

# 湘东北幕阜山地区中生代构造—岩浆特征 及其对稀有金属伟晶岩的控制

www.  
geojournals.cn/georev柏道远<sup>1)</sup>, 文春华<sup>1)</sup>, 黄建中<sup>1)</sup>, 李彬<sup>1,2)</sup>, 周芳春<sup>3)</sup>,张立平<sup>3)</sup>, 陈虎<sup>3)</sup>, 陈剑锋<sup>1)</sup>, 陈旭<sup>1)</sup>

- 1) 湖南省地质调查所,长沙,410016;
- 2) 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌,330013;
- 3) 湖南省地质灾害调查监测所,长沙,410100

**内容提要:**幕阜山地区发育燕山期大型花岗岩体,形成了大量花岗伟晶岩脉及相关稀有金属矿床或矿化体。尽管前人对该地区花岗岩、伟晶岩和稀有金属矿床的地质地球化学特征、形成时代、空间展布和演化过程等进行了系统研究并取得大量成果,但地质构造对花岗岩和稀有金属伟晶岩的控制作用尚缺乏研究。鉴此,笔者等通过跨幕阜山岩体接触带的多个地质剖面调查,结合区域地质和矿产发育特征,对幕阜山地区中生代构造—岩浆演化过程以及构造对花岗岩体、伟晶岩脉和接触变质带的控制作用等进行了研究,形成以下主要认识:① 中生代—新生代早期,研究区自早至晚经历了早—中三叠世海相盆地、中三叠世后期—晚三叠世印支运动、晚三叠世晚期—中侏罗世早期类前陆盆地、中侏罗世晚期早燕山运动、晚侏罗世—早白垩世早期花岗质岩浆活动与成矿、早白垩世晚期—古近纪中期区域伸展与断陷盆地、古近纪中晚期 NE 向挤压等 7 个构造阶段。② 幕阜山岩体边界主要受 NW 向、NE 向和 NEE 向等 3 组断裂控制,其构造机制实质为岩体区断块和岩体外断块对岩浆侵位过程的控制。③ 岩体侵位构造可定性划分为低侵位缓倾接触构造、低侵位陡倾接触构造、高侵位缓倾接触构造和高侵位陡倾接触构造等 4 类,其中低侵位缓倾接触构造对花岗伟晶岩的形成最为有利。④ 控制伟晶岩脉(体)的构造包括层面或层间剪切面、逆断裂、岩体接触带等主导性控岩构造,以及走滑剪切破裂、膝折面等限制性控岩构造。层间剪切面主要形成于武陵运动,EW 向和 NWW 向逆断裂、NWW 向膝折面、NNE 向左行剪切破裂、NNW 向右行剪切破裂等形成于印支运动 SN 向挤压,NNW 向右行剪切破裂形成于早燕山运动 NWW 向挤压;仁里地区构造的走向为叠加后期顺时针旋转后的结果。⑤ 受岩体接触带和不同类型与规模的面状构造控制,仁里地区自北而南,围岩中伟晶岩脉的规模自大变小、岩脉产状由简单变复杂,主要成矿元素由 Nb—Ta —>Nb—Ta—Li—Cs 变化。

**关键词:**幕阜山;中生代;花岗岩;伟晶岩;构造演化;构造控岩特征

幕阜山地区位于新元古代江南造山带中段(周金城等,2009),湘东北中生代构造隆起区的北部(柏道远等,2021a),地处湘鄂赣三省交界。区内发育燕山期大型花岗岩体,并于岩体内部及近岩体围岩(冷家溪群片岩)中形成了大量花岗伟晶岩脉以及花岗伟晶岩型稀有金属矿床或矿化体(冷双梁等,2018;刘翔等,2018;李鹏等,2019a;周芳春等,2019a)。前人对幕阜山花岗岩体的成岩时代和地质地球化学特征(Ji Webin et al., 2017;许畅等,2019;

Li Peng et al., 2020;李鹏等,2020;王晶等,2020;李安邦等,2021),以及稀有金属伟晶岩的地质地球化学特征(文春华等,2016;文春华,2017;李鹏等,2017,2019b;李乐广等,2019)、岩石和矿化类型及其空间展布(刘翔等,2019;石威科等,2020;张立平等,2020)、成岩成矿时代(周芳春等,2020;Li Peng et al., 2020;Xiong Yiqu et al., 2020;姜鹏飞等,2021;陈剑锋等,2021)、岩浆—热液演化过程(王臻等,2019;杨晗等,2019;周芳春等,2019b;Li Peng et al., 2020)等。

注:本文为湖南省科技厅重点研发项目(编号:2019SK2261)、有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室开放基金资助项目(编号:2021YSJS04)和湖南省地质院科研项目(编号:HNGSTP202105\_201917)的成果。

收稿日期:2022-08-13;改回日期:2022-10-31;网络首发:2022-12-20;责任编辑:高作宇。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.12.023

作者简介:柏道远,男,1967 年生,博士,研究员级高级工程师,长期从事区域地质调查与基础地质研究;Email: daoyuanbai@sina.com。

al., 2021)等进行了系统研究,取得大量地质资料和成果认识。此外,李鹏等(2021)在上述成果基础上对燕山期成岩成矿的时空演化过程进行了总结,提出花岗岩基总体呈现出由东北向西南侵入时代由老至新、岩浆演化程度逐渐升高、稀有金属成矿组合由单一至多样的框架性认识。

尽管幕阜山地区燕山期成岩成矿研究已取得丰硕成果,但地质构造对花岗岩和稀有金属伟晶岩的

控制作用尚缺乏研究,一定程度上影响到对成矿规律的更深刻认识。

鉴此,笔者等通过跨幕阜山岩体接触带的多个地质剖面调查,结合区域地层、岩浆岩、变质岩、构造、矿产等发育特征,对幕阜山地区中生代构造—岩浆演化过程、控制花岗岩体和伟晶岩脉侵位的构造类型、岩体侵位构造类型及其对变质作用和伟晶岩的控制等进行了研究,相关认识为幕阜山地区成岩

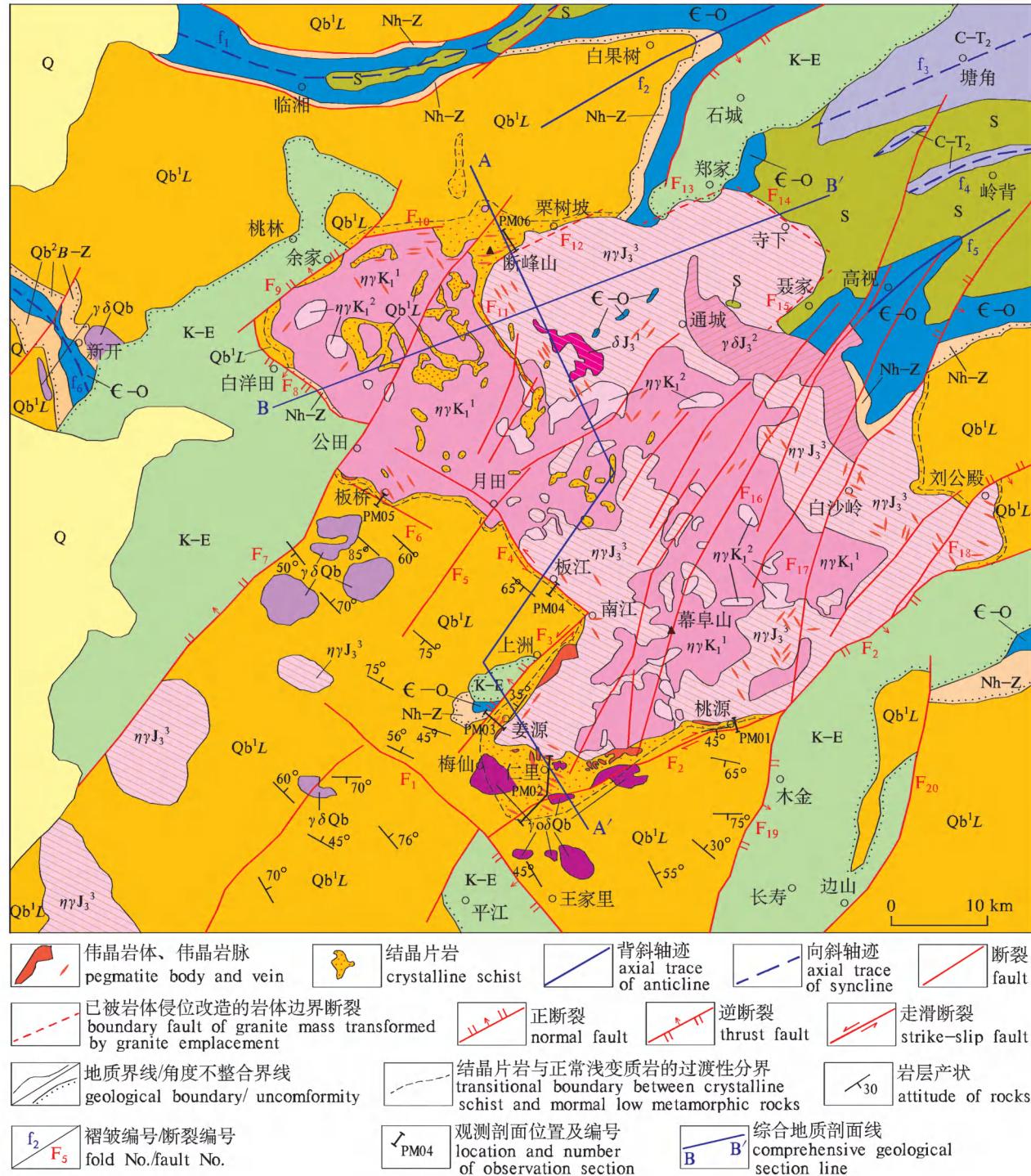


图1 幕阜山花岗岩体及周邻区域地质图(湖南省地质局区域地质测量队<sup>①</sup>;李鹏等,2017;李乐广等,2019修改)

Fig. 1 Geological map of Mufushan granite mass and its surrounding areas(modified from the Regional Geological Survey Team of Hunan Geological Bureau<sup>①</sup>; Li Peng et al., 2017&; Li Leguang et al., 2019& )

Q—第四系;K—E—白垩系—古近系;C—T<sub>2</sub>—石炭系—中三叠统;S—志留系;E—O—寒武系—奥陶系;Nh—Z—南华系—震旦系;Qb<sup>2</sup>B—Z—新元古界青白口系板溪群—震旦系;Qb<sup>1</sup>L—新元古界青白口系冷家溪群; $\eta\gamma K_1^2$ —早白垩世第二次侵入二云母二长花岗岩; $\eta\gamma K_1^1$ —早白垩世第一次侵入二云母二长花岗岩; $\eta\gamma J_3^3$ —晚侏罗世第三次侵入黑云母二长花岗岩; $\gamma\delta J_3^2$ —晚侏罗世第二次侵入花岗闪长岩; $\delta J_3^1$ —晚侏罗世第一次侵入闪长岩; $\gamma\delta Qb$ —青白口纪花岗闪长岩; $\gamma\delta Qb$ —青白口纪英云闪长岩。褶皱名称:f<sub>1</sub>—临湘向斜;f<sub>2</sub>—白果树背斜;f<sub>3</sub>—塘角向斜;f<sub>4</sub>—岭背向斜;f<sub>5</sub>—高视背斜;f<sub>6</sub>—新开向斜。断裂名称:F<sub>1</sub>—王家里断裂;F<sub>2</sub>—桃源断裂;F<sub>3</sub>—上洲断裂;F<sub>4</sub>—板江断裂;F<sub>5</sub>—月田断裂;F<sub>6</sub>—板桥断裂;F<sub>7</sub>—公田断裂;F<sub>8</sub>—白洋田断裂;F<sub>9</sub>—余家断裂;F<sub>10</sub>—苏家垄断裂;F<sub>11</sub>—谭家坪断裂;F<sub>12</sub>—栗树坡断裂;F<sub>13</sub>—郑家断裂;F<sub>14</sub>—寺下断裂;F<sub>15</sub>—聂家断裂;F<sub>16</sub>—上罐断裂;F<sub>17</sub>—白沙岭断裂;F<sub>18</sub>—刘公殿断裂;F<sub>19</sub>—木金断裂;F<sub>20</sub>—边山断裂  
Q—Quaternary; K—E—Cretaceous—Paleogene; C—T<sub>2</sub>—Carboniferous—Middle Triassic; S—Silurian; E—O—Cambrian—Ordovician; Nh—Z—Nanhuan—Sinian; Qb<sup>2</sup>B—Z—Neoproterozoic Banxi Group—Sinian(Ediacaran) System; Qb<sup>1</sup>L—Neoproterozoic Lengjiaxi Group;  $\eta\gamma K_1^2$ —the second intrusion of mica monzogranite in Early Cretaceous;  $\eta\gamma K_1^1$ —the first intrusion of mica monzogranite in Early Cretaceous;  $\eta\gamma J_3^3$ —the third intrusion of biotite monzogranite in Late Jurassic;  $\gamma\delta J_3^2$ —the second intrusion of granodiorite in Late Jurassic;  $\delta J_3^1$ —the first intrusion of diorite in Late Jurassic;  $\gamma\delta Qb$ —granodiorite of Qingbaikou (Early Neoproterozoic) Period;  $\gamma\delta Qb$ —tonalite of Qingbaikou Period. Names of folds: f<sub>1</sub>—Linxiang syncline; f<sub>2</sub>—Baiguoshu anticline; f<sub>3</sub>—Tangjiao syncline; f<sub>4</sub>—Lingbei syncline; f<sub>5</sub>—Gaoshi anticline; f<sub>6</sub>—Xinkai syncline. Names of faults: F<sub>1</sub>—Wangjiali fault; F<sub>2</sub>—Taoyuan fault; F<sub>3</sub>—Shangzhou fault; F<sub>4</sub>—Baijiang fault; F<sub>5</sub>—Yuetian fault; F<sub>6</sub>—Banqiao fault; F<sub>7</sub>—Gongtian fault; F<sub>8</sub>—Baiyangtian fault; F<sub>9</sub>—Yujia fault; F<sub>10</sub>—Sujialong fault; F<sub>11</sub>—Tanjaping fault; F<sub>12</sub>—Lishupo fault; F<sub>13</sub>—Zhengjia fault; F<sub>14</sub>—Sixia fault; F<sub>15</sub>—Niejia fault; F<sub>16</sub>—Shangguan fault; F<sub>17</sub>—Baishaling fault; F<sub>18</sub>—Liugongdian fault; F<sub>19</sub>—Mujin fault; F<sub>20</sub>—Bianshan fault

