

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.2-3.009

滇中老街子铅-银矿床富碱岩脉岩石学特征、时空结构及其对成矿作用的约束

黄仲金^{1,2}, 吴静^{1,2*}, 吴鹏^{1,2*}, 姜龙燕^{1,2}, 杨航^{1,2}HUANG Zhongjin^{1,2}, WU Jing^{1,2*}, WU Peng^{1,2*}, JIANG Longyan^{1,2}, YANG Hang^{1,2}

1.昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2.有色金属矿产地质调查中心西南地质调查所, 云南 昆明 650093

1.Kunming University of Science and Technology, College of Land and Resources Engineering, Kunming 650093, Yunnan, China;

2.Southwest Institute of Geological Survey, Geological Survey Center for Non-ferrous Mineral Resources, Kunming 650093, Yunnan, China

摘要:滇中老街子铅-银矿床位于金沙江-哀牢山富碱斑岩成矿带内的姚安铅多金属成矿区。区内富碱岩脉广泛发育,与构造活动关系密切,按矿物组合主要分为正长斑岩脉、粗面斑岩脉、煌斑岩脉和白榴石斑岩脉。铅-银矿(化)体主要赋存于正长斑岩体内,在粗面斑岩脉上、下盘加富。富碱岩脉受断裂构造控制,主要呈NE向展布,其次为NW向;岩脉(体)间的穿插关系显示侵位顺序为:(粗面岩→)正长斑岩脉(体)→粗面斑岩脉→白榴石斑岩脉→煌斑岩脉。岩石地球化学特征指示,4类富碱岩脉均属钾玄岩系列岩石,形成于俯冲背景下碰撞后的板内拉张环境,主要来源于下地壳,并混入少量地幔组分。由于不同程度的岩浆演化及源区岩浆房内的分带,导致岩浆在逐层上升侵位后,形成不同矿物组合和化学组分的富碱岩脉(体)。对比分析4类富碱岩脉的时空分布及源区特征,结合其与构造、成矿的耦合关系,构建富碱岩脉时空结构模型,为深部及外围找矿预测提供依据。

关键词:富碱岩脉;岩石学;地球化学;时空结构;铅-银矿床;云南

中图分类号:P618.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)02/03-0285-22

Huang Z J, Wu J, Wu P, Jiang L Y, Yang H. Petrology and space-time structure of alkali-rich dikes and its constraints on mineralization in the Laojiezi lead-silver deposit, central Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3): 285-306

Abstract: The Laojiezi Pb-Ag deposit, central Yunnan, is located in Yao'an lead-polymetallic mine district in Jinshajiang-Ailaoshan alkali-rich porphyry metallogenic belt. Alkali-rich dikes, widely developed in the area and closely related to the structure, according to mineral assemblage, are divided into syenite porphyry dikes, trachyte porphyry dikes, lamprophyre dikes and leucite porphyry dikes. Pb-Ag mineralized bodies mostly occur in syenite porphyry and are enriched in the hanging wall and footwall of trachyte porphyry dikes. The alkali-rich dikes are controlled by the fault structure and are mainly distributed in NE and NW direction. Combined with the interspersed relationship of alkali-rich dikes(masses), the sequence of emplacement is inferred as follows: trachyte → syenite → trachyte porphyry → leucite porphyry → lamprophyre. Through the petrogeochemical characteristics, it is considered that the four types of alkali rich dikes are belong to the shoshonite, formed in the intraplate extensional environment after collision in the subduction background, mainly derived from the thickened lower crust and mixed with a small amount of enriched mantle components. Different degrees of magma evolution, zonation in the magma chamber in the source area and emplacement layer by layer of magma lead to the the finally formation of several types of alkali-rich dikes(masses) with different mineral assemblages and chemical components. Comprehensively

收稿日期:2021-05-12;修订日期:2022-01-23

资助项目:云南省“万人计划”青年拔尖人才专项(编号:YNWR-QNBJ-2018-272)、云南省矿产资源预测评价工程实验室(2010)和云南省地质过程与矿产资源创新团队(2012)项目

作者简介:黄仲金(1998-),女,在读硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:2391013932@qq.com

* 通信作者:吴静(1968-),女,副教授,从事晶体光学、矿物学、岩石学和矿床学的教学与科研。E-mail:wujing0102@163.com

吴鹏(1981-),男,教授,从事矿产普查与勘探的教学与科研。E-mail:76902594@qq.com

comparing and analyzing the temporal and spatial distribution and source characteristics of the four types of dikes, and exploring the coupling relationship with tectonic and mineralization, constructing a time-space model of alkali-rich dikes, so as to provide a basis for deep and peripheral prospecting predictions.

Key words: alkali-rich dikes; petrology; petrogeochemistry; temporal and spatial structure; Pb-Ag deposit; Yunnan Province

岩脉一般指呈脉状产出的侵入岩体,呈直立或近直立的板状岩体则被称为“岩墙”。20 世纪 80 年代以来,国内外学者通过研究岩脉的产出背景、找矿指示意义等,认为岩脉的发育暗示了拉张(裂谷)环境,通常与张性构造相伴而生(王学成等,1991;贾大成等,2002;李夫杰,2009);在找矿实践中,岩脉对特定矿体的形成具有重要指示作用,常被作为找矿标志(夏宗强等,2009;应立娟等,2011;梁瑞等,2012;李临位等,2019)。

富碱侵入岩最早由涂光炽先生于 1982 年提出,并以全碱含量(K_2O+Na_2O)>8% 对其定义(涂光炽,1989)。新生代印度-欧亚板块碰撞致使青藏高原隆升,藏东—滇西“三江”地区发生大规模逆冲推覆—走滑伸展作用,伴随强烈的构造-岩浆-成矿作用,形成哀牢山—金沙江富碱侵入岩带和多个贵金属、有色金属成矿带(涂光炽等,1984;张玉泉等,1987;罗均烈等,1994;邓万明等,1998;钟大赉等,2000;葛良胜等,2002;李文昌等,2020)。姚安铅多金属成矿区位于金沙江—哀牢山富碱侵入岩带内,分布有老街子铅—银矿床和白马苴金矿床,区内富碱斑岩的产出常伴有重要经济价值的多金属矿产资源,因此前人对该区富碱斑岩的岩石学、地球化学、成矿预测等开展了大量研究(毕献武等,2000,2001;2005;程锦等,2007;李勇等,2011;孙春迪等,2016;Sun et al.,2017;严清高等,2017;2018;2019;Yan et al.,2018;罗晨皓,2018;2019)。研究表明,姚安富碱斑岩具有富碱高钾、富轻稀土元素和 Rb、Sr、Ba、Th 等大离子亲石元素而亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素的特征(毕献武等,2001),成岩时代集中在 30~40 Ma(Chung et al.,1998;Wang et al.,2001;Sun et al.,2017;严清高等,2017);成岩过程中分异出的岩浆流体为姚安金矿床早期成矿作用提供了必需的成矿流体。

随着探矿工程的实施,老街子矿床地表和深部均发现了一系列富碱岩脉,宏观上显示其与矿化和构造活动密切相关,但缺乏系统研究,尚未解决的科学问题有:①岩脉的类别划分及准确定名,②岩

脉与构造、成矿之间的联系,③岩脉的时空结构。本次对地表(标高:2212~2559 m)及矿床深部(2143 m→2018 m→2089 m→2073 m→2050 m 中段)揭露的富碱岩脉进行了系统观测,结合偏光显微镜、元素测试分析,总结区内岩脉的空间分布及岩石学特征,综合前人获得的同位素数据及年代学资料,解释其岩石成因,厘定 4 类岩脉间的穿插关系及时间序列,探讨其与构造-成矿的耦合关系,建立岩脉的时空结构,为深部及外围找矿预测提供依据。

1 地质概况

研究区位于云南楚雄盆地中部,地处东特提斯构造域藏东—滇西“三江”地区,扬子板块西南缘(图 1-a)。新生代印度-欧亚板块碰撞导致青藏高原隆升形成了 NW—NNW 向的哀牢山—金沙江断裂带,沿该断裂带分布着一条富碱侵入岩带,长达 1000 km,宽 50~80 km,并向西北延伸至唐古拉山地区(图 1-b)(涂光炽等,1984;张玉泉等,1987)。

老街子铅—银矿床位于该富碱侵入岩带东部的姚安铅多金属成矿区,区内出露地层主要有中生代下白垩统普昌河组(K_1p)、高峰寺组(K_1gw)和上白垩统江底河组(K_2j)、马头山组(K_2ml),以砂岩、泥岩为主;新生代由火山-侵入杂岩体构成的老街子组($E_{2-3}l$),呈角度不整合覆盖于中生代红层之上(严清高等,2017)。主要发育 NNW 向“川”字形紧闭长轴褶皱,NE 向断裂构造(F_1 、 F_2 、 F_3 等)斜贯全区,其次多为 NW 向断裂(F_5 、 F_6 、 F_7 、 F_9 等)(图 2)。主要出露 4 类富碱岩脉,分别为正长斑岩脉、粗面斑岩脉、煌斑岩脉和白榴石斑岩脉。区内以老街子铅—银矿床和白马苴金矿床为主,富碱岩脉与铅—银(金)矿化关系密切,矿(化)体主要赋存于正长斑岩体内部,粗面斑岩脉上、下盘。主矿体群受 NE 向(F_1)和 NW 向(F_6 、 F_7)断裂控制,一般在张性破碎带内更富集。主要蚀变包括黄铁矿化、镜铁矿化、重晶石化,其次为绢云母化、绿泥石化、角岩化、高岭土化等,其中黄铁矿化、高岭土化、重晶石化与铅矿化关系密切(杨宗良等,2007)。

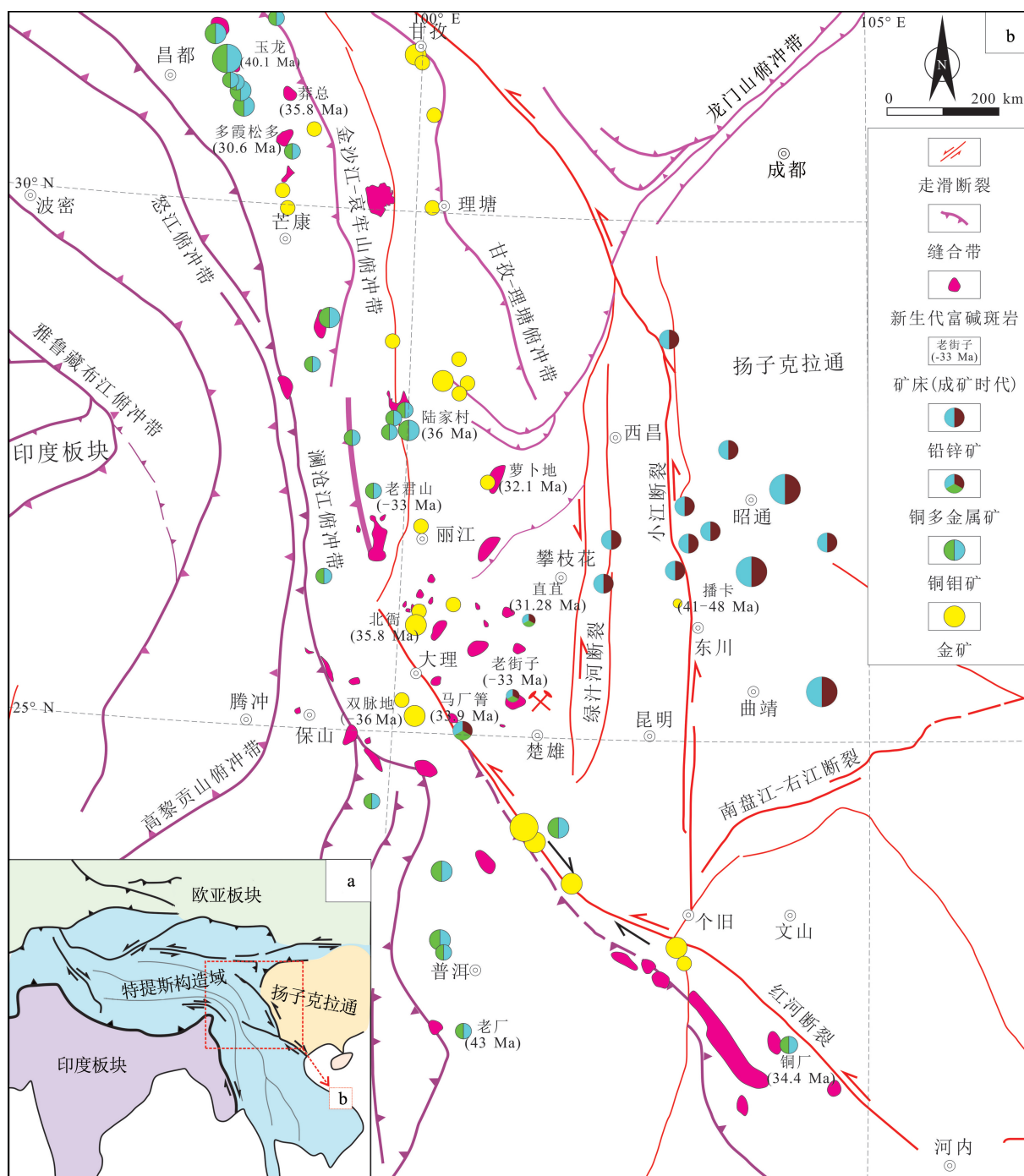


图 1 青藏高原东南缘大地构造图(a)及新生代富碱岩体分布图(b, Yan et al., 2018)

Fig. 1 Geologic map showing tectonic of the southeastern margin in the Qinghai-Tibet Plateau (a) and the distribution of Cenozoic alkaline porphyry (b)

