

doi: 10.12029/gc20201104002

高轲, 宋扬, 刘治博, 杨欢欢, 林彬, 李发桥. 2024. 西藏拿若铜(金)矿床隐爆角砾岩对成矿时代的约束[J]. 中国地质, 51(2): 385–398.

Gao Ke, Song Yang, Liu Zhibo, Yang Huanhuan, Lin Bin, Li Faqiao. 2024. Constraints on metallogenic age from cryptoexplosive breccia in Naruo Cu(Au) deposit, Xizang[J]. Geology in China, 51(2): 385–398(in Chinese with English abstract).

西藏拿若铜(金)矿床隐爆角砾岩对成矿时代的约束

高轲¹, 宋扬², 刘治博², 杨欢欢², 林彬², 李发桥³

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:【研究目的】拿若矿床是多龙矿集区 4 个超大型矿床之一, 由斑岩型和角砾岩型矿体组成。斑岩型矿体研究资料丰富, 角砾岩矿体研究程度较浅, 隐爆作用与成矿作用的时代关系还缺乏详细的研究。隐爆角砾岩整体呈筒状产出, 角砾成分为长石石英砂岩和花岗闪长斑岩, 胶结物成分主要为岩粉。【研究方法】本次研究旨在通过年代学证据探讨隐爆角砾岩形成与成矿的时代关系。【研究结果】锆石矿物学显示花岗闪长斑岩(NR1)锆石边部发生溶蚀边, 震荡环带减弱, 未彻底重结晶; 胶结物(NR2)锆石结晶较好, 震荡环带清晰。两种样品的锆石微量元素特征显示, 两期岩浆源区均为陆壳环境; 稀土配分曲线均较陡, 富集重稀土, 亏损轻稀土; 具有显著的正 Ce 异常和负 Eu 异常。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 花岗闪长斑岩的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 117.3~125.4 Ma, 加权平均年龄为(120.8±1.4)Ma, 成岩时间在 120.8 Ma 左右; 胶结物的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 113.5~119.9 Ma, 加权平均年龄为(116.4±1.2)Ma, 隐爆时代在 116.4 Ma 左右。【结论】拿若矿床共发生两期成岩作用, 分别为~120 Ma 和~117 Ma。拿若矿床成矿作用发生在 116~117 Ma, 而非~120 Ma。根据年代学证据认为, 成矿作用和隐爆作用受同期岩浆作用控制, 隐爆作用在前而成矿作用在后, 岩浆演化在时间和空间上存在差异。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 隐爆时代; 成岩成矿时代; 隐爆角砾岩; 拿若; 西藏; 矿产勘查工程
中图分类号: P618.41; P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0385-14

Constraints on metallogenic age from cryptoexplosive breccia in Naruo Cu(Au) deposit, Xizang

GAO Ke¹, SONG Yang², LIU Zhibo², YANG Huanhuan², LIN Bin², LI Faqiao³

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The Naruo deposit is one of four super large deposits in Duolong ore district. It is composed of porphyry and breccia type orebodies. Previous researches have focused on porphyry orebody, while the research on cryptoexplosive breccia ore bodies is relatively weak. The temporal relationship between cryptic explosion processes and mineralization remains inadequately studied. The cryptoexplosive breccia is generally produced in a cylindrical shape, with the breccia composed of feldspar quartz sandstone and

收稿日期: 2020-11-04; 改回日期: 2021-02-05

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20242518、DD20230031、DD20190167、DD20190147), 国家自然科学基金项目(41702080、91955208)以及国家重点研发计划深地资源开采项目(2018YFC0604103)联合资助。

作者简介: 高轲, 男, 1987 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事矿床学、成矿规律研究; E-mail: gaokely@163.com。

granodiorite porphyry, and the cement mainly composed of rock powder. **[Methods]** This study is to explore the age relationship between the formation and mineralization of cryptoexplosive breccia through chronological evidence. **[Results]** Zircon mineralogy shows that the zircon edge of the granite diorite porphyry (NR1) is characterized by dissolution, weak oscillation zone, and incomplete recrystallization. Zircons in cement (NR1) is characterized by fine crystalline form, clear oscillatory zone. The trace element characteristics of these two types of zircons show that the source of two stages of magma is continental crust. The rare earth distribution curves are relatively steep, with enrichment of heavy rare earth elements, loss of light rare earth elements, significant positive Ce and negative Eu anomalies. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results show that the zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of granite diorite porphyry is between 117.3 Ma and 125.4 Ma, with weighted average age of (120.8 ± 1.4) Ma, indicating the diagenetic age of 120.8 Ma. The zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of cement is between 113.5 Ma and 119.9 Ma, with weighted average age of (116.4 ± 1.2) Ma, indicating the cryptoexplosive age of 116.4 Ma. **[Conclusions]** The results in this study show two stages of diagenesis in Naruo deposit, ~120 Ma and ~117 Ma, respectively. Mineralization occurred between 116 Ma and 117 Ma, rather than ~120 Ma. The chronological data shows that the mineralization and cryptoexplosion are controlled by contemporaneous magmatism, with cryptoexplosion occurring first and mineralization occurring later, and there are differences in the time and space of magma evolution.

Key words: zircon U-Pb dating; cryptoexplosive time; diagenesis and mineralization; cryptoexplosive breccias; Naruo; Xizang; mineral exploration engineering

About the first author: GAO Ke, male, born in 1987, senior engineer, mainly engaged in the study of mineral deposits and metallogenic regularities; E-mail: gaokely@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20242518, No.DD20230031, No.DD20190167, No.DD20190147), National Natural Science Foundation of China (No.41702080, No.91955208), National Key Research and Development Program (No.2018YFC0604103).

1 引 言

班公湖—怒江成矿带(简称班怒成矿带)是西藏重要的铜多金属成矿带之一,于燕山期经历了复杂的构造演化、显著的岩浆活动;同时伴随大规模的成矿作用,是研究青藏高原动力学演化及多金属成矿的重要天然实验室,也是中国重要的储备资源基地。该成矿带发育铜、金、(铬)铁矿床超百处,其中尕尔穷—嘎拉勒矿集区和多龙矿集区是较典型的超大型铜金矿集区。近年来,班怒成矿带内各大矿床和含矿岩体都已陆续报道了比较精确的成岩成矿年龄和地球化学数据(曲晓明等, 2012; 吕丽娜, 2012; 陈华安等, 2013; Li et al., 2013; 符家骏等, 2014; 丁帅, 2014; 祝向平等, 2015a, b; 张志, 2015; Yang et al., 2022),为研究区域矿床成因和成矿动力学背景提供了良好的基础。多龙矿集区地处班怒成矿带西段,是这一成矿带上最重要的矿集区,而拿若矿床是多龙矿集区的重要组成部分。该矿床隶属于西藏阿里地区改则县物玛乡,位于县城北西方向约 120 km。于 2013 年开展商业性勘查后,拿

若已探明铜资源量突破 243 万 t,伴生金突破 76 t,达到超大型矿床规模。拿若矿床是典型的斑岩—隐爆角砾岩成矿系统,以斑岩型矿体为主,矿区西南一较大的隐爆角砾岩筒种也存在较厚大的铜矿体。

隐爆角砾岩型矿床是一种重要的矿床类型,对寻找角砾岩型金矿有很好的指示意义(谢广东, 1993; Sillitoe and Hedenquist, 2003; 王胜权和刘学武, 2009),多数该类矿床的形成与岩浆作用有直接关系(Johnston and Lowell, 1961; Sillitoe et al., 1975, 1985; 章增凤, 1991; 唐菊兴, 1995; Ross et al., 2002; Yang and Bodnar, 2004)。拿若矿床斑岩成矿系统研究程度较高,主要涉及含矿斑岩年代学、地球化学和矿床勘查模型等方面(吕丽娜, 2012; 方向等, 2014; 丁帅, 2014; 祝向平等, 2015a)。此外,笔者对隐爆角砾岩做过少量研究工作,探讨了隐爆角砾岩流体特征并仅以快讯形式报道了相关年龄数据(高轲等, 2016, 2017),并未系统研究探讨隐爆角砾岩的形成机制、岩浆热液来源及成岩与成矿的关系。本文重新采集隐爆角砾岩的相关样品并进行了测试,通过拿若矿床隐爆角砾岩中花岗闪长斑岩和胶

结物中的锆石 U-Pb 年代学研究, 结合前人资料探讨该隐爆角砾岩的成岩成矿时代, 并进一步讨论成矿与隐爆作用之间的关系。

2 区域地质

多龙矿集区大地构造位置位于南羌塘—保山板块南缘、班公湖—怒江缝合带的北侧(图 1)。矿集区地层有上白垩统阿布山组(K_{2a})、下白垩统美日切错组(K_{1m})、中—下侏罗统色哇组(J_{1-2s})、下侏罗统曲色组(J_{1q})、上三叠统日干配错组(T_{3r})。阿布山组主要分布于矿集区西北侧, 岩性以浅紫红色砂砾岩和砂岩为主, 其次为粉泥岩、砂岩和火山岩; 美日切错组分布于矿集区北侧和西南侧, 沿 F10 断层展布, 岩性主要为紫红色安山岩、安山玢岩; 色哇组分布于矿集区北侧, 岩性为灰色—灰白色长石石英砂岩、岩屑砂岩及深灰色泥质板岩; 曲色组分布最广, 岩性为浅灰绿色—灰褐色厚层状长石石英砂岩, 受岩体侵入的影响地层存在穹窿构造; 日干配错组分布于东北侧, 岩性为厚层状灰岩。

区内岩浆活动强烈, 以中酸性的花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩和中性的安山玢岩为主。其他矿(化)点包括色那、拿顿、地堡那木岗、尕尔勤等, 含矿岩体也为中酸性侵入岩。矿集区内构造显著, 主要为近东西向、北东向和北西向断层, 控矿断层主要为北东向断层, 尤其是北东向 F10 断层和东西向 F2 断层, 分别控制了矿集区内的铁格隆南和多不杂两个超大型矿床成矿及矿体的保存。矿集区内现已发现 4 个超大型矿床: 铁格隆南斑岩—浅成低温热液铜(金、银)矿、多不杂斑岩铜(金)矿、波龙斑岩铜(金)矿和拿若斑岩—隐爆角砾岩铜(金)矿, 含矿岩体均主要为花岗闪长斑岩。