成矿规律的进一步研究和稀有金属找矿补充了重要的基础资料。

## 1 区域地质概况

研究区地层自老至新发育有新元古界冷家溪群和板溪群、南华系—志留系、上石炭统一中三叠统、上白垩统一古近系、第四系等(图1),其中冷家溪群为区域褶皱基底,板溪群—志留系和上石炭统一中三叠统为区域海相盖层,上白垩统一古近系为晚燕山期区域伸展构造环境下的断陷盆地沉积。冷家溪群主要为一套含火山物质的以砂、泥质为主的浅变质碎屑岩,形成于弧后盆地,总厚达8800 m以上(柏道远等,2021b)。板溪群仅分布于西部的新开向斜,角度不整合于冷家溪群之上;为砂岩、粉砂岩和板岩,厚约800 m。南华系为一套含砾砂、泥质沉积,角度不整合于冷家溪群或平行不整合于板溪群之上,厚250 m左右。震旦系主要为碳酸盐岩、硅质岩,厚220 m左右。寒武系为碳酸盐岩和碳酸盐岩(北部)或含碳质、硅质和钙质沉积(南部),厚1100 m左右。奥陶系为碳酸盐岩(北部)或含钙质泥岩(南部),地层总厚度550 m左右。志留系主要为粉砂岩、页岩,厚2700 m左右。上石炭统一中三叠统为灰质、硅质、泥质沉积,与下伏志留系之间为平行不整合接触,厚1260~1650 m。上白垩统一古近系为一套砾岩、砂岩组成的红色堆积,与前白垩系之间

为角度不整合接触。第四系为河、湖相砾、砂、泥质沉积。

区内岩浆岩主要为新元古代侵入岩、燕山期花岗岩和花岗伟晶岩(图1)。新元古代侵入岩分布于新开—板桥—仁里一带,主要岩石类型为英云闪长岩和花岗闪长岩,具岛弧花岗岩特征(马铁球等,2009;陕亮等,2017)。燕山期花岗岩主要为幕阜山岩体,该岩体整体走向NW—SE(图1),地表出露岩石类型主要为黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩,其次为花岗闪长岩,局部见闪长岩和白云母二长花岗岩;成岩年代为154~138 Ma,对应于晚侏罗世—早白垩世初,总体上自北东往南西侵入时代由老至新、岩浆演化程度逐渐升高(李鹏等,2021)。花岗伟晶岩广泛分布于岩体内和岩体外接触变质带中,按特征矿物组合可划分为断峰山地区电气石伟晶岩、电气石—绿柱石伟晶岩、绿柱石伟晶岩、铌钽铁矿—绿柱石伟晶岩,和仁里地区的锂电气石—锂云母伟晶岩5类,分别对应伟晶岩稀有金属富集程度分类中的无矿→(含Be)→富Be→富Be、Nb、Ta→富Li、Be、Nb、Ta阶段(李乐广等,2019);伟晶岩形成时代主要介于141~125 Ma(Li Peng et al., 2020;姜鹏飞等,2021;陈剑锋等,2021)。

该区经历了武陵运动、加里东运动、印支运动、早燕山运动等多次构造运动(湖南省地质调查院,

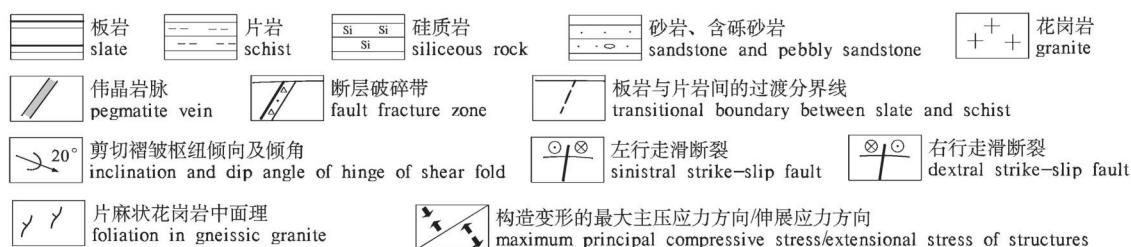
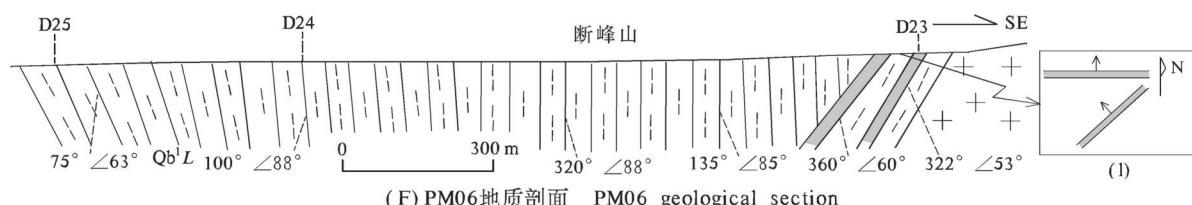
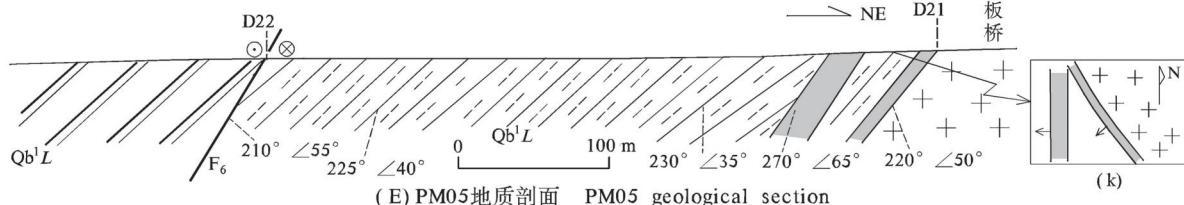
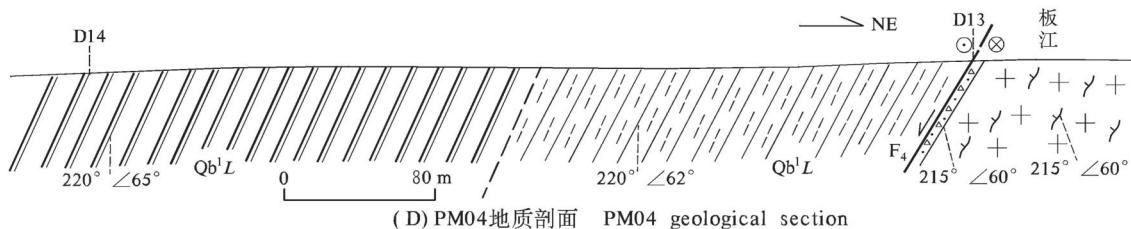
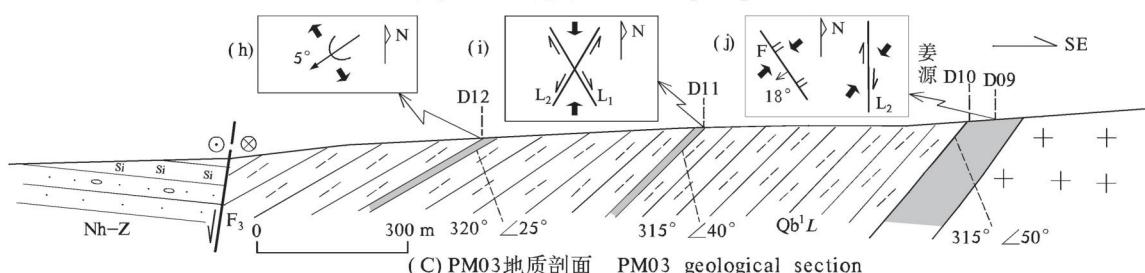
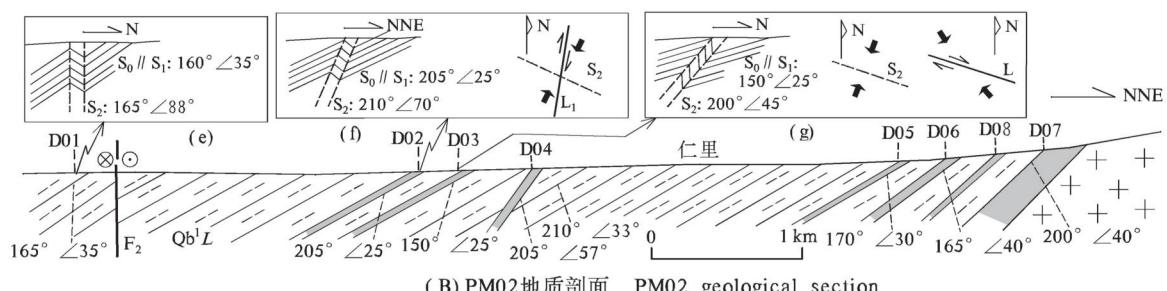
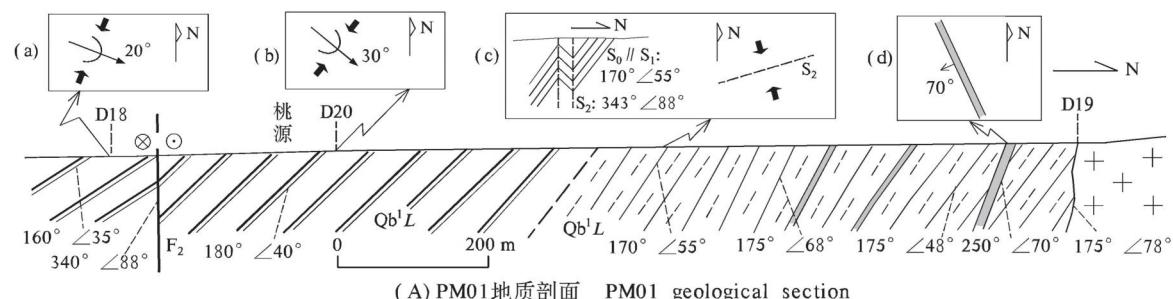


图2 幕阜山花岗岩体周缘观测地质剖面

Fig. 2 Measuring geological section around Mufushan granite

剖面位置见图1。(a) D18点板岩中剪切褶皱;(b) D20点板岩中剪切褶皱;(c) D19点片岩中 NEE 向膝折带和膝折面  $S_2$ ;(d) D19点片岩中 NNW 向伟晶岩脉;(e) D01 点 NEE 向膝折带及膝折面  $S_2$ ;(f) D02 点 NWW 向膝折面  $S_2$ ;(g) D03 点 NE 向劈理  $S_1$ 、NWW 向膝折面  $S_2$ ;(h) D12 点 NE 向伸展滑脱褶皱;(i) NNE 向左行剪切破裂和 NNW 向右行剪切破裂反映 SN 向主应力;(j) D09 点 NW 向逆断裂和 SN 向右行剪切破裂反映 NE 向—NNE 向最大主应力;(k) NW 向和 SN 向伟晶岩脉;(l) NE 向和 EW 向伟晶岩脉;Nh—Z—南华系—震旦系;Qb<sup>1</sup>L—青白口系冷家溪群;S<sub>0</sub>—层面;S<sub>1</sub>—板劈理;S<sub>2</sub>—膝折面;L—剪切破裂

Location of the sections are shown in Fig. 1. (a) shear folds in slate at D18; (b) shear folds in slate at D20; (c) NEE-trending kink zone and axial of kink  $S_2$  to the south of D19; (d) NNW-trending pegmatite vein in the schist at D19; (e) NEE-trending kink zone and axial of kink  $S_2$  at D01; (f) the NWW-trending axial of kink  $S_2$  at D02; (g) the NE-trending cleavages  $S_1$  and NWW-trending axial of kink  $S_2$  at D03; (h) the NE-trending extensional detachment folds at D12; (i) NNE-trending sinistral shear fractures and NNW-trending dextral shear fractures indicate SN compression; (j) NW-trending thrust fault and SN-trending dextral shear fractures indicate NE—NNE compression; (k) NW-trending and SN-trending pegmatite veins; (l) NE-trending and EW-trending pegmatite veins; Nh—Z—Nanhuan—Sinian System; Qb<sup>1</sup>L—Lengjiaxi Group of Qingbaikou System; S<sub>0</sub>—rock layer; S<sub>1</sub>—slaty cleavages; S<sub>2</sub>—axial of kink; L—shear fracture

