

西藏冈底斯成矿带西段罗布真浅成低温热液型金银多金属矿床地质特征及发现意义*

黄瀚霄¹, 李光明^{1*}, 刘洪¹, 张洪铭², 张林奎¹, 余槐², 焦彦杰¹, 陈小平², 梁维¹

(1 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2 四川省核工业地质局二八二大队, 四川 德阳 618000)

摘要 在野外地质调查基础上, 通过详细的岩相学和矿物学观察, 以及矿床对比研究等手段, 初步探讨了罗布真金银多金属矿床成因类型和地质意义。罗布真金银多金属矿床位于冈底斯陆缘火山-岩浆弧西段, 矿体受NWW向断裂构造控制, 呈似层状、脉状、透镜体状产于帕那组火山岩中, 或产于火山岩与始新世闪长岩的接触部位。金银矿体由石英脉、蚀变岩和角砾岩组成。矿石具有角砾状、条带状和网脉状等热液型矿床典型构造。金属矿物主要有自然金、碲银矿、黄铁矿、方铅矿、毒砂和闪锌矿等, 非金属矿物有石英、玉髓、绿泥石、方解石等。围岩蚀变属于中、低温环境下的一套蚀变矿物组合, 有绢云母化、硅化、碳酸盐化、绿泥石化等; 围岩蚀变具有从矿脉中心到围岩有绢英岩化到青磐岩化过渡分带, 垂向上也有顶部伊利石、硅华、玉髓层, 深部绿泥石、绢云母、微细粒石英-玉髓脉的分带。成矿流体显示出低温、低盐度的特点, 主要来自于大气降水; 而金、银等成矿物质主要来源于围岩。通过矿床对比研究, 初步确定罗布真金银多金属矿床属于低硫化型浅成低温热液型矿床, 该成因类型矿床在冈底斯成矿带西段尚属首次发现。

关键词 地质学; 低硫化型; 浅成低温热液金银多金属; 罗布真; 冈底斯成矿带; 西藏

中图分类号: P618.51; P618.52

文献标志码: A

Geological characteristics and significance of Luobuzhen epithermal Au-Ag polymetallic deposit in west of Gangdise metallogenic belt

HUANG HanXiao¹, LI GuangMing¹, LIU Hong¹, ZHANG HongMing², ZHANG LinKui¹, YU Huai²,
JIAO YanJie¹, CHEN XiaoPing² and LIANG Wei¹

(1 Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2 No. 282 Geological Party, Sichuan Bureau of Geology for Nuclear Industry, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract

This paper gives a detailed discussion on the genetic type of the Luobuzhen Au-Ag polymetallic deposit and its significance on the basis of regional geological setting, field geological survey, thin-section examination, and its comparison with similar deposits. The Luobuzhen Au-Ag polymetallic deposit is located in the western part of the Gangdise continental marginal volcanic-magma arc, Tibet. The orebodies, controlled by NWW-trending faults, are mainly in stratified, veinlet and lenticular forms, consist of quartz veins, altered and breccia rocks, and occur in the volcanic rock of Pana Formation or its contact zone with the Eocene acid-intermediate intrusive rocks. The ore exhibits typical characteristics of the hydrothermal deposit as shown by the brecciated vein as well

* 本文得到国家重点研发计划(编号:2016YFC0600308;SQ2018YFC060162)、中国地质调查项目(编号:DD20160015)和中国地质调查局成都地质调查中心青藏高原国际大学计划的联合资助

第一作者简介 黄瀚霄,男,1982年生,高级工程师,从事青藏高原地质矿产、地球化学研究。Email:hanxiaohuang@126.com

** 通讯作者 李光明,男,1965年生,研究员,从事青藏高原地区金属矿产资源评价、区域成矿规律与成矿预测研究。Email:cdlguangming@cgs.gov.cn

收稿日期 2018-10-08;改回日期 2019-06-01。张绮玲编辑。

as banded and net vein structures. The metallic minerals contain native gold, hessite, pyrite, galena, arsenopyrite and sphalerite, and the non-metallic minerals comprise quartz, chalcedony, chlorite and calcite. The wall rock alterations include sericitization, silication, carbonatation and chloritization, representing an intermediate-alkaline alteration combination formed in a medium-low temperature environment. The lateral distribution of the wall rock alteration displays phyllic zone, transitional zone and propylitization zone from the vein center to the wall rock, and the vertical zoning shows that illite, silicification and chalcedony occur at the top, whereas chlorite, sericite and micrograined quartz lie at the bottom. Mineralizing fluids characterized by low temperature and low salinity resulted from water-rock exchange reaction between atmospheric precipitation and wall rocks, whereas metallogenic materials such as gold were mainly derived from the host strata. Synthesizing the above geological information, the authors preliminary confirm that the Luobuzhen Au polymetallic deposit belongs to the low sulfide type epithermal deposit, and the genesis of this deposit was discovered for the first time in the western part of Gangdise metallic zone.

Key words: geology, low sulfide type, epithermal Au-Ag polymetallic deposit, Luobuzhen, Gangdise metallogenic belt, Tibet

浅成低温热液型矿床是目前世界上最为重要的矿床类型之一(Cooke et al., 2000; Hedenquist et al., 2000; 江思宏等, 2004; 唐菊兴等, 2016)。冈底斯成矿带位于中国西藏南部, 目前已确定以斯弄多银多金属矿床和弄如日金矿床为代表的2期浅成低温热液成矿作用(李光明等, 2005; 唐菊兴等, 2016), 此外, 也可能存在以洞嘎金矿床为代表的中侏罗世浅成低温热液型金矿床(唐菊兴等, 2014; 黄瀚霄等, 2019; 刘洪等, 2019)。然而, 冈底斯成矿带西段(E88°以西)至今尚未有浅成低温热液型矿床的发现和报道。近年来, 四川省核工业地质局二八二大队在西藏昂仁县新发现了罗布真金银多金属矿床, 获得金资源量约8 t, 并共(伴)生银铅锌矿。由于矿床勘查程度的制约, 前人最初认为罗布真属于与中新世岩浆作用有关的中低温热液型铅锌矿床(欧阳海涛等, 2015; Sun et al., 2017)。但随着勘探工作的深入, 成矿作用过程中保留的矿石矿物组合、蚀变类型等新的成矿信息不断涌现, 罗布真显现出不同于热液型铅锌矿床的矿化特征。因此, 需重新认识和确定罗布真的矿床成因类型。本文以罗布真金银多金属矿床所取得的勘查进展和已有研究成果为基础, 通过野外地质调查、岩相学和矿物学观察, 以及矿床对比研究等手段, 初步探讨了罗布真的矿床类型及发现意义。