3 矿床地质与隐爆角砾岩筒特征

3.1 矿床地质

拿若铜(金)矿床位于多龙矿集区的北侧, 其附近存在铁格隆南、色那等多个矿床。矿区出露地层为中—下侏罗统色哇组(图 2)。岩浆岩主要为花岗闪长斑岩, 呈岩株和岩瘤状侵入产出。矿区构造较

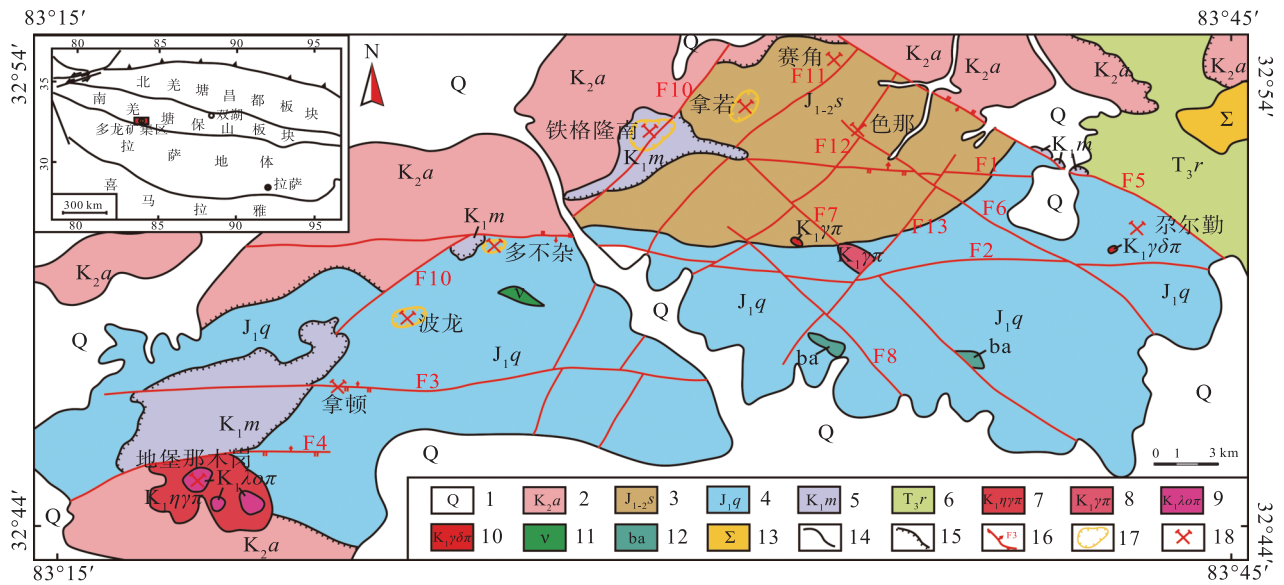


图 1 多龙矿集区地质图(据杨超等, 2014; Xu et al., 2015)

1—第四系; 2—上白垩统阿布山组; 3—中—下侏罗统色哇组; 4—下侏罗统曲色组; 5—下白垩统美日切错组; 6—上三叠统日干配错组; 7—早白垩世二长花岗斑岩; 8—早白垩世花岗斑岩; 9—早白垩世石英闪长斑岩; 10—早白垩世花岗闪长斑岩; 11—辉长岩; 12—玄武岩; 13—橄榄岩; 14—整合接触界线; 15—不整合接触界线; 16—断层及编号; 17—经工程控制矿体范围; 18—矿床位置

Fig.1 Geological map of the Duolong ore concentration area (modified from Yang Chao et al., 2014; Xu et al., 2015)

1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous Abushan Formation; 3—Lower-Middle Jurassic Sewa Formation; 4—Lower Jurassic Quse Formation; 5—Lower Cretaceous Meiriqiecuo Formation; 6—Upper Riganpeicuo Formation; 7—Early Cretaceous monzonitic granite porphyry; 8—Early Cretaceous granite porphyry; 9—Early Cretaceous quartz diorite porphyry; 10—Early Cretaceous granodiorite porphyry; 11—Gabbro; 12—Basalt; 13—Peridotite; 14—Conformity boundary; 15—Unconformity boundary; 16—Fault and number; 17—Controlled ore body scope; 18—Position of deposits

弱,在南东侧存在一条北东向平移断层。矿区围岩蚀变强烈,地表可见绢云母化、青磐岩化和硅化蚀变。

矿床已探明铜资源量达 243 万 t, 矿石量超过 63770 万 t, 平均品位 0.38%; 金以伴生状态产出, 资源量达 76 t, 平均品位 0.19 g/t(高轲等, 2016)。矿体主要存在于成矿岩体花岗闪长斑岩和围岩长石石英砂岩中(丁帅, 2014), 部分位于隐爆角砾岩中。高品位厚大矿体主要位于 0 号勘探线的西侧, 由成矿岩体侵位形成, 向四周品位逐渐降低、厚度逐渐减薄。矿体在平面上呈长条状分布, 其中长轴长度

达 1.4 km, 短轴长度可达 0.6 km。所有钻孔中仅 ZK0001 钻孔的顶板和底板皆为花岗闪长斑岩, 其他钻孔的顶底板岩性大多为砂岩, 部分钻孔中存在角砾岩底板。

矿石类型有浸染状、致密块状、角砾状等类型。矿石结构有结晶结构、交代结构、碎裂结构、填隙结构和固溶体分离结构等。矿石构造多为脉状、浸染状、角砾状构造, 偶见网脉状构造等。

矿体中金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿, 少量辉钼矿、赤铁矿、磁铁矿、蓝辉铜矿、铜蓝等, 以原生矿物为主。其中, 黄铁矿在金属矿物中占比最

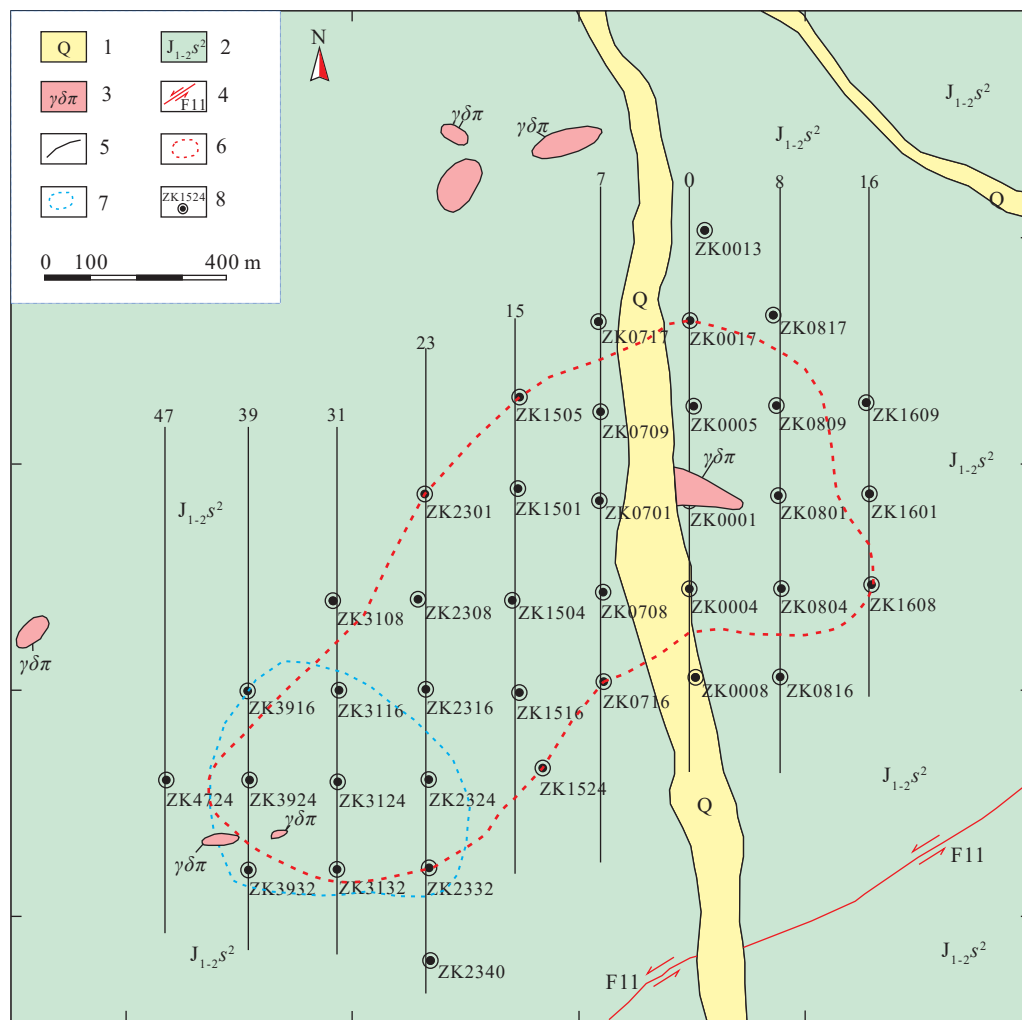


图 2 拿若铜(金)矿区地质图(据高轲等, 2016, 2023)

1—第四系; 2—中—下侏罗统色哇组二段; 3—花岗闪长斑岩; 4—断层及编号; 5—地质界线; 6—矿体范围; 7—隐爆角砾岩范围; 8—钻孔位置及编号

Fig.2 Geological map of the Naruo Cu(Au) deposit (after Gao Ke et al., 2016, 2023)

1—Quaternary; 2—The second member Lower–Middle Jurassic Sewa Formation; 3—Granodiorite porphyry; 4—Fault and number; 5—Geological boundary; 6—Ore body scope; 7—Cryptoexplosive breccia scope; 8—Position and number of drilling