2017),其中武陵运动造成了冷家溪群与板溪群或南华系之间的角度不整合;加里东运动造成了石炭系与志留系之间的平行不整合;印支运动造成了研究区北面赤壁—嘉鱼地区上三叠统—侏罗系与先期地层的角度不整合(柏道远等,2009a)。冷家溪群中的 NWW 向—EW 向紧闭褶皱(图 1 中未标示)、卷入板溪群—中三叠统的 NWW 向—NEE 向褶皱以及白垩纪—古近纪 NE 向断陷盆地组成区内基本构造格架。NW 向、NE 向、NEE 向断裂发育,断裂性质有走滑断裂、正断裂、逆断裂等。

区内岩浆岩相关的稀有金属矿产发育,并具有较明显的分带性,由岩体中心向外依次为:与云英岩化二云母花岗岩有关的铍矿床、与花岗岩内伟晶岩脉有关的铌钽铍多金属矿床以及与板岩内伟晶岩脉有关的锂铌钽多金属矿床(冷双梁等,2018)。此外,在幕阜山岩体西侧尚发育有桃林铅锌矿床(张鲲等,2012),岩体南缘发育栗山铅锌铜多金属矿床(郭飞等,2018,2020)等。

## 2 幕阜山岩体接触带代表性地质剖面特征

笔者针对幕阜山岩体南缘、南西缘和北缘的接触带及其外侧围岩进行了多条地质剖面的野外观测(图 1),根据观测结果并结合已有区域地质资料,厘定各剖面地质结构如图 2 所示。各剖面中地质现象及相关分析与认识,是探讨区域构造特征、地质演化过程以及伟晶岩形成和侵位的构造控制机制的重要基础。鉴此,本节对各剖面地质和构造特征分别予以介绍。在具体介绍剖面之前,就分析方法说明两点:①最大主应力方向的确定:褶皱、逆断裂和劈理

形成的最大主应力分别垂直其走向;根据 Anderson 断层模式以及前人实际观测,脆性剪切破裂或断裂形成的最大主压应力与裂面和擦痕夹角取 30°;膝折带形成的最大主压应力与膝折面夹角取 55°(郑亚东等,2007)。走滑、斜滑剪切破裂和断裂以及膝折带所形成的应力方位不易直接确定,通过赤平投影软件 strGraphPrj 手工操作求解(见后文图 3b、h,图 4a、b、d、f、m,图 6d、i);②剖面上构造和岩浆岩形成的构造背景,与研究区构造—岩浆演化过程之间为相互约束关系。因此,后文分析总结各剖面构造和岩浆岩形成构造背景的依据,既包括构造和岩石的交切关系,也包括区域构造—岩浆演化过程和主要构造事件的区域应力场特征。

### 2.1 桃源 PM01 地质剖面

本剖面位于幕阜山花岗岩体南缘东段(图 1),总体呈 SN 向,长约 1.5 km,剖面上观测、记录内容包括地层岩性及产状、断裂、褶皱、劈理、膝折带、伟晶岩脉产出特征、岩体与围岩接触面、围岩变质特征等(图 3a—i)。

剖面上主要出露冷家溪群,北端出露黑云母二长花岗岩(图 2A)。冷家溪群主要为板岩,顺层板劈理发育(图 3d);其北段因接触变质作用而形成宽约 600 m 的微晶片岩和角岩化板岩,自北而南变质程度减弱。岩层总体呈 EW 走向,倾向 S,倾角总体北陡南缓(图 2A);剖面南端岩层走向为 NEE 向,主要产状为 160°∠35°左右。岩体与围岩接触面陡倾并弯曲,总体产状为 175°∠78°左右(图 3e);接触带陡倾与较窄的热接触变质带相一致。

岩体南侧约 300 m 内的围岩中见多条宽 10~50 cm 的伟晶岩脉,大多顺层面产出(图 3f),个别沿

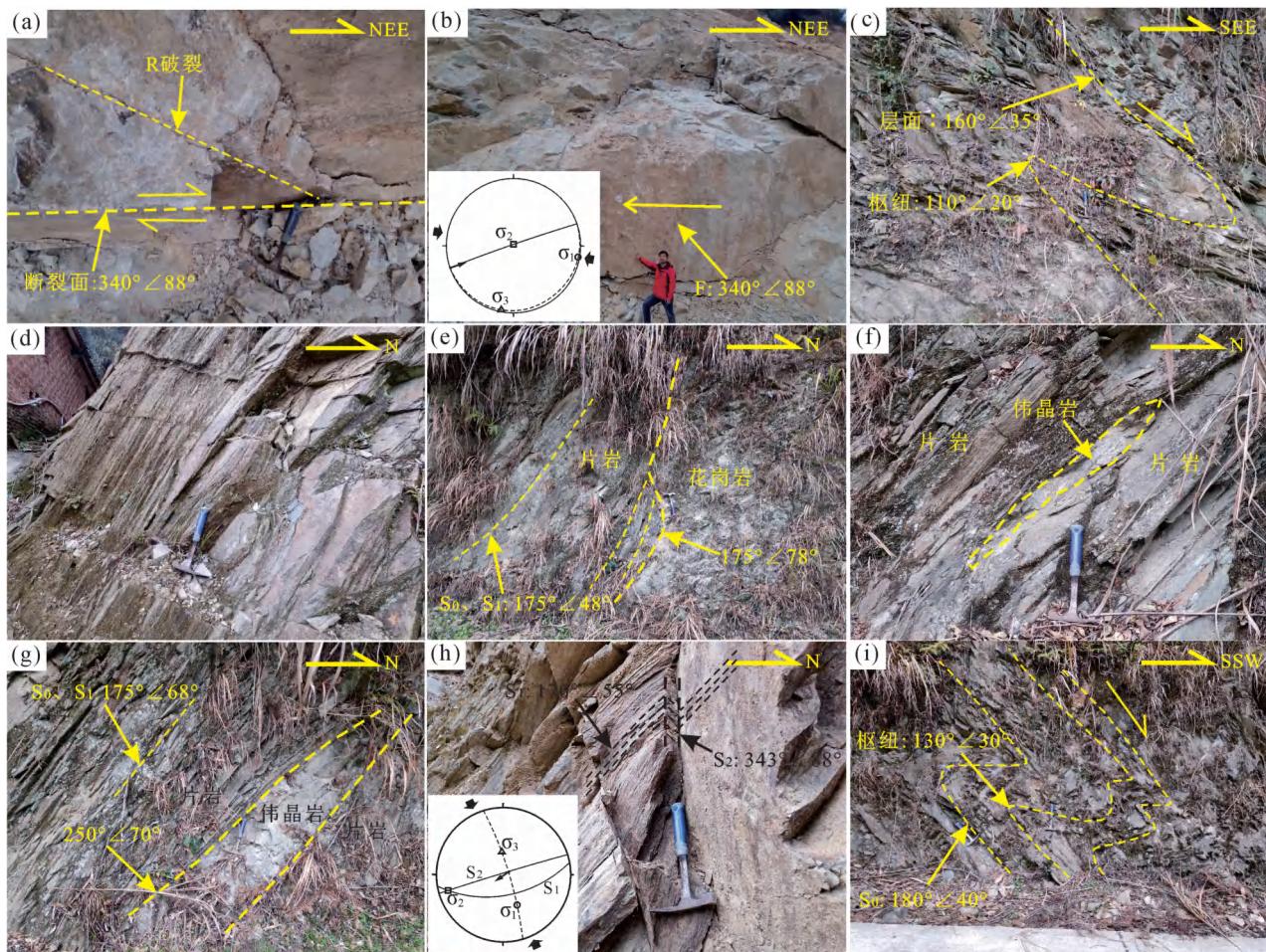


图 3 PM01 剖面(图 2A)上的地质现象

Fig. 3 The geological phenomena on PM01 section(Fig. 2A)

(a) D18 点羽裂示 NEE 向断裂右行走滑(俯视);(b) D18 点 NEE 向断裂带中裂面;(c) D18 点板岩中剪切褶皱;(d) D19 点片岩中劈理特征;(e) D19 点花岗岩与片岩接触关系;(f) D19 点片岩中顺层伟晶岩脉;(g) D19 点片岩中 NNW 向伟晶岩脉;(h) D19 点南面片岩中 NEE 向膝折带和膝折面  $S_2$ ;(i) D20 点剪切褶皱示上岩层向南运移

(a) the pinnate fractures at D18 indicate that the NEE-trending fault dextral strike-slip (overlook); (b) a fracture in the NEE-trending fault at D18; (c) shear folds in slate at D18; (d) cleavages in the schist at D19; (e) contact relationship between the granite and schist at D19; (f) bedding pegmatite vein in the schist at D19; (g) NNW-trending pegmatite vein in the schist at D19; (h) NEE-trending kink zone and axials of kink  $S_2$  to the south of D19; (i) the shear folds at D20 show that the upper stratum move to the south

NNW 向陡倾断裂或破裂侵入(图 2d, 图 3g)。

剖面上主要构造为 NEE 向桃源断裂  $F_2$ , 另见层间剪切褶皱和膝折构造(图 2a—c), 具体特征如下:① 桃源断裂表现为一宽 15 m 以上的硅化破碎带, 断裂产状  $340^\circ \angle 88^\circ$ , 羽裂指示右行走滑(图 3a), 反映 NWW 向最大主压应力(图 3b)。② 层间剪切褶皱见于 D18 点(图 2a, 图 3c) 和 D20 点(图 2b, 图 3i), 枢纽产状分别为  $110^\circ \angle 20^\circ$ 、 $130^\circ \angle 30^\circ$ , 褶皱形态均反映上岩层向 SW 滑移; 褶皱翼部的板劈理平行层面, 转折端劈理则垂直并切割层面, 反映褶皱和劈理分别形成于武陵运动的早期和晚期。③ 膝折

构造以顺层劈理为变形面(图 2c), 走向 NEE 向, 反映现方位倾向南的最大主压应力(图 3h)。

分析推断上述构造形成的地质背景如下:武陵运动早期 NNE 向挤压, 形成 NWW 向层间剪切褶皱, 晚期形成顺层板劈理; NNE 向挤压应力场与南邻万古—黄金洞一带一致(Zhou Yueqiang et al., 2021)。印支运动区域近 SN 向水平挤压, 形成膝折面向 S 倾的 EW 向膝折。中侏罗世晚期早燕山运动 NWW 向挤压, 形成 NEE 向右行走滑的桃源断裂。晚侏罗世幕阜山花岗岩侵位, 其挤压、顶托作用使南侧围岩整体向 S 掀斜, 导致岩层产状整体北陡南缓、

武陵期 NWW 向褶皱枢纽向 SE 倾斜、印支期 EW 向膝折反映的最大主压应力由最初的水平转为现今的向南倾斜;仁里一带岩浆向南运移拓展导致 EW 向膝折转为 NEE 向。

## 2.2 仁里 PM02 地质剖面

本剖面位于幕阜山花岗岩体南缘西段(图 1), 总体呈 NNE 向, 长约 7.5 km, 剖面上观测、记录内

容包括地层岩性及产状、剪切破裂(断裂)、劈理、膝折带、伟晶岩脉产出特征、围岩变质特征等(图 4a-o)。剖面上出露冷家溪群, 北端出露黑云母二长花岗岩(图 2B)。冷家溪群为一套云母片岩(图 4j), 北部靠近幕阜山岩体为细晶结构, 往南多为微晶结构; 岩石中顺层劈理和片理发育, 其中劈理连续性和剥离性很好, 而片理则为细微的片状构造。岩层走



图 4 PM02 剖面(图 2B)上的地质现象

Fig. 4 The geological phenomena on PM02 section(Fig. 2B)

(a) D01 点 NEE 向膝折带及膝折面  $S_2$ ; (b) D02 点伟晶岩脉被多组构造面所限; (c) D02 点层面与 SN 向剪切破裂  $L_1$  控制伟晶岩脉边界; (d) D02 点 NWW 向膝折面  $S_2$  控制伟晶岩脉边界; (e) D03 点 NWW 向直立破裂  $L$ 、顺层劈理  $S_1$  和膝折面  $S_2$  控制伟晶岩脉边界; (f) D03 点 NE 向劈理  $S_1$ 、NWW 向膝折面  $S_2$  和膝折枢纽; (g) D04 点伟晶岩脉顺逆断裂侵位; (h) D04 点 NWW 向南倾板劈理与 NWW 向北倾破裂  $L$  控制管状伟晶岩脉; (i) D05 点伟晶岩脉顺层产出; (j) D06 点伟晶岩脉下盘片岩特征; (k) D07 点伟晶岩脉上界面平行层面; (l) D07 点伟晶岩中片岩捕虏体; (m) D07 点正阶步示伟晶岩中 NE 向剪切破裂左行; (n) D08 点顺层产出的伟晶岩细脉; (o) D08 点顺层产出的透镜状伟晶岩脉