2 富碱岩脉岩石学及时空分布特征

2.1 岩相学特征

按照矿物组合差异,将该矿床富碱岩脉分为 4 类:正长斑岩脉、粗面斑岩脉、煌斑岩脉、石榴石斑

岩脉。通过显微镜系统观察,结合野外产出及手标本特征,总结其岩石学特征如下。

(1)正长斑岩脉:主要呈紫红色—肉红色、灰—青灰色、黄褐色,斑状结构,斑晶主要为碱性长石、石英及少量黑云母,长石斑晶主要为白色—无色,

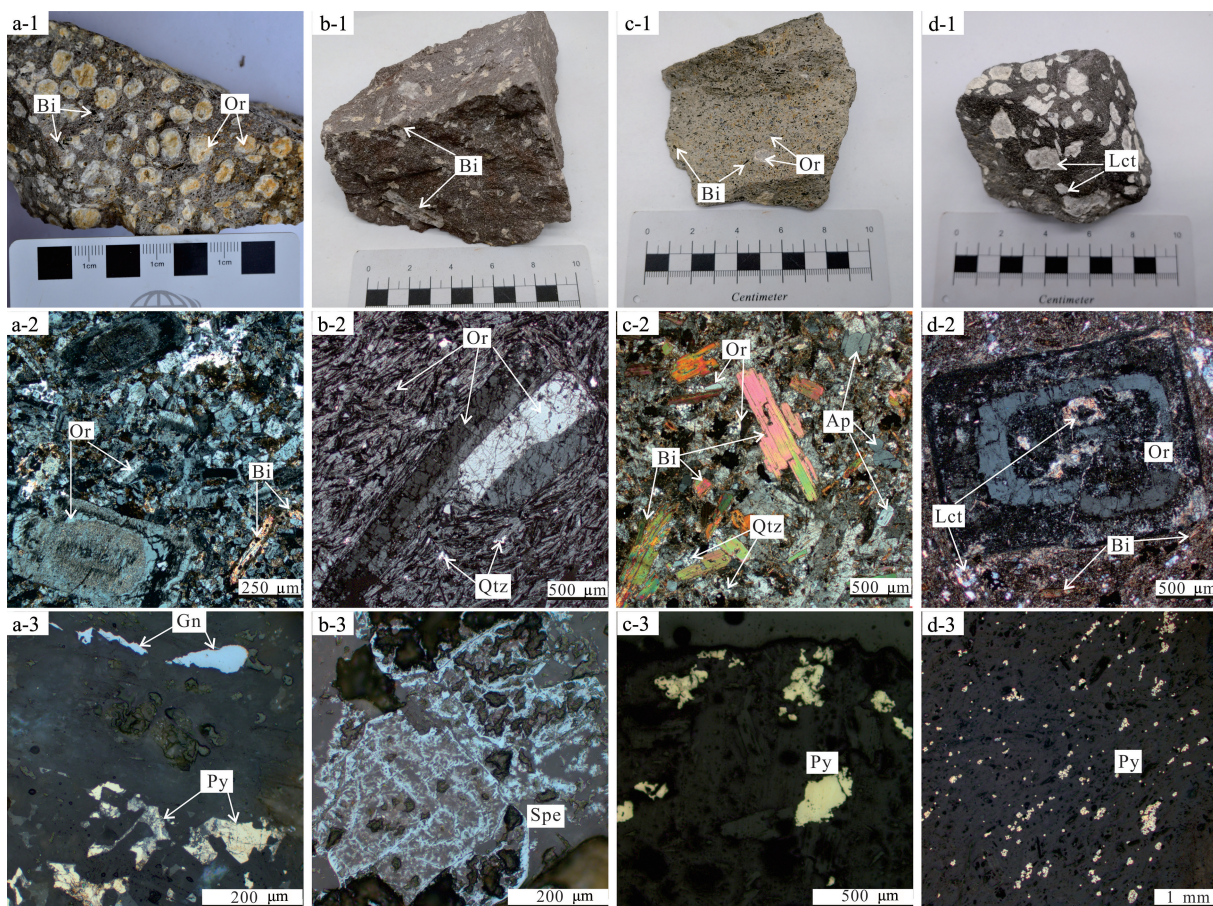
自形—半自形粒状,常发育环带蚀变,蚀变部分呈黄褐色(图版 I-a-1、a-2),颗粒大小 0.2~1 cm,显微镜下可见卡氏双晶;基质成分与斑晶类似,显微镜下可见长条状的碱性长石形成交织结构,在长石间隙有细粒的石英颗粒填充。反射光下可见方铅矿、黄铁矿(图版 I-a-3)、闪锌矿,偶见磁黄铁矿。

(2)粗面斑岩脉:主要呈浅紫色—紫红色,岩脉沿裂隙蚀变,褪色为浅黄色—灰白色,斑状结构,浅紫色—紫红色部分斑晶主要为正长石,长石斑晶多呈宽板状(图版 I-b-1),大体具定向性,显微镜下可见卡反双晶。显微镜下见基质主要为长条状碱性长石微晶,定向排列形成粗面结构(图版 I-b-2)。部分样品浅紫色—紫红色部分含较多黑云母斑晶,蚀变褪色部分黑云母相应减少。反射光下可见黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、镜铁矿(图版 I-b-3)。

(3)煌斑岩脉:主要呈灰色—灰黑色(图版 I-c-1),具典型煌斑结构,斑晶为黑云母,为主要暗色矿物,呈自形,部分黑云母可见环带现象;基质以黑云母、磷灰石、长石、石英为主(图版 I-c-2)。根据其矿物组合,可定名为云煌岩。反射光下可见黄铁矿(图版 I-c-3)和方铅矿。

(4)白榴石斑岩脉:新鲜岩石主要呈黑绿色(图版 I-d-1),致密坚硬,而大多出露的岩体颜色多因风化蚀变而变浅,呈灰色—青灰色,结构亦变得疏松。斑状结构,斑晶主要为白榴石、碱性长石,白榴石斑晶多呈灰白色、浅黄褐色,显微镜下白榴石斑晶具六边形或八边形,长石斑晶具环带蚀变,白榴石被碱性长石交代现象明显(图版 I-d-2)。孙春迪(2016)对姚安白榴石斑岩进行电子探针和 X 衍射微区分析后认为,岩体内白榴石多被碱性长石交

图版 I Plate I



a-1.正长斑岩手标本;a-2.正交偏光下正长石发育蚀变环带;a-3.反射光下方铅矿、黄铁矿;b-1.粗面斑岩手标本;b-2.正交偏光下正长石双晶、粗面结构;b-3.反射光下镜铁矿;c-1.煌斑岩手标本;c-2.正交偏光下黑云母斑晶;c-3.反射光下黄铁矿;d-1.白榴石斑岩手标本;d-2.正交偏光下白榴石斑晶被碱性长石交代;d-3.反射光下黄铁矿。Bi—黑云母;Or—正长石;Qtz—石英;Ap—磷灰石;Lct—白榴石;Gn—方铅矿;Py—黄铁矿;Spe—镜铁矿

代,仅保留了晶形,并将其命名为假白榴石斑岩。基质成分与斑晶类似,显微镜下为细粒长条状长石和黑云母。反射光下可见黄铁矿(图版 I-d-3)、闪锌矿及少量方铅矿。

2.2 时空分布特征

2.2.1 空间分布

通过地表及不同中段地质调查,观测了 202 条富碱岩脉。根据走向不同,分为 4 个方向:NE 向(111 个)(集中在 $NE60^{\circ}\sim 70^{\circ}$)、NW 向(54 个)(集中在 $NW50^{\circ}\sim 70^{\circ}$)、近 EW 向(18 个)、近 NS 向(19 个)。

4 类岩脉的空间分布特征为:①在地表,富碱岩脉主要呈 NE 向产出,正长斑岩脉分布范围最广,其次为粗面斑岩脉和煌斑岩脉,白榴石斑岩脉零星分布(图 2)。②在老街子铅-银矿床 2143~2073 m 中段,粗面斑岩脉最为发育,主要呈 NE 向产出,少数

呈 NW 向;其次为正长斑岩,主要呈 NW 向产出(图 3-a);白榴石斑岩脉较少见。③从剖面看,粗面斑岩多呈脉状穿插于正长斑岩体内,正长斑岩脉大多呈近直立产出,Pb-Ag 矿(化)体在粗面斑岩脉上、下盘加富(图 3-b~d)。结合地表及矿床深部富碱岩脉的出露情况,认为岩脉在空间上与构造、成矿存在密切关系。

2.2.2 时间序列

前人关于该矿床中富碱岩脉的年龄测定统计见表 1,区内 4 类富碱岩脉的形成年龄均在 33 Ma 左右。因此,很难从成岩时代上对 4 类岩脉进行时序性的精确厘定,需要结合岩脉之间的岩性组合、穿插关系等宏观地质特征进行综合研究。

野外产出特征显示,正长斑岩主要呈岩墙状、岩株状、岩脉状侵位于粗面岩和中生代陆相沉积岩中(图 4-a、b,图 5-a);粗面斑岩主要呈脉状穿插到正

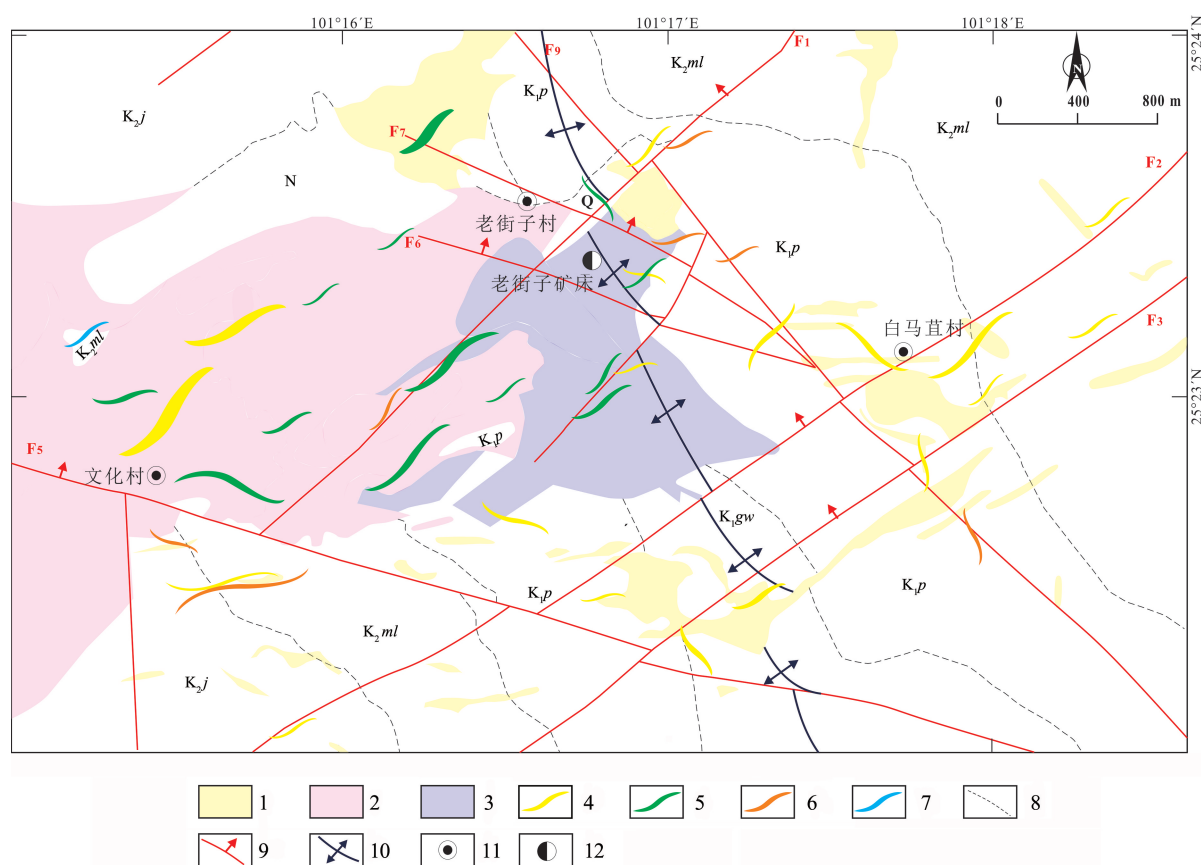


图 2 老街子铅-银矿区地表富碱岩脉分布示意图(Sun et al., 2017)

Fig. 2 Schematic map showing the distribution of alkali-rich dikes in surface of Laojiezi Pb-Ag mining area

Q—第四纪沉积层;N—新近系; K_2j —上白垩统江底河组; K_2ml —上白垩统马头山组; K_1gw —下白垩统高峰寺组;

K_1p —下白垩统普昌河组;1—正长斑岩群;2—背斜轴部岩筒群;3—文老杂岩体;4—正长斑岩脉;5—粗面斑岩脉;

6—煌斑岩脉;7—白榴石斑岩脉;8—地层界线;9—断层;10—褶皱;11—行政村;12—铅-银矿床

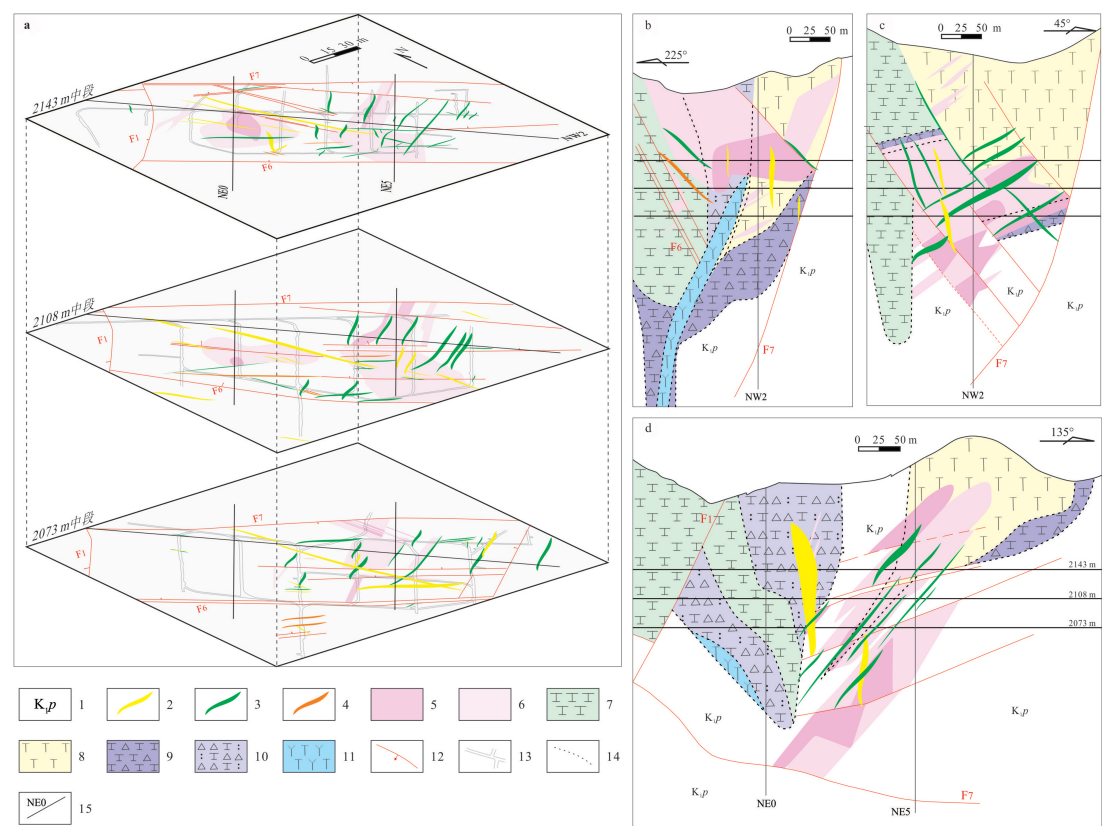


图3 老街子铅-银矿床2143~2073 m中段富碱岩脉分布示意图

Fig. 3 Schematic map showing the distribution of alkali-rich dikes in 2143~2073 m level of Laojiezi Pb-Ag deposit
a—2073~2143 m中段空间分布示意图;b—NE0勘探线剖面图;c—NE5勘探线剖面图;d—NW2勘探线剖面图;1—下白垩统普昌河组;
2—正长斑岩脉;3—粗面斑岩脉;4—煌斑岩脉;5—铅的富矿体;6—铅的贫矿体;7—粗面岩;8—正长斑岩;
9—含角砾粗面岩;10—粗面凝灰质火山角砾岩;11—假白榴石正长斑岩;12—断层;13—坑道;14—岩性界线;15—勘探线及编号

