

云南姚安铅银矿床假白榴石斑岩空间分布和组构特征

孙春迪¹, 吴鹏¹, 王蝶¹, 管申进¹, 江小均¹, 姜龙燕², 王建飞¹

(1. 昆明理工大学 有色金属矿产地质调查中心 西南地质调查所, 云南 昆明 650093; 2. 悦达矿业控股有限公司, 云南 昆明 650093)

摘要: 姚安铅银矿床位于金沙江-哀牢山断裂带东侧的富碱斑岩带内, 主要发育正长斑岩、粗面岩、假白榴石斑岩、含斑正长细晶岩等一套杂岩体, 其中正长斑岩为主要容矿围岩。通过野外地质勘查、显微镜鉴定、电子探针及X射线微区衍射分析, 对假白榴石斑岩的空间分布、岩石矿物学特征进行了综合研究, 结果表明, 姚安铅银矿床假白榴石斑岩多以脉状、角砾状或呈小岩枝产出, 出露在正长斑岩质火山角砾岩的外围, 主要分布在角砾岩型铅银矿(化)体的南西侧、F₄断裂的北东盘, 在空间上与角砾岩筒及外围断裂有关; 该矿床的假白榴石具两个世代, 早期为灰绿色浑圆粒状假白榴石斑岩的假白榴石斑晶, 富Al, 晚期为灰-灰白色四角三八面体假白榴石斑岩的假白榴石斑晶, 富Si、Na, 二者均蚀变成钾长石、高岭石、石英等含水富硅矿物; 姚安假白榴石斑岩形成于印度板块与欧亚大陆俯冲碰撞后的板内拉张环境; 假白榴石斑岩形成晚于粗面岩、正长斑岩, 早于含斑正长细晶岩; 假白榴石斑岩与铅银矿(化)体无直接成因联系。

关键词: 假白榴石斑岩; 组构特征; 空间分布; 铅银矿床; 云南姚安

中图分类号: P588.13; P578.968

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)06-0991-12

Spatial distribution and fabric features of pseudoleucite porphyry from the Yao'an Pb-Ag deposit in Yunnan Province

SUN Chun-di¹, WU Peng¹, WANG Die¹, GUAN Shen-jin¹, JIANG Xiao-jun¹, JIANG Long-yan² and WANG Jian-fei¹

(1. Southwest Institute of Geological Survey, Geological Survey Center for Non-ferrous Mineral Resources, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yueda Mining Holdings Limited, Kunming 650093, China)

Abstract: There exists a suite of complex porphyries in the Yao'an Pb-Ag deposit, such as syenite porphyry, trachyte, pseudoleucite porphyry, and phenocryst-bearing syenite aplite, with the syenite porphyry being the host rock. Through an integrated study of the spatial distribution and petrological and mineralogical characteristics of pseudoleucite porphyry through field geological survey, microscopic identification, electron microprobe analysis and X ray diffraction analysis, the following results have been obtained: ① Pseudoleucite porphyry is outcropped in the periphery of syenite porphyritic volcanic breccia in the forms of veins, breccia or small apophyses and is mainly distributed in the southwest of breccia-type orebodies and the northeast of F₄ fault. Pseudoleucite porphyry is associated with breccia pipe and peripheral fault in space; ② Pseudoleucite has two generations. The early pseudoleucite phenocryst is in the grayish green round form rich in Al, whereas the late

收稿日期: 2016-04-02; 接受日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102049); 云南省矿产资源预测评价工程实验室和云南省、校创新团队项目

作者简介: 孙春迪(1992-), 女, 汉族, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 1831695268@qq.com; 通讯作者: 吴鹏(1981-), 男, 汉族, 副教授, 主要从事矿产普查与勘探的教学与科研工作, E-mail: 76902594@qq.com.

pseudoleucite phenocryst, which exhibits high Si and Na, is grayish white tetragonal trisoctahedron phenocryst. Both of them have been replaced by altered minerals such as potash feldspar, kaolinite, and quartz; ③ Pseudoleucite porphyry was formed in an intraplate extensional environment after the collision between India continent and Eurasia continent; ④ Pseudoleucite porphyry was formed later than trachyte, syenite porphyry and earlier than phenocryst-bearing syenite aplite. It had no direct genetic connection with galena mineralization.

Key words: pseudoleucite porphyry; fabric feature; spatial distribution; Pb-Ag deposit; Yao'an, Yunnan

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41102049); Mineral Resources Prediction and Evaluation Engineering Laboratory of Yunnan Province and the Program of Provincial and University Innovation Team

白榴石是一种似长石矿物,属于硅不饱和的典型高温矿物,是富钾贫硅熔岩及其浅成岩(白榴石玄武岩、白榴石响岩、白榴粗面岩、白榴斑岩和白榴岩等)的造岩矿物,通常呈斑晶呈现(王濮等, 1982)。曾荣树等(1991)认为白榴石的结晶范围受压力与体系的含水量影响,白榴石受到后期作用容易蚀变为正长石和绢云母,亦可为霞石和钠长石交代(王濮等, 1982),亦可蚀变成方沸石或多水高岭石(Gianetti and Masr, 1990),但是它们仍然保留白榴石的外形,称为假白榴石或变白榴石。含白榴石或者假白榴石的岩石一般为富钾和超钾质岩石,多是由花岗质岩浆演化而来(吴利仁等, 1964),产出多与伸展构造背景有关(颜晗等, 2013)。

姚安铅银矿床位于金沙江-哀牢山断裂带东侧的富碱斑岩带内。自 1982 年涂光炽先生提出哀牢山富碱斑岩带以来,姚安矿床富碱斑岩备受众多学者关注,并取得了一系列的研究成果(张兆忠, 1981; 张良, 1994; 毕献武等, 1999, 2000, 2001, 2004, 2006; 钱祥贵等, 2000; 崔银亮等, 2002; 葛良胜等, 2002, 2004, 2005; 崔银亮, 2003; 杨宗良等, 2007; 程锦等, 2007; 李勇等, 2011)。区内关于假白榴石斑岩的主要认识有: 谭喜生(1988)认为假白榴石斑岩以岩筒形式产出,与其有关的矿产为铅、锌、硫、钡; 张良(1994)和杨宗良等(2007)认为假白榴石斑岩为晚于正长斑岩的脉岩; 程锦等(2007)对假白榴石斑岩样品进行岩石化学分析,认为其具有富碱、高钾和富钙的特征,源区为 EM II 型富集地幔。

哀牢山富碱斑岩带中少有假白榴石的相关报道,姚安铅银矿床出露的假白榴石斑岩较典型,具代表性。地表出露的假白榴石斑岩易蚀变、强风化、不易识别,制约了对其成因认识及其地质意义的研究。近年来,随着探矿工程的实施,在地表及矿床深部坑道内陆续揭露出假白榴石斑岩,本文从产状、岩石矿

物学特征着手,从现场观察到显微镜鉴定,利用电子探针及 X 射线微区衍射等分析方法,总结假白榴石斑岩空间分布及组构特征,进一步研究假白榴石斑岩与区内正长斑岩、铅银矿(化)体的空间关系及成岩成矿作用,为研究区富碱斑岩系统理论及假白榴石斑岩成因研究提供依据。

1 矿床地质概况

姚安铅银矿床位于扬子板块西缘凹陷带和哀牢山-金沙江断裂带东侧(图 1a)。沿该断裂带及其两侧分布着一条呈南北向的富碱侵入岩带,向北经玉树、巴塘、芒康,再往北至唐古拉山,是散布在青藏高原东南缘的长约 2 000 km、宽 50~80 km 的一条巨型构造-岩浆-成矿带(涂光炽等, 1984; 张玉泉等, 1987)。该带在云南境内延长约 800 km,分布有姚安区、大理区、剑川区、永平区、金平区等岩区(张玉泉等, 1987; 钟立志等, 1996; 侯增谦等, 2004)。富碱岩体多呈岩株、岩脉形式产出,少量呈岩基、岩筒形式,极少为岩被、岩盆形式,多与围岩呈侵入接触关系。姚安杂岩体是该富碱侵入岩带的重要组成部分。