(a) the NEE-trending kink zone and axial of kink  $S_2$  at D01; (b) the pegmatite vein at D02 are limited by multiple structural foliations; (c) The boundary of the pegmatite vein at D02 is controlled by stratum layers and SN-trending shear fracture  $L_1$ ; (d) boundary of the pegmatite vein is controlled by the NWW-trending axial of kink  $S_2$  at D02; (e) boundary of the pegmatite vein at D03 is controlled by NWW-trending vertical fracture  $L$ , bedding cleavages  $S_1$  and axial of kink  $S_2$ ; (f) the NE-trending cleavages  $S_1$  and NWW-trending axial of kink  $S_2$  at D03; (g) the pegmatite vein at D04 was emplaced along the thrust fault; (h) the tubular pegmatite veins at D04 are controlled by NWW-trending south-dip slaty cleavages and NWW-trending north-dip fractures  $L$ ; (i) the pegmatite vein at D05 occurs along the strata; (j) schist under the pegmatite vein at D06; (k) the upper boundary of pegmatite vein is parallel to the stratum layers at D07; (l) schist xenoliths in the pegmatite at D07; (m) the steps at D07 indicate that NE-trending shear fracture sinistral strike-slip; (n) the bedding pegmatite veins at D08; (o) the lenticular pegmatite vein at D08 produced in bedding

向主要为 NWW 向—EW 向, 向南缓倾。剖面上围岩地层与花岗岩之间为伟晶岩脉(仁里 7 号脉), 伟晶岩与地层之间接触面产状为  $200^\circ \angle 40^\circ$ 。幕阜山岩体南面发育宽达 7 km 的热接触变质带(图 1); 电磁测深剖面和钻探揭示剖面下部发育顶面埋深 100~500 m 的隐伏花岗岩(李鹏等, 2020; 曹创华等, 2021), 表明剖面下部存在埋深不大、顶面总体向南缓倾的隐伏花岗岩体。值得指出的是, 从青白口纪英云闪长岩出露情况来看(图 1), 剖面南段的热接触变质除受燕山期岩浆活动(李鹏等, 2020)影响外, 与青白口纪岩浆活动可能也有一定关系。

剖面上发育大量规模不一的伟晶岩脉, 前人获得的伟晶岩中锆石 U-Pb 年龄(陈剑锋等, 2021)、锂云母<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 年龄(李鹏等, 2019b)、辉钼矿 Re-Os 年龄(周芳春等, 2020)、铌钽铁矿 U-Pb 年龄(Li Peng et al., 2020)以及寄主岩中锆石 U-Pb 年龄(Li Peng et al., 2020), 反映伟晶岩成岩年龄为 141~125 Ma, 属早白垩世早期。控制脉体边界的构造类型见以下几种: ① 层面或顺层剪切面, 如 D05 点发育宽 1.2 m 的顺层伟晶岩脉(图 4i); D07 点伟晶岩脉顶部与片岩的分界面平行于层面和顺层劈理(图 4k), 伟晶岩中见较多沿层面和顺层劈理剥离的狭长片岩捕虏体(图 4l); D08 点见沿层面和顺层劈理面发育的似层状伟晶岩细脉(图 4n)和透镜状伟晶岩(图 4o)。其中 D08 点所见似层状和透镜状伟晶岩位于宽 20 m 以上的 V204 脉的旁侧, 且脉体未见受力变形特征, 说明其形成于小股岩浆顺层的贯入和拓展, 而非后期挤压形成的构造透镜体。② 不同

产状的切层断裂或破裂, 如 D02 点 SN 向右行剪切破裂  $L_1$ (图 4b、图 4c)、D03 点 NWW 向直立破裂  $L$ (图 4e)、D04 点与层面小角度交切的 NWW 向逆断裂(图 4g)等均构成了伟晶岩的边界; D04 点于 NWW 向南倾劈理和 NWW 向北倾破裂交汇部位形成多个管状伟晶岩脉, 切面上显示为矩形和不规则状(图 4h)。③ 膝折面, 如 D02 点 NWW 向南倾膝折面  $S_2$ (图 4b)、D03 点 NWW 向南倾膝折面  $S_2$ (图 4f)均为伟晶岩脉的局部边界。④ 岩体接触带, 如 D07 点所见仁里 7 号伟晶岩脉发育于花岗岩与围岩地层之间(图 2B), 显示脉体受接触带与层面(或层间剪切面)的联合控制。

值得指出的是, 包括本剖面在内的研究区内, 与层面平行的伟晶岩脉可能沿层面侵入, 也可能沿层间剪切面贯入, 但受发育规模、变质作用叠加和脉体充填等影响, 层间剪切面与层面一般难以区分。

剖面上见以下代表性露头尺度构造: ① NWW 向逆断裂, 见于 D04 点, 顺断裂充填伟晶岩脉; 断裂产状  $205^\circ \angle 57^\circ$ , 次级破裂 R' 指示断裂具逆冲性质(图 4g)。② 膝折带, 于 D01 点、D02 点和 D03 点见及(图 2e—g), 均以顺层劈理为变形面, 其中 D01 点膝折面直立(图 2e), 反映近 SN 向(NNW 向)挤压(图 4a); D02 点(图 2f, 图 4d) 和 D03 点(图 2g, 图 4f)膝折面走向 NWW, 倾向 S, 反映现方位 NNE 向挤压。③ SN 向右行剪切破裂, 见于 D02 点, 正阶步指示右行, 反映现方位 NNE 向挤压应力方向(图 2f, 图 4b); 见破裂西盘因后期伟晶岩浆的侵位挤压而西移(图 4c)。④ NWW 向直立破裂, 见于 D03 点

(图 2g), 产状为  $200^{\circ} \angle 80^{\circ}$ , 其切割 NWW 向膝折面, 牵引效应显示右行走滑特征, 构成伟晶岩脉的局部边界(图 4e)。⑤ NE 向左行剪切破裂, 见于 D07 点伟晶岩中, 正阶步指示左行走滑, 反映 NNE 向最大主压应力(图 4m)。

根据构造和岩石的交切关系, 结合区域构造演化过程、幕阜山岩体南西端侵位构造特征以及桃源 PM01 剖面上膝折带走向, 推断 PM02 剖面上构造和岩浆岩形成背景如下: 武陵运动形成顺层板劈理及层间剪切面(带)。印支运动 SN 向挤压, 形成 EW 向逆断裂(D04)、以劈理为变形面的 EW 向膝折带(D01、D02、D03 点)(现方位 NWW 向)、NNW 向右行剪切破裂(D02 点)(现方位 SN 向)(图 5a)。

中侏罗世后期早燕山运动 NWW 向挤压, 形成切割先期 EW 向膝折面的近 EW 向右行剪切破裂(D03 点)(现方位 NWW 向)。晚侏罗世—早白垩世幕阜山岩体侵位, 仁里一带岩浆向南运移拓展而形成向南突出的舌状体(图 1), 使舌状体西翼围岩产生顺时针旋转, 导致 D04 点的 EW 向逆断裂、D02 点和 D03 点的 EW 向膝折带转为 NWW 向, D02 点的 NNW 向右行剪切破裂转为 SN 向, D03 点的近 EW 向右行剪切破裂转为 NWW 向; 舌状体东翼逆时针旋转, 导致桃源一带 EW 向膝折转为 NEE 向(图 5b)。岩体侵位使围岩发生热接触变质作用并形成细微片理。岩浆活动晚期花岗质伟晶岩侵位, 先期形成的岩层面、层间剪切面、逆断裂、膝折面、走滑剪切破裂等成为岩浆运移通道并限制岩脉边界。古近纪中晚期区域 NNE 向挤压, 于伟晶岩中形成

NE 向左行剪切破裂。

### 2.3 姜源 PM03 地质剖面

本剖面位于幕阜山岩体西南缘舌状体的北西侧(图 1), 呈 NW 向, 长约 2.2 km, 剖面上观测、记录内容包括地层岩性及产状、断裂、破裂、褶皱、劈理、伟晶岩脉产出特征、围岩变质特征等(图 6a—k)。

剖面上自东向西依次为幕阜山岩体的黑云母二长花岗岩、伟晶岩、新元古界冷家溪群片岩、南华系—震旦系碎屑岩和硅质岩(图 2C)。冷家溪群片岩中顺层板劈理发育(图 6g), 劈理面倾向 NW, 倾角  $25^{\circ} \sim 50^{\circ}$ , 自南东往北西产状逐渐变缓, 暗示岩层倾斜与南东侧的花岗岩侵位顶托有关。宽约 1.5 km 的冷家溪群均具接触变质, 自南东往北西变质程度逐渐降低, 云母矿物逐渐变细, 暗示发育顶面向 NW 缓倾的隐伏花岗岩体。

剖面上见较多宽窄不一的伟晶岩脉(图 2C), 岩脉大多顺层面或层间剪裂面产出(图 6e、f、h、j), 并见 NNW 向剪切破裂控制脉体延伸(图 6h)、NNE 向剪切破裂控制岩脉的局部边界(图 6j)。

冷家溪群与花岗岩体之间的伟晶岩脉宽达 120 m 以上, D09 点因宅基地开挖而见 EW 向长近 30 m 的伟晶岩新鲜露头剖面。剖面上伟晶岩中含多个条片状花岗质片麻岩捕虏体(图 6a), 捕虏体产状与内部面理产状相近, 为  $300^{\circ} \angle 15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ , 暗示存在平行于面理的剪切裂面。剖面西端伟晶岩中尚见较多细粒白云母花岗岩碎块即捕虏体(图 6b)。

剖面上所见代表性露头尺度构造有: ① NNE 向左行剪切破裂(图 6i) 和 NNW 向右行剪切破裂, 二

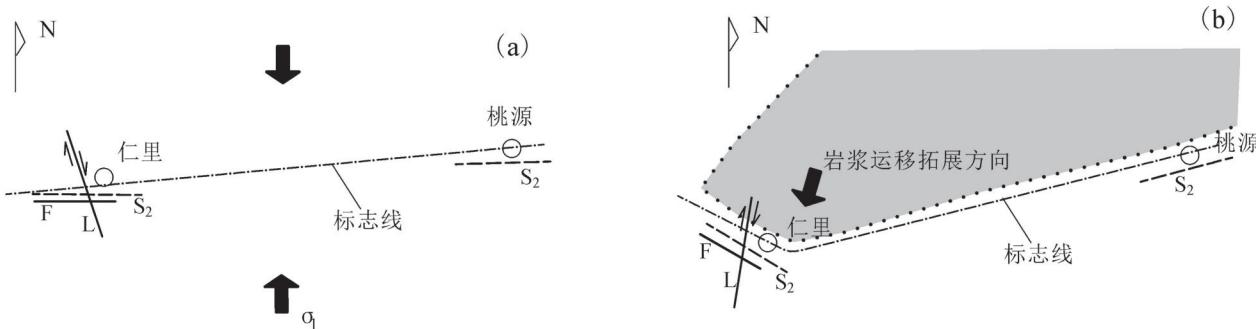


图 5 幕阜山花岗岩体侵位导致构造面走向变位示意图

Fig. 5 Schematic diagram of structural surfaces displacement caused by Mufushan granite emplacement

(a) 印支运动 SN 向挤压形成 EW 向膝折带和 NNW 向右行剪切破裂; (b) 燕山期岩浆侵位导致围岩整体旋转而使先期膝折带和剪切破裂变位。L—剪切破裂; F—逆断裂; S<sub>2</sub>—膝折带之膝折面

(a) the Indosian SN-compression resulted in EW-trending kinks and NNW-trending dextral shear fractures; (b) the Yanshanian magma emplacement led to the overall rotation of the wall rock and the displacement of the formal kinks and shear fractures. L—shear fracture; F—thrust fault; S<sub>2</sub>—axial of kink



图 6 PM03、PM04 剖面(图 2C,D)及南江 D16 点地质现象

Fig. 6 The geological phenomena on PM03 and PM04 section(Fig. 2C,D), and at D16 of Nanjiang

(a) D09 点伟晶岩中花岗质片麻岩捕虏体; (b) D09 点伟晶岩中细粒白云母花岗岩捕虏团块; (c) D09 点 NW 向逆断裂切错 NNW 向伟晶岩细脉; (d) D09 点正阶步示 SN 向破裂右行剪切; (e) D10 点伟晶岩与片岩界面平行于层面; (f) D10 点片岩中顺劈理发育的伟晶岩细脉; (g) D11 点片岩中顺层板劈理; (h) D11 点伟晶岩脉顺层产出并受 NNW 向剪切破裂限制; (i) D11 点北西面正阶步示 NNE 向破裂左行剪切; (j) D12 点伟晶岩受层面和 NNE 向破裂控制; (k) D12 点 NE 向伸展滑脱褶皱; (l) D13 点片麻状花岗岩与片岩界线; (m) D13 点正阶步示 NW 向断裂左行走滑; (n) D13 点片麻状花岗岩中 NW 向面理; (o) D16 点张裂脉示 NE 向断裂早期左行走滑; (p) D16 点正阶步示 NE 向断裂后期正滑

(a) the granitic gneiss xenoliths at D09 in pegmatite; (b) the fine grained muscovite granite xenolith block at D09 in pegmatite; (c) the NW-trending thrust fault at D09 cuts off NNW-trending pegmatite veinlets; (d) the steps at D09 indicate that the SN-trending fracture dextral shear; (e) the interface between pegmatite and schist at D10 is parallel to the stratum layer; (f) the pegmatite veinlets at D10 developed along cleavage in schist; (g) the bedding cleavages in schist at D11; (h) the pegmatite vein at D11 occurs along the strata and is limited by NNW-trending shear fracture; (i) The steps to the northwest of D11 indicate that NNE-trending fracture sinistral shear; (j) the pegmatite at D12 is controlled by stratum layer and NNE-trending fracture; (k) the NE-trending extensional detachment folds at D12; (l) the boundary between gneissic granite and schist at D13; (m) steps indicate that the NW-trending fault at D13 sinistral strike-slip; (n) the NW-trending foliation at D13 in gneissic granite; (o) the extensional vein at D16 indicates that the NE-trending fault sinistral strike-slip in the early stage; (p) the steps at D16 indicate that the NE-trending fault normal slid in the late stage