表1 老街子铅-银矿床富碱岩脉同位素年龄统计
Table 1 The date of isotopic age of the alkali-rich dikes of the Laojiezi Pb-Ag deposit

岩石类型	测试对象	测试方法	年龄/Ma	资料来源
正长斑岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	30.75±0.06	李文昌等,2020
	锆石		33.23±0.27	
	锆石		33.21±0.26	
	锆石		33.58±0.28	
	锆石		33.42±0.28	
	锆石		33.06±0.34	
粗面斑岩	黑云母	K-Ar	33.5±1.0	Zhang et al.,1997
	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	32.32±0.2 Ma	黄仲金等,2022
	锆石		32.43±0.4 Ma	
煌斑岩	黑云母	Ar-Ar	33.7±0.5	Lu et al.,2015
	锆石	LA-ICP-MS	31.22±0.33	严清高等,2019
白榴石斑岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	33.31 ± 0.5	罗晨皓,2018
	锆石		34.1±0.3	Sun et al.,2017

长斑岩内(图 4-a、图 5-b);白榴石斑岩为底部侵入岩,侵位于粗面斑岩和正长斑岩(图 4-c、图 5-d),且其中似长石类矿物(白榴石)的出现,指示岩浆分异演化程度更高,侵位更晚,为粗面斑岩及正长斑岩后期的脉岩;煌斑岩为矿区内最晚期的岩浆活动产物,穿插在各个时期的地层、侵入岩及火山岩中(图 4-b、图 5-c)。严清高等(2019)根据野外岩体(脉)的压盖-侵位关系,在研究区识别出同期五阶段火山-侵入岩事件,认为其中第二阶段为粗面质火山岩-沉积岩,第三阶段为正长斑岩,第四阶段为粗面斑岩,第五阶段为辉绿岩-煌斑岩等基性脉岩体。

结合前人的同位素年代学数据及穿插关系,笔者认为,老街子铅-银矿床中 4 类富碱岩脉为同期形成,且集中在 33 Ma,侵位先后顺序为(粗面岩→)正长斑岩脉(体)→粗面斑岩脉→白榴石斑岩脉→煌斑岩脉。

3 岩石地球化学

不同中段采集新鲜的岩脉及岩体样品共 27 件。其中,正长斑岩脉(体)样品 6 件,粗面斑岩脉样品 12 件,煌斑岩脉样品 4 件,白榴石斑岩脉样品 1 件,粗面岩样品 4 件。用于镜下观察的样品,在廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司完成切片。在宏观及微观鉴定的基础上,为进一步研究富碱岩脉岩石学特征,对新鲜岩石样品进行岩石化学分析,主量、微量元素分析均在西北有色地质研究院测试中心(西安)完成,测试方法成熟,数据准确可靠。

3.1 主量元素

4 类富碱岩脉地球化学分析结果见表 2,富碱岩体地球化学分析结果见表 3,其中 S-1~11 地球化学数据据孙春迪(2017),L-1、2 地球化学数据据罗晨皓(2018),Y-1~4 地球化学数据据严清高(2018)。

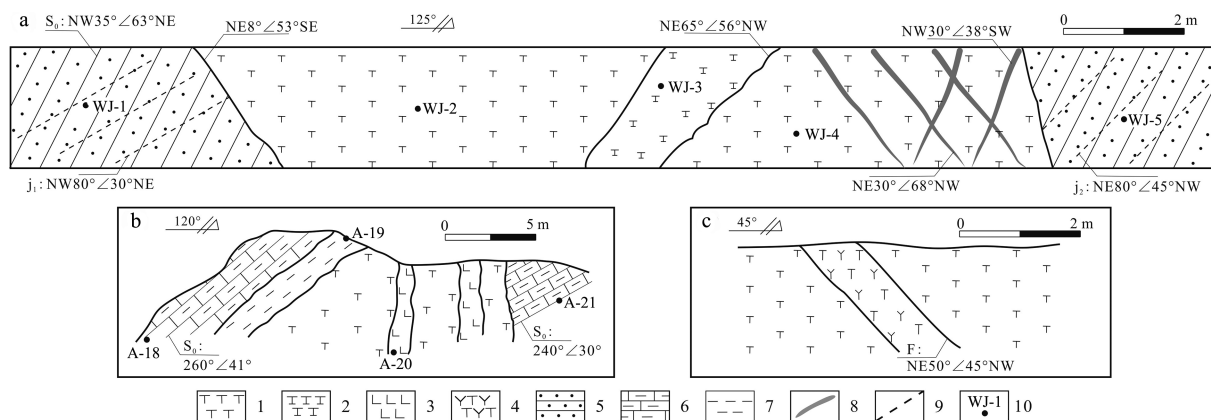


图 4 老街子铅-银矿床富碱岩脉(体)穿插关系素描图

Fig. 4 Interspersed relationship sketch map of alkali-rich dikes (masses) of the Laojiezi Pb-Ag deposit

a—2050 m 中段 2[#]穿脉编录图;b—A-18 至 A-21 号地质点剖面图;c—A-95 号地质点剖面图;1—正长斑岩;2—粗面斑岩;3—煌斑岩;4—白榴石斑岩;5—砂岩;6—泥灰岩;7—网脉状泥灰岩;8—矿化脉;9—节理;10—地质点及编号

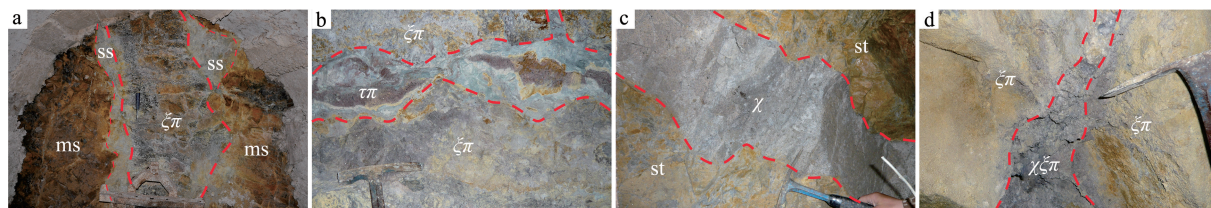


图 5 老街子铅-银矿床深部富碱岩脉穿插关系照片

Fig. 5 Interspersed relationship photos of alkali-rich dikes in the depth of the Laojiezi Pb-Ag deposit

a—正长斑岩呈脉状侵入砂岩、泥岩岩体;b—粗面斑岩呈脉状侵入正长斑岩岩体;c—煌斑岩呈脉状侵入粉砂岩岩体;d—白榴石斑岩呈脉状侵入正长斑岩岩体;ξπ—正长斑岩;τπ—粗面斑岩;χ—煌斑岩;χξπ—白榴石斑岩;ss—砂岩;ms—泥岩;st—粉砂岩

选取的样品新鲜,烧失量均值(2.79%)小于3%,蚀变程度低。为了更准确地反映地球化学特征,避免烧失量(LOI)对地球化学分析造成的影响,下文投图数据均剔除烧失量,并重新换算为100%后进行。

4类岩脉 SiO_2 含量为 52.20%~66.60%,属中性岩类;其中,粗面斑岩脉 SiO_2 含量普遍较高(59.49%~66.12%)。4类岩脉 K_2O 为 6.01%~13.13%、 Na_2O 为 0.38%~4.46%、 CaO 为 0.04%~2.51%、 Al_2O_3 为 13.21%~19.64%、 TFe_2O_3 为 1.39%~9.74%、 TiO_2 为 0.22%~1.27%、 MgO 为 0.08%~4.04%、 $\text{Mg}^\#$ 值为 4.30~59.58。全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量为 9.08%~13.76%,在火成岩岩性判别图解(图 6-a)上,样品点均落在碱性系列,主要分布于正长岩-粗面岩范围。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.36~29.06,在 SiO_2 - K_2O 图解(图 6-b)上,样品点均落在钾玄岩系列区域,表明其均属于高钾质碱性岩。样品 A/CNK 值介于 1.16~1.72 之间,显示其具有过铝质特征(图 6-c)。表 2 和表 3 显示,除煌斑岩脉 MgO 含量(1.58%~4.04%)较高外,4类富碱岩脉的其余主量元素含量均在富碱岩体相应含量范围内,总体具有高钾高碱高铝质的特征。在 Harker 图解(图 6-d~h)上, TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 和 P_2O_5 含量随着 SiO_2 的增长呈明显下降趋势,总体符合岩浆演化趋势。

3.2 微量和稀土元素

在原始地幔标准化蛛网图(图 7-a)中,4类富碱岩脉与粗面岩、正长斑岩(体)微量元素变化特征类似。相对于原始地幔,明显富集 Rb、La、Nd、Y、K 等大离子亲石元素(LILE),而相对亏损 Ta、Nb、Ti、P 等高场强元素(HISF)。样品均显示 Sr 的亏损,粗面斑岩脉相较于其他 3 类岩脉,显示强烈的 Sr 和 Ba 的亏损。

在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 7-b)中,4类富碱岩脉与粗面岩、正长斑岩(体)具有相似的稀土元素配分模式,轻、重稀土元素分馏特征明显,正长斑岩脉(体)及粗面斑岩脉样品显示 Eu 的弱负异常,而煌斑岩脉、白榴石斑岩脉及粗面岩显示 Eu 的弱正异常。4类富碱岩脉样品稀土元素含量变化范围较窄,其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 33.9~91.9 之间, δEu 值为 0.700~1.34, δCe 值为 0.868~1.22,

ΣREE 为 $443\times10^{-6}\sim1406\times10^{-6}$,煌斑岩脉和白榴石斑岩脉的 ΣREE 较高($778\times10^{-6}\sim1406\times10^{-6}$),样品 LREE 为 $431\times10^{-6}\sim1371\times10^{-6}$,HREE 为 $12.2\times10^{-6}\sim51.1\times10^{-6}$,LREE/HREE 值为 17.6~39.2。

4 讨论

4.1 岩石成因

老街子铅-银矿床富碱岩脉(体)总体富集 LREE 和 LILE、亏损 HFSE,具有明显的“TNT”负异常特征,指示岩浆源区与受俯冲带流体交代改造的富集地幔源有关(Sun et al., 1989; Cornell et al., 1995),这与区域上印度板块向欧亚板块俯冲,在滇西“三江”地区发生的斜向碰撞造山的地质事件相符。岩脉中主要的铁镁质矿物为含水黑云母,暗示岩浆形成过程中有富水熔体/流体的加入;富碱岩脉(体)具有高钾特征(K_2O 含量为 6.01%~13.13%),属钾玄岩类; K_2O 含量通常受源区控制,说明源区具高钾特征,为岩石圈地幔成因(Meen, 1990; Turner et al., 1996)。锆石 Hf 同位素研究显示,区内富碱岩脉(体)具有极低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-18.96\sim-6.78$),明显不同于北衙、马厂箐等富集地幔源煌斑岩类($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 0 左右),暗示其不可能来自于单一的岩石圈地幔;较古老的 Hf 模式年龄(1323~1981 Ma)(严清高, 2018; 罗晨皓等, 2019),也指示岩浆形成与古老地壳物质密切相关。岩脉(体)较高的 A/CNK 值(1.15~1.79, ≥ 1)通常指示岩浆来源于地壳或受到富 Al 地壳物质的混染;在 Th/Yb-Nb/Yb 图解(图 8-a)上,数据点主要落在喜马拉雅基底区域,在 Sr-Nd 同位素相关图解(图 8-b)上,数据点主要落在下地壳区域,属亲喜马拉雅型。区内富碱岩脉(体)总体具有较高的 ΣREE ($411\times10^{-6}\sim1802\times10^{-6}$),钾/超钾质基性幔源岩浆底侵下地壳后生成的新生代下地壳,在部分熔融时会形成钾/超钾质高 ΣREE 长英质熔体(辛未, 2019)。

基于上述特征,笔者认为,老街子富碱岩脉(体)原始岩浆主要来源于地壳,具有一定幔源特征,为壳-幔相互作用的产物,可能与幔源钾质岩浆底侵诱发下地壳的部分熔融后、在壳-幔过渡带形成岩浆房有关。