姚安地区地层出露白垩系高峰寺组、普昌河组、马头山组、江底河组及古近系、新近系,以陆相沉积的紫红色、浅灰色长石石英砂岩夹泥岩为主,矿区内出露正长斑岩、粗面岩、假白榴石斑岩、含斑正长细晶岩等一套杂岩体(图 1b),呈岩墙、岩脉侵入于沉积地层中。铅银矿(化)体主要产于岩体内部及外接触带的裂隙内,主矿体位于 NW 向 F_3 及 F_4 两断层所夹持的“凹兜”内及次火山构造裂隙旁侧的围岩裂隙中,矿体形态及产状严格受断裂控制,且在构造蚀变强烈地段加富加厚。围岩蚀变主要有绢云母化、钾化、硅化、重晶石化、高岭土化、镜铁矿化、黄铁矿化、磁铁矿化等,其中黄铁矿化、重晶石化是矿床重

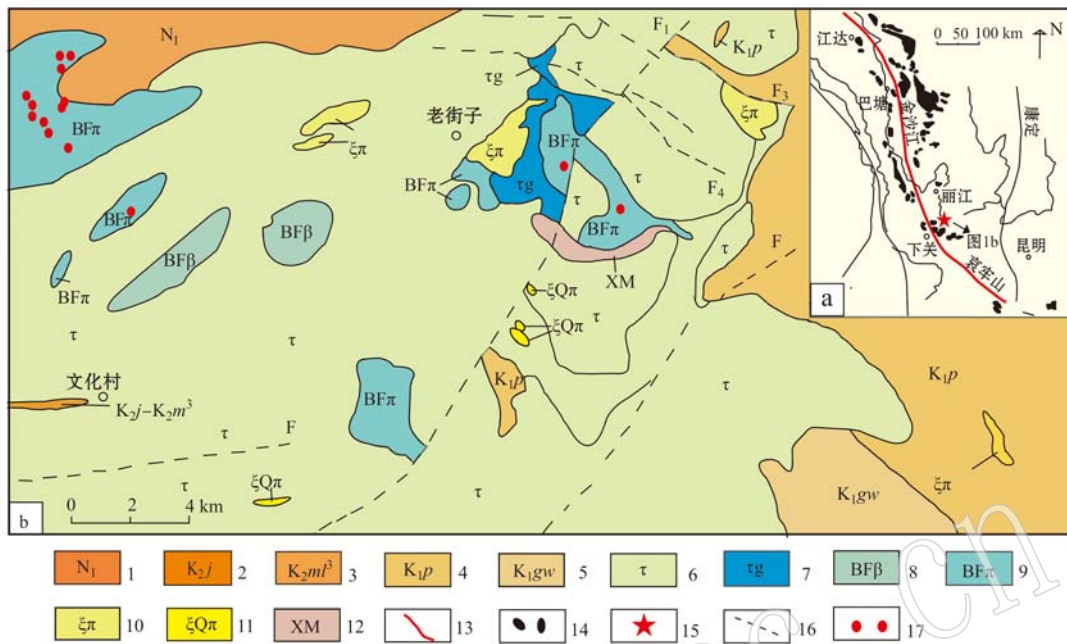


图 1 哀牢山-金沙江富碱侵入岩体分布示意图(a, 据毕献武等, 2006)和姚安富碱杂岩体地质简图(b, 据程锦等, 2007)

Fig. 1 Schematic map showing the distribution of alkali-rich intrusive bodies in the Ailaoshan-Jinshajiang belt

(a, after Bi Xianwu *et al.*, 2006) and geological map of Yao'an alkali-rich complex (b, after Cheng Jin *et al.*, 2007)

1—古近系; 2—上白垩统江底河组; 3—上白垩统马头山组六苜上段; 4—下白垩统普河组; 5—下白垩统高峰寺组; 6—粗面岩; 7—假白榴石斑岩质火成角砾岩; 8—假白榴石碱玄岩; 9—假白榴石斑岩; 10—正长斑岩; 11—石英正长岩; 12—煌斑岩; 13—哀牢山-金沙江断裂; 14—富碱侵入岩体; 15—姚安矿床; 16—断裂; 17—假白榴石斑岩样品采集点

1—Paleogene; 2—Upper Cretaceous Jiangdihe Formation; 3—Upper Liuju Member of Upper Cretaceous Matoushan Formation; 4—Lower Cretaceous Puhe Formation; 5—Lower Cretaceous Gaofengsi Formation; 6—trachyte; 7—pseudoleucite porphyritic volcanic breccia; 8—pseudoleucite tephrite; 9—pseudoleucite porphyry; 10—syenite porphyry; 11—quartz syenite; 12—lamprophyre; 13—Ailaoshan-Jinshajiang belt; 14—alkali-rich intrusive rocks; 15—Yao'an deposit; 16—fault; 17—sampling locations

要的找矿标志(杨宗良等, 2007)。主要金属矿物为方铅矿、黄铁矿等, 呈脉状、网脉状、散点状分布。主要脉石矿物为碱性长石、黑云母、石英、高岭石等。

2 假白榴石斑岩空间分布和组构特征

2.1 空间分布

姚安矿区的假白榴石斑岩在地表及矿床深部均广泛发育。在地表, 白榴石主要以假白榴石斑岩及白榴石斑岩质火成角砾岩形式出露于姚安文化村正北 7 km 和老街子村附近, 呈脉状、角砾状产出, 粗面岩及正长斑岩为主要的围岩, 在空间上与断裂关系密切; 在矿床深部 2 143~2 108 m 中段, 白榴石多以假白榴石斑岩或团块形式产出, 根据切割、穿插关系, 判断假白榴石斑岩晚于正长斑岩体呈脉状侵入(图 2)。在空间上, 假白榴石斑岩呈小岩枝或沿断裂出露在正长斑岩质火山角砾岩的外围, 主要分布在角砾岩型铅矿(化)体的南西侧、F₄ 断裂的北东盘(图

3)。结合地表及矿床深部坑道中假白榴石斑岩出露情况, 认为其在空间上与角砾岩筒及外围断裂有关。

2.2 组构特征

通过显微镜系统观察, 假白榴石斑岩主要造岩矿物为白榴石、碱性长石、黑云母。根据颜色、形态不同, 将矿床出露的假白榴石斑岩分为两种类型(图 4): 一种为灰-灰白色, 具四角三八面体假白榴石斑晶; 另一种为灰绿色, 具浑圆状假白榴石斑晶。二者的组构特征分述如下:

斑晶为四角三八面体晶形的假白榴石斑岩(图 4a), 灰-灰白色, 斑状结构, 块状构造, 具少量气孔(图 4b), 斑晶主要为假白榴石, 有少量较新鲜长石和黑云母。岩石手标本为颗粒状, 斑晶较大, 有些粒径长达 1 cm 以上, 假白榴石被碱性长石交代现象明显, 显微镜下清晰可见交代残余现象, 局部见少量的磁铁矿。样品抛光后可见矿物之间无间隙, 岩石致密坚硬。假白榴石在单偏光下为黄褐色、无色, 具六边形或八边形(图 5a), 干涉色不均, 大小约为 2~

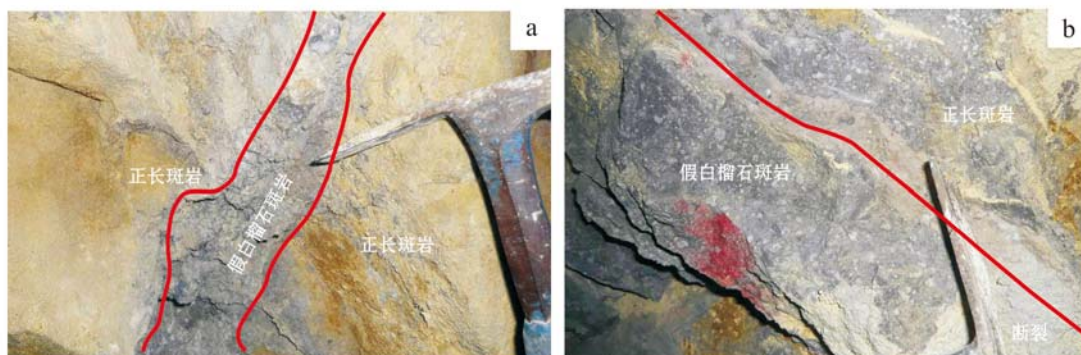


图 2 2 143~2 108 m 中段假白榴石斑岩产状

Fig. 2 Attitude of pseudoleucite porphyry at 2 143 m and 2 108 m level

a—N85 号地质点,假白榴石斑岩呈脉状侵入正长斑岩体中; b—N29 号地质点,假白榴石斑岩与正长斑岩接触部位发育一条断裂,产状 NE60°∠NW80°

a—geological site N85, pseudoleucite porphyry intruded into syenite porphyry as veins; b—geological site N29, the contact zone between pseudoleucite porphyry and syenite porphyry develops a fault, its attitude: NE60°∠NW80°