1 成矿地质背景

拉萨地块位于印度河-雅鲁藏布缝合带和班公湖-怒江缝合带之间, 是印度-亚洲大陆主碰撞带的重

要组成部分之一(潘桂棠等, 2006)(图1a)。在早白垩世, 拉萨地块北缘与羌塘地块碰撞, 在晚白垩世—古新世, 喜马拉雅造山带拼合到拉萨地块南缘(侯增谦等, 2006a; 潘桂棠等, 2006; Zhu et al., 2015)。受新特提斯洋和班公湖-怒江洋构造演化的制约, 拉萨地块中部主要为前寒武纪结晶老基底, 南、北两侧以新生地壳为主(张立雪等, 2013)。前寒武纪结晶老基底经历了多期变质作用, 以岩浆岩间的残片形式呈近东西向断续分布(潘桂棠等, 2006); 新生地壳主要为中、新生代的海相与海陆交互相地层和火山沉积地层(Zhu et al., 2011)。古新世—始新世, 印度和亚洲大陆强烈碰撞, 青藏高原发生地壳缩短和垂向增生, 出现短暂的应力松弛或SN向伸展, 形成大规模剪切带和近EW向展布的正断层(侯增谦等, 2006a)。渐新世—中新世, 印度-亚洲大陆进入到后碰撞阶段, 区域构造应力开始由挤压转变为拉张的过程, 形成一系列横跨高原的近SN向构造(侯增谦等, 2006b)。拉萨地块是弧岩浆、碰撞型岩浆和后造山岩浆大规模复合的场所, 岩浆活动以早白垩世、始新世和中新世为主, 具有从北到南逐渐年轻的趋势(莫宣学等, 2005; Zhu et al., 2011)。早白垩世的岩浆作用与中特提斯洋南向俯冲或新特提斯洋北向俯冲有关(Zhu et al., 2009; Tang et al., 2015); 始新世花岗岩具有碰撞型岩浆的特点, 形成于印度-亚洲大陆碰撞过程中(侯增谦等, 2006a; Zheng et al., 2014a); 中新世是拉萨地块南部岩浆活动的重要时期, 是印度-亚洲大陆碰撞后的一次大规模伸展作用的产物(侯增谦等, 2006b; Zheng et al., 2014b)。

罗布真地区位于拉萨地块南部冈底斯陆缘火

山-岩浆弧西段北缘(图 1a)。区域地层主要为林子宗群(图 1b)。林子宗群为一套中酸性的火山碎屑岩,形成于古新统-始新统,自下而上可分为典中组(E_1d)、年波组(E_2n)和帕那组(E_2p)。典中组火山岩

属于钙碱性系列的中性火山岩,形成于新特提斯大洋岩石圈俯冲晚期到印度-亚洲初始碰撞阶段(梁银平等, 2010);年波组下部为钙碱性系列岩石,是印度-亚洲大陆碰撞阶段的产物;年波组晚期和帕那组火

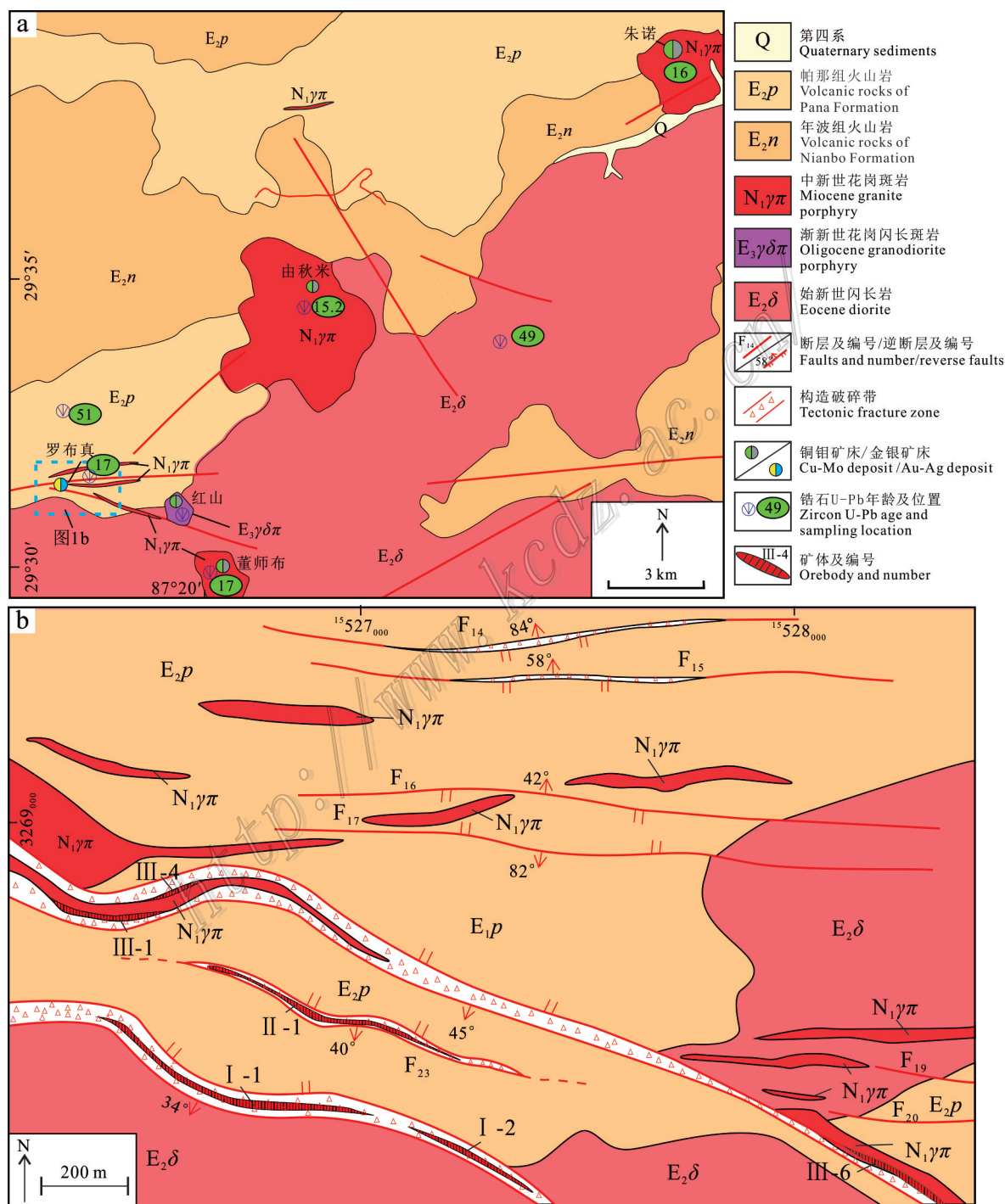


图 1 罗布真地区区域地质简图(a)及罗布真金银多金属矿床矿区地质简图(b, 据黄瀚霄等, 2018 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of Luobuzhen area (a) and geological sketch map of the Luobuzhen Au-Ag polymetallic deposit (b, modified after Huang et al., 2018)

山岩则是板片断离的结果(朱弟成等, 2017)。侵入岩以岩基、岩株或岩脉形式侵入到林子宗群火山岩地层中, 岩石类型主要有闪长岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩等。侵入岩按成岩时代可分为始新世、渐新世和中新世3期岩浆活动(图1b)。始新世闪长岩与上地壳物质的部分熔融有关(Sun et al., 2017); 中新世花岗岩具有“埃达克质”岩浆的地球化学特征(Zheng et al., 2014b; Huang et al., 2017)。

2 矿床地质

罗布真矿区出露的地层为始新统林子宗群帕那组(图1a)。帕那组总体向北东方向倾斜, 倾角 $73^{\circ}\sim 81^{\circ}$, 主要岩性为英安岩、流纹岩等。帕那组火山岩具有钾玄岩地球化学特征, 属于同碰撞火山岩。中酸性侵入岩以岩基或岩脉的形式, 侵入到帕那组中, 岩石类型有花岗闪长岩、花岗斑岩等(图1b)。闪长岩分布在矿区南部, 呈岩基产出, 侵位时间约为48 Ma(Sun et al., 2017)。闪长岩呈灰白色, 斑状结构, 块状构造, 主要由斜长石和角闪石组成, 有少量石英、黑云母和辉石; 花岗斑岩受近东西向断裂控制, 呈大小不一的岩脉侵位于早期的闪长岩和帕那组火山岩中, 其锆石U-Pb年龄为17 Ma(Sun et al., 2017)。花岗斑岩呈灰白色, 斑状结构, 块状构造, 主要由斑晶和基质组成, 斑晶约占40%, 主要为斜长石、正长石、石英和黑云母组成, 基质约占60%, 主要成分为石英和正长石。矿区构造行迹表现为一系列近东西向断裂, 该组断裂出露长600~3000 m, 宽40~80 m, 断裂面向南或向北, 倾角 $40^{\circ}\sim 82^{\circ}$, 具逆冲推覆的性质, 是矿区内重要的控矿和赋矿构造。

