

文章编号: 0258-7106(2017)05-1074-19

DOI: 10.16111/j.0258-7106.2017.05.004

林子宗群火山岩与成矿关系: 以斯弄多浅成低温热液型矿床为例^{*}

丁 帅¹, 陈毓川², 唐菊兴^{2*}, 谢富伟¹, 胡古月², 杨宗耀³, 施 硕¹,
李于海⁴, 杨洪钰⁴

(1 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756; 4 西藏中瑞矿业发展有限责任公司, 西藏拉萨 850000)

摘要 林子宗群火山岩是青藏高原规模最大的火山岩带, 但对该火山岩与成矿关系的研究较少。文章以斯弄多低硫化浅成低温热液型银铅锌矿床为例, 对矿区主要的赋矿火山岩开展了精确的 LA-ICP-MS 定年和全岩地球化学分析, 获得矿区火山岩锆石 U-Pb 年龄在 62~65 Ma 之间, 这些岩石属于高钾钙碱性-钾玄岩和过铝质岩石系列, 相对富集轻稀土元素 (Σ LREE/ Σ HREE = 3.39~13.21) 和大离子亲石元素 (LILE, 如 Rb、K、Sr); 亏损重稀土元素 ($\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}} = 3.02 \sim 16.47$) 和高场强元素 (HFSE: Nb、Ta、Ti、P) 显示出弧火山特征。结合其他研究数据及区域上典型矿床成岩成矿时代特征, 作者指出斯弄多低硫化浅成低温热液型矿床的形成与林子宗群火山作用 (62~65 Ma) 密切相关, 是火山作用驱动地热体系的产物, 成岩成矿发生在印度-亚洲大陆初始碰撞期的陆缘火山弧背景下。

关键词 地球化学 林子宗群火山岩 低硫化 浅成低温热液 斯弄多 火山弧背景 冈底斯

中图分类号: P618.52 P618.42; P618.43

文献标志码: A

Relationship between Linzizong volcanic rocks and mineralization: A case study of Sinongduo epithermal Ag-Pb-Zn deposit

DING Shuai¹, CHEN YuChuan², TANG JuXing², XIE FuWei¹, HU GuYue², YANG ZongYao³,
SHI Shuo¹, LI YuHai⁴ and YANG HongYu⁴

(1 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 4 Zhongrui Mining Co., Ltd., Lhasa 850000, Tibet, China)

Abstract

The Linzizong volcanic rocks constitute the largest volcanic belt in the Tibetan Plateau. However, effective studies of the relationship between volcanic rocks and mineralization remain very insufficient. In this paper, the authors carried out an accurate LA-ICP-MS dating and whole rock geochemical analysis of the ore-hosting vol-

* 本文获地调项目《西藏雄村-普桑果斑岩-矽卡岩型铜多金属矿成矿地质背景与找矿潜力调查》(编号: 12120114068401) 和西藏中瑞矿业发展有限责任公司项目(XZZR-2015) 联合资助

第一作者简介 丁 帅, 男, 1987 年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: 782628728@qq.com

** 通讯作者 唐菊兴, 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿床学及矿产勘查研究。Email: tangjuxing@126.com

收稿日期 2016-08-18; 改回日期 2017-02-28。张绮玲编辑。

canic rocks from the Sinongduo low sulfidation epithermal Ag-Pb-Zn deposit and obtained the U-Pb ages between 62 Ma and 65 Ma, suggesting that the rocks belong to high potassium calc-alkali to shoshonite and peraluminous rock series; all the rocks show the relative enrichment in light rare earth elements (Σ LREE/ Σ HREE = 5.48~6.95) and large ion lithophile elements (LILE: such as Rb, Sr, K), and relative depletion in heavy rare earth elements (La_N/Yb_N = 5.53~8.54) and high field strength elements (HFSE, Nb, Ta, Ti, P), implying arc volcanic features. Combined with other research data and the characteristics of the metallogenic age, the authors hold that the formation of Sinongduo low sulfidation epithermal deposit was closely related to Linzizong Group volcanic rocks (62~65 Ma) and the deposit seems to be the product of the volcanic system which occurred in the continental volcano-tectonic setting at the initial time of India-Asian collision.

Key words: geochemistry, Linzizong Group volcanic rock, low sulfidation, epithermal, Sinongduo, volcano-tectonic setting, Gangdise

火山作用是壳幔物质交换与循环的主要方式,常伴有大量的化学元素迁移和强烈的热液活动,是形成斑岩-浅成低温热液型、角砾岩型、VMS型等不同类型矿床的有利成矿地质条件(王登红等,1996; Sillitoe et al., 2003; Audébat et al., 2008; Ulrich et al., 2010; Sidorov et al., 2015)。浅成低温热液型矿床大多形成于浅地表(<2 km)中低压(<100 Pa)中低温度(200~300°C)环境中(Lindgren, 1922; 1933; Hedenquist, 1987; White et al., 1990; Hedenquist et al., 2000; Corbett, 2002; Cooke et al., 2003; Simmons et al., 2005),是火山岩地区最重要的矿床类型之一(Lindgren, 1933; Hedenquist et al., 2000; Corbett, 2002),同时也是全球主要金银铜铅锌等金属的主要来源(Kesler et al., 2009)。早期学者根据该类矿床成矿流体中硫的氧化还原态与蚀变矿物组合划分为高硫化(明矾石-高岭石型)和低硫化(冰长石-绢云母型)两种端员类型(Hedenquist, 1987; Heald et al., 1987; Berge et al., 1989; Einaudi et al., 2003)。前者主要与碱性安山质和英安质火山-岩浆活动有关,由酸性、氧化的热液流体形成(White et al., 1990; Corbett, 2002; 张德全等,2005),以高含量的金铜硫化物及高价硫的明矾石+高岭土等硫酸盐矿物组合为主(Heald et al., 1987; Hedenquist, 1987; Sillitoe et al., 2003; 唐菊兴等,2014a),是深部斑岩成矿系统重要组成部分,多产于俯冲带之上的岛弧或陆缘弧环境,如菲律宾 Lepanto Cu-Au 矿床、福建紫金山 Cu-Au 矿床、西藏铁格隆南 Cu(Au)矿床等;后者与碱性或钙碱性玄武质-流纹质火山活动有关,由近中性、还原的热流体形成(Corbett, 2002; Taylor, 2007),以金银铅锌等金属硫化物及低价硫的冰长石

+绢云母硅酸盐矿物组合为主(Simmons et al., 2000; Sillitoe et al., 2003; Moncada et al., 2012),包括了早期的热泉型、火山-次火山岩型矿床,多产于火山岩浆弧或弧后裂谷环境(Hedenquist et al., 2000; Corbett, 2002; Richards, 2013),如巴布亚新几内亚 Ladolam Au 矿床、美国 Cripplecreek Au 矿床、新疆阿希 Au 矿床、江西冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿床等。

西藏斯弄多银铅锌矿床位于冈底斯成矿带的中西段,是目前在冈底斯北缘铅锌成矿带林子宗群火山岩中首次发现并确立的低硫化浅成低温热液型银铅锌矿床(唐菊兴等,2016)。整个冈底斯成矿带挟持于班公湖-怒江缝合带与雅鲁藏布江缝合带之间,近东西向延伸超过2000 km,是受特提斯洋演化以及印度大陆与亚洲大陆碰撞作用控制形成的巨型成矿带。包括驱龙、甲玛、雄村、蒙亚啊、亚贵拉、洞中拉-洞中松多等多个与碰撞-后碰撞钙碱性岩浆相关的世界级斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床(Hou et al., 2009; 郎兴海等,2012; 唐菊兴等,2012; 2014b; Tang et al., 2015; Zheng et al., 2015)。前人对这些矿床已有研究,并取得了重要的成果,但对于浅成低温热液型矿床的研究相对有限。西藏地区发现的浅成低温热液型矿床包括班公湖-怒江成矿带上与早白垩世高钾钙碱性陆缘弧岩浆相关的铁格隆南 Cu(Au)矿床(唐菊兴等,2014a; 杨超等,2014; 方向等,2015; 李光明等,2015)、冈底斯成矿带上与早-中侏罗世钙碱性岛弧火山-岩浆相关的雄村-洞嘎 Cu(Au/Ag/Pb/Zn)矿床(唐菊兴等,2014b)及上侏罗统一下白垩统沉积建造容矿的弄如日 Au 矿床(刘云飞等,2012)。这些不同背景、不同时代形成的矿床表明青藏高原具有寻找浅成低温热液型矿床的广阔前景。

西藏斯弄多银铅锌矿床赋存于南木林地区林子宗群陆相火山岩中(王银川等, 2012; 刘波等, 2010)。该矿床最早为西藏地质二队于2008年通过化探异常查证发现, 近年来西藏中瑞矿业发展有限责任公司通过详细的地质填图及钻探工作, 共探明Ag金属量400吨, $w(\text{Ag}) > 100 \text{ g/t}$; Pb+Zn资源量超过30万吨, $w(\text{Pb} + \text{Zn}) > 5\%$; 同时圈定出外围浅地表金异常2处, $w(\text{Au})$ 为 $43 \times 10^{-9} \sim 960 \times 10^{-9}$, 显示出巨大的找矿潜力。斯弄多矿床的发现具有重要意义: ①是在冈底斯北缘铅锌成矿带首次发现的典型浅成低温热液型矿床, 对区域找矿具有积极的指导效应; ②矿化赋存于林子宗群火山岩中, 暗示了该套火山岩不仅是青藏高原大规模的构造岩浆事件的产物, 而且也存在良好的成矿条件。本文通过对斯弄多矿区赋矿火山岩开展精确的年代学及岩石

地球化学分析, 限定了火山活动时代及其成矿地质背景, 并初步探讨了火山作用与成矿的关系。

2 矿床地质

2.1 成矿地质背景

斯弄多矿区位于西藏自治区谢通门县境内, 大地构造位置处于拉萨地体隆格尔-工布江达弧背断带, 属于冈底斯北缘Pb-Zn-Ag成矿带中段(图1a)。该成矿带作为冈底斯Cu多金属成矿带重要组成部分, 西起恰功, 东至亚贵拉, 延拉萨地体中部洛巴堆-米拉山断裂延伸近400 km, 并且拥有近20个中-大型矿(如亚贵拉、沙让、蒙亚啊、洞中拉-洞中松多、纳如松多等), 蕴含超过1000万吨Pb+Zn, 20万吨Mo, 200万吨铜及1万吨Ag资源量(Zheng et al., 2015)。