者构成共轭剪裂,反映SN向主压应力(图2i);两组剪裂均可成为伟晶岩脉的侵位构造(图6c,h,j)。②NE走向的伸展滑脱褶皱(图2h,图6k)。③D09点上发育NW向缓倾逆断裂和SN向右行剪切破裂,反映NE向—NNE向最大主压应力(图2j)。其中NW向逆断裂切割花岗质片麻岩并切错NNW向伟晶岩细脉(图6c);SN向剪切破裂位于伟晶岩中,正阶步指示右行走滑(图6d)。

剖面西端跨NE向上洲断裂F<sub>3</sub>(图2C),因覆盖而未见断裂露头,但邻侧地表露头及区域地质状况显示断裂经历过左行走滑和伸展活动:①于南江镇南面见该断裂露头,表现为宽25~30 m的NE向硅化破碎带,产状为300°~310°∠75°~85°;S—C组构及派生张裂脉指示断裂早期具左行走滑(图6o),反映近SN向最大主应力;擦痕及正阶步反映断裂晚期正滑活动(图6p)。②断裂北西侧发育白垩纪—古近纪残余断陷盆地(图1),反映断裂的伸展活动。

根据上述观测资料及区域地质背景,分析推断剖面上构造和岩浆岩形成背景如下:武陵运动形成顺层板劈理及层间剪切面。印支运动SN向挤压,形成NE向左行走滑的上洲断裂、NNE向左行和NNW向右行剪切破裂。晚侏罗世—早白垩世发生岩浆活动,上洲断裂控制了花岗岩体的NW边界,先期层面和层间剪切面(带)、NNE向和NNW向剪切破裂等控制伟晶岩侵位。白垩纪—古近纪区域伸展,上洲断裂产生正断活动。古近纪中晚期区域NE向—NNE向挤压,形成切割伟晶岩的NW向缓倾逆断裂和SN向右行剪切破裂。

## 2.4 板江PM04地质剖面

本剖面位于幕阜山岩体西南缘中段(图1),呈NE向,长约600 m(图2D),剖面上观测、记录内容包括地层岩性及产状、花岗岩特征、断裂、破裂、岩体与围岩接触面、围岩变质特征等(图6l—n)。剖面NE端为片麻状花岗岩(图6n),岩石中叶理产状为215°∠60°,与接触带走向一致,暗示叶理与岩体侵位挤压有关。剖面主体出露冷家溪群板岩、粉砂质板岩,岩层产状为220°∠62°左右。靠近岩体约200 m范围内因热接触变质而形成微晶片岩,窄的变质带暗示接触带向下陡倾延伸。围岩地层中未见伟晶岩脉发育。

花岗岩与冷家溪群的接触带继承NW向板江断裂F<sub>4</sub>发育(图1),界面之上发育宽3 m左右的断裂带,带内岩石较破碎,次级剪切破裂发育(图6l)。

断裂产状为215°∠60°,正阶步指示左行走滑(图6m),反映近EW向最大主应力,可能与中侏罗世早燕山运动有关。

## 2.5 板桥PM05地质剖面

本剖面位于幕阜山岩体西南缘北段(图1),呈NE向,长约530 m。剖面NE端为二云母二长花岗岩,往南均为冷家溪群。冷家溪群主要为板岩,靠近花岗岩体约500 m范围内变质为片岩、角岩化板岩,变质程度自岩体往外渐低。地层走向NW,产状一般227°∠38°左右(图2E)。

冷家溪群与花岗岩体分界处见NW向伟晶岩脉和SN向伟晶岩脉(图2k)。NW向伟晶岩脉宽约12 m,其与花岗岩之间的界面产状为220°∠50°(图7a),与围岩之间界面平行于层面(图7b),显示伟晶岩受接触带和层面(或层间剪切面)联合控制。SN向伟晶岩脉宽达20 m,其沿片岩中的SN向剪切破裂侵位(图7c);伟晶岩中尚见SN向片岩夹块(图7d)。

见NW向板桥断裂F<sub>6</sub>露头,表现一宽5 m以上的硅化断裂破裂带。断裂产状为210°∠55°,正阶步和羽裂指示左行走滑(图7e),可能与早燕山运动近EW向挤压有关。

## 2.6 断峰山PM06地质剖面

本剖面位于幕阜山岩体北缘(图1),呈NW向,长约2 km。剖面南端为二云母二长花岗岩,往北均为片岩(图2F),系冷家溪群板岩热接触变质产物。片岩中顺层劈理发育,劈理产状陡倾至直立,走向有NE向和近SN向(图2F),应与后期构造叠加有关,但具体成因有待研究。

剖面南段靠近花岗岩体发育NE向和EW向伟晶岩脉(图2l)。NE向伟晶岩脉位于D23点,顺层产出,产状为322°∠53°(图7f)。EW向伟晶岩脉见于D23点北西约40 m的采场中,出露2~3条。岩脉明显受EW向断裂控制(图7g),脉体边界产状主要为360°∠60°左右,局部边界不规则(图7h)。脉宽2 m左右,局部宽达6 m以上。脉体旁侧次级剪裂面上阶步指示EW向断裂具逆冲性质,可能形成于印支运动SN向挤压。

剖面及区域地质资料表明,断峰山北面接触变质带宽度可达5 km(图1),暗示冷家溪群之下存在顶面总体向NE缓倾的隐伏花岗岩体。

顺便指出,剖面上冷家溪群往南西呈—NE向夹块延入幕阜山岩体中(图1),在大界村353国道边见(D27点)于片岩中见近顺层伟晶岩脉(图7i)。

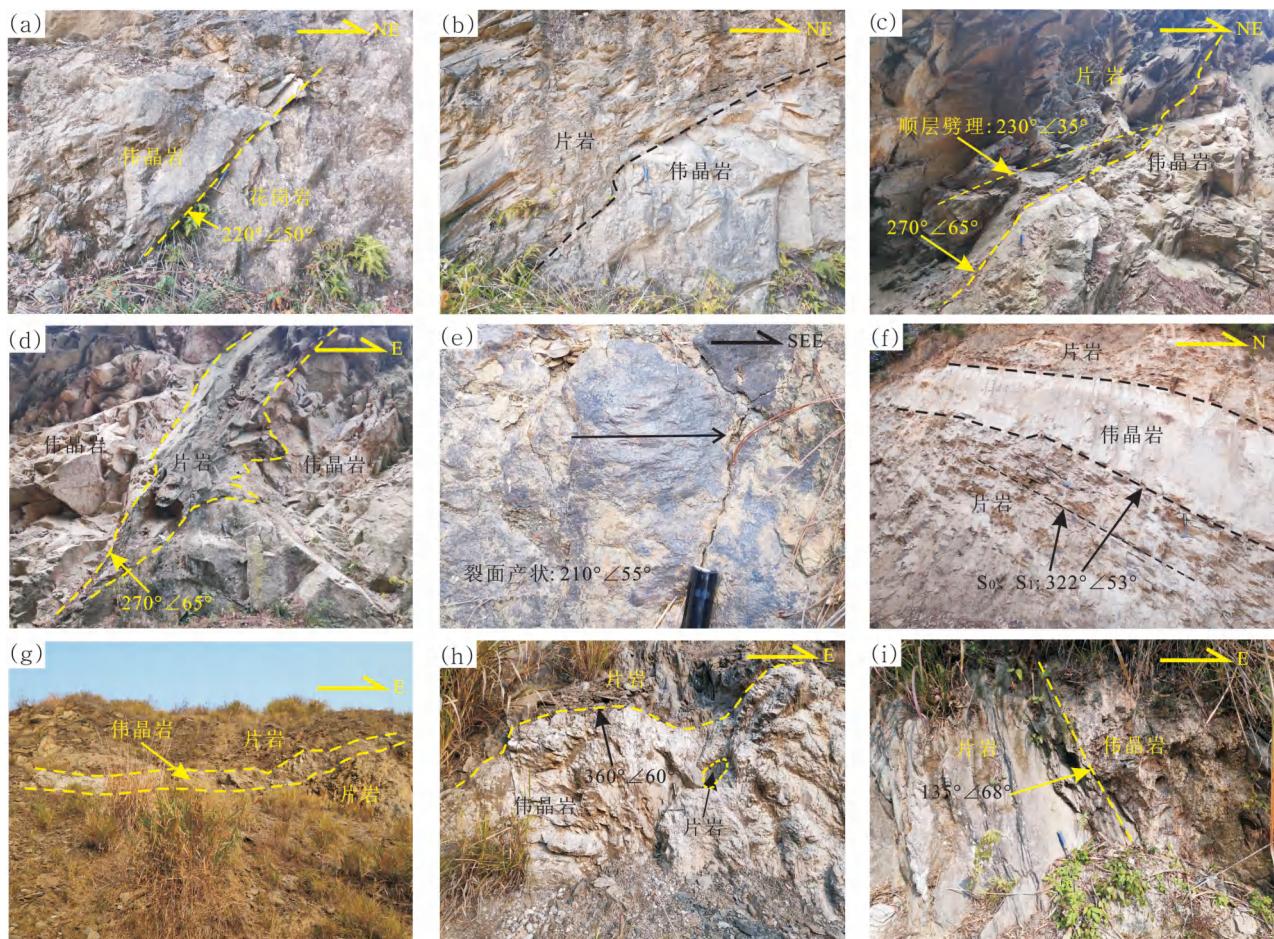


图 7 PM05、PM06 剖面(图 2E,F)及 D27 点地质现象

Fig. 7 The geological phenomena on PM05 and PM06 section(Fig. 2E, F), and at D27

(a) D21 点花岗岩与 NW 向伟晶岩脉接触界面; (b) D21 点 NW 向伟晶岩脉与片岩分界面平行于层面; (c) D21 点 SN 向伟晶岩脉与片岩分界; (d) D21 点 SN 向伟晶岩脉中片岩夹块; (e) D22 点羽裂和正阶步示 NW 向板桥断裂左行走滑; (f) D23 点片岩中 NW 向顺层伟晶岩脉; (g) D23 点充填于断裂中的 EW 向伟晶岩脉; (h) D23 点 EW 向伟晶岩脉边界特征; (i) D27 点片岩中近顺层伟晶岩脉(大界村)

(a) contact interface between the granite and NW-trending pegmatite vein at D21; (b) the boundary between NW-trending pegmatite vein and schist at D21 are parallel to the stratum layer; (c) the boundary between SN-trending pegmatite vein and schist at D21; (d) schist block in the SN-trending pegmatite vein at D21; (e) pinnate fractures and steps at D22 indicate that the NW-trending Banqiao fault sinistral strike-slip; (f) the NW-trending bedding pegmatite vein at D23 in schist; (g) the EW-trending pegmatite vein at D23 filled in fault; (h) the boundary of the EW-trending bedding pegmatite vein at D23; (i) the bedding pegmatite vein at D27 in schist (Dajiecun)

### 3 中生代—新生代早期构造—岩浆演化过程

根据地层、岩浆岩、变质岩、构造、矿产等地质记录,以及笔者等调查资料和前人研究成果,分析总结并厘定中生代—新生代早期区域构造演化过程如表 1 所示,自早至晚可分为早—中三叠世海相盆地、中三叠世后期—晚三叠世印支运动、晚三叠世晚期—中侏罗世早期类前陆盆地、中侏罗世晚期早燕山运动、晚侏罗世—早白垩世早期花岗质岩浆活动与成矿、早白垩世晚期—古近纪中期区域伸展与断陷盆

地、古近纪中晚期 NE 向挤压等 7 个构造阶段。上述地质事件总体为连续演化过程,其地质作用特征的转变主要与区域板块构造格局和深部构造—岩浆作用有关。

#### 3.1 早—中三叠世海相盆地

早—中三叠世早期继承晚古生代地质演化过程,研究区为陆表海盆地(湖南省地质调查院,2017),自早至晚形成了大冶组灰色薄层泥晶灰岩、页岩,嘉陵江组灰—浅灰色厚层云岩、灰质云岩和云质灰岩。相关沉积仅于北西部塘角一带有保留(图 1)。

### 3.2 中三叠世后期—晚三叠世印支运动

印支运动具区域SN向挤压构造体制(柏道远等,2018),形成了EW向褶皱如临湘向斜 $f_1$ 、白果树背斜 $f_2$ 、塘角向斜 $f_3$ 、岭背向斜 $f_4$ (图1),NE向左行走滑断裂如上洲断裂 $F_3$ (图1,图2C,图6o),NNE向左行剪切破裂(图6i)和NNW向右行剪切破裂(图2i,图4b)、EW向膝折带(图3h,图4a,图4d,图4f)、EW向逆断裂(图4g)等,其中EW向褶皱走向因后期构造叠加已发生偏转,仁里一带的EW向膝折带和逆断裂、NNW向右行剪切破裂的走向因燕山期岩浆侵位而分别转为NWW向、NS向(图5)。本期变形的构造背景为中三叠世晚期秦岭—大别—苏鲁构造带碰撞造山(张岳桥等,2009;徐先兵等,2009)和晚三叠世特提斯构造域(张岳桥等,2009;Shu Liangshu et al., 2009, 2021),可能与扬子及其以南各地块向北运移并与中朝板块碰撞(万天丰等,2002)有关。

