

doi:10.3799/dqkx.2017.114

幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪 稀有金属成矿高峰:年代学依据

李 鹏¹, 李建康^{1*}, 裴荣富¹, 冷双梁², 张 旭², 周芳春³, 李胜苗⁴

1. 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

2. 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034

3. 湖南省核工业地质局 311 大队, 湖南长沙 410011

4. 湖南省地质调查院, 湖南长沙 410116

摘要: 花岗岩浆的分异过程是制约稀有金属成矿的重要因素, 造山过程中多期次岩浆活动的叠加作用易导致伟晶岩熔体的大量聚集成矿。华南幕阜山复式花岗岩体由多期次多阶段的花岗岩侵入体构成, 在区域持续而频繁的多期次岩浆活动作用下形成了华南地区重要的稀有金属矿集区。对幕阜山复式花岗岩体边部的断峰山含铌钽铁矿白云母钠长石伟晶岩以及岩体中部大兴含绿柱石白云母钠长石伟晶岩进行了⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素定年研究, 其白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄分别为 127.7±0.9 Ma 和 130.5±0.9 Ma。结合野外观察基础及区域已有的同位素年代学数据, 推断出在燕山早期至中期该地区经历了多期岩浆演化, 且持续时间较长, 而伟晶岩的稀有金属矿化发生在岩浆活动末期的白垩纪, 体现了区域岩浆多期次的分异演化作用导致稀有金属逐渐富集成矿的过程。这些地质现象说明, 幕阜山区域在印支期经历了广泛的陆陆碰撞造山作用, 进入燕山期后构造背景开始由陆内碰撞挤压向伸展减薄转变, 在岩石圈伸展过程中经由玄武质岩浆底侵作用的影响, 下地壳发生熔融, 多期次岩浆活动导致了最终的稀有金属成矿。

关键词: ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年; 稀有金属; 岩浆活动; 白垩纪成矿高峰; 花岗岩; 地质年代学。

中图分类号: P611.1

文章编号: 1000-2383(2017)10-1684-13

收稿日期: 2017-05-05

Multistage Magmatic Evolution and Cretaceous Peak Metallogenic Epochs of Mufushan Composite Granite Mass: Constrains from Geochronological Evidence

Li Peng¹, Li Jiankang^{1*}, Pei Rongfu¹, Leng Shuangliang², Zhang Xu², Zhou Fangchun³, Li Shengmiao⁴

1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China

3. 311 Brigade of Hunan Nuclear Geology, Changsha 410011, China

4. Hunan Geological Survey, Changsha 410116, China

Abstract: The differentiation process of granitic magma is an important factor constraining the metallogenic mechanism of rare metal. The superimposition of multistage magmatic activities in orogenic process could easily lead to the accumulation of metallogenic pegmatite melts. Mufushan composite granite mass, which is composed of multistage granite intrusions, formed an important rare metal ore concentration area in South China. In this paper we report muscovite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating results from tantalite-bearing muscovite albite pegmatite of Duanfengshan on the margin of granite mass, and beryl-bearing muscovite albite pegmatite of Daxing in its central region. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of muscovite are 127.7±0.9 Ma and 130.5±0.9 Ma. Based on the

基金项目: 中国地质调查局项目(No.DD20160056); 自然科学基金项目(No.41372088); 湖南省国土资源厅地质勘查项目(No.20170331); 深部探测项目(No.2017YFC0602701)。

作者简介: 李鹏(1988-), 男, 博士后, 主要从事稀有金属矿床研究。ORCID: 0000-0002-0450-6688. E-mail: Lipeng031111@163.com

* **通讯作者:** 李建康, ORCID: 0000-0001-6963-8000. E-mail: Li9968@126.com

引用格式: 李鹏, 李建康, 裴荣富, 等, 2017. 幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪稀有金属成矿高峰: 年代学依据. 地球科学, 42(10): 1684-1696.

detailed field work and existing regional isotope chronological data, it is suggested that this area experienced long-lasting multi-stage magmatic evolution from early to middle Yanshanian. Rare metal mineralization of pegmatite occurred at the end of magmatic activities in Cretaceous, which showed the process of gradual enrichment and mineralization of rare metal led by regional multistage magmatic differentiation and evolution. These geological phenomena showed that Mufushan area has undergone a widely distributed continental collision orogeny in Indosinian and its tectonic setting shifted from continental collision to extensional thinning at Yanshanian. The multistage magmatic activities associated with regional lower crustal melting, which caused by underplating of basaltic magma during the process of lithospheric extension, led to the final rare metal mineralization.

Key words: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating; rare metal; magmatic activity; Cretaceous peak metallogenic epoch; granite; geochronology.

0 引言

在世界范围内,花岗伟晶岩型稀有金属矿床多形成于造山过程中(Li *et al.*, 2015),每个造山周期,花岗岩浆的活动周期可以自造山高峰期持续 60 Ma (Thompson, 1999).造山周期内最早出现的伟晶岩主要由钾长石、石英和云母组成,经济价值不大(Tkachev, 2011),稀有金属伟晶岩多形成于造山晚期或后造山阶段(Cerný, 1991; Tkachev, 2011).这体现了在一个造山周期内,岩浆多期的分异演化作用导致稀有金属逐渐富集乃至成矿.这一现象存在于世界多地的伟晶岩省,北美苏必利尔伟晶岩省经历了 5 个演化阶段的岩浆活动,其中火山弧的发育及大陆增生发生于 2 775~2 725 Ma,稀有金属的富集则发生在 2 685 Ma 的鬼湖岩基侵位之后(Breaks and Moore, 1992);在南美最大的巴西东部伟晶岩省,虽然在元古代就开始有岩浆活动,直至加里东期才分异出稀有金属伟晶岩(Morteani *et al.*, 2000);世界上最大的固体锂矿床澳大利亚 Greenbushes 矿床的伟晶岩成矿作用经历了包括 2 527 Ma、2 430 Ma 和 1 100 Ma 3 个期次构造热活动(Partington *et al.*, 1995).

位于湘鄂赣三省交界的幕阜山复式花岗岩体是中生代以来,华南强烈的构造—岩浆—成岩/成矿作用的产物,以大规模的花岗岩岩浆作用及稀有金属成矿作用而著称,是研究岩浆活动对稀有金属成矿制约关系的天然实验室.区域岩浆活动已有一定的同位素定年研究基础(湖南省地质矿产局, 1988; 刘娟群等, 1999; 石红才等, 2013),但缺乏对岩浆活动期次的系统梳理,也缺乏稀有金属成矿年代学研究,因此难以厘定区域岩浆活动和稀有金属成矿的内在联系.本文对幕阜山复式花岗岩体的演化期次进行了系统梳理,并选择岩体中部和边部的代表性稀有金属伟晶岩脉进行了白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,以探讨区域岩浆活动对稀有金属成矿的制约.

1 区域地质特征

幕阜山位于湖北、湖南和江西三省交界处,大地构造上位于扬子与华夏板块的交接部位江南隆起带中段的幕阜山—九岭构造岩浆带(图 1a).区内地层跨及下扬子地层分区和江南地层分区,出露地层有元古界待建系—长城系、新元古界青白口系,下古生界寒武系、奥陶系、志留系,新生界白垩—古近系、第四系.其中,元古界分布于研究区西南角(图 1b);古生界分布于东北角,包括寒武系(图 1b, ϵ_1 - ϵ_3)、奥陶系(O_1)、志留系(S_1 - S_2);大片燕山期花岗岩中亦有部分前寒武纪地层残留,为青白口系冷家溪群(Pt/n),呈孤立的残丘出露,并大面积出露于花岗岩基西南部.

新元古代发生的晋宁运动造成研究区强烈褶皱并伴随区域变质作用,奠定区域褶皱基底,之后转入长期隆升剥蚀;震旦纪—三叠纪以垂直升降为主;印支—燕山运动持续南北向挤压应力场,形成研究区近东西向主体构造线,其后随着挤压应力的消退及山体抬升隆起,区域发生大规模的伸展滑脱;燕山中晚期北北东向构造的强烈活动,在鄂南地区形成大规模的隆起与凹陷,并伴随中酸性岩浆岩的侵位、强烈的断裂活动、频繁的酸性及基性岩浆活动,带来大量的稀有金属和内生金属矿源.构造应力场由南北向挤压转为南北向扭动,形成研究区北东向主体构造格局(傅昭仁等, 1999; 贺转利等, 2004; 彭和求等, 2004; 柏道远等, 2006).