高, 其次为黄铜矿。非金属矿物主要为长石、石英、方解石和绢云母, 可见少量钾长石、绿泥石、绿帘石、石膏、黑云母等。

矿区内围岩蚀变强烈, 地表显示蚀变较单一, 主要为角岩化和青磐岩化; 岩心显示还存在钾硅酸盐化、绢云母化等蚀变, 矿区岩心详细的地质编录及镜下鉴定, 识别出 4 种主要蚀变类型, 以 00 号勘探线的花岗闪长斑岩为中心向外分别为: 钾硅酸盐化、绢云母化、青磐岩化和角岩化。

3.2 隐爆角砾岩筒特征

隐爆角砾岩筒范围由 5 排勘探线控制, 工程已控制的隐爆角砾岩范围平面投影呈近椭圆状分布, 面积约 0.24 km², 最大直径范围 500 m 左右(图 2)。钻孔 ZK3124 隐爆角砾岩厚度最大, 达 424 m(图 2, 图 3)。ZK3916 孔隐爆角砾岩厚度仅有几米厚, 判断基本已达西北侧边部(图 4)。隐爆角砾岩筒的范围仅南西侧未圈闭, 但由于南西侧两个钻孔 ZK3932 和 ZK3132 见矿效果不佳, 因此未布置边部钻探工程。在发现隐爆角砾岩的 7 个钻孔中有 2 个钻孔未打穿隐爆角砾岩, 因此, 对角砾岩筒的真实形态暂时无法确定, 但初步推测应该呈筒状向下延伸。现有勘查资料显示, ZK3924 孔矿体厚度最大, 铜矿

体厚度达 340 m(图 4), 角砾岩厚度仅次于 ZK3124 孔, 证实隐爆角砾岩筒中心位于这两个钻孔之间。

隐爆角砾岩的角砾成分相对单一, 主要为长石石英砂岩和花岗闪长斑岩。砂岩角砾总体含量占绝大多数, 在 55% 以上; 岩体角砾含量较少, 约占 20%, 其中靠近角砾岩筒中心含量相对增多。角砾大小主要在 3~25 mm, 少量角砾直径可达 10 cm 以上(图 5a)。靠近角砾岩体中心磨圆较好, 可以达到次圆—次棱角状, 部分可见交代环边或流化边(图 5b); 向边部逐渐变差, 棱角明显, 形态不规则, 局部有很好的拼接性(图 5c)。

胶结物成分主要为岩屑, 还可见少量方解石、硅质、铁质胶结物质(图 5d)。结构为细粒和斑状结构, 块状构造。非金属矿物主要有石英、长石和绢云母, 见少量黑云母、方解石、角闪石、绿泥石、绿帘石和碳酸盐; 金属矿物有黄铜矿、黄铁矿、蓝辉铜矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿和赤铁矿, 其中黄铜矿

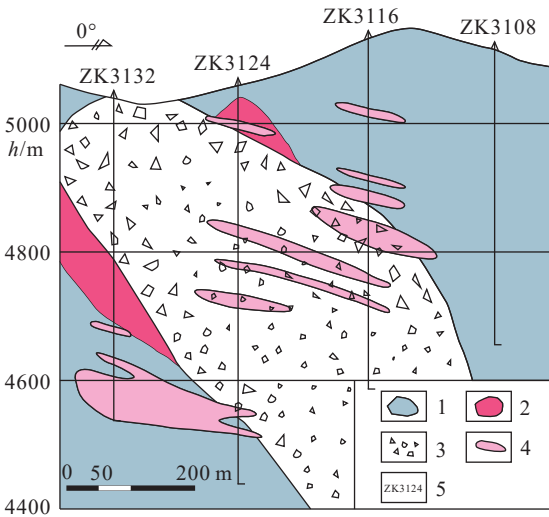


图 3 拿若矿床 31 号勘探线剖面图(据高轲等, 2016)
1—长石石英砂岩; 2—花岗闪长斑岩; 3—隐爆角砾岩; 4—矿体;
5—钻孔编号

Fig.3 31[#] exploration line map of the Naruo deposit (after Gao Ke et al., 2016)

1—Feldspar quartz sandstone; 2—Granodiorite porphyry; 3—Cryptoexplosive breccias; 4—Ore body; 5—Drills number

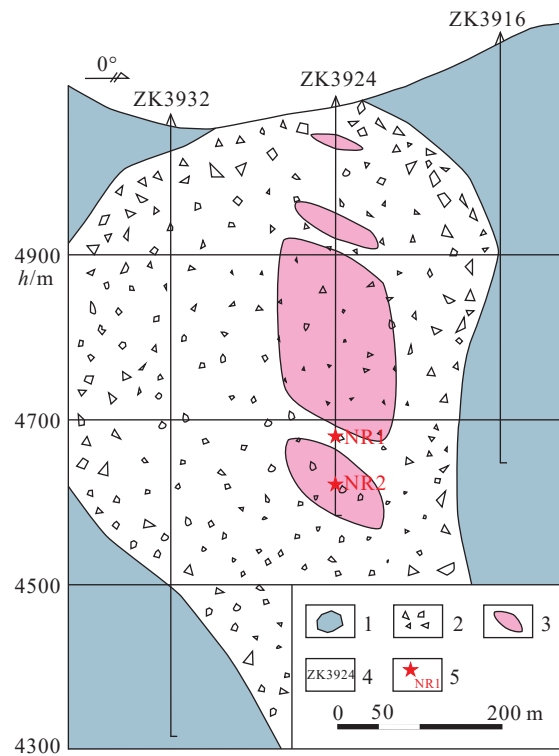


图 4 拿若矿床 39 号勘探线剖面图(据高轲等, 2016)
1—长石石英砂岩; 2—隐爆角砾岩; 3—矿体; 4—钻孔编号; 5—采样
位置及编号

Fig.4 39[#] exploration line map of the Naruo deposit (after Gao Ke et al., 2016)

1—Feldspar quartz sandstone; 2—Cryptoexplosive breccias; 3—Ore body; 4—Drills number; 5—Position and number of samples

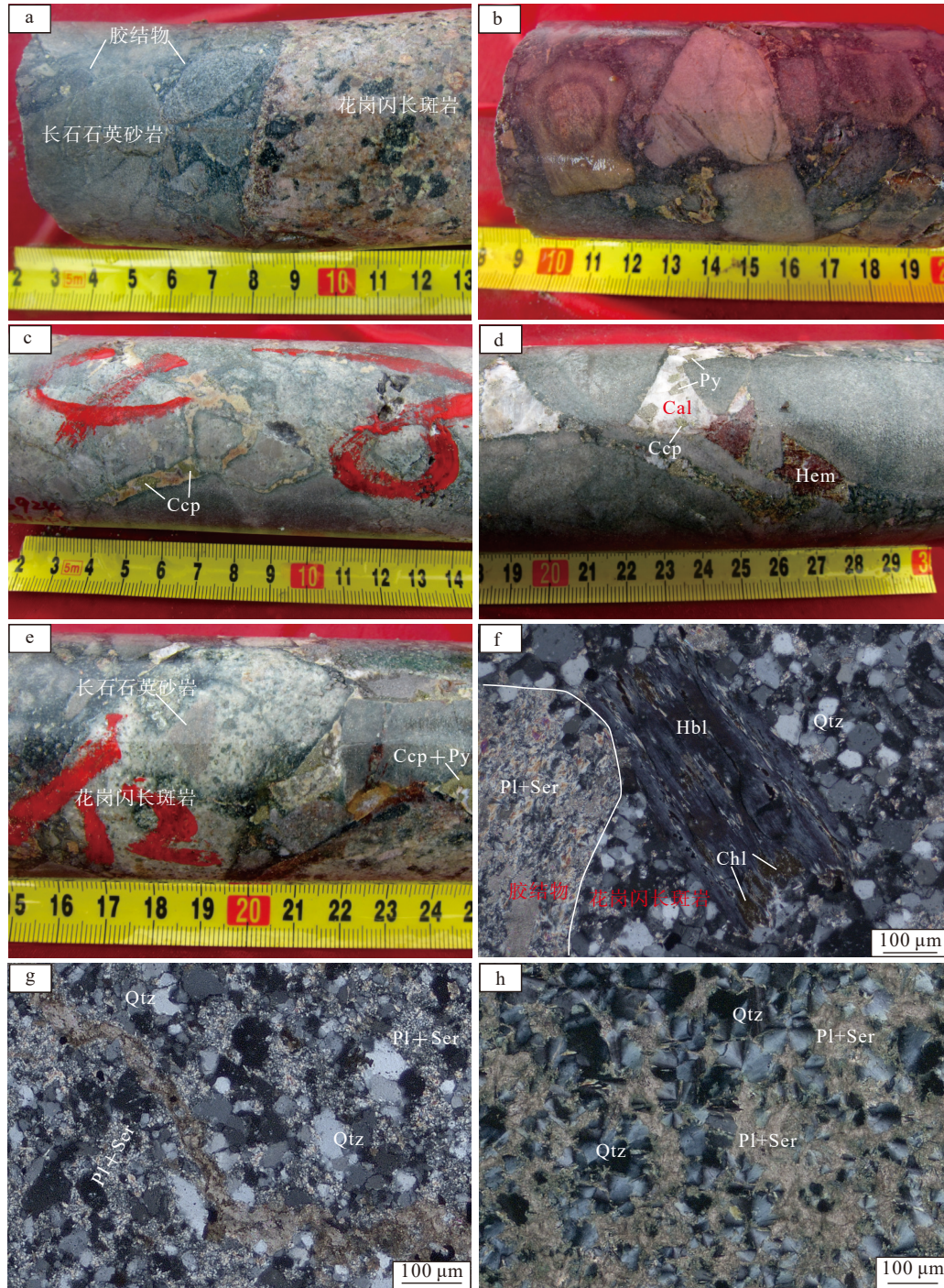


图5 拿若矿床隐爆角砾岩手标本及显微照片

a—不同砾径的角砾；b—发生交代环边的角砾；c—可拼接的角砾间充填黄铜矿；d—角砾间充填黄铁矿、黄铜矿、方解石和赤铁矿；e—岩体角砾中包裹砂岩角砾；f—岩体中绿泥石交代角闪石斑晶；g, h—胶结物中石英、斜长石和角闪石结晶差；Qtz—石英；Ser—绢云母；Pl—斜长石；Ccp—黄铜矿；Py—黄铁矿；Cal—方解石；Hbl—角闪石；Chl—绿泥石

