

# 宜章县长城岭浅成花岗质岩浆隐爆机制 及找矿意义探讨

张术根<sup>1,2</sup>, 钱丽华<sup>1,2</sup>, 刘贤红<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 在长城岭铅锌多金属矿区, 常见沿花岗斑岩脉与北东向断裂交汇处发育与成矿关系密切的角砾岩。这类角砾岩的空间就位、物质组成、岩石结构及蚀变特征等表明其为隐爆成因, 可划分为爆破角砾岩、震碎角砾岩和混杂角砾岩。按照隐爆机制的不同, 其又可分为岩浆隐爆角砾岩和热液隐爆角砾岩。区内花岗斑岩的地质地球化学特征表明, 燕山早期晚阶段侵入的富含挥发分、流体-溶体相互作用强烈的浅成花岗斑岩具备有利的隐爆条件和明显的隐爆特征。隐爆作用不仅为铅锌多金属矿化富集提供物源及流体源, 还为成矿流体汇聚及卸载沉淀提供了重要场所。长城岭地区与铅锌多金属成矿关系密切的隐爆角砾岩的发现对其矿区深部、湘南钨锡多金属矿化集中区乃至南岭中段有色金属找矿研究具有重要意义。

**关键词:** 花岗质岩浆; 花岗斑岩; 隐爆作用; 隐爆角砾岩; 铅锌多金属矿床

中图分类号: P618.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)04-0707-13

## The cryptoexplosive mechanism of the hypabyssal granitic magma in Changchengling area, Yizhang County, Hunan Province, and its implications for mineral prospecting

ZHANG Shu-gen<sup>1,2</sup>, QIAN Li-hua<sup>1,2</sup> and LIU Xian-hong<sup>1,2</sup>

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Numerous breccias were identified as the host rocks of the Pb-Zn polymetallic deposit in Changchengling area, Hunan Province. These breccias are restricted to the intersections between the granite porphyry dykes and the NE-striking faults. Their distribution patterns, compositions, textures, and alteration characteristics suggest that they might have resulted from cryptoexplosion. The cryptoexplosive breccias can be divided into explosive breccias, shatter breccias and mixed breccias on the basis of the features of the cryptoexplosive breccias. These breccias can also be divided into igneous cryptoexplosive breccias and hydrothermal cryptoexplosive breccias according to their genesis. The geological and geochemical features of the granite porphyries indicate that the early Yanshanian hypabyssal granite porphyries were rich in volatiles and experienced strong fluid-melt, thus probably belonging to the cryptoexplosion type. The cryptoexplosion provided not only ore-forming elements and fluids for the Pb-Zn polymetallic mineralization but also convergent and precipitable space for ore-forming fluids. The discovery of cryptoexplosive breccias connected with Pb-Zn polymetallic mineraliza-

收稿日期: 2013-11-05; 修订日期: 2014-06-05

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAB43B05)

作者简介: 张术根(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿产地质和矿物及相关材料研究, E-mail: zhangshugenzsg@163.com

tion in the Changchengling orefield is significant in the search for deep-seated mineralization in this orefield as well as in the southern Hunan W-Sn polymetallic concentration area and even in the whole central segment of Nanling region.

**Key words:** granitic magma; granite porphyry; cryptoexplosion; cryptoexplosive breccia; Pb-Zn polymetallic deposit

隐爆作用是近地表环境中特定构造-岩浆条件下岩浆或水热流体的爆发作用。超基性到酸性岩浆在一定的环境中均可发生隐爆作用(Breiter, 2002; 励音骥等, 2010; 孟凡超等, 2013)。国内外学者对与隐爆作用有关的浅成-超浅成岩体、隐爆角砾岩、隐爆作用机制等做了详细的理论和实验研究(Burnham, 1985; Melluso *et al.*, 1995; 胡承绮, 1997; 王照波, 2001)。与隐爆及矿化有关的浅成-超浅成岩体通常是富挥发分和成矿物质的岩浆分异晚期的残余熔体, 具特有的隐爆特征(胡承绮等, 1997)。隐爆角砾岩筒的形成与岩浆侵入过程中释放的挥发分密不可分(Norton and Cathles, 1973; 黄定华等, 1997; 宋世伟等, 2013)。岩浆隐爆角砾岩与和隐爆有关的中浅成侵入体具有明显的亲缘关系(刘家远, 2001; 余宏全等, 2005; 伍光英等, 2005), 研究者多强调压力梯度对隐爆作用产生的贡献(黄定华等, 1997; 刘继顺等, 2005; 宋世伟等, 2013)。隐爆作用常与斑岩型 W、Sn、Cu、Pb、Zn、Mo、Au、U 等矿床成矿关系极其密切(Landtwing *et al.*, 2002; 章邦桐等, 2002; 林书平等, 2012), 也与热液型 Pb、Zn、Au、Ag 等矿床关系密切(Wallier *et al.*, 2006; 张会琼等, 2012)。

长城岭铅锌多金属矿位于湘南钨锡多金属矿化集中区, 如图 1 所示, 其被白云仙、瑶岗仙、东坡、新田岭、香花岭、宝山、黄沙坪及芙蓉等 8 大著名钨锡多金属矿田环绕, 紧邻北东向炎陵-郴州-蓝山断裂带和北西向仁化-郴州-邵阳断裂带交汇部位, 具有极佳的区域地质成矿背景。作者近期在湖南宜章长城岭铅锌多金属矿区成矿预测与找矿研究中发现该区花岗斑岩与北东向断裂交汇处存在隐爆角砾岩, 且与区内铅锌多金属矿化关系密切, 其发育部位即是重要的矿化富集部位, 成为该区铅锌多金属矿的重要找矿标志。在湘南钨锡多金属矿化集中区, 除湘南宝山、界牌岭等地有人报道和研究过隐爆角砾岩外(伍光英等, 2005; 刘悟辉等, 2006), 再没有发现较大规模矿床且仅有少量脉状花岗斑岩侵入的地区, 亦未报道过岩浆隐爆现象, 更未见研究其与钨锡

多金属矿化关系的实例。因此, 长城岭地区隐爆作用的发现及其与铅锌多金属成矿关系的研究, 对该矿区深部、湘南钨锡多金属矿化集中区乃至南岭中段的有色金属找矿研究具有重要意义。

## 1 矿区地质特征

矿区出露地层比较简单(图 1), 从新到老依次为: 下侏罗统  $J_1$  石英砂岩、泥质粉砂岩及砂页岩等; 上泥盆统锡矿山组 ( $D_{3x}$ ) 泥质粉砂岩、灰岩, 夹含灰岩透镜体的钙质页岩、砂页岩等; 上泥盆统余田桥组 ( $D_{3s}$ ) 泥质灰岩、灰岩, 夹钙质砂页岩、瘤状泥质灰岩和黄色页岩等; 中泥盆统棋梓桥组 ( $D_{2q}$ ) 含泥质灰岩、灰岩、白云质灰岩、白云岩, 夹薄层泥灰岩等。其中, 棋梓桥组 ( $D_{2q}$ ) 是区内铅锌多金属矿床的重要赋矿层位。本区位于走向近南北的刘家-平和背斜东翼, 发育平缓的次级褶皱。岩层主体走向 NNE-NE, 倾向 SE-SEE, 倾角一般为  $30^\circ \sim 50^\circ$ 。区内断裂构造发育, 可分为北东向、北西(西)向及近南北向 3 组。其中, 具有多期次活动的北东向断裂带是区内最重要的控矿构造。北东向的  $F_{102}$  和  $F_{103}$  断裂在加里东期已存在于变质基底, 海西期、印支期、燕山期均存在间歇性活动。区内岩浆岩发育强度较低, 见沿北东向、北西向及南北向 3 组断裂侵位的花岗斑岩脉(墙), 其明显密集于  $F_{101} \sim F_{104}$  的夹持地带。据刘勇等(2012)报道的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果, 区内花岗斑岩的年龄为  $153 \pm 14$  Ma, 虽然该年龄值误差较大, 但是结合花岗斑岩群侵入区内地层、构造特征及其地球化学特征, 可以认为这些花岗斑岩属南岭地区燕山早期成岩成矿大爆发的产物。

