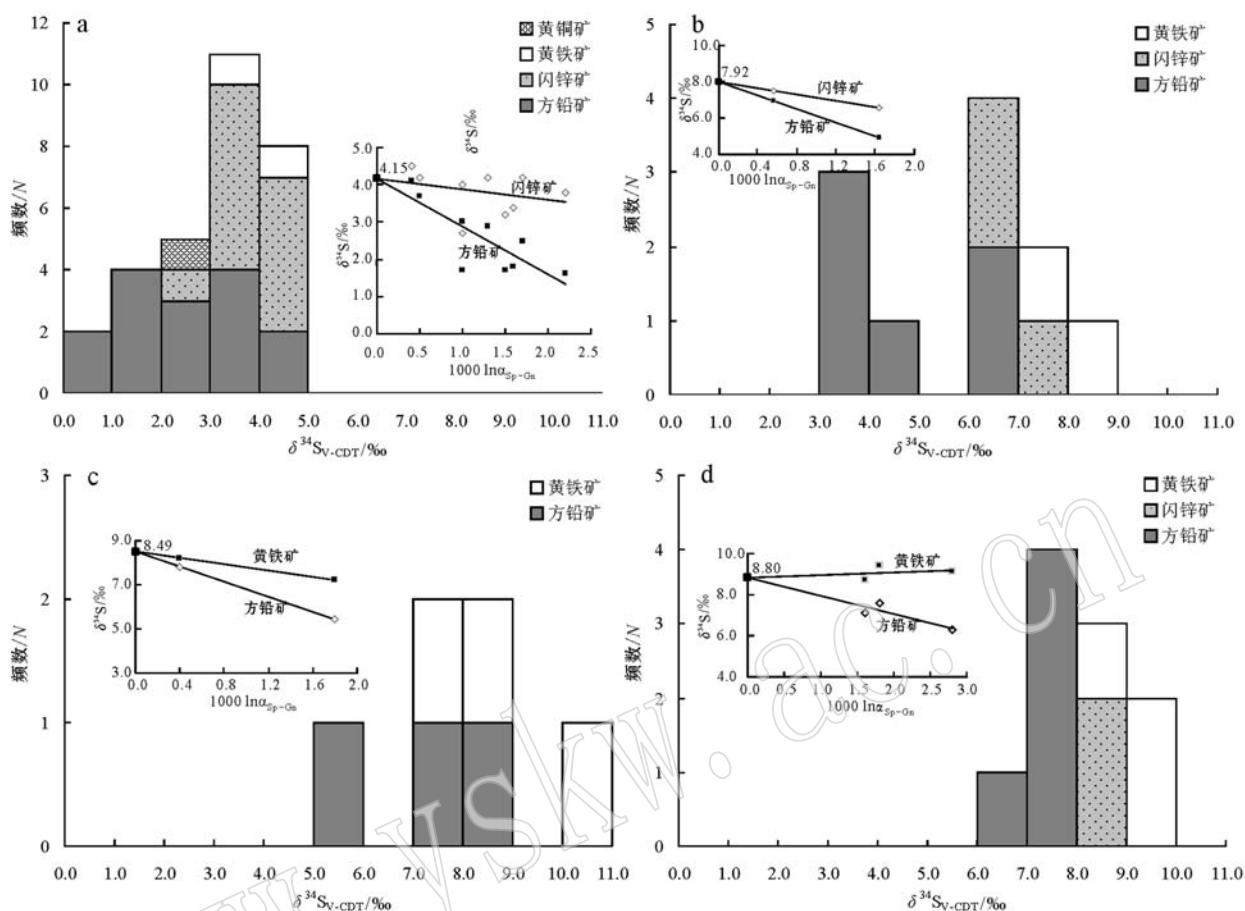


图8 纳如松多铅锌矿床硫化物S同位素直方图

Fig. 8 Sulfur isotope composition of sulfide in the Narusongduo Pb-Zn deposit

a—隐爆角砾岩型；b—矽卡岩型；c—矿层型；d—脉型；内嵌散点图为确定总硫数值的平克尼-拉夫特图解
a—cryptoexplosive breccia type; b—skarn type; c—manto type; d—vein type; the scatter diagrams in the column diagrams are the Pinckney diagrams for total sulfur value