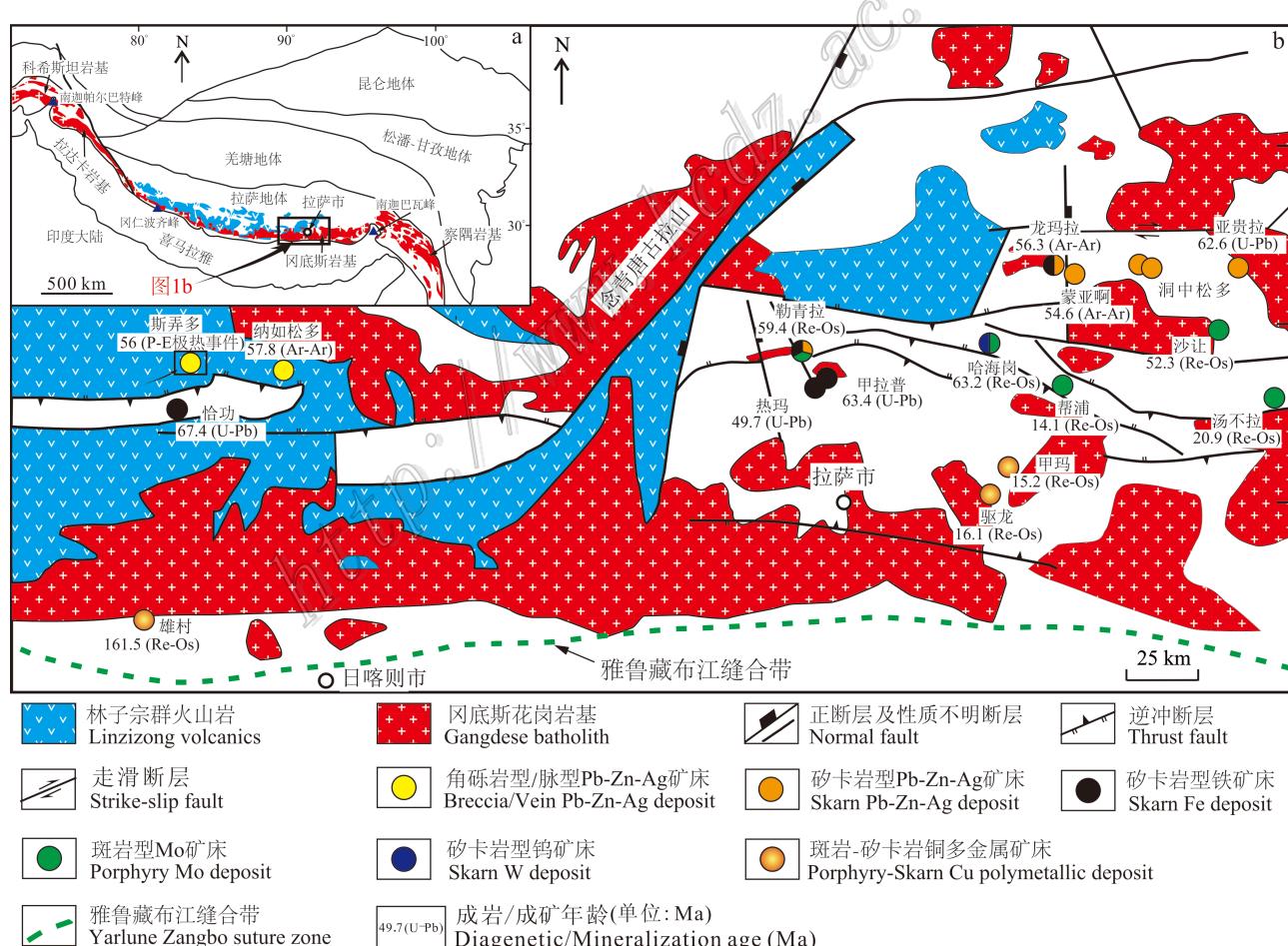
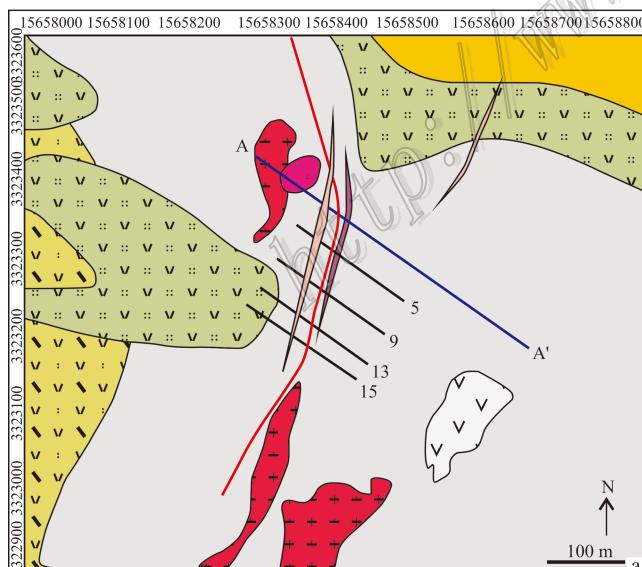


图1 西藏地区构造分区图(a, 据Hou et al., 2004修改)及冈底斯北带区域地质及矿床分布图(b, 据Zheng et al., 2015修改)

Fig. 1 Sketch tectonic map in Tibet(a, modified after Hou et al., 2004) and simplified regional geological map of northeastern Gangdese belt with ore deposits(b, modified after Zheng et al., 2015)

矿床类型以矽卡岩型及热液脉型为主, 成岩成矿大多集中在 63~42 Ma 时间段(图 1b), 与区域上大规模的林子宗火山岩的喷发时代一致, 显示成矿作用过程与林子宗火山岩大规模喷发过程相伴, 为印度-亚洲大陆碰撞环境下的产物(Wang et al., 2015)。西藏林子宗群火山岩是青藏高原最大规模的火山岩带, 沿雅鲁藏布江缝合带东西向展布长于 1200 km, 分布范围占冈底斯岩浆带面积的一半以上(Mo et al., 2008), 是白垩纪晚期—早新生代(70~40 Ma)印度-亚洲大陆碰撞至闭合过程完整的构造岩浆事件记录(Ding et al., 2003; 2005; 侯增谦等, 2006)。该套火山岩自下而上划分为典中组、年波组和帕那组, 成岩年龄集中在 64.43~61.45 Ma、54.07 Ma、48.72~43.93 Ma(董国臣等, 2005), 其中, 典中组表现为弧火山岩特征, 年波组显示为陆缘弧、碰撞和板内环境特征, 帕那组显示为大陆碰撞、板内环境特征, 由南向北岩石碱度增高, 由东向西由偏基性过渡为偏酸性, Nd-Sr-Pb 同位素也指示了从典中组到帕那组地幔/洋壳物质参与逐渐减少, 新生地壳物质增多的趋势, 反应了由南向北, 大洋向大陆的转换, 岩浆源区具有不均一性的特征(Lee et al. 2009; Chen et al. 2014)。



研究区出露石炭系—二叠系(C_1 — P_1)碳酸盐-碎屑岩建造, 中生界(J_3 — K_1)浅海相至海陆交互相碎屑岩、碳酸盐岩建造及古新统典中组(E_{1d})火山岩, 火山岩岩性主要为流纹斑岩、晶屑凝灰岩、火山角砾岩、英安岩等(图 2a), 这套火山岩也是斯弄多矿床最主要的含矿岩系。邻区纳如松多隐爆角砾岩型银铅锌矿床、则学热液脉型铅锌银矿床及拉宗热液脉型银铅锌矿床均产于这套火山岩中(纪现华等, 2012; 2014)。矿区内地质体及矿体分布受火山机构控制。该套火山岩表现为陆相中心-裂隙式喷发特征, 呈火山角砾岩-流纹斑岩-凝灰岩岩相分带特征, 整体以爆发相为主, 次为溢流相和火山沉积相。围绕古火山口发育多条放射状同生断裂构造, 并堆积有大量条带状、层纹状硅质沉积物, 根据产状划分为南北向和东西向 2 组断裂, 其中南北向断裂为本区主要构造, 断裂带中可见石英晶簇和晶洞, 表现出张性断裂特征, 是热液脉型矿体的主要赋存空间。

矿区侵入岩主要为黑云母花岗斑岩, 呈岩脉、岩枝分布在中部和南侧(图 2a)。

2.2 矿体特征

斯弄多铅锌银矿体均赋存于林子宗群典中组陆相火山岩中, 根据矿体空间位置及成矿元素可划分

图 2 斯弄多矿区地质图(a)及 A-A'剖面图(b)

Fig. 2 Geological map (a) and section A-A' (b) of the Sinongduo deposit

出 3 种类型矿体,即产于流纹斑岩中隐爆角砾岩型银铅锌矿体、火山机构旁侧次级断裂带中的热液脉型铅锌银矿体及断裂上盘的独立银矿体。其中,隐爆角砾岩型矿体位于矿区西侧,近直立筒状,目前控制长 60 m,宽约 30 m,厚度约 50 m(图 2b)。角砾成分主要为流纹斑岩及火山碎屑岩,呈三角形、板状、椭圆形及不规则状,大小 0.5~10 cm 之间,占整个角砾岩体积约 30%~50%,胶结物主要为岩粉、石英、长石、绢云母、伊利石、菱铁矿、菱锰矿及黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物。其中,方铅矿主要呈半自形-他形粒状充填于角砾之间;闪锌矿多沿方铅矿边缘发生交代,或和黄铜矿构成固溶体分离结构。此外,角砾岩型矿体中发现部分银矿物赋存于方铅矿中。热液脉型矿体近南北向位于矿区中部,是矿区规模最大、品位高的银铅锌矿体,主要产于火山机构旁侧张性断裂中,呈板状陡倾斜,倾向南东,倾角在 50°~70° 之间,矿体走向长度超过 300 m,倾向延伸 200 m,厚度在 2~30 m 之间(图 2b)。方铅矿、闪锌矿等硫化物多呈块状、网脉状、细脉状集合体,系含矿热液沿构造裂隙充填交代作用形成,而银矿物以硫砷铜银矿和螺状硫银矿为主,呈锥状集合体分布于方铅矿边缘。独立银矿体:分布在断裂上盘(图 2b)。矿体呈板状陡倾斜,倾向南东,倾角在 50°~70° 之间。在这种矿体类型中,铅锌硫化物少见,发育大量独立银矿物,包括辉银矿、硫砷铜银矿、深红银矿等,且多分布在红色碧玉及含铁锰碳酸盐矿物的裂隙中,构成斯弄多矿区最重要的银矿体。

从矿体空间分布及矿化特征来看,斯弄多矿区不同矿体属同期矿化不同表现形式而已,即成矿热液在上升过程中,一部分隐爆上覆围岩并以硫化物形式胶结充填在角砾之间,一部分沿构造裂隙充填交代形成脉状矿体,并在靠近断裂上盘位置含锰矿物附近伴生大量独立银矿物。截止目前,斯弄多矿床共探明 Pb+Zn 金属量大于 30 万吨,Ag 金属量超过 400 吨(331+332 类别),达中型规模。

2.3 矿石特征

矿区矿石呈典型热液矿床的构造与结构,以块状、角砾状、网脉状为主,局部发育脉状-网脉状、浸染状矿石,结构以结晶作用、交代作用及固溶体分离作用形成的结构为主。金属矿物由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、辉银矿、硫砷铜银矿、黄钾铁矾、赤铁矿和菱铁矿、菱锰矿等组成。非金属矿物可见石

英、斜长石、绢云母、伊利石、玉髓、冰长石、方解石、重晶石、萤石等。根据钻孔编录、光薄片鉴定和矿物能谱分析,蚀变矿物组合有石英-玉髓-碧玉、重晶石-萤石、冰长石-伊利石-绢云母,碳酸盐矿物组合(包括铁锰碳酸盐岩和叶片状方解石)及表生硅华。且这些矿物具有空间分带特征,即从浅地表泥化带→中部绢云母-高岭石(伊利石)-玉髓化带→深部伊利石-石英-碳酸盐化带,表征了浅成低温环境下温压变化的一种矿物组合形式(Simmons et al., 2000; Sillitoe et al., 2003; Moncada et al., 2012)。

3 样品采集及岩石学特征

流纹斑岩、凝灰岩、英安岩是斯弄多矿床最主要的含矿岩石,用于本次研究的 4 件流纹斑岩及 5 件凝灰岩样品采自于斯弄多矿区钻孔深部,6 件英安岩样品采自矿区西南部地表(图 3a)。其中,流纹斑岩呈斑状结构,斑晶成分主要为石英、斜长石,石英颗粒呈不规则粒状,含量约为 25%,粒径 1~3 mm 不等,斜长石斑晶呈板柱状,含量约 15%,粒径 1~3 mm 不等,多发生绢云母化或黏土化;长石斑晶和石英斑晶局部被拉长,基质主要为长英质,约占 60%(图 3b)。

凝灰岩呈晶屑凝灰结构,块状构造,主要由火山灰(70%)、石英晶屑(20%)与长石晶屑(10%)及少量次生矿物等组成,石英晶屑呈灰白色、浅灰色,他形粒状,破碎,大小 1~2 mm,个别达 4 mm,含量约占 20%;长石呈灰白色、浅灰绿色,板柱状,半自形-他形晶,晶形大多不完整,后期多发生绢云母化(图 3c)。

英安岩表面呈紫红色,斑状结构,块状构造。斑晶主要为石英、长石、黑云母,石英呈棱锥状,不规则粒状,粒径 0.2~5 cm,约含 20%。长石斑晶呈短柱状、长柱状,斑晶大小 2~9 mm,约含 25%,局部发生溶蚀或黏土化。基质为长英质隐晶、微晶,含黑云母较高而显浅灰色-深灰色,基质含量 35%。其他暗色矿物(角闪石)约占 5%(图 3d)。