## 2 隐爆角砾岩研究

### 2.1 矿区几类角砾岩特征简述

区内主要存在以下 4 种成因类型的角砾岩: 同生角砾岩、构造角砾岩、岩溶角砾岩及隐爆角砾岩, 各类角砾岩控矿作用存在显著差别。



角砾岩常含花岗斑岩、硅质岩及硫化物矿石角砾等。

(4) 隐爆角砾岩: 以囊状、筒状等产出, 主要分布于岩脉下盘。由中心往外侧, 隐爆角砾岩在物质组成、组构及蚀变特征等方面具有明显分带现象。角砾成分复杂, 有花岗斑岩角砾及灰岩角砾等, 胶结物主要为微细粒石英集合体, 部分为花岗斑岩或碳酸盐。区内可见花岗斑岩、灰岩原地爆破产物(图2a、2b), 也可见被震碎后具有可拼接性的花岗斑岩、

灰岩角砾。被花岗质胶结的花岗斑岩角砾常因被熔蚀而呈浑圆状(图2c), 局部可见隐晶质花岗斑岩角砾有强烈的塑性变形和定向排列现象。蚀变强烈, 有云母化(白云母化、绢云母化)、萤石化、硅化、碳酸盐化及沸石化等, 与铅锌多金属矿化关系密切。因其特殊的空间分布、物质组成、结构构造、热液蚀变特征及与成矿的密切关系, 这类角砾岩有必要深入研究。

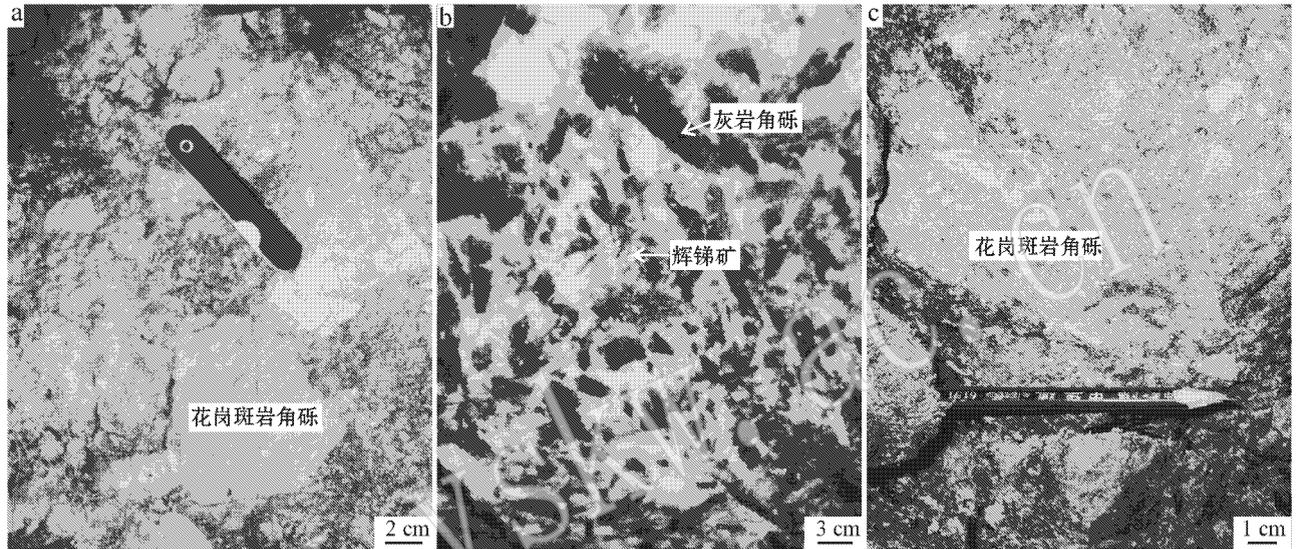


图2 隐爆角砾岩露头照片

Fig. 2 Outcrop photographs of cryptoexplosive breccias

a—花岗斑岩原地爆破产物; b—由沿断裂裂隙贯入的被岩浆加热的地下水引发的灰岩原地爆破产物; c—花岗斑岩角砾被熔蚀的爆破产物, 见萤石化现象

a—breccia resulting from cryptoexplosion of granite porphyry; b—cryptoexplosion of limestone caused by groundwater heated by magma that migrated along the fracture; c—explosive breccia having fluoritization phenomenon with erosional clasts of granite porphyry

## 2.2 隐爆角砾岩研究

在长城岭地区, 隐爆角砾岩沿花岗斑岩与北东向断裂交汇处发育, 主要呈囊状或近似筒状产出, 少量呈透镜状产出。受矿山揭露条件限制, 本文着重研究产于羊犄垄、风吹罗带和长城岭3个区段的隐爆角砾岩。其中, 羊犄垄发育北东向、南北向及北西向三个方向的花岗斑岩脉, 断裂裂隙尤为发育, 在靠近岩体的北东向主断裂与其分支断裂交汇处有透镜状锑矿体产出; 风吹罗带和长城岭仅发育北西向的花岗斑岩脉(墙)。在这3个地段, 隐爆角砾岩在物质组成、组构及矿化蚀变特征方面都具有明显相似性, 且都具有类似的角砾岩分带现象, 可分为爆破相、震碎相以及穿过角砾岩体的破碎带中的混合相(图3a、3b、3c)。

爆破相角砾岩: 分布于隐爆角砾岩体的中心部位。其主要产于花岗斑岩与北东向主断裂交汇处,

部分产于相对远离花岗斑岩, 但与花岗斑岩沟通的北东向主断裂与其分支断裂交汇处。产于花岗斑岩与北东向主断裂交汇处者, 在靠近花岗斑岩一侧, 角砾主要为花岗斑岩角砾, 为具隐晶结构的花岗质胶结或含硫化物硅质胶结。其中, 以具隐晶质结构的花岗质胶结的角砾岩, 角砾成分为花岗斑岩, 少量为灰岩角砾(图4a), 角砾常因被熔蚀而呈浑圆状, 角砾与基质间界限模糊, 角砾粒径多在0.5~6 cm之间, 少量砾径可超过10 cm; 含硫化物硅质胶结的角砾岩, 角砾成分主要为花岗斑岩, 部分为灰岩角砾, 角砾常具有明显的塑性变形和定向排列现象, 局部可见呈花瓣状的强硅化花岗斑岩角砾(图4b), 砾径多介于2~4 cm之间, 范围相对较窄, 沿裂隙面发育萤石化、硅化等。在靠近围岩一侧, 角砾包括花岗斑岩角砾、灰岩角砾及粗晶方解石集合体角砾, 它们主要被含硫化物的硅质胶结, 局部被石英方解石脉胶