区域岩浆岩活动最早始于新元古代,晚侏罗世再次活动达到高峰,直至白垩纪早期结束,主要经历了前加里东构造拼合→印支期俯冲汇聚→燕山早期汇聚走滑→燕山晚期离散走滑的构造发展过程(傅昭仁等, 1999; 李建威等, 1999; 李先福等, 1999, 2000; 章泽军等, 2003; 贺转利等, 2004; 彭和求等, 2004; 柏道远等, 2006; 李鹏春, 2006; 湖北省地质调查院, 2013; 董学发等, 2016).区内花岗岩出露面积约 2 360 km²(图 1b),出露于地表的岩石以

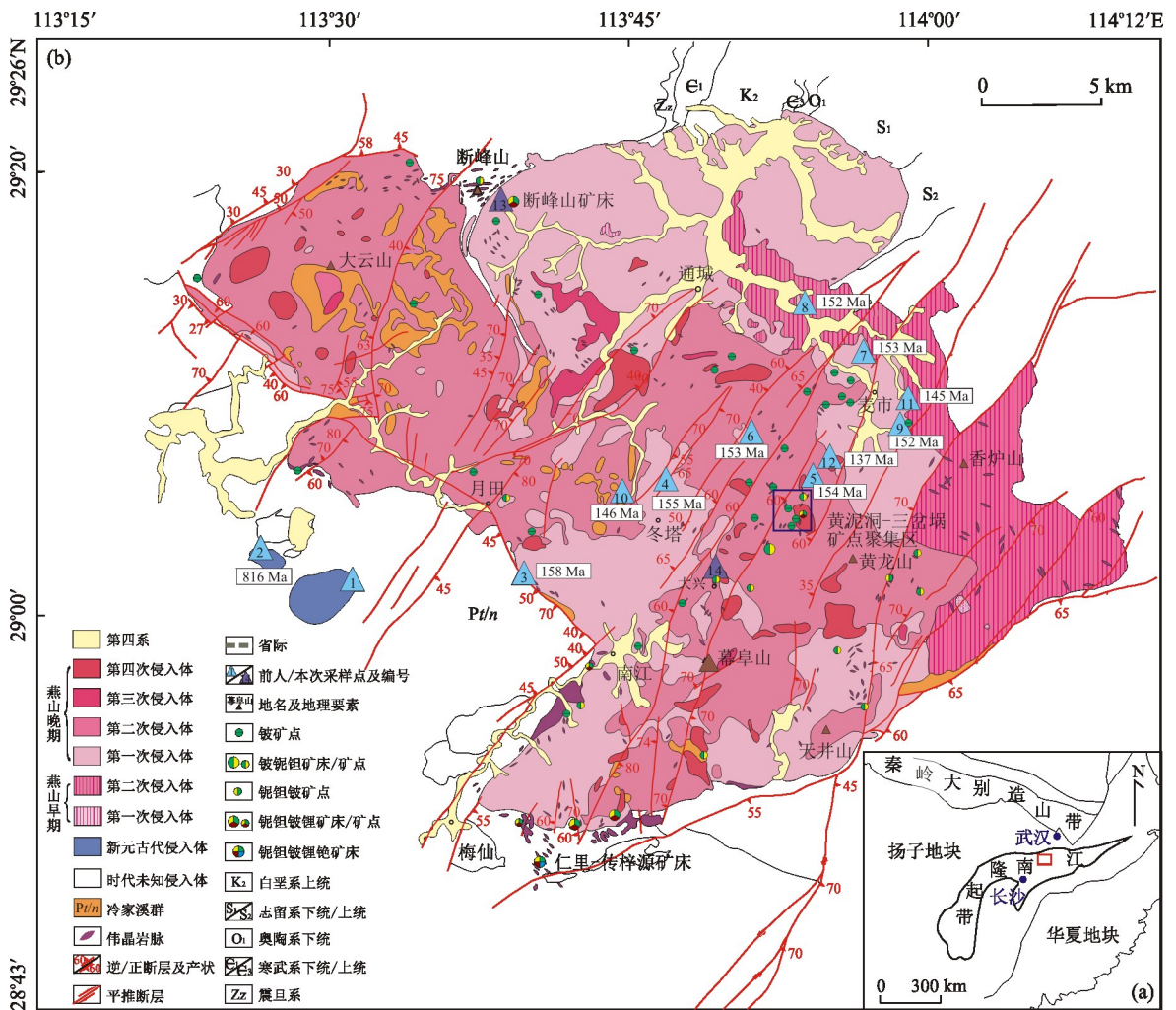


图 1 幕阜山稀有金属矿集区地质矿产简图

Fig.1 Geological and mineral resources map of Mufushan rare metal ore concentration area

据湖南省地质局区域地质测量队(1978)改编.a.幕阜山矿集区大地构造位置;b.幕阜山矿集区地质矿产分布

中深成、中—中浅成侵入岩为主,岩性主要是中酸性—酸性花岗岩类及基性、中酸性、酸性脉岩类,一般呈较大的岩基或岩株产出。

新元古代侵入岩仅分布于幕阜山花岗岩体西南角(图 1b, 新元古代侵入体),出露范围有限,多呈岩株或岩滴状产出,出露面积约 5.5 km²。岩体侵入于青白口系冷家溪群浅变质岩石之中,侵入界线清楚,局部岩层受岩体侵位影响产状变缓。晚侏罗世花岗岩区域分布广泛,构成了幕阜山花岗岩体的主体,由多个活动阶段的侵入体组成,该时代花岗岩总体包括石英二长岩体、黑云母花岗闪长岩体、黑云母二长花岗岩体及二云母二长花岗岩体。中生代早白垩世花岗岩主要分布于五里镇、通城县西、盘石、板江—冬塔乡一带,侵入体以小岩株形态侵入到中生代侏罗纪侵入岩中,主要岩体包括细粒花岗闪长岩体和白云母二长花岗岩体。总体上由东部→中部→西部、南部,幕

阜山复式花岗岩体呈现出由老逐渐变新的趋势。

区域稀有金属矿产分布总体呈现出“北钨钼、东钨、南钨钨钨、中钨钨钨、西部尚未见明显矿化”的分布规律(图 1):北部以断峰山钨钼矿床为代表,稀有金属矿物主要为钨钼铁矿,次要为绿柱石;东部为钨矿点聚集区,分布有超过 15 处小型矿床及矿化点,稀有金属矿物主要为绿柱石,次要为钨钼铁矿、锂云母;南部以仁里—传梓源钨钨钨钨矿床为代表,稀有金属矿物主要为锂辉石、钨钼铁矿,次要为绿柱石;中部产出黄泥洞、三岔坳等十多个稀有金属矿(化)点,稀有金属矿物主要为钨钼铁矿、细晶石,次要矿物为透锂长石、锂云母、锂辉石、绿柱石等。整体上表现出,东部以单一的钨矿化为主,至中部钨钨钨钨多种元素矿化,北部和南部产出大型稀有金属矿床,反映出稀有金属成矿一定的分异性。

2 样品采集与分析方法

本文对幕阜山复式岩体边部断峰山铌钽矿床及中部大兴铍矿点两处的稀有金属伟晶岩进行了白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年,以获得矿集区精确的稀有金属成矿时代。

白云母样品 DFS-3-3 采集于位于幕阜山复式岩基北部边缘的断峰山铌钽矿床(图 1b, 采集点 13),该矿床包括花岗伟晶岩脉数百条,具有工业意义的有近百条,远景资源量可达数千万吨,属特大型矿床。伟晶岩原生结构从矿体外向内依次分为文象、准文象结构带→中粗粒结构带→小块体结构带→块体结构带。但并不是每个结构带发育都完好,有时结构带界线呈渐变关系。白云母采自含铌钽铁矿白云母钠长石伟晶岩脉(图 2a),呈片状集合体,粒径 0.6~1.2 cm(图 2b)。脉体主要矿物有钠长石、石英、白云母(图 2c),矿石矿物主要为铌钽铁矿,次要为绿柱石。