4 分析测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

将用于锆石 U-Pb 测年火山岩样品送至实验室进行锆石挑选、制靶。锆石单矿物挑选在河北省廊坊

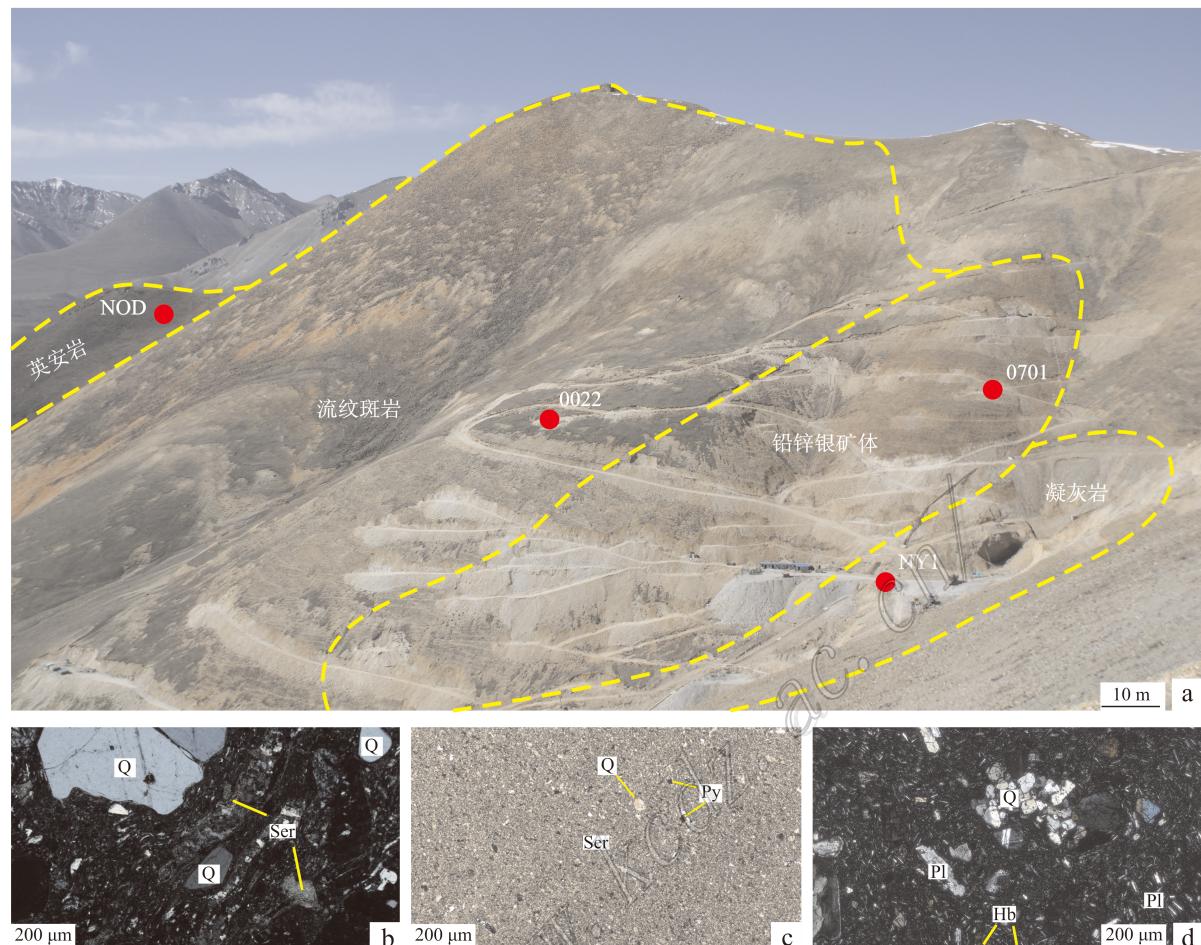


图3 斯弄多矿区岩石分布及特征图

a. 斯弄多矿区主要岩性分布及采样位置图; b. 流纹斑岩镜下照片, 发育流纹构造; c. 凝灰岩镜下照片, 发育绢云母化; d. 英安岩镜下照片
Q—石英; Pl—斜长石; Ser—绢云母; Hb—角闪石; Py—黄铁矿

Fig. 3 The distribution and characteristics of rocks in the Sinongduo deposit

a. The lithologic distribution and sampling location in the Sinongduo deposit; b. The rhyolite porphyry under polarized light with rhyolitic structure; c. The tuff under polarized light with sericitization; d. The dacite under polarized light

Q—Quartz; Pl—Plagioclase; Ser—Sericite; Hb—Hornblende; Py—Pyrite

区域地质调查研究院完成, 每件样品均在双目镜下挑选出晶形较好的锆石, 而后将其粘贴到双面胶上, 用无色透明环氧树脂固定, 待环氧树脂充分固化后, 将锆石靶表面抛光使锆石内部得以充分暴露。然后将锆石靶送至中国地质科学院矿产资源研究所进行锆石阴极发光照相, 所用仪器为 JXA28800 型电子探针, 圈定晶形较好、环带发育的锆石(图4)。最后将挑选好的锆石送至中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室, 所用的仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用的斑束直径为 25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U-Th

含量以锆石 M127 ($w(\text{U})$: 923×10^{-6} ; $w(\text{Th})$: 439×10^{-6} ; Th/U 比值为 0.475; Nasdala et al., 2008) 为外标, 进行校正。数据处理和谐和图绘制采用 ICPMSDataCal 和 Isoplot 3.0 程序(Liu et al., 2010)获得。详细实验测试过程可参见侯可军等(2007)。

本次测年的岩石样品锆石在 CL 图像上多呈长柱状, 少数粒状和不规则状, 粒度在 50~150 μm 之间。多数颗粒自形程度较好, 柱面和锥面比较发育, 振荡环带清晰, 且内部无残留核, 边缘无变质边(图4), 同时具有较高的 Th/U 比值(表1), 表明为岩浆锆石(Belousova et al., 2002; Hoskin et al., 2003), 因而其锆石 U-Pb 年龄能代表岩浆结晶年龄。

表 1 斯弄多矿区火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopes analyzed data of the volcanic rocks from the Sinongduo deposit

样品号及分析点号	$w(B)/10^{-6}$			Th/U			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			同位素比值			年龄/Ma		
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
ZK0022-01	69.8	1061.6	587.3	1.8	0.0526	0.0019	0.0750	0.0034	0.0103	0.0003	309.3	91.7	73.4	3.2	66.3	2.1		
ZK0022-02	118.2	1643.4	732.6	2.2	0.0577	0.0049	0.0856	0.0100	0.0106	0.0003	516.7	202.7	83.4	9.4	68.2	2.1		
ZK0022-04	49.1	680.0	585.6	1.2	0.0531	0.0011	0.0780	0.0029	0.0106	0.0002	344.5	50.0	76.3	2.8	68.1	1.4		
ZK0022-08	267.3	3051.7	4473.1	0.7	0.0592	0.0065	0.0880	0.0095	0.0108	0.0002	576.0	230.5	85.7	8.9	69.3	1.2		
ZK0022-17	70.3	1113.5	468.2	2.4	0.0488	0.0031	0.0688	0.0051	0.0102	0.0002	200.1	150.0	67.5	4.8	65.5	1.3		
ZK0022-20	25.5	349.7	355.7	1.0	0.0515	0.0027	0.0741	0.0040	0.0104	0.0002	261.2	122.2	72.6	3.8	67.0	1.4		
ZK0022-21	39.6	592.1	361.7	1.6	0.0481	0.0008	0.0675	0.0015	0.0102	0.0002	105.6	25.0	66.4	1.5	65.3	1.2		
ZK0022-22	45.7	699.0	416.0	1.7	0.0486	0.0009	0.0669	0.0014	0.0100	0.0002	127.9	30.6	65.8	1.4	64.1	1.1		
ZK0022-23	133.8	2005.8	2103.3	1.0	0.0489	0.0006	0.0696	0.0013	0.0103	0.0002	146.4	-69.4	68.4	1.2	66.2	1.1		
ZK0022-25	56.0	852.2	405.7	2.1	0.0517	0.0021	0.0737	0.0025	0.0104	0.0002	272.3	94.4	72.2	2.3	66.5	1.2		
ZK0701-01	43.0	744.6	489.6	1.5	0.0474	0.0007	0.0644	0.0013	0.0099	0.0002	77.9	33.3	63.4	1.3	63.3	1.2		
ZK0701-03	41.1	649.9	506.1	1.3	0.0549	0.0023	0.0762	0.0031	0.0101	0.0001	405.6	94.4	74.5	2.9	64.7	0.9		
ZK0701-06	55.0	898.7	690.5	1.3	0.0478	0.0006	0.0679	0.0014	0.0103	0.0002	87.1	27.8	66.7	1.4	66.0	1.3		
ZK0701-08	60.6	1092.2	480.3	2.3	0.0498	0.0010	0.0676	0.0013	0.0099	0.0002	187.1	58.3	66.5	1.3	63.2	1.4		
ZK0701-09	45.1	698.7	370.3	1.9	0.0672	0.0043	0.0932	0.0066	0.0100	0.0002	842.6	133.3	90.5	6.1	64.4	1.3		
ZK0701-10	52.5	795.3	579.1	1.4	0.0642	0.0057	0.0887	0.0088	0.0100	0.0002	750.0	185.6	86.3	8.2	63.9	1.4		
ZK0701-11	43.0	744.6	489.6	1.5	0.0478	0.0007	0.0646	0.0016	0.0098	0.0002	100.1	38.9	63.6	1.5	62.9	1.4		
ZK0701-15	36.9	650.7	511.7	1.3	0.0470	0.0006	0.0646	0.0014	0.0100	0.0002	50.1	33.3	63.5	1.3	63.9	1.2		
ZK0701-16	45.3	812.3	519.3	1.6	0.0469	0.0007	0.0644	0.0015	0.0100	0.0002	55.7	38.9	63.4	1.4	63.8	1.2		
ZK0701-17	46.0	833.5	506.3	1.6	0.0474	0.0008	0.0642	0.0016	0.0098	0.0002	77.9	38.9	63.2	1.6	63.0	1.3		
ZK0701-19	40.0	674.4	595.2	1.1	0.0479	0.0007	0.0686	0.0016	0.0104	0.0002	100.1	33.3	67.3	1.5	66.6	1.4		
NY1-01	20.5	304.5	261.4	1.2	0.0472	0.0009	0.0646	0.0017	0.0099	0.0002	61.2	50.0	63.6	1.6	63.6	1.2		
NY1-05	34.8	490.8	435.7	1.1	0.0477	0.0007	0.0675	0.0016	0.0103	0.0002	83.4	33.3	66.3	1.5	65.7	1.1		
NY1-09	23.6	337.7	267.8	1.3	0.0479	0.0007	0.0673	0.0017	0.0102	0.0002	100.1	33.3	66.2	1.6	65.4	1.4		
NY1-12	36.9	537.2	343.8	1.6	0.0473	0.0007	0.0677	0.0015	0.0104	0.0002	61.2	33.3	66.6	1.4	66.7	1.3		
NY1-13	34.5	512.7	448.3	1.1	0.0477	0.0008	0.0661	0.0018	0.0100	0.0002	87.1	38.9	65.0	1.7	64.4	1.2		
NY1-14	88.9	1363.1	395.9	3.4	0.0476	0.0007	0.0679	0.0017	0.0103	0.0002	79.7	33.3	66.7	1.6	66.3	1.4		

续表 1
Continued Table 1

样品号及分析点号	$w(B)/10^{-6}$			同位素比值						$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/Ma						
	Pb	Th	U	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
NY1-17	32.6	458.4	516.4	0.9	0.0483	0.0007	0.0683	0.0024	0.0102	0.0003	122.3	38.9	67.1	2.3	65.7	1.9
NY1-18	43.1	651.1	468.3	1.4	0.0474	0.0007	0.0675	0.0016	0.0103	0.0002	77.9	33.3	66.3	1.6	66.2	1.3
NY1-20	43.6	678.4	657.4	1.0	0.0480	0.0015	0.0654	0.0026	0.0099	0.0002	98.2	77.8	64.4	2.5	63.4	1.1
NY1-21	36.0	515.1	404.7	1.3	0.0473	0.0009	0.0678	0.0025	0.0104	0.0003	61.2	30.6	66.6	2.4	66.6	2.0
NY1-23	69.0	1048.7	661.4	1.6	0.0479	0.0007	0.0676	0.0013	0.0102	0.0002	94.5	33.3	66.4	1.3	65.6	1.2
NY1-24	34.2	545.6	368.8	1.5	0.0476	0.0008	0.0657	0.0019	0.0100	0.0002	79.7	52.8	64.7	1.8	64.2	1.5
NY1-28	79.3	1311.3	731.0	1.8	0.0477	0.0005	0.0664	0.0012	0.0101	0.0002	87.1	22.2	65.3	1.2	64.7	1.2
NY1-29	39.8	629.1	364.3	1.7	0.0499	0.0009	0.0701	0.0019	0.0102	0.0002	190.8	44.4	68.8	1.8	65.2	1.2
NOD-03	38.2	671.7	654.9	1.0	0.0474	0.0007	0.0635	0.0014	0.0097	0.0002	77.9	33.3	62.5	1.3	62.4	1.1
NOD-04	26.8	479.2	358.4	1.3	0.0472	0.0008	0.0642	0.0017	0.0099	0.0002	57.5	25.0	63.2	1.6	63.2	1.2
NOD-05	36.3	643.5	622.2	1.0	0.0473	0.0006	0.0640	0.0013	0.0098	0.0002	64.9	27.8	63.0	1.3	62.9	1.0
NOD-06	68.1	1271.3	951.7	1.3	0.0470	0.0007	0.0625	0.0013	0.0096	0.0002	55.7	33.3	61.5	1.3	61.9	1.1
NOD-08	89.2	1632.2	1116.4	1.5	0.0481	0.0006	0.0652	0.0012	0.0098	0.0002	105.6	41.7	64.1	1.2	63.0	1.2
NOD-09	36.7	664.5	508.4	1.3	0.0472	0.0006	0.0634	0.0015	0.0097	0.0002	61.2	41.7	62.4	1.5	62.5	1.3
NOD-13	82.8	1613.5	636.4	2.5	0.0478	0.0007	0.0641	0.0015	0.0097	0.0002	87.1	33.3	63.1	1.4	62.4	1.0
NOD-14	21.7	404.4	219.4	1.8	0.0475	0.0010	0.0646	0.0018	0.0099	0.0002	76.0	63.9	63.6	1.7	63.3	1.4
NOD-16	56.5	1060.0	508.3	2.1	0.0473	0.0006	0.0647	0.0014	0.0099	0.0002	64.9	27.8	63.6	1.4	63.5	1.1
NOD-17	46.0	887.9	434.8	2.0	0.0473	0.0008	0.0624	0.0013	0.0096	0.0002	77.9	38.9	61.5	1.2	61.3	1.0
NOD-20	42.3	695.7	496.9	1.4	0.0477	0.0006	0.0640	0.0014	0.0097	0.0002	83.4	27.8	63.0	1.4	62.4	1.2
NOD-22	39.1	651.7	469.1	1.4	0.0467	0.0007	0.0620	0.0012	0.0096	0.0002	35.3	52.8	61.1	1.2	61.8	1.1
NOD-23	67.5	1081.9	760.4	1.4	0.0485	0.0007	0.0653	0.0017	0.0098	0.0002	124.2	136.1	64.2	1.7	62.6	1.1
NOD-24	37.5	611.5	416.9	1.5	0.0482	0.0007	0.0643	0.0014	0.0097	0.0002	105.6	33.3	63.3	1.3	62.1	1.2
NOD-25	131.3	2160.1	1338.9	1.6	0.0481	0.0005	0.0637	0.0013	0.0096	0.0002	101.9	41.7	62.7	1.3	61.6	1.0
NOD-31	121.5	1919.6	1412.6	1.4	0.0488	0.0006	0.0652	0.0014	0.0097	0.0002	200.1	27.8	64.1	1.3	62.1	1.0