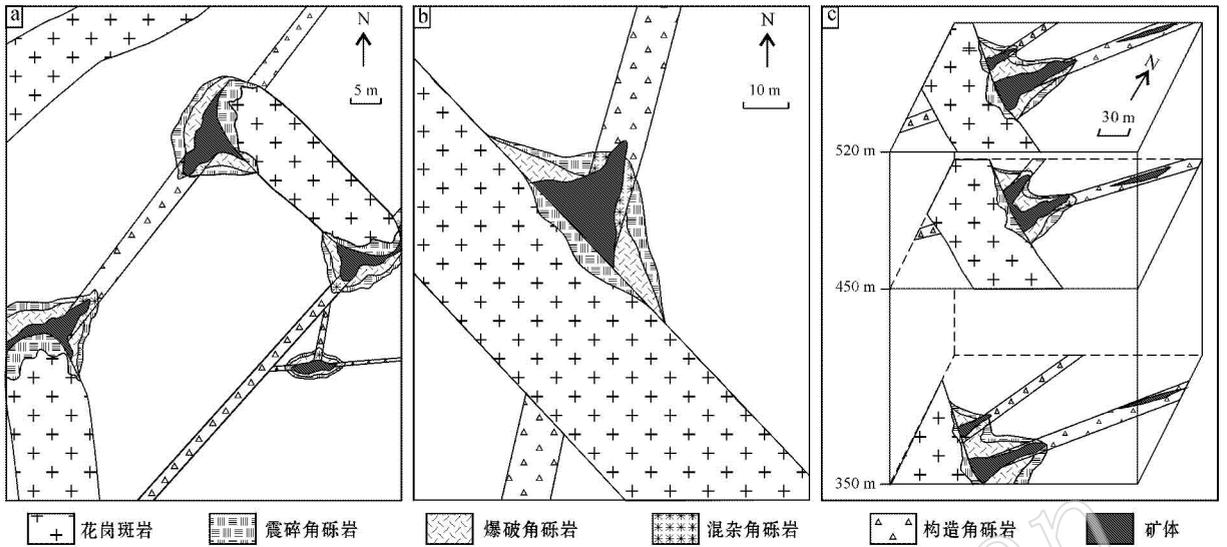


图 3 隐爆角砾岩空间分布特征

Fig. 3 Distribution patterns of cryptoexplosive breccias

a—羊蹄垄隐爆角砾岩 485 m 中段平面产出特征；b—风吹罗带隐爆角砾岩 495 m 中段平面产出特征；c—长城岭隐爆角砾岩空间产出特征  
 a—distribution pattern of cryptoexplosive breccias at 485 m level of Yanguilong；b—distribution pattern of cryptoexplosive breccias at 495 m level of Fengchuiluodai；c—distribution pattern of Changchengling cryptoexplosive breccias

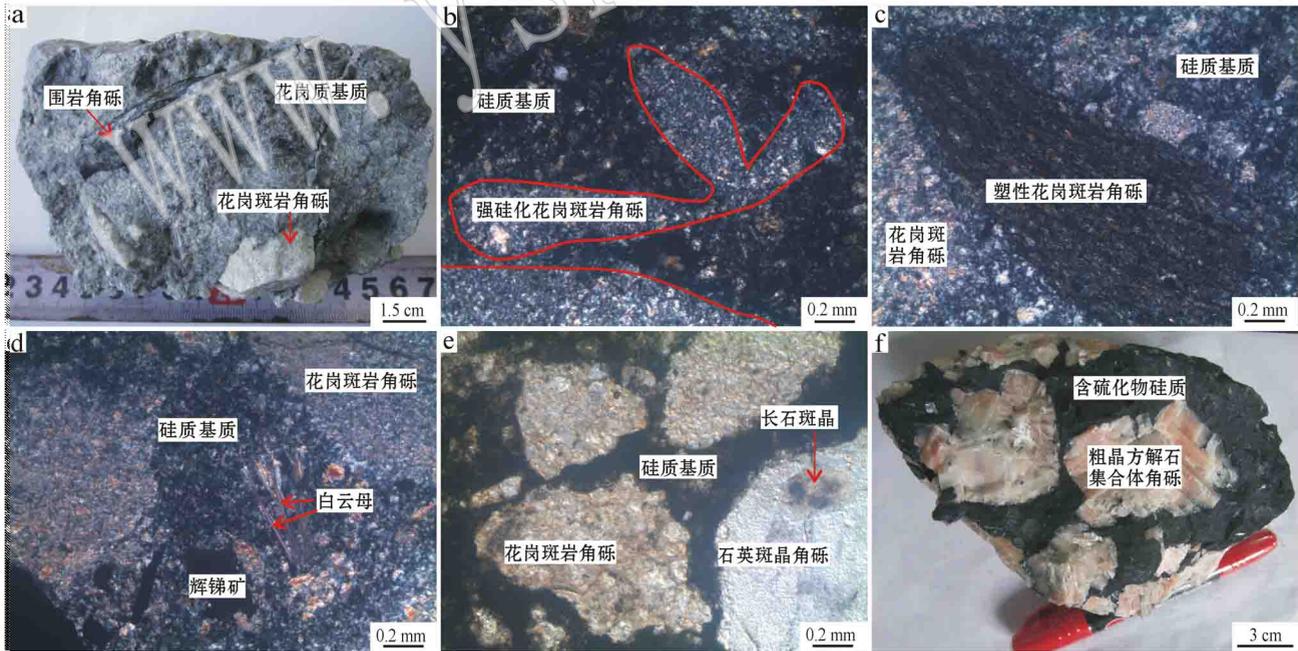


图 4 隐爆角砾岩的手标本及显微照片

Fig. 4 Specimen and microphotograph of cryptoexplosive breccias

a—含围岩角砾岩浆爆破角砾岩；b—呈花瓣状强硅化花岗斑岩角砾(+)；c—塑性花岗斑岩角砾(+)；d—爆破角砾岩基质中的白云母化(+)；  
 e—震碎角砾岩(-)；f—角砾为粗晶方解石集合体的震碎角砾岩  
 a—igneous explosive breccia with clasts of wall rock；b—petal-shaped clast of granite porphyry with strong silicification (+)；c—plastic clasts of granite porphyry (+)；d—muscovite in the matrix of explosive breccia (+)；e—shatter breccia (-)；f—shatter breccia with clasts of coarse-grained calcite vein

结。其中,花岗斑岩角砾多呈棱角状、次棱角状,砾径在2~6 cm之间,也有少量砾径较小者为拉长或扭曲的塑性花岗斑岩角砾(图4c),沿斑岩角砾边缘及其裂隙有石英细脉分布;灰岩角砾多为棱角状、次棱角状,少数因其边缘被熔蚀而圆滑;主要蚀变类型有白云母化(图4d)、萤石化、硅化、绢云母化、碳酸盐化、沸石化、绿泥石化及粘土化等。产于与花岗斑岩沟通的北东向主断裂与其分支断裂交汇处者,角砾成分为灰岩,胶结物主要为含硫化物的微细粒石英集合体,部分为方解石、菱铁矿、铁白云石等结晶碳酸盐矿物集合体。

**震碎相角砾岩:**分布于隐爆角砾岩体的边部,产于花岗斑岩与北东向主断裂交汇处者,靠近花岗斑岩一侧角砾成分为花岗斑岩,靠近围岩一侧角砾成分为灰岩角砾;产于与花岗斑岩沟通的北东向主断裂与其分支断裂交汇处者,角砾成分为灰岩角砾。这两种产出部位震碎角砾岩的共同特征是:角砾棱角清楚,大小悬殊,具有可拼接性(图4e),主要为孔隙-裂隙式胶结,胶结物主要为含硫化物微细粒石英集合体及岩屑等,部分为碳酸盐。局部角砾成分为肉红色粗晶方解石集合体,被含硫化物的硅质胶结(图4f)。