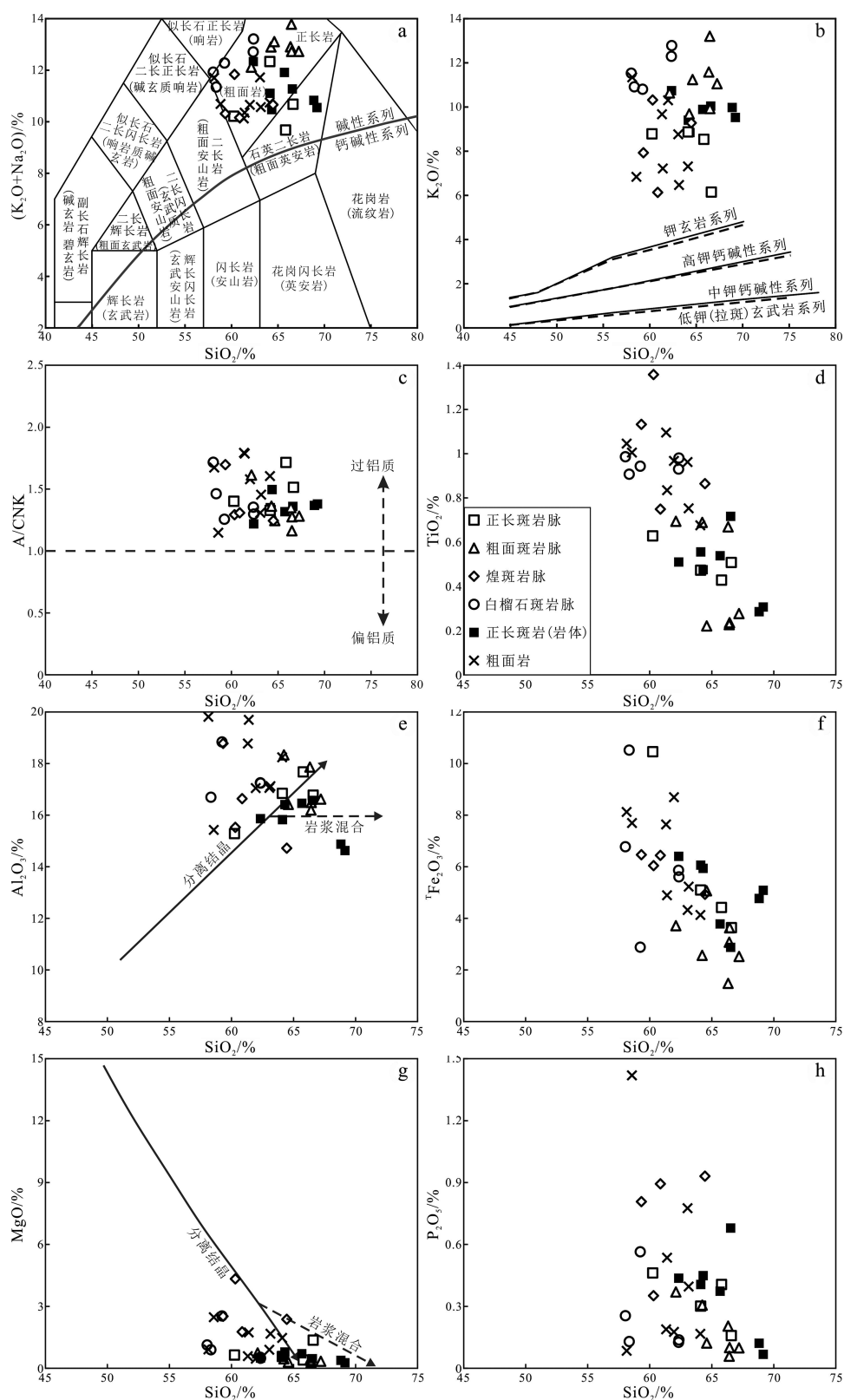


图 6 岩性判别图解与协变图解

Fig. 6 Lithological discrimination and variation diagrams

a— SiO_2 — $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 关系图 (TAS 图解); b— SiO_2 — K_2O 关系图; c— SiO_2 — A/CNK 关系图; d~h—Harker 图解

表 2 老街子铅-银矿床富碱岩脉主量、微量和稀土元素含量
Table 2 Major, trace and rare earth elements concentrations for the alkali-rich dikes of the Laojiezi Pb-Ag deposit

岩性	正长斑岩脉										粗面斑岩脉					煌斑岩脉					白榴石斑岩脉				
	S-1	S-2	S-3	WJ-9	WJ-3	WJ-11	WJ-14	WJ-15	WJ-15-2	S-4	Fe-12	WJ-10	Fe-9	A-428-2	N123	S-5	S-6	S-7	L-1	L-2					
SiO ₂	61.68	63.04	65.48	55.92	61.74	62.54	66.12	65.76	65.54	63.71	59.49	57.85	56.35	59.61	56.52	58.60	52.20	54.76	59.64	54.04					
TiO ₂	0.40	0.47	0.50	0.58	0.66	0.63	0.23	0.23	0.27	0.22	0.66	0.78	1.27	0.73	1.08	0.92	0.83	0.93	0.89	0.84					
Al ₂ O ₃	16.57	16.57	16.49	14.19	17.62	16.84	16.12	16.32	16.21	16.19	19.20	13.21	14.51	16.30	17.89	16.20	16.60	19.64	16.51	15.46					
TF ₂ O ₃	4.14	5.01	3.58	9.71	2.46	1.39	3.06	3.59	2.46	5.00	3.56	4.43	5.65	6.31	6.16	5.27	2.54	6.39	5.61	9.74					
MnO	0.70	0.08	0.04	1.42	0.10	0.02	0.02	0.04	0.11	0.24	0.04	0.04	0.06	0.09	0.04	0.07	0.15	0.02	0.36	1.14					
MgO	0.21	0.41	1.19	0.45	0.29	0.20	0.08	0.14	0.18	0.14	0.56	1.99	4.04	1.58	2.25	0.31	2.10	0.92	0.36	0.69					
CaO	0.59	0.35	0.39	0.64	0.55	0.31	0.11	0.19	0.24	0.09	0.30	1.05	0.17	2.51	0.72	0.07	2.39	0.20	0.04	0.07					
Na ₂ O	1.07	3.41	4.46	1.33	3.09	1.26	0.64	2.78	1.64	1.85	1.43	1.25	1.43	3.95	2.28	0.41	1.31	0.38	0.41	0.41					
K ₂ O	8.00	8.72	6.05	8.15	9.31	10.91	13.13	9.82	10.77	11.07	10.18	8.32	9.63	6.01	7.55	12.00	9.51	10.87	11.75	10.10					
P ₂ O ₅	0.38	0.30	0.16	0.43	0.29	0.19	0.06	0.10	0.10	0.12	0.35	0.84	0.33	0.88	0.77	0.13	0.50	0.24	0.12	0.12					
烧失量	4.18	1.47	1.59	5.55	1.78	2.52	0.69	1.15	1.83	1.04	3.22	2.53	3.76	1.98	2.78	2.32	5.39	4.40	2.21	4.97					
总计	97.93	99.82	99.92	98.38	97.90	96.81	100.25	100.13	99.36	99.68	99.00	92.28	97.19	99.94	98.04	96.30	93.51	98.75	97.90	97.58					
ALK	9.08	12.13	10.51	9.48	12.40	12.17	13.76	12.59	12.41	12.93	11.60	9.57	11.06	9.95	9.83	12.41	10.82	11.25	12.16	10.51					
K/N	7.45	2.56	1.36	6.12	3.01	8.68	20.63	3.54	6.55	5.98	7.13	6.67	6.75	1.52	3.32	29.06	7.26	28.61	28.66	24.63					
A/CNK	1.71	1.33	1.51	1.40	1.36	1.35	1.16	1.28	1.28	1.24	1.61	1.24	1.29	1.31	1.70	1.30	1.26	1.72	1.35	1.46					
AR	3.24	6.07	4.29	4.54	5.29	5.88	12.14	7.42	7.14	8.71	3.94	5.08	7.11	3.25	3.24	7.44	3.65	3.62	6.54	5.19					
Mg [#]	8.30	12.75	37.26	7.61	17.45	20.78	4.30	6.62	11.71	4.89	22.01	44.49	56.09	30.87	39.50	9.55	59.58	20.42	10.26	11.21					
Li	6.28	22.4	12.1	11.8	10.37	4.99	8.73	14.3	40.4	3.78	11.3	22.8	59.9	24.3	17.9	29.5	8.58	/	11.9	20.4					
Be	2.24	5.45	4.29	6.71	3.81	1.89	4.85	9.14	9.00	5.70	5.09	5.11	8.20	4.27	3.44	6.02	5.78	/	4.72	5.98					
Sc	9.10	8.06	5.11	5.79	4.33	3.99	0.938	1.30	1.55	1.99	7.98	4.88	16.2	17.1	10.04	7.73	4.55	15.9	5.90	5.80					
V	33.3	55.8	46.3	79.7	64.3	79.8	27.7	35.9	30.1	35.5	77.0	73.9	99.7	96.0	103	176	109	162	186	184					
Cr	15.0	16.1	23.1	17.4	7.11	10.94	4.07	4.99	6.48	50.5	20.0	86.9	169	141	148	51.8	45.3	15.0	2.00	1.00					
Co	10.17	10.56	3.83	10.8	6.73	7.25	0.749	1.37	4.30	2.09	9.07	21.1	24.3	21.1	16.8	12.8	12.0	16.0	12.1	20.4					
Ni	21.3	10.40	18.4	17.4	8.52	22.5	2.15	3.95	7.15	7.49	16.0	61.6	123	78.0	106	41.0	27.4	13.5	10.6	19.7					

续表 2-1

岩性	正长斑岩脉					粗面斑岩脉					煌斑岩脉					白榴石斑岩脉				
	S-1	S-2	S-3	WJ-9	WJ-3	WJ-11	WJ-14	WJ-15	WJ-15-2	S-4	Fe-12	WJ-10	Fe-9	A-428-2	NI23	S-5	S-6	S-7	L-1	L-2
Cu	132	38.8	21.4	34.7	20.6	62.4	4.73	4.73	14.4	26.5	23.1	743	84.8	32.5	60.7	42.8	39.5	21.2	24.6	8.80
Zn	2800	54.6	31.0	1035	317	1044	260	424	733	460	323	687	317	157	517	383	197	153	628	1200
Ga	27.1	37.9	32.2	22.9	23.3	17.9	32.8	33.2	35.0	21.0	29.3	23.9	23.0	23.5	23.6	28.9	22.2	/	26.6	26.5
As	134	10.00	3.90	119	60.8	43.5	53.5	38.5	78.2	41.0	117	356	14.2	4.40	14.0	32.0	27.0	26.0	/	/
Rb	302	244	228	323	402	413	641	526	643	637	577	265	473	227	300	542	302	339	486	411
Sr	930	839	772	2804	2729	1500	396	621	582	338	2295	1611	2203	1523	2537	1400	3100	2200	1460	1285
Zr	489	529	129	521	685	756	944	978	843	915	842	735	745	247	802	1505	609	1046	1390	1340
Nb	25.0	34.4	18.9	22.6	40.1	38.1	66.8	66.4	57.4	58.0	30.3	35.2	34.0	15.8	38.8	62.6	39.5	50.3	58.3	56.8
Mo	2.48	1.94	0.594	1.38	2.50	2.28	0.493	0.507	1.47	1.47	0.8	13.7	3.64	1.78	6.25	1.66	7.10	2.10	1.16	1.27
Sn	1.81	2.09	1.20	3.21	3.82	4.20	3.93	4.37	4.28	3.39	4.6	4.22	3.51	1.53	3.86	4.04	3.61	/	4.30	4.50
Sb	15.0	1.10	1.20	3.12	7.19	9.19	8.09	8.61	4.85	5.40	13.8	28.6	3.40	0.600	12.0	3.00	2.40	0.900	/	/
Cs	5.09	3.60	2.84	9.18	8.60	4.42	4.41	5.32	5.77	10.09	5.9	4.87	13.6	11.9	24.4	11.3	6.82	/	8.12	8.52
Ba	1420	5016	2595	8184	5732	5390	933	870	1753	717	4150	7415	13955	3851	8061	11510	11000	9200	9260	9750
Hf	5.62	11.9	3.55	17.1	23.6	33.3	31.3	37.9	34.2	24.4	14.7	28.2	5.68	6.23	19.2	30.1	9.49	21.0	32.1	30.3
Ta	1.22	1.69	0.934	1.07	1.90	1.80	1.83	1.85	1.64	1.88	1.77	1.59	1.41	0.865	2.02	3.04	1.74	2.00	2.70	2.70
Hg	24.0	0.050	0.020	0.505	1.98	5.68	0.384	0.696	1.81	0.160	92.3	4.31	86.2	0.020	0.390	0.070	0.120	/	/	/
Tl	6.03	2.23	1.32	6.28	7.52	7.14	7.67	7.15	10.34	12.0	10.68	3.36	3.42	0.929	4.25	5.67	2.48	/	4.04	2.70
Pb	15800	276	29.7	1645	3459	26140	136	309	5212	372	757	12200	177	118	139	302	199	124	63.9	70.0
Bi	0.252	0.957	6.40	0.399	0.176	0.069	0.260	0.328	0.363	0.401	0.659	0.402	0.513	0.120	0.204	0.130	0.127	/	/	/
Th	44.3	58.9	39.0	56.9	54.1	27.0	167	173	179	77.9	79.6	58.9	49.0	70.3	45.0	81.6	36.4	59.6	75.7	69.3
U	5.70	8.84	5.07	7.86	6.92	4.17	22.6	30.3	30.0	18.0	9.98	6.26	5.01	9.27	9.16	17.9	4.77	7.80	11.05	15.4
Ag	24.3	<2.00	<2.00	2.95	6.22	14.0	0.267	0.076	2.25	2.00	<2.00	15.6	<2.00	<2.00	2.00	2.00	2.00	<2.00	/	/
Au	/	/	/	12.8	5.21	5.60	10.27	6.13	9.25	/	/	55.1	/	/	/	/	/	/	/	/

续表 2-2

岩性	正长斑岩脉				粗面斑岩脉							煌斑岩脉					白榴石斑岩脉				
	S-1	S-2	S-3	WJ-9	WJ-3	WJ-11	WJ-14	WJ-15	WJ-15-2	S-4	Fe-12	WJ-10	Fe-9	A-428-2	N123	S-5	S-6	S-7	L-1	L-2	
La	312	154	91.6	131	150	179	199	197	184	154	135	438	221	243	186	232	272	213	209	198	
Ce	551	294	194	268	301	384	323	316	294	209	228	649	361	542	347	454	503	381	378	361	
Pr	58.1	33.6	20.2	30.3	33.2	42.7	27.3	26.8	24.9	16.8	30.5	61.1	47.0	50.2	37.4	45.1	53.8	49.6	38.8	37.8	
Nd	212	128	77.7	110	118	145	72.4	72.0	68.9	44.5	102	194	171	172	135	161	192	196	134	131	
Sm	28.5	17.7	10.69	15.0	15.9	19.1	8.80	8.63	8.21	5.18	18.2	21.8	27.7	26.2	22.0	27.2	29.7	28.0	22.5	21.8	
Eu	6.71	3.89	2.45	4.33	4.48	5.34	2.05	2.05	2.07	1.35	5.53	6.98	10.05	6.33	8.30	11.2	10.65	6.80	5.77	5.80	
Gd	21.4	9.96	6.56	10.77	11.3	13.6	7.95	7.79	7.36	5.35	14.8	16.9	22.1	20.7	19.4	24.1	23.9	17.8	15.8	15.9	
Tb	2.04	1.42	0.874	1.26	1.29	1.55	0.884	0.866	0.835	0.540	1.83	1.70	2.50	2.25	2.15	2.71	2.37	2.60	1.99	1.98	
Dy	8.56	5.47	3.32	5.78	6.00	7.15	4.39	4.30	4.26	2.66	7.06	7.20	8.95	10.94	10.22	12.5	9.85	10.40	9.48	9.52	
Ho	1.32	0.914	0.561	0.922	0.930	1.13	0.779	0.769	0.760	0.475	1.22	1.15	1.48	1.85	1.63	1.88	1.33	1.80	1.56	1.55	
Er	3.00	2.55	1.54	2.72	2.66	3.42	2.57	2.55	2.50	1.42	3.07	3.52	3.48	4.95	4.22	4.85	3.00	4.50	3.85	3.81	
Tm	0.346	0.341	0.192	0.381	0.356	0.453	0.404	0.411	0.402	0.227	0.426	0.478	0.432	0.631	0.586	0.669	0.433	0.600	0.520	0.490	
Yb	1.98	2.14	1.14	2.77	2.49	3.30	3.06	3.10	3.02	1.27	2.58	3.46	2.61	3.87	3.22	3.79	2.12	3.60	2.99	2.90	
Lu	0.341	0.365	0.186	0.482	0.353	0.528	0.428	0.448	0.438	0.227	0.445	0.551	0.492	0.562	0.512	0.598	0.365	0.600	0.460	0.430	
Y	33.1	23.4	14.4	32.9	30.0	39.6	29.4	28.9	30.0	13.5	40.3	38.3	43.8	42.2	48.6	54.6	37.0	47.6	45.5	45.5	
ΣREE	1208	654	411	583	648	807	653	643	602	443	551	1406	880	1086	778	982	1105	916	825	791	
LREE	1169	631	397	558	623	776	633	623	583	431	520	1371	838	1040	736	931	1061	874	788	755	
HREE	39.0	23.2	14.4	25.1	25.4	31.2	20.5	20.2	19.6	12.2	31.4	35.0	42.0	45.8	41.9	51.1	43.4	41.9	36.7	36.5	
LREE/HREE	29.9	27.2	27.6	22.3	24.5	24.9	30.9	30.8	29.8	35.4	16.6	39.2	19.9	22.7	17.6	18.2	24.5	20.9	21.5	20.7	
(La/Yb) _N	113	51.6	57.4	33.9	43.2	39.1	46.7	45.7	43.8	87.2	37.7	90.7	60.7	44.9	41.5	43.9	91.9	42.4	50.1	49.0	
δEu	0.830	0.895	0.895	1.04	1.02	1.01	0.748	0.763	0.814	0.781	1.03	1.11	1.24	0.832	1.23	1.34	1.22	0.931	0.936	0.954	
δCe	1.00	1.00	1.11	1.04	1.05	1.08	1.08	1.06	1.07	1.01	0.869	0.972	0.868	1.20	1.02	1.09	1.02	0.909	1.03	1.02	