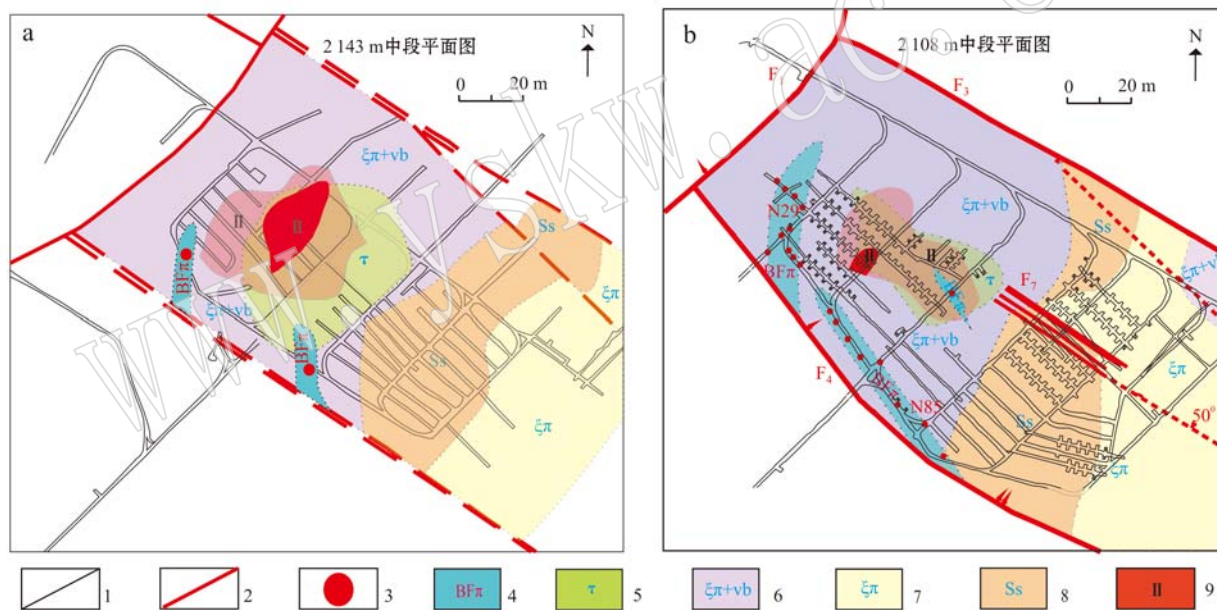


图 3 2 143~2 108 m 中段假白榴石斑岩空间分布简图

Fig. 3 Spatial distribution of pseudoleucite porphyry at 2 143 m and 2 108 m level

1—坑道; 2—断裂; 3—假白榴石出露点; 4—假白榴石斑岩; 5—粗面岩; 6—正长斑岩质火成角砾岩; 7—正长斑岩; 8—砂岩; 9—二号矿体
1—tunnel; 2—fault; 3—location of pseudoleucite; 4—pseudoleucite porphyry; 5—trachyte; 6—syenite porphyritic volcanic breccia;
7—syenite porphyry; 8—sandstone; 9—No. 2 orebody

5 mm, 大者 1 cm, 约占 15%~20%。碱性长石(图 5b)分为由早期白榴石与残余岩浆反应生长者和直接晶出者两种,与五大连池的白榴碧玄岩和白榴苦橄碧玄岩一致(王承祺等, 1987),单偏光下无色透明,具板状晶形,正低突起,干涉色为一级灰白,略显环带构造,为斜长石的富钠端员组分,粒径多在 0.5~4 mm 之间,含量较少,约 1%~2%。基质为显微

晶质,部分由细小长条状长石微晶(粒径在 0.2 mm 以下)略呈定向排列组成,反射光下可见假白榴石斑晶边缘及基质中有细脉状、斑点状磁铁矿。

斑晶为浑圆状的假白榴石斑岩(图 4c、4d),灰绿-灰白色,斑状结构,块状构造,斑晶主要为假白榴石,偶见黑云母,假白榴石斑晶的手标本为粉末状、泥状,斑晶颗粒较小,多者 1~3 mm,少量 5 mm,基

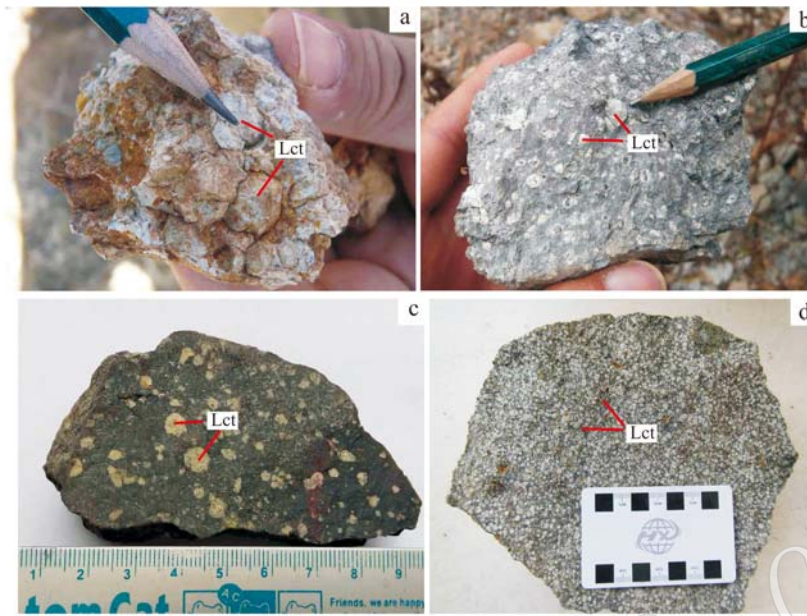


图 4 不同斑晶类型的假白榴石斑岩手标本照片

Fig. 4 Photos of hand specimens of the pseudoleucite porphyry with different types of phenocryst

a—灰白色四角三八面体假白榴石斑晶斑岩，地表 A76 样品；b—灰色四角三八面体假白榴石斑晶斑岩，具有气孔，地表 A217 样品；c—灰绿色浑圆状假白榴石斑晶斑岩，2108 m 中段 N44 样品；d—灰色浑圆状假白榴石斑晶的典型斑岩，地表 A157 样品；Lct—假白榴石
 a—grayish white tetragonal trisoctahedron pseudoleucite phenocryst porphyry, sample A76, surface; b—gray tetragonal trisoctahedron pseudoleucite phenocryst porphyry, vesicular structure, sample A217, surface; c—grayish green round pseudoleucite phenocryst porphyry, sample N44, 2108 m elevation; d—gray round typical pseudoleucite phenocryst porphyry, sample A157, surface; Lct—pseudoleucite