矿化之间的距离都在1 km范围内,在空间上表现出了极强的相关性。这套石英正长斑岩的侵位时间在62 Ma左右(纪现华等,2012),隐爆角砾岩型铅锌矿化发生在57 Ma左右(纪现华等,2014),二者非常相近,前人研究认为隐爆角砾岩型矿化的金属物质来自这套花岗斑岩(杨勇等,2010b),本文研究则显示其成矿流体和硫都应来自一套发生过去气作用的氧化性岩浆系统,这些都较好地证明了矿区这套石英正长斑岩对隐爆角砾岩型矿化的负责性。虽然尚未发现矿层型矿化和脉型矿化与这套石英正长斑岩的直接关系,但是从地质事实上来看,按照隐爆角砾岩型、矽卡岩型、矿层型和脉型的顺序,这些矿化具有基本一致的矿物组合和围岩蚀变特征,同时又整体表现出了围岩蚀变减弱、黄铜矿减少、石英减少、

碳酸盐增多的特征,反映出同一成矿系统中成矿温度逐渐降低的演化特征。同时,按照以上顺序,在硫同位素特征上,系统表现出了 $\delta^{34}\text{S}$ 值逐渐增大的趋势,这是同一岩浆体系 H_2S 去气作用程度越来越深的反映。因此,推测矿区所出露的这套石英正长斑岩与矿区目前所见的4种矿化型式直接相关,为纳如松多矿区铅锌矿化的成矿岩体。

同冈底斯带上的斑岩铜矿带成矿斑岩(杨勇等,2010a)乃至世界上接受程度较高的I型、S型、A型花岗岩相比,纳如松多斑岩都有着诸多不同,但是,同国内认为最典型的斑岩型铅锌矿——冷水坑斑岩型铅锌矿床的成矿斑岩相比,二者却极为相似。对比纳如松多成矿斑岩和冷水坑成矿斑岩可以发现,在主要元素上,二者都具有极高的 SiO_2 含量(纳如

松多 80%, 冷水坑 71%) 和极低的 NaO 含量(纳如松多 0.04%, 冷水坑 0.08%); 在稀土和微量元素上, 二者配分曲线一致, 具有 Eu 的明显负异常, 大离子亲石元素富集, 并具有一致的 Ba、Sr、Ti、P 明显亏损特征; 在 Sr-Nd 同位素指示的岩石源区上, 二者位置基本一致, 都由古老中上地壳重熔并混染少量地幔物质形成(左力艳等, 2008; 杨勇等, 2010a)。纳如松多成矿斑岩和冷水坑成矿斑岩的这种相似性, 令人联想到纳如松多斑岩型铅锌矿化的存在。目前纳如松多地表细斑斑岩中尚并未见到铅锌矿化, 但是其粗斑斑岩中可见大量黄铁矿斑团和少量绢云母化的存在, 而且目前所见的斑岩应为实际斑岩体的远端或外围, 若能提供储量如此巨大的铅锌矿床存在, 推测深部必定有大体积的斑岩侵入体的存在, 而在深部侵入体中, 也极有可能存在与冷水坑斑岩型铅锌矿化相似的斑岩型铅锌矿体。

根据以上讨论, 笔者认为虽然纳如松多矿区目前仅发现了 4 种类型的铅锌矿化型式, 但是在其深部斑岩体内却很可能存在第 5 种和岩浆作用有关的铅锌矿化型式, 也即斑岩型铅锌矿化型式。这 5 种矿化型式应该囊括了产在挤压背景下的和岩浆作用有关的所有铅锌矿化类型, 它们和同一岩体相关, 具有一致的成矿流体和成矿物质来源, 并随着外界条件的变化, 在不同的位置淀积铅锌硫化物而成矿。

4.4 纳如松多矿床成因模型及与岩浆作用相关的独立铅锌成矿系统的建立

发育在印度-欧亚大陆碰撞主碰撞阶段的与岩浆作用相关的铅锌矿床在青藏高原冈底斯成矿带北缘广泛分布, 虽然就目前的勘探程度来看, 这套矿床更多地以隐爆角砾岩型和矽卡岩型在地表展布, 但实际上它可能囊括了产在挤压背景下的与岩浆作用有关的所有铅锌矿化型式。这些矿化型式可由一套具有特殊属性的斑岩产生, 并根据斑岩外围地层岩性以及构造条件的差异而在不同位置淀积出不同类型的铅锌矿体, 形成独立的铅锌成矿系统。以纳如松多铅锌矿床为例, 它的具体成矿模型可描述如下:

(1) 在白垩纪末期到新生代早期(70~60 Ma), 俯冲的新特提斯洋壳板片发生回转并带动印度陆壳一起向拉萨地块之下陡俯冲, 从而引起软流圈物质向地幔楔上涌, 产生异常热源, 诱发地幔楔和上覆地壳部分熔融, 形成纳如松多斑岩岩浆, 并在印度-欧亚大陆板块汇聚速率骤减时导致的碰撞造山带短暂

的应力松弛阶段上升到纳如松多地区, 发生大范围的具有特定源区和独特地球化学特征的岩浆作用(杨勇等, 2010a; 纪现华等, 2012)。

(2) 这套具有特定源区的原始岩浆富含大量的 H_2O 及 H_2S 等气体, 伴随着其上升侵位, 温度降低, 岩浆内开始发生流体初溶和 H_2O 及 H_2S 等挥发分的去气作用, 这一过程使岩浆内汇集了富含具氧化性质的 S 和金属物质的高密度残余岩浆水, 而在岩浆顶部则由于 H_2S 的聚集而汇集了更多的富含具还原性质 S 和金属的高密度残余岩浆水。根据 S 的性质来判断, 其岩浆内部金属离子可能多与 Cl 离子等结合形成 Cl 的液相络合物, 而在岩浆顶部, 则可能更多地与 HS^- 结合形成 $[Pb(HS)_3]^-$ 、 $Pb(HS)_2$ 、 $[Zn(HS)_3]^-$ 等气相络合物(图 9)。

(3) 当岩浆上升侵位到一定的深度, 伴随着温度的进一步降低和岩浆的结晶作用, 岩浆内部初溶流体中的 SO_2 发生水解, H_2S 活动性增强, 铅锌硫化物开始沉淀, 形成斑岩型铅锌矿化。在岩浆顶部, 由于第三系火山岩的隔挡作用, 局部压力过大导致其发生隐爆作用, 压力瞬间释放, 岩浆顶部富集的大量成矿元素随流体迁移进入因隐爆所产生的围岩裂隙中充填成矿, 形成引爆角砾岩型矿化。同时, 岩浆侵位过程中产生的富氧化性质 S 及金属物质的残余岩浆水也在向岩浆外围低压地层迁移, 并由于外在物理化学条件的变化产生还原 S, 在岩浆和灰岩的接触带上混合了大气降水, 形成接触交代的矽卡岩型矿化; 又在不同岩性分界面上, 形成了矿层型矿化; 最后在地层先存的裂隙中, 形成了脉型矿化。在流体迁移过程中, 其 H_2S 仍在持续脱离原有的热液体系, 导致硫化物的 $\delta^{34}S$ 同位素值越来越较原始原浆发生正向偏移(图 9)。

5 结论

(1) 青藏高原冈底斯成矿带北缘纳如松多铅锌矿区产出 4 种与石英正长斑岩相关的铅锌矿化型式, 分别为产在斑岩外围古新世凝灰岩中的隐爆角砾岩型铅锌矿化、产在斑岩与二叠系灰岩接触带上的矽卡岩型铅锌矿化、产在斑岩外围凝灰岩与砂板岩岩性分界面上的矿层型矿化以及产在凝灰岩或砂板岩内部先存裂隙中的脉型矿化。这些矿化型式以