注: 因测得年齡<1000 Ma, 故采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年齡。

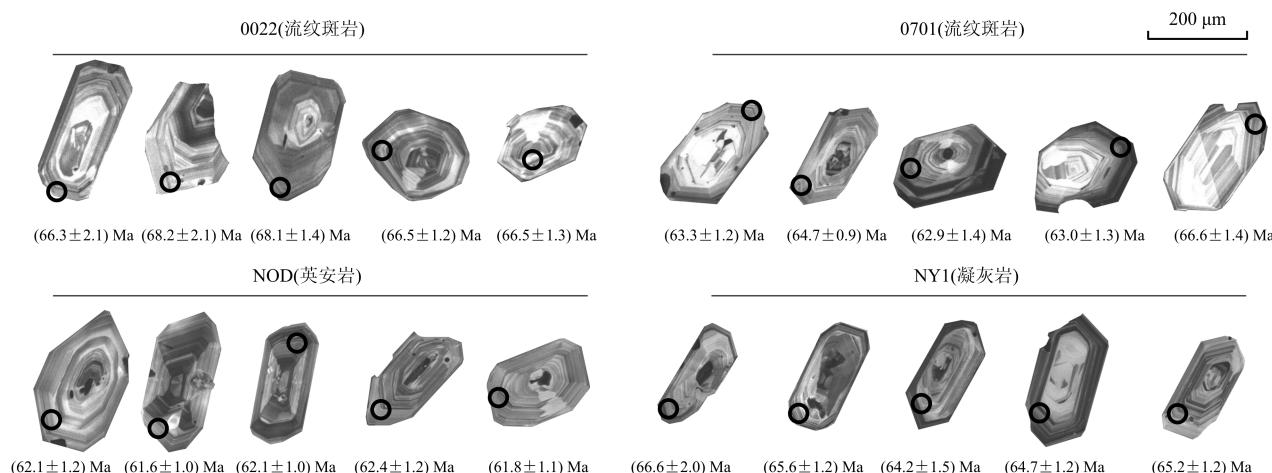


图 4 斯弄多矿区火山岩锆石 CL 图像、测点及 U-Pb 年龄测试结果

Fig. 4 Zircon CL images with analytical spots and U-Pb ages of volcanic rocks from the Sinongduo deposit

对 2 件流纹斑岩(ZK0022、ZK0701)样品中的锆石颗粒分别进行了 U-Pb 年龄测定(表 1)。其中 ZK0022 样品 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 在 $349.7 \times 10^{-6} \sim 3051.7 \times 10^{-6}$ 和 $355.7 \times 10^{-6} \sim 4473.1 \times 10^{-6}$ 之间; Th/U 比值在 $0.6822 \sim 2.3784$ 之间, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $64.1 \sim 69.3$ Ma 之间, 加权平均年龄 (65.0 ± 1.0) Ma(MSWD=0.42)(图 5a); 获得 ZK0701 样品 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 在 $649.9 \times 10^{-6} \sim 1092.2 \times 10^{-6}$ 和 $370.3 \times 10^{-6} \sim 690.5 \times 10^{-6}$ 之间; Th/U 比值在 $1.133 \sim 2.2739$ 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $62.9 \sim 66.6$ Ma 之间, 加权平均年龄 (64.18 ± 0.73) Ma(MSWD=0.83)(图 5b)。

对凝灰岩(NY1)样品 14 个锆石颗粒进行了 U-Pb 年龄测定(表 1)。其中 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 分别在 $304.5 \times 10^{-6} \sim 1363.1 \times 10^{-6}$ 和 $261.4 \times 10^{-6} \sim 731 \times 10^{-6}$ 之间; Th/U 比值变化在 $0.9 \sim 3.4$ 之间, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $63.4 \sim 66.7$ Ma 之间, 加权平均年龄 (65.15 ± 0.69) Ma(MSWD=0.66)(图 5c)。

英安岩(NOD)样品 16 个锆石定年结果见表 2, 获得 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 分别在 $404.4 \times 10^{-6} \sim 2160.1 \times 10^{-6}$ 和 $219.4 \times 10^{-6} \sim 1412.6 \times 10^{-6}$ 之间; Th/U 比值均较高, 变化在 $1 \sim 2.5$ 之间, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $61.3 \sim 63.5$ Ma 之间, 加权平均年龄 (62.4 ± 0.55) Ma(MSWD=0.32)(图 5d), 为晚期喷发覆盖于流纹斑岩之上。

斯弄多矿区 4 件火山岩样品成岩时代相近, 集中在 $62 \sim 65$ Ma 之间, 同时, 结合岩相学、锆石形态及 Th/U 比值, 确认斯弄多矿区不同岩性火山岩属

于同一构造岩浆活动产物, 这些锆石定年结果能代表其成岩时代, 记录了冈底斯成矿带在主碰撞期(65 Ma)存在一次大规模构造岩浆事件。

4.2 主量、微量元素

全岩主量、微量元素分析在西南冶金地质测试所完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱仪测定: 样品经破碎、缩分、称量后用无水四硼酸锂熔融, 以硝酸铵为氧化剂, 加氟化锂和少量溴化锂作助熔剂和脱模剂, 制成玻璃样片。最后在荷兰帕纳科 X 射线分析仪器有限公司 Axios X 射线荧光光谱仪上进行测定, 各元素精度小于 1%。微量元素采用 ICP-MS 测定, 将磨制好的样品用四酸消解, 然后在美国 PE 公司 NexION 300x 等离子体质谱仪测定。各元素精度小于 2%。

斯弄多矿区典中组火山岩地球化学分析数据见表 2。这些岩石样品总体表现出富硅($w(\text{SiO}_2) = 71.81\% \sim 86.24\%$)、钾($w(\text{K}_2\text{O}) = 3.05\% \sim 8.65\%$)、贫镁、钛、磷($w(\text{MgO}) = 0.04\% \sim 0.46\%$; $w(\text{TiO}_2) = 0.05\% \sim 0.24\%$; $w(\text{P}_2\text{O}_5) = 0.02\% \sim 0.05\%$)、过铝质($\text{A/CNK} = 0.81 \sim 2.76$)特征。在火山岩 TAS 图解(图 6a)中(Le Maitre et al., 1989), 14 个岩石样品大都位于流纹岩区域, 这可能与岩石遭遇后期硅化相关; 因而采用 Nb/Y-Zr/Ti 微量元素对岩石进行分类, 在图解(图 6b)中(Winchester et al., 1977), 火山岩样品相对集中, 落入流纹岩+英安岩与碱性流纹岩过渡区, 这与野外定名相一致。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 和 A/NK-A/CNK 图解(图 6c、d)中(Pecceirillo et al., 1976), 大部分样品均属于高

表2 斯弄多矿区火山岩地球化学数据结果表

Table 2 Geochemical data for the volcanic rocks from the Sinongduo deposit

组分	流纹质岩						凝灰岩						英安岩		
	ZK0701	ZK0903	ZK0201	ZK0022	ZK0202	ZK0024	ZK0602-2	ZK0602-1	NOD-1	NOD-2	NOD-3	NOD-4	NOD-5		
SiO ₂	78.60	78.10	76.96	77.72	79.94	86.24	76.83	76.40	71.81	74.00	74.83	74.15	74.06	73.07	
Al ₂ O ₃	10.90	11.15	11.89	11.25	11.16	7.74	9.16	11.91	13.05	13.07	12.99	12.95	13.17	13.28	
Fe ₂ O ₃	0.05	0.07	0.09	0.14	0.79	0.24	0.69	0.81	0.34	1.50	1.20	1.18	1.24	1.59	
FeO	0.63	0.58	0.73	0.58	0.63	0.72	0.99	0.94	2.85	0.49	0.36	0.52	0.63	0.67	
MgO	0.05	0.05	0.07	0.04	0.40	0.14	0.09	0.38	0.46	0.14	0.15	0.14	0.17	0.21	
CaO	0.12	0.10	0.11	0.10	0.09	0.07	1.91	1.27	1.39	0.84	0.58	0.47	0.61	0.93	
Na ₂ O	0.14	0.14	0.14	0.14	0.05	0.04	0.16	0.04	0.09	0.75	0.91	0.88	1.22	1.47	
K ₂ O	8.30	8.38	8.33	8.65	3.50	3.05	7.03	4.20	4.34	6.06	6.02	6.10	5.81	5.73	
TiO ₂	0.05	0.05	0.05	0.05	0.48	0.09	0.07	0.15	0.24	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	
MnO	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.05	0.10	0.30	0.07	0.07	0.06	0.10	0.12	
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	
LOSS	0.49	0.69	1.05	0.75	2.68	1.23	2.49	3.13	4.63	2.30	2.06	2.64	2.28	2.12	
总和	99.37	99.35	99.47	99.46	99.50	99.63	99.49	99.36	99.54	99.43	99.38	99.30	99.51	99.41	
ANK	1.18	1.20	1.29	1.17	2.88	2.30	1.17	2.80	2.68	1.68	1.62	1.61	1.59	1.54	
ACNK	1.16	1.18	1.26	1.15	2.76	2.21	0.81	1.72	1.77	1.40	1.43	1.45	1.40	1.29	
							w(B)·10 ⁻⁶								
Bi	0.11	0.07	0.08	0.09	0.33	0.49	0.09	0.66	0.40	0.18	0.15	0.17	0.13	0.06	
Li	10.21	9.52	8.89	8.68	12.70	16.13	11.80	14.97	15.13	21.79	20.88	20.21	20.48	20.22	
Be	0.81	0.84	1.04	0.78	1.36	0.98	0.54	1.19	1.59	1.58	1.59	1.46	1.58	1.58	
Sc	2.40	2.97	3.30	2.90	3.81	2.91	1.62	3.46	4.94	2.65	2.58	2.55	2.25	2.45	
V	3.44	4.12	3.74	2.35	16.49	8.48	6.70	13.08	26.89	6.99	8.02	5.58	5.41	6.25	
Cr	11.49	15.58	11.60	13.84	8.58	8.32	7.29	7.38	9.58	9.64	8.17	8.51	5.76	6.19	
Co	1.26	0.74	0.47	0.80	0.34	0.67	1.26	1.22	2.99	1.43	0.67	1.39	0.60	2.39	
Ni	3.03	1.90	2.06	1.35	2.00	2.18	1.91	2.27	1.06	0.65	1.68	3.04	0.88	2.04	
Cu	11.15	8.94	10.79	9.81	10.26	7.23	9.96	11.50	10.81	8.62	10.59	7.77	7.47	6.36	
Pb	90.98	61.33	34.23	153.89	63.87	661.68	57.94	21.84	10.86	31.14	29.50	35.61	38.43	41.72	
Zn	25.23	37.02	45.75	48.30	49.68	105.74	57.47	48.72	768.40	50.93	48.01	46.69	50.11	55.88	
Ga	11.52	12.64	15.31	11.98	15.53	11.55	7.63	16.46	19.14	16.59	17.06	17.07	17.08	16.85	
Rb	449.74	440.45	446.84	444.19	295.93	215.17	333.86	337.00	326.18	277.93	278.97	266.70	264.05		
Sr	59.30	67.18	66.37	65.98	25.11	20.11	133.97	38.82	42.94	127.91	118.20	113.98	133.81	166.64	
Y	45.85	47.13	46.28	42.59	31.05	21.41	27.60	28.33	35.59	26.57	27.50	26.89	28.01	29.37	