**混合相角砾岩:**是隐爆角砾岩与构造角砾岩叠加复合后的产物,发育在控制隐爆角砾岩系的北东向断裂带内,沿断裂带向远离隐爆角砾岩系方向过渡为构造角砾岩。角砾成分复杂,有花岗斑岩角砾、石英斑晶角砾、灰岩角砾、粗晶方解石集合体角砾及硫化物角砾等,局部含石英砂岩角砾,常见角砾的再次破碎现象。砾径普遍较小,呈次棱角状、次圆状。靠近花岗斑岩一端,胶结物为隐晶质花岗斑岩及岩屑,远离花岗斑岩端,胶结物主要为含硫化物微细粒石英集合体,局部为石英方解石脉。蚀变类型有白云母化、萤石化、硅化及碳酸盐化。

隐爆角砾岩体是囊状、筒状铅锌多金属矿体的主要赋矿部位,但在不同地段,矿化蚀变具有一定差异。羊蹄垄主要发育筒状锑矿体,围岩蚀变主要为硅化、铁白云石化、方解石化(其中部分方解石呈肉红色)等;风吹罗带主要发育透镜状、囊状锑矿体,含浅色闪锌矿,围岩蚀变主要为硅化、白云石化、方解石化,局部萤石化;长城岭花岗斑岩体北西段主要是囊状锑矿体,中段则发育筒状铅锌矿体,铅锌矿段围岩蚀变主要为硅化、萤石化、菱铁矿化及方解石化等。

综合以上隐爆角砾岩特征,其在空间上与花岗斑岩紧密伴生,以囊状或近似筒状等产出,可分为爆破相、震碎相以及穿过角砾岩体的破碎带中的混合相,各角砾岩相在物质组成、岩石组构、蚀变及矿化特征上存在明显的规律性差异,确属隐爆作用产物。综合考虑区内隐爆角砾岩的各方面特征,参照张会琼等(2012)的隐爆角砾岩分类方案,区内隐爆角砾岩系可划分为爆破角砾岩、震碎角砾岩及混杂角砾岩。根据隐爆角砾岩的成因,其又可分为岩浆隐爆角砾岩和热液隐爆角砾岩。

### 3 花岗斑岩地质地球化学特征

隐爆角砾岩是花岗斑岩侵入爆破的产物,与花岗斑岩有着紧密伴生的空间联系。因此,有必要研究区内花岗斑岩的地质地球化学特征。

#### 3.1 岩相学特征

长城岭地区花岗斑岩脉(墙)主要沿北东向、北西(西)向及近南北向三组断裂产出,灰白色,常因蚀变而呈黄绿色,斑状结构,块状构造,解理裂隙发育。斑晶为钾长石、石英和黑云母,随岩浆分异结晶和蚀变程度不同,斑晶含量与各矿物所占比例不同,基质为显微晶质结构、显微嵌晶结构及隐晶质结构等。石英斑晶中裂隙发育,常发育未穿透斑晶且呈花瓣状的裂隙,包含有磷灰石、气液两相包裹体及长石等包裹体,其边缘常发育重结晶现象。长石斑晶的蚀变有白云母化、绢云母化、硅化、碳酸盐化及强烈粘土化等。黑云母褪色蚀变强烈,部分蚀变为白云母,裂隙较为发育(图5a)。副矿物含量低,主要为磷灰石、电气石、金红石,少量为锆石、榍石及褐帘石。较深部岩体基质中常含石榴子石、透闪石等。区内花岗斑岩普遍发育萤石化、硅化、碳酸盐化、伊利石化及叶蜡石化等。萤石主要以脉状沿花岗斑岩的裂隙分布(图5b),局部形成强萤石化花岗斑岩。在靠近断裂带的岩体边缘部位,常见隐晶质基质沿裂隙灌入显微晶质基质中(图5c),说明岩浆固结成岩期间发生了隐爆作用。

#### 3.2 主量元素特征

如表1所示,花岗斑岩的 $\text{SiO}_2$ 含量为70.88%~76.01%,平均值为73.95%,从QAP图解中可以看出,其主要为富石英花岗岩,个别样落在碱长花岗岩区(图6); $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量为4.24%~5.41%,含量值偏低;里特曼指数 $\sigma$ 为0.6~1.03,属钙碱性系

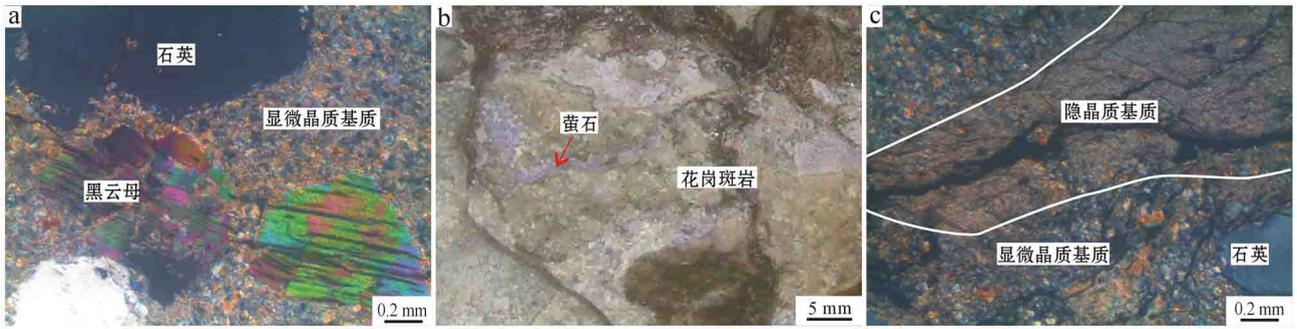


图5 花岗斑岩的露头及显微照片

Fig. 5 Outcrop and microphotographs of granite porphyries

a—花岗斑岩显微照片(+); b—花岗斑岩的萤石化现象; c—隐晶质基质沿裂隙贯入显微晶质基质(+)

a—microphotograph of granite porphyry(+); b—granite porphyry developed with fluorite; c—microaphanite matrix filling fractures of microcrystalline matrix(+)

表1 花岗斑岩的主量元素分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 1 Major element compositions of granite porphyry

编号	长城岭花岗斑岩体			风吹罗带花岗斑岩体		羊蹄壑花岗斑岩体		平均值	华南燕山早期 花岗岩平均值
	K31	K32	K53	K77	K78	Y23	Y27		
SiO <sub>2</sub>	72.56	74.72	73.65	74.34	70.88	75.52	76.01	73.95	73.25
TiO <sub>2</sub>	0.032	0.032	0.03	0.016	0.025	0.021	0.066	0.032	0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.4	14.11	14.51	15.8	16.96	14.34	14.3	15.06	13.59
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.06	1.01	0.82	0.56	0.69	0.88	1.42	0.92	0.65+1.51*
MnO	0.12	0.12	0.13	0.11	0.12	0.1	0.05	0.11	0.07
MgO	0.75	0.82	0.82	0.83	1.03	0.78	0.69	0.81	0.45
CaO	1.04	0.97	1.09	0.20	0.35	0.21	0.05	0.56	1.02
Na <sub>2</sub> O	0.35	0.36	0.54	0.42	0.33	0.18	0.21	0.34	3.39
K <sub>2</sub> O	3.89	4.13	3.92	4.58	5.08	4.29	4.39	4.32	4.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.17	0.08	0.30	0.27	0.16	0.11	0.17	0.06
S/10 <sup>-6</sup>	285.4	205.1	192.0	201.0	263.2	162.4	79.0	153.1	
L.O.I	4.47	3.81	4.27	3.26	4.28	3.45	2.59	3.73	
A/CNK	2.31	2.07	2.04	2.63	2.54	2.70	2.75	2.43	
ALK	4.24	4.49	4.46	5.00	5.41	4.47	4.60	4.67	8.14
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	11.11	11.47	7.26	10.90	15.39	23.83	20.90	14.41	1.40
SI	12.5	13.08	13.55	13.04	14.51	12.83	10.36	12.84	
σ	0.60	0.63	0.64	0.79	1.03	0.61	0.64	0.71	