白云母样品 PJ-9-7-4 采集于幕阜山复式岩基中部,位于湖南省平江县大兴含绿柱石白云母钠长石伟晶岩脉(图 1b, 采集点 14)。该岩脉受侵入体接触

面控制,含矿伟晶岩脉有 3 条,长 100~200 m,平均宽 20~30 m,厚 8~10 m,呈 X 状或不规则脉状,产出绿柱石、铌尖晶石等。白云母来自白云母钠长石伟晶岩(图 2d),呈片状集合体分布,粒径 0.8~2.6 cm(图 2e)。脉体主要矿物有钠长石、石英、白云母(图 2f),矿石矿物主要为绿柱石。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年测试分析在中国地质科学院地质研究所氩—氩实验室完成。选纯的白云母(纯度>99%)用超声波清洗,清洗后的样品被封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射,照射工作是在中国原子能科学研究院的“游泳池堆”中进行的。样品的阶段升温加热使用石墨炉,每一个阶段加热 10 min,净化 20 min。质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行的,每个峰值均采集 20 组数据,所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正, ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$,用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线,坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见有关文章(陈文等,2006;张彦等,2006)。

3 测试结果

幕阜山地区断峰山铌钽矿床中白云母(DFS-3-3)和大兴绿柱石矿点中白云母(PJ-9-7-4)的阶段加热 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素分析结果列于表 1,相应的表观年龄谱、等时线年龄及反等时线年龄如图 3、图 4 所示。

如表 1 所示,在 700~1 400 °C 温度范围内对样品 DFS-3-3 进行了 12 个阶段的释热分析,其低温释热阶段的视年龄较小,可能是由于矿物低温晶格缺陷或矿物边部少量 Ar 丢失所致,而在高温释热阶段构成了很好的年龄坪。样品总气体年龄为 127.7 Ma,在高温释热阶段(880~1 400 °C)构成的坪年龄为 $127.7 \pm 0.9 \text{ Ma}$ (图 3a),对应了 92.7% 的 ^{39}Ar 释放量,相应的 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄为 $127.4 \pm 1.3 \text{ Ma}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 305 ± 14 (MSWD=2.3)(图 3b)。

在 700~1 430 °C 温度范围内对样品 PJ-9-7-4 进行了 14 个阶段的释热分析,其低温释热阶段的视年龄较小,可能是由于矿物低温晶格缺陷或矿物边部少量 Ar 丢失所致,而在高温释热阶段构成了很

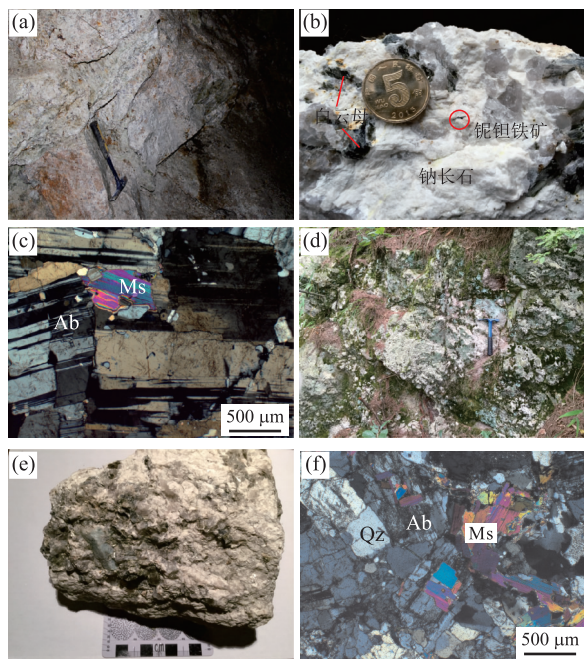


图 2 幕阜山地区稀有金属伟晶岩野外、样品及镜下照片
Fig. 2 Field sample photos and microphotographs of rare metal pegmatite from Mufushan area

a.断峰山伟晶岩野外照片;b.断峰山含铌钽铁矿白云母钠长石伟晶岩;c.断峰山伟晶岩镜下照片(正交偏光);d.大兴伟晶岩野外照片;e.大兴含绿柱石白云母钠长石伟晶岩;f.大兴伟晶岩镜下照片(正交偏光)。Qz代表石英;Ms代表白云母;Ab代表钠长石

表 1 幕阜山地区稀有金属伟晶岩白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温测年数据Table 1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar stepwise heating analytical data for muscovite from the rare metal pegmatite in Mufushan area

T(°C)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	⁴⁰ Ar(%)	⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar	³⁹ Ar (10 ⁻¹⁴ mol)	表面年龄 (Ma)	±1σ (Ma)
DFS-3-3 白云母 W=27.07 mg J=0.004 403									
700	32.333 8	0.076 5	1.332 3	0.030 9	30.33	9.817 2	0.08	76.3	6.2
750	34.406 2	0.057 4	0.000 0	0.022 5	50.73	17.454 5	0.38	133.6	1.8
800	28.693 2	0.039 8	0.212 8	0.021 1	59.01	16.935 6	0.60	129.7	1.4
840	22.356 8	0.017 0	0.000 0	0.014 5	77.46	17.317 8	0.68	132.6	1.4
880	19.102 7	0.008 2	0.075 4	0.014 2	87.38	16.692 6	2.52	127.9	1.2
910	17.042 4	0.001 3	0.014 4	0.012 7	97.70	16.650 4	4.17	127.6	1.2
940	16.851 2	0.000 7	0.000 0	0.012 6	98.71	16.633 4	4.05	127.5	1.2
970	16.961 7	0.001 1	0.012 2	0.012 7	98.03	16.628 3	3.12	127.5	1.2
1 020	17.175 9	0.002 0	0.032 2	0.012 9	96.55	16.584 4	2.70	127.1	1.2
1 100	17.223 8	0.001 8	0.017 0	0.013 0	96.88	16.686 3	3.09	127.9	1.2
1 200	16.903 2	0.000 9	0.048 1	0.013 1	98.34	16.624 0	2.04	127.4	1.3
1 400	20.732 8	0.013 1	0.456 7	0.015 7	81.42	16.887 0	0.29	129.4	2.0
总气体年龄=127.7 Ma									
PJ-9-7-4 白云母 W=26.88 mg J=0.004 442									
700	43.960 7	0.103 8	0.675 1	0.029 8	30.35	13.348 9	0.09	103.9	8.0
770	26.506 8	0.034 4	0.054 0	0.018 6	61.61	16.332 5	0.35	126.3	1.7
820	25.629 6	0.030 2	0.147 7	0.018 1	65.24	16.721 8	0.65	129.3	1.5
860	21.868 4	0.016 3	0.000 0	0.015 3	77.91	17.037 8	1.57	131.6	1.3
890	17.649 7	0.002 6	0.013 0	0.013 0	95.68	16.887 8	4.87	130.5	1.3
920	17.275 1	0.001 4	0.022 4	0.012 7	97.58	16.857 8	4.32	130.3	1.3
950	17.314 6	0.001 4	0.012 4	0.012 6	97.50	16.882 6	3.28	130.5	1.3
980	17.571 9	0.002 0	0.014 9	0.013 0	96.63	16.979 3	1.79	131.2	1.3
1 020	17.822 6	0.002 9	0.004 2	0.012 9	95.24	16.974 8	1.26	131.1	1.3
1 070	17.703 0	0.003 4	0.081 0	0.013 4	94.27	16.689 7	1.59	129.0	1.3
1 130	17.693 0	0.002 8	0.036 6	0.013 0	95.37	16.873 6	2.65	130.4	1.3
1 200	22.873 8	0.018 8	0.000 0	0.015 7	75.74	17.324 3	0.99	133.7	1.5
1 400	125.753 0	0.365 4	0.146 7	0.082 3	14.14	17.789 8	0.46	137.2	1.8
1 430	153.969 4	0.456 0	0.533 8	0.094 1	12.50	19.250 5	0.05	148.0	9.3
总气体年龄=130.6 Ma									

好的年龄坪。样品总气体年龄为 130.6 Ma, 在高温释热阶段(820~1 130 °C)构成的坪年龄为 130.5 ± 0.9 Ma(图 3c), 对应了 91.9%的³⁹Ar 释放量, 相应的³⁶Ar/⁴⁰Ar-³⁹Ar/⁴⁰Ar 反等时线年龄为 130.3 ± 1.4 Ma,⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值为 301 ± 17 (MSWD = 7.3)(图 3d)。