Fig.5 Photos of the hand specimens and micrographs of cryptoexplosive breccias in the Naruo deposit
a—The rubble of different diameter; b—Replacement rim rubble; c—Rubble with split joint filling chalcopyrite; d—Rubble filling pyrite, chalcopyrite, calcite and hematite; e—Sandstone rubble encapsulated by granite porphyry rubble; f—Hornblende is replaced by chlorite; g, h—Poor crystallization of quartz, plagioclase and hornblende is in the cement; Qtz—Quartz; Ser—Sericitite; Pl—Plagioclase; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Cal—Calcite; Hbl—Hornblende; Chl—Chlorite

呈团块状产出(图 5e、f、g、h)。胶结物部分整体发育青磐岩化。

隐爆角砾岩矿石类型主要为角砾状矿石, 少量浸染状矿石。矿石结构有交代结构、固溶体分离结构等。矿石构造多为团块状、浸染状、角砾状构造等。整个角砾岩筒中, 铜矿物主要为黄铜矿, 偶尔可见少量蓝辉铜矿、斑铜矿; 黄铜矿主要呈颗粒或团块状产于角砾间隙和呈浸染状产出在角砾中。角砾岩型铜矿体的品位在各钻孔之间差别较小, 仅个别钻孔上部可见一层较薄的高品位矿体达 0.86%, 其他位置铜品位主要在 0.3% 左右。隐爆角砾岩筒的金矿化程度较弱, 金主要以伴生的形式产于部分铜矿体中, 仅 ZK3924 和 ZK3116 中金品位达伴生品位, 伴生品位介于 0.1~0.18 g/t。

4 样品与分析方法

4.1 样品采集

此次实验两件样品均采自 ZK3924 钻孔, 其中 NR1 为角砾状花岗闪长斑岩, 采样深度为 398.75 m; NR2 为隐爆角砾岩间胶结物, 采样深度为 462 m(采样位置见图 4)。所采样品均未风化, 发生弱青磐岩化。岩石呈灰色—灰绿色, 角砾状构造。花岗闪长斑岩角砾具明显斑状结构, 矿物成分主要为斜长石(55%~60%)、石英(25%~30%)、绢云母(2%~3%)、角闪石(4%~6%), 少量黑云母等暗色矿物。部分角闪石和黑云母发生绿泥石化, 仍保留原矿物外形。胶结物间的岩粉为岩浆热液结晶物质, 颗粒细小, 斑晶不明显, 仍可见斜长石、石英和绢云母等矿物。

4.2 分析方法

本次为研究拿若矿床隐爆角砾岩筒形成时代, 对先成的花岗闪长斑岩和后成的胶结物进行锆石 U-Pb 测年。由于两个样品的特殊性, 在送样之前对样品进行了筛选。花岗闪长斑岩角砾较完整, 挑选直径较大的整体角砾, 少有其他岩性混入, 易于采样。胶结物样品则挑选角砾成分较少的样品, 经过初步粉碎, 剔除角砾成分, 尽可能多只保留胶结物, 完成样品送样前处理。

锆石挑选工作在河北省地质测绘院岩矿实验测试中心, 岩石经过人工粉碎后按照重力和磁选方法分选出锆石, 再通过双目镜挑纯。锆石制靶、照相与测年工作在北京核工业地质研究院实验中心

完成, 将挑纯的锆石置于环氧树脂表面, 经抛光后依次进行透射、反射及阴极发光(CL)图像拍摄, 明确锆石内部形态及结构特征, 便于挑选测年点位。锆石 U-Pb 测年使用仪器为 PE NexION 300 等离子体质谱仪和 Geolas 193 准分子固体激光器, 测试温度为 22°C, 湿度为 28%, 检测方法和依据为《激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 U-Pb 同位素定年方法》(HDB/T 3002-2016)。

5 分析结果

5.1 锆石矿物学

本次研究工作所采样品的锆石有所差异, 样号 NR1 中锆石具有部分变质锆石的特征。变质锆石是指在变质作用过程中形成的锆石, 其中一种成因是热液蚀变作用对锆石的淋滤和溶蚀(Vavra et al., 1999; Rizvanova et al., 2000; Liati et al., 2002; Corfu, 2003; Moller et al., 2003)。该样品受到后期热液作用影响, 早期岩浆锆石被后期岩浆热液改造, 锆石边部发生溶蚀边, 未彻底重结晶; 阴极发光(CL)图像显示震荡环带减弱, 部分呈扇形(图 6)。锆石基本呈半自形柱状和长条状, 长度为 50~230 μm , 宽度为 50~150 μm , 长宽比值介于 1~2.5。

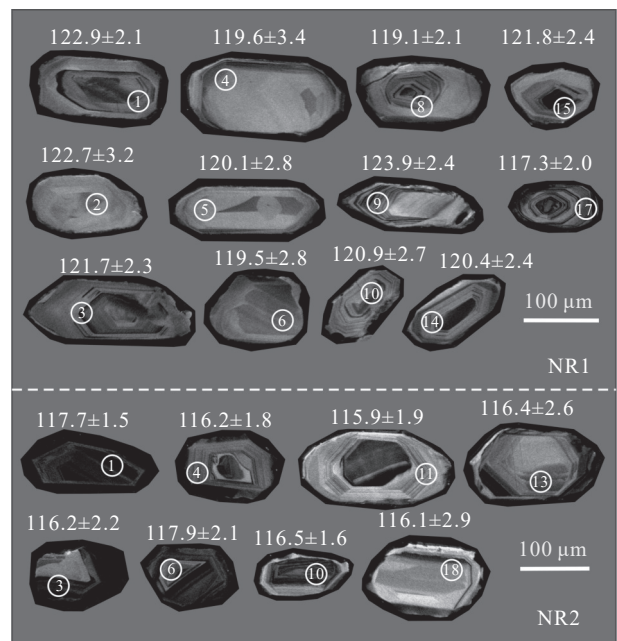


图 6 拿若隐爆角砾岩锆石阴极发光(CL)图像及年龄(Ma)
Fig.6 CL images and ages (unit: Ma) of zircons of
cryptoexplosive breccias in the Naruo deposit

岩浆锆石通常为自形到半自形,一般具有较明显的震荡环带(Hoskin and Schaltegger, 2003; 吴元保等, 2004)。岩浆岩中环带结构清楚、未受变质重结晶作用影响锆石区域的年龄代表了相应岩石的形成年龄(Pidgeon et al., 1992; Hoskin and Black, 2000)。NR2 中锆石阴极发光(CL)图像显示环带清晰,具有典型的岩浆锆石特征(图 6)。锆石形态多为自形短柱状,部分呈长条状,长度 70~270 μm ,宽度 60~160 μm ,长宽比值介于 1.2~2.5。

5.2 锆石微量元素特征

两类锆石的稀土元素分析结果见表 1。花岗闪长斑岩(NR1)锆石测点稀土元素含量为 864.0×10^{-6} ~ 3499.1×10^{-6} ,平均值为 1831.3×10^{-6} ; LREE/HREE 值

为 0.02~0.04; δCe 值为 16.0~719.8,均值为 185.1,具有较强的正异常; δEu 值为 0.28~0.49,均值为 0.38,呈明显的负 Eu 异常。胶结物(NR2)锆石测点稀土元素含量为 1042.8×10^{-6} ~ 3962.5×10^{-6} ,平均值为 1937.6×10^{-6} ; LREE/HREE 值为 0.03~0.06; δCe 值为 62.7~921.9,均值为 174.5; δEu 值为 0.27~0.62,均值为 0.44,呈明显的负 Eu 异常。两件锆石的稀土元素配分曲线趋势相似,曲线左倾且较陡,稀土含量从 Pr 至 Lu 迅速增加;表现为重稀土富集,轻稀土亏损的特征(图 7)。

5.3 锆石 U-Pb 测年结果

本次实验对两件样品进行锆石定年获得 35 个有效测点,测试结果见表 1 和表 2,谐和图见图 8。

表 1 拿若隐爆角砾岩锆石稀土元素分析结果 (10^{-6})

Table 1 Rare earth elements in zircons of cryptoexplosive breccias in the Naruo deposit (10^{-6})