值得指出的是,中三叠世后期尚存在扬子陆块与华夏古陆的继发性陆内汇聚(柏道远等,2009b;张国伟等,2011),其构造体制为NWW向—NW向挤压,其形成了湘东南地区NNE向、湘中地区NE向为主的褶皱(柏道远等,2005,2006,2009b,2012,2018,2021c;张国伟等,2011)。但研究区所在的湘北地区靠近秦岭—大别—苏鲁构造带,受NW向挤压体制的影响较小。

### 3.3 晚三叠世晚期—早侏罗世类前陆盆地

继印支运动之后,该阶段研究区为抬升山地环境而处于隆升剥蚀状态,北邻赤壁—嘉鱼一带则形成挤压类前陆盆地(柏道远等,2009a),相继形成了晚三叠世九里岗组、早侏罗世龙王滩组和花家湖组的陆相含煤碎屑沉积。

### 3.4 中侏罗世晚期早燕山运动

中侏罗世晚期早燕山运动中研究区具区域NWW向—EW向挤压构造体制,形成了NEE向右行走滑断裂如桃源断裂 $F_2$ (图1,图2A,图3a,图3b),NW向左行走滑断裂如板江断裂 $F_4$ (图1,图2D,图6m)、板桥断裂 $F_6$ (图1,图2E,图7e),EW向右行剪切破裂(图2g,图4e)(仁里PM02剖面D03点,经后期旋转后现方位为NWW向)等。此外,岩体北侧、北东侧的褶皱走向由EW向偏转为NEE向(图1),很可能与本次构造运动中NW向断裂的左行走滑有关。本期变形与古太平洋板块(或伊邪那岐板块)的俯冲有关(舒良树等,2002,2004;Li Zhengxiang et al., 2007;徐先兵等,2009;张岳桥等,2009;Chu

Yang et al., 2019)。值得指出的是,早燕山运动中大规模的断裂剪切生热,应是之后燕山期花岗质岩浆活动的重要诱因之一。

### 3.5 晚侏罗世—早白垩世早期花岗质岩浆活动与成矿

晚侏罗世—早白垩世早期研究区发生大规模花岗质岩浆活动,幕阜山复式岩体相继侵位(李鹏等,2021)。岩浆活动晚期形成了大量伟晶岩脉(体)及伟晶岩型稀有金属矿床,年龄数据介于141~125 Ma(李鹏等,2019b;周芳春等,2020;Li Peng et al., 2020;姜鹏飞等,2021;陈剑锋等,2021);桃林铅锌矿和栗山铅锌矿大约也于同期形成。岩体侵位于冷家溪群围岩中形成了强弱和宽窄不一的接触变质带,区域重力分析表明岩体位于上地壳上部(杨文采,2018)。本次岩浆事件与印支—早燕山陆内造山之后的伸展减薄(李鹏春等,2005;李鹏等,2017,2020;刘翔等,2018)或古太平洋板块(或伊邪那岐板块)俯冲后崩塌(Li Zhengxiang et al., 2007;许德如等,2017a,b;郭飞等,2020;柏道远等,2020a,2021d,2022)有关。

本次岩浆活动形成于区域伸展环境,巨量岩浆的向上侵位和横向上的空间拓展造成了不同的构造效应。岩浆向上侵位过程中,印支运动和早燕山运动中形成的NE向、NW向和NEE向走滑断裂常构成岩体的边界,导致岩体一侧的断盘相对抬升,而围岩一侧的断盘则相对下降。岩浆主动上侵还导致岩体边缘围岩向外掀斜,如岩体南部桃源一带武陵期NW向剪切褶皱的枢纽即因此向SE倾斜(图2a、b)。岩浆在横向上的空间拓展,使围岩块体发生水平方向的整体挤压变形,如受岩体就位挤压影响,EW向临湘向斜 $f_1$ 的东段走向偏转为NEE向,而新开向斜 $f_6$ 的走向自西向东由NW向渐转为NNW向(图1);仁里一带岩浆向南运移拓展导致印支期形成的EW向逆断裂和膝折带转为NWW向,印支期NNW向右行剪切破裂转为SN向(图5b),早燕山期近EW向右行剪切破裂转为NWW向。此外,尽管岩体总体形成于伸展构造环境,但当岩浆拓展速率大于区域伸展速率时即对岩体边部造成较强的挤压,从而于部分地段花岗岩中形成片麻状结构。

低温热年代学研究表明,幕阜山岩体区自晚白垩世以来因隆升而发生了平均4800 m的剥蚀(石红才等,2013)。因此,岩体上侵引起的构造抬升与大幅剥蚀,对伟晶岩和稀有金属矿床的类型、保存和埋深具有重要控制作用。

表 1 幕阜山岩体及外围中生代—新生代早期构造演化阶段

Table 1 The tectonic evolution stages of Mesozoic—early Cenozoic in Mufushan granite body and its periphery

地质时代	构造阶段	构造体制	沉积建造	岩浆岩	变质作用	构造变形	与成矿关系
E <sub>2</sub> —E <sub>3</sub>	喜马拉雅运动	NE—NNE 向挤压				切割伟晶岩脉的 NE 向左行剪切破裂、SN 向右行剪切破裂、NW 向逆断裂	
K <sub>1</sub> —E <sub>2</sub>	伸展与断陷盆地	NW—SE 向伸展	陆相红色碎屑沉积			NE 向和 NW 向正断裂；断陷盆地；伸展滑脱褶皱	抬升剥蚀影响矿床保存
J <sub>3</sub> —K <sub>1</sub> 早期	花岗质岩浆	区域伸展，岩浆侵位挤压、牵引		多次侵入花岗岩	岩体围岩中热接触变质	花岗岩中片麻状构造；使区域褶皱走向偏转；仁里一带先期构造走向发生顺时针旋转	形成稀有金属矿床、铅锌矿床
J <sub>2</sub> 晚期	早燕山运动	NWW—EW 向挤压				NW 向左行走滑断裂、NEE 向右行走滑断裂、EW 向右行剪切破裂	
T <sub>3</sub> —J <sub>2</sub> 早期	类前陆盆地发育	弱挤压(?)	邻区陆相盆地碎屑沉积				
T <sub>2</sub> 后期—T <sub>3</sub>	印支运动	SN 向挤压	邻区陆相盆地碎屑沉积			EW 向褶皱、逆断裂、膝折带；NE 向左行走滑断裂；NNE 向左行和NNW 向右行剪切破裂	
T <sub>1</sub> —T <sub>2</sub>	海相盆地发育	弱伸展	灰岩、云岩、泥灰岩、页岩				

### 3.6 早白垩世晚期—古近纪中期区域伸展与断陷盆地

早白垩世晚期—古近纪中期为区域伸展构造环境(柏道远等, 2015, 2020b), 先期 NE 向和 NW 向走滑断裂常转变为正断裂, 如王家里断裂 F<sub>1</sub>、上洲断裂 F<sub>3</sub>(图 6p)、公田断裂 F<sub>7</sub> 和白洋田断裂 F<sub>8</sub>(柏道远等, 2010)、余家断裂 F<sub>9</sub>、木金断裂 F<sub>19</sub> 等; 断裂下盘抬升遭受剥蚀, 上盘则下降而形成以 NE 向为主的断陷盆地并接受沉积(图 1)。与此同时, 幕阜山岩体区整体抬升遭受剥蚀, 古近纪时已有花岗岩剥露出地表, 洞庭盆地湘阴凹陷中古近系即以花岗质砾、砂为主(柏道远等, 2010)。此外, 露头所见伸展滑脱褶皱(图 2h, 图 6k)也大体形成于本期事件。关于本期变形的动力机制存在区域 NE 向挤压诱发 NW 向伸展(万天丰等, 2002)、岩石圈伸展(Lin Wei et al., 2018)、岩石圈俯冲+基性岩浆底侵(Zhou Xinmin et al., 2006)、俯冲回撤(Uyeda et al., 1979)、弧后伸展(Watson et al., 1987; Lapierre et al., 1997; Ren Jianye et al., 2002)等多种观点。

显然, 岩体区(包括部分近侧围岩)在本阶段的抬升剥蚀, 对伟晶岩和稀有金属矿床的保存现状起到了重要的控制作用。

### 3.7 古近纪中晚期 NE 向挤压

古近纪中晚期(E<sub>2</sub>—E<sub>3</sub>)喜马拉雅运动早幕发动, 区域构造体制为 NE 向—NNE 挤压(柏道远等, 2015), 形成了区内切割伟晶岩脉的 NE 向左行剪切

破裂(图 4m)、NW 向逆断裂(图 2j、图 6c)、SN 向右行剪切破裂(图 2j、图 6d)等。本期变形与印度板块与亚洲大陆碰撞有关(张进等, 2010; 张岳桥等, 2012)。

### 4 断裂对幕阜山花岗岩体边界的控制

幕阜山地区花岗伟晶岩为花岗岩的分异演化产物(李鹏等, 2017; 陈剑锋等, 2021; 姜鹏飞等, 2021), 围岩中伟晶岩的空间分布直接受花岗岩体边界及侵位接触构造的控制(见后文), 而断裂又是控制研究区岩体边界和侵位接触构造类型的关键因素。鉴此, 本节就断裂对岩体边界的控制给予分析和阐释。

断裂对幕阜山花岗岩体边界的控制作用在平面地质图上已得到明确反映(图 1)。为了更直观表达断裂控岩和接触带构造特征, 根据本次构造剖面调查、前人物探资料(曹创华等, 2021)以及地层、岩浆岩、变质岩(带)、褶皱和断裂、幕阜山岩体内残留地层顶盖或顶垂体等的分布特征, 编制了 2 条代表性综合地质剖面如图 8 所示。图中地表线之上已剥蚀岩体顶面的垂向位置和形态, 根据岩体西北部余家—板江一带冷家溪群残留顶盖或顶垂体以及北部通城地区寒武系、志留系残留体的发育推断。

控制幕阜山岩体边界的断裂主要有 NW 向、NE 向和 NEE 向等 3 组断裂, 其中 NW 向断裂有板江断裂 F<sub>4</sub>、板桥断裂 F<sub>6</sub>、白洋田断裂 F<sub>8</sub>、寺下断裂 F<sub>14</sub>, NE 向断裂有上洲断裂 F<sub>3</sub>、公田断裂 F<sub>7</sub>、余家断裂 F<sub>9</sub>、聂

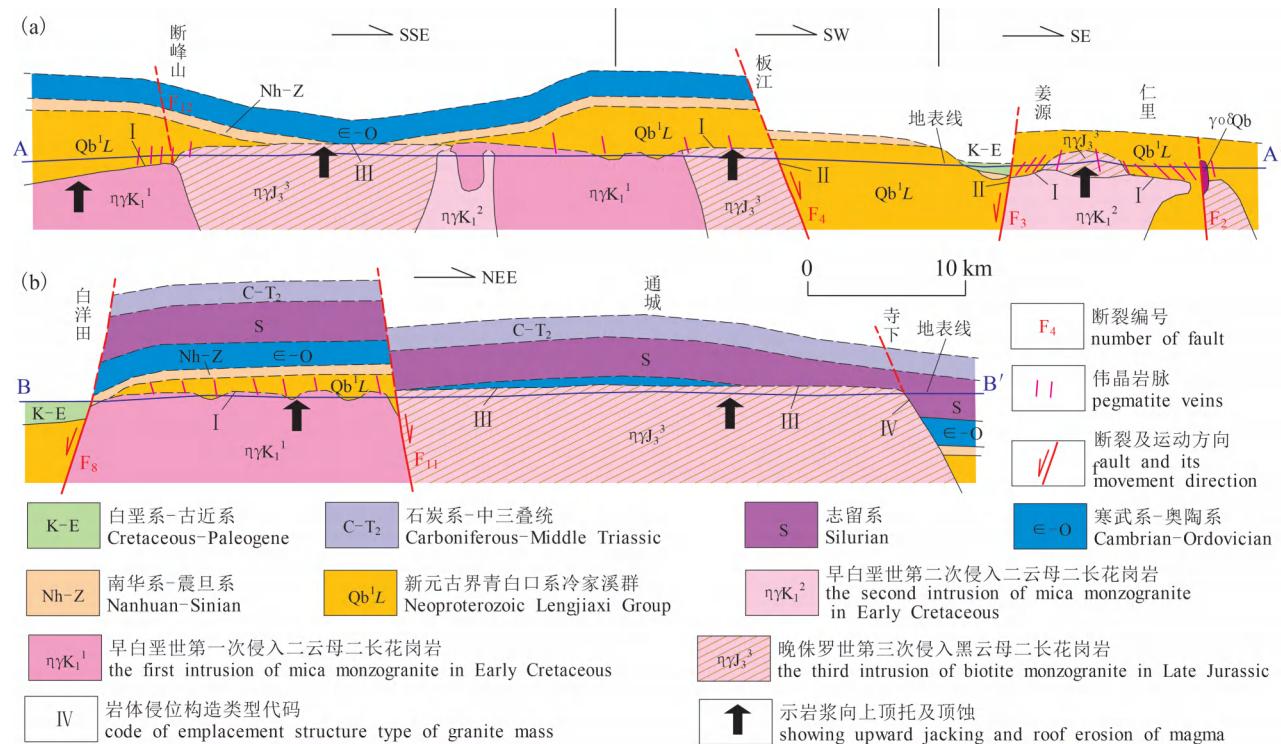


图 8 综合地质剖面图

Fig. 8 Comprehensive geological sections

(a) 断峰山—板江—仁里地质剖面; (b) 白洋田—寺下地质剖面; 剖面位置见图 1。断裂名称: F<sub>2</sub>—桃源断裂; F<sub>3</sub>—上洲断裂; F<sub>4</sub>—板江断裂; F<sub>8</sub>—白洋田断裂; F<sub>11</sub>—谭家坪断裂; F<sub>12</sub>—栗树坡断裂。岩体侵位构造类型: I—低侵位缓倾接触构造; II—低侵位陡倾接触构造; III—高侵位缓倾接触构造; IV—高侵位陡倾接触构造。

(a) Duanfengshan—Banjiang—Renli geological section; (b) Baiyangtian—Sixia geological section; Location of the sections are shown in fig. 1. Names of folds: F<sub>2</sub>—Taoyuan fault; F<sub>3</sub>—Shangzhou fault; F<sub>4</sub>—Banjiang fault; F<sub>8</sub>—Baiyangtian fault; F<sub>11</sub>—Tanjiaoping fault; F<sub>12</sub>—Lishupo fault. Granite emplacement structure type: I—low emplacement—gently dipping contact structure; II—low emplacement—steep dipping contact structure; III—high emplacement—gently dipping contact structure; IV—high emplacement—steep dipping contact structure.