注: ①分析测试单位: 湖南建材与非金属测试利用研究所; 实验依据: GB/T14506-2010 硅酸盐化学分析方法; 测试仪器: ICP6300 电感耦合等离子体发射光谱仪; 测试时间: 2013年4月; ②\*为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO。

列; K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 在 7.26~23.83 之间, 平均值为 14.41, 表现出明显富钾的特征, 且变化范围较大; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 0.08%~0.30%, 平均值为 0.17%, 含量较高; S 含量为  $79 \times 10^{-6} \sim 285.4 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $153.1 \times 10^{-6}$ , 相对较富; A/CNK 为 2.04~2.75, 说明花岗斑岩铝饱和程度高; 固结指数 SI 值在 10.36~14.51 之间, 反应岩浆的分异程度较高。与华南燕山早期花岗岩的平均值相比较(南京大学地质系, 1981), 长城岭地区的花岗斑岩酸度相对偏高, 碱度

偏低, 属过铝质、高钾钙碱性岩系。

### 3.3 稀土元素特征

如表 2 所示, 长城岭地区花岗斑岩的稀土元素总量为  $15.66 \times 10^{-6} \sim 54.89 \times 10^{-6}$ , (La/Yb)<sub>N</sub> 值为 1.61~2.4, 轻稀土相对富集。δCe=0.73~0.91, 具有较弱的负铈异常。球粒陨石标准化稀土元素分布模式图如图 7 所示, 具有明显的四分组效应和强烈的 Eu 亏损, δEu=0.07~0.13。除个别样的 Y/Ho 值为 26.84, Y/Ho 值集中分布在 31.66~40.50

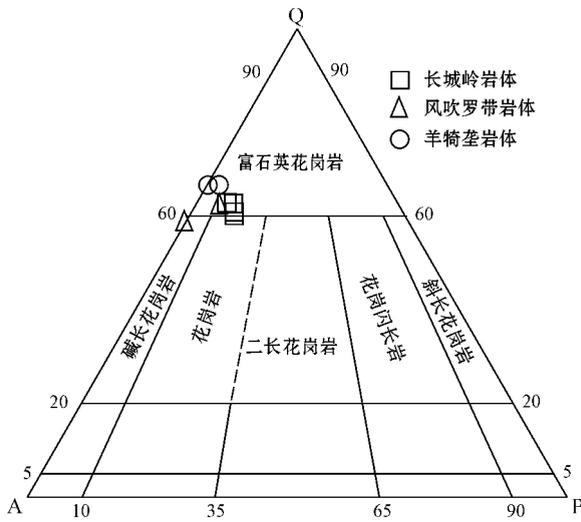


图 6 花岗斑岩 QAP 图解(据 Streckeisen *et al.*, 1979)

Fig. 6 QAP classification diagram of granite porphyries  
(after Streckeisen *et al.*, 1979)

之间, 高于 28, 反映区内花岗质岩浆是一种受高演化的富挥发份  $H_2O$ 、Li、B、F、P 和或 Cl 的岩浆 (Bau, 1996)。与湘南钨锡多金属矿化集中区其他地段酸性斑岩的稀土元素特征相比 (图 7) (郑基俭等, 2002), 长城岭花岗斑岩的稀土元素特征具有以下 3

个最为突出的特点, 即极低的稀土元素总量, 强烈的 Eu 亏损和明显的四分组效应, 反映区内花岗质岩浆存在富挥发分 (F、Cl) 流体与溶体的强烈相互作用 (王中刚等, 1989; 刘丛强等, 2003)。

### 3.4 成矿元素富集特征

长城岭地区花岗斑岩、隐爆角砾岩的成矿元素含量如表 3 所示, 除 Cu 外, 区内花岗斑岩中 W、Sn、Pb、Zn、Sb 等成矿元素的富集系数均大于 1, 特别是 Sn、Sb 的富集系数分别高达 25.6 和 228.46。相比于华南燕山早期花岗岩, 区内花岗斑岩尤其富集 Sn、Pb、Zn、Sb 等成矿元素, 具有良好的含矿性。区内隐爆角砾岩中成矿元素的富集与花岗斑岩有着极为密切的物源联系。

长城岭地区花岗斑岩中广泛发育萤石化、碳酸盐化、黄铁矿化, 石英斑晶含有大量磷灰石和气液两相包裹体, 且气液两相包裹体在常温下的气液比小于 10%, 结合花岗斑岩的地球化学特征, 认为区内花岗斑岩由一套富含水蒸气、 $CO_2$  及含 F、Cl、S 等挥发份的过铝质偏酸性花岗质岩浆结晶而成。区内花岗斑岩属高钾钙碱性系列的富石英花岗岩类, 铝饱和程度高, 富 P、K 等, 稀土总量极低, 在岩浆侵位过程中存在流体与溶体的相互作用, 具备隐爆的基本条

表 2 花岗斑岩稀土元素 ( $w_B/10^{-6}$ ) 及相关参数

Table 2 Trace element compositions ( $w_B/10^{-6}$ ) of granite porphyry

编号	长城岭花岗斑岩体			风吹罗带花岗斑岩体		羊蹄垄花岗斑岩体	
	K31	K32	K53	K77	K78	Y23	Y27
La	4.43	4.36	5.76	3.15	2.95	4.14	11.2
Ce	7.54	7.06	11.70	4.64	4.74	7.05	17.60
Pr	1.24	1.20	1.69	0.71	0.77	1.19	2.76
Nd	3.57	3.54	5.29	2.26	2.3	3.49	8.34
Sm	1.72	1.72	2.15	0.78	1.00	1.36	2.73
Eu	0.05	0.04	0.07	0.03	0.03	0.06	0.10
Gd	1.77	1.75	2.10	0.81	0.86	1.30	3.11
Tb	0.49	0.51	0.56	0.23	0.26	0.35	0.89
Dy	0.68	0.92	0.88	1.07	0.94	1.76	0.40
Ho	0.42	0.44	0.47	0.20	0.19	0.25	0.90
Er	1.05	1.24	1.41	0.54	0.57	0.76	2.65
Tm	0.23	0.25	0.26	0.11	0.12	0.16	0.48
Yb	1.77	1.95	2.15	0.98	1.13	1.33	3.33
Lu	0.22	0.24	0.27	0.15	0.15	0.18	0.45
Y	11.20	13.90	15.60	6.40	7.49	8.67	31.12
$\Sigma$ REE	25.16	25.22	34.77	15.66	16.01	23.37	54.89
LREE/HREE	2.80	2.46	3.29	2.83	2.80	2.83	3.50
$(La/Yb)_N$	1.79	1.61	1.92	2.30	1.88	2.23	2.40
Y/Ho	26.84	31.66	33.07	32.41	40.50	34.53	34.76
$\delta$ Ce	0.78	0.74	0.91	0.73	0.75	0.77	0.75
$\delta$ Eu	0.09	0.07	0.09	0.11	0.10	0.13	0.10

注: 测试单位: 长沙核工业二三〇研究所分析测试中心; 检测方法: GB/T14506.30-2010; 测试仪器: 电感耦合等离子质谱 (ICP-MS); 测试时间: 2013 年 5 月。