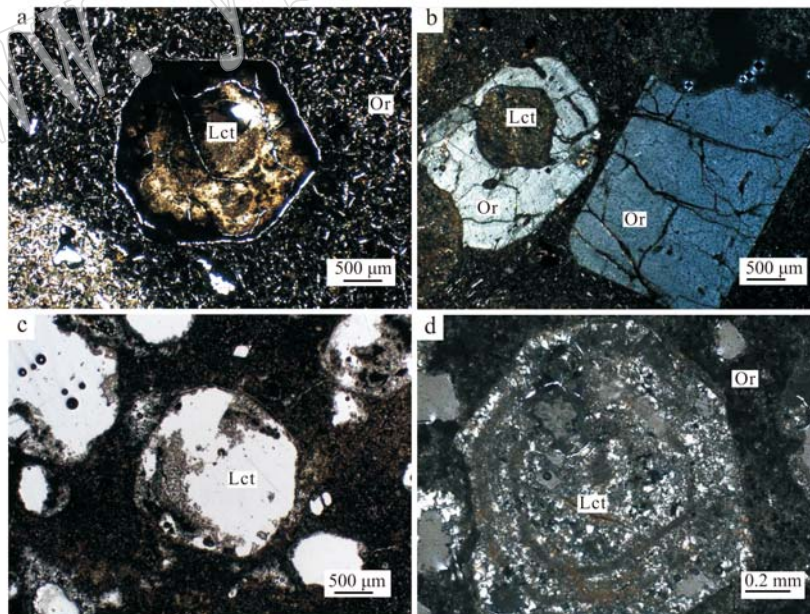


图 5 姚安假白榴石斑岩显微结构照片

Fig. 5 Microphotographs of Yao'an pseudoleucite porphyry

a—四角三八面体假白榴石斑晶，2108 m 中段 N19 样品，正交偏光；b—假白榴石斑晶被长石交代，2108 m 中段 N19 样品，正交偏光；c—浑圆状假白榴石斑晶，部分矿物切片时丢失，2108 m 中段 N44 样品，单偏光；d—浑圆状具环带结构假白榴石斑晶，地表 A157 样品，正交偏光；Lct—假白榴石，Or—钾长石

a—tetragonal trisoctahedron pseudoleucite phenocryst, sample N19 at 2108 level, crossed nicols; b—feldspar replacing pseudoleucite phenocryst, sample N19 at 2108 level, crossed nicols; c—round pseudoleucite phenocryst, some minerals were lost when sliced, sample N44 at 2108 level, plainlight; d—round pseudoleucite phenocryst with zonal structure, sample A157 on surface, crossed nicols; Lct—pseudoleucite, Or—orthoclase

质为隐晶质,未见金属矿物。岩石蚀变强烈,样品抛光后可见部分矿物丢失,岩石较为松软。在单偏光镜下,假白榴石斑晶为黄褐色、无色,呈浑圆状(图 5c),约占 25%~50%,大小约为 1~3 mm,少量 5 mm,部分斑晶丢失,正低突起,偶见环带结构(图 5d),基质为隐晶质,少量为细小长条状长石微晶(粒径在 0.2 mm 以下)略呈交织状排列组成。正交偏光镜下,假白榴石斑晶为暗黑、黄褐色,一级灰白干涉色,反射光下可见沿假白榴石斑晶边缘及基质中的细小星点状铁矿。

3 样品及分析方法

为了进一步研究假白榴石斑晶化学成分,对典型样品进行了电子探针和 X 射线微区衍射分析,文中所分析的样品采自姚安老街子铅银矿区地表及深部 2 108~2 143 m 中段(图 1、图 2)。

首先在光学显微镜下仔细观察样品矿片并确定四角三八面体和浑圆状的假白榴石斑晶,用细头记号笔标记,再对探针片喷碳,然后在电子探针仪器上对标记的假白榴石斑晶进行化学成分能谱分析。电子探针分析实验在中南大学地球科学与信息物理学院电子探针实验室完成,电子探针仪器型号为 EP-MA-1720 型(日本岛津公司),点分析时测试条件为:加速电压 15 kV,探针电流 10 nA,电子束斑直径 10 μm ,ZAF 校正,检测限为 0.01%~0.05%。共完成了 4 个样品的 33 个点测试。

选取 2 个最具有代表性的假白榴石斑岩进行 X 射线微区衍射分析,分别以矿片(X-79 样品)、粉末(N19 样品)为分析对象。对于前者,首先在显微镜下仔细观察,确定要做 X 射线微区分析的假白榴石斑晶,然后将矿片放进仪器中进行矿物微区分析;对于后者,首先仔细观察假白榴石斑岩岩石标本,将要进行分析的假白榴石斑晶抠下来,研磨至粉末,然后取 10~30 mg 粉末植入微区衍射仪样品腔进行测试。X 射线微区分析仪器型号为 Rigaku Rapid II 微区衍射仪,测试条件是:电压 40 kV,电流 250 mA,测试范围 100 μm ,测试时间 15 min。

4 结果与讨论

4.1 结果

白榴石标准化学成分为 SiO_2 55.02%, Al_2O_3

23.40%, K_2O 21.58%, 含微量的 Na、Ca 和 H_2O (李胜荣,2008)。电子探针能谱分析(图 6)显示矿床中假白榴石斑晶已蚀变成长石、高岭石、石英等含水富硅矿物,浑圆状假白榴石斑晶富 Al,四角三八面体状白榴石斑晶富 Si、Na。

X 衍射微区分析结果显示,浑圆状斑晶的假白榴石(X-79 号样品,图 7)主要蚀变为石英(特征衍射峰 d 值为 3.337 4、1.978 8、1.812 4、1.536 8、1.375 9 \AA)、钾长石(特征衍射峰 d 值为 3.769 7、3.230 6、2.984 2)、高岭石(特征衍射峰 d 值为 4.468 4、2.554 4、2.281 2、1.663 6、1.489 5);四角三八面体状斑晶的假白榴石(N19 号样品,图 8)已蚀变为石英、钾长石(特征衍射峰 d 值为 4.206 1、3.778 1、3.462 7、2.992 1、2.906 2、2.765 6、2.570 9、2.168 2、1.999 7、1.794 2、1.495 5、1.276 8),表明研究区假白榴石斑岩的白榴石均蚀变为钾长石、高岭石、石英等矿物。

分析结果显示,浑圆状假白榴石斑晶不仅富 Al,且具环带结构,说明遭受过后期熔体的改造作用,推测为部分地壳物质在深部富钾花岗岩岩浆房熔融形成白榴石,后经过搬运、磨圆、沉淀、改造。四角三八面体状白榴石斑晶富 Si、Na,是由于贫硅碱性岩浆在分离结晶过程中,白榴石不断析出,剩余的熔体逐渐富 SiO_2 ,最后达到共结点,结晶出钾长石和石英(邱家骧,1985),白榴石部分被钾长石和石英溶蚀(图 5b),使得白榴石更富 Si,富 Na 可能是与原始岩浆富水有关(张招崇等,2001),也可能与地表水有关,四角三八面体外形暗示着白榴石是在高温条件下形成的(王濮等,1982),因此,推测其为碱性岩浆部分结晶分异后残余岩浆侵入至地表浅部时直接结晶形成的白榴石。根据以上分析认为研究区假白榴石具有两个世代:早期为浑圆状白榴石,晚期为四角三八面体白榴石。

4.2 岩石成因讨论

白榴岩主要由白榴石和辉石组成,几乎不含长石,可以有玻璃质,白榴石在斑晶和基质中均有(邱家骧,1985)。赵志丹等(2006)认为超钾质岩石最主要的特征是斑晶除了橄榄石外,出现富钾矿物白榴石等。青藏高原广泛分布着新生代钾质-超钾质火山岩,如拉萨地块中部、班公-怒江结合带的羌塘地区,许多学者认为其与青藏高原的形成隆升有密切关系(邓万明,1991,1993,1998;迟效国等,1999;丁林等,1999;莫宣学等,2001),与岩石圈地幔的减