家断裂 F<sub>15</sub>, NEE 向断裂有桃源断裂 F<sub>2</sub>、苏家垄断裂 F<sub>10</sub>、栗树坡断裂 F<sub>12</sub>、郑家断裂 F<sub>13</sub> (图 1)。此外, 尚有复式岩体内部的 NNW 向谭家坪断裂 F<sub>11</sub> 控制了晚侏罗世黑云母二长花岗岩侵入体的边界, 导致黑云母二长花岗岩侵入体与早白垩世二云母二长花岗岩侵入体之间的片岩呈 NNW 向线状展布 (图 1, 图 8b)。多数控岩断裂形迹清晰, 少量断裂如栗树坡断裂 F<sub>12</sub>、郑家断裂 F<sub>13</sub>、寺下断裂 F<sub>14</sub>、聂家断裂 F<sub>15</sub> 等受岩浆侵位改造而表现为较为平直的侵位界线 (图 1)。

断裂对岩体边界的控制在地表以两种方式体现, 或直接为表露岩体与围岩的分界, 如板江断裂 F<sub>4</sub>、公田断裂 F<sub>7</sub>、苏家垄断裂 F<sub>10</sub> 等; 或控制岩体边界的走向, 断裂与岩体之间出露宽度不大的片岩, 如桃源断裂 F<sub>2</sub>、上洲断裂 F<sub>3</sub>、白洋田断裂 F<sub>8</sub> 等 (图 1, 图 8)。地表以后一种方式体现时, 往下断裂仍可直

接为岩体与围岩的分界, 如上洲断裂 F<sub>3</sub> (图 8a)。

从断裂和岩体的展布格局来看, 断裂控制岩体边界的构造机制实质为断块控岩: 不同方向的走滑断裂将中上地壳分划为不同断块, 岩体区断块之下为岩浆源区。深部岩浆向上运移后侵位, 侵位过程表现为岩浆向上的顶托和横向的拓展, 前者导致岩体区断块抬升, 后者则止于相邻的岩体外断块 (图 9)。

就现有资料来看, 上述控制岩体边界的断裂主要为印支运动和早燕山运动形成的走滑断裂。其中 NE 向断裂具左行走滑 (如上洲断裂 F<sub>3</sub>)、NNW 向断裂具右行走滑, 二者形成于印支期运动 SN 向挤压; NW 向断裂具左行走滑 (如板江断裂 F<sub>4</sub>)、NEE 向断裂具右行走滑 (如桃源断裂 F<sub>2</sub>), 二者形成于早燕山运动 NW 向挤压。顺便指出, 断裂形成于岩体侵位之前, 表明岩体周边断裂确为控岩断裂, 而非后期

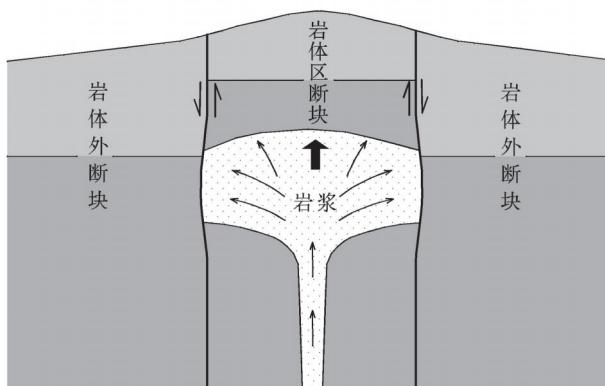


图 9 断裂控制岩体边界机制示意图

Fig. 9 Mechanism for faults controlling the boundaries of the granite body

改造断裂。

值得注意的是,断裂除控制幕阜山岩体的边界外,断裂剪切生热也应是导致岩浆形成的重要因素之一。其中早燕山运动中 NW 向断裂的左行走滑,可能不仅控制了岩体 NW—SE 的整体走向,同时导致岩体北侧、北东侧的印支期 EW 向褶皱偏转为 NEE 向(图 1)。

## 5 岩体侵位构造及其对变质作用和伟晶岩的控制

幕阜山地区伟晶岩或产于变质围岩即外接触带片岩中(包括与花岗岩分界处),或产于花岗岩体中。以南部仁里地区和北部断峰山地区为代表的外接触带伟晶岩是区内稀有金属矿的赋矿主体,其分布具有一定的规律性,岩脉的产状特征也受控于一定的构造类型(刘翔等,2018;周芳春等,2019a;李乐广等,2019);花岗岩体中的伟晶岩脉产状一般杂乱无序,通常不具稀有金属矿化或以 Be 矿化为主(陈剑锋等,2021;姜鹏飞等,2021)。显然,就控制外接触带中伟晶岩发育程度的因素进行探索,对稀有金属成矿远景区和找矿靶区的确定具有重要的现实意义。笔者等初步研究认为,外接触带中伟晶岩的发育与岩体侵位深度及接触带产状特征密切相关,因此本节基于岩体侵位深度及接触带产状进行侵位构造类型的定性划分,并探讨其对变质作用和伟晶岩的控制。

### 5.1 岩体侵位构造类型

首先指出,为全面认识岩体侵位构造特征并探讨其动力机制,笔者等所讨论的侵位构造包括现状

构造和推断的已剥蚀构造(图 8)。

岩体侵位深度根据围岩地层位定性确定,围岩为下部冷家溪群时侵位深度大,为低侵位;围岩为上部的寒武系—志留系时侵位深度小,为高侵位。岩体接触带产状的确定主要根据接触变质带宽度、地表接触带产状、岩体区残留顶盖或顶垂体的发育情况等确定(图 8)。

根据区域地质特征(图 1,图 8)及剖面观测资料,岩体侵位构造可定性划分为低侵位缓倾接触构造(I)、低侵位陡倾接触构造(II)、高侵位缓倾接触构造(III)和高侵位陡倾接触构造(IV)等 4 类(表 2,图 10)。低侵位缓倾接触构造以岩体南缘姜源—仁里一带和北缘断峰山一带为代表,围岩中接触变质带宽度大(1.5~7 km),隐伏接触带产状平缓(图 8a)。此外,岩体北西部余家—月田一带为已被剥蚀的低侵位缓倾接触构造(图 8a,b)。低侵位陡倾接触构造以岩体南缘桃源、岩体西南缘的板江和板桥为代表,围岩中接触变质带宽度小,一般 0.2~0.6 km,地表及下部隐伏接触带产状陡倾(图 8a)。高侵位缓倾接触构造以岩体北部通城一带的已剥蚀接触构造为代表;高侵位陡倾接触构造以东北缘寺下一带为代表(图 8b)。不同类型岩体侵位构造在围岩变质特征、围岩中伟晶岩发育特征以及稀有金属成矿潜力等方面存在差异(表 2)。

陡倾侵位接触构造主要与岩体边界受走滑断裂限制或继承走滑断裂发育有关,缓倾侵位接触构造主要与岩浆向上顶托和顶蚀有关(图 10)。

需要指出的是,本文 4 类岩体侵位构造为一初步的定性划分方案,其目的是为了从总体上把握岩体侵位构造特征的变化特征,并建立岩体构造与侵位机制之间的联系;部分地段的侵位构造可能具有过渡特征,如岩体西端白洋田北面(图 1)。

### 5.2 岩体侵位构造对围岩变质特征及变质带宽度的控制

显然,岩体侵位深度大则围岩背景温度高、岩体散热慢,相应的围岩变质程度更高、围岩中接触变质带厚度更大。此外,受切面角度差异控制,对一定厚度变质带而言,接触带及变质带的产状越平缓,则水平方向上的表露变质带越宽。因此,侵位深度和接触带产状有别的不同类型的岩体侵位构造,其围岩具有不同的变质程度、变质带厚度和表露变质带宽度。总体而言,低侵位接触构造比高侵位接触构造的围岩变质程度高、变质带厚度大。此外,由于侵位构造成因差异,同为低侵位或高侵位的缓倾接触构

表 2 幕阜山地区岩体侵位构造一览表

Table 2 Granite emplacement structure types in Mufushan area

侵位构造类型	侵位深度	接触面倾角	侵位构成因	围岩变质特征	围岩中伟晶岩发育特征	稀有金属成矿潜力	示例
低侵位缓倾接触构造(I)	大	小	岩浆顶托、顶蚀	变质较强，变质带宽	大量发育	较大	仁里—姜源;断峰山;余家—月田(已剥蚀)
低侵位缓倾接触构造(II)	大	大	断裂控制	变质较强，变质带较宽	不发育或少量发育	无或较小	桃源、板桥、板江
低侵位缓倾接触构造(III)	小	小	岩浆顶托、顶蚀	变质弱，变质带较宽	不发育	无	通城地区(已剥蚀)
低侵位缓倾接触构造(IV)	小	大	继承断裂发育	变质弱，变质带窄	不发育	无	寺下

造比陡倾接触构造的变质程度更高、表露变质带宽度更大,以低侵位缓倾和陡倾接触构造为例,分析其产生机制如下(图 11):

由于低侵位陡倾接触构造继承陡倾走滑断裂发育,而低侵位缓倾接触构造由岩浆顶托、顶蚀形成,当岩浆向上侵位时,低侵位缓倾接触构造之上的围

岩块体相对低侵位陡倾接触构造一侧的围岩块体抬升,导致前者所处构造层次更低、形成的接触变质带厚度更大。因此,经后期隆升剥露后,厚度更大、产状更缓的低侵位缓倾接触构造的表露接触变质带宽度便显著大于低侵位陡倾接触构造(图 11)。

### 5.3 岩体侵位构造对伟晶岩分布的控制

首先说明,以下只讨论稀有金属成矿潜力更大

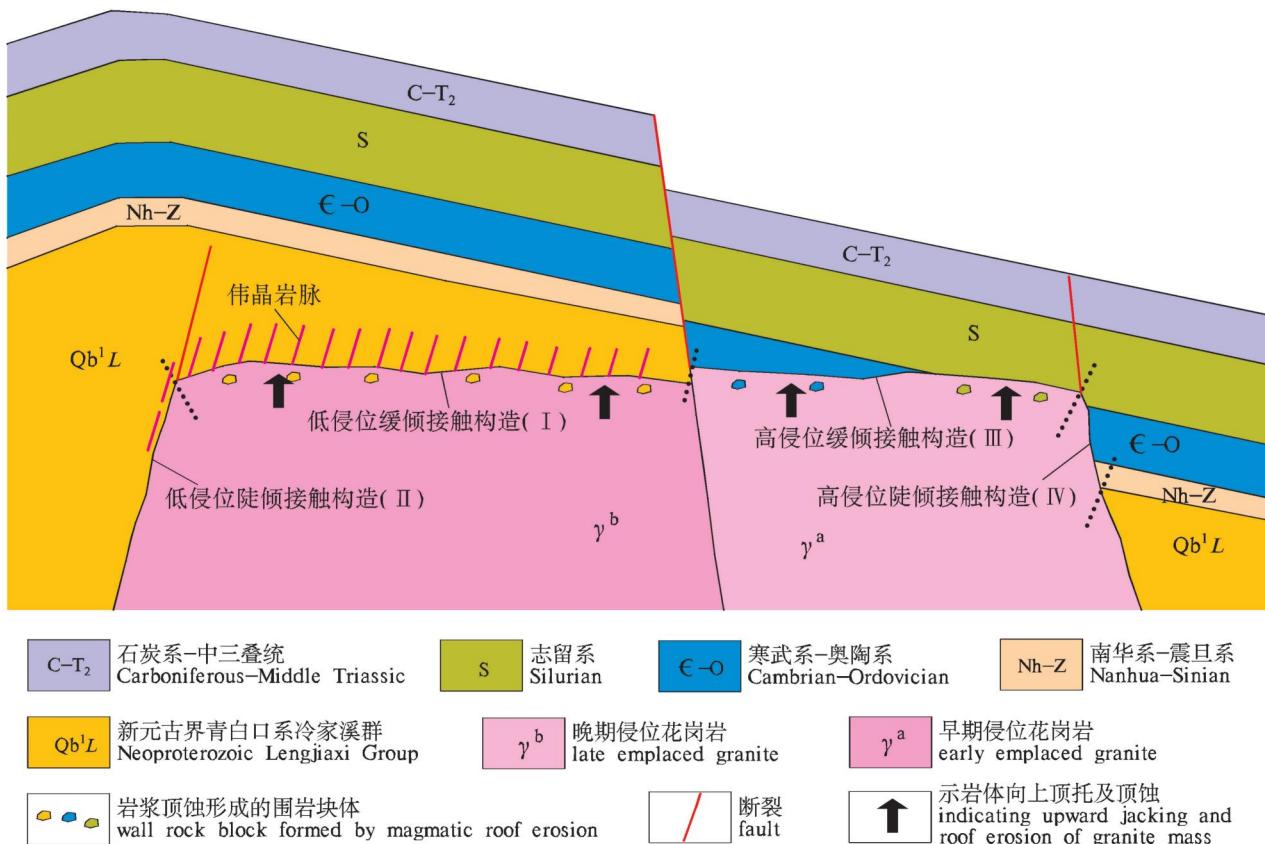


图 10 幕阜山岩体侵位构造分类模型

Fig. 10 Classification model of the emplacement structures of Mufushan granite body