续表 2
Continued Table 2

组分	流纹斑岩						凝灰岩						英安岩	
	ZK0701	ZK0903	ZK0201	ZK0022	ZK0202	ZK0804	ZK0602-2	ZK0602-1	NOD-1	NOD-2	NOD-3	NOD-4	NOD-5	
Zr	71.08	74.40	80.06	73.15	122.31	103.05	167.19	129.00	165.96	154.66	149.04	148.31	152.25	152.53
Nb	27.62	27.37	30.11	28.19	14.05	12.63	11.93	18.88	11.52	15.72	17.90	17.82	16.92	15.39
Cs	5.66	6.72	9.12	5.62	15.41	4.86	6.49	14.43	14.30	22.39	22.19	20.79	16.50	13.72
Ba	285.08	224.89	214.06	235.53	177.40	164.78	1020.05	200.82	138.04	803.77	873.24	856.95	859.56	925.08
La	23.96	22.63	23.14	21.60	29.18	29.85	31.52	44.84	37.77	70.94	65.14	65.69	62.72	63.41
Ce	51.50	48.88	51.15	78.93	58.37	53.97	60.83	77.01	69.62	139.77	108.61	108.26	105.37	104.69
Pr	6.17	5.91	6.05	5.73	6.61	5.99	7.05	8.34	7.76	12.00	11.44	11.74	11.00	11.28
Nd	24.29	23.33	24.10	22.31	25.04	21.76	25.19	29.93	29.32	41.05	39.04	39.39	37.67	38.53
Sm	6.53	6.28	6.45	5.96	5.05	4.19	5.21	5.44	5.76	6.24	6.16	6.04	5.93	6.10
Eu	0.77	0.56	0.62	0.82	0.92	0.88	0.79	1.20	1.18	1.30	1.43	1.35	1.46	1.56
Gd	7.10	6.83	6.61	6.33	5.04	3.80	5.06	5.51	5.93	5.94	5.75	5.86	5.95	6.13
Tb	1.46	1.44	1.35	1.26	0.98	0.67	0.91	1.00	1.07	0.94	0.95	0.89	0.97	1.04
Dy	8.95	9.04	8.33	7.79	6.17	3.86	5.11	5.67	6.36	5.23	5.21	4.89	5.27	5.95
Ho	1.83	1.88	1.78	1.65	1.32	0.82	1.01	1.15	1.37	1.08	1.09	1.00	1.09	1.21
Er	5.36	5.46	5.17	5.05	3.78	2.54	3.02	3.47	4.04	3.29	3.26	2.92	3.21	3.52
Tm	0.83	0.82	0.79	0.75	0.54	0.39	0.43	0.51	0.61	0.46	0.48	0.42	0.47	0.50
Yb	5.63	5.37	5.40	5.04	3.52	2.64	2.92	3.38	4.01	3.09	3.19	3.00	3.16	3.23
Lu	0.87	0.86	0.88	0.82	0.56	0.44	0.48	0.53	0.66	0.50	0.52	0.47	0.50	0.51
Hf	3.57	3.71	3.70	3.59	4.28	3.92	5.71	4.53	5.36	5.29	5.21	5.23	5.27	5.26
Ta	3.24	3.35	3.80	3.47	1.34	0.98	1.11	1.83	1.10	1.47	1.52	1.48	1.50	1.40
Tl	14.68	15.69	16.90	17.50	6.11	5.57	5.34	6.19	5.61	2.30	2.17	2.17	1.89	
Th	36.91	38.66	42.79	40.19	17.34	20.25	22.06	29.85	31.24	28.65	29.15	27.63	25.51	25.93
U	9.98	15.80	19.90	15.15	2.26	13.60	3.68	3.25	0.88	2.79	3.06	2.81	2.62	2.63
SREE/HREE	145.25	139.28	141.80	164.04	147.08	131.80	149.51	187.98	175.46	291.85	252.26	251.92	244.75	247.67
LREE/HREE	113.22	107.58	111.50	135.34	125.17	116.64	130.58	166.76	151.41	271.31	231.81	232.46	224.13	225.58
L _N /Yb _N	32.03	31.69	30.30	28.70	21.91	15.17	18.93	21.22	24.06	20.54	20.45	19.46	20.62	22.08
ΣREE/HREE	3.53	3.39	3.68	4.72	5.71	7.69	6.90	7.86	6.29	13.21	11.34	11.95	10.87	10.21
δEu	0.34	0.26	0.29	0.41	0.56	0.67	0.47	0.67	0.62	0.65	0.74	0.69	0.75	0.78
δCe	1.04	1.04	1.06	1.74	1.03	0.99	1.00	0.98	1.00	1.17	0.98	0.96	0.98	0.96
L _N /Yb _N	3.05	3.02	3.07	3.07	5.95	8.13	7.74	9.52	6.75	16.47	14.65	15.69	14.22	14.09

注: 比值单位为 1; A/CNK = $x \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3) / x \cdot (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; A/NK = $x \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3) / x \cdot (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; δEu = Eu_N / (Sm_N × Gd_N)^{1/2}; δCe = Ce_N / (La_N × Pr_N)^{1/2}。

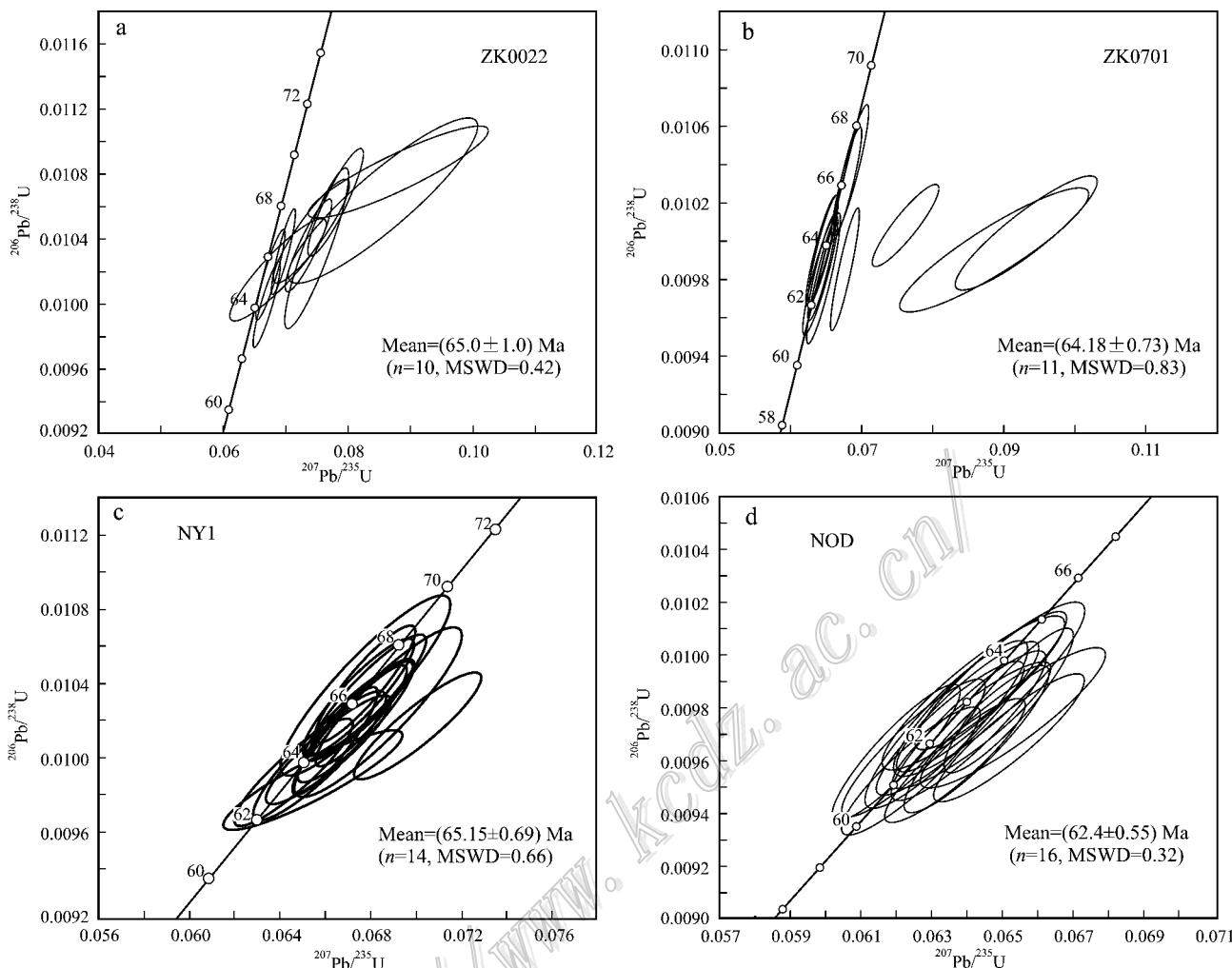


图 5 斯弄多矿区火山岩锆石 U-Pb 谱和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄
a, b. 流纹斑岩; c. 凝灰岩; d. 英安岩

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams and weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of the volcanic rocks from the Sinongduo deposit
a, b. Rhyolitic; c. Tuff; d. Dacite

钾钙碱性-钾玄岩和过铝质岩石系列,与冈底斯地区早期研究数据一致(莫宣学等,2009)。微量元素方面,所有岩石相对富集轻稀土元素($\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE} = 3.39 \sim 13.21$)和大离子亲石元素(LILE:如Rb、K、Sr);亏损重稀土元素($\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}} = 3.02 \sim 16.47$)和高场强元素(HFSE:Nb、Ta、Ti、P);Ce无异常Eu呈明显负异常(图7a、b),显示出典型弧岩浆地球化学特征(Stolz et al., 1996)。

5 讨 论

5.1 成岩成矿时限

冈底斯北缘铅锌成矿带上分布着多个与林子宗群火山岩同时代的矿床,如沙让斑岩型钼矿辉钼矿

Re-Os 和角闪石 Ar-Ar 年龄分别为(51.0 ± 1.0) Ma 和(53.25 ± 0.60) Ma(唐菊兴等,2009;高一鸣等,2010);洞中拉含矿石英脉中 Ar-Ar 年龄为(42.2 ± 1.7) Ma(费光春等,2009);蒙亚啊铅锌矿床矽卡岩型矿体的白云母 Ar-Ar 年龄为(54.6 ± 0.4) Ma(付强等,2015),这些矿床的成岩成矿年龄与林子宗群火山岩的形成时代均相对应(图8)。

就斯弄多矿区而言,本文获得矿区主要赋矿火山岩锆石 U-Pb 年龄在 62~65 Ma 之间,而项目组最近获得斯弄多矿区与矿化相关的 2 件伊利石 Ar-Ar 年龄分别为(63.01 ± 0.74) Ma 和(60.85 ± 0.74) Ma(另文发表),代表了其成矿年龄,说明斯弄多硫化浅成低温热液型矿床形成于林子宗群火山岩所代表的印度-亚洲主碰撞时期(65~60 Ma),与区域