注: S-1~7 地球化学数据据孙春迪(2017), L-1、L-2 地球化学数据据罗晨皓(2018); 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

表 3 老街子铅-银矿床富碱岩体主量、微量和稀土元素含量
Table 3 Major, trace and rare earth elements concentrations for the alkali-rich masses of the Laojiezi Pb-Ag deposit

岩性	正长斑岩(岩体)												粗面岩			
	WJ-2	WJ-4	WJ-14-3	S-8	S-9	S-10	S-11	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Fe-10-1	Fe-10-2	A-504-1	A-506	
样品号																
SiO ₂	58.80	63.41	62.45	66.38	66.60	60.89	58.18	56.55	55.05	61.63	60.96	57.19	58.67	58.93	60.98	
TiO ₂	0.51	0.52	0.67	0.28	0.30	0.45	0.48	0.97	0.99	0.65	0.93	1.02	0.92	0.80	0.73	
Al ₂ O ₃	14.51	15.89	15.55	14.34	14.09	15.53	14.80	14.89	18.85	17.54	16.49	17.51	16.14	18.90	16.54	
T Fe ₂ O ₃	5.56	3.65	2.70	4.60	4.89	5.62	5.97	7.43	7.69	3.97	4.18	7.13	8.23	4.70	5.05	
MnO	0.80	0.12	0.14	0.03	0.04	0.77	1.01	0.11	0.03	0.02	0.04	0.07	0.03	0.02	0.05	
MgO	0.40	0.53	0.27	0.22	0.11	0.60	0.32	2.24	0.72	1.27	0.72	0.40	0.29	1.52	1.47	
CaO	0.57	0.56	0.86	0.04	0.05	0.48	0.64	2.68	0.19	0.60	1.28	0.32	0.14	0.65	1.17	
Na ₂ O	1.57	1.96	1.16	0.83	0.99	1.55	1.50	3.70	0.35	3.30	2.86	0.44	0.35	3.01	3.96	
K ₂ O	8.62	9.54	9.42	9.62	9.17	8.37	10.01	6.60	10.73	7.03	8.47	9.01	9.75	6.93	6.25	
P ₂ O ₅	0.37	0.36	0.64	0.12	0.07	0.43	0.41	1.37	0.08	0.16	0.75	0.18	0.17	0.51	0.38	
烧失量	3.95	1.58	2.72	2.63	3.08	3.15	4.60	0.97	2.77	2.11	1.12	4.68	3.71	2.80	2.56	
总计	95.66	98.13	96.59	99.08	99.38	97.83	97.91	97.51	97.45	98.28	97.80	97.93	98.40	98.78	99.14	
ALK	10.18	11.50	10.58	10.45	10.16	9.92	11.51	10.30	11.08	10.33	11.33	9.45	10.09	9.94	10.21	
K/N	5.49	4.86	8.09	11.57	9.24	5.40	6.68	1.78	30.66	2.13	2.96	20.57	28.22	2.30	1.58	
A/CNK	1.35	1.32	1.36	1.37	1.38	1.50	1.22	1.15	1.67	1.60	1.31	1.79	1.58	1.79	1.45	
AR	5.16	5.65	4.63	6.31	6.11	4.25	6.85	3.83	3.78	3.65	4.52	3.25	4.26	3.07	3.72	
Mg [#]	11.42	20.59	14.99	7.85	3.78	16.01	8.62	34.96	14.30	36.32	23.49	9.10	5.99	36.60	34.17	
Li	8.07	11.1	9.37	27.8	20.5	18.9	5.88	22.5	23.9	13.0	15.0	10.52	11.1	13.0	12.7	
Be	1.97	4.84	5.73	5.42	5.87	2.73	2.20	10.66	7.53	5.26	3.5	4.33	4.57	6.40	4.56	
Sc	3.75	5.13	6.33	1.71	1.70	7.69	7.77	12.5	4.87	5.24	9.89	5.41	5.23	9.06	7.61	
V	59.7	65.3	72.2	37.1	46.7	35.2	49.4	221	186	77.1	130	166	148	71.3	61.8	
Cr	22.3	33.5	18.6	54.6	55.1	15.0	15.0	127	134	123	23.3	12.2	13.62	70.0	74.3	
Co	9.58	9.99	11.3	4.21	5.69	10.62	8.88	17.79	9.86	7.27	4.91	29.5	8.65	9.73	9.36	
Ni	18.7	18.2	14.1	30.8	8.76	19.8	13.2	116	118	69.3	35.6	23.6	10.70	44.8	47.6	
Cu	135	146	65.2	26.5	33.3	102	57.8	24.93	32.4	11.5	12.4	532	56.7	40.6	25.9	
Zn	1815	273	1928	228	241	1100	831	293	125	208	250	2403	416	178	130	
Ga	15.4	25.9	23.9	25.1	26.3	24.0	22.6	23.8	25.0	23.2	22.7	21.1	22.0	27.8	24.0	
As	135	108	75.0	17.0	55.0	57.0	144	6.69	12.11	6.35	8.69	204	25.6	5.88	8.23	
Rb	232	325	403	482	462	276	322	234	412	195	185	391	417	195	182	
Sr	1074	1462	1262	240	377	1300	1099	3819	1463	2727	3908	1285	1218	3307	3366	
Zr	332	409	612	322	178	403	395	905	1505	622	773	1489	1399	539	483	
Nb	18.7	27.0	40.4	43.7	46.7	26.8	26.7	33.8	46.5	24.2	32.2	53.0	53.1	18.2	15.4	
Mo	9.40	3.90	4.17	2.58	2.16	1.65	2.29	5.31	12.9	8.43	1.58	1.44	2.83	1.22	0.797	

续表 3

岩性	正长斑岩(岩体)											粗面岩				
	样品号	WJ-2	WJ-4	WJ-14-3	S-8	S-9	S-10	S-11	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Fe-10-1	Fe-10-2	A-504-1	A-506
	Sn	2.39	3.76	3.07	3.30	3.55	1.88	2.11	3.79	5.17	2.94	2.81	4.12	4.18	3.93	2.31
	Sb	19.9	21.6	14.9	2.20	2.00	11.0	16.0	0.270	0.89	0.850	0.150	4.13	3.54	0.734	0.881
	Cs	6.49	7.61	8.00	4.53	4.56	4.65	5.28	1.54	1.38	4.93	3.27	7.98	9.40	3.66	4.00
	Ba	2935	4879	3843	1728	1608	3227	2881	9538	10405	4685	10139	11180	9738	6952	4944
	Hf	14.0	11.7	23.5	9.46	6.61	2.01	2.16	19.4	29.1	12.3	15.9	3.43	4.97	6.77	5.78
	Ta	1.03	1.22	1.82	2.42	2.53	1.09	0.825	1.58	2.08	1.29	1.69	1.50	1.25	1.93	0.97
	Hg	3.43	1.69	2.54	0.110	0.770	1.80	1.10	0.730	0.820	0.900	0.800	14.0	107.9	21.0	19.4
	Tl	4.98	6.99	7.17	6.49	7.63	3.49	4.03	1.68	2.31	2.09	0.610	3.52	4.12	1.48	1.04
	Pb	24756	2260	10280	263	1200	10900	9300	375	104	138	69.1	207	127	201	123
	Bi	0.182	0.210	0.137	0.194	0.321	0.162	0.178	0.130	0.200	0.350	0.040	0.122	0.278	0.983	0.207
	Th	30.5	67.5	90.0	68.5	63.6	20.8	35.1	44.5	57.5	44.8	30.8	87.1	81.2	61.8	53.5
	U	3.53	4.47	10.40	16.3	18.3	6.05	2.13	5.90	8.40	8.27	9.83	2.75	3.84	8.21	4.26
	Ag	21.3	5.18	4.63	2.00	2.00	<2.00	12.0	/	/	/	/	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00
	Au	26.4	61.5	25.5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	La	282	302	155	234	184	553	314	282	281	187	182	130	133	225	158
	Ce	462	524	299	368	305	820	503	528	338	327	305	226	221	409	258
	Pr	45.0	51.0	32.0	35.2	29.1	77.5	48.7	54.8	51.4	33.5	35.7	30.7	30.3	52.4	35.1
	Nd	147	158	112	109	93.4	267	170	216	164	107	121	101	98.1	178	115
	Sm	15.8	17.2	14.3	14.8	13.4	31.4	20.5	31.8	28.4	18.8	24.4	15.4	15.1	27.0	17.5
	Eu	3.72	4.24	3.41	3.75	3.33	8.22	5.55	8.15	7.51	5.08	7.35	5.81	5.90	8.08	5.43
	Gd	11.7	12.6	10.13	12.6	11.4	25.9	16.6	20.2	20.5	12.7	17.4	11.5	11.8	20.1	13.2
	Tb	1.09	1.18	1.13	1.13	1.10	2.25	1.42	2.31	2.68	1.46	2.19	1.28	1.30	2.07	1.41
	Dy	4.21	4.59	4.98	4.74	4.96	8.97	5.62	11.6	13.8	6.90	10.85	4.31	4.30	7.19	5.23
	Ho	0.613	0.673	0.813	0.719	0.720	1.38	0.796	1.59	2.08	0.960	1.60	0.641	0.664	1.17	0.934
	Er	1.75	1.96	2.54	2.15	2.04	3.30	2.02	4.68	5.88	3.11	4.44	1.38	1.56	3.06	2.51
	Tm	0.210	0.253	0.365	0.339	0.325	0.376	0.242	0.430	0.680	0.330	0.500	0.168	0.172	0.364	0.349
	Yb	1.45	1.84	2.64	1.97	1.82	2.25	1.42	2.82	4.30	2.21	3.24	1.01	1.08	2.10	2.06
	Lu	0.233	0.319	0.397	0.351	0.305	0.399	0.253	0.420	0.610	0.330	0.470	0.226	0.251	0.380	0.373
	Y	17.9	20.3	26.3	21.6	21.2	36.6	20.0	44.2	72.3	29.5	32.4	48.3	50.2	33.9	33.9
	ΣREE	976	1080	639	789	650	1802	1089	1165	921	707	716	530	524	936	615
	LREE	955	1057	616	765	628	1757	1061	1121	870	679	675	509	503	900	589
	HREE	21.3	23.4	23.0	24.0	22.7	44.8	28.3	44.1	50.6	28.0	40.7	20.5	21.1	36.4	26.1
	LREE/HREE	44.9	45.2	26.8	31.8	27.6	39.2	37.5	25.4	17.2	24.3	16.6	24.8	23.9	24.7	22.6
	(La/Yb) _N	139	118	42.2	85.2	72.4	176	158	71.7	46.8	60.7	40.3	92.9	88.6	76.9	55.0
	δEu	0.837	0.879	0.865	0.839	0.823	0.881	0.921	0.983	0.952	1.01	1.09	1.33	1.35	1.06	1.09
	δCe	1.01	1.04	1.04	0.994	1.02	0.972	1.00	1.04	0.690	1.01	0.928	0.878	0.851	0.923	0.851

注: S-8~11 地球化学数据据孙春迪(2017), Y-1~4 地球化学数据据严清高(2018); 微量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

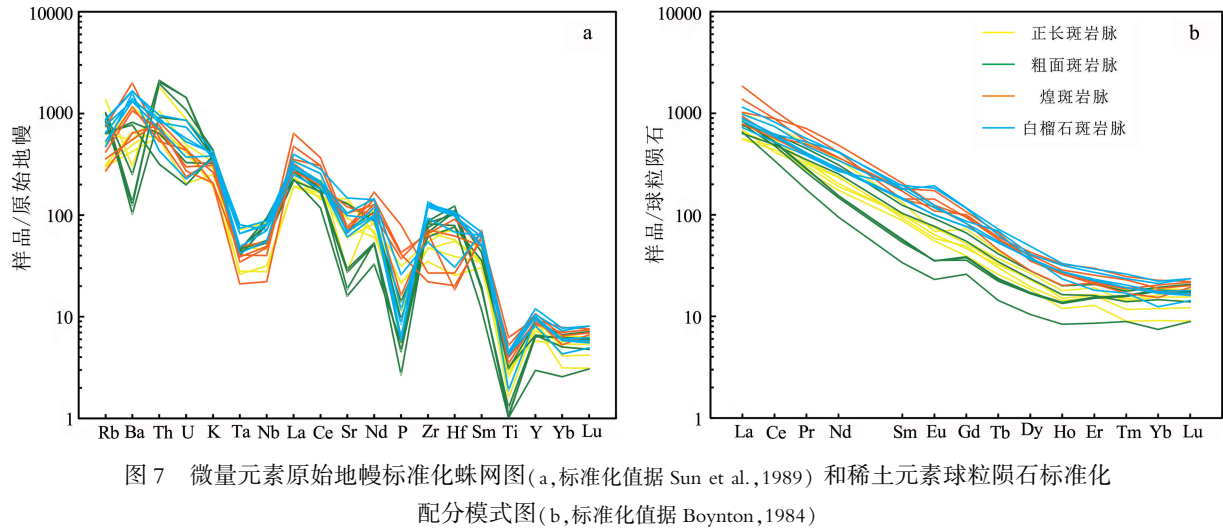


Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams(a) and chondrite-normalized rare earth element patterns(b)