测点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	δEu	δCe
样号NR1																		
1-1	0.024	51.84	0.143	1.48	4.18	2.21	33.6	13.04	158.4	75.3	378.4	102.6	1130	291.2	2242.4	0.03	0.40	105.5
1-2	0.024	24.85	0.064	1.1	2.61	1.15	18.4	6.1	82.4	36.6	186.8	50.5	554	142.4	1107.0	0.03	0.37	104.8
1-3	0.01	34.05	0.016	0.41	2.03	1.05	19.8	8.68	119.7	56.1	292.4	81.8	884	225.8	1725.9	0.02	0.33	528.3
1-4	0.01	24.86	0.033	0.38	3.00	1.13	12.3	5.84	75.1	34.3	172.8	47.6	517	133.3	1027.7	0.03	0.49	208.6
1-5	0.025	35.57	0.228	3.44	9.67	2.62	48.4	18.16	227.3	96.8	442.4	109.5	1064	249.0	2307.1	0.02	0.30	46.4
1-6	0.01	32.62	0.103	2.07	4.33	2.04	29.4	10.83	142.2	65.1	310.6	84.8	874	215.1	1773.2	0.02	0.41	94.6
1-7	0.267	28.97	0.224	2.19	3.59	1.28	19.8	7.99	90.9	42.1	213.9	60.3	643	166.4	1280.9	0.03	0.37	27.2
1-8	0.024	42.69	0.08	2.01	5.92	1.61	32.1	12.84	171.7	83.1	413.6	112.3	1150	290.8	2318.8	0.02	0.28	147.9
1-9	0.026	57.34	0.172	2.74	8.69	4.49	53.8	22.07	283.5	130.5	640.7	170.5	1713	411.6	3499.1	0.02	0.49	97.6
1-10	0.128	36.63	0.067	1.25	6.11	2.54	28.6	12.68	144.5	69.3	351.4	97.1	1016	263.7	2030.0	0.02	0.49	96.1
1-11	0.025	47	0.066	2.24	5.84	2.35	33.7	12.31	151.9	71	337.3	91.7	971	242.3	1968.7	0.03	0.40	191.9
1-12	0.109	37.65	0.267	3.33	7.75	3.22	45.9	15.84	206.7	90.4	442	114.8	1177	286.6	2431.6	0.02	0.41	37.6
1-14	0.01	34.28	0.049	2.24	4.5	1.41	28.9	10.13	137.5	64	316.6	87.1	938	239.8	1864.5	0.02	0.29	200.8
1-15	0.556	32.17	0.4	2.59	5.43	1.91	35.4	15.01	176.6	80.8	402.7	112.4	1167	285.4	2318.4	0.02	0.32	16.0
1-16	0.05	49.33	0.05	1.41	3.92	1.89	26.6	11.21	141.6	69.4	348.8	96.4	1059	266.6	2076.3	0.03	0.42	218.7
1-17	0.01	50.6	0.12	1.76	4.7	1.56	25.5	11.38	150	70.1	343.5	91.7	977	241.1	1969.0	0.03	0.35	126.7
1-18	0.01	21.37	0.011	1.87	3.01	1.14	13.1	4.64	61.4	28.8	156.6	44.4	498	130.7	965.1	0.03	0.47	442.1
1-19	0.01	32.48	0.01	1.27	2.67	0.82	14.8	5.52	70.9	32.4	164.9	46.1	517	135.6	1024.5	0.04	0.32	719.8
1-20	0.01	26.1	0.072	1.14	1.54	0.77	11.6	4.82	59.8	28.4	140.7	40	436	113	864.0	0.04	0.40	106.6
样号NR2																		
2-1	0.087	72.24	0.117	5.67	9.81	4.18	62.4	23.44	268.6	125.5	603.7	165.3	1725	432.4	3498.4	0.03	0.39	147.7
2-2	0.010	187.11	0.059	3.53	11.75	4.72	70.3	28.72	335.2	148.5	708.1	180.2	1845	439.3	3962.5	0.06	0.39	921.94
2-3	0.010	40.77	0.161	3.84	6.47	2.97	36.9	13.07	163	70.3	325.5	86.6	878	212.7	1840.3	0.03	0.46	76.7
2-4	0.046	44.14	0.2	2.6	7.78	2.35	35.9	13.56	174	76.5	379	99.6	1014	255.7	2105.4	0.03	0.36	62.7
2-5	0.010	47.69	0.143	1.87	3.02	1.52	22.3	8.12	107	51	265.7	77.1	869	229.8	1684.3	0.03	0.41	100.7
2-6	0.026	28.11	0.086	1.86	3.44	0.78	15.6	5.96	78.4	37	191.6	53.6	582	151.9	1150.4	0.03	0.27	90.5
2-7	0.065	61.36	0.144	4.17	9.04	3.74	49.5	18.51	212.7	96.9	459.4	118.3	1252	301.9	2587.7	0.03	0.43	112.0
2-8	0.042	48.95	0.194	3.13	6.15	3.34	39	14.06	179.5	81.5	388.4	109.7	1161	295.3	2330.3	0.03	0.50	72.1
2-9	0.010	44.62	0.132	1.59	4.59	2.06	26.4	10.06	133.6	63.9	327.7	91.6	968	248.2	1922.5	0.03	0.45	101.9
2-10	0.010	42.56	0.057	1.05	3.8	1.93	28	10.8	132.4	61.8	293	79.6	863	214.0	1732.0	0.03	0.41	216.6
2-11	0.010	29.99	0.1	2.45	4.24	2.33	21.1	7.9	97.3	43.5	212.8	59.6	643	172.1	1296.4	0.03	0.62	89.5
2-12	0.010	35.24	0.145	1.16	4.15	1.93	23.6	8.86	105.1	48.2	246.2	68.9	725	187.1	1455.6	0.03	0.47	73.4
2-13	0.010	30.26	0.071	2.99	5.62	2.17	25.2	8.49	107.7	48	232.6	64.9	702	179.6	1409.6	0.03	0.47	125.3
2-14	0.022	25.79	0.059	0.89	1.83	1.63	16.1	6.54	80.8	36	174.3	48.7	518	132.1	1042.8	0.03	0.62	118.06
2-15	0.023	48.39	0.035	1.06	3.45	1.29	18.5	7.57	101.1	48.2	243.4	71.4	800	216.6	1561.0	0.04	0.40	339.7
2-16	0.010	47.74	0.099	0.8	2.02	1.14	20.5	7.55	95.5	46.5	237.6	66.9	716	180.5	1422.9	0.04	0.35	143.9

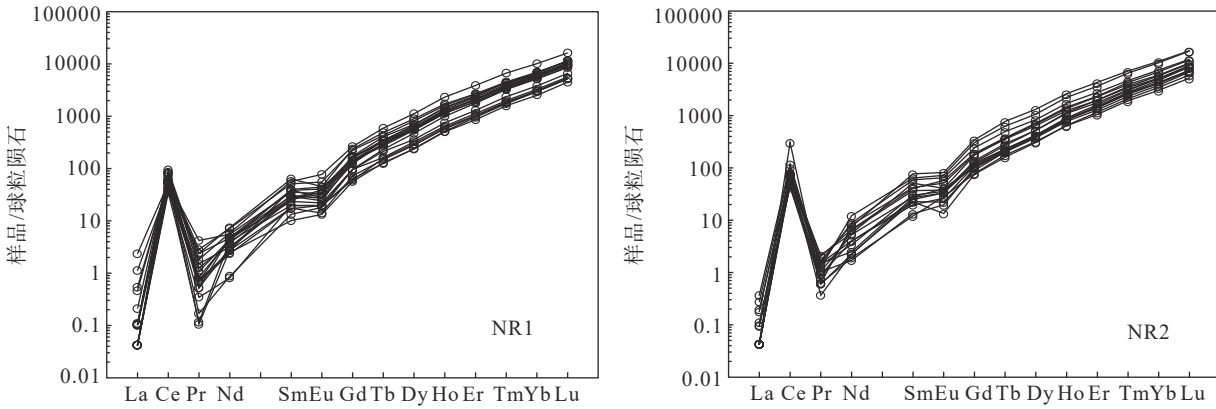


图 7 拿若隐爆角砾岩锆石球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(底图据路远发, 2004)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of zircons of cryptoexplosive breccias in the Naruo deposit (base map after Lu Yuanfa, 2004)

表 2 拿若矿床隐爆角砾岩 (NR1) 及角砾岩筒胶结物 (NR2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb results of cryptoexplosive breccias (NR1) and cement (NR2) in the Naruo deposit

测点	元素含量/ 10^{-6}			Th/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		
隐爆角砾岩NR1												
1-1	26.07	399.2	622	0.64	0.04939	0.0042	0.12935	0.01007	0.01925	0.00033	122.9	2.1
1-2	11.21	160.46	254.46	0.63	0.06806	0.00669	0.17787	0.01642	0.01922	0.00051	122.7	3.2
1-3	22.23	272.67	697.52	0.39	0.0576	0.00516	0.14717	0.01187	0.01906	0.00037	121.7	2.3
1-4	11.04	164.65	284.41	0.58	0.06571	0.00711	0.15816	0.01506	0.01873	0.00054	119.6	3.4
1-5	15.23	234.5	310.09	0.76	0.05332	0.00631	0.12856	0.01396	0.01881	0.00044	120.1	2.8
1-6	19.2	344.41	394.8	0.87	0.05077	0.00453	0.12611	0.00956	0.01872	0.00045	119.5	2.8
1-7	13.73	201.83	295.16	0.68	0.05053	0.00641	0.12944	0.01579	0.01964	0.00054	125.4	3.4
1-8	24.52	357.57	637.32	0.56	0.05658	0.00406	0.13896	0.0084	0.01865	0.00033	119.1	2.1
1-9	23.01	366.7	533.77	0.69	0.05372	0.00454	0.13892	0.01033	0.01941	0.00038	123.9	2.4
1-10	20.42	316.27	472.98	0.67	0.06855	0.00835	0.16893	0.01872	0.01893	0.00043	120.9	2.7
1-11	33.14	523.19	721.77	0.72	0.05053	0.00446	0.13886	0.01326	0.01961	0.00033	125.2	2.1
1-12	23.72	401.2	510.82	0.79	0.05559	0.00463	0.13491	0.00989	0.01864	0.0004	119.1	2.5
1-14	17.06	262.92	437.62	0.6	0.05063	0.00466	0.12795	0.01037	0.01885	0.00038	120.4	2.4
1-15	37.24	481.77	1185.09	0.41	0.05166	0.00335	0.12978	0.00772	0.01908	0.00046	121.8	2.9
1-16	29.21	391.31	706.28	0.55	0.05677	0.00399	0.14534	0.00937	0.01904	0.00037	121.6	2.4
1-17	25.21	451.07	629.89	0.72	0.04563	0.00331	0.11412	0.00817	0.01836	0.00032	117.3	2.0
1-18	10.21	161.46	273.24	0.59	0.05522	0.0075	0.12671	0.01543	0.01854	0.00056	118.4	3.6
1-19	16.98	252.62	395.92	0.64	0.05083	0.00461	0.1271	0.01037	0.01862	0.00043	118.9	2.7
1-20	14.4	200.15	450.58	0.44	0.05345	0.00526	0.1292	0.01045	0.01854	0.00042	118.4	2.7
隐爆角砾岩筒胶结物NR2												
2-1	73.74	1207.5	1641.04	0.74	0.05081	0.00229	0.12903	0.00585	0.01842	0.00024	117.7	1.5
2-2	94.86	1831.29	1795.75	1.02	0.05199	0.00327	0.13176	0.0077	0.01878	0.00032	119.9	2.0
2-3	21.68	407.41	496.89	0.82	0.05148	0.00416	0.12745	0.00939	0.01818	0.00035	116.2	2.2
2-4	29.11	414.03	746.12	0.55	0.04842	0.00362	0.11945	0.00811	0.01818	0.00029	116.2	1.8
2-6	22.87	361.94	604.7	0.6	0.04182	0.00336	0.10716	0.00835	0.01846	0.00034	117.9	2.1
2-8	11.76	200.02	303.54	0.66	0.05184	0.00574	0.12354	0.01383	0.01787	0.00042	114.2	2.7
2-9	39.01	699.45	817.3	0.86	0.05257	0.00435	0.12684	0.00977	0.01776	0.00035	113.5	2.2
2-10	46.28	676.23	1144.45	0.59	0.05025	0.00295	0.1261	0.00708	0.01823	0.00025	116.5	1.6
2-11	21.76	348.72	527.47	0.66	0.05072	0.00439	0.12398	0.00982	0.01809	0.00034	115.6	2.2
2-12	27.05	449.69	618.25	0.73	0.04926	0.00385	0.12379	0.00991	0.01814	0.0003	115.9	1.9
2-13	16.92	274.22	396.09	0.69	0.06038	0.00565	0.1448	0.01261	0.01822	0.00041	116.4	2.6
2-15	22.4	318.42	514.49	0.62	0.04954	0.0051	0.11959	0.0111	0.0183	0.00039	116.9	2.5
2-17	16.23	286.79	400.27	0.72	0.05096	0.0041	0.12349	0.0077	0.01836	0.00038	117.3	2.4
2-18	12.56	192.82	275.69	0.7	0.05617	0.00588	0.13122	0.01193	0.01817	0.00046	116.1	2.9
2-19	23.64	389.81	637.93	0.61	0.05157	0.00373	0.12847	0.00927	0.01806	0.00029	115.4	1.9
2-20	22.81	377.85	591.07	0.64	0.0495	0.00344	0.12062	0.00758	0.01815	0.00034	116	2.1