罗布真矿区目前发现3条金矿(化)带和38条金银多金属矿(化)体。金矿(化)带受NWW向断裂构造控制, 产于帕那组火山岩中或者帕那组火山岩与始新世花岗岩的接触部位(图1b, 图2a)。金矿(化)体产状与近东西断裂基本一致, 并随断裂产状的变化而变化, 具有膨大缩小现象。经探矿工程揭露, 金矿体一般长80~1000 m, 厚度为0.8~14.6 m, 部分矿体延深超过600 m, 金品位1.2~4.3 g/t, 共(伴)生银品位9.1~177.5 g/t。矿体主要由石英脉、蚀变岩和角砾岩组成。按照矿石工业类型分类, 矿石类型可分为角砾岩型、石英脉型和蚀变岩型3类。矿石构造主要有浸染状构造、网脉状构造, 其次有条带状构造和

角砾状构造等(图2b、j)。角砾状构造表现为石英、碳酸盐矿物胶结早期岩浆岩角砾, 具有隐爆角砾岩特点(图2b); 条带状构造、网脉状构造主要是在石英沿裂隙充填过程中沉淀形成。矿石结构以自形-半自形、半自形-他形, 以及叶片状结构为主。叶片状结构是指石英、碳酸盐矿物呈叶片状不均匀分布于矿石中。

矿石矿物主要有自然金、锑银矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、黄铁矿、硫砷铜银矿、黄铜矿等(图2c~i、k、l, 表1); 脉石矿物有石英、玉髓、绢云母、方解石、绿泥石、伊利石等(图2e、j)。黄铁矿呈自形、半自形粒状, 集合体呈短脉状或脉团状产出, 具有多阶段成因特征。方铅矿、闪锌矿、黄铜矿共生, 闪锌矿、方铅矿内部零星发育固溶体分离结构的黄铜矿(图2f、k), 且沿边缘或裂纹交代早期黄铁矿; 毒砂等其他硫化物多呈中细粒自形-半自形晶体星散浸染分布于矿石中(图2g); 自然金呈他形粒状产于黄铁矿裂隙中, 与方铅矿共生(图2h); 锑银矿呈他形粒状或不规则状集合体交代方铅矿。从金物相分析结果(表2)来看, 金赋存状态以包裹金为主, 有少量的游离自然金, 载金矿物主要有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和石英等。

热液蚀变类型及分带特征是矿化类型的重要标志。罗布真金银多金属矿床围岩蚀变受断裂破碎带的制约, 矿脉向两侧蚀变作用减弱, 主要蚀变类型有黄铁矿化、绢云母化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化、毒砂化等, 其中与金矿化关系密切的有黄铁矿化、绢云母化、硅化等(图2e)。围岩蚀变三维空间分带明显, 从矿脉到围岩有绢英岩化、碳酸盐化到青磐岩化的水平分带, 在垂向上也具有从深部绿泥石、绢云母、微细粒石英脉到浅部伊利石、硅华、玉髓层的分带特征。绢英岩化带出现大量的玉髓化石英、绢云母, 以及方解石等蚀变矿物; 青磐岩化带出现绿泥石、绢云母和方解石等新生的蚀变矿物。

根据脉体穿插关系和矿物共生组合、生成顺序, 罗布真金矿床成矿作用可划分为热液成矿期和表生氧化成矿期。热液成矿期又可进一步划分为3个成矿阶段(表1): 早期阶段为石英-黄铁矿阶段(S1), 该阶段石英交代两侧围岩, 形成硅化蚀变带, 并共生较多的黄铁矿(图2h); 中期阶段为石英-金-硫化物阶段(S2), 形成含金石英、微晶状玉髓脉, 并含有毒砂、闪锌矿等硫化物, 是金富集的主要阶段(图2i); 最后阶段为石英-碳酸盐脉阶段(S3),