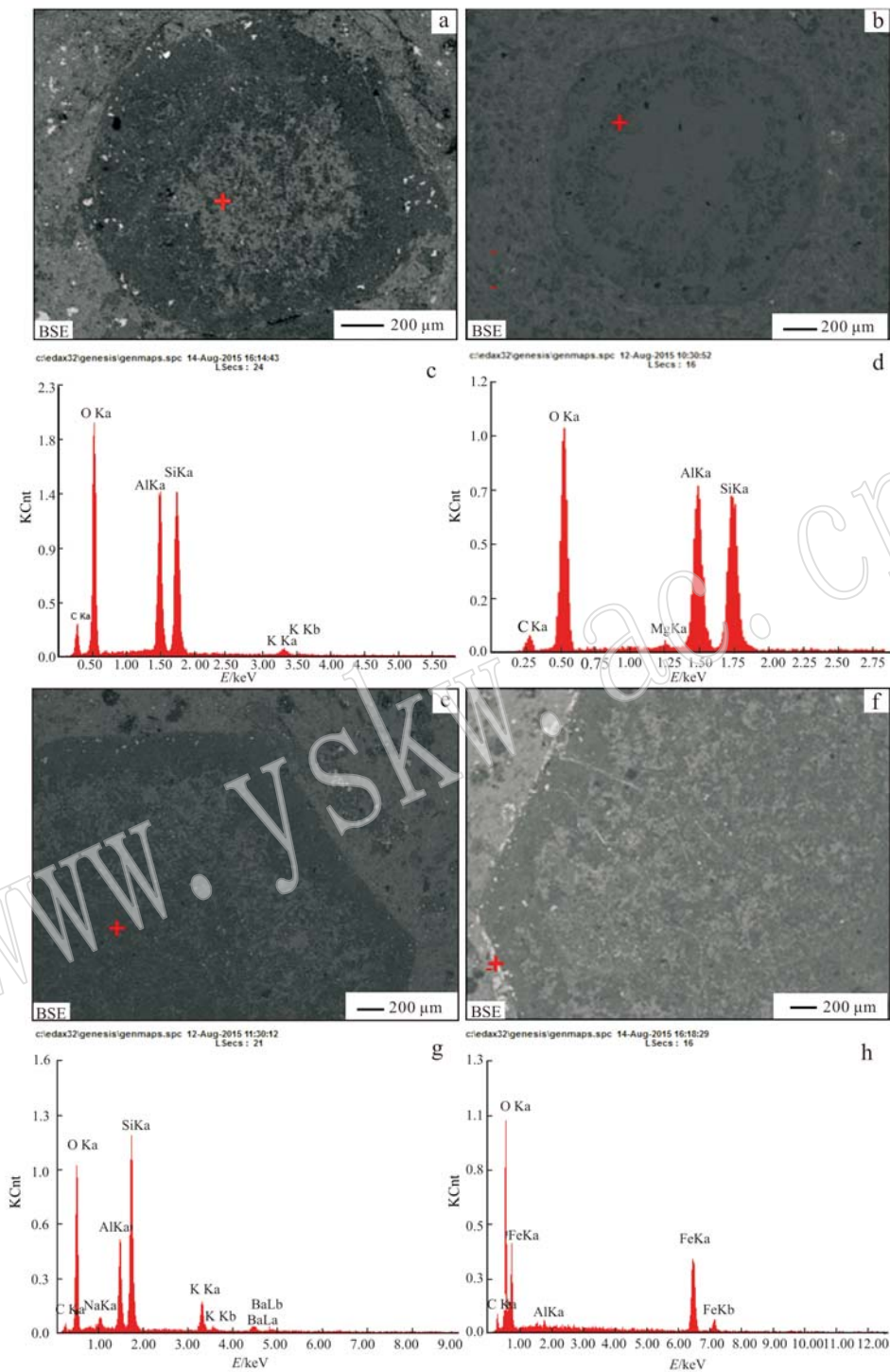


图 6 假白榴石斑晶背散射图像(a, b, e, f)及能谱峰图(c, d, g, h)

Fig. 6 Backscatter scanning reconstructions (a, b, e, f) and energy spectra (c, d, g, h) of pseudoleucite phenocryst
 a—浑圆状假白榴石斑晶, 白榴石均蚀变为钾长石、高岭石、石英等矿物, 斑晶边缘见星点状磁铁矿; b—浑圆状假白榴石斑晶, 基质为细小长条状长石交织排列组成; c—四角三八面体假白榴石斑晶, 自形程度高, 但成分上均蚀变为钾长石、石英等矿物集合体, 在斑晶内及边缘在细小磁铁矿颗粒; d—四角三八面体假白榴石斑晶边缘密集发育磁铁矿; e—浑圆状假白榴石斑晶, 基质为细小长条状长石交织排列组成; f—四角三八面体假白榴石斑晶, 自形程度高, 但成分上均蚀变为钾长石、石英等矿物集合体, 在斑晶内及边缘在细小磁铁矿颗粒; g—四角三八面体假白榴石斑晶, 自形程度高, 但成分上均蚀变为钾长石、石英等矿物集合体, 在斑晶内及边缘在细小磁铁矿颗粒; h—四角三八面体假白榴石斑晶边缘密集发育磁铁矿; a, b, e, f 图中红十字丝为电子探针分析点, c, d, g, h 为对应所得能谱峰图, 分别为钾长石、高岭石、钾长石、磁铁矿

a—round altered pseudoleucite phenocryst is replaced by potash feldspar, kaolinite and quartz, magnetite is sparsely dispersed; b—round pseudoleucite phenocryst, tiny strip-like feldspars are in a pilotaxitic texture in ground mass; c—tetragonal trisectahedron pseudoleucite phenocryst, which are euhedral, and altered minerals are potash feldspar and quartz; d—tetragonal trisectahedron pseudoleucite phenocryst, magnetite is densely distributed in tetragonal trisectahedron pseudoleucite phenocrysts; e—round altered pseudoleucite phenocryst is replaced by potash feldspar, kaolinite and quartz, magnetite is sparsely dispersed; f—round pseudoleucite phenocryst, tiny strip-like feldspars are in a pilotaxitic texture in ground mass; g—tetragonal trisectahedron pseudoleucite phenocryst, which are euhedral, and altered minerals are potash feldspar and quartz; h—tetragonal trisectahedron pseudoleucite phenocrysts; electron microprobe analyzing points are at the cross wire in Fig. a, b, e and f, and their corresponding energy spectra respectively show potash feldspar, kaolinite, potash feldspar and magnetite in Fig. c, d, g and h

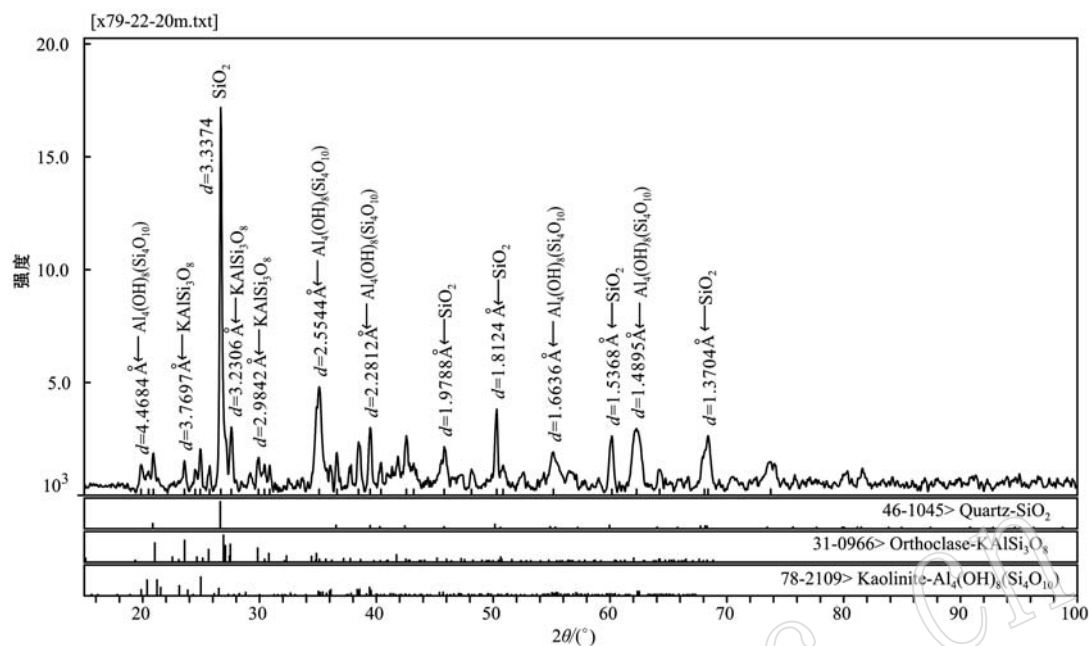


图 7 假白榴石浑圆斑晶 X 射线微区分析图谱(x-79 号样品)
Fig. 7 XRD spectrum of round pseudoleucite crystal (from sample x-79)