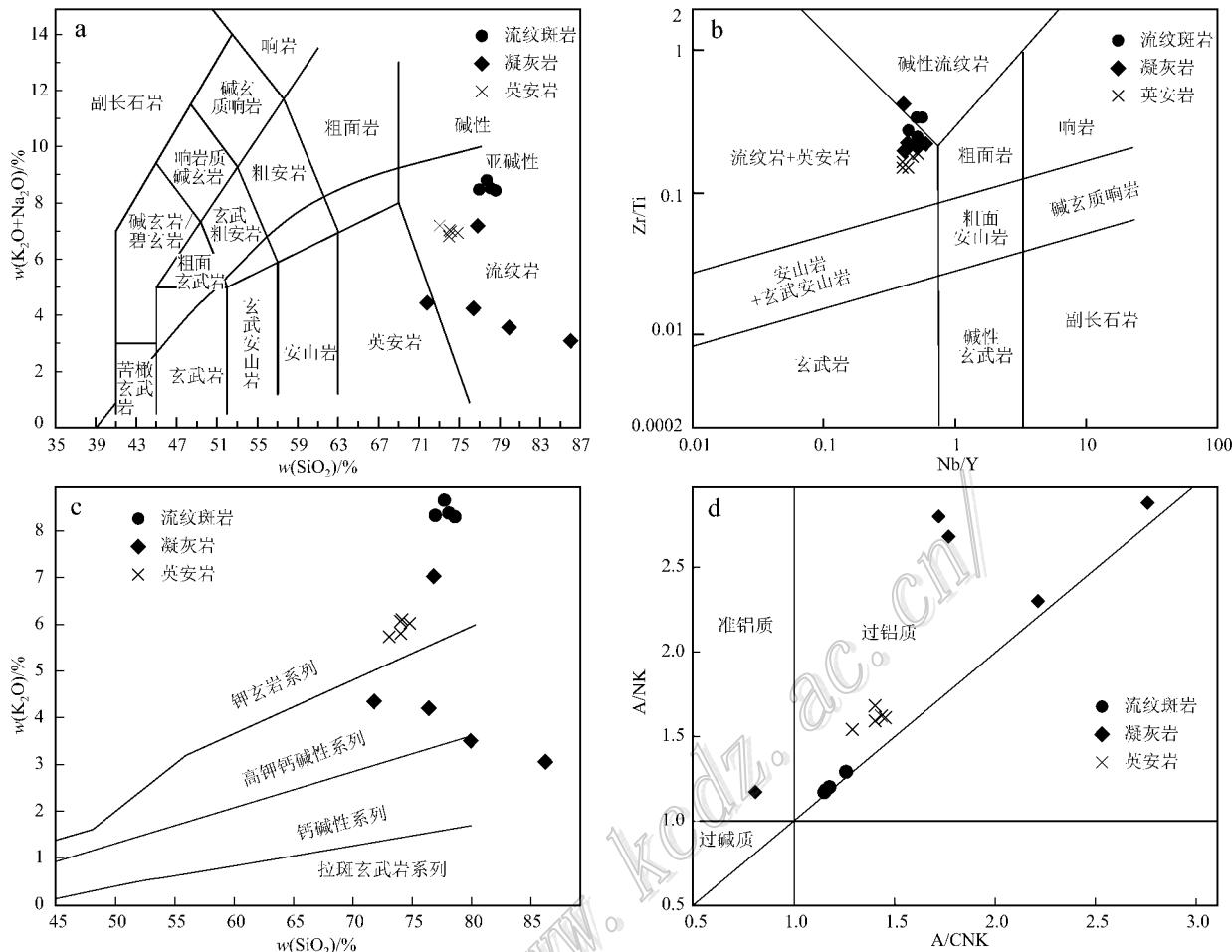


图 6 斯弄多矿区火山岩地球化学图解

- a. 火山岩 TAS 图解(底图据 Le Maitre et al. , 1989); b. Nb/Y-Zr/Ti 岩石类型判别图解(底图据 Winchester et al. , 1977);
 c. SiO₂-K₂O ; d. A/CNK ($\chi(\text{Al}_2\text{O}_3)\chi(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) A/NK ($\chi(\text{Al}_2\text{O}_3/\chi(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}))$ (底图据 Peccerillo et al. , 1976)

Fig. 6 Geochemical diagram of volcanic rocks from the Sinongduo deposit

- a. TAS diagram(after Le Maitre et al. , 1989); b. Rock type discrimination diagram of Nb/Y versus Zr/Ti(after Winchester et al. , 1977);
 c. SiO₂ versus K₂O ; d. A/CNK ($\chi(\text{Al}_2\text{O}_3)\chi(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) versus A/NK ($\chi(\text{Al}_2\text{O}_3/\chi(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}))$ (after Peccerillo et al. , 1976)

成岩成矿时代相一致。

5.2 火山作用与成矿关系

世界范围内浅成低温热液型矿床多产于著名火山岩浆带内,如安第斯成矿带(如马力昆带(La Franja de Maricunga)印地-帕斯瓜带(Franja El Indio-Pascua))。一般认为这种火山岩地区的火山-次火山热液是主要成矿流体,或者与火山作用相伴的地热体系驱动大量流体萃取围岩中成矿物质有关(Hedenquist et al. , 2000 ; Corbett , 2002 ; Sillitoe , 2015)。但不可否认大规模火山作用与成矿之间具有成因关系。

西藏冈底斯地区是中、新生代火山作用最为强烈造山区之一,带内分布着大面积不同时期不同类

型的火山岩系,包括下(中)侏罗统叶巴组、上侏罗统一下白垩统桑日群及古近系林子宗群火山岩,是对新特提斯洋北向俯冲直至印度-亚洲大陆完成对接碰撞等一系列过程的火山-岩浆作用的积极响应(朱弟成等 2005 ;莫宣学等 2003)同时也造就了冈底斯带大规模成矿作用(唐菊兴等,2014b;侯增谦等,2006)构成了与早侏罗世—晚侏罗世岛弧型中酸性火山岩浅成岩建造有关的斑岩型铜、金、银、铅锌矿床成矿亚系列(雄村)和与古新世—始新世中酸性火山-中浅成岩浆建造有关的斑岩-矽卡岩型铅锌、银、钼、钨、铁矿床成矿亚系列(亚贵拉、洞中松多-洞中拉、沙让等)(唐菊兴等,2014b)。而以冈底斯北缘铅锌成矿带为标志的印度-亚洲碰撞期成矿事件与林

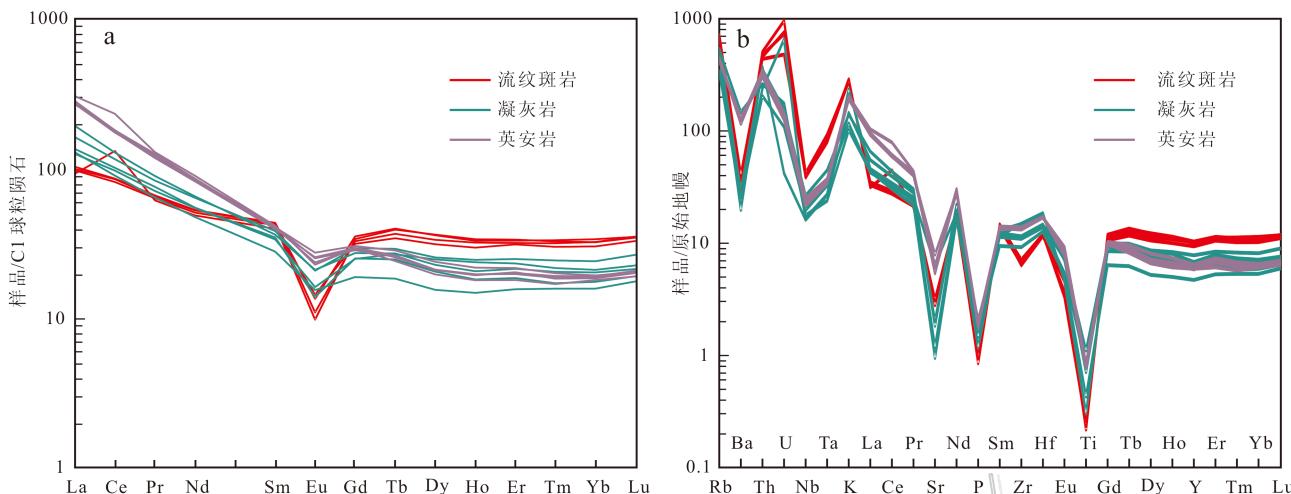


图 7 斯弄多矿区火山岩稀土元素 Cl 球粒陨石标准化配分曲线(a, 标准化值据 Boynton, 1984)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, 标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Cl-chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b, normalization values after Sun et al., 1989) of volcanic rocks from the Sinongduo deposit

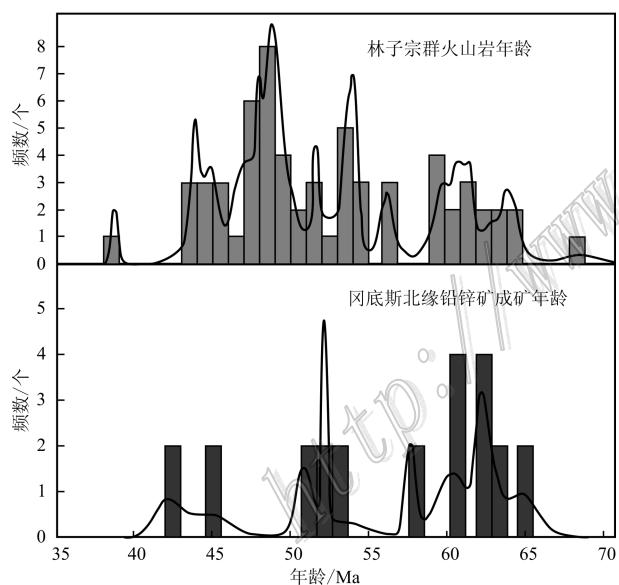


图 8 林子宗群火山岩及冈底斯北缘主要铅锌矿床龄分布直方图(数据据 Wang et al., 2015 及参考文献整理)

Fig. 8 Histogram of compiled age data of the Linzizong volcanic rocks and Pb-Zn deposits in Gangdise
(Data sources are from Wang et al., 2015 and references)

子宗群火山活动在时空上耦合关系则更加突出了大规模火山作用对成矿的贡献(Wang et al., 2015)。

斯弄多银铅锌矿床作为冈底斯成矿带上首例浅成低温热液型矿床, 矿体主要赋存在林子宗群火山岩中, 与该套火山岩存在密切的空间关系。而上文

论述了该矿床成矿时代与林子宗群火山岩形成时代相对应, 集中在 65~60 Ma 之间, 暗示了火山作用过程中伴有相关成矿作用。此外, 李海峰等(待发表)获得斯弄多矿床石英-方铅矿-闪锌矿阶段中石英的均一温度主要集中在 210~270°C, 盐度主要集中在 2.90%~5.26%; 闪锌矿均一温度主要集中在 220~260°C 之间, 盐度主要集中在 1.39%~5.41% 之间, 且流体包裹体中的 δD_{V-SMOW} 呈明显负值 ($-151\text{‰} \sim -177\text{‰}$, 平均 -167.6‰), 与青藏高原南部地热水(热泉)的 δD_{V-SMOW} 范围近乎完全一致(郑淑蕙等, 1982), 表明成矿流体与地热活动具有较为密切的联系, 并具有由大气水下渗循环构成的地热水的属性, 而流体中 $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值远远低于 4, 则被认为是流体大量萃取了这套火山岩物质。更为重要的是, 付燕刚等(待发表)报道了斯弄多矿区与矿化相关的硅质条带的 Si 同位素, 其中 $\delta^{30}\text{Si}$ 多为负异常为 $-1.2\text{‰} \sim +0.3\text{‰}$, 显示出火山与热水沉积的混合特征一致。因而, 斯弄多矿床形成与火山作用过程中相伴的地热活动驱动地下热水萃取林子宗群火山岩中成矿物质有关。

5.3 成矿构造背景

全球范围内低硫化浅成低温热液型矿床多形成于岩浆弧或弧后张裂带环境中(Hedenquist et al., 2000; Corbett, 2002; Richards, 2013), 并与同期火山活动及所相伴的地热体系密切相关(Sillitoe,

2015)。典中组作为林子宗群火山岩第一次喷发旋回的产物,相比与年波组和帕那组火山岩,其地球化学性质多体现出陆缘弧火山岩特征(莫宣学等,2003,2009;Mo et al.,2008)。

本文获得斯弄多矿区主要赋矿围岩(典中组火山岩)属高钾钙碱性-钾玄岩和过铝质岩石系列(图6c,d),相对富集轻稀土元素(Σ LREE/ Σ HREE=3.39~13.21)和大离子亲石元素(LILE:如Rb、K、Sr);亏损重稀土元素(La_N/Yb_N =3.02~16.47)和高场强元素(HFSE:Nb、Ta、Ti、P)(图7a,b),显示出弧火山岩特征(Stolz et al.,1996)。然而,这似乎与前人研究认为典中组火山岩是印度-亚洲碰撞阶段的产物相矛盾(莫宣学等,2003,2009;Mo et al.,2008)。笔者认为这可能与俯冲洋壳滞后于地幔区有关。首先,冈底斯地区典中组火山岩Nd-Sr-Pb同位素体现大洋岩石圈大陆岩石圈地幔混合趋势,相比年波组和帕那组体现出更多幔源成分特征(莫宣学等,2003,2009),说明林子宗群典中组火山岩仍显示出了俯冲体制下地球动力学环境中所具备的岩石特征。其次,岩石相对亏损HREE和HFSE(Nb、Ta、Ti)元素表明源区存在仍存在俯冲板片脱水产生的流体交代作用(Rapp et al.,2003),这种岩浆源岩区应对应在榴辉岩相或角闪榴辉岩相的变质压力条件下,其深度至少可达100 km以下(Manning,2004)。虽然始新世(65~60 Ma)印度与亚洲大陆强

烈碰撞可能引起加厚地壳发生榴辉岩相部分熔融,但这种机制下的岩浆多体现出板内环境下岩石特征,如年波组和帕那组,而本文获得典中组火山岩在Y+Nb-Rb图解(图9a)中均落在火山弧与同碰撞火山岩过渡区内,具有两者共同的特征,说明新特提斯洋在65 Ma时正由俯冲向碰撞发生转化,因而典中组火山岩表现出弧火山岩石特征。另外,在Ta/Yb-Th/Yb图解(图9b)中,斯弄多矿区火山岩样品均位于活动大陆边缘,具有洋-陆俯冲环境下岩石地球化学特征,更加说明了典中组火山岩形成于滞后洋壳与地幔区岩石相互作用的陆缘弧背景下。