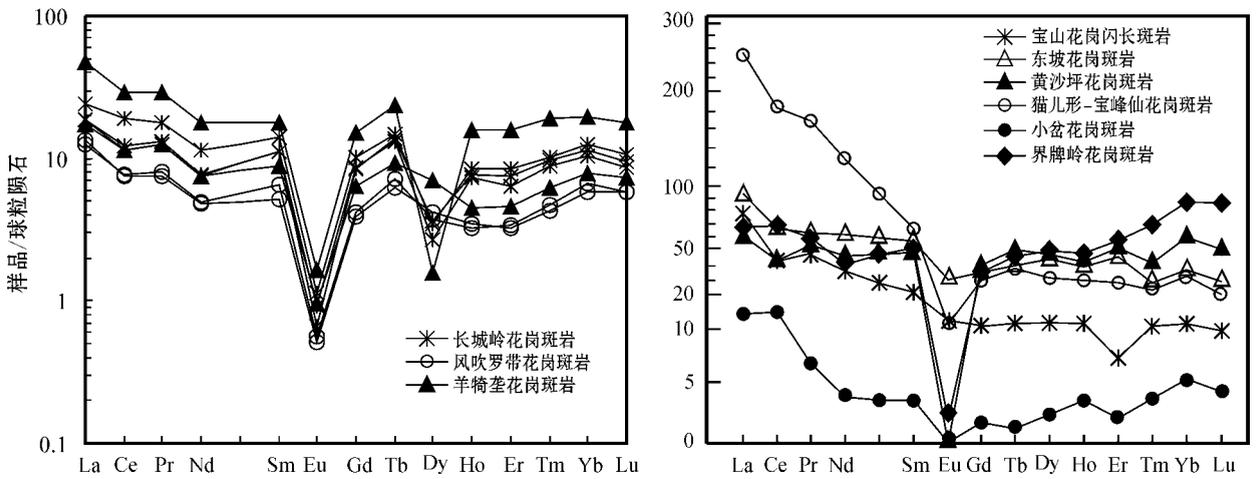


图7 长城岭花岗斑岩(a)与湘南其他地段酸性斑岩(b,据郑俭基等,2002)的稀土元素配分模式图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of the Changchengling granite porphyries (a) and acid porphyries in south Hunan Province (b, modified after Zheng Jianji *et al.*, 2002)

表3 矿区花岗斑岩与隐爆角砾岩的成矿元素含量

$w_B/10^{-6}$

Table 3 Ore-forming element content of granite porphyry and cryptoexplosive breccias

岩性(样品数)	隐爆角砾岩(2)		花岗斑岩(7)		华南燕山早期花岗岩(夏宏远等,1991)		花岗岩类 (维氏值)
	$\bar{X}$	K	$\bar{X}$	K	$\bar{X}$	K	
W	9.67	6.45	1.88	1.25	10.20	6.80	1.50
Sn	10.95	3.65	76.80	25.60	22.90	7.63	3.00
Pb	75.00	3.75	64.30	3.22	21.05	1.05	20.00
Zn	39.05	0.65	315.20	5.25	14.20	0.24	60.00
Cu	11.80	0.59	7.22	0.36	16.00	0.80	20.00
Sb	48.30	85.77	59.40	228.46			0.26

注:分析测试单位:湖南建材与非金属测试利用研究所;实验依据:JC/T1021-2007 非金属矿物和岩石化学分析方法;测试仪器:ICP6300 电感耦合等离子体发射光谱仪; $\bar{X}$ —平均值;K—富集系数;测试时间:2013年4月。

件和明显的隐爆特征。区内花岗斑岩明显富集 Sn、Pb、Zn、Sb 等成矿元素,为隐爆角砾岩中成矿元素的富集提供了物源条件。

## 4 讨论

### 4.1 隐爆作用机制

受热的流体和气体在一定条件下均可引发隐爆作用,而受热的流体和气体既可以是岩浆来源的,也可以是岩浆和外来水的混合,还可以是被岩浆加热后的地下水(Sillitoe, 1985;章增凤, 1991;张会琼等, 2012;宋世伟等, 2013)。国内外学者对于岩浆热液隐爆角砾岩型矿床做了大量的研究,多数采用 Burnham(1985)提出的岩浆流体减压爆发模式解释隐爆角砾岩的形成机制(黄定华等, 1997;Breiter, 2002;刘继顺等, 2005;Davies *et al.*, 2008)。长城

岭地区发育燕山早期沿断裂侵入的富含挥发分、流体-溶体相互作用强烈的浅成花岗斑岩。区内不仅存在角砾和胶结物成分均为花岗斑岩的爆破角砾岩,且存在灰岩爆破形成的胶结物为石英方解石的爆破角砾岩。根据隐爆角砾岩特征和花岗斑岩的地质地球化学特征,结合区内地质特征,作者认为长城岭地区的隐爆作用主要由岩浆流体减压导致,但也存在由被岩浆加热后的地下水导致的爆破作用。当富含挥发分的花岗质岩浆沿断裂侵入到距离地表较近的与北东向断裂交汇部位时,其前峰冷凝结晶,形成相对封闭空间,处于一个低围岩压力的环境中。岩浆中  $H_2O$  的溶解度随压力降低而降低(Holtz *et al.*, 2001),再者由于岩浆的结晶,岩浆中  $H_2O$  的溶解度也进一步降低(Candela, 1997),随即发生所谓的二次沸腾,岩浆与围岩之间的压力梯度迅速增大,导致了岩浆爆破作用的发生。岩浆爆破作用之后逃

逸出来的气液组分、热能混合围岩裂隙水沿断裂裂隙运移,当热液流体到达与花岗斑岩沟通的北东向主断裂与其分支断裂交汇处等相对开阔空间时,发生流体减压沸腾,再次导致爆破作用的发生。因此,本区不仅存在岩浆爆破作用,而且存在热液爆破作用,隐爆作用形成了一套隐爆角砾岩系和热液蚀变产物。

#### 4.2 找矿意义

南岭地区中生代大规模有色金属成矿作用与该地区广泛发育且强烈的花岗质岩浆活动有密切关系(华仁民等, 2005; 毛景文等, 2007; 陈骏等, 2008)。钨锡多金属矿床主要与高度分异演化的晚阶段小岩体有关,这些晚阶段小岩体的稀土元素含量通常很低,副矿物含量也较低(华仁民等, 2007)。湘南钨锡多金属矿集区是南岭中段多金属成矿带的重要组成部分,中生代构造岩浆活动强烈,分布有许多大型、超大型矿床(邓希光等, 2005; 彭建堂等, 2008)。长城岭地区花岗斑岩体为中生代形成的经高度演化的晚阶段小岩体,稀土总量极低,富集钨锡等成矿元素,具备了极其有利的成矿条件。花岗斑岩的侵入及其隐爆作用为成矿流体提供了热能、金属元素及富含  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $CO_3^{2-}$  的矿化剂。隐爆作用形成的断裂裂隙为含矿热液的运移创造了有利条件,同时隐爆角砾岩体是区内重要的赋矿部位,矿化主要发生于隐爆角砾岩的基质中。在湘南宝山、界牌岭等存在隐爆角砾岩的地区,地表主要出露酸性斑岩脉(墙),而深部则有呈岩株状产出的花岗岩体(伍光英等, 2005; 路远发等, 2006; 刘悟辉等, 2006; 卢友月等, 2013)。根据区内花岗斑岩的岩相学、岩石地球化学及含矿性特征,结合南岭中段地区钨锡多金属矿床的成矿条件,可以预期长城岭地区深部具备寻找新矿化类型甚至新矿种的潜力。在南岭中段,特别是湘南地区,酸性斑岩发育,主要以岩脉、岩墙产出。因此,长城岭地区与铅锌多金属成矿关系密切的花岗质岩浆隐爆作用的发现及隐爆角砾岩存在的证实对湘南乃至南岭中段地表仅有酸性斑岩脉出露地区今后的找矿具有重要意义。