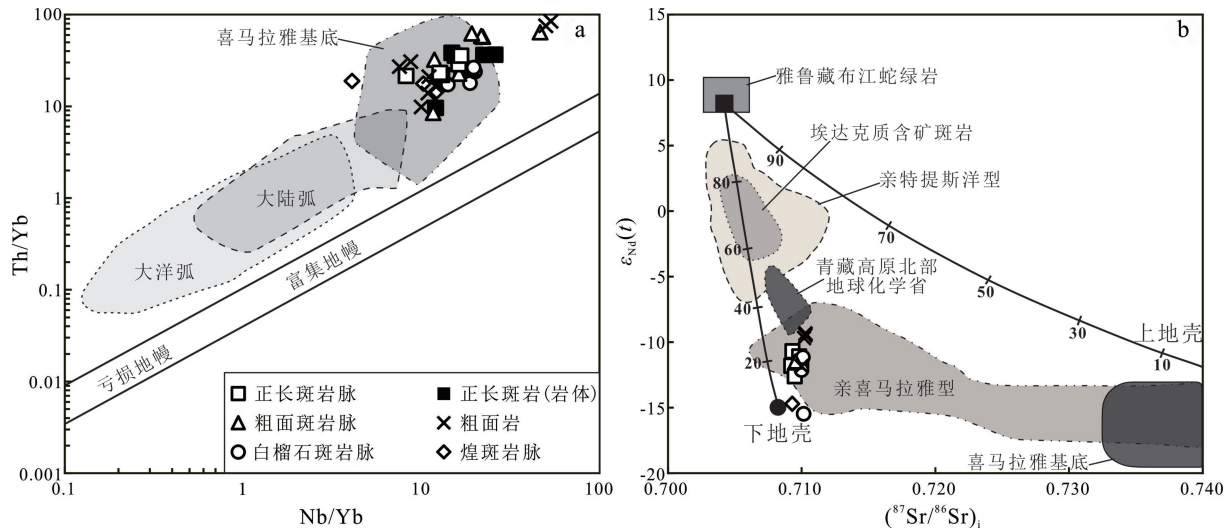


图 8 Nb/Yb-Th/Yb 图解(a,底图据 Zhao et al.,2009)和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(b,底图据莫宣学等,2006)

(富碱岩脉 Sr-Nd 同位素数据据程锦等,2007;Yan et al.,2018;罗晨皓,2018)

Fig. 8 Nb/Yb vs.Th/Yb diagram(a) and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram(b)

粗面斑岩脉具有极低的 MgO ($0.08\% \sim 0.56\%$)、Cr ($4.07 \times 10^{-6} \sim 50.5 \times 10^{-6}$) 及 Ni 含量 ($2.15 \times 10^{-6} \sim 22.5 \times 10^{-6}$),在图 9 上主要落在加厚下地壳源,认为粗面斑岩脉受地幔组分影响较小;正长斑岩脉(体)受地幔组分影响程度略高于粗面斑岩脉(MgO 含量为 $0.11\% \sim 1.19\%$ 、Cr 为 $15.0 \times 10^{-6} \sim 54.6 \times 10^{-6}$ 、Ni 为 $8.76 \times 10^{-6} \sim 30.8 \times 10^{-6}$);白榴石斑岩脉和粗面岩受地幔组分影响较大,具较高的 MgO ($0.31\% \sim 2.24\%$)、Cr ($1.00 \times 10^{-6} \sim 134 \times 10^{-6}$) 及 Ni 含量 ($10.6 \times 10^{-6} \sim 118 \times 10^{-6}$);煌斑岩脉的 MgO

($1.58\% \sim 4.04\%$)、Cr ($86.9 \times 10^{-6} \sim 169 \times 10^{-6}$) 及 Ni 含量 ($61.6 \times 10^{-6} \sim 106 \times 10^{-6}$),在图 9 上主要落在俯冲洋壳和拆沉下地壳区域,认为其受地幔组分影响最大,可能来自地壳物质进入地幔后形成的壳-幔混合源区。

根据富碱岩脉(体)侵位时序:粗面岩→正长斑岩脉(体)→粗面斑岩脉→白榴石斑岩脉→煌斑岩脉,推测可能由于混入地幔组分比例不同,加之经历了不同程度的岩浆演化,造成源区物理、化学的分带现象。首先,粗面斑岩脉较正长斑岩及粗面

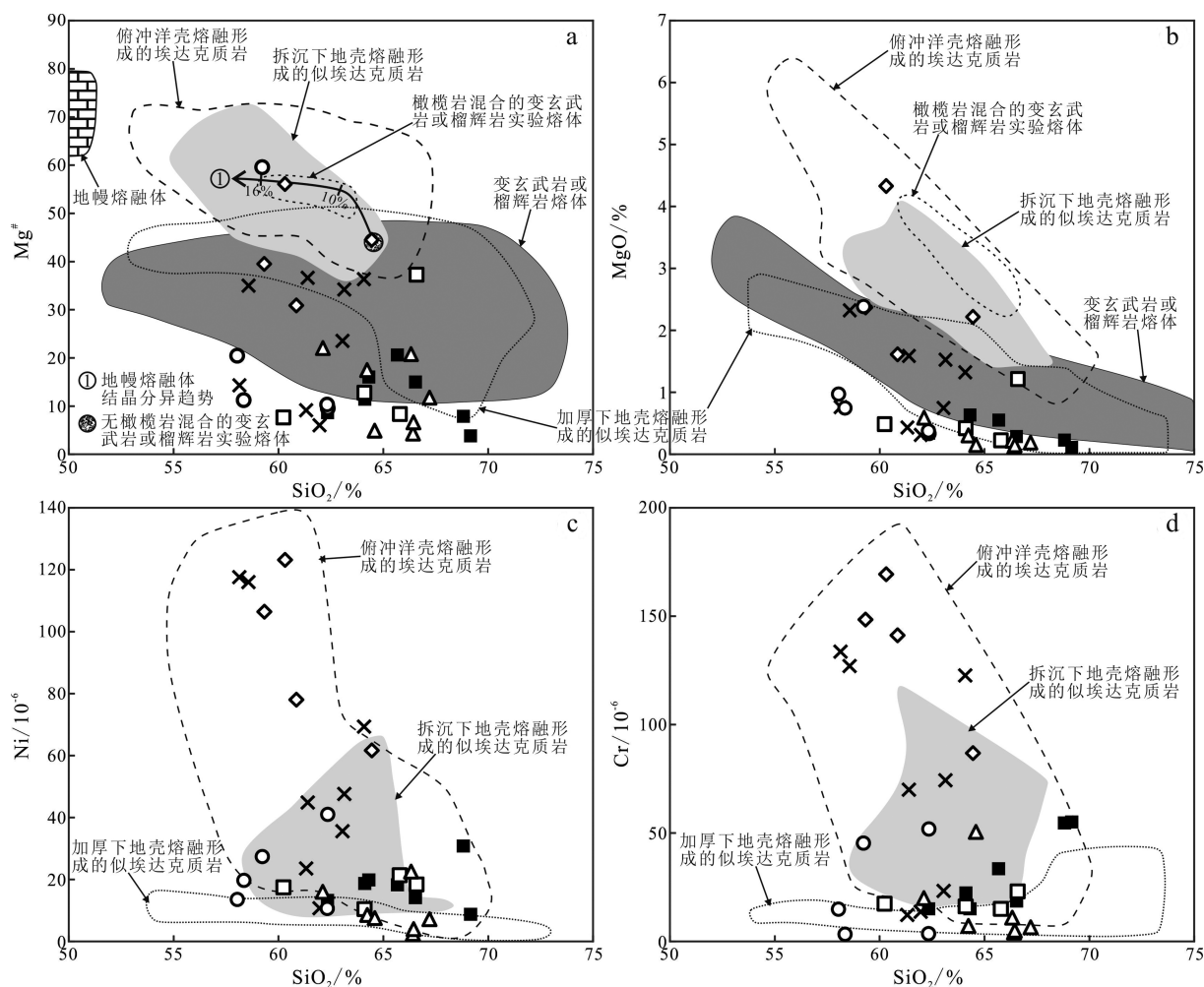


图9 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ (a)、 SiO_2 - MgO (b)、 SiO_2 - Ni (c) 和 SiO_2 - Cr (d) 图解 (底图据 Lu et al., 2013)

Fig. 9 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ (a), SiO_2 - MgO (b), SiO_2 - Ni (c) and SiO_2 - Cr (d) diagrams

岩,岩浆演化程度更高(黄仲金等,2022);而且白榴石斑岩脉中似长石矿物的出现,说明相较于其他几类岩脉(体),白榴石斑岩脉具有更高的演化程度。因此,粗面斑岩脉与白榴石斑岩脉的原始岩浆应存在于岩浆房内更靠下层的位置,从而更晚侵位。由于岩石圈地幔密度低,榴辉岩下地壳密度大(许田,2019),在混入了地幔组分后的岩浆房内,低密度的地幔物质表现出高浮力的特性,停留在岩浆房上层位置,上层岩浆最先上升侵位,表现出较强的幔源特征,形成粗面岩;中层靠下的岩浆受地幔组分的影响相对较小,稍晚侵位后形成正长斑岩脉(体)和粗面斑岩脉;下层岩浆由于与地幔直接接触,混入了较多的地幔组分,侵位形成白榴石斑岩脉;拆沉下地壳或俯冲洋壳进入富集地幔,混合生成的岩浆

最晚侵位生成煌斑岩脉。

在 La - La/Sm 图解(图10)上,正长斑岩(体)的 La/Sm 值与 La 呈显著正相关,表明其为部分熔融作用的产物;4类岩脉和粗面岩更符合结晶分异趋势线,表明其形成主要由结晶分异作用控制。 TiO_2 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 P_2O_5 和 SiO_2 的显著负相关(图6-d~h)与 Ta 、 Nb 、 Sr 、 P 、 Ti 元素的强烈亏损,表明存在钾长石、白榴石、黑云母,以及磷灰石、磁铁矿等副矿物的分离结晶,而无明显的负 Eu 异常,反映岩浆演化过程中可能没有斜长石结晶分异。

通常认为,区域上的富碱斑岩形成于裂谷作用的拉张条件下(涂光炽,1989;张玉泉等,1987)。根据老街区铅-银矿床富碱岩脉(体)高钾特征,采用 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图11-a)和 Zr/TiO_2 -

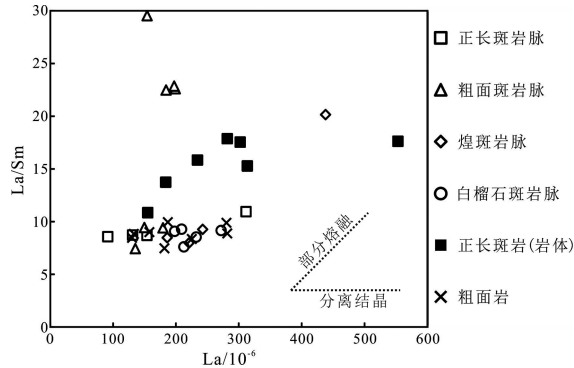


图 10 La-La/Sm 图解

Fig. 10 La-La/Sm diagram

Ce/P₂O₅图解(图 11-b)进行投图(赵振华, 2007), 显示粗面斑岩脉、粗面岩、煌斑岩脉及白榴石斑岩脉主要形成于板内环境, 而正长斑岩脉(体)主要落在大陆弧区域。区内富碱岩脉(体)的成岩时代主要集中在 33 Ma, 与晚碰撞阶段(40~26 Ma)“三江”地区的陆内剪切走滑作用相对应(钟大赉等, 2000)。正长斑岩指示的大陆弧环境特征反映, 成岩环境为印-亚大陆俯冲背景下的活动大陆边缘, 与岩脉(体)成岩环境为晚碰撞阶段的板内拉张构造环境相矛盾, 这可能是由于岩浆活动的“滞后效应”(莫宣学, 1992; 邓万明等, 1998)造成的。

综上, 笔者认为, 老街子铅-银矿床富碱岩脉

(体)的岩石成因为: 在印-亚大陆碰撞的动力学背景下, 部分海水或俯冲沉积物被带到地幔楔内, 发生交代形成富集地幔; 持续的碰撞造山作用导致青藏高原隆升, 使地壳增厚, 重力异常引发山根拆沉和岩石圈减薄(Lu et al., 2015), 致使上覆地幔楔部分熔融产生的钾质岩浆, 沿构造薄弱带向活动大陆边缘扩散, 底侵至加厚下地壳, 为地壳物质的部分熔融提供热源及少量地幔组分; 在此“滞留”期间, 壳-幔相互作用形成岩浆房, 但由于地幔物质混入比例和岩浆演化程度的不同, 导致岩浆房内物理和化学的分带; 在碰撞晚阶段陆内剪切-走滑背景下, 派生出的一系列次级断裂构造, 使岩浆逐层上升侵位至地壳浅层, 造成矿区富碱岩脉(体)的化学组分和矿物组合的变化。

4.2 岩脉-成矿关系

“小岩体成(大)矿”理论体系(汤中立等, 2015)提出以来, 岩脉与成矿的关系得到广泛关注, 在指导找矿工作中尤为重要。研究区含矿富碱斑岩体以小岩株为主, 其次为岩脉和岩墙。空间上, 铅-银矿(化)体主要产于正长斑岩体内部, 粗面斑岩脉上盘常发育平行于脉体的方铅矿脉(图 12), 且铅矿(化)体在岩脉上下盘变厚、加富(图 3-c、d), 可作为宏观上的找矿标志。显微镜下, 4 类岩脉均可见到方铅矿和黄铁矿, 粗面斑岩还见镜铁矿化(图版 I)。时间上, 铅矿化为岩浆期后热液沿断裂充填作用产物, 成矿与岩脉侵位同时或稍晚于岩脉