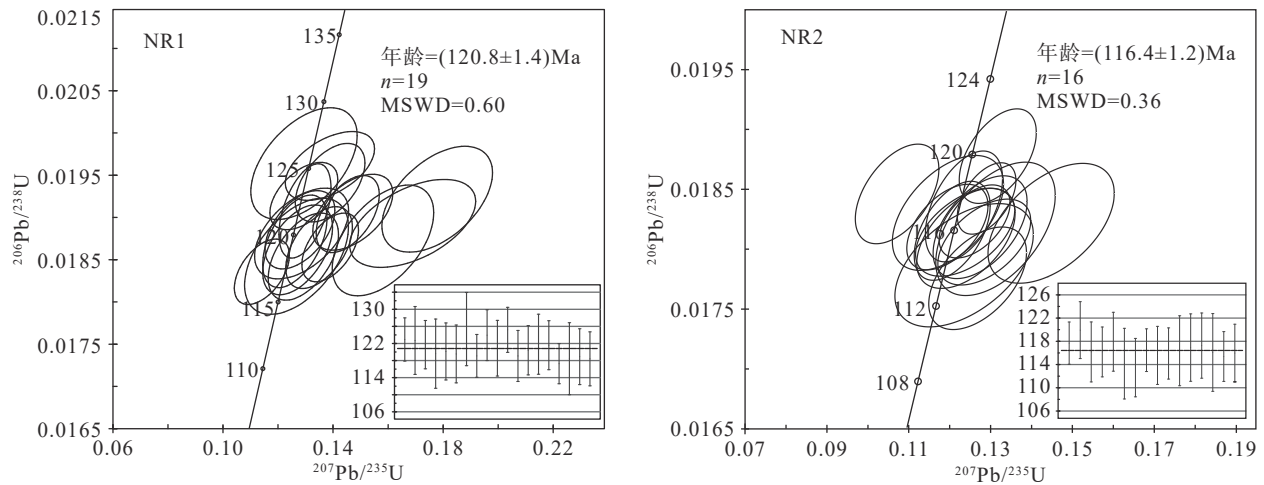


图8 拿若隐爆角砾岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig.8 Concordia diagrams of zircons of cryptoexplosive breccias in the Naruo deposit

受变质重结晶作用影响较小的锆石微区其年龄的最大值可能代表原生锆石的形成年龄,其年龄的最小值最可能代表重结晶作用发生的时间(Vavra et al., 1999; Hoskin and Black, 2000),受热液影响较小的变质锆石区域其形成时间介于原岩和变质作用形成时代之间(吴元保等, 2004)。本次研究通过锆石 U-Pb 法测得 NR1 中 19 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 117.3~125.4 Ma, 加权平均年龄为 $(120.8 \pm 1.4)\text{Ma}$ 。岩浆原生锆石形成年龄在 120 Ma 之前, 热液改造作用发生在约 117 Ma。

没有受到后期热液作用影响的锆石, 可以准确代表岩体的形成年龄(Liati et al., 2002; Tomaschek et al., 2003)。NR2 样品中有 16 个有效测点, 获得锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 113.5~119.9 Ma, 加权平均年龄为 $(116.4 \pm 1.2)\text{Ma}$, 这一年龄与 NR1 中的岩浆锆石发生热液改造时间非常接近。岩浆热液隐爆作用发生后隐爆流体冷凝时间在 116 Ma 左右。此次获得的两组年龄与前人获得的年龄值在误差范围内基本一致(高轲等, 2017)。

6 讨论

6.1 锆石成因及地质意义

前人资料认为, 不同成因锆石具有不同的阴极发光和微量元素特征(吴元保等, 2004)。岩浆锆石阴极发光具有明显的环带特征, 变质锆石则具有无分带、弱分带特征。岩浆锆石的 Th、U 含量较高, Th/U 比值较大(一般 >0.4); 变质锆石的 Th、U 含量较

低, Th/U 比值较小(一般 <0.1)(Rubatto and Gebauer, 2000; Moller et al., 2003)。此次主要针对两种成因的锆石开展研究, 分别为早期侵入岩中的锆石和后期胶结物中的锆石。早期侵入岩中的锆石受到后期岩浆热液改造, 发生浅程度重结晶, 部分显示变质锆石的特征。该类锆石既显示岩浆锆石特征也显示变质锆石的部分特征, 锆石阴极发光(CL)图像反映震荡环带不明显, 呈无分带、弱分带特征, 呈部分变质锆石的影像特征; 但锆石微量元素 Th/U 比值为 0.39~0.87, 均值为 0.62, 显示为岩浆锆石的特征, 但该比值相对更接近 0.4, 介于岩浆锆石与变质锆石之间。说明早期形成的岩浆岩锆石受到后期热液影响, 影响程度较小。

以岩屑为主的胶结物中的锆石结晶较好, 阴极发光(CL)图像显示震荡环带明显, 分带清晰; 锆石微量元素 Th/U 比值为 0.55~1.02, 均值为 0.70, 表现为岩浆锆石的特征。岩浆热液隐爆作用发生之前岩浆在密闭的高温高压条件下形成锆石副矿物, 温度变化较小而形成清晰环带, 说明胶结物中锆石形成于稳定—亚稳定状态。在密闭的高温条件下形成的锆石结构更稳定, 不易受到后期热液的影响(李长民, 2009), 因此该件样品的锆石的环带年龄更可靠。

锆石微量元素是判断锆石形成环境的重要手段, 通过微量元素中的 U、Yb、Y 绘制 Yb-U 和 Y-U/Yb 图解判断锆石是洋壳成因还是陆壳成因, 从而揭示侵入岩的源区(Grimes et al., 2007)。微量元素数据投图显示, 岩体和胶结物中的锆石均落于

陆壳区域(图 9), 据此判断拿若矿床隐爆角砾岩中的岩浆锆石和热液锆石源区均为陆壳环境, 与矿集区内其他矿床一致(陈华安等, 2013; Li et al., 2013; 符家骏等, 2014; 祝向平等, 2015b; Li et al., 2017)。

6.2 侵入岩年龄与成矿时代

拿若矿床是典型斑岩型矿床, 前人对该矿床的侵入岩成岩时代有多种认识, 但尚未定论。吕丽娜(2012)最先对钻孔 ZK0001 附近露头的含矿花岗闪长斑岩露头进行锆石 U-Pb 测年, 认为该岩体形成年龄为(119.4±0.6)Ma。丁帅(2014)对矿体中心钻孔内含矿花岗闪长斑岩测年显示, 该含矿岩体形成年龄在(119.4±0.6)Ma, 两个年龄基本一致。祝向平等(2015a)结合花岗闪长斑岩的岩相学特征, 将含矿岩体分为两期, 成岩年龄分别是(120.2±1.4)Ma 和(120.5±1.2)Ma, 两期岩体侵位时间非常接近。Zhou et al.(2015)在拿若矿区一期含矿花岗闪长斑岩获得该岩体的年龄为(124.03±0.94)Ma, 并认为该年龄是矿区的主要成岩时代。白荣龙(2016)在钻孔 ZK0701 中 200m 处的花岗闪长斑岩测年结果显示其成岩年龄为(116.1±0.9)Ma, 说明拿若矿床存在更晚期的岩浆活动。综合前人资料判断, 主成岩期花岗闪长斑岩成岩年龄分别在 124 Ma、120 Ma 和 116 Ma 左右, 该成岩年龄与多龙其他典型矿床成岩成矿年龄(115~125 Ma)基本一致(Li et al., 2013; 祝向平等, 2015b; Li et al., 2017)。

隐爆角砾岩筒内花岗闪长斑岩角砾定年结果显示锆石谐和年龄为(120.8±1.4)Ma, 结合锆石成因特征, 判断角砾岩筒中的花岗闪长斑岩形成时代在 120 Ma 左右。该年龄与前人测得的矿床早期成岩年龄基本一致, 说明角砾岩筒中的侵入岩与早期岩浆属同期岩浆作用, 存在 120 Ma 左右的非含矿岩体侵入。