从分析结果可以看出, 样品的总气体年龄、坪年龄、相应的反等时线年龄在误差范围内完全一致, 因而样品的坪年龄可以代表其结晶年龄。

4 讨论

4.1 稀有金属成矿时代

野外观察表明, 虽然幕阜山复式岩体中各阶段花岗岩侵入体均有伟晶岩伴生, 但总体来说伟晶岩多以伟晶岩壳的形式分布于晚期花岗岩补体的顶

部, 或分布于细粒花岗岩的内部成伟晶岩团块。从时间上它们的形成近于同时, 但伟晶岩略晚, 伟晶岩中的长石可见包裹团块状的细粒花岗岩矿物。

⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素分析结果显示: 幕阜山复式岩体边部的含铌钽铁矿白云母钠长石伟晶岩中白云母的坪年龄为 127.7 ± 0.9 Ma, 这一年龄代表了 92.7%的³⁹Ar 释放量; 岩体中部的含绿柱石白云母钠长石伟晶岩中白云母的坪年龄为 130.5 ± 0.9 Ma, 这一年龄代表了 91.9%的³⁹Ar 释放量。二者的坪年龄结果与其反等时线年龄是非常一致的, 因此笔者认为所测定的白云母分别为 127.7 Ma 和 130.5 Ma 左右形成的, 而鉴于二者与稀有金属矿物密切的接触关系, 可以较好地代表稀有金属伟晶岩矿床(点)的成矿年龄。

以上年龄表明, 幕阜山稀有金属矿集区的成矿时代集中在燕山中期, 岩体中部稀有金属成矿时代略早, 为 130 Ma; 而岩体边部至外围的稀有金属成

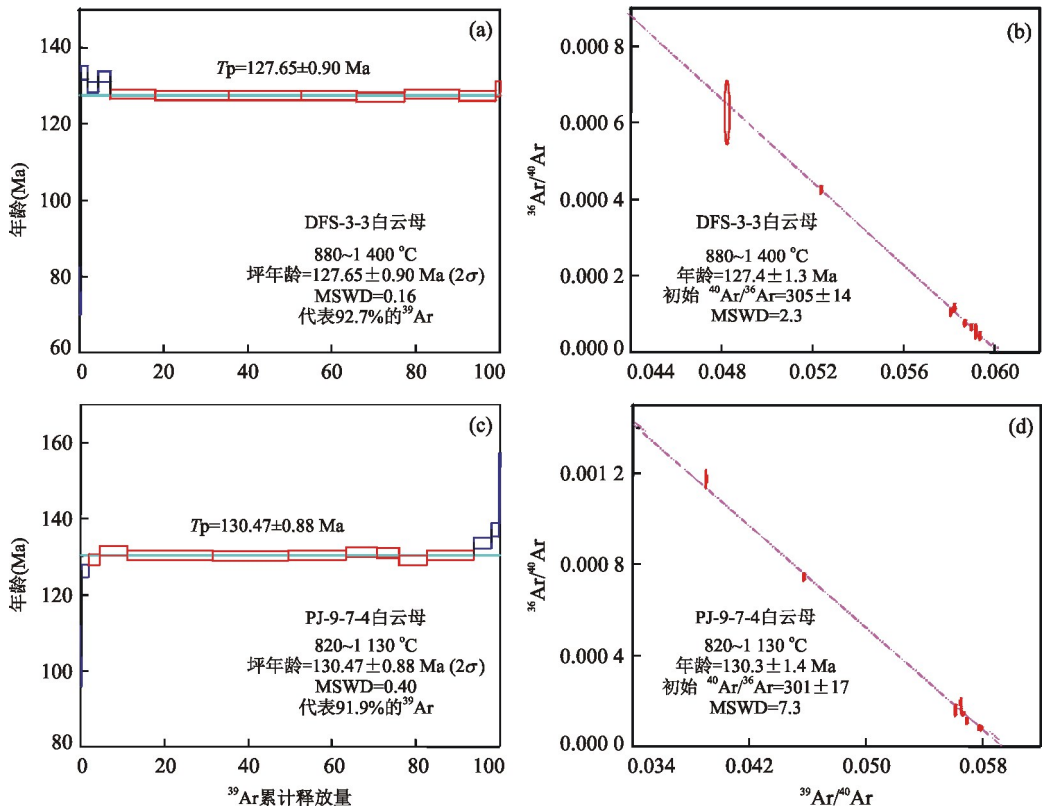


图 3 幕阜山地区稀有金属伟晶岩白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄图及反等时线年龄图

Fig.3 ⁴⁰Ar-³⁹Ar age spectrum and inverse isochron of muscovite from the rare metal pegmatite in Mufushan area

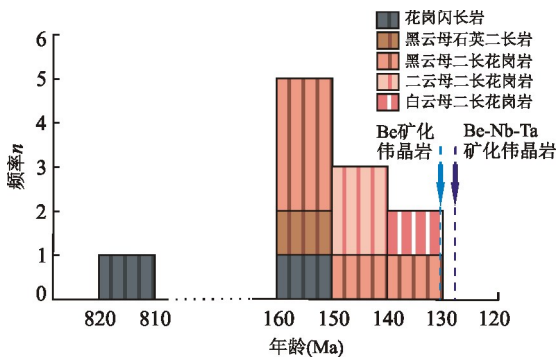


图 4 岩石单位时代统计直方图

Fig.4 Statistical histogram of rock units ages

矿时代略晚,为 127 Ma.二者的年龄差异一定程度上体现出了幕阜山复式岩体及相关伟晶岩脉分异程度的差异:从幕阜山复式花岗岩体东部早期的小规模铍矿点,到岩体内部的铌钽矿化,再到岩体外围晚期的大规模稀有金属矿床,矿物组合越来越多,伟晶岩分带越来越完善,矿床规模越来越大,矿种由单一(Be)向综合演化(Nb-Ta-Be-Li).该特点与新疆阿尔泰伟晶岩成矿带等典型稀有金属成矿带成矿时空分布规律一致(邹天人等, 1986; 王登红等, 2002, 2004; 韩宝福, 2008),是一种岩浆多期次活动,分

异演化程度逐渐增高,而导致稀有金属逐渐富集,是成矿规模逐渐增大的过程.

4.2 幕阜山复式花岗岩体成岩时代分布

花岗岩类岩体作为岩浆侵入活动的一种特定地质体,其本身往往不是单个出现的,而是多个岩体在空间上紧密地共生组合在一起,从而形成复杂的复式岩体,又称“体中体”.刘家远(2003)对“复式岩体”和“杂岩体”进行了较为详细的描述,认为“复式岩体”系指不同时代花岗岩类岩体在空间上的共生,组成“复式岩体”的各部分彼此之间不存在必然的成因联系,而“杂岩体”则指来自同一岩浆房(或岩浆源地)的同源岩浆多次分离、上升和侵入定位所形成的岩体共生组合.

复式岩体已成为花岗岩类岩体产出的普遍特征之一,尤其是南岭地区与成矿有关的花岗岩类岩体,绝大多数都是多期多阶段生成的,有的岩浆侵入作用甚至从加里东期开始一直延续到燕山晚期,例如武功山岩体、诸广山岩体等.幕阜山岩体岩浆岩活动从新元古代持续到白垩纪早期,是典型的由不同时代花岗岩类岩体在空间上共生而成的复式岩体.岩体内部及外围分布的广泛稀有金属矿床矿点与多期次的岩浆活动关系密切,本文综合区域已有的同位

素年龄数据(地质部 701 地质队, 1965; 湖南省地质局区域地质测量队, 1978; 刘姝群等, 1999; 石红才等, 2013; 湖北省地质调查院, 2013), 结合相关资料及野外地质特征, 大致以岩体为单位, 将幕阜山岩浆岩划分为 3 个时代, 20 个侵入期次, 参见岩体岩石单位时代划分表(表 2)。

幕阜山复式花岗岩体总体呈现出由东向西年龄由老到新, 演化逐渐完善的变化趋势: 早期的花岗岩多为花岗闪长岩、黑云母花岗岩, 出露面积占复式岩体的主导地位, 为复式花岗岩体的主体; 晚期的花岗岩多为二云母花岗岩, 颜色较浅, 往往呈岩株、岩脉或岩枝等出露, 面积较小, 侵入在主体花岗岩的内部, 为补充花岗岩体(简称补体)。岩体岩石单位时代划分表(表 2)及岩石单位时代统计直方图(图 4)显示, 幕阜山复式花岗岩体中各岩体的侵入顺序为: 花岗闪长岩→黑云母石英二长岩→黑云母二长花岗岩→二云母二长花岗岩→白云母二长花岗岩。岩石的化学组成、微量元素和稀土元素均表现出岩浆的演化程度逐步增高的特征(未发表数据)。各岩体的演化顺序及区域稀有金属矿化种类分带特征与典型的“花岗岩树”模型和 Shearer *et al.* (1992) 的岩浆连续结晶分异成因的伟晶岩模型相似, 即岩体演化顺序为黑云二长花岗岩→二云母花岗岩→白云母花岗岩, 稀有金属矿化种类由单一向综合演化: $\text{Be} \rightarrow \text{Be} + \text{Nb} - \text{Ta} \rightarrow \text{Be} + \text{Nb} - \text{Ta} + \text{Li} \rightarrow \text{Be} + \text{Nb} - \text{Ta} + \text{Li} + \text{Cs}$ 。因此, 可以断定, 幕阜山复式花岗岩中各岩石单元以及中部至边部稀有金属矿化伟晶岩是深部岩浆多期次连续分异的结果。