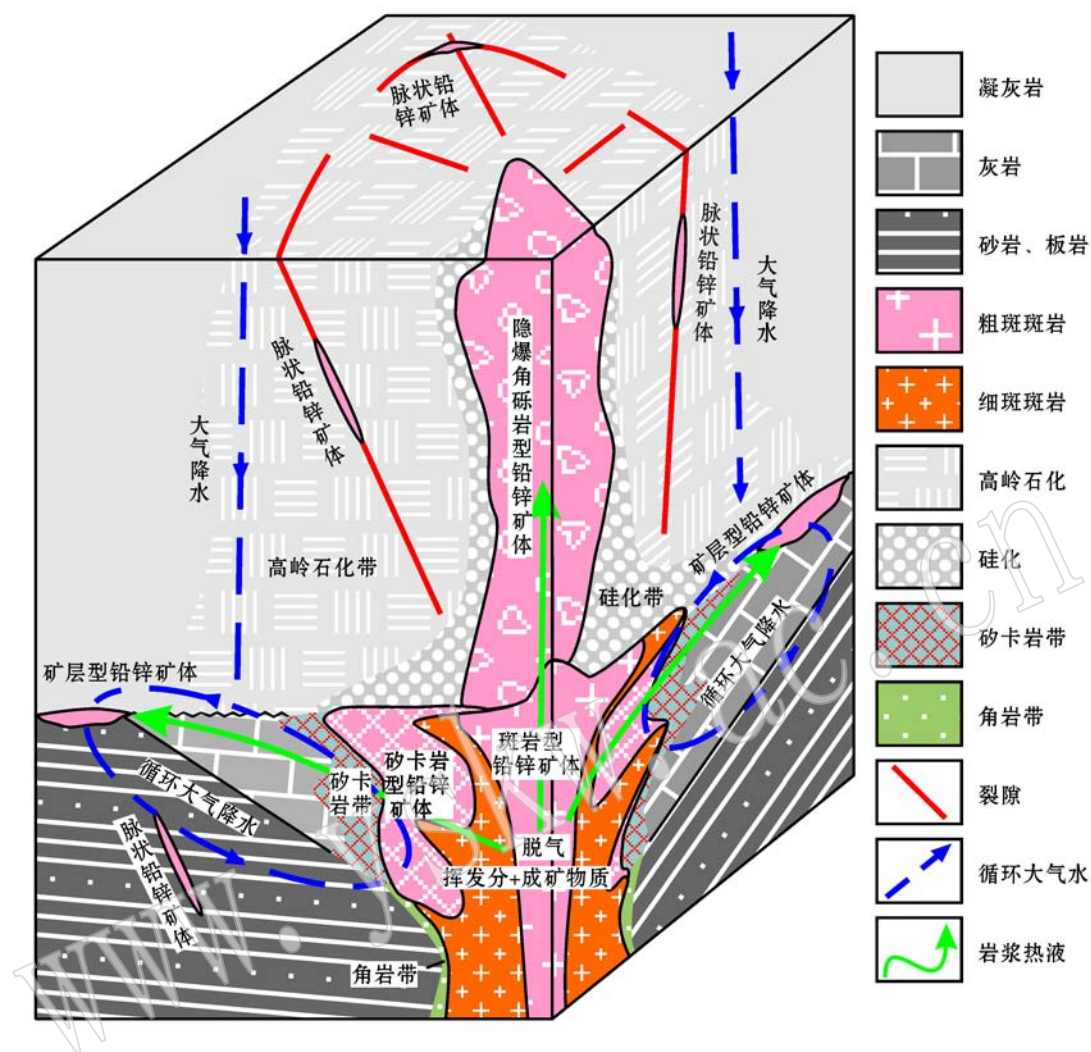


图9 与岩浆作用相关的独立铅锌矿床成矿系统

Fig. 9 A sketch model of magmatism-related Pb-Zn system

绿帘石绿泥石化、硅化绢云母化和碳酸盐化为主要围岩蚀变类型,以方铅矿+闪锌矿为主要矿石矿物,以黄铁矿+黄铜矿+石英+绢云母+方解石为主要脉石矿物,并按照隐爆角砾岩型、砂卡岩型、矿层型和脉型的顺序呈现围岩蚀变减弱,绿石英、绢云母和黄铜矿逐渐减少至消失,碳酸盐逐渐增多的特征,反映出了同一矿化系统成矿温度逐渐降低的特征。

(2) 纳如松多铅锌矿床隐爆角砾岩型矿化和砂卡岩型矿化具有一致的成矿流体来源,主要为发生了去气作用的岩浆水,并有少量大气降水的加入,其中,砂卡岩型矿化获得了更多大气降水的参与。

(3) 纳如松多铅锌矿床4种铅锌矿化型式的成矿物质都来自矿区石英正长斑岩,其中硫来自发生了 H_2S 去气作用的斑岩岩浆残余相,且按照隐爆角砾岩型、砂卡岩型、矿层型和脉型的顺序,岩浆 H_2S