祝向平等(2015a)认为 120 Ma 左右侵位的花岗闪长斑岩为拿若矿床的成矿斑岩, 成矿物质来自两期时代相近的成矿斑岩, 而丁帅(2014)通过矿体中辉钼矿 Re-Os 测年获得拿若矿床成矿时代为(117.62±2.3)Ma。本次研究获得的晚期 116~117 Ma 的岩浆热液活动年龄与辉钼矿成矿年龄和隐爆时代非常接近, 据此认为拿若矿床的成矿年龄在很可能限定在 116~117 Ma。角砾岩矿体中的花岗闪长斑岩与主成岩期成岩时代一致, 同为 120 Ma 左右, 两者应为同一期成岩作用。但是, 此次研究获得的花岗闪长斑岩角砾不含矿, 说明 120 Ma 左右的主成岩期的岩浆很可能不含矿, 而是受更晚期的含矿热液侵位所致。斑岩型矿体与角砾岩型矿体同为后期含矿热液所致, 含矿热液在早期的花岗闪长斑岩中形成浸染状为主的矿体, 角砾岩中矿质充填在角砾间隙, 两者成矿作用几乎同时形成。隐爆角砾岩的形成年龄介于 116~117 Ma, 与成矿岩体侵位时间相近, 笔者认为这两种地质作用受同期岩浆控制, 隐爆流体和成矿流体演化空间和时间上的差

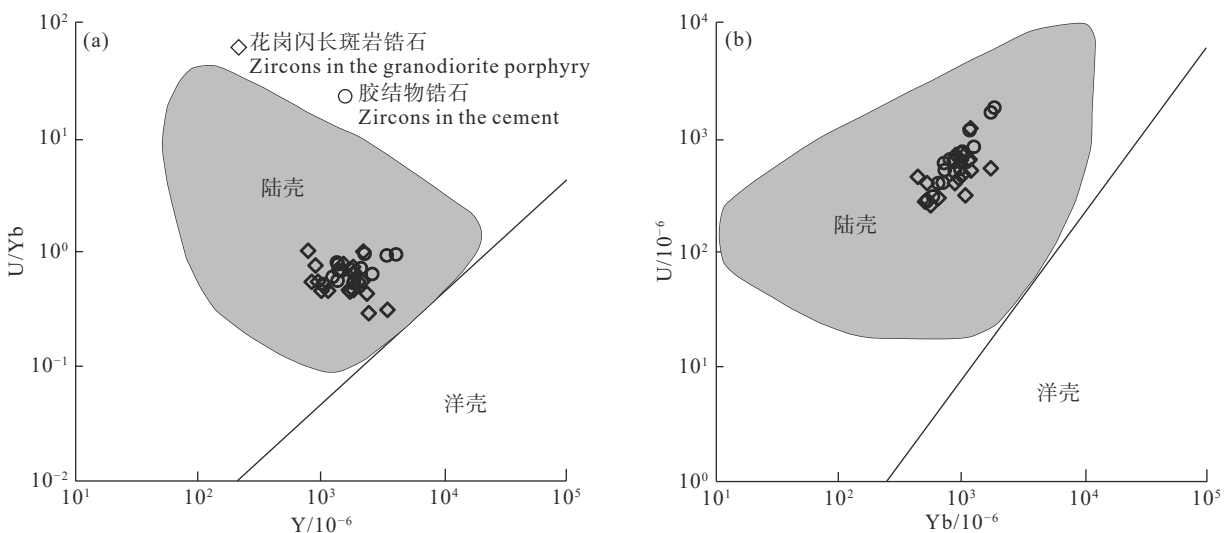


图 9 锆石 Y-U/Yb 图解 (a) 和 Yb-U 图解 (b)(底图据 Grimes et al., 2007)
Fig.9 Diagrams of Y-U/Yb (a) and Yb-U (b) of zircons (after Grimes et al., 2007)

异性导致成矿差异性,包括了矿石结构、矿石构造及矿物组合等特征差异。结合前人获得的辉钼矿、含矿斑岩体及本次获得的胶结物和不含矿岩体角砾的年龄等彼此之间关系,本文认为拿若矿床的成矿岩浆侵位时间在 116~117 Ma。

6.3 隐爆过程与隐爆时代

高温高压中酸性岩浆热液侵位至 3 km 以浅的位置时,热液压力超过上覆静岩压力和张力之和时则易发生隐蔽爆破。胶结物中的锆石年龄为 $(116.4\pm 1.2)\text{Ma}$,晚期早阶段岩浆热液在早期岩浆提供的空间结晶出锆石,该年龄代表了密闭亚稳态条件下锆石形成时间。晚期晚阶段岩浆侵入时间在 116~117 Ma,该阶段侵入前端高温气体打破了早阶段亚稳态状态,破坏早阶段热液平衡而使其发生隐爆作用。拿若隐爆角砾岩筒存在多次隐爆的特征,在角砾之中包含角砾(图 5e),与王照波等(2003)提出的多次隐爆相类似,热液在多次隐爆之后温压降低,利于成矿。在隐爆角砾岩的角砾间隙具有宽松空间,利于矿质沉淀,因此在角砾间沉淀团块状黄铜矿(图 5c、d、e),形成角砾岩型矿体。

在隐爆作用发生时,隐爆的岩浆上部则会有岩浆物质作为胶结物填充在角砾之间。通过胶结物中锆石的形成年龄可以较准确地判断隐爆时代,查阅大量文献发现少有学者通过这一方法判断隐爆角砾岩的形成时代。

隐爆作用发生之前岩浆在高温高压条件下结晶出锆石,在隐爆之后锆石停止结晶,此时成型的完整锆石可代表隐爆之前的年龄。胶结物中的锆石 U-Pb 定年结果为 $(116.4\pm 1.2)\text{Ma}$,该年龄值代表胶结物锆石结晶年龄,隐爆作用限制在 116~117 Ma。

7 结 论

(1) 隐爆角砾岩内花岗闪长斑岩锆石年龄为 $(120.8\pm 1.4)\text{Ma}$,成岩年龄在 120 Ma 左右,这一年龄与前人获得的矿体中心的花岗闪长斑岩年龄基本一致,属于同一主成岩期。

(2) 胶结物中锆石年龄为 $(116.4\pm 1.2)\text{Ma}$,说明隐爆角砾岩筒的形成年龄在 116~117 Ma,该年龄与前人测得辉钼矿年龄接近,进一步证实成矿年龄很可能在 116~117 Ma。隐爆作用与成矿作用受同

期晚期岩浆作用控制,隐爆作用在先而成矿作用在后。

(3) 拿若矿床共发生 3 期主成岩作用,分别在 124 Ma、120 Ma 左右和 116~117 Ma,岩浆源区均主要为陆壳环境。

致谢: 笔者在野外工作期间得到西藏地质五队同仁的帮助,匿名审稿人在百忙之中审阅论文并提出宝贵的意见和建议,在此一并表示感谢。

References

- Bai Ronglong. 2016. Geochemical Characteristics and Genesis of Magmatic Rocks for Duolong Ore Concentrated Area in Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Tecnology, 1-75 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hua'an, Zhu Xiangping, Ma Dongfang, Huang Hanxiao, Li Guangming, Li Yubin, Li Yuchang, Wei Lujie, Liu Chaoqiang. 2013. Geochronology and geochemistry of the Bolong porphyry Cu-Au deposit, Tibet and its mineralizing significance[J]. Acta Geologica Sinica, 87(10): 1593-1611 (in Chinese with English abstract).
- Corfu F. 2003. Atlas of zircon textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469-500.
- Ding Shuai. 2014. The Study of Geological Characteristics of Naruo Copper (gold) deposit in Gaize, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Tecnology, 1-70 (in Chinese with English abstract).
- Fang Xiang, Tang Juxing, Li Yanbo, Wang Qin, Ding Shuai, Zhang Zhi, Yang Chao, Li Yubin, Chen Hongqi, Wei Lujie, Ni Ma. 2014. Metallogenic element spatial distribution of the Naruo copper (gold) deposit in the Duolong ore concentration area of Tibet and its geochemical exploration model[J]. *Geology in China*, 41(3): 936-950 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jiajun, Zhao Yuanyi, Guo Shuai. 2014. Geochemical characteristics and significance of granodiorite porphyry in the Duolong ore concentration area, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(6): 1039-1051 (in Chinese with English abstract).
- Gao Ke, Duo Ji, Tang Juxing, Song Yang, Liu Zhibo, Fang Xiang, Yang Huanhuan, Wang Qin, Song Junlong. 2017. Geochronology and geochemistry of cryptoexplosive breccia from the Naruo Cu (Au) deposit, Tibet[J]. *Geology in China*, 44(3): 618-619 (in Chinese with English abstract).
- Gao Ke, Song Yang, Liu Zhibo, Yang Huanhuan, Wang Yiyun. 2023. Sulfur and lead isotope composition and tracing for sources of ore-forming materials in the Naruo Cu(Au) deposit, in Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(1): 145-155 (in Chinese with English abstract).
- Gao Ke, Tang Juxing, Song Yang, Liu Zhibo, Fang Xiang, Yang Huanhuan, Wang Qin, Lin Bin, Song Junlong. 2016. Fluid inclusion study of the cryptoexplosive breccias of the Naruo deposit in Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 52(5): 815-825 (in Chinese