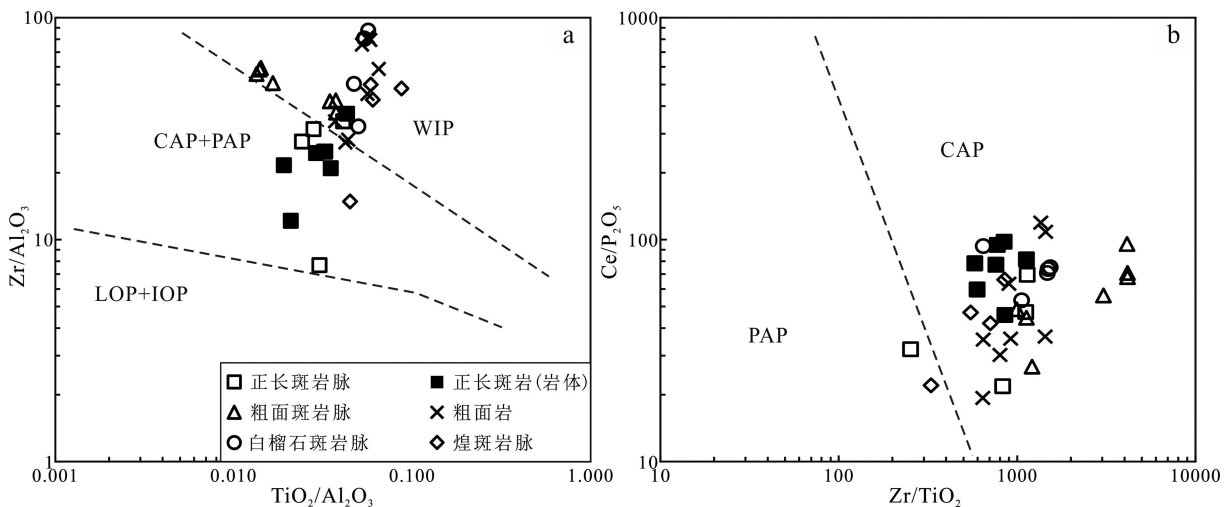


图 11 构造环境判别图解(据 Abdel-Rahman, 1994)

Fig. 11 Diagram for discriminating tectonic settings

WIP—板内; CAP—大陆弧; PAP—后碰撞弧; IOP—初始洋弧; LOP—晚期洋弧

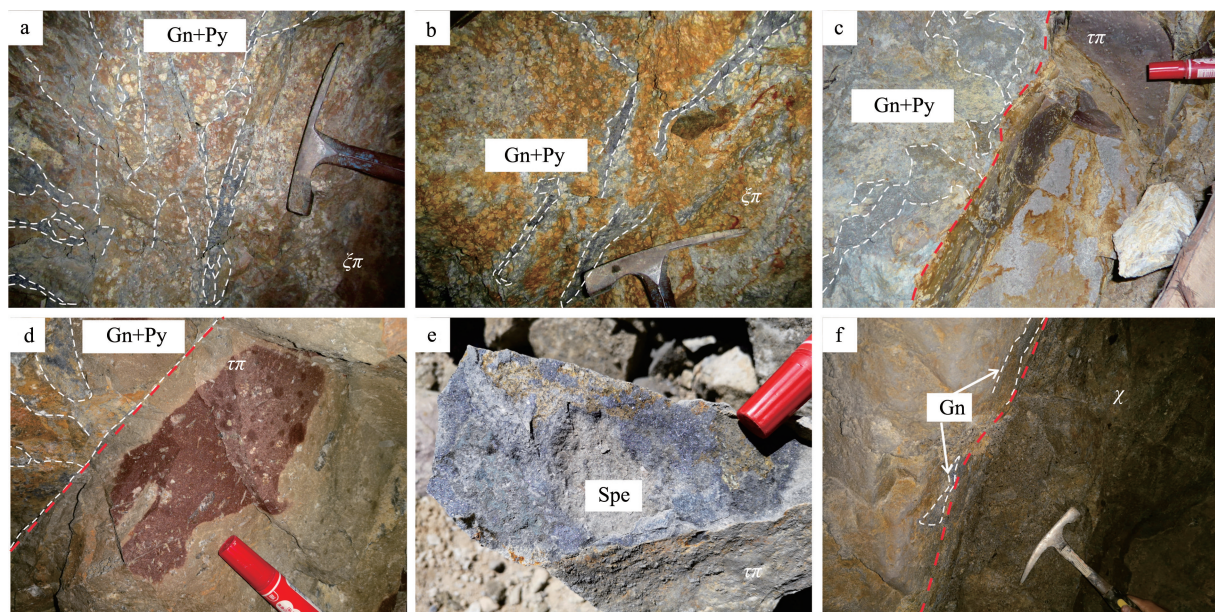


图 12 老街子铅-银矿床富碱岩脉与矿化的空间关系

Fig. 12 Spatial relationship diagram between the alkali-rich dikes and mineralization of the Laojiezi Pb-Ag deposit

a、b—正长斑岩脉体内发育网脉状方铅矿；c、d—粗面斑岩脉上盘发育黄铁矿和方铅矿化；e—粗面斑岩发育镜铁矿化；f—煌斑岩脉沿上裂面见方铅矿脉；ξπ—正长斑岩；τπ—粗面斑岩；X—煌斑岩；Gn—方铅矿；Py—黄铁矿；Spe—镜铁矿

就位(王建飞等,2016;江小均等,2018)。成矿物质主要来源于壳幔相互作用而形成的岩浆(严清高,2018;江小均等,2018),与富碱岩脉在源区上可能存在一定联系。

全岩主量、微量元素分析结果(表2)显示,4类岩脉均相对富含岩浆演化晚阶段的碱土金属元素Li及Rb、K,而贫Sr、Ba,因此,K/Rb和Rb/Sr值仍接近世界花岗岩的平均值。对比主要矿化元素后发现,正长斑岩、粗面斑岩的Pb、Zn、Ag元素含量普遍高于维诺格拉多夫值的5~10倍(图13),局部Au元素富集,表示2类岩脉具有成矿的物质基础(李光斗等,2010)。通过研究矿化元素组合,煌斑岩脉中相对富集Cu、Mo、Fe、Cr、Co、Ni、V(个别样品Au含量较高),指示矿床深部可能存在铜钼矿化,这与2073 m中段局部出现的辉钼矿脉、铜矿化现象吻合(吴鹏等,2019);白榴石斑岩脉中相对富集Ba、V、Zr、U、Nb、Ta、REE,可能与热液活动及稀土元素富集有关,有待进一步研究。

综上所述,老街子铅-银矿床中富碱岩脉与矿(化)体在空间上密切共生,在形成时间与物质来源上具有一致性,表明二者存在一定的时空和成因联系;与煌斑岩脉有关的Cu-Mo(Au)矿化元素富集和与白榴石斑岩有关的稀土矿化元素富

集,为深部找矿预测提供了新的方向,有待进一步研究。

4.3 岩脉-构造关系

前人在研究岩脉时,认为岩脉既是一次(或几次)岩浆热液活动的产物(廖震等,2012;刘战庆等,2016),又是一定规模的构造运动的物质表现形式,即岩脉与张性构造相伴而生。通过大量统计研究区4类岩脉及断裂构造的产状,区内岩脉主要呈NE向分布,其次为NW向,推测NE向与NW向的断裂为拉张状态。对比矿区内断裂构造极点图(图14-a),断裂多呈NE向分布,其次为NW向,由此认为,区内NE向密集断裂构造和NW向次密集断裂构造与富碱岩脉的分布存在耦合关系,推测其为主要控岩构造。据李文昌等(2020)对扬子西缘陆内构造转换系统研究,认为印-亚板块碰撞晚阶段,沿NW向金沙江-红河发生了大规模左行走滑,并派生近SN向和近EW向的次级构造。推测在近EW向次级伸展作用下,派生出的一系列NE向与NW向小断裂,斜贯整个矿区,为深部岩浆活动提供了运移通道及赋存空间,岩浆上侵形成了NE向和NW向富碱岩脉。岩脉主要集中在NE60°~70°和NW50°~70°产出,通过构造应力场解析(图14-b),在近EW向挤压和近NS向伸展的应力场作用

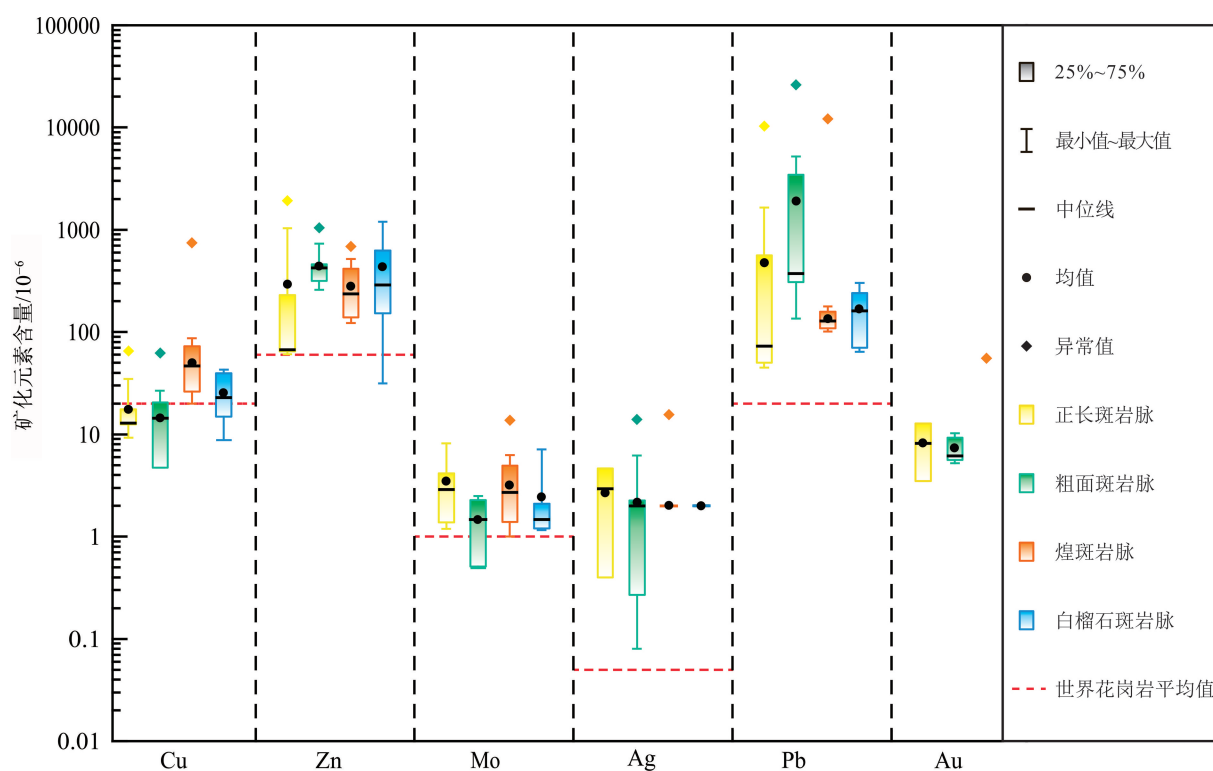


图 13 老街子铅-银矿床富碱岩脉主要矿化元素含量箱型图

Fig. 13 Box diagram of major mineralized elements concentrations for the alkali-rich dikes of the Laojiezi Pb-Ag deposit

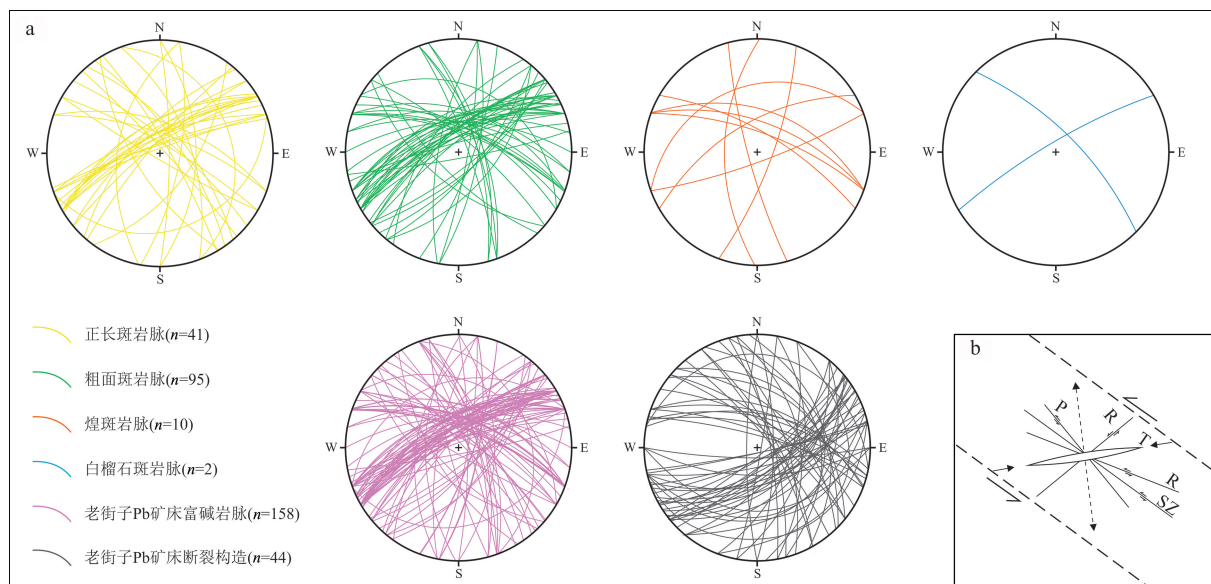


图 14 老街子铅-银矿床富碱岩脉与区域断裂构造极点图(a)和构造应力场解析(b,据李文昌等,2020)

Fig. 14 Pole diagram of the alkali-rich dikes and regional fault structures(a) and tectonic stress field analysis(b) of the Laojiezi Pb-Ag deposit

下,与之配套的 NE 向和 NW 向断裂为张扭性断裂构造。综上所述,老街子铅-银矿床中富碱岩脉产出主要受控于区域近 EW 向次级伸展断裂应力作用下的 NE 向和 NW 向张扭性断裂构造,在矿床尺

度上以 NE 向最显著。

4.4 时空结构

空间上,富碱岩脉主要呈 NE 向产出,其次为 NW 向;正长斑岩在地表分布最广,主要呈岩墙状、

岩株状、岩脉状侵位于粗面岩等火山岩中;粗面斑岩在各个中段更发育,呈脉状穿插到正长斑岩内;白榴石斑岩为底部侵入岩,侵位于粗面斑岩及其他火山岩下部;煌斑岩穿插在不同地层、侵入岩及火山岩中。

时间上,区内岩脉于喜马拉雅期(33 Ma 左右)集中侵入新生代不同地层中,以老街子组($E_{2-3}l$)最集中。根据岩脉与围岩的穿插关系、岩性组合,以及与其他侵入岩、火山岩之间的侵入接触或不整合接触关系,将区内岩脉划分成 4 个阶段,其时序性为:(粗面岩→)正长斑岩脉→粗面斑岩脉→白榴石斑岩脉→煌斑岩脉。因此,在 4 类岩脉形成年龄划分不明确的情况下,其穿插关系是确定其空间分布