## 5 结论

(1) 长城岭地区燕山早期晚阶段侵入的浅成花岗岩斑岩属富石英花岗岩类,铝饱和程度高,全碱含量较低,钾钠比较高,且变化范围较大,富含挥发分、成

矿元素,流体-熔体相互作用强烈,具有利的隐爆作用条件,也显示出明显的隐爆特征。相比于湘南钨锡多金属矿化集中区其他地段酸性斑岩的稀土元素特征,长城岭花岗斑岩的稀土元素总量低、Eu 亏损强烈,具有明显的四分组效应。与华南燕山早期花岗岩相比,长城岭花岗斑岩具有酸度偏高、碱度偏低、相对富钾贫钠、成矿元素更加富集的特点。

(2) 按照隐爆机理的不同,区内的隐爆作用可分为岩浆隐爆作用和热液隐爆作用。隐爆角砾岩体以囊状或近似筒状产出,并可分为爆破角砾岩、震碎角砾岩和混杂角砾岩。隐爆作用伴随的热液蚀变有白云母化、萤石化、硅化、绢云母化、沸石化、碳酸盐化、绿泥石化,局部有矽卡岩化。

(3) 伴随隐爆作用,岩浆热液活动为成矿元素富集提供了充分的物源和流体来源。隐爆角砾岩体是区内铅锌多金属成矿流体汇聚场所和重要赋矿部位。强烈富集 Sn、Pb、Zn、Sb 等成矿元素的长城岭地区花岗斑岩及其隐爆作用与铅锌多金属成矿的密切成因联系为该地区深部新类型、新矿种找矿提供了重要信息。

(4) 长城岭地区具有极佳的区域地质成矿背景。区内花岗斑岩隐爆作用及其与铅锌多金属成矿关系的发现与证实,对湘南乃至南岭中段地区没有大规模燕山期花岗岩体出露、但酸性斑岩脉发育地区的找矿具有重要价值。

## References

- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 323~333.
- Breiter K. 2002. From explosive breccia to unidirectional solidification textures: magmatic evolution of a phosphorus- and fluorine-rich granite system [J]. *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 77(2): 67~92.
- Burnham C W. 1985. Energy release in subvolcanic environments: implications for Breccia Formation [J]. *Economic Geology*, 80(6): 1515~1522.
- Candela P A. 1997. A review of shallow, ore-related granites: textures, volatiles and ore metals [J]. *Journal of Petrology*, 38(12): 1619~1633.
- Chen Jun, Lu Jianjun, Chen Weifeng, et al. 2008. W-Sn-Nb-Ta-bearing granites in the Nanling range and their relationship to metallo-

- genesis[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 459~473 (in Chinese with English abstract).
- Davies A G S, Cooke D R, Gemmell J B, *et al.* 2008. Diatreme breccias at the Kelian gold mine, Kalimantan, Indonesia: Precursors to epithermal gold mineralization[J]. *Economical Geology*, 103: 689~716.
- Deng Xiguang, Li Xianhua, Liu Yimao, *et al.* 2005. Geochemical characteristics of Qitianling granites and their implications for mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(2): 93~103 (in Chinese with English abstract).
- Holtz F, Johannes W, Tamic N, *et al.* 2001. Maximum and minimum water contents in granitic melts generated in the crust: a reevaluation and implications[J]. *Lithos*, 56: 1~14.
- Hu Chengqi, Feng Zuohai, Wang Linjiang, *et al.* 1997. Study on the features of intermediate-acid cryptoexplosion breccia and subvolcanic rocks (ultra-hypabyssal rocks) and their relation with mineralization[J]. *Geology and Prospecting*, 33(4): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, *et al.* 2005. Metallogenesis and their geodynamic settings related to mesozoic granitoids in the Nanling range[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 291~304.
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Gu Shengyan, *et al.* 2007. Comparison between REE granite and W-Sn granite in the Nanling region, South China, and their mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2321~2328 (in Chinese with English abstract).
- Huang Dinghua, Xiang Shuyuan, Zhu Yunhai, *et al.* 1997. Cryptoexplosive mechanics and its significance for mechanism of mineralization[J]. *Geological Science and Technology Information*, 16(1): 77~80 (in Chinese with English abstract).
- Huang Gefei, Gong Shuqing, Jiang Xiwei, *et al.* 2003. Exploration on the ore-forming regularities of tin deposits in Qitianling area, southern Hunan[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 445~451 (in Chinese with English abstract).
- Landtwing M R, Dillenbeck E D, Leake M H, *et al.* 2002. Evolution of the Breccia-Hosted Porphyry Cu-Mo-Au Deposit at Agua Rica, Argentina: Progressive Unroofing of a Magmatic Hydrothermal System[J]. *Economic Geology*, 97(6): 1273~1292.
- Li Yinqi, Li Zilong, Sun Yali, *et al.* 2010. PGE and geochemistry of Wajilitag ultramafic cryptoexplosive brecciated rocks from Tarim Basin: Implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3307~3318 (in Chinese with English abstract).
- Lin Shuping, Liu Sha, Wang Chunlong, *et al.* 2012. Locating the cryptoexplosion center at erniaogou Cu polymetallic deposit in the Zijin ore field and its geological implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(3): 450~456 (in Chinese with English abstract).
- Liu Congqiang and Zhang Hui. 2003. Geochemical behavior of incompatible elements in peraluminous magmatic system and its mechanism-fractionation of the coherent elemental pairs and the lanthanide tetrad effect in granitic magmas: implications for melt-fluid interaction[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 648~660 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiayuan. 2001. Magmatic crypto-explosion, explosive breccia and its mineralization significance in Laoshankou of Qinghe, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 19(4): 241~245 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jishun, Ma Guang and Shu Guanglong. 2005. Discovery of cryptoexplosive breccia type Cu(Au) orebodies in Tonglushan skarn-type Cu-Fe deposit of Hubei Province and ore-searching vista[J]. *Mineral Deposits*, 24(5): 527~536 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wuhui, Li Hailong, Li Yi, *et al.* 2006. Geological, Geochemical characteristics of the Jiepailing tin deposit and its genetic type[J]. *Mineral Resources and Geology*, 20(4~5): 327~333 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Li Tingdong, Xiao Qinghui, *et al.* 2012. Formation epoch and origin of the Yizhang andesite, diabase and granite-porphyry in Yizhang County, Southern Hunan Province: Zircon U-Pb age and Hf isotopes[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(9): 1363~1377 (in Chinese with English abstract).
- Lu Youyue, Fu Jianming, Cheng Shunbo, *et al.* 2013. SHRIMP Zircon U-Pb geochronology of the ore-bearing granite porphyry in the Jiepailing tin-polymetallic deposit, southern Hunan province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 29(3): 199~206 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa, Ma Liyan, Qu Wenjun, *et al.* 2006. U-Pb and Re-Os isotope geochronology of Baoshan Cu-Mo polymetallic ore deposit in Hunan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2483~2492 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, *et al.* 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanjing region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329~2338.
- Melluso L, Morra V, Perrotta A, *et al.* 1995. The eruption of the breccia Museo (Campi Flegrei, Italy): fractional crystallization processes in a shallow, zoned magma chamber and implications for the eruptive dynamics[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 68(4): 325~339.
- Meng Fanchao, Liu Jialin and Cui Yan. 2013. Petrogenesis and cryptoexplosive mechanism of trachyte in Yingcheng formation of Xujiawei fault depression, Songliao basin, NE China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(3): 704~715 (in Chinese with English abstract).