去气作用逐渐增强。

(4) 纳如松多铅锌矿床成矿斑岩与中国典型的斑岩型铅锌矿床——冷水坑斑岩型铅锌矿床的成矿斑岩具有极大相似性,推测纳如松多斑岩体深部也存在斑岩型铅锌矿化的可能,并据此建立了一个独立的铅锌成矿系统,它包括了在挤压环境中形成的所有和岩浆作用相关的铅锌矿化类型,具体成矿模式可简单归纳为:新特提斯洋壳俯冲回转→地幔楔及上覆地壳部分熔融→纳如松多具有独特性质的岩浆形成;岩浆上升侵位→ H_2O 及 H_2S 去气,流体初溶→岩浆内部和顶部分别汇集富氧化性质S和金属物质及富还原性质S和金属物质的残余岩浆流体;岩浆进一步侵位→内部温度降低,岩浆结晶, SO_2 水解,斑岩型铅锌矿化形成;顶部遇高度致密凝灰岩,水压致裂,隐爆角砾岩型铅锌矿化形成;富成矿物质

的残余岩浆水向岩浆外围运移,伴随残余岩浆中 H_2S 的进一步去气,矽卡岩型、矿层型、脉型铅锌矿化在不同岩性地层和构造位置中形成。

致谢 野外工作得到了宝翔矿业有限公司工作人员的大力支持,武汉地质矿产研究所于玉帅工程师、中国地质大学(北京)郑远川副教授、梁维、付强、徐玉涛、张雄等同学参加了野外地质工作,国土资源部同位素地质重点实验室相关老师帮助完成了同位素分析工作,在此对上述个人及单位一并表示感谢。

References

- Boni M. 2003. Non-sulfide zinc deposits: a new-(old) type of economic mineralization[J]. *SGA News*, 15(1): 6~11.
- Bonsall T A, Spry P G, Voudouris P C, *et al.* 2011. The geochemistry of carbonate-replacement Pb-Zn-Ag mineralization in the Lavrion district, Attica, Greece: Fluid inclusion, stable isotope, and rare earth element studies[J]. *Economic Geology*, 106(4): 619~651.
- Canet C, Camprubi A, González-Partida E, *et al.* 2009. Mineral assemblages of the Francisco I. Madero Zn-Cu-Pb-(Ag) deposit, Zacatecas, Mexico: Implications for ore deposit genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 35(3~4): 423~435.
- Chen Jun and Wang Henian. 2004. *Chemical Geology*[M]. Beijing: Science Press, 116~117(in Chinese).
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3 057~3 067.
- Dai Zixi, Sheng Jifu and Bai Ye. 2005. Distribution and Potentiality of Lead and Zinc Resources in the World[M]. Beijing: Earthquake Publish Company, 1~387(in Chinese).
- Deng Shaoming. 1991. Cryptoexplosion detrital rock types and genetic type in the ancient volcano rock area of Lengshuikeng deposit, Guixi country, Jiangxi Province[J]. *Geological Science and Technology of Jiangxi*, 18(1): 28~32(in Chinese with English abstract).
- Franklin J, Gibson H, Jonasson I, *et al.* 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits[J]. *Economic Geology*, 98: 523~560.
- Giggenbach W F. 1992. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(4): 495~510.
- Harris A C and Golding S D. 2002. New evidence of magmatic-fluid-related phyllic alteration: Implications for the genesis of porphyry Cu deposits[J]. *Geology*, 30(4): 335~338.
- Hedenquist J W, Arribas A and Reynolds T J. 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines[J]. *Economic Geology*, 93(4): 373~404.
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, *et al.* 2006. Metallogene-sis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 629~651(in Chinese with English abstract).
- Ji W Q, Wu F Y, Liu C Z, *et al.* 2009. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1 240~1 261.
- Ji Xianhua, Meng Xiangjin, Yang Zhusen, *et al.* 2014. The Ar-Ar geochronology of sericite from the cryptoexplosive breccias type Pb-Zn deposit in Narusongduo and its significance[J]. *Geology and Prospecting*, 50(2): 281~290(in Chinese with English abstract).
- Ji Xianhua, Yang Zhusen, Yu Yushuai, *et al.* 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).
- Kesler S E, Vennemann T W, Frederickson C, *et al.* 1997. Hydrogen and oxygen isotope evidence for origin of MVT-forming brines, southern Appalachians[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(7): 1 513~1 523.
- Leach D L, Bradley D C, Huston D, *et al.* 2010. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History[J]. *Economic Geology*, 105(3): 593~625.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, *et al.* 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective[J]. *Economic Geology*, 100: 561~607.
- Li Guangming, She Hongquan, Zhang Li, *et al.* 2009. Based on mineral resource assessment system (MRAS) for the metallogenic prognosis in Gangdese metallogenic belt, Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 45(6): 645~654(in Chinese with English abstract).
- Luo Yijue. 1985. Geological characteristics of the Lengshuikeng porphyry type Pb-Zn deposit in Guixi Country, Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 4(4): 15~24(in Chinese with English abstract).
- Macdonald A J, Kreczmer M J and Kesler S E. 1986. Vein, manto, and chimney mineralization at the Fresnillo silver-lead-zinc mine, Mexico[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23(10): 1 603~1 614.
- McCrea J M. 1950. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 18(8): 849~857.
- Meinert L, Dipple G and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J].