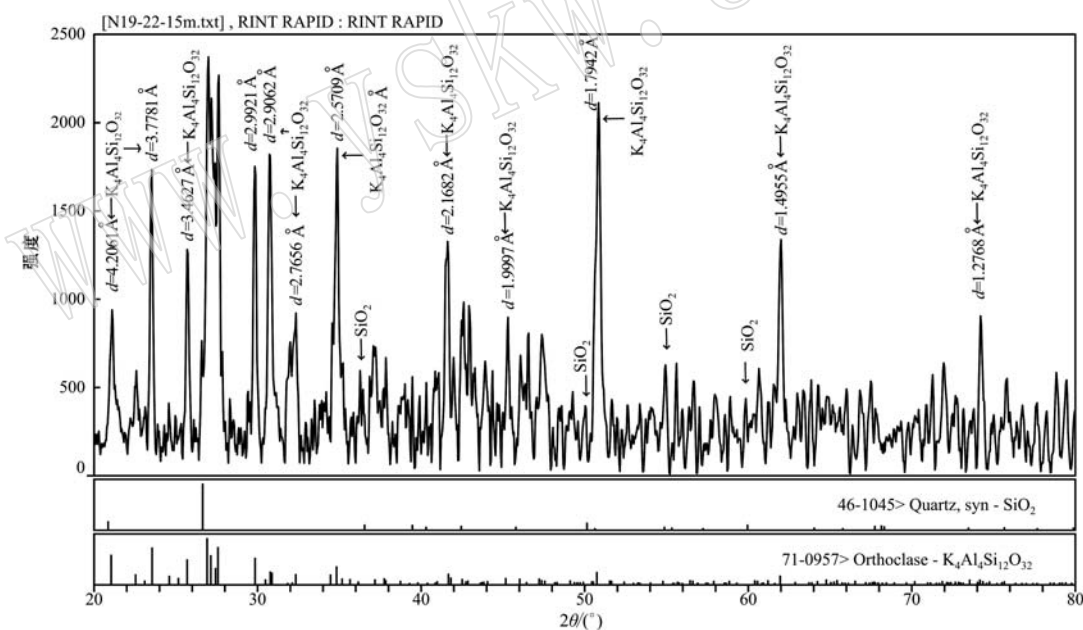


图 8 假白榴石自形斑晶 X 射线微区衍射图谱(N19 号样品)
Fig. 8 XRD spectrum of euhedral pseudoleucite crystal (from sample N19)

薄作用有关(赵志丹等, 2006; 赵芝等, 2009), 形成于印度与亚洲大陆碰撞造山后的板内环境(廖思平等, 2002)。邱小平(2002)认为碰撞造山事件与成矿作用具有耦合关系, 在碰撞过程中, 深部的壳幔物质相互作用和构造-岩浆活动都参与了成矿作用。一般认为含似长石类矿物的岩石为碱性岩, 前人对中

国碱性岩的成因研究(柯珊等, 2006; 侯增谦等, 2008; 麻菁等, 2015)认为其物源区主要为上地幔(或加厚的下地壳), 在构造环境由俯冲挤压向陆内伸展、拉张转换的动力学条件下, 沿断裂系统中的薄弱处向上侵入。攀西裂谷地质队对姚安地区假白榴石斑岩的金云母进行 K-Ar 同位素测年得到年龄为

31.79 Ma(谭喜生, 1988), 在姚安富碱斑岩高峰期(45~30 Ma)范围内(李勇等, 2011), 与青藏高原碰撞后岩浆作用时间基本一致或稍晚(Hou *et al.*, 2007; Deng *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2016), 程锦等(2007)研究认为姚安富碱斑岩产于碰撞后的板内构造环境, 其形成与金沙江-哀牢山走滑断裂带的形成与活动有关。在印度板块与欧亚大陆俯冲碰撞的动力学背景下, 青藏高原快速隆升, 岩石圈缩短(程锦等, 2007), 陆-陆碰撞引起了强烈的板内变形, 导致哀牢山-金沙江断裂带走滑剪切(李勇等, 2011), 断裂由挤压转为拉张, 深部富集地幔减压熔融导致高钾碱性岩浆喷发。楚雄盆地地下陷和地幔上拱为交代地幔源区的假白榴石斑岩形成提供场所(张玉泉等, 2000), 地幔部分熔融物质为假白榴石斑岩的形成提供物质来源(毕献武等, 2005)。

姚安地区出露的假白榴石斑岩斑晶主要为白榴石、少量碱性长石和黑云母, 基质与斑晶成分相似, 但白榴石斑晶已蚀变为钾长石、高岭石、石英等矿物集合体, 与理论上矿物成分的差异可能是后期蚀变造成的。结合大地构造背景及动力学机制, 在时空分布及岩石组构特征研究基础上, 认为假白榴石斑岩是印度板块与欧亚大陆俯冲碰撞后的构造-岩浆活动的结果, 形成于碰撞后的板内拉张环境。假白榴石斑岩的形成晚于粗面岩、正长斑岩, 早于含斑正长细晶岩。铅矿(化)体主要分布在正长斑岩体内、含斑正长细晶岩脉上下盘, 在假白榴石斑岩体内未见明显铅矿化, 只在斑晶边缘或基质中见极小细粒磁铁矿, 可能与黑云母微晶脱水、氧化有关(邱家骧, 1985)。因此, 铅银矿(化)体与假白榴石斑岩没有直接的时间-空间-物源等成因联系, 但两者都在印度-欧亚大陆俯冲碰撞及碰撞后哀牢山-金沙江断裂动力学背景下形成。

5 结论

(1) 姚安铅银矿床假白榴石斑岩多以脉状、角砾状或呈小岩枝产出, 出露在正长斑岩质火山角砾岩的外围, 主要分布在角砾岩型铅矿(化)体的南西侧、 F_4 断裂的北东盘。

(2) 根据假白榴石斑岩的斑晶晶形、微观组构、化学成分特征可以看出, 姚安早期假白榴石斑岩为灰绿色浑圆粒状假白榴石斑晶的斑岩, 富 Al, 晚期为灰-灰白色四角三八面体假白榴石斑晶的斑岩, 富

Si、Na; 两者的假白榴石斑晶均已蚀变成钾长石、高岭石、石英等含水富硅矿物集合体。

(3) 结合大地构造背景及前人的年代学研究, 认为假白榴石斑岩是印度板块与欧亚大陆俯冲碰撞后的构造-岩浆活动的产物, 形成于碰撞后的板内拉张环境。

(4) 假白榴石斑岩的形成晚于粗面岩、正长斑岩, 早于含斑正长细晶岩。铅矿化见于正长斑岩体内及含斑正长细晶岩脉上、下盘, 在假白榴石斑岩内未见铅矿化, 因此, 铅银矿(化)体与假白榴石斑岩没有直接的时间-空间-物源等成因联系, 但两者都在印度-欧亚大陆俯冲碰撞及碰撞后哀牢山-金沙江断裂动力学背景下形成。

致谢 感谢昆明理工大学韩润生教授、刘星教授以及审稿专家对论文的撰写与修改提出宝贵意见; 感谢中南大学地球科学与信息物理学院谷湘平教授在电子探针等实验方面给予的指导和帮助。

References

- Bi Xianwu. 1999. Study on Alkali-rich Intrusive Rocks and Their Relation with Metallogenesis of Copper and Gold in the "Sanjiang" Region, Western Yunnan(Ph. D. Dissertation)[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- Bi Xianwu, Hu Ruizhong and Cornell D H. 2000. The origin of altered fluid: REE evidence from primary and secondary feldspars in the mineralization-alteration zone [J]. Chinese Science Bulletin, 45 (13): 1 429~1 432(in Chinese).
- Bi Xianwu, Hu Ruizhong and Cornell D H. 2001. Trace element and isotope evidence for the evolution of ore-forming fluid of Yao'an gold deposit, Yunnan province, China[J]. Geochimica, 30(3): 263~272(in Chinese with English abstract).
- Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Mungall J E, *et al.* 2006. Mineral chemistry studies of Cu and Au mineralized alkaline intrusions[J]. Acta Mineralogica Sinica, 26(4): 377~386(in Chinese with English abstract).
- Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, *et al.* 2004. REE and HFSE Geochemical characteristics of pyrites in Yao'an gold deposit: tracing ore forming fluid signatures[J]. Bulletin of Mineral Geochemistry, 23(1): 1~4(in Chinese with English abstract).
- Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, *et al.* 2005. Geochemical characteristics of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intru-