4.3 多期次岩浆分异演化对稀有金属成矿的约束

通过幕阜山复式花岗岩体的岩浆期次与成矿时代的对比发现, 区域成矿作用时代(130~127 Ma)晚于区域出露的最晚期花岗岩体成岩时代(137 Ma), 成矿岩体可能是最晚期侵入的小规模岩株、岩枝状的补充岩体, 也可能是隐伏与下部的晚期花岗岩侵入体。具体成矿岩体的确认需要结合进一步的工程揭露及地球化学、流体包裹体等方面的分析测试, 但可以确定的是, 成矿作用发生在区域岩浆活动的最晚期, 是区域岩浆多期次的分异演化作用导致稀有金属逐渐富集成矿的过程。该特点与国内外多数稀有金属矿集区相似, 如北美苏必利尔伟晶岩省(Breaks *et al.*, 1992)、南美最大的巴西东部伟晶岩省(Morteani *et al.*, 2000)、国内的新疆阿尔泰伟晶岩成矿带(Windley *et al.*, 2002; 王登红等, 2002, 2004; Xiao *et al.*, 2004; 韩宝福, 2008; 刘

锋等, 2009)以及松潘—甘孜造山带中部的可尔因矿田(李建康等, 2007)等。

幕阜山岩体的多期次活动和成矿可用复式岩体的“体中体”模式解释, 由具有同源联系的多个单一侵入体先后相继侵位构成“体中体”, 而成矿岩体则多为其中较晚期、较小规模的岩体, 例如西华山岩体、千里山岩体、栗木岩体等(赫英, 1985; 沈渭洲等, 1994; 柏道远等, 2007; 娄峰等, 2014; 侯红星等, 2016)。这些岩浆演化系列中较晚期的单元, 代表了岩浆期后在封闭条件变化时花岗岩粒间熔体—溶液向岩体顶部、边部集中, 并分离出挥发分溶液以后的残留部分, 无论在岩体的物质组成上, 还是时空关系上, 都表现出与成矿作用尤为密切的联系, 当然对于花岗岩“体中体”与矿化的关系, 现实中也存在多次成矿成矿的事实, 即每次岩浆侵入都伴随有矿化的出现, 如西华山钨矿, 裴荣富(1995)称之为共岩浆补余分异成矿。

按照“体中体”模式, 并根据岩浆演化特征和稀有金属矿床的分布规律, 可粗略绘制出幕阜山岩体岩浆分异和稀有金属分带的概略图(图 5)。岩浆自东向西演化, 并在中部地区的局部产出小岩体, 矿化种类也从单一的 Be 矿化逐渐演化为丰富的 $\text{Be} + \text{Nb} - \text{Ta} + \text{Li} + \text{Cs}$ 稀有金属矿化组合。伟晶岩中稀有金属元素是通过岩浆结晶分异而逐渐富集的, 在幕阜山岩体多期次岩浆演化过程中, 由于含水挥发分对稀有金属元素的亲和性致使成矿元素不断富集; 岩浆侵位上升过程中, 挥发分与稀有金属络合物快速迁移至岩体顶部逐渐富集, 随着温度下降, 岩浆不混溶作用导致了 Na、Li 与 K 的分离(王联魁等, 2000), 致使演化末期最终的富集、沉淀。研究表明, 在岩浆形成演化过程中 F 主要分配进入熔体相, 而含 Cl 流体相中 Li、Rb、Cs、Nb 等亲石微量元素的流体相—熔体相分配系数与流体相中 Cl 的含量呈正相关性(Webster *et al.*, 1989; Bai and van Groos, 1999)。幕阜山岩体多期次的岩浆演化过程中, 在流体相中 HCl 的活度、硅酸盐熔体的 $(\text{Na} + \text{K}/\text{Al})$ 值的线性变化及硅酸盐熔体与高盐熔体的不混溶液相分离等因素的共同作用下(Bau, 1996; Irber, 1999), 导致了稀有金属元素分配系数的规律变化, 最终形成了区域显著的稀有金属矿化分带。

近年来, 众多有关华南中生代构造—岩浆与沉积作用响应及大地构造演化的研究表明, 华南在经历了印支期广泛的陆陆碰撞造山作用后, 于燕山晚期进入陆内岩石圈伸展减薄构造背景, 但伸展背景

表 2 幕阜山复式花岗岩体岩石单位时代划分

Table 2 Age division of rock units from the Mufushan composite granite mass

时代	岩体名称	侵入体 期次	主要岩性特征	同位素年龄 (Ma)	采样点	空间相关稀有金 属矿床/矿点	主要/次要稀 有金属矿物	矿点描述	
白 垩 世	白云母二长花岗岩	中	中细粒(细中粒)白云母二长花岗岩	SH-z137 ^① K-Ar136 ^③	12	里洞钨矿点	绿柱石/ 钨钽铁矿	伟晶岩细脉带, 脉体宽 3~20 cm, 可见少量绿 柱石、钨钽铁矿, 与围岩接触带可见白云母化、 弱云英岩化、弱电气石化	
	黑云母花岗岩	早	黑云母花岗岩	K-Ar137 ^⑤	—	—	—	—	
	花岗闪长岩	白	细粒黑云母花岗闪长岩	—	—	—	—	—	
	黑云母二长花岗岩	世	似斑状黑云母二长花岗岩	K-Ar145 ^③	—	—	—	—	
中 生 代	二云母二长花岗岩	中	细粒二云母二长(钾长)花岗岩	SH-z145 ^②	11	麦市钨矿 点分布区	绿柱石/ 钨钽铁矿	包括狮子尖、票家巷等 5 处小规模矿化点, 脉体 宽 5~90 cm, 半数脉体含矿, 绿柱石 3~ 6 000 g/m ³ , 钨钽铁矿几颗约 130 g/m ³ , 与围岩 接触带可见弱云英岩化	
	二云母二长花岗岩	第Ⅳ期	中粗粒(斑状)二云母二长花岗岩	—	—	—	—	—	—
		第Ⅲ期	中粒(斑状)二云母二长花岗岩	SH-z146 ^②	10	—	—	—	—
		第Ⅱ期	中细粒少斑状二云母二长花岗岩	—	—	—	—	—	—
		第Ⅰ期	细粒(少斑状)二云母二长花岗岩	—	—	—	—	—	—
	黑云母二长花岗岩	第Ⅳ期	粗中粒(斑状)黑云母二长花岗岩	—	—	—	—	—	—
		第Ⅲ期	中粒(少)斑状黑云母二长花岗岩	SH-z152 ^①	8、9	通城肥猪 窝钨矿点	绿柱石	主矿脉 2 条, 其中一条长 20 m, 宽 2~6 m, 绿柱 石长 1~10 cm, 含量为 0.5 kg/m ³	
	晚 侏 罗 世	黑云母二长花岗岩	第Ⅱ期	细中粒(少)斑状黑云母二长花岗岩	SH-z153 ^②	6、7	林树村 钨矿点	绿柱石、 钨钽铁矿	含绿柱石伟晶岩细脉带, 呈分支复合, 宽 5~ 20 cm, 脉体富绿柱石及钨钽铁矿, 多数具风化 剥蚀, 地表样品钨钽平均品位 35.4 g/m ³
			第Ⅰ期	细粒(中细粒)黑云二长花岗岩	SH-z154 ^②	5	通城麦垌 钨矿点	绿柱石/ 钨钽铁矿	含绿柱石伟晶岩大脉, 主脉长 60 m, 宽 50 m, 分 异好, 交代弱, 见文象带, 块体长石带, 矿体石英 带, 富集带绿柱石 17.82 kg/cm ³ , 贫矿带 2.16 kg/m ³ , 围岩中含 Li ₂ O 0.01%~0.1%.
			第Ⅲ期	细中粒黑云母二长花岗岩	—	—	—	—	—
新元 古代	花岗闪长岩	第Ⅱ期	细中粒黑云母花岗闪长岩	SH-z155 ^②	4	—	—	—	
		第Ⅰ期	中细粒黑云母英闪长岩	—	—	—	—	—	
		中细粒黑云母石英二长岩	SH-z158 ^②	3	板江伟 晶岩段	绿柱石	脉体共计 7 条, 产于花岗岩体与冷家溪群内接 触带, 长 20~300 m, 宽 2~10 m, 长石开采为 主, 可见少量绿柱石		
中粒花岗闪长岩	中粒黑云母花岗闪长岩	SH-z816 ^①	2	—	—	—	—		
	中细粒英闪长岩	—	1	—	—	—	—		