- Norton D L and Cathles L M. 1973. Breccia Pipes Products of Exsolved Vapor from Magma[J]. *Economic Geology*, 68: 540~546.
- Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Yuan Shunda, *et al.* 2008. The time ranges of granitoid emplacements and related nonferrous metallic mineralization in south Hunan[J]. *Geological Review*, 54(5): 617~625 (in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Zhang Guilin and Zhang Dequan. 2005. Geological and geochemical characteristics and genesis of Chenjiazhangzi cryptoexplosive breccia pipe gold deposit, Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 24(4): 373~387.
- Sillitoe R H. 1985. Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs[J]. *Economic Geology*, 80(6): 1467~1514.
- Song Shiwei, Zhang Chengjiang and Huang Xiaodong. 2012. A study on ore-forming process of the hydrothermal cryptoexplosive breccia[J]. *Geological Journal of China Universities*, (19) supplement: 234~235 (in Chinese).
- Streckeisen A and Le Maitre R W. 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks[J]. *Neues Jahrb Mineral Abh*, 136: 169~206.
- The Geology Department of Nanjing University. 1981. The Different Dating Granitoids and Their Relations to Mineralization in South China[M]. Beijing: Science Press: 213~219 (in Chinese).
- Wallier S, Rey R, Kouzmanov, *et al.* 2006. Magmatic fluids in the breccia-hosted epithermal Au-Ag deposit of Rosia Montana, Romania[J]. *Economic Geology*, 101: 923~954.
- Wang Zhaobo. 2001. Discussion of cryptoexplosive rocks and the formation mode[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 16(3): 201~205.
- Wang Zhonggang, Yuxueyuan, ZhaoZhenhua, *et al.* 1989. Geochemistry of Rare Earth Elements[M]. Beijing: Science Press, 88~93 (in Chinese).
- Wu Guangying, Ma Tiejie, Bai Daoyuan, *et al.* 2005. Petrological and geochemical characteristics of granodioritic cryptoexplosion breccia and zircon SHRIMP dating in the Baoshan Area, Hunan Province[J]. *Geoscience*, 19(2): 198~204 (in Chinese with English abstract).
- Xia Hongyuan and Liang Shuyi. 1991. The Genetic Series of Mineral Deposits of Tungsten, Tin, Rare Metal in South China[M]. Beijing: Science Press, 19~23 (in Chinese).
- Zhang Bangtong, Chen Peirong, Chen Diyuan, *et al.* 2002. More on pneumatothermal fluid leaching metallogenic mechanism of felsic cryptoexplosive breccia: stable isotopic geochemical evidence of cryptoexplosive breccia type uranium deposits[J]. *Mineral Deposits*, 21(3): 256~263 (in Chinese with English abstract).
- 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 Huiqiong, Wang Jingbin and Wang Yuwang. 2012. A study on lithofacies zonation of crypto-explosive breccia pipe in zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit, Lingqiu county, northeastern Shanxi province, and its exploration significance[J]. *Geological Review*, 58(6): 1046~1055 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jijian, Jia Baohua, Sun Haiqing, *et al.* 2002. Ages and metallogenic specialization for acidic porphyries in Chengzhou-Guiyang, South Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 102~108 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 等. 2008. 南岭地区钨锡铋钽花岗岩及其成矿作用[J]. *高校地质学报*, 14(4): 459~473.
- 邓希光, 李献华, 刘义茂, 等. 2005. 骑田岭花岗岩体的地球化学特征及其对成矿的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(2): 93~102.
- 胡承绮, 冯佐海, 王林江, 等. 1997. 中酸性隐爆角砾岩、次火山(超浅成)岩与成矿的关系[J]. *地质与勘探*, 33(4): 1~6.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. *高校地质学报*, 11(3): 291~304.
- 华仁民, 张文兰, 顾晟彦等. 2007. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比[J]. *岩石学报*, 23(10): 2321~2328.
- 黄定华, 向树元, 朱云海, 等. 1997. 中浅成岩浆的隐爆机制及其成矿动力学意义[J]. *地质科技情报*, 16(1): 77~80.
- 黄革非, 龚述清, 蒋希伟, 等. 2003. 湘南骑田岭锡矿成矿规律探讨[J]. *地质通报*, 22(6): 445~451.
- 励音骥, 厉子龙, 孙亚莉, 等. 2010. 塔里木瓦吉里塔格超镁铁质隐爆角砾岩铂族元素和微量元素地球化学特征及其岩石成因探讨[J]. *岩石学报*, 26(11): 3307~3318.
- 林书平, 刘莎, 王春龙, 等. 2012. 紫金山矿田二庙沟铜多金属矿点隐爆角砾岩活动中心的厘定及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 36(3): 450~456.
- 刘丛强, 张辉. 2003. 过铝质岩浆体系中不相容元素的地球化学行为及机理—元素对分异和稀土元素“四重效应”及其对流体作用过程的指示意义[J]. *高校地质学报*, 9(4): 648~660.
- 刘家远. 2001. 新疆清河老山口地区岩浆隐蔽爆破作用、爆破角砾岩及成矿意义[J]. *新疆地质*, 19(4): 241~245.
- 刘继顺, 马光, 舒广龙. 2005. 湖北铜绿山砂卡岩型铜铁矿床中隐爆角砾岩型金(铜)矿体的发现及其找矿前景[J]. *矿床地质*, 24(5): 527~536.
- 刘悟辉, 李海龙, 李毅, 等. 2006. 界牌岭锡矿床地质、地球化学特征及成因类型[J]. *矿产与地质*, 20(4~5): 327~333.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等. 2012. 湘南宜章地区辉绿岩、花岗岩斑岩、安山岩的形成时代和成因[J]. *地质通报*, 31(9): 1363~1377.

- 卢友月,付建明,程顺波,等. 2013. 湘南界牌岭锡多金属矿床含矿花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 华南地质与矿产, 29(3): 199~206.
- 路远发,马丽艳,屈文俊,等. 2006. 湖南宝山铜钨多金属矿床成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2483~2492.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用:成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329~2338.
- 孟凡超,刘嘉麒,崔岩. 2013. 松辽盆地徐家围子断陷营城组粗面岩成因与隐爆机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(3): 704~715.
- 南京大学地质学系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系[M]. 科学出版社, 213~219.
- 彭建堂,胡瑞忠,袁顺达,等. 2008. 湘南中生代花岗质岩石成岩成矿的时限[J]. 地质论评, 54(5): 617~625.
- 余宏全,张桂兰,张德全,等. 2005. 赤峰陈家杖子隐爆角砾岩型金矿床地质地球化学特征与成因[J]. 矿床地质, 24(4): 373~387.
- 宋世伟,张成江,黄小东. 2013. 热液隐爆角砾岩成矿过程分析[J]. 高校地质学报, (19)增刊: 234~235.
- 王照波. 2001. 隐爆岩及其形成模式探讨[J]. 地质找矿论丛, 16(3): 201~205.
- 王中刚,于学元,赵振华,等. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 科学出版社, 88~93.
- 伍光英,马铁球,柏道远,等. 2005. 湖南宝山花岗岩闪长质隐爆角砾岩的岩石学、地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 现代地质, 19(2): 198~204.
- 夏宏远,梁书艺. 1991. 华南钨锡稀有金属花岗岩矿床成因系列[M]. 科学出版社: 19~23.
- 章邦桐,陈培荣,陈迪云,等. 2002. 再论长英质隐爆角砾岩的气热流体熔浸成矿机制-隐爆角砾岩型铀矿床的稳定同位素地球化学证据[J]. 矿床地质, 21(3): 256~263.
- 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.
- 张会琼,王京彬,王玉往. 2012. 山西灵丘支家地铅锌银矿隐爆角砾岩筒的岩相分带性研究及其勘查意义[J]. 地质论评, 58(6): 1046~1055.
- 郑基俭,贾宝华,孙海清,等. 2002. 湘南郴桂地区酸性斑岩的时代划分及成矿专属性[J]. 华南地质与矿产, 3: 102~108.