- sions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(1): 113~124(in Chinese with English abstract).
- Cheng Jin, Xia Bin and Zhang Yuquan. 2007. Petrological and geochemical characteristics of Yao'an alkaline complex in Yunnan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 118~125(in Chinese with English abstract).
- Chi Xiaoguo, Li Cai, Jin Wei, *et al.* 1999. Spatial-temporal evolution of Cenozoic volcanism and uplifting in North tibelt [J]. *Geological review*, 45(sup.): 978~986(in Chinese).
- Cui Yinliang. 2003. The alteration of country rocks and outlook for ore prospecting of the gold deposits[J]. *Mineral Resources and Geology*, 17(sup): 369~372(in Chinese).
- Cui Yinliang, Zhang Yingxu, He Langtao, *et al.* 2002. Metallogenic prognosis and prospecting criteria of gold deposits related to alkali-rich porphyry in Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 21: 101~104(in Chinese).
- Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian, *et al.* 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth-Sci. Rev.*, 138: 268~299.
- Deng Wanming. 1991. Geology, geochemistry and age of shoshonitic lavas in the Central Kunlun Orogenic Belt[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 193~206(in Chinese).
- Deng Wanming. 1993. Study on trace element and Sr, Nd isotopic geochemistry of Cenozoic potassic volcanic rocks in North Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 379~387(in Chinese with English abstract).
- Deng Wanming. 1998. Cenozoic Intraplate Volcanic Rocks in the Northern Qinghai, Xizhang Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Ding Lin, Zhang Jinjiang, Zhou Yong, *et al.* 1999. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibet Plateau: Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in northern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 408~421(in Chinese with English abstract).
- Gao Xinguo. 1987. Leucite-rich rock in Fenghang[J]. *Liaoning Geology*, (1): 21~35(in Chinese with English abstract).
- Ge Liangsheng, Guo Xiaodong, Zou Yilin, *et al.* 2002. Geology and genesis of the Yao'an gold deposit related to alkali rich magmatic rock in Yunnan province[J]. *Geology and Resources*, 11(1): 29~37(in Chinese with English abstract).
- Ge Liangsheng, Wang Wencheng and Li Hanguang. 2005. The Rich Alkaline Rocks and Gold Mineralization in the Northwest of Yunnan Province[M]. Beijing: Seismological Press, 1~204(in Chinese).
- Ge Liangsheng, Zou Yilin, Xing Junbing, *et al.* 2004. Gold mineralization system related to alkali-rich porphyries in Himalayan, the north-western part of Yunnan[J]. *Gold Geology*, 10(1): 39~47(in Chinese with English abstract).
- Glanneti B and Masr U (translate by Zhao Donghong and Zhang Lianchang). 1990. Trace element behavior and its environmental significance in the weathering process of the potassium volcanic rocks from the Roccamonfina(South Italy)[J]. *Foreign Geology and Exploration*, (4): 41~46(in Chinese).
- Hou Zengqian, Tian Shihong, Xie Yuling, *et al.* 2008. Mianning Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Aaian collilion zone, southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 145~176(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zaw Kin, Pan Guitang, *et al.* 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S.W. China: tectonic setting, metallogenic epoch and deposit type[J]. *Ore Geol. Rev.*, 31: 48~87.
- Hou Zengqian, Zhong Dalai and Deng Wanming. 2004. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold metallogenic belts on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Geology*, 31(1): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Ke Shan, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 2006. Petrogenesis and geochemistry of Cenozoic Taxkorgan alkalic complex and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 905~915(in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong. 2008. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~346(in Chinese).
- Li Yong, Yu Xuehui, Huang Xingkai, *et al.* 2011. Petrogenesis of alkali rich porphyry of Yao'an Sanjiang in the northwest of Yunnan Province: geochemical and geochronological [J]. *Bulletin of Mineral Geochemistry*, 30: 67~68(in Chinese).
- Liao Siping, Chen Zhenhua, Luo Xiaochuan, *et al.* 2002. Discovery of leucite phonolite in the Tangra Yumco area, Tibet and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 735~738(in Chinese with English abstract).
- Ma Jing, Zeng Pusheng, Gou Ruitao, *et al.* 2015. Genesis and metallogenesis of alkaline complexes in China mainland[J]. *Geology and Exploration*, 51(3): 466~477(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Deng Jinfu, Dong Fangliu, *et al.* 2001. Volcanic petro-tectonic assemblages in Sanjiang orogenic belt, SW China and implication for tectonics[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(2): 121~138(in Chinese with English abstract).
- Qian Xianggui and Li Zhiwei. 2000. Geological and geochemical characteristics

- of the Yao'an gold ore deposit in central Yunnan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 24: 31~36(in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiexiang. 1985. *Igneous Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Qiu Xiaoping. 2002. Collisional orogenic belt and metallogenetic divisions [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(10): 675~681(in Chinese with English abstract).
- Tan Xisheng. 1988. Origin and Indicator for deposit of Yao'an gold deposit in Yunnan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, (2): 65~76(in Chinese).
- Tu Guangchi, Zhang Yuquan and Zhao Zhenhua. 1984. A preliminary study on the two alkali rich intrusive rock zones in southern China [A]. *Geology of Granite and Their Metallogenic Relationship*[C]. Nanjing: Jiangsu Science Publishing House, 21~37(in Chinese).
- Wang Pu, Pan Zhaolu, Weng Lingbao, *et al.* 1982. *Systematic Mineralogy*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wu Liren, Zhang Zhaozhong, Zhang Yuxue, *et al.* 1964. Theory of Shanxi antecline alkaline magma formation and evolution[J]. *Chinese Journal of Geology*, (2): 125~142(in Chinese).
- Yan Han, Zhao Zhidan, Liu Dong, *et al.* 2013. Geochronology and geochemistry of the Yangbajing leucite porphyry, Tibet: Implication for timing of N-S rift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 731~3 744(in Chinese with English abstract).
- Yang Zongliang, Yang Shikun, Wang Zhengchang, *et al.* 2007. The geology of Laojiezi Pb deposit and existence of Ag Yao'an Yunnan[J]. *Geology*, 26(1): 106~111(in Chinese with English abstract).
- Zeng Rongshu and Mac Kenzie W S. 1991. Crystal region of leucite in the residual system after diagenesis under water-deficient conditions and at $P_{H_2O}=5$ kbar[J]. *Science Bulletin*, 36(1): 51~53(in Chinese).
- Zhang Liang. 1994. The geology of Laojiezi Pb deposit and existence of Ag Yao'an[J]. *Southwest Mineral Geology*, (3): 23~31(in Chinese).
- Zhang Yuquan and Xie Yingwen. 1997. Geochronology of alkalic intrusive rocks in Ailaoshan-Jinshajiang region and its isotope characteristics of Nd-Sr[J]. *Science in China(D)*, 27(4): 289~293(in Chinese).
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Li Xianhua, *et al.* 2000. Isotope characteristics of magmatic rocks of shoshonitic series in the eastern of Tibetan Plateau: petrogenesis and tectonic significance[J]. *Science in China(D)*, 30(5): 493~498(in Chinese).
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen and Tu Guangzhi. 1987. Preliminary studies of the alkali-rich intrusive rocks in the ailaoshan-jiangshajiang belt and their bearing on rift tectonics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 17~26(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Li Shucai, *et al.* 2001. Discovery of a special type of leucite tephrite in Jingpohu region of Heilongjiang province and its significance[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 23~35(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaozhong. 1981. The zonal texture of orthoclase in alkaline rock from Yao'an county, Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, (2): 171~175(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Sebastien Nomade, *et al.* 2006. Postcollisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial and Temporal distribution and its' implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 787~794(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Chi Xiaoguo, Liu Jianfeng, *et al.* 2009. Geochemical feature and its tectonic significance of Gemucuo Oligocene potassic volcanic rocks in the Qiangtang area, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(4): 463~473(in Chinese with English abstract).
- Zhong Lizhi, He Yite and Li Zongguang. 1996. Analysis of alkali porphyry copper gold polymetallic metallogenetic zoning and metallogenetic geological conditions of the western margin of the Yangtze platform rich[J]. *Southwest Mineral Geology*, 10(1): 6~15(in Chinese).
- Zhou Jiayi, Dou Song, Huang Zhilong, *et al.* 2016. Origin of the Luping Pb deposit in the Beiya area, Yunnan province, SW China: Constraints from geology, isotope geochemistry and geochronology[J]. *Ore Geol. Rev.*, 72: 179~190.