注: “—”为缺乏年龄数据; “SH-z”为 Shrimp 锆石 U-Pb 定年; “K-Ar”为云母 K-Ar 同位素定年。①据通城县区域地质调查报告(湖北省地质调查院, 2013); ②据 1/25 万岳阳市幅(湖南省地质局区域地质测量队, 1978); ③据幕阜山花岗岩区稀有金属矿产普查报告(地质部 701 地质队, 1965)。

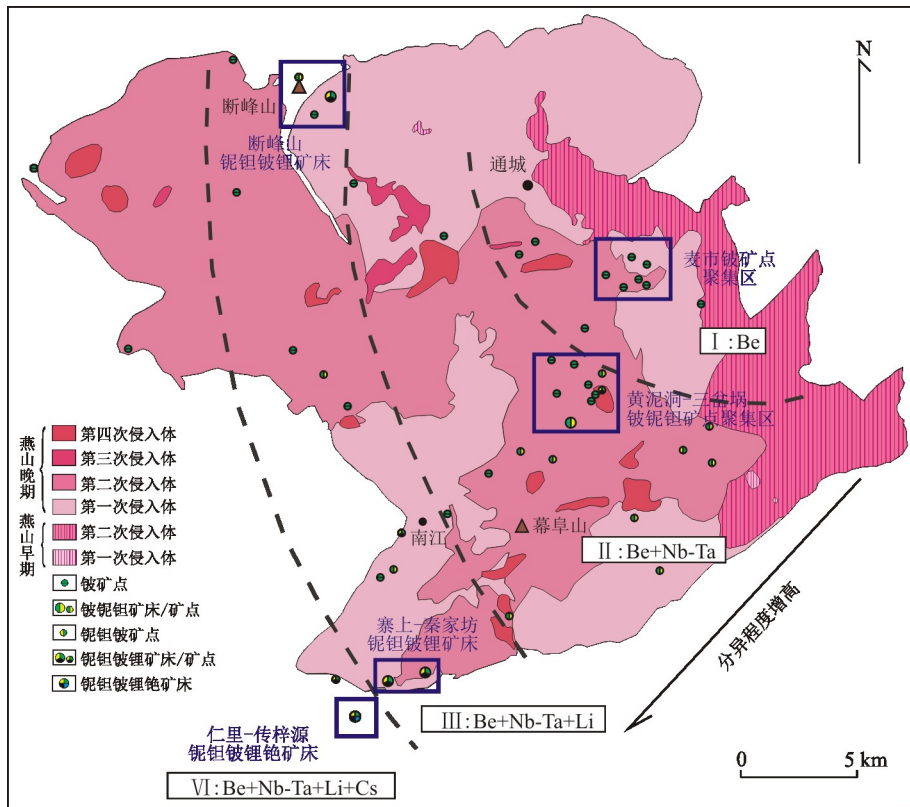


图 5 幕阜山复式花岗岩体岩浆分异及稀有金属矿化组合分带概略图

Fig.5 Magmatic differentiation and rare metal mineralization zoning diagram of Mufushan composite granite mass

据湖南省地质局区域地质测量队(1978)改编

是何时启动的一直争论不休,随着湘南道县、定远地区早中生代(178 Ma)具 OIB 型地幔属性碱性玄武岩、郴州—临武断裂 EMI、EMII 型岩石圈地幔镁铁质岩石、桂东南 165 Ma 左右的钾玄岩和正长岩、赣中早中生代(168 Ma)OIB 型碱性玄武岩的发现(郭锋等, 1997; 李献华等, 1997, 1999; 王岳军等, 2005),多数学者已倾向于认为在早中侏罗世华南板块内部已经转为伸展背景(陈培荣等, 2002; 范蔚茗等, 2003; 王岳军等, 2004, 2005; 谢桂青等, 2005; 李献华等, 2007; 胡开明等, 2016).综合宏观考虑区域地层系统、构造特征,华南各省区调报告均一致认为华南中侏罗—晚侏罗世处于挤压隆升状态,伴有变质变形和推覆构造等,并因此提出华南中生代构造体制转折最终结束时限为 150~142 Ma(邢光福等, 2008).综合幕阜山区域地质背景和已有研究成果,其约 154 Ma 富集岩石圈地幔性质的镁铁质岩浆的上升侵位极可能代表了湘东北地区由陆内碰撞挤压向伸展的转变时间(湖北省地质调查院, 2013).本次研究认为,幕阜山区域在印支期经历了广泛的陆陆碰撞造山作用,进入燕山期后构造背景开始由陆内碰撞挤压向伸展减薄转变,在岩石

圈伸展过程中经由玄武质岩浆底侵作用的影响,下地壳发生熔融,多期次岩浆活动导致了稀有金属的逐渐富集成矿,于燕山中期形成了区域广泛分布的稀有金属矿床、矿点.

5 结论

幕阜山复式花岗岩体的岩浆活动可划分为 3 个时代,20 个侵入期次,其主体形成于燕山早期至中期,总体呈现出由东向西年龄由老到新、演化逐渐完善、稀有金属矿化种类逐渐增多的变化趋势.根据本文获得的岩体边部及中部稀有金属伟晶岩中白云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄,区域稀有金属伟晶岩形成年龄为 130.5~127.7 Ma,是在燕山中期构造背景下,由挤压碰撞向伸展减薄转换的过程中,玄武质岩浆底侵,下地壳熔融伴随的多期次岩浆活动导致的富集成矿.

致谢:感谢王登红、邹天人研究员和刘善宝副研究员对文章的指导与建议,湖北省地质调查院的秦志军工程师及湖南省地质调查院的文春华博士在野外工作中提供了帮助,感谢王成辉博士、刘琰博士、

黄凡博士等人在成文过程中的帮助与建议!