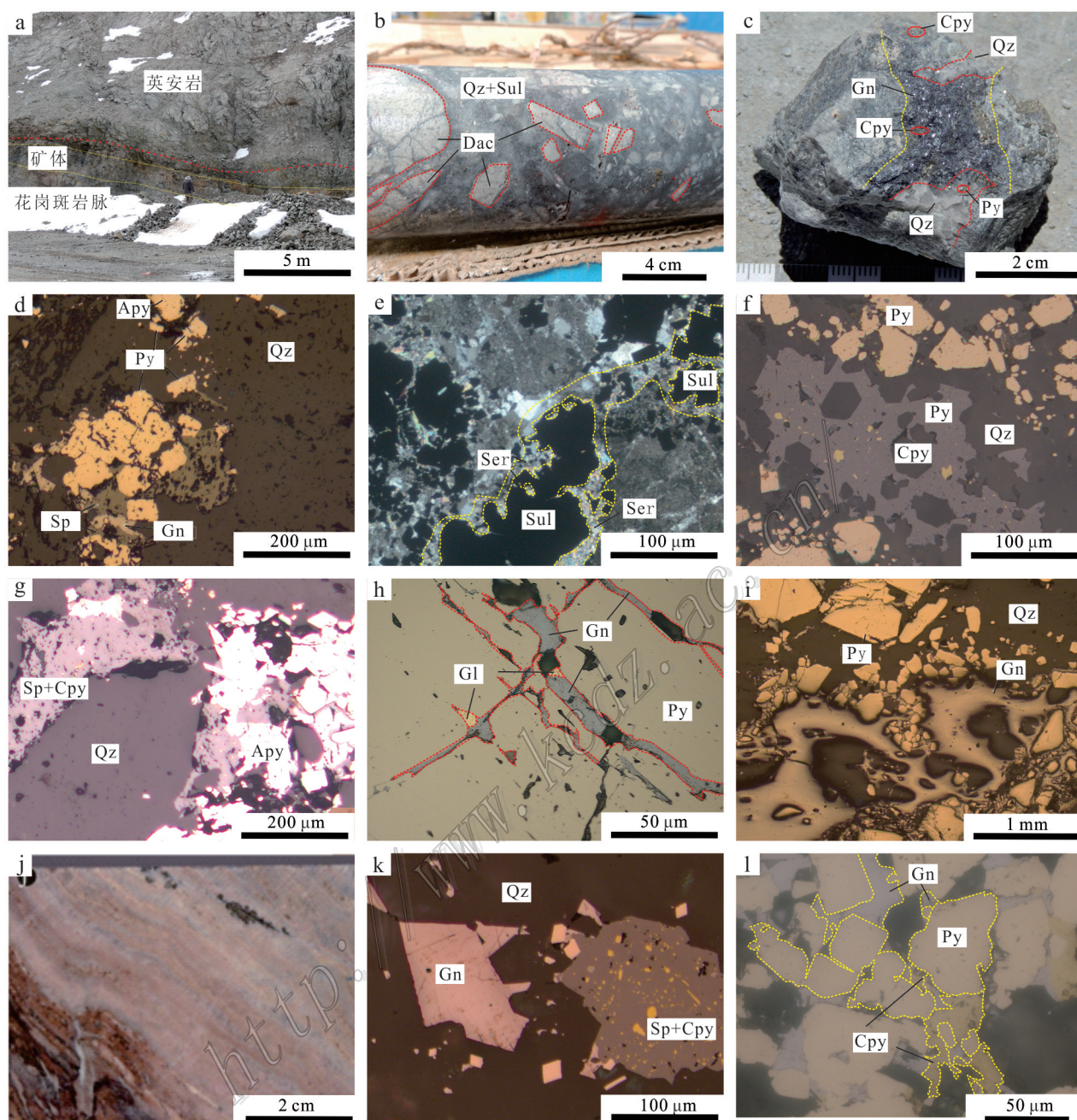


图2 罗布真金银多金属矿床矿石特征和镜下照片

a. 产于破碎带中的Ⅲ-4金银矿体; b. 角砾岩型矿石, 角砾为英安岩, 胶结物为石英-硫化物; c. 蚀变岩型金矿石; d-i. 金矿石镜下特征;
j. 条带状玉髓; k. 闪锌矿、黄铜矿固溶体结构, 毒砂的自形-半自形结构; l. 黄铁矿被方铅矿、黄铜矿交代
Qz—石英; Ser—绢云母; Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Cpy—黄铜矿; Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; Gl—自然金; Dac—角砾;
Sul—金属硫化物

Fig. 2 Field and microscopic photographs of the Luobuzhen Au-Ag polymetallic deposit

a. Ⅲ-4 Au-Ag orebody in fractured zones; b. Breccia type of gold ore, the breccia is dacite and the cement is quartz-sulphide; c. Altered rock type of gold ore; d-i. Microscopic characteristics of gold ores; j. Banded chalcedony; k. Sphalerite and chalcopyrite solid solution structure, arsenopyrite euhedral-subhedral structure; l. Pyrite metasomatized by galena and chalcopyrite
Qz—Quartz; Ser—Sericite; Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Cpy—Chalcopyrite; Gn—Galena; Sp—Sphalerite;
Gl—Native gold; Dac—Breccia; Sul—Metal sulfide

表1 罗布真银金矿成矿期、成矿阶段、矿物生成顺序表

Table 1 Mineralization periods and stages, paragenetic sequence of minerals in the Luobuzhen silver-gold deposit

成矿期 成矿阶段 矿物组合	热液期			表生期
	石英-黄铁 矿阶段(S1)	石英-金-多 金属硫化物阶段(S2)	石英-碳酸盐 矿物阶段(S3)	
石英	—————	—————	—————	
黄铁矿	—————	—————	-----	
辉钼矿	-----	-----		
辉锑矿	-----	-----		
毒砂	-----	—————		
黄铜矿		—————		
绢云母	-----	—————	—————	
方解石	-----	—————	—————	
方铅矿		—————	-----	
闪锌矿		—————	-----	
车轮矿		-----		
自然金		-----		
碲银矿		-----		
含银锌锑 黝铜矿		-----		
绿泥石			-----	
褐铁矿			-----	-----

————— 大量出现 Very extensive ----- 少量出现 Lesser ----- 偶见 A few

表2 罗布真金矿床金物相分析结果

Table 2 Phase analyses of the Luobuzhen silver-gold deposit

样品	$w(\text{Au})/10^{-6}$					
	游离自然金	碳酸盐包裹金	铜铅锌硫化矿包裹金	褐铁矿包裹金	黄铁矿包裹金	石英和硅酸盐包裹金
英安岩	0.10	<0.01	0.03	0.02	0.02	<0.01
蚀变岩型金矿石	0.62	0.23	3.90	0.42	0.90	1.56

形成石英-方解石脉,穿切围岩及早期形成石英-硫化物脉体。表生氧化期表现为金属矿物和脉石矿物氧化。

3 矿床地球化学

本文总结和重新解释了前人对罗布真金银多金属矿床的流体包裹体和矿物H、O、S、Pb同位素研究成果(欧阳海涛等, 2015; Sun et al., 2017)。罗布真金银多金属矿床的原生流体包裹体主要存在溶液包裹体和含子矿物三相包裹体两大类型,其中以溶液包裹体为主体;成矿阶段的流体包裹体均一温度集中在180~320℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 集中在6%~16%,显示出中低温、低盐度的特点(欧阳海涛等, 2015; Sun et al., 2017)。成矿期热液脉体的石英单矿物样品的流体包裹体的 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 V-SMOW 值的变化范围为-125‰~-91‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 V-SMOW 值的变化范围为

3.5‰~6.6‰(Sun et al., 2017; 欧阳海涛等, 2015)。在 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 图解(图3)中,罗布真样品投影点均落在岩浆水之下,并随着成矿演化,逐渐向西藏地热水方向漂移,其对应的解释一般为岩浆水和大气降水的混合,或者是大气降水与围岩交换反应。氧同位素出现明显的漂移,一般解释为大气降水与围岩发生水岩交换反应的结果。然而,大气水和岩浆水所形成的混合水与围岩的水和作用也能导致岩浆流体同位素特征被“掩盖”,而显示出大气降水来源(Criss et al., 1991; Simon et al., 1999)。成矿流体盐度和氧同位素变化范围较大,表明成矿过程中有岩浆水加入。因此,笔者认为,罗布真矿床成矿流体主要为大气降水,早阶段有岩浆水的加入,随着成矿作用的进行,大气降水比例逐渐增大。

镜下鉴定和金物相分析结果表明(图2h,表2),金与黄铁矿、方铅矿等金属硫化物共生。因此,对共生的金属硫化物的S、Pb同位素组成特征研

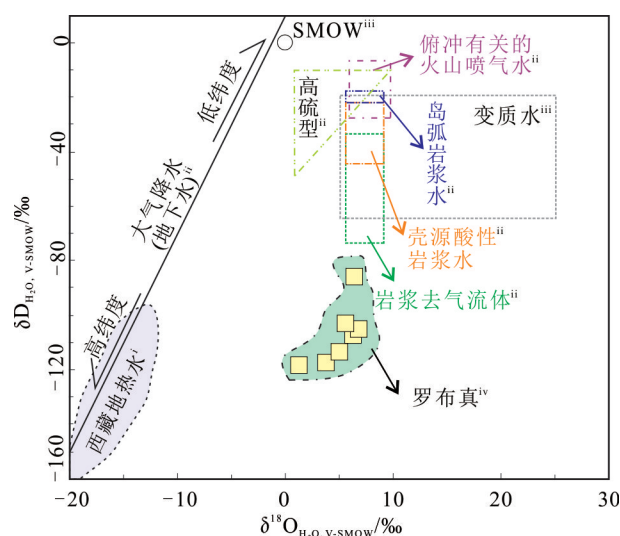


图3 罗布真银金矿成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}, \text{V-SMOW}}$ 与 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}, \text{V-SMOW}}$ 图解

(图中上角 i 据郑淑蕙等, 1982; ii 据 Hedenquist et al., 1994; iii 据 Taylor, 1974; iv 据欧阳海涛等, 2015; Sun et al., 2017)

Fig. 3 Plot of $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}, \text{V-SMOW}} - \delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}, \text{V-SMOW}}$ (a) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{Cal, V-SMOW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{Cal, V-PDB}}$

(i after Zheng et al., 1982; ii after Hedenquist et al., 1994; iii after Taylor, 1974; iv after Ouyang et al., 2015; Sun et al., 2017)