及时序性最有力的依据。

源区上,区内富碱岩脉(体)主要来自下地壳,幔源岩浆底侵提供热量及一定组分的幔源物质。根据岩脉(体)间表现出的地球化学特征差异及侵位时序,推测在源区岩浆房内存在分带,从上至下依次为:粗面岩、正长斑岩脉(体)、粗面斑岩脉、白榴石斑岩脉的原始岩浆;煌斑岩具最明显的幔源特征,源于俯冲洋壳或拆沉下地壳物质进入地幔后形成的壳-幔混合岩浆。

根据 4 类岩脉的穿插关系及岩体间的侵入接触关系,结合其源区分带现象,总结其时空分布规律,建立时空结构模型(图 15)。

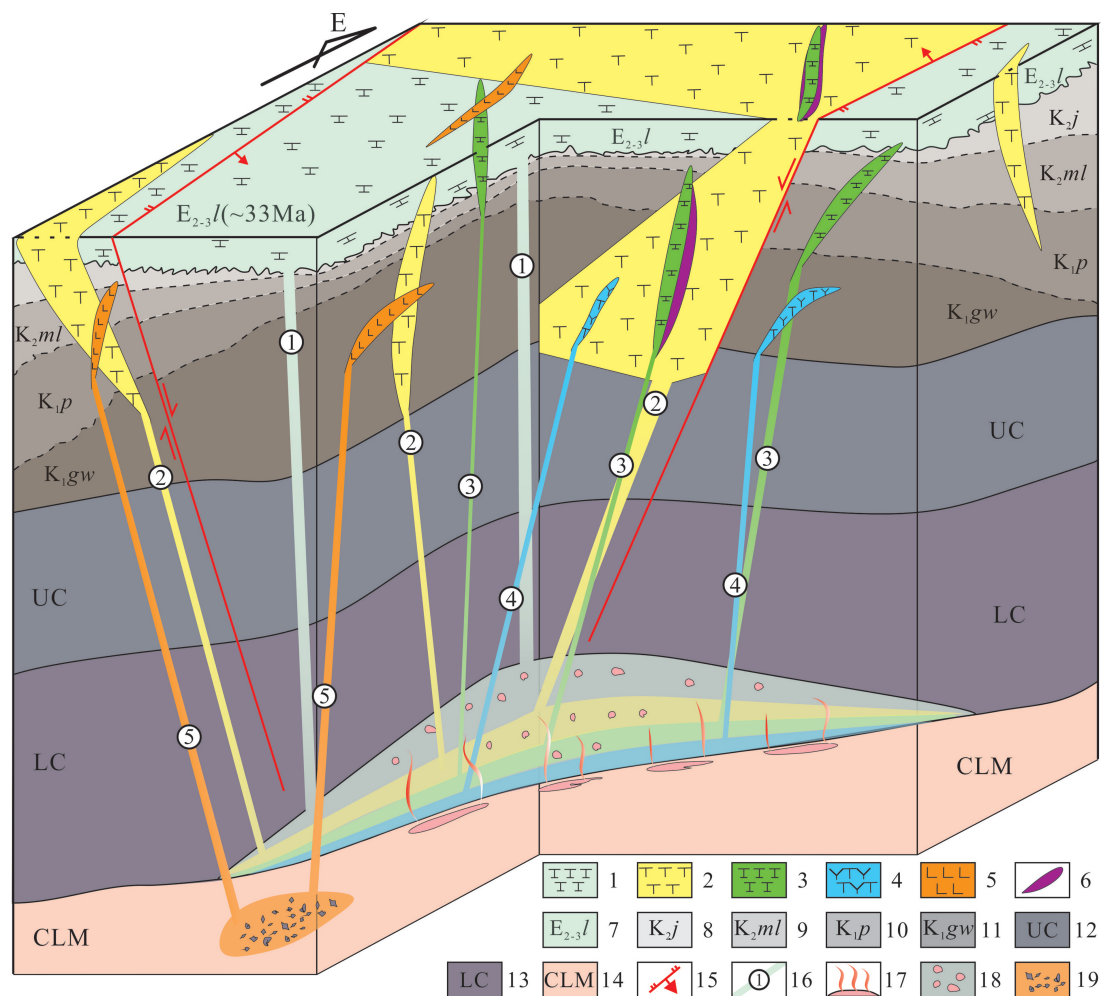


图 15 老街子铅-银矿床富碱岩脉时空结构模型

Fig. 15 Time-space model of alkali-rich dikes of the Laojiezi Pb-Ag deposit

- 1—粗面岩;2—正长斑岩;3—粗面斑岩;4—白榴石斑岩;5—煌斑岩;6—Pb-Ag 矿(化)体;7—老街子组($E_{2-3}l$);8—上白垩统江底河组;
9—上白垩统马头山组;10—下白垩统普昌河组;11—下白垩统高峰寺组;12—上地壳;13—下地壳;14—大陆岩石圈地幔;
15—逆断层;16—岩体侵位及时序;17—幔源岩浆底侵下地壳、提供热量;18—混入地壳的地幔组分;19—俯冲洋壳或拆沉下地壳

5 结 论

(1) 滇中老街子铅-银矿床富碱岩脉主要呈 NE 向分布,其次为 NW 向,受控于区域近 EW 向伸展断裂应力作用下派生的 NE 向和 NW 向张扭性断裂构造;Pb-Ag 矿(化)体与岩脉在空间上密切共生,主要赋存于正长斑岩体内部,在粗面斑岩脉上、下盘富集,成岩成矿时间一致,物源类似;富碱岩脉(体)侵位顺序为:(粗面岩→)正长斑岩脉(体)→粗面斑岩脉→石榴石斑岩脉→煌斑岩脉。

(2) 4 类富碱岩脉均属钾玄岩系列岩石,总体富集 LILE 和 LREE,亏损 HFSE,与区内粗面岩和正长斑岩相似;形成于俯冲背景下碰撞后的板内拉张环境,为壳-幔相互作用的产物,主要来源于下地壳,混入少量的地幔组分,不同岩脉(体)出现矿物组合及化学组分的差异;煌斑岩脉可能为拆沉下地壳或俯冲洋壳进入地幔后混合生成的产物,为区内最晚侵位形成。

(3) 根据富碱岩脉(体)的时空物分布特征,构建了老街子铅-银矿床富碱岩脉时空结构模型。

参考文献

- Abdel-Rahman A F M. Nature of biotites from alkaline, calcalkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 1994, 35(2): 525-541.
- Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63-114.
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, et al. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago[J]. *Nature*, 1998, 394: 769-773.
- Cornell D H, Schutte S S, Eglington B L. The Ongeluk basaltic andesite formation in Crigulalnc West South Africa: submarine alteration in a 2222 Ma Proterozoic sea[J]. *Precambrian Research*, 1995, 79: 101-123.
- Lu Y J, Kerrich R, McCuaig T C, et al. Geochemical, Sr-Nd-Pb, and Zircon Hf-O Isotopic Compositions of Eocene-Oligocene Shoshonitic and Potassic Adakite-Like Felsic Intrusions in Western Yunnan, SW China: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. *Journal of Petrology*, 2013, 54(7): 1309-1348.
- Lu Y J, McCuaig T C, Li Z X, et al. Paleogene post-collisional lamprophyres in western Yunnan, western Yangtze Craton: Mantle source and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2015, 233: 139-161.
- Meen J K. Elevation of potassium content of basaltic magma by fractional crystallization: the effect of pressure[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1990, 104(3): 309-331.
- Sun C D, Wu P, Wang D, et al. Geochemistry and Zircon U-Pb age of the Yao'an pseudoleucite porphyry, Yunnan Province, China[J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36(2): 316-328.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic

- basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. *Magnetism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- Turner S, Arnaud N, Liu J, et al. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(1): 45-71.
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, et al. Thermochronological constraints on the timing of Cenozoic high-potassic magmatism in eastern Tibet[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 231-233.
- Yan Q G, Jiang X J, Li C, et al. Geodynamic background of intracontinental Cenozoic alkaline volcanic rocks in Laojiezi, Western Yangtze Craton: Constraints from Sr-Nd-Hf-O isotopes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(6): 2098-2119.
- Zhang Y Q, Xie Y W. Geochronology of alkalic intrusive rocks in Ailaoshan-Jinshajiang region and its isotope characteristics of Nd and Sr[J]. *Science in China*, 1997, 27(4): 289-293.
- Zhao Z, Mo X, Dilek Y, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet[J]. *Lithos*, 2009, 113: 190-212.
- 毕献武, 胡瑞忠, Cornell D H. 姚安金矿床成矿流体形成演化的稀土元素地球化学[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4): 263-265.
- 毕献武, 胡瑞忠, Cornell D H. 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*, 2001, 30(3): 264-272.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 113-124.
- 程锦, 夏斌, 张玉泉. 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*, 2007, 31(1): 118-125.
- 邓万明, 黄萱, 钟大赉. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因[J]. *地球科学*, 1998, 33(4): 412-425.
- 葛良胜, 邹依林, 邢俊兵, 等. 滇西北地球富碱岩体(脉)地质学及岩石地球化学特征[J]. *矿产与地质*, 2002, 16(3): 147-153.
- 贾大成, 胡瑞忠, 谢桂青. 湘东北中生代基性岩脉微量元素地球化学特征及岩石成因[J]. *地质地球化学*, 2002, 30(3): 33-39.
- 江小均, 严清高, 李文昌, 等. 滇中老街子 Pb-Ag 多金属矿床的成矿时代及成矿动力学背景探讨: 来自硫化物 Re-Os 同位素证据[J]. *地质学报*, 2018, 92(6): 1280-1296.
- 黄仲金, 吴静, 吴鹏, 等. 滇中老街子 Pb-Ag 矿床粗面斑岩脉岩石成因: 来自锆石 U-Pb 年龄, Hf 同位素与岩石地球化学证据[J]. *矿物学报*, 2022, 42(3): 295-314.
- 李夫杰. 陕南镇巴东部地区基性岩墙群和正长斑岩脉的岩石地球化学特征及其构造意义[D]. 长安大学硕士学位论文, 2009.
- 李光斗, 念红, 张道红, 等. 扬子地台北缘富碱斑岩铜金多金属矿床成矿条件及找矿前景[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 57-65.
- 李临位, 刘伟. 夹皮沟金矿田闪长岩脉、正长斑岩脉与金矿体的关系及成矿预测——以北沟金矿床为例[J]. *黄金*, 2019, 40(9): 7-11.
- 李文昌, 江小均. 扬子西缘陆内构造转换系统与构造-岩浆-成矿效应[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 151-164.

- 李勇,莫宣学,喻学惠,等.金沙江-哀牢山断裂带几个富碱斑岩体的锆石 U-Pb 定年及地质意义[J].现代地质,2011,25(2): 189-200.
- 梁瑞,白海军,赵军,等.浅谈脉岩在热液矿床成矿中的作用——以河北蔡家营铅锌银矿床为例[J].矿产勘查,2012,3(6): 767-773.
- 廖震,王玉往,王京彬,等.内蒙古大井锡多金属矿床岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].岩石学报,2012,28(7): 2292-2306.
- 刘战庆,刘善宝,裴荣富,等.赣东北珍珠山花岗岩脉地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成研究[J].大地构造与成矿学,2016,40(4): 808-825.
- 罗晨皓,周晔,沈阳.云南姚安 Au-Pb-Ag 矿床含矿富碱岩浆岩地球化学特征及岩石成因[J].地球科学,2019,44(6): 2063-2083.
- 罗晨皓.滇西姚安富碱斑岩年代学、地球化学特征及岩石成因[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2018.
- 罗均烈,杨友华,赵准,等.滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用[M].北京:地质出版社,1994: 157-214.
- 莫宣学,赵志丹,Don J Depaolo,等.青藏高原拉萨地块碰撞-后碰撞岩浆作用的三种类型及其对大陆俯冲和成矿作用的启示: Sr-Nd 同位素证据[J].岩石学报,2006,22(4): 795-803.
- 莫宣学.我国西部造山带火山岩研究中的一些新问题[C]//岩石学论文集.武汉:中国地质大学出版社,1992: 47-55.
- 孙春迪,吴鹏,王蝶,等.云南姚安铅银矿床假白榴石斑岩空间分布和组构特征[J].岩石矿物学杂志,2016,35(6): 991-100.
- 孙春迪.云南姚安富碱斑岩体岩石学、地球化学及其成矿效应[D].昆明理工大学硕士学位论文,2017.
- 汤中立,焦建刚,闫海卿,等.小岩体成(大)矿理论体系[J].中国工程科学,2015,17(2): 4-18.
- 涂光炽,张玉泉,赵振华.华南两个富碱侵入岩带的初步研究[C]//花岗岩地质和成矿的关系.南京:江苏科学出版社,1984: 21-37.
- 涂光炽.关于富碱侵入岩[J].矿产与地质,1989,3(13): 1-4.
- 王建飞,吴鹏,姜龙燕,等.云南姚安老街子铅银矿床岩性-断裂控矿特征与找矿预测——以 2108 m 中段为例[J].地质与勘探,2016,52(3): 407-416.
- 王学成,章邦桐,张祖还.暗色岩脉与铀成矿关系研究[J].矿床地质,1991,10(4): 359-370.
- 吴鹏,杨航,韩润生,等.滇中楚雄盆地老街子铅-银矿床镜铁矿特征及地质意义[J].岩石学报,2019,35(5): 1489-1502.
- 夏宗强,李建红.贵东-诸广山地区白垩纪中基性岩脉特征及其与铀成矿关系[J].矿物学报,2009,29(S1): 641-643.
- 辛未.云南省哀牢山-红河成矿带新生代金铜钨成矿作用研究[D].吉林大学博士学位论文,2019.
- 许田.华北克拉通破坏的深部过程: 来自表面重力和地形的认识[D].中国科学技术大学硕士学位论文,2019.
- 严清高,郭忠林,李超,等.滇中姚安干沟金矿床煌斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及 Hf 同位素特征[J].矿床地质,2019,38(3): 526-540.
- 严清高,江小均,吴鹏,等.滇中姚安老街子板内富碱火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及火山机构划分[J].地质学报,2017,91(8): 1743-1759.
- 严清高.滇中姚安板内富碱火山-侵入杂岩体时空演化序列及成岩-成矿机制研究[D].昆明理工大学硕士学位论文,2018.
- 杨宗良,杨世坤,王正常,等.云南姚安老街子铅矿地质及银的赋存状态[J].云南地质,2007,26(1): 106-111.
- 应立娟,唐菊兴,王登红,等.西藏甲玛超大型铜矿区斑岩脉成岩时代及其与成矿的关系[J].岩石学报,2011,27(7): 2095-2102.
- 张玉泉,谢应雯,涂光炽.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,1987,2(1): 17-25.
- 赵振华.关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J].大地构造与成矿学,2007,31(1): 92-103.
- 钟大赉,丁林,刘福田,等.造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动制约——以三江及邻区为例[J].中国科学(D 辑),2000,30(Z1): 1-8.