- Economic Geology, 98: 299~336.
- Mo X, Niu Y, Dong G, *et al.* 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: a case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet[J]. Chemical Geology, 250(1): 49~67.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 135~148(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Yu Xuehui, *et al.* 2009. Cenozoic Collisional-Postcollisional Igneous Rocks in the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~396(in Chinese with English abstract).
- O'Neil J R, Clayton R N and Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. The Journal of Chemical Physics, 51(12): 5 547~5 558.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. Barnes H L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits (2nd edition)[C]. New York: Wiley, 509~567.
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 521~533(in Chinese with English abstract).
- Pinckney D M and Rafter T A. 1972. Fractionation of sulfur isotopes during ore deposition in the Upper Mississippi Valley zinc-lead district[J]. Economic Geology, 67(3): 315~328.
- Schärer U, Xu R H and Allègre C J. 1984. U-Pb geochronology of Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xigaze region, Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 69(2): 311~320.
- Sheppard S M F. 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 16(1): 165~184.
- Shmulovich K I, Landwehr D, Simon K, *et al.* 1999. Stable isotope fractionation between liquid and vapour in water-salt systems up to 600°C[J]. Chemical Geology, 157(3): 343~354.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 105(1): 3~41.
- Tang Juxing, Duo Ji, Liu Hongfei, *et al.* 2012. Minerogenetic series of ore deposits in the East part of the Gandise metallogenic belt[J]. Acta Geoscientia Sinica, 33(4): 493~410(in Chinese with English abstract).
- Taylor B E. 1986. Magmatic volatiles: isotopic variation of C, H, and S[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 16(1): 185~225.
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Economic Geology, 69(6): 843~883.
- Voudouris P, Melfos V, Spry P G, *et al.* 2008. Carbonate-replacement Pb-Zn-Ag ± Au mineralization in the Kamariza area, Lavrion, Greece: Mineralogy and thermochemical conditions of formation[J]. Mineralogy and Petrology, 94(1~2): 85~106.
- Wang Jun, Liu Tianchou and Yin Guan. 2000. Characteristics of isotope distribution in precipitation in the middle-lower reaches of Yarlung Zangbo river[J]. Geology-Geochemistry, 28(1): 63~67(in Chinese with English abstract).
- Yang Yong, Luo Taiyi, Huang Zhilong, *et al.* 2010a. Sulfur and lead isotope compositions of the Narusongduo silver zinc-lead deposit in Tibet: Implications for the sources of plutons and metal in the deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 30(3): 311~318(in Chinese with English abstract).
- Yang Yong, Luo Taiyi, Yang Zhusen, *et al.* 2010b. A comparison of porphyries between Pb-Zn-Ag metallogenic system and Cu-Mo-Au metallogenic system in Gangdese orogen, Tibet[J]. Mineral Deposits, 29(2): 195~206(in Chinese with English abstract).
- Yang Yongqiang and Li Li. 2010. Geological characteristics and formation mechanism of nonsulfide zinc deposit[J]. Global Geology, 29(1): 56~59(in Chinese with English abstract).
- Zang Wenshuan, Meng Xiangjin, Yang Zhusen, *et al.* 2007. Sulfur and lead isotopic compositions of lead-zinc-silver deposits in the Gangdise metallogenic belt, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(10): 1 393~1 397(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huiqiong, Wang Jingbin and Wang Yuwang. 2012. A study on lithofacies zonation of crypto-explosive breccia pipe in Zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit, Lingqiu County, Northeastern Shanxi Province and its exploration significance[J]. Geological Review, 58(6): 1 046~1 055(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zunzun, Li Zeqin, Wang Jiangzhen, *et al.* 2013. Characteristics of lead-zinc deposits in Gangdise metallogenic belt, Tibet, China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resource Research, 28(1): 34~40(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F. 1990. Sulfur isotope fractionation in magmatic systems: models of Rayleigh distillation and selective flux[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 9(1): 27~45.
- Zhou S, Mo X, Dong G, *et al.* 2004. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications[J]. Chinese Science Bulletin, 49(18): 1 970~1 979.
- Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, *et al.* 2010. Presence of Permian extension-and arc-type magmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications[J]. Geological Society of America Bulletin, 122(7~