究,可以间接了解金等成矿物质的来源(李永胜等, 2012)。罗布真成矿阶段的硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值均在 0 值附近,变化范围为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = -5.1\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$, Pb 同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别为 18.722~18.849、15.640~15.785、39.068~39.560 (Sun et al., 2017),这些数据表明,罗布真矿床中不同硫化物的 S 来自岩浆硫(地幔或下地壳, $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = -3\text{‰} \sim +3\text{‰}$),而 P 同位素来自上地壳和交代地幔,这与林子宗群火山岩和冈底斯渐新世—中新世斑岩型铜矿床的 S、Pb 同位素组成均有一定相似性。考虑到成矿流体主要来自大气降水,以及帕那组火山岩较高的金背景值($w(\text{Au})$ 区域背景值 0.82×10^{-9} ,帕那组 $w(\text{Au})$ 平均为 20.39×10^{-9})(洪涛等, 2019),罗布真矿床的成矿物质可能主要来源于赋矿火山岩,但这并不能排除深部岩浆对成矿作用的贡献。

4 讨论

4.1 矿床成因类型初讨

金矿床按照数百吨到上千吨金产量成矿省的特

征,分为造山型金矿床、卡林型-类卡林型金矿床、浅成低温热液型金矿床、斑岩型铜金矿床、铁氧化物型铜金矿床、富金 VHMS 型和 SEDEX 型矿床等的方案在国内外矿床学界得到了广泛的运用(Cooke et al., 2000; Goldfarb et al., 2001; 陈衍景等, 2007; 2009; 葛良胜等, 2008; 黄瀚霄等, 2014)。其中,浅成低温热液型金矿床主要是指与岩浆岩有关,在地壳浅部(0~2 km),较低温度(一般不高于 350°C)和中低压力(10~50 MPa)等条件下形成的一类金矿床(Cooke et al., 2000)。罗布真金银多金属矿床赋矿围岩属于岩浆岩建造,这与产于变质岩地体中的造山型金矿床(Goldfarb et al., 2001)以及沉积岩系中的卡林型金矿床(王登红, 2000)相区别。金矿(化)体受断裂控制,矿化形式为沿断裂充填的石英大脉型、细脉浸染型和角砾岩型,矿石富硫化物且具有热液型矿床矿石组构,这与矿体产于中酸性岩体中的斑岩型金矿床(卿敏等, 2011),以及贫硫化物、富铁氧化物矿石的铁氧化物型铜金矿床(Williams et al., 2005)不同,这也不符合于富金 VHMS 型和 SEDEX 型矿床层控型矿体的特征(Gu et al., 2007; Lyons et al., 2006)。

典型的矿物组合、矿石组构是判断浅成低温热液成矿作用过程及矿床类型的关键(江思宏等, 2004; 杨永胜等, 2015; 唐菊兴等, 2016)。罗布真金银多金属矿床角砾岩型矿石中胶结物为热液物质,含有较多的单硫化物,角砾中可见石英-硫化物脉,这与早期热液沿断裂充填过程中局部超压导致岩石碎裂有关,而这种裂隙封闭和热液角砾岩化在岩浆热液体系中常见(Cooke, 2001)。叶片状构造常形成于流体快速沸腾过程中,石英沉淀充填的条带状构造通常是热液充填裂隙所致(张元厚等, 2009; 杨永胜等, 2015),这些均属于岩浆热液矿床中的典型构造类型。罗布真金银多金属矿床的闪锌矿色浅,具有明显的强内反射特征(图 2k),这与低温型闪锌矿(Kullerud, 1953)特征相似,指示矿床形成温度较低;绢云母形成温度一般不高于 350°C (Maineri et al., 2002);玉髓等非晶质硅质矿物也形成于相对高的 pH 值和中低温环境,是沸腾热液在浅地表环境下快速冷却沉淀产物(张元厚等, 2009)。这些与金共生的矿物均指示矿床形成于浅部低温环境。研究认为,早阶段的流体特征能判别矿床成因类型(陈衍景等, 2007)。罗布真金银多金属矿床流体包裹体以水溶液包裹体为主,有少量的含子矿物三相包裹体(欧阳海涛等, 2015),这与富含 CO_2 包裹体的造山型矿床、

含多类子晶的包裹体的浆控高温热液型矿床,以及缺乏含子晶包裹体的卡林型金矿床(陈衍景等,2007)相区别,而和浅成低温热液成矿系统的流体包裹体(陈衍景等,2007)特征相同。成矿主阶段的包裹体均一温度集中在180~320℃,对应估算出的成矿深度为204~1416 m,属于浅成低温范围(欧阳海涛等,2015)。综上所述,罗布真应属于浅成低温热液型金银多金属矿床。

依据成矿流体中S的氧化还原价态,浅成低温热液矿床可划分为高硫化型和低硫化型2种常见端员类型(Hedenquist et al., 2000; Sillitoe et al., 2003)。特征性硫化物和蚀变矿物组合能有效指示浅成低温热液型矿床亚类型(Heald et al., 1987)。罗布真金银多金属矿床主要成矿阶段金属硫化物组合为黄铁矿-闪锌矿-方铅矿-毒砂等,与高硫化型矿床的高价硫的硫酸盐矿物组合(Hedenquist et al., 2000; Sillitoe et al., 2003)不同,而与低硫化型矿床的黄铁矿-磁黄铁矿-毒砂-闪锌矿的矿物组合基本一致。蚀变矿物石英、玉髓、绢云母、方解石也符合低硫化型矿床石英-冰长石-绢云母-碳酸盐典型蚀变矿物组合特征。冰长石一般是鉴定低硫型浅成低温热液金矿床的标志性矿物(Hedenquist et al., 2000; Sillitoe et al., 2003)。本次工作未在矿体中发现脉状的冰长石,但围岩英安岩中却发现斜长石有被冰长石交代现象。从蚀变特征来看,矿床顶部发育硅华-玉髓层-伊利石,到较深部逐渐过渡到微细粒石英-玉髓化石英脉-绿泥石-绢云母的分带,与Parkers Hill等低硫化型浅成低温热液型矿床的分带特征(Corbett, 2002)相似。罗布真金矿床主要成矿阶段流体主要来源于大气降水,与高硫型矿床岩浆水为主导的大气降水和岩浆水混合流体(Rye, 1993; 江思宏等,2004)不同,而与低硫化浅成低温热液型金矿床的大气降水为主的流体特征(江思宏等,2004)相吻合。基于上述证据,本文初步认为罗布真属于低硫型浅成低温热液金银多金属矿床。

4.2 发现意义

前已述及,冈底斯成矿带已明确存在以斯弄多银多金属矿床和弄如日金矿床为代表的两期浅成低温热液成矿作用。斯弄多等矿床赋存于隆格尔-工布江达弧背断隆带典中组火山岩中,其成矿与林子宗群典中组火山岩有关,是新特提斯洋壳向北俯冲的成矿事件(唐菊兴等,2016; 丁帅等,2017)。弄如日金矿床位于哲古错-米拉山-门巴近SN向断裂带附

近,成矿时代为中新世,形成于印度-亚洲大陆后碰撞伸展阶段(李光明等,2005; 黄瀚霄等,2012)。此外,冈底斯成矿带存在以洞嘎金矿床为代表的浅成低温热液成矿作用。洞嘎浅成低温热液型金矿床产于雄村斑岩型铜金矿床外围的雄村组火山岩中,目前尚缺乏成矿年代学数据,但唐菊兴等(2014)根据矿床产出特征,认为洞嘎金矿床与雄村斑岩型铜金矿床共生,是新特提斯洋在中侏罗世向北俯冲过程的产物。罗布真金银多金属矿床和斯弄多银多金属矿床均位于林子宗群火山岩中,表明除在中侏罗世雄村组火山岩中和近南北向断裂外,在林子宗群火山岩中也具有寻找与浅成低温热液型矿床的潜力。