References

- Bai, D. Y., Huang, J. Z., Meng, D. B., et al., 2006. Mesozoic Thermochronological Analysis of the Uplift Process of Mountains in Southeast Hunan. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(6): 525—536 (in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Jia, B. H., Li, J. D., et al., 2007. Important Significance of Regional Tectonic Regime to Metallogenic Capacity of Indosinian and Early Yanshanian Granites in Southeastern Hunan: A Case Study of Qianlishan and Wangxianling Plutons. *Mineral Deposits*, 26(5): 487—500 (in Chinese with English abstract).
- Bai, T. B., van Groos, A. F. K., 1999. The Distribution of Na, Rb, Sr, Al, Ge, Cu, W, Mo, La, and Ce between Granitic Melts and Coexisting Aqueous Fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7): 1117—1131. doi:10.1016/S0016-7037(98)00284-1
- 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323—333. doi:10.1007/s004100050159
- Breaks, F. W., Moore, J. M., 1992. The Ghost Lake Batholith, Superior Province of Northwestern Ontario: A Fertile, S-Type, Peraluminous Granite-Rare-Element Pegmatite System. *Can Mineralogist*, 30: 835—875.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan, 1988. Regional Geology of Hunan. Geological Publishing House, Beijing, 417—437 (in Chinese).
- Černý, P., 1991. Rare-Element Granitic Pegmatites. Part II: Regional to Global Environments and Petrogenesis. *Geoscience Canada*, 18(2): 68—80.
- Chen, P. R., Hua, R. M., Zhang, B. T., et al., 2002. The Yanshanian Post-Orogenic Granitoids in Nanling: Petrology Constraint and Geodynamic Setting. *Science China Earth Sciences*, 32(4): 279—289 (in Chinese).
- Chen, W., Zhang, Y., Zhang Y. Q., et al., 2006. Late Cenozoic Episodic Uplifting in Southeastern Part of the Tibetan Plateau—Evidence from Ar-Ar Thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867—872 (in Chinese with English abstract).
- Dong, X. F., Tang, Z. C., Chen, Z. D., et al., 2016. Geochemical Characteristics of the Basic and Magnesian Metamorphic Rocks in Longyou Area, Zhejiang Province and Their Tectonic Setting. *Earth Science*, 41(8): 1322—1333 (in Chinese with English abstract).
- Fan, W. M., Wang, Y. J., Guo, F., et al., 2003. Mesozoic Mafic Magmatism in Hunan-Jiangxi Provinces and the Lithospheric Extension. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 159—169 (in Chinese with English abstract).
- Fu, Z. R., Li, Z. J., Zheng, D. Y., 1999. Structural Pattern and Tectonic Evolution of NNE-Trending Strike-Slip Orogenic Belt in the Border Region of Hunan and Jiangxi Provinces. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 263—272 (in Chinese with English abstract).
- Guo, F., Fan, W. M., Lin, G., et al., 1997. Chronological Study and Genesis Discussion of Gabbro Xenoliths in Daoxian, Hunan. *Chinese Science Bulletin*, 42(15): 1661—1663 (in Chinese).
- Han, B. F., 2008. A Preliminary Comparison of Mesozoic Granitoids and Rare Metal Deposits in Chinese and Russian Altai Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 655—660 (in Chinese with English abstract).
- He, Y., 1985. Some Views on the Division into Rock Formation Phases of the Xihuashan Granite Stock. *Geological Review*, 31(2): 173—178 (in Chinese with English abstract).
- He, Z. L., Xu, D. R., Chen, G. H., et al., 2004. Gold Polymetallic Ore-Forming Geochemistry of Yanshanian Intracontinental Collision Orogen, Northeastern Hunan Province. *Mineral Deposits*, 23(1): 39—51 (in Chinese with English abstract).
- Hou, H. X., Zhang, D. H., Zhang, R. Z., 2016. The Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Mesozoic Shiyagou Hidden Granite at the East Qinling. *Earth Science*, 41(10): 1665—1682 (in Chinese with English abstract).
- Hu, K. M., Tang, Z. C., Meng, X. S., et al., 2016. Chronology of Petrogenesis and Mineralization of Datongkeng Porphyry W-Mo Deposit in West Zhejiang. *Earth Science*, 41(9): 1435—1450 (in Chinese with English abstract).
- Hubei Geological Survey, 2013. 1: 500 000 Regional Geological Survey Report of Tongcheng Area. Hubei Geological Survey, Wuhan, 1—288 (in Chinese).
- Irber, W., 1999. The Lanthanide Tetrad Effect and Its Correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of Evolving Peraluminous Granite Suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3—4): 489—508.
- Li, J. K., Wang, D. H., Zhang, D. H., et al., 2007. Mineralizing Mechanism and Continental Geodynamics of Typical Pegmatite Deposits in Western Sichuan, China. Atomic Energy Press, Beijing, 1—154 (in Chinese).
- Li, J. K., Zou, T. R., Liu, X. F., et al., 2015. The Metallogenic Regularities of Lithium Deposits in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(2): 652—670. doi:10.

3969/j.issn.1000-9515.2015.02.023

- Li, J. W., Li, X. F., Li, Z. J., et al., 1999. Fluid Inclusions Study in the Process of Strike Slip Faulting—A Case Study in Eastern Hunan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(3): 240—247 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. C., 2006. Magmatism of Phanerozoic Granitoids in Northeastern Hunan Province, China and Its Evolution Regularity (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 1—101 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. F., Li, J. W., Fu, Z. R., 1999. Uranium Mineralization Related to Strike-Slip Faults, Lujing Orefield, Border Region between Eastern Hunan and Western Jiangxi. *Earth Science*, 24(5): 476—479 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. F., Yan, T. Z., Fu, Z. R., 2000. Relationship between NEN-trending Active Strike-Slip Faults and Earthquake Hot Spring Distribution in Eastern Hunan and Western Jiangxi, China. *Journal of Geomechanics*, 6(4): 73—78 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Hu, R. Z., Rao, B., 1997. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous Mafic Dikes from Northern Guangdong. *Geochimica*, 26(2): 14—31 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007. Further Discussion on the Genetic Types and Tectonic Significance of Early Yanshanian Granite. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981—991 (in Chinese).
- Li, X. H., Zhou, H. W., Liu, Y., et al., 1999. Petrological and Geochemical Characteristics of the Potassic Intrusive Rocks in Southeastern Guangxi. *Chinese Science Bulletin*, 44(18): 1992—1998 (in Chinese).
- Liu, F., Yang, F. Q., Mao, J. W., et al., 2009. Study on Chronology and Geochemistry for Abagong Granite in Altay Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1416—1425 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. Q., Zhang, L. X., Jin, W. Q., et al., 1999. The Yanshanian Granitoids in Northeast Hunan. *Geology and Mineral Resources of South China*, (4): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Y., 2003. Compound Massif and Complex Massif—The Two Basic Forms of the Massif Association of Granitoid and Their Significance. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(3): 143—148 (in Chinese with English abstract).
- Lou, F., Wu, J., Chen, G. H., 2014. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Indosinian Rock Mass in Paoshuling of Limu, Guangxi and Its Geological Implications. *Geological Bulletin of China*, 33(7): 960—965 (in Chinese with English abstract).
- Morteani, G., Preinfalk, C., Horn, A. H., 2000. Classification and Mineralization Potential of the Pegmatites of the Eastern Brazilian Pegmatite Province. *Mineralium Deposita*, 35(7): 638—655. doi:10.1007/s001260050268
- No.701 Force of Geology Department, 1965. A Survey Report on Rare Metal Minerals in the Granite Area of Mufushan. 701 Force of Geology Department, Beijing, 1—176 (in Chinese).
- Partington, G. A., Menaughton, N. J., Williams, I. S., 1995. A Review of the Geology, Mineralization, and Geochronology of the Greenbushes Pegmatite, Western Australia. *Economic Geology*, 90(3): 616—635. doi:10.2113/gsec-90.3.616
- Regional Geological Survey Team of Hunan Geological Bureau, 1978. Geological Map of Pingjiang (Scale 1 : 250 000). Hunan Geological Bureau, Changsha, 1—87 (in Chinese).
- Pei, R. F., 1995. Comagmatic Complementary Differentiation and Metallogeny. *Mineral Deposits*, 14(4): 376—379 (in Chinese).
- Peng, H. Q., Jia, B. H., Tang, X. S., 2004. Uplift Process of Mufushan and Thermochronology of Wangxiang Granites in Northeastern Hunan Province. *Geological Science and Technology Information*, 23(1): 11—15 (in Chinese with English abstract).
- Shearer, C. K., Papike, J. J., Jolliff, B. L., 1992. Petrogenetic Links among Granites and Pegmatites in the Harney Peak Rare-Element Granite-Pegmatite System, Black Hills, South Dakota. *Canadian Mineralogist*, 30: 785—809.
- Shen, W. Z., Xu, S. J., Wang, Y. X., et al., 1994. Nd-Sr Isotope Study of West Huashan Granite. *Chinese Science Bulletin*, 39(2): 154—156 (in Chinese).
- Shi, H. C., Shi, X. B., Yang, X. Q., et al., 2013. The Exhumation Process of Mufushan Granite in Jiangnan Uplift since Cenozoic: Evidence from Low-Temperature Thermochronology. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(6): 1945—1957 (in Chinese with English abstract).
- Thompson, A. B., 1999. Some Time-Space Relationships for Crustal Melting and Granitic Intrusion at Various Depths. In: Castro, A., Fernandez, C., Vignier-esse, J. L., eds., Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques. *Geological Society, London, Special Publications*, 168: 7—25. doi: 10.1144/GSL.SP.1999.168.01.02
- Tkachev, A. V., 2011. Evolution of Metallogeny of Granitic Pegmatites Associated with Orogens throughout Geo-