附中文参考文献

- 毕献武. 1999. 滇西“三江”地区富碱侵入岩及其与铜、金成矿关系的研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 毕献武, 胡瑞忠, Cornell D H. 2000. 蚀变流体的来源: 矿化蚀变带中原生与次生长石的稀土元素证据[J]. *科学通报*, 45(13): 1 429~1 432.
- 毕献武, 胡瑞忠, Cornell D H. 2001. 富碱侵入岩与金成矿关系: 云南省姚安金矿床成矿流体形成演化的微量元素和同位素证据[J]. *地球化学*, 30(3): 264~272.
- 毕献武, 胡瑞忠, Mungall J E, 等. 2006. 与铜、金矿化有关的富碱侵入岩矿物化学研究[J]. *矿物学报*, 26(4): 377~386.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 2004. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 23(1): 1~4.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征[J]. *岩石学报*, 21(1): 113~124.
- 程 锦, 夏 斌, 张玉泉. 2007. 云南姚安碱性杂岩体的岩石学和地球化学特征[J]. *大地构造与成矿学*, 31(1): 118~125.
- 迟效国, 李 才, 金 巍, 等. 1999. 藏北新生代火山岩作用的时空

- 演化与高原隆升[J]. 地质论评, 45(增刊): 978~986.
- 崔银亮. 2003. 云南省与富碱斑岩有关的金矿床围岩蚀变特征和找矿前景[J]. 矿产与地质, 17(增刊): 369~372.
- 崔银亮, 张映旭, 和浪涛, 等. 2002. 云南省与富碱斑岩有关的金矿床成矿预测和找矿标志[J]. 矿床地质, 21(增刊): 101~104.
- 邓万明. 1991. 中昆仑造山带钾玄质火山岩的地质、地球化学和时代[J]. 地质科学, (3): 201~213.
- 邓万明. 1993. 青藏北部新生代钾质火山岩微量元素和 Sr、Nb 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 9(4): 379~387.
- 邓万明. 1998. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京: 地质出版社.
- 丁林, 张进江, 周勇, 等. 1999. 青藏高原岩石圈演化记录: 藏北超钾质钠质火山岩的岩石学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 15(3): 408~421.
- 高新国. 1987. 凤城的富石榴石岩[J]. 辽宁地质, (1): 21~33.
- 葛良胜, 郭晓东, 邹依林, 等. 2002. 云南姚安与富碱岩浆活动有关的金矿床地质及成因[J]. 地质与资源, 11(1): 29~37.
- 葛良胜, 王文成, 李汉光. 2005. 滇西北富碱岩体与金矿成矿[M]. 北京: 地震出版社, 1~204.
- 葛良胜, 邹依林, 邢俊兵, 等. 2004. 滇西北与喜马拉雅期富碱斑岩有关的金矿成矿系统[J]. 黄金地质, 10(1): 39~47.
- Glanneti B, MAsr U(赵东宏, 张连昌译). 1990. Roccamonfina(意大利南部)钾质火山岩的石榴石风化过程中痕量元素行为及其环境意义[J]. 国外地质与勘测, (4): 41~46.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 等. 2008. 川西冕宁—德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 27(2): 145~176.
- 侯增谦, 钟大赉, 邓万明. 2004. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式[J]. 中国地质, 31(1): 1~14.
- 柯珊, 莫宣学, 罗照华, 等. 2006. 塔什库尔干新生代碱性杂岩的地球化学特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 22(4): 905~915.
- 李胜荣. 2008. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1~346.
- 李勇, 喻学惠, 黄行凯, 等. 2011. 滇西三江姚安地区富碱斑岩的岩石成因——地球化学和年代学约束[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30: 67~68.
- 廖思平, 陈振华, 罗小川, 等. 2002. 西藏当惹雍错地区石榴石响岩的发现及地质意义[J]. 地质通报, 21(11): 735~738.
- 麻菁, 曾普胜, 苟瑞涛, 等. 2015. 中国碱性杂岩的成因及其成矿作用[J]. 地质与勘探, 51(3): 466~477.
- 莫宣学, 邓晋福, 董力浏, 等. 2001. 西南三江造山带火山岩—构造组合及其意义[J]. 高校地质学报, 7(2): 121~138.
- 钱祥贵, 李志伟. 2000. 滇中姚安金矿床地质地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 24: 31~36.
- 邱家骧. 1985. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1~890.
- 邱小平. 2002. 碰撞造山带与成矿区划[J]. 地质通报, 21(10): 675~681.
- 谭喜生. 1988. 云南姚安金矿床成因及找矿标志[J]. 西南地质科技情报, (2): 65~76.
- 涂光炽, 张玉泉, 赵振华. 1984. 华南两个富碱侵入岩带的初步研究[A]. 花岗岩地质与成矿关系[C]. 南京: 江苏科学出版社, 21~37.
- 王承祺, 杜向荣, 刘继贤. 1987. 科洛—五大连池—二克山火山群第五章 含白榴石高钾火山岩岩相学[J]. 华东地质学院学报, (2): 83~87.
- 王濮, 潘兆槽, 翁玲宝, 等. 1982. 系统矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1~1338.
- 吴利仁, 张兆忠, 张玉学, 等. 1964. 论山西台背斜碱性岩浆的成因及演化[J]. 地质科学, (2): 125~142.
- 颜晗, 赵志丹, 刘栋, 等. 2013. 西藏羊八井白榴斑岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学及其与裂谷发育的关系[J]. 岩石学报, 29(11): 3731~3744.
- 杨宗良, 杨世坤, 王正常, 等. 2007. 云南姚安老街区铅矿地质及银的赋存状态[J]. 云南地质, 26(1): 106~111.
- 曾荣树, MacKenzie W S. 1991. 在 5 kbar 及水不饱和条件下成岩残余体系的白榴石结晶区域[J]. 科学通报, 36(1): 51~53.
- 张良. 1994. 姚安老街区银铅矿床地质特征及银的赋存状态[J]. 西南矿产地质, (3): 23~31.
- 张玉泉, 谢应雯. 1997. 哀牢山—金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd、Sr 同位素特征[J]. 中国科学, 27(4): 289~293.
- 张玉泉, 谢应雯, 李献华, 等. 2000. 青藏高原东部钾玄岩系岩浆岩同位素特征: 岩石成因及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 30(5): 493~498.
- 张玉泉, 谢应雯, 涂光炽. 1987. 哀牢山—金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究[J]. 岩石学报, (1): 17~26.
- 张招崇, 李兆鼐, 李树才, 等. 2001. 黑龙江镜泊湖地区特殊类型白榴石碱玄岩的发现及其意义[J]. 地质科学, 36(1): 23~35.
- 张兆忠. 1981. 云南姚安碱性岩中环带状正长石[J]. 地质科学, (2): 171~175.
- 赵芝, 迟效国, 刘建峰, 等. 2009. 西藏羌塘戈木错渐新世钾质火山岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 28(4): 463~473.
- 赵志丹, 莫宣学, Nomade S, 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义[J]. 岩石学报, 22(4): 787~794.
- 钟立志, 何毅特, 李宗光. 1996. 扬子地台西缘富碱斑岩铜金多金属成矿区划及成矿地质条件分析[J]. 西南矿产地质, 10(1): 6~15.