从矿化特征来看,罗布真金银多金属矿床角砾岩型矿石中的石英-硫化物脉穿插于英安岩和闪长岩角砾中(图2b),表明矿床成矿时间要晚于英安岩和闪长岩的成岩年龄。测试数据显示,英安岩和闪长岩的成岩年龄分别为51 Ma和49 Ma(Sun et al., 2017),这就说明罗布真金银多金属矿床成矿时代应晚于49 Ma。含金石英与自然金、方铅矿等共生,其Rb-Sr等时线年龄为 (21.1 ± 1.8) Ma(待发表数据),表明矿床形成于中新世。由此可见,罗布真金矿床的围岩虽然是林子宗群帕那组火山岩,但成矿时间却是中新世,明显晚于林子宗群火山作用时间,这也区别于产于林子宗群典中组火山岩中的斯弄多等浅成低温热液型矿床。

研究显示,斑岩型矿床与浅成低温热液型矿床在时空上常相依出现,构成一套完整的斑岩-浅成低温热液成矿系统(Hedenquist et al., 1998; 江思宏等,2004; Sillitoe, 2010; 顾雪祥等,2016)。低硫化浅成低温热液型金矿床形成在斑岩型矿化的边缘部分,而高硫化浅成低温热液型金矿化往往发育在以侵入体为中心的斑岩型矿化的上方和紧靠侵入体的外接触带围岩,甚至直接发育在斑岩侵入体中(Corbett, 2002; 江思宏等,2004; Sillitoe, 2010; 王治华等,2012)。除雄村斑岩型铜金矿床和外围火山机构控制的洞嘎金矿床可能构成的中侏罗世斑岩-浅成低温热液型成矿系统外(唐菊兴等,2014),冈底斯成矿带常形成斑岩-矽卡岩型成矿系统,如西藏驱龙巨型斑岩铜钼矿床周围发育知不拉与浪母家果矽卡岩铜矿床(王登芳等,2015)。罗布真金矿床和红山铜钼矿床在空间上毗邻(图1b)。红山铜钼矿床铜钼矿体呈长轴状发育于花岗闪长斑岩中,矿化形式以浸染状、网脉状为主(图21),含矿岩体从中心到外围具有钾

化到青磐岩化的蚀变分带,且成矿与热液绢英岩化和钾化相关,表明红山铜钼矿床属于斑岩型矿床。红山斑岩型铜钼矿床含矿花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 等时线年龄分别为 24 Ma 和 23 Ma(Huang et al., 2019),指示该矿床形成于渐新世末—中新世初,这和罗布真金矿床的成矿时代大致相近。由此可见,罗布真金银多金属矿床与红山斑岩型铜钼矿床可能受控于同一构造-岩浆成矿系统,构成渐新世末—中新世初斑岩铜矿-浅成低温热液金矿床成矿系统。当然,这个结论还有待更多的证据支持。总的来说,罗布真金银多金属矿床的发现和矿床类型的确定,表明冈底斯成矿带西段斑岩型铜钼矿床上覆的岩浆岩建造中存在浅成低温热液型金矿床,这对区域找矿和金成矿规律等理论研究具有极其重要的意义。

5 结 论

(1) 罗布真金银多金属矿床位于冈底斯陆缘火山-岩浆弧西段北缘。金矿(化)体受 NWW 向断裂构造控制产于帕那组火山岩中或者帕那组火山岩与始新世中酸性侵入岩体的接触部位;矿石主要成矿阶段硫化物组合为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、毒砂等,脉石矿物组合为石英、绢云母、方解石等。矿石具有条带状、角砾状、网脉状矿石构造;成矿流体显示出低温、低盐度的特点。这些证据初步指示罗布真金银多金属矿床属于低硫化浅成低温热液型矿床。

(2) 罗布真金银多金属矿床和红山斑岩型铜钼矿床时空位置基本一致,可能构成渐新世末—中新世初的斑岩铜矿-浅成低温热液金矿床成矿系统。

致 谢 感谢审稿人对文中出现的疏漏之处提出的宝贵意见!