6 结 论

(1) 斯弄多铅锌银矿床是赋存于林子宗群火山岩中首例低硫化浅成低温热液型矿床,成岩成矿发生在印度-亚洲主碰撞时期(65~60 Ma),与区域成岩成矿时代相一致。

(2) 流体包裹体及同位素证据显示林子宗群火山岩为矿床形成提供必要的热源与成矿物质,是火山作用过程中相伴的地热活动驱动地下热水萃取火山岩中物质成矿。

(3) 矿区火山岩相对富集轻稀土元素(Σ LREE/ Σ HREE=3.39~13.21)和大离子亲石元素(LILE:如Rb、K、Sr),亏损重稀土元素(La_N/Yb_N =

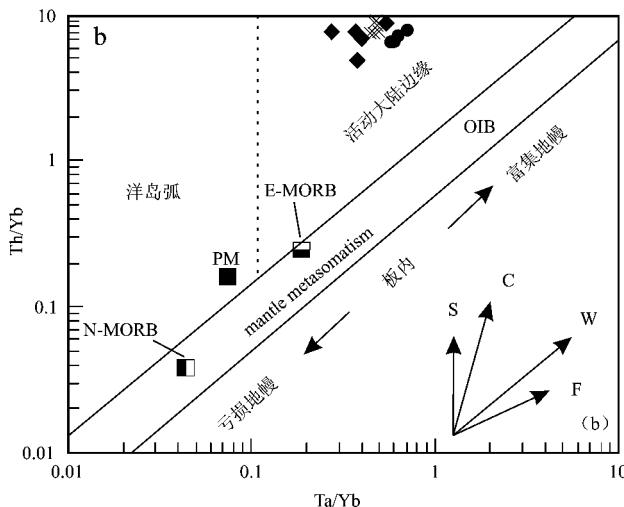
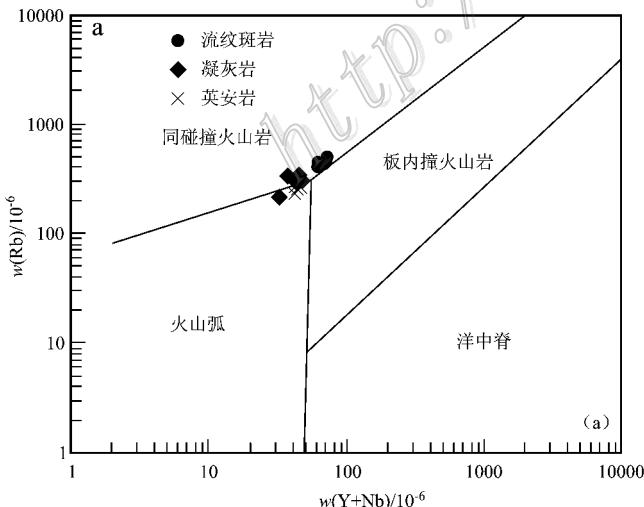


图 9 斯弄多矿区火山岩地球化学图解

a. Rb/(Y+Nb)(底图据 Pearce, 1996), b. Ta/Yb-Th/Yb(底图据 Pearce, 1983)

Fig. 9 Geochemical discrimination diagrams of volcanic rocks from the Sinongduo deposit

a. Rb/(Y+Nb) diagram (base map after Pearce, 1996), b. Ta/Yb-Th/Yb diagram (base map after Pearce, 1983)

3.02~16.47)和高场强元素(HFSE:Nb、Ta、Ti、P),显示出弧火山岩特征,暗示了该区成岩成矿形成于滞后洋壳与地幔区岩石相互作用的陆缘火山弧背景下。

志 谢 本文在成文过程中得到中国地质科学院矿产资源所项目团队的支持和帮助,同时感谢西藏中瑞矿业发展有限责任公司黄若朝董事长、范国兴监事、李祥总经理为笔者的野外地质工作提供资助,感谢中国地质科学院矿产资源研究所侯可军老师在实验过程中的悉心指导及审稿专家为本文提出的宝贵意见!

References

- Audétat A, Pettke T, Heinrich C A and Bodnar R J. 2008. The composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions[J]. *Econ. Geol.*, 103(5):877-908.
- Belousova E , Suzanne G W , O'Reilly S Y and Fisher Y. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 143:602-622.
- Berge B R and Henley R W. 1989. Advances in the understanding of epithermal gold-silver deposits, with special reference to the western United States[J]. *Econ. Geol.*, Monograph 6:405-423.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies: Rare earth element geochemistry[M]. Tucson, Arizona University, 63-114.
- Chen J S , Huang B C , Yi Z Y , Yang L K and Chen L W. 2014. Paleomagnetic And $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological results from the Linzizong group, Linzhou basin, Lhasa terrane, Tibet: Implications to paleogene paleolatitude and onset of the India-Asia collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96:162-177.
- Cooke D R and Deyell C L. 2003. Descriptive names for epithermal deposits: Their implications for inferring fluid chemistry and ore genesis[A]. In: Eliopoulos E A, ed. *Proceedings of the seventh biennial SGA meeting-mineral exploration and Sustainable development*[C]. Rotterdam : Mill-press Science Publishers. 457-460.
- Corbett G. 2002. Epithermal gold for explorationists[J]. *AIG Journal-Applied Geoscientific Practice and Research in Australia*, 1:1-26.
- Ding L , Kapp P , Zhong D L and Deng W M. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. *Journal of Petrology*, 44:1833-1865.
- Ding L , Kapp P and Wan X Q. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet[J]. *Tectonic*, 24:1-18.
- Dong G C , Mo X X , Zhao Z D , Wang L and Zhou S. 2005. A new understanding of the stratigraphic successions of the Linzizong volcanic rocks in the Linzhou Basin, northern Lhasa, Tibet, China[J]. *Geology Bulletin of China*, 24(6):549-557(in Chinese with English abstract).
- Einaudi M T , Hedenquist J W and Inan E E. 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal system: Transitions from porphyry to epithermal environments[J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10:28-314.
- Fang X , Tang J X , Song Y , Yang C , Ding S , Wang Y Y , Wang Q , Sun X G , Li Y B , Wei L J , Zhang Z , Yang H H , Gao K and Tang P. 2015. Formation epoch of the south Tiegelong superlarge epithermal Cu(Au-Ag) deposit in Tibet and its geological implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2):168-176(in Chinese with English abstract).
- Fei G C , Wen C Q , Zhou X , Wu P Y and Wen Q. 2009. Laser microprobe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of quartz from Dongzhongla lead-zinc deposit in Tibet and its significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 30(3):38-43(in Chinese with English abstract).
- Fu Q , Huang K X , Zheng Y C , Yang Z S and Duan L F. 2015. Ar-Ar age of muscovite from skarn orebody of the Mengya 'a lead-zinc deposit in Tibet and its geodynamic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3):569-582(in Chinese with English abstract).
- Gao Y M , Chen Y C and Tang J X. 2010. SHRIMP zircon U-Pb and amphibole $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of amphibole diorite from Sharang porphyry molybdenum deposit in Gongbo 'gyamda County, Tibet, and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 29(2):323-331(in Chinese with English abstract).
- Heald P , Foley N K and Hayba D O. 1987. Comparative anatomy of volcanic hosted epithermal deposits-acid sulphate and adularia-sericite type[J]. *Econ. Geol.*, 80:1-26.
- Hedenquist J W. 1987. Volcanic-related hydrothermal systems in the circum-Pacific basin and their potential for mineralization[J]. *Mining Geology*, 37(3):347-364.
- Hedenquist J W , Arribas R A and Gonzalez U E. 2000. Exploration for epithermal gold deposit[J]. *Reviews in Econ. Geol.*, 13:245-277.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[A]. In: Manchar J M and Hoskin P W O, eds. *Zircon: Reviews of mineralogy and geochemistry*: Chantilly, VA[C]. Mineralogical Society of America, 53:27-62.
- Hou K J , Li Y H , Zhou T J , Qu X M , Shi Y R and Xie G Q. 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2595-2604(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q , Gao Y F , Qu X M , Rui Z Y and Mo X X. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during Mid-Miocene East-West extension

- sion in southern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 220: 139-155.
- Hou Z Q , Yang Z S , Xu W Y , Mo X X , Ding L , Gao Y F , Dong F L , Li G M , Qu X M , Li G M , Zhao Z D , Jiang S H , Meng X J , Li Z Q , Qin K Z and Yang Z M. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt : I . Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. Mineral Deposits , 25(4): 337-358(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q , Yang Z M , Qu X M , Meng X J , Li Z Q , Beaudoin G , Rui Z Y , Gao Y F and Zaw K. 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan orogeny[J]. Ore Geology Reviews , 36 : 25-31.
- 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).
- Ji X H , Meng X J , Yang Z S , Zhang Q , Tian S H , Li Z Q , Liu Y C and Yu Y S. 2014. The Ar-Ar geochronology of sericite from the cryptoexplosive breccia type Pb-Zn deposit in Narusongduo , Tibet and its geological significance[J]. Geology And Exploration , 50 (2): 281-290(in Chinese with English abstract).
- Kesler S E and Wilkinson B H. 2009. Resources of gold in Phanerozoic epithermal deposits[J]. Econ. Geol. , 104 : 623-633.
- Lang X H , Tang J X , Chen Y C , Li Z J , Huang Y , Wang C H , Chen Y , Zhang L and Zhou Y. 2012. Neo-Tethys mineralization on the southern margin of the Gangdise metallogenic belt , Tibet , China : Evidence from Re-Os ages of Xiongcunore body No. I [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences , 37(3): 515-525(in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W , Bateman P , Dudek A , Keller J , Lameyre M J , Lebas M J , Sabine P A , Schmid R , Sorensen H , Streckeisen A , Wooley A R and Zanettin B. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. London : Blackwell. 28.
- Lee H Y , Chuang S L , Lo C H , Ji J Q , Lee T Y , Qian Q and Zhang Q. 2009. Eocene Neotethyan slab breakoff in southern Tibet inferred from the Linzizong[J]. Tectonophysics , 477 : 20-35.
- Li G M , Zhang X N , Qin K Z , Sun X G , Zhao J X , Yin X B , Li J X and Yuan H S. 2015. The telescoped porphyry-high sulfidation epithermal Cu(-Au) mineralization of Rongna deposit in Duolong ore cluster at the southern margin of Qiangtang terrane , Central Tibet : Integrated evidence from geology[J]. Acta Petrologica Sinica , 31(8): 2307-2324(in Chinese with English abstract).
- Lindgren W. 1922. A suggestion for a terminology of certain mineral deposit[J]. Econ. Geol. , 17 : 292-294.
- Lindgren W. 1933. Mineral deposit[M]. 4th Ed. New York : McGraw Hill. 1-930.
- Liu B , Dong S L , Li G M and Zhang H. 2010. The geochemical characteristics and age of igneous from the Sinongduo Pb-Zn deposit and its geological significance , Tibet[J]. Mineral Deposits , 29(S1): 472-473(in Chinese).
- Liu Y F , Yang Z M , Xie Y L , Zhou P , Du D H , Li Y X , Li Q Y , Qu H C and Xu B. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age and geochemistry of intrusive rocks from Nongruri gold deposit , Gangdese , Tibet[J]. Mineral Deposits , 31(4): 727-744(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S , Gao S , Hu Z C , Gao C G , Zong K Q and Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North Chinaorogen : U-Pb dating , Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology , 51(1-2): 537-571.
- Manning C E. 2004. The chemistry of subduction-zone fluids[J]. Earth and Planetary Science Letters , 223(1-2): 1-16.
- Mo X X , Zhao Z D , Deng J F , Dong G C , Zhou S , Guo T Y , Zhang S Q and Wang L L. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences , Beijing), 10(3): 135-148(in Chinese with English abstract).
- Mo X X , Niu Y L , Dong G C , Zhao Z D , Hou Z Q , Zhou S and Ke S. 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 : 49-67.
- Mo X X , Zhao Z D , Yu X H , Dong G C , Li Y G , Zhou S , Liao Z L and Zhu D C. 2009. Cenozoic collisional-postcollisional igneous rocks in the Tibetan plateau[M]. Beijing : Geological Publishing House. 1-396(in Chinese with English abstract).
- Moncada D , Mutchler S , Nieto A , Reynolds T J , Rimstidt J D and Bodnar R J. 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato , Mexico : Application to exploration[J]. Journal of Geochemical Exploration , 114 : 20-35.
- Nasdala L , Hofmeister W , Norberg N , Mattinson J M , Corfu F , Dörr W , Kamo S L , Kennedy A K , Kronz A , Reiners P W , Frei D , Kosler J , Wan Y S , Götz J , Häger T , Kröner A and Valley J W. 2008. Zircon M257-A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. Geostandards and Geoanalytical Research , 32(3): 247-265.
- Pearce J A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[A]. In : Hawkesworth C J and Norry M J , eds. Continental basalts and mantle xenoliths : Nantwich , Shiva[M]. 230-249.
- Pearce J A. 1996. Source and settings of granitic rocks[J]. Episodes , 19(4): 120-125.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area , northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology , 58 : 63-81.