8): 979~993.

- Zuo Liyan, Hou Zengqian, Song Yucai, *et al.*. 2009. A study of the ore-forming fluid in the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn porphyry deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(5): 616~626(in Chinese with English abstract).
- Zuo Liyan, Meng Xiangjin and Yang Zhusen. 2008. Petrochemistry and Sr, Nd isotopes of intrusive in Lengshuikeng porphyry type Ag-Pb-Zn deposit[J]. *Mineral Deposits*, 27(3): 367~382(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈骏, 王鹤年. 2004. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 116~117.
- 戴自希, 盛继福, 白治. 2005. 世界铅锌资源的分布和潜力[M]. 北京: 地震出版社, 1~387.
- 邓绍明. 1991. 江西贵溪冷水坑古火山岩区隐爆碎屑岩类型及成因探讨[J]. 江西地质科技, 18(1): 28~32.
- 侯增谦, 由晓明, 杨竹森, 等. 2006. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6): 629~651.
- 纪现华, 孟祥金, 杨竹森, 等. 2014. 西藏纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿床绢云母 Ar-Ar 定年及其地质意义[J]. 地质与勘探, 50(2): 281~290.
- 纪现华, 杨竹森, 于玉帅, 等. 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.
- 李光明, 余宏全, 张丽, 等. 2009. 西藏冈底斯铜多金属成矿带基于 MRAS 资源评价系统的成矿预测[J]. 地质与勘探, 45(6): 645~654.
- 罗治爵. 1985. 冷水坑斑岩型铅锌矿床地质特征[J]. 矿床地质, 4(4): 15~24.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135~148.
- 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠, 等. 2009. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 1~396.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 等. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 493~410.
- 王军, 刘天仇, 尹观. 2000. 西藏雅鲁藏布江中、下游地区大气降水同位素分布特征[J]. 地质地球化学, 28(1): 63~67.
- 杨永强, 李丽. 2010. 非硫化物型锌矿床的地质特征和成因机制[J]. 世界地质, 29(1): 56~59.
- 杨勇, 罗泰义, 黄智龙, 等. 2010b. 西藏纳如松多银铅矿 S、Pb 同位素组成: 对成矿物质来源的指示[J]. 矿物学报, 30(3): 311~318.
- 杨勇, 罗泰义, 杨竹森, 等. 2010a. 冈底斯造山带两套不同成矿体系的含矿斑岩对比研究[J]. 矿床地质, 29(2): 195~206.
- 臧文栓, 孟祥金, 杨竹森, 等. 2007. 西藏冈底斯成矿带铅锌银矿床的 S、Pb 同位素组成及其地质意义[J]. 地质通报, 26(10): 1393~1397.
- 张会琼, 王京彬, 王玉往. 2012. 山西灵丘支家地铅锌银矿隐爆角砾岩筒的岩相分带性研究及其勘查意义[J]. 地质论评, 58(6): 1046~1055.
- 张遵遵, 李泽琴, 王奖臻, 等. 2013. 西藏冈底斯成矿带中铅锌矿床的成矿特征[J]. 地质找矿论丛, 28(1): 34~40.
- 左力艳, 侯增谦, 宋玉财, 等. 2009. 冷水坑斑岩型银铅锌矿床成矿流体特征研究[J]. 地球学报, 30(5): 616~626.
- 左力艳, 孟祥金, 杨竹森. 2008. 冷水坑斑岩型银铅锌矿床含矿岩石地球化学及 Sr、Nd 同位素研究[J]. 矿床地质, 27(3): 367~382.