References

- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajno F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085-2107(in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Zhai M G and Jiang S Y. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695-2726(in Chinese with English abstract).
- Cooke D. 2001. Epithermal Au-Ag-Te mineralization, Acupan, Baguio District, Philippines: Numerical simulations of mineral deposition[J]. *Econ. Geol.*, 96(1): 109-131.
- Cooke D R and Simmons S F. 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits[J]. *Reviews in Econ. Geol.*, 13(12): 221-244.
- Corbett G. 2002. Epithermal gold for explorationists[J]. *AIG Journal-Applied Geoscientific Practice and Research in Australia*, April: 1-26.
- Criss R E, Fleck R J and Jr H P T. 1991. Tertiary meteoric hydrothermal systems and their relation to ore deposition, northwestern United States and southern British Columbia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(B8): 13335-13356.
- Ding S, Chen Y C, Tang J X, Xie F W, Hu G Y, Yang Z Y, Shi S, Li Y H and Yang H Y. 2017. Relationship between Linzizong volcanic rocks and mineralization: A case study of Sinongduo epithermal Ag-Pb-Zn deposit[J]. *Mineral Deposits*, 36(5): 1074-1092(in Chinese with English abstract).
- Ge L S, Deng J, Zhang W Z, Li J Z, Zhang Y C, Guo X D and Lu Y M. 2008. Gold deposits in China (I):The resent progress of metallogenic theory[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 23(4): 265-274(in Chinese with English abstract).
- Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 18(1): 1-75.
- Gu L, Zheng Y, Tang X, Zaw K, Della-pasque F, Wu C, Tian Z, Lu J, Ni P and Li X. 2007. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, N.E. China[J]. *Ore Geology Reviews*, 30(1): 1-29.
- Gu X X, Dong L H, Peng Y W, Wang X L, Yuan P and Zhu B Y. 2016. Formation and evolution of the epithermal-porphyry Au polymetallic mineralization system in the Tulasu volcanic basin of the West Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1283-1300(in Chinese with English abstract).
- Heald P, Foley N K and Hayba D O. 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: Acid-sulfate and adularia-sericite types[J]. *Econ. Geol.*, 82(1): 1-26.
- Hedenquist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 370(6490): 519-527.
- 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]. *Econ. Geol.*, 93(4): 373-404.
- Hedenquist J, Jr A A and Urien-gonzales E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits[J]. *Society of Economic Geologists: Reviews in Econ. Geol.*: 245-277.
- Hong T, Xia F, Zhong F J, Liu G J, Wo D H and Zhou T B. 2019. Geological characteristics and genesis of lubuzhen Pb-Zn polymetallic deposit in Tibet[J]. *Metal Mine*, 48(3): 135-146(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- 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. 2006a. 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, Pan G T, Wang A J, Mo X X, Tian S H, Sun X M, Ding L, Wang E Q, Gao Y F and Xie Y L. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521-543(in Chinese with English abstract).
- Huang H X, Li G M, Dong S L, Dan H Z, Liu B and Zhang Z L. 2012. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of sericite in the nongruri gold deposit of Tibet and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(4): 607-612(in Chinese with English abstract).
- Huang H X, Li G M, Liu B, Zhang Z L, Ma D, Qu Z, Xiao M F and Liu H. 2014. Discovery of shangxu orogenic type gold deposit in northern Tibet and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 33(3): 486-496(in Chinese with English abstract).
- Huang H X, Li G M, Liu H, Zhang H M, Zhang L K, Yu H, Jiao Y J and Liang W. 2018. An low sulfide epithermal gold-silver polymetallic deposit newly discovered in the western section of the Gangdise metallogenic belt[J]. *Chinese Geology*, 45(3): 628-629(in Chinese with English abstract).
- Huang H X, Liu H, Li G M, Zhang L K, Cao H W, Zhou Q, Wang X X and Yan G Q. 2019. Zircon U-Pb, molybdenite Re-Os and quartz vein Rb-Sr geochronology of the Luobuzhen Au-Ag and Hongshan Cu deposits, Tibet, China: Implications for the Oligocene-Miocene porphyry-epithermal metallogenic system[J]. *Minerals*, 9: 476.
- Huang H X, Zhang L K, Liu H, Li G M, Huang Y, Lan S S and Lü M H. 2019. Major types, mineralization and potential prospecting areas in western section of the Gangdise metallogenic belt, Tibet[J]. *Earth Science*, 44(6): 1876-1887(in Chinese with English abstract).
- Huang Y, Li G M, Ding J, Dai J, Guoqiang Y, Dong S L and Huang H X. 2017. Origin of the newly discovered zhunuo porphyry Cu-Mo-Au deposit in the western part of the Gangdese porphyry copper belt in the southern Tibetan plateau, SW China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 91(1): 109-134.
- Jiang S H, Nie F J, Zhang Y and Hu P. 2004. The latest advances in the research of epithermal deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 401-411(in Chinese with English abstract).
- Kullerød G. 1953. The FeS-ZnS system, a geological thermometer[J]. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 32(2/4): 61-147.
- Li G M, Zeng Q G, Yong Y Y, Gao D F, Wang G M and Liu B. 2005. Discovery of epithermal Au-Sb deposits in Gangdese metallogenic belt of Tibet and its significance: Case study of Longruri Au-Sb deposit[J]. *Mineral Deposits*, 24(6): 595-602(in Chinese with English abstract).
- Li Y S, Lü Z C, Yan G S, Zhen S M and Du Z Z. 2012. Isotopic characteristics of S, Pb, H and O of Jiama copper-polymetallic ore deposit, Tibet and their significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 72-81(in Chinese with English abstract).
- Liang Y P, Zhu J, Ci Q, He W H and Zhang K X. 2010. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rock from Linzizong Group in Zhunuo area in middle Gangdise belt, Tibet plateau[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 211-223(in Chinese with English abstract).
- Liu H, Li G M, Huang H X, Zhang L K, Lü M H, Lan S S, Fu J G, Zhou W D and Jie H. 2019. Sources of ore-forming materials in Luerma porphyry copper (gold) deposit, western Gangdise[J]. *Mineral Deposits*, 38(3): 631-643(in Chinese with English abstract).
- Lyons T W, Gellatly A M, Mcgoldrick P J and Kah L C. 2006. Proterozoic sedimentary exhalative (SEDEX) deposits and links to evolving global ocean chemistry[J]. *Memoir of the Geological Society of America*, 198: 169-184.
- Maineri C, Benvenuti M, Costagliola P, Dini A, Lattanzi P, Ruggieri G and Villa I M. 2002. Sericitic alteration at the La Crocetta deposit (Elba Island, Italy): Interplay between magmatism, tectonics and hydrothermal activity[J]. *Mineralium Deposita*, 38(1): 67-86.
- Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, Zhou S, Wang L L, Qiu R Z and Zhang F Q. 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281-290(in Chinese with English abstract).
- Ouyang H T, Sun X, Zheng Y Y, Wu S, You Z M, Geng R R and Wang X. 2015. Characteristics of metallogenic fluid in the Luobuzhen Pb-Zn deposit of the Gangdese belt, southern Tibet[J]. *Geology and Prospecting*, 51(5): 816-827(in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Mo X X, Hou Z Q, Zhu D C, Wang L Q, Li G M, Zhao Z D, Geng Q R and Liao Z L. 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).
- Qing M, Ge L S, Tang M G, Qu W J, Yuan S S and Zhao Y S. 2011. Molybdenite Re-Os isotope age of Bilihe large-size porphyry gold deposit in Sunid Right Banner of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(1): 11-20(in Chinese with English abstract).
- Rye R O. 1993. The evolution of magmatic fluids in the epithermal environment: The stable isotope perspective[J]. *Econ. Geol.*, 88(3): 733-752.
- Sillitoe R and Hedenquist J. 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits[C]. *Society of Economic geologists and Geochemical Society: Special Publication*, 10: 1-29.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105: 3-41.
- Simon G, Kesler S E, Russell N, Hall C M, Bell D and Pinero E. 1999. Epithermal Gold mineralization in an old volcanic arc; the Jacinto

- deposit, Camagueey District, Cuba[J]. *Econ. Geol.*, 94(4): 487-506.
- Sun X, Zheng Y Y, Li M, Ouyang H T, Liu Q Q, Jing X K, Sun G P and Song Q J. 2017. Genesis of Luobuzhen Pb-Zn veins: Implications for porphyry Cu systems and exploration targeting at Luobuzhen-Dongshibu in western gangdese belt, southern Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 82: 252-267.
- Tang J X, Wang Q, Yang C, Ding S, Lang X H, Liu H F, Huang Y, Zheng W B, Wang L J, Gao Y M, Feng J, Duan J L, Song Y, Wang Y Y, Lin B, Fang X, Zhang Z and Yang H H. 2014. Two porphyry-epithermal deposit metallogenic subseries in Tibetan Plateau: Practice of "absence prospecting" deposit metallogenic series[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1151-1170(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 and Wang Q. 2015. Geological characteristics and genesis of the Jurassic No. I porphyry Cu-Au deposit in the Xiongcu district, Gangdese porphyry copper belt, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 70(4): 438-456.
- Tang J X, Ding S, Meng Z, Hu G Y, Gao Y M, Xie F W, Li Z, Yuan M, Yang Z Y, Chen G R, Li Y H, Yang H Y and Fu Y G. 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 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.
- Wang D F, Jiang Z Y, Yue N F, Lu W and Jiang G W. 2015. Geological characteristics of the Zhibula and Langmujiaguo skarn Cu deposits and the determination of the Qulong-Zhibula-Langmujiaguo porphyry-skarn mineralization system in Tibet[J]. *Geology and Prospecting*, 51(4): 619-633(in Chinese with English abstract).
- Wang D H. 2000. New advance in exploration of carlin-type gold deposits and its significance[J]. *Geology-Geochemistry*, 28(1): 92-96(in Chinese with English abstract).
- Wang Z H, Ge L S, Guo X D, Wang L, Yuan S S and Yang L J. 2012. Epithermal-porphyry Cu-Mo-Au polymetal metallogenic system in Machangqing ore field, Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1425- 1437(in Chinese with English abstract).
- Williams P J, Barton M D, Fontbote L, Dehaller A, Johnson D A, Mark G, Oliver N S and Marschik R. 2005. Iron oxide-copper-gold deposits: Geology, space-time distribution and possible modes of origin[J]. *Econ. Geol.*: 100th Anniversary Volume: 371-405.
- Yang Y S, Wu C M, Lü X B, Gao R Z, Li C C and Xing W W. 2015. Comparison of hydrothermal alteration characteristics of low sulfidation and high sulfidation epithermal gold deposits and their relation with mineralization[J]. *Geology and Prospecting*, 51(4): 655- 669(in Chinese with English abstract).
- Zhang L X, Wang Q, Zhu D C, Jia L L, Wu X Y, Liu C A, Hu Z C and Zhao T P. 2013. Mapping the Lhasa terrane through zircon HF isotopes: Constraints on the Nature of the crust and metallogenic potential[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3681-3688(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y H, Mao J W, Li Z Y, Qiao C J, Zhang X M and Zhang X W. 2009. Ore deposit types and characteristics of magmatic-hydrothermal systems and implication for exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 399-425(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]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 18(1): 99~106(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y Y, Sun X, Gao S B, Zhao Z D, Zhang G Y, Wu S, You Z M and Li J D. 2014a. Multiple mineralization events at the Jiru porphyry copper deposit, southern Tibet: Implications for Eocene and Miocene magma sources and resource potential[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 842-857.
- Zheng Y Y, Sun X, Gao S B, Wang C M, Zhao Z Y, Wu S, Li J D and Wu X. 2014b. Analysis of stream sediment data for exploring the Zhunuo porphyry Cu deposit, southern Tibet[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 143(3): 19-30.
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, Zhao Z D, Wang L Q, Liu Y S and Wu F Y. 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an East-West traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Chemical Geology*, 268(3): 298-312.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q and Wu F Y. 2011. The Lhasa terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1): 241-255.
- Zhu D C, Li S M, Cawood P A, Wang Q, Zhao Z D, Liu S A and Wang L Q. 2015. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in Central Tibet by divergent double subduction[J]. *Lithos*, 245: 7-17.
- Zhu D C, Wang Q and Zhao Z D. 2017. Constraining quantitatively the timing and process of continent-continent collision using magmatic record: Method and examples[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(6): 1040-1056.