- with English abstract).
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheadle M J, Hanghoj K, Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance[J]. *Geology*, 35(7): 643–646.
- Hoskin P W O, Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid–state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62.
- Johnston W P, Lowell J D. 1961. Geology and origin of mineralized breccias pipes in Copper Basin, Arizona[J]. *Economic Geology*, 56(5): 916–940.
- Li Changmin. 2009. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons[J]. *Geological Survey and Research*, 33(3): 161–174 (in Chinese with English abstract).
- Li J X, Qin K Z, Li G M, Xiao B, Zhao J X, Cao M J, Chen L. 2013. Petrogenesis of ore–bearing porphyries from the Duolong porphyry Cu–Au deposit, central Tibet: evidence from U–Pb geochronology, petrochemistry and Sr–Nd–Hf–O isotope characteristics[J]. *Lithos*, 160(1): 216–227.
- Li X K, Li C, Sun Z M, Wang M. 2017. Origin and tectonic setting of the giant Duolong Cu–Au deposit, South Qiangtang Terrane, Tibet: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Cretaceous intrusive rocks[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 61–78.
- Liati A, Gebauer D, Wysoczanski R. 2002. U–Pb SHRIMP–dating of zircon domains from UHP garnet–rich mafic rocks and late pegmatoids in the Rhodope zone (N Greece): Evidence for Early Cretaceous crystallization and Late Cretaceous metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184(3): 281–299.
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochimica*, 33(5): 459–464 (in Chinese with English abstract).
- Lü Lina. 2012. The model of the Fe–rich and Cu(Au) deposit in the western Bangong–Nujiang Metallogenic belt, Tibet[J]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–219 (in Chinese with English abstract).
- Moller A, O’Brien P J, Kennedy A, Kroer A. 2003. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: An example from the ultrahigh–temperature granulites of Rogaland (SW Norway)[J]. *Geological Society London Special Publications*, 220(1): 65–81.
- Pidgeon R T. 1992. Recrystallisation of oscillatory–zoned zircon: Some geochronological and petrological implications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(4): 463–472.
- Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, Dai Jingjing, Li Youguo, Qi Xun, Xin Hongbo, Song Yang, Du Dedao. 2012. Discovery of Xiongmei porphyry copper deposit in middle segment of Bangonghu–Nujiang suture zone and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 31(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Rizvanova N G, Lenchnkov O A, Belous A E, Bezme N I, Maslenikov A V, Komarov A N, Makeev A F, Levskiy L K. 2000. Zircon reaction and stability of the U–Pb isotope system during the interaction with carbonate fluid: Experimental hydrothermal study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(1): 101–134.
- Ross P S, Jebrak M, Walker B M. 2002. Discharge of hydrothermal fluids from a magma chamber and Concomitant Formation of a stratified breccia zone at the Questa porphyry molybdenum deposit[J]. *Economic Geology*, 97(8): 1679–1699.
- Rubatto D, Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U–Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps[J]. *Cathodoluminescence in Geoscience*, Springer–Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 373–400.
- Sillitoe R H, Halls C, Grant J N. 1975. Porphyry tin deposits in Bolivia[J]. *Economic Geology*, 70(6): 913–927.
- Sillitoe R H, Hedenquist J W. 2003. Linkage between volcanotectonic settings, ore fluid compositions, and epithermal precious metal deposits[J]. *Society of Economic Geologists, Special Publication* 10: 315–343.
- Sillitoe R H. 1985. Ore–related breccias in volcanoplutonic arcs[J]. *Economic Geology*, 80(6): 1467–1514.
- Tang Juxing. 1995. Characteristics and study significance of gold–bearing hydrothermal cryptoexplosion breccias[J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 22(3): 59–64 (in Chinese with English abstract).
- Tomaschek F, Kennedy A K, Villa I M, Lagos M, Ballhaus C. 2003. Zircons from Syros, Cyclades, Greece–recrystallization and mobilization of zircon during high–pressure metamorphism[J]. *Journal of Petrology*, 44(11): 1977–2002.
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U–Th–Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon: Geochronology of the Ivren Zone (Southern Alps)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(4): 380–404.
- Wang Shengquan, Liu Xuewu. 2009. Geological characteristic and ore–controlling significance of the cryptoexploded breccia in Niujuan silver deposit, in Hebei province[J]. *Contributions to Geology & Mineral Resources Research*, 24(2): 139–141 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaobo, Si Rongjun, Zhong Weiguo, Yang Xuesheng. 2003. Features of ore–forming fluid evolution trend curves of crypto–explosive breccia pipe–type deposits[J]. *Geology Geochemistry*, 31: 62–67 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2014. Study on the origin mineralogy of zircon and its restriction to U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese with English Abstract).
- Xie Guangdong. 1993. Relations between the hydrothermal boiling action and gold mineralization and their significances[J]. *Geological Science and Technology Information*, 12: 61–67 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Dilek K, Cao H, Yang J S, Robinson P, Ma C Q, Li H, Jolivet M, Roger F, Chen X J. 2015. Paleo–Tethyan evolution of Tibet as recorded in the East Cimmerides and West Cathaysides[J]. *Journal*

- of *Asian Earth Sciences*, 105: 320–337.
- Yang Chao, Tang Juxing, Wang Yiyun, Yang Huanghuan, Wang Qin, Sun Xingguo, Feng Jun, Yin Xianbo, Ding Xianbo, Fang Xiang, Zhang Zhi, Li Yubin. 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).
- Yang Huanhuan, Wang Qin, Li Yanbo, Lin Bin, Song Yang, Wang Yiyun, He Wen, Li Hongwei, Li She, Li Jianli, Liu Changcheng, Feng Shibin, Xin Tang, Fu Xuelian, Liang Xinjuan, Zhang Qi, Wang Beiqi, Li Yang. 2022. Geology and mineralization of the Tiegelongnan supergiant porphyry–epithermal Cu (Au, Ag) deposit (10 Mt) in western Tibet, China: A review[J]. *China Geology*, 5(1):136–159.
- Yang K, Bodnar R J. 2004. Orthomagmatic origin for the Ilkwang Cu–W breccias pipe deposit, southeastern Kyongsang Basin, South Korea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(2): 259–270.
- Zhang Zengfeng. 1991. General features and genetic mechanism of crypto–explosive breccias[J]. *Geological Science and Technology Information*, 10(4): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhi. 2015. Metallogenic Regularity and Metallogenic Prediction for Ga'erqiong–Galale Copper–gold Concentrated Area, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Zhou X, Fei G C, Zhou Y, Wen C Q, Zhang Y, Yue X Y. 2015. Chronology and crust–mantle mixing of ore–forming porphyry of the Bangongco: Evidence from zircon U–Pb age and Hf isotopes of the Naruo porphyry copper gold deposit[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(1): 217–228
- Zhu Xiangping, Chen Huan, Liu Hongfei, Ma Dongfang, Li Guangming, Zhang Hong, Liu Chaoqiang, Wei Lujie. 2015a. Geochronology and geochemistry of porphyries from the Naruo porphyry copper deposit, Tibet and their metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 109–128 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Huan, Liu Hongfei, Ma Dongfang, Li Guangming, Huang Hanxiao, Zhang Hong, Liu Chaoqiang, Wei Lujie. 2015b. Zircon U–Pb ages, geochemistry of the porphyries from the Duobuza porphyry Cu–Au deposit, Tibet and their metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 534–548 (in Chinese with English abstract).
- 理工大学.
- 方向,唐菊兴,李彦波,王勤,丁帅,张志,杨超,李玉彬,陈红旗,卫鲁杰,尼玛. 2014. 西藏多龙矿集区拿若铜(金)矿床成矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型[J]. *中国地质*, 41(3): 936–950.
- 符家骏,赵元艺,郭硕. 2014. 西藏多龙矿集区花岗闪长斑岩地球化学特征及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(6): 1039–1051.
- 高轲,多吉,唐菊兴,宋扬,刘治博,方向,杨欢欢,王勤,宋俊龙. 2017. 西藏拿若铜(金)矿床隐爆角砾岩锆石 U–Pb 年代学及地球化学特征[J]. *中国地质*, 44(3): 618–619.
- 高轲,宋扬,刘治博,杨欢欢,王艺云. 2023. 西藏拿若铜(金)矿床硫、铅同位素组成及成矿物质来源[J]. *沉积与特提斯地质*, 43(1): 145–155.
- 高轲,唐菊兴,宋扬,方向,杨欢欢,王勤,林彬,宋俊龙. 2016. 西藏拿若铜(金)矿床隐爆角砾岩流体包裹体研究[J]. *地质与勘探*, 52(5): 815–825.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. *地质调查与研究*, 33(3): 161–174.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 33(5): 459–464.
- 吕丽娜. 2012. 西藏班公湖–怒江成矿带西段富铁与铜(金)矿床模型[D]. 北京: 中国地质科学院, 1–219.
- 曲晓明,王瑞江,代晶晶,李佑国,戚迅,辛洪波,宋扬,杜德道. 2012. 西藏班公湖–怒江缝合带中段雄梅斑岩铜矿的发现及意义[J]. *矿床地质*, 31(1): 1–12.
- 唐菊兴. 1995. 含金热液隐爆角砾岩的特征及研究意义[J]. *成都理工大学学报*, 22(3): 59–64.
- 王胜权,刘学武. 2009. 河北牛圈银矿隐爆角砾岩地质特征及控矿作用[J]. *地质找矿论丛*, 24(2): 139–141.
- 王照波,司荣军,仲卫国,杨学生. 2003. 隐爆角砾岩筒矿床成矿流体演化趋势曲线特征[J]. *地质地球化学*, 31(4): 62–67.
- 吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U–Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 49(16): 1589–1604.
- 谢广东. 1993. 热液沸腾作用与金矿化的关系及其找矿意义[J]. *地质科技情报*, 12(3): 61–67.
- 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.
- 章增凤. 1991. 隐爆角砾岩的特征及其形成机制[J]. *地质科技情报*, 10(4): 1–5.
- 张志. 2015. 西藏杂尔穷—嘎拉勒铜金矿集区成矿规律与成矿预测[D]. 成都: 成都理工大学.
- 祝向平,陈华安,刘鸿飞,马东方,李光明,张红,刘朝强,卫鲁杰. 2015a. 西藏拿若斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义[J]. *地质学报*, 89(1): 109–128.
- 祝向平,陈华安,刘鸿飞,马东方,李光明,黄瀚霄,张红,刘朝强,卫鲁杰. 2015b. 西藏多不杂斑岩铜矿斑岩锆石 U–Pb 年龄、岩石地球化学特征及其成矿意义[J]. *地质学报*, 89(3): 534–548.

附中文参考文献

- 白荣龙. 2016. 西藏多龙矿集区岩浆岩地球化学特征及成因研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1–75.
- 陈华安, 祝向平, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 李玉彬, 李玉昌, 卫鲁杰, 刘朝强. 2013. 西藏波龙斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义[J]. *地质学报*, 87(10): 1593–1611.
- 丁帅. 2014. 西藏改则县拿若铜(金)矿地质特征研究[D]. 成都: 成都