- logic Time. In: Sial, A. N., Bettencourt, J. S., de Campos, C. P., eds., *Granite-Related Ore Deposits, Geological Society, London, Special Publications*, 350: 7—23. doi: 10.1144/SP350.2
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Xu, Z. G., et al., 2002. Metallogenic Series and Metallogenic Regularity of Altai Metallogenic Province. Atomic Energy Press, Beijing, 1—492 (in Chinese).
- Wang, D. H., Zou, T. R., Xu, Z. G., et al., 2004. Advance in the Study of Using Pegmatite Deposits as the Tracer of Orogenic Process. *Advances in Earth Science*, 19(4): 614—620 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. K., Wang, H. F., Huang, Z. L., 2000. Geochemical Indicators of Trace Element in Li-F Granite Liquid Segregation. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 145—152 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Liang, X. Q., et al., 2005. SHRIMP Zircon U-Pb Ages of the Indosinian Granites in Hunan and Their Implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 1259—1266 (in Chinese).
- Wang, Y. J., Liao, C. L., Fan, W. M., et al., 2004. Early Mesozoic OIB-Type Alkaline Basalt in Central Jiangxi Province and Its Tectonic Implications. *Geochimica*, 33(2): 109—117 (in Chinese with English abstract).
- Webster, J. D., Holloway, J. R., Hervig, R. L., 1989. Partitioning of Lithophile Trace Elements between H_2O and H_2O+CO_2 Fluids and Topaz Rhyolite Melt. *Economic Geology*, 84(1): 116—134. doi: 10.2113/gsecongeo.84.1.116
- Windley, B. F., Kroner, A., Guo, J., et al., 2002. Neoproterozoic to Paleozoic Geology of the Altai Orogen, NW China: New Zircon Age Data and Tectonic Evolution. *The Journal of Geology*, 110: 719—737. doi: 10.1086/342866
- Xiao, W., Windley, B. F., Badarch, G., et al., 2004. Palaeozoic Accretionary and Convergent Tectonics of the Southern Altai: Implications for the Growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339—342. doi: 10.1144/0016-764903-165
- Xie, G. Q., Mao, J. W., Hu, R. Z., et al., 2005. Discussion on Some Problems of Mesozoic and Cenozoic Geodynamics of Southeast China. *Geological Review*, 51(6): 613—620 (in Chinese with English abstract).
- Xing, G. F., Lu, Q. D., Chen, R., et al., 2008. Study on the Ending Time of Late Mesozoic Tectonic Regime Transition in South China—Comparing to the Yanshan Area in North China. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 451—463 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Chen, W., Chen, K. L., et al., 2006. Study on the Ar-Ar Age Spectrum of Diagenetic I/S and the Mechanism of ^{39}Ar Recoil Loss—Examples from the Clay Minerals of P-T Boundary in Changxing, Zhejiang Province. *Geological Review*, 52(4): 556—561 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. J., Zhang, X. H., Yi, S. H., 2003. Intraplate Tectonic Deformation of the Precambrian in the Mufu and Jiuling Mountains Area, North-West Jiangxi. *Geological Journal of China Universities*, 9(1): 81—88 (in Chinese with English abstract).
- Zou, T. R., Zhang, X. C., Jia, F. Y., et al., 1986. The Origin of No. 3 Pegmatite in Altay, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 5(4): 36—50 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏道远, 黄建中, 孟德保, 等, 2006. 湘东南地区中、新生代山带隆升过程的热年代学研究. *地球学报*, 27(6): 525—536.
- 柏道远, 贾宝华, 李金冬, 等, 2007. 区域构造体制对湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力的重要意义——以千里山岩体和王仙岭岩体为例. *矿床地质*, 26(5): 487—500.
- 湖南省地质矿产局, 1988. 湖南区域地质志. 北京: 地质出版社, 417—437.
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等, 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景. *中国科学: 地球科学*, 32(4): 279—289.
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 等, 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据. *岩石学报*, 22(4): 867—872.
- 董学发, 唐增才, 陈忠大, 等, 2016. 浙江龙游地区基性及镁质变质岩的地球化学特征及其构造环境. *地球科学*, 41(8): 1322—1333.
- 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 等, 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. *地学前缘*, 10(3): 159—169.
- 傅昭仁, 李紫金, 郑大瑜, 1999. 湘赣边区 NNE 向走滑造山带构造发展样式. *地学前缘*, 6(4): 263—272.
- 郭锋, 范蔚茗, 林舸, 等, 1997. 湘南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨. *科学通报*, 42(15): 1661—1663.
- 韩宝福, 2008. 中俄阿尔泰山中生代花岗岩与稀有金属矿床的初步对比分析. *岩石学报*, 24(4): 655—660.
- 赫英, 1985. 关于西华山花岗岩株成岩阶段划分问题的几点看法. *地质论评*, 31(2): 173—178.
- 贺转利, 许德如, 陈广浩, 等, 2004. 湘东北燕山期陆内碰撞造山带金多金属成矿地球化学. *矿床地质*, 23(1): 39—51.
- 侯红星, 张德会, 张荣臻, 2016. 东秦岭中生代石瑶沟隐伏花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义. *地球科学*, 41(10): 1665—1682.

- 胡开明,唐增才,孟祥随,等,2016.浙西大铜坑斑岩型钨钼矿床成岩成矿年代学.地球科学,41(9): 1435-1450.
- 湖北省地质调查院,2013.1:50万通城县区幅区域地质调查报告.武汉:湖北省地质调查院,1-288.
- 李建康,王登红,张德会,等,2007.川西伟晶岩型矿床的形成机制及大陆动力学背景.北京:原子能出版社,1-154.
- 李建威,李先福,李紫金,等,1999.走滑变形过程中的流体包裹体研究——以湘东地区为例.大地构造与成矿,23(3): 240-247.
- 李鹏春,2006.湘东北地区显生宙花岗岩岩浆作用及其演化规律(博士学位论文).广州:中国科学院广州地球化学研究所,1-101.
- 李先福,李建威,傅昭仁,1999.湘赣边鹿井矿田与走滑断层有关的铀矿化作用.地球科学,24(5): 476-479.
- 李先福,晏同珍,傅昭仁,2000.湘东—赣西 NNE 向走滑断裂与地震、地热的关系.地质力学学报,6(4): 73-78.
- 李献华,胡瑞忠,饶冰,1997.粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学.地球化学,26(2): 14-31.
- 李献华,李武显,李正祥,2007.再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义.科学通报,52(9): 981-991.
- 李献华,周汉文,刘颖,等,1999.桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征.科学通报,44(18): 1992-1998.
- 刘锋,杨富全,毛景文,等,2009.阿尔泰造山带阿巴官花岗岩体年代学及地球化学研究.岩石学报,25(6): 1416-1425.
- 刘姝群,张录秀,金维群,等,1999.湘东北燕山期花岗岩.华南地质与矿产,(4): 1-9.
- 刘家远,2003.复式岩体和杂岩体—花岗岩类岩体组合的两种基本形式及其意义.地质找矿论丛,18(3): 143-148.
- 娄峰,伍静,陈国辉,2014.广西栗木泡水岭印支期岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地质通报,33(7): 960-965.
- 地质部 701 地质队,1965.1:5万幕阜山花岗岩区稀有金属矿产普查报告.北京:地质部 701 地质队,1-176.
- 湖南省地质局区域地质测量队,1978.1:25万地质图——平江幅.长沙:湖南省地质局,1-87.
- 裴荣富,1995.共(源)岩浆补余分异作用与成矿.矿床地质,14(4): 376-379.
- 彭和求,贾宝华,唐晓珊,2004.湘东北望湘岩体的热年代学与幕阜山隆升.地质科技情报,23(1): 11-15.
- 沈渭洲,徐士进,王银喜,等,1994.西华山花岗岩的 Nd-Sr 同位素研究.科学通报,39(2): 154-156.
- 石红才,施小斌,杨小秋,等,2013.江南隆起带幕阜山岩体新生代剥蚀冷却的低温热年代学证据.地球物理学报,56(6): 1945-1957.
- 王登红,陈毓川,徐志刚,等,2002.阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究.北京:原子能出版社,1-492.
- 王登红,邹天人,徐志刚,等,2004.伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展.地球科学进展,19(4): 614-620.
- 王联魁,王慧芬,黄智龙,2000.Li-F 花岗岩液态分离的微量元素地球化学标志.岩石学报,16(2): 145-152.
- 王岳军,范蔚茗,梁新权,等,2005.湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示.科学通报,50(12): 1259-1266.
- 王岳军,廖超林,范蔚茗,等,2004.赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义.地球化学,33(2): 109-117.
- 谢桂青,毛景文,胡瑞忠,等,2005.中国东南部中—新生代地球动力学背景若干问题的探讨.地质论评,51(6): 613-620.
- 邢光福,卢清地,陈荣,等,2008.华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比.地质学报,82(4): 451-463.
- 张彦,陈文,陈克龙,等,2006.成岩混层(I/S)Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例.地质论评,52(4): 556-561.
- 章泽军,张雄华,易顺华,2003.赣西北幕阜山—九岭山一带前震旦纪构造变形.高校地质学报,9(1): 81-88.
- 邹天人,张相宸,贾富义,等,1986.论阿尔泰 3 号伟晶岩脉的成因.矿床地质,5(4): 36-50.