附中文参考文献

- 陈衍景,倪培,范洪瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2085-2107.
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. *岩石学报*, 25(11): 2695-2726.
- 丁帅, 陈毓川, 唐菊兴, 谢富伟, 胡古月, 杨宗耀, 施硕, 李于海, 杨洪钰. 2017. 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[J]. *矿床地质*, 36(5): 1074-1092.
- 葛良胜, 邓军, 张文钊, 李强之, 张艳春, 郭晓东, 路彦明. 2008. 中国金矿床(I): 成矿理论研究新进展[J]. *地质找矿论丛*, 23(4): 265-274.
- 顾雪祥, 董连慧, 彭义伟, 王新利, 袁鹏, 朱炳玉. 2016. 新疆西天山吐拉苏火山岩盆地浅成低温热液-斑岩型金银多金属成矿系统

- 的形成与演化[J]. 岩石学报, 32(5): 1283-1300.
- 洪涛, 夏菲, 钟福军, 刘国奇, 吴德海, 周堂波. 2019. 西藏罗布真铅锌多金属矿床地质特征及成因[J]. 金属矿山, 48(3): 135-146.
- 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. 2006a. 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.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5): 521-543.
- 黄瀚霄, 李光明, 董随亮, 石洪召, 刘波, 张智林. 2012. 西藏弄如日金矿床蚀变绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 36(4): 607-612.
- 黄瀚霄, 李光明, 刘波, 张智林, 马东, 曲扎, 肖万峰, 刘洪. 2014. 藏北商旭造山型金矿床的发现及意义[J]. 矿床地质, 33(3): 486-496.
- 黄瀚霄, 李光明, 刘洪, 张洪铭, 张林奎, 余槐, 焦彦杰, 梁维. 2018. 冈底斯成矿带西段首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床——罗布真金多金属矿床[J]. 中国地质, 45(3): 628-629.
- 黄瀚霄, 张林奎, 刘洪, 李光明, 黄勇, 兰双双, 吕梦鸿. 2019. 西藏冈底斯成矿带西段矿床类型、成矿作用和找矿方向[J]. 地球科学, 44(6): 1876-1887.
- 江思宏, 聂凤军, 张义, 胡朋. 2004. 浅成低温热液型金矿床研究最新进展[J]. 地学前缘, 11(2): 401-411.
- 李光明, 曾庆贵, 雍永源, 高大发, 王高明, 刘波. 2005. 西藏冈底斯成矿带浅成低温热液型金锑矿床的发现及其意义——以西藏弄如日金锑矿床为例[J]. 矿床地质, 24(6): 595-602.
- 李永胜, 吕志成, 严光生, 甄世民, 杜泽忠. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床S、Pb、H、O同位素特征及其指示意义[J]. 地学前缘, 19(4): 72-81.
- 梁银平, 朱杰, 次邛, 何卫红, 张克信. 2010. 青藏高原冈底斯带中部朱诺地区林子宗群火山岩锆石U-Pb年龄和地球化学特征[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 35(2): 211-223.
- 刘洪, 李光明, 黄瀚霄, 张林奎, 吕梦鸿, 兰双双, 付建刚, 周维德, 解惠. 2019. 冈底斯成矿带西段鲁尔玛斑岩型铜(金)矿床的成矿物质来源研究[J]. 矿床地质, 38(3): 631-643.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 11(3): 281-290.
- 欧阳海涛, 孙祥, 郑有业, 吴松, 游智敏, 耿瑞瑞, 王烜. 2015. 西藏冈底斯罗布真铅锌矿床成矿流体特征[J]. 地质与勘探, 51(5): 816-827.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521-533.
- 卿敏, 葛良胜, 唐明国, 屈文俊, 袁士松, 赵玉锁. 2011. 内蒙古苏尼特右旗毕力赫大型斑岩型金矿床辉钼矿Re-Os同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 30(1): 11-20.
- 唐菊兴, 王勤, 杨超, 丁帅, 郎兴海, 刘鸿飞, 黄勇, 郑文宝, 王立强, 高一鸣, 冯军, 段吉琳, 宋杨, 王艺云, 林彬, 方向, 张志, 杨欢欢. 2014. 青藏高原两个斑岩-浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践[J]. 矿床地质, 33(6): 1151-1170.
- 唐菊兴, 丁帅, 孟展, 胡古月, 高一鸣, 谢富伟, 李壮, 袁梅, 杨宗耀, 陈国荣, 李于海, 杨洪钰, 付燕刚. 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——以斯弄多银多金属矿为例[J]. 地球学报, 37(4): 461-470.
- 王登芳, 蒋宗洋, 岳宁飞, 路文, 蒋光武. 2015. 西藏知不拉和浪母家矽卡岩铜矿地质特征及驱龙-知不拉-浪母家果成矿系统的确定[J]. 地质与勘探, 51(4): 619-633.
- 王登红. 2000. 卡林型金矿找矿新进展及其意义[J]. 地质地球化学, 28(1): 92-96.
- 王治华, 葛良胜, 郭晓东, 王梁, 袁士松, 杨立强. 2012. 云南马厂箐矿田浅成低温热液-斑岩型Cu-Mo-Au多金属成矿系统[J]. 岩石学报, 28(5): 1425-1437.
- 杨永胜, 吴春明, 吕新彪, 高荣臻, 李春诚, 邢伟伟. 2015. 低硫化型与高硫化型浅成低温热液金矿蚀变特征与成矿关系的对比研究[J]. 地质与勘探, 51(4): 655-669.
- 张立雪, 王青, 朱弟成, 贾黎黎, 吴兴源, 刘盛邀, 胡兆初, 赵天培. 2013. 拉萨地体锆石Hf同位素填图: 对地壳性质和成矿潜力的约束[J]. 岩石学报, 29(11): 3681-3688.
- 张元厚, 毛景文, 李宗彦, 乔翠杰, 张孝民, 张向卫. 2009. 岩浆热液系统中矿床类型、特征及其在勘探中的应用[J]. 地质学报, 83(3): 399-425.
- 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), 18(1): 99-106.
- 朱弟成, 王青, 赵志丹. 2017. 岩浆岩定量限定陆-陆碰撞时间和过程的方法和实例[J]. 中国科学: 地球科学, 60(6): 1040-1056.