- Rapp R P , Shimizu N and Norman M D. 2003. Growth of early continental crust by Partial melting of eclogite[J]. *Nature*, 425(6958): 605-609.
- Richards J P. 2013. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes[J]. *Nature Geoscience*, 6(11): 911-916.
- Sidorov A A , Volkov A V and Savva N E. 2015. Volcanism and epithermal deposits[J]. *Journal of Volcanology and Seismology*, 9(6): 349-357.
- Sillitoe R H and Hedenquist J W. 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore fluid compositions, and epithermal precious metal deposits[J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10 : 315-343.
- Sillitoe R H. 2015. Epithermal paleosurfaces[J]. *Mineralium Deposita*, 50(7): 767-793.
- Simmons S F , Arehart G , Simpson M P and Mauk J L . 2000. Origin of massive calcite veins in the golden cross low-sulfidation, epithermal au-ag deposit, New Zealand[J]. *Econ. Geol.*, 95(1): 99-112.
- Simmons S F , White N C and John D A. 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits[J]. *Econ. Geol.* 100th Anniversary Volume, 485-522.
- Stolz A J , Jochum K P , Spettel B and Hofmann AW. 1996. Fluid and melt-related enrichment in the subarc mantle : evidence from Nb/Ta variations in island arc basalts[J]. *Geology*, 24 : 587-590.
- Sun S S and McDonough W. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society*, 42 : 313-345.
- Tang J X , Chen Y C , Wang D H , Wang C H , Xu Y P , Qu W J , Huang W and Huang Y. 2009. Re-Os dating of molybdenite from the Sharang porphyry molybdenum deposit in Gongbogymada County, Tibet and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 698-704(in Chinese with English abstract).
- Tang J X , Dur J , Liu H F , Lang X H , Zhang J S , Zheng W B and Ying L J. 2012. Minerogenetic series of ore deposits in the east part of the Gangdese metallogenic belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- Tang J X , Sun X G , Ding S , Wang Q , Wang Y Y , Yang C , Chen H Q , Li Y B , Li Y B , Wei L J , Zhang Z , Song J L , Yang H H , Du-an J L , Gao K , Fang X and Tan J Y. 2014a. Discovery of the epithermal deposit of Cu(Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Tang J X , Wang L Q , Zheng W B and Zhong K H. 2014b. Ore deposits metallogenetic regularity and prospecting in the eastern section of the Gangdese metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2545-2555(in Chinese with English abstract).
- Tang J X , Lang X H , Xie F W , Gao Y M , Li Z J , Huang Y , Ding F , Yang H H , Zhang L , Wang Q and Zhou Y . 2015. Geological characteristics and genesis of the Jurassic No. I porphyry Cu-Au deposit in the Xiongcun district, Gangdese porphyry copper belt, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 70 : 438-456.
- Tang J X , Ding S , Meng Z , Hu G Y , Xie F W , Li Z , Yuan M , Yang Z Y , Chen G R , Li Y H and Yang H Y. 2016. The first discovery of the low sulfidation epithermal deposit in Linzizong volcanics, Tibet : A case study of the Sinongduo Ag polymetallic deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(4): 461-470(in Chinese with English abstract).
- Taylor B E. 2007. Epithermal gold deposits[A]. In : Goodfellow W D , ed. *Mineral deposits of Canada : A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*[M]. Geological Association of Canada , Mineral Deposits Division , Special Publication. 5 : 113-139.
- Ulrich S S , Hennie T and Thomas O. 2010. Volcanic-hosted massive sulfide deposits in the Murchison greenstone belt, South Africa[J]. *Mineralium Deposita*, 45(2) : 113-145.
- Wang D H. 1996. The volcanic rock and mineralization in Ashele Cu mine, Xinjiang[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 31(2): 163-169(in Chinese with English abstract).
- Wang L Q , Tang J X , Deng J , Kang H R , Lin X , Cheng W B , Li Z and Zhang Z. 2015. The Longmala and Mengya 'a skarn Pb-Zn deposits, Gangdese region, Tibet : evidence from U-Pb and Re-Os geochronology for formation during early India-Asia collision[J]. *International Geology Review*, 57(14): 1825-1842.
- Wang Y C , Zhou Y , Liu Y H , Li R B , Wei F H , Gao J M , Liu C J and Wu S K. 2012. Characteristics of Sinongduo Large-size overprinted and reworked Pb-Zn deposit in Xietongmen County of Tibet and the ore-searching directions[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 27(4): 440-449(in Chinese with English abstract).
- White N C and Hedenquist J W. 1990. Epithermal environment and styles of mineralization : Variations and their causes and guidelines for exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 36 (3): 445-474.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20(77): 325-343.
- Yang C , Tang J X , Wang Y Y , Yang H H , Wang Q , Sun X G , Feng J , Yin X B , Ding S , Fang X , Zhang Z and Li Y B. 2014. Fluid and geological characteristics researches of southern Tiegelong epithermal porphyry Cu-Au deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1287-1305(in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q , Feng C Y , Li D X , She H Q and Dong Y J. 2005. The evolution of ore-forming fluids in the porphyry-epithermal metallogenetic system of zijinshan area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(2): 127-136(in Chinese with English abstract).

Zheng S H , Zhang Z F , Ni B L , Hou F G and Shen M Z . 1982. Hydrogen and oxygen isotopic studies of thermal waters in Xizang[J]. Journey of Peking university , 1 : 99-106(in Chinese with English abstract).

Zheng Y C , Fu Q , Hou Z Q , Yang Z S , Huang K X , Wu C D and Sun Q Z . 2015. Metallogeny of the northeastern Gangdese Pb-Zn-Ag-Fe-Mo-W polymetallic belt in the Lhasa terrane , southern Tibet[J]. Ore Geology Reviews , 70 : 510-532.

Zhu D C , Pan G T , Mo X X , Liao Z L , Jiang X S , Wang L Q and Zhao Z D . 2005. Geochemistry and petrogenesis of the Sangxiu Formation basalts in the central segment of Tethyan Himalaya[J]. Geochimica , 34(1) : 7-19(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

董国臣 , 莫宣学 , 赵志丹 , 王亮 , 周肃 . 2005. 拉萨北部林周盆地林子宗火山岩层序新议[J]. 地质通报 , 24(6) : 549-557.

方向 , 唐菊兴 , 宋扬 , 杨超 , 丁帅 , 王艺云 , 王勤 , 孙兴国 , 李玉彬 , 卫鲁杰 , 张志 , 杨欢欢 , 高轲 , 唐攀 . 2015. 西藏铁格隆南超大型浅成低温热液铜(金、银)矿床的形成时代及其地质意义[J]. 地球学报 , 33(2) : 168-176.

费光春 , 温春齐 , 周雄 , 吴鹏宇 , 温泉 . 2009. 西藏洞中拉铅锌矿床石英激光探针⁴⁰Ar-³⁹Ar定年及地质意义[J]. 矿物岩石 , 30(3) : 38-43.

付强 , 黄克贤 , 郑远川 , 杨竹森 , 段连峰 . 2015. 西藏蒙亚啊铅锌矿床矽卡岩型矿体白云母 Ar-Ar 年代学研究及其地球动力学意义[J]. 地质学报 , 89(3) : 569-582.

高一鸣 陈毓川 , 唐菊兴 . 2010. 西藏沙让斑岩钼矿床锆石 SHRIMP 定年和角闪石 Ar-Ar 定年及其地质意义[J]. 矿床地质 , 29(2) : 323-331.

侯可军 , 李延河 , 邹天人 , 曲晓明 , 石玉若 , 谢桂青 . 2007. La-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报 , 23(10) : 2595-2604.

侯增谦 , 杨竹森 , 徐文艺 , 莫宣学 , 丁林 , 高永丰 , 董方浏 , 李光明 , 曲晓明 , 李光明 , 赵志丹 , 江思宏 , 孟祥金 , 李振清 , 秦克章 , 杨志明 . 2006. 青藏高原碰撞造山带:I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质 , 25(4) : 337-358.

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.

纪现华 , 孟祥金 , 杨竹森 , 张乾 , 田世洪 , 李振清 , 刘英超 , 于玉帅 . 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.

郎兴海 , 唐菊兴 , 陈毓川 , 李志军 , 黄勇 , 王成辉 , 陈渊 , 张丽 , 周云 . 2012. 西藏冈底斯成矿带南缘新特提斯洋俯冲期成矿作用:来自雄村矿集区 I 号矿体的 Re-Os 同位素年龄证据[J]. 地球科学-中国地质大学学报 , 37(3) : 515-525.

李光明 , 张夏楠 , 秦克章 , 孙兴国 , 赵俊兴 , 印贤波 , 李金祥 , 袁华山 . 2015. 羌塘南缘多龙矿集区荣那斑岩-高硫型浅成低温热液 Cu(Au) 套合成矿:综合地质、热液蚀变及金属矿物组合证据[J]. 岩石学报 , 31(8) : 2307-2324.

刘波 , 董随亮 , 李光明 , 张晖 . 2010. 西藏斯弄多铅锌矿岩体地球化学特征及年龄地质意义[J]. 矿床地质 , 29(增刊) : 472-473.

刘云飞 , 杨志明 , 谢玉玲 , 周平 , 杜等虎 , 李应树 , 李秋耘 , 曲焕春 , 许博 . 2012. 西藏弄如日金矿床侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 矿床地质 , 31(4) : 727-744.

莫宣学 , 赵志丹 , 邓晋福 , 董国臣 , 周肃 , 郭铁鹰 , 张双全 , 王亮亮 . 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 , 董国臣 , 李佑国 , 周肃 , 廖忠礼 , 朱弟成 . 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.

唐菊兴 , 陈毓川 , 王登红 , 王成辉 , 许远平 , 屈文俊 , 黄卫 , 黄勇 . 2009. 西藏工布江达县沙让斑岩钼矿床辉钼矿铼-锇同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报 , 83(5) : 698-704.

唐菊兴 , 多吉 , 刘鸿飞 , 郎兴海 , 张金树 , 郑文宝 , 应立娟 . 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) : 393-410.

唐菊兴 , 孙兴国 , 丁帅 , 王勤 , 王艺云 , 杨超 , 陈红旗 , 李彦波 , 李玉彬 , 卫鲁杰 , 张志 , 宋俊龙 , 杨欢欢 , 段吉林 , 高轲 , 方向 , 谭江云 . 2014a. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. 地球学报 , 33(1) : 6-10.

唐菊兴 , 王立强 , 郑文宝 , 钟康惠 . 2014b. 冈底斯成矿带东段矿床成矿规律及找矿预测[J]. 地质学报 , 88(12) : 2545-2555.

唐菊兴 , 丁帅 , 孟展 , 胡古月 , 谢富伟 , 李壮 , 袁梅 , 杨宗耀 , 陈国荣 , 李于海 , 杨洪钰 . 2016. 西藏林子宗群火山岩中首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床[J]. 地球学报 , 37(4) : 461-470.

王登红 . 1996. 新疆阿舍勒铜矿区火山岩与成矿[J]. 地质科学 , 31(2) : 163-169.

王银川 , 周勇 , 刘玉红 , 李瑞保 , 魏方辉 , 高景民 , 刘成军 , 吴树宽 . 2012. 西藏谢通门县斯弄多大型叠加改造型铅锌矿床特征及找矿方向[J]. 地质找矿论丛 , 27(4) : 440-449.

杨超 , 唐菊兴 , 王艺云 , 杨欢欢 , 王勤 , 孙兴国 , 冯军 , 印贤波 , 丁帅 , 方向 , 张志 , 李玉彬 . 2014. 西藏铁格隆南浅成低温热液型-斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究[J]. 矿床地质 , 33(6) : 1287-1305.

张德全 , 丰成友 , 李大新 , 余宏全 , 董英君 . 2005. 紫金山地区斑岩-浅成热液成矿系统的成矿流体演化[J]. 地球学报 , 26(2) : 127-136.

郑淑蕙 , 张知非 , 倪葆龄 , 侯发高 , 沈敏子 . 1982. 西藏地热水的氢氧稳定同位素研究[J]. 北京大学学报(自然科学版) , 1 : 99-106.

朱弟成 , 潘桂棠 , 莫宣学 , 廖忠礼 , 江新胜 , 王立全 , 赵志丹 . 2005. 特提斯喜马拉雅带中段桑秀组玄武岩的地球化学和岩石成因[J]. 地球化学 , 34(1) : 7-19.