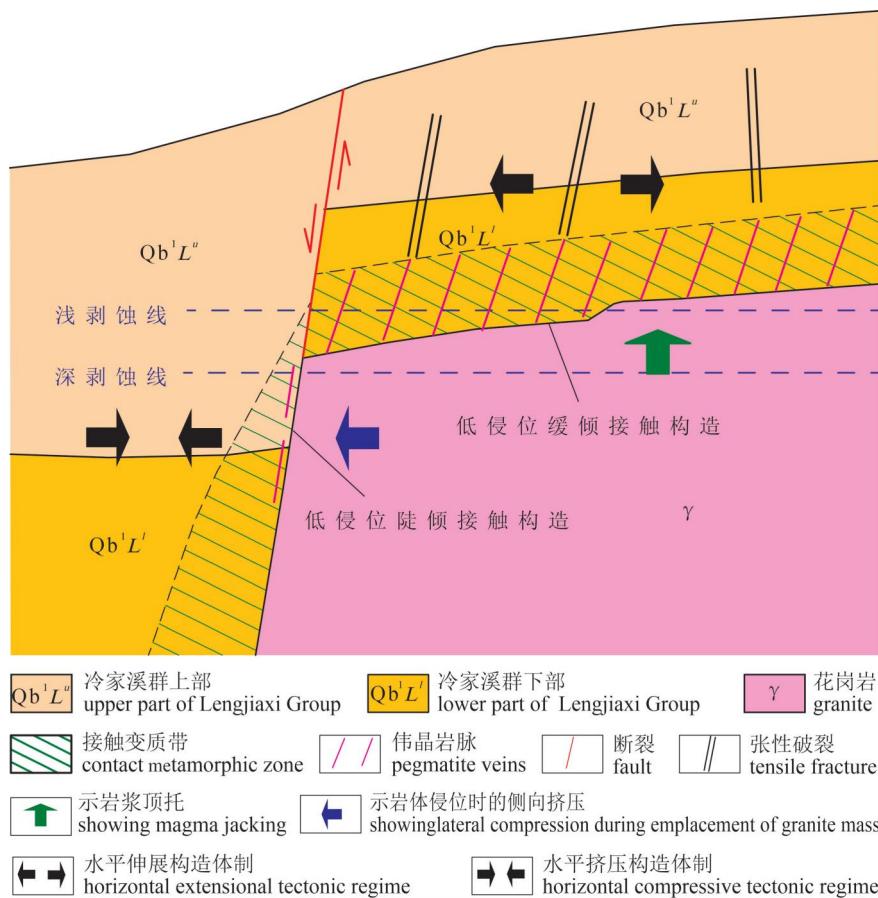


图 11 岩体侵位构造对围岩变质及伟晶岩的控制

Fig. 11 Controlment of emplacement structures on wall rock metamorphism and pegmatite

的变质围岩中的伟晶岩,花岗岩中的伟晶岩不在本文讨论范围。

研究区伟晶岩脉只发育于低侵位接触构造的冷家溪群围岩中,在岩体东北缘高侵位接触构造的上古生界围岩中不发育(图 1)。造成这一差异的原因可能如下:岩体侵位深度大则总体上岩浆散热慢、温度更高(冯佐海等,2009);更高温度的岩浆黏度更低(杜杨松等,1989;卞霄等,2018),且分离结晶和岩浆分异更加容易(Brown, 1994; 汪相等, 2022),因此更有利于形成演化程度更高的伟晶岩熔体并侵入于围岩中的破裂而形成伟晶岩脉。此外,侵位深度更大时,围岩背景温度更高,伟晶岩结晶温度与围岩变质温度相近,结晶的物理化学条件稳定,有利于晶体长大而形成伟晶岩(陈衍景等,2021)。研究区伟晶岩只产于变质程度较高的片岩中,世界上至今未见侵入于未变质沉积岩中的伟晶岩(Bradley et al., 2017),均可通过上述机制给予解释。此外需要指出的是,岩体东北部侵位时代更早、演化程度更低(李

鹏等,2021),不利于岩浆活动晚期高演化程度的伟晶岩熔体的形成,也应是岩体东北缘围岩中伟晶岩不发育的原因之一。

同为低侵位接触构造,低侵位缓倾接触构造比低侵位陡倾接触构造的伟晶岩发育规模更大。这一差异的形成可能与构造体制和接触带产状有关:①由于岩浆上侵顶托,低侵位缓倾接触构造之上的围岩块体产生水平方向的拉张,并继承先期断裂、层面、剪切破裂、膝折面等构造面形成上下延伸的张性破裂,从而为伟晶岩脉的大量形成提供了良好的运移通道和就位空间(图 11),如仁里(图 2B)、姜源(图 2C)、断峰山(图 2F)等。由于岩浆侵位过程中横向挤压,低侵位陡倾接触构造旁侧的围岩块体受到水平方向的挤压(图 11),相对封闭的构造体制不利于岩浆运移和侵位,因此难以形成伟晶岩脉,如板江(图 2D);或仅于岩体近侧形成少量、小规模伟晶岩脉,如桃源(图 2A)、板桥

(图 2E)。②由于围岩中伟晶岩呈带状散布于岩体近侧,低侵位缓倾接触构造围岩中伟晶岩分布区的表露宽度因此远大于陡倾接触构造(图 11)。

## 6 构造对伟晶岩脉(体)的控制

伟晶岩脉(体)为伟晶岩熔浆沿构造薄弱带或构造不连续面贯入而形成。基于前文剖面调查成果并结合区域地质资料,就研究区地层中伟晶岩脉(体)的控岩构造总结如下:

### 6.1 控制伟晶岩脉(体)的构造类型

控制伟晶岩脉(体)的构造类型有层面或层间剪切面、逆断裂、不同方向的走滑断裂或剪切破裂、膝折面等面状构造以及岩体接触带。①层面或层间剪切面所控制的伟晶岩脉分布最广,如桃源(图 3f)、仁里(图 4i、n、o)、姜源(图 6e、f、h、j)、断峰山(图 7f、i)等地均有发育;脉体与围岩界面平行于层面。②逆断裂控制的伟晶岩脉见于仁里(图 4g)和断峰山(图 7g),前者脉体走向 NWW、产状较缓并切割层

面,后者走向 EW、产状较陡并切割顺层劈理。③受走滑断裂或剪切破裂控制的伟晶岩脉较多,如桃源(图 3g)、仁里(图 4c、e)、姜源(图 6h、j)、板桥(图 7c)等地均有见及;脉体边界陡倾至直立,走向有 NNW 向、NNE 向、SN 向、NNW 向等。④受膝折面控制的伟晶岩脉见于仁里,NNW 向膝折面构成脉体的局部边界(图 4b、图 4f)。⑤岩体接触带控制的伟晶岩见于仁里(图 2B)、姜源(图 2C)、板桥(图 2E)等地剖面中。此外,在幕阜山岩体南西端舌状体的两侧,岩体与围岩间均发育大规模的伟晶岩体(图 1),反映作为构造不连续面的接触带是伟晶岩脉的重要就位构造。

## 6.2 复合构造对伟晶岩脉的控制

研究区伟晶岩脉通常受多组构造控制,不同类型构造的交汇、组合,可导致伟晶岩脉(体)的产出状态(岩脉或岩体及其边界的走向、倾向)在平面和剖面上的复杂变化。如仁里 D02 点露头剖面上见伟晶岩脉同时被 NNW 向层面、NNW 向膝折面和 SN 向剪切破裂所限(图 4b),D03 点见伟晶岩脉被 NNW 向直立破裂、NNW 向膝折面和 NEE 向顺层劈理所限(图 4e),D04 点 NNW 向南倾板劈理与 NNW 向北倾破裂控制管状伟晶岩脉(图 4h);姜源 D11 点见顺层伟晶岩脉端部被 NNW 向剪切破裂限制(图 6h),等。再如已有调查和勘查资料显示,仁里地区大量以 NNW 向为主的伟晶岩脉在走向上厚度变化很大,其中 2 号脉表现出边界参差不平、厚度强烈变化的断续出露的组脉特征(周芳春等,2019a),也反映出多组构造控制或限制的产出特征。此外,仁里(图 4k)、姜源(图 6e)、板桥(图 7b)等地沿接触带发育的伟晶岩脉与围岩的接触面常平行于层面,反映脉体受接触带与层面(或层间剪切面)的联合控制。

## 6.3 不同类型构造的控岩规模

尽管伟晶岩脉的控制构造类型多样,且常表现出多组构造复合控岩特征,但受发育规模限制,不同类型构造的控岩规模不一。总体而言,层面或层间剪切面、逆断裂、岩体接触带等延伸规模大,为伟晶岩熔浆提供了主要的运移通道和就位空间,属于主导性控岩构造;走滑剪切破裂、膝折面延伸规模小,主要构成伟晶岩脉的局部边界,属于限制性控岩构造。

## 6.4 控制伟晶岩构造的形成背景

据地质剖面调查和区域构造演化,研究区控制伟晶岩脉(体)的各类构造的形成背景如下:层面形成于冷家溪群沉积期。层间剪切面主要形成于武陵

运动,但从断裂活动的继承性考虑,部分剪切面可能存在印支期和早燕山期活动。断峰山的 EW 向逆断裂,仁里的 NNW 向逆断裂、NNW 向膝折面、SN 向右行剪切破裂,以及姜源的 NNE 向左行剪切破裂和 NNW 向右行剪切破裂等形成于印支运动 SN 向挤压,其中仁里一带构造的走向为后期岩浆侵位挤压、牵引而发生顺时针旋转的结果。仁里一带 NNW 向右行剪切破裂形成于早燕山运动 NNW 向挤压,初始走向为近 EW 向。岩体接触带显然形成于晚侏罗世—早白垩世初的主岩浆活动期。

## 7 岩浆演化和构造对稀有金属伟晶岩的控制

幕阜山岩体周缘围岩中伟晶岩均为稀有金属伟晶岩,只是稀有金属类型及其富集程度存在差异(李乐广等,2019;刘翔等,2019;李鹏等,2021;Li Peng et al,2021)。因此,前文有关岩体侵位构造对围岩中伟晶岩分布的控制作用及构造对地层中伟晶岩脉(体)的控制特征,可视为花岗岩体和地质构造控制地层围岩中稀有金属伟晶岩分布和产出的总体性规律。以下根据前人研究成果和笔者等资料,就岩浆演化和构造对不同矿化类型和成矿强度稀有金属伟晶岩的控制给予简单总结和讨论。

### 7.1 岩浆演化对稀有金属伟晶岩的控制

幕阜山地区稀有金属伟晶岩主要与幕阜山复式岩体晚期岩石单元有关,是早白垩世二云母花岗岩相关岩浆进一步分异演化的产物(文春华等,2016;李鹏等,2017;李安邦等,2021)。

伟晶岩类型及其稀有金属矿化特征存在明显的演化规律,前人根据不同的矿物组合标志对此进行了总结。李乐广等(2019)根据特征矿物组合并按岩浆演化程度由低至高的次序,将研究区伟晶岩分为断峰山地区电气石伟晶岩、电气石—绿柱石伟晶岩、绿柱石伟晶岩、铌钽铁矿—绿柱石伟晶岩,以及仁里地区的锂电气石—锂云母伟晶岩 5 类,分别对应伟晶岩稀有金属富集程度分类中的无矿,含 Be,富 Be,富 Be、Nb、Ta,富 Li、Be、Nb、Ta 阶段。刘翔等(2019)提出幕阜山岩体由岩体内接触带往岩体外接触带(10 km),由黑云母伟晶岩→二云母伟晶岩→白云母伟晶岩→锂云母伟晶岩→锂辉石白云母伟晶岩过渡,矿化特征由无矿化→Be→Be+Nb+Ta→Be+Nb+Ta+Li→Be+Nb+Ta+Li+Cs 变化。文春华(2017)将幕阜山南缘地区伟晶岩由北往南依次划分为钾长石伟晶岩、斜长石伟晶岩、斜长石—钠长

石伟晶岩、钠长石伟晶岩和钠长石—锂辉石伟晶岩等 5 种类型,其  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量逐次升高、 $\text{K}_2\text{O}$  含量逐次降低,钠长石化和锂辉石化过程制约着稀有金属成矿作用。

规模较大的稀有金属伟晶岩脉内部因分离结晶作用而常存在分带性,如仁里地区 5 号伟晶岩脉深部可划分为文象伟晶岩带、微斜长石钠长石伟晶岩带、钠长石白云母伟晶岩带、含石榴子石白云母钠长石伟晶岩带等 4 个带,从外带向内带云母由白云母系列逐渐向锂云母系列转变(杨晗等,2019)。

## 7.2 构造对稀有金属伟晶岩的控制

侵位接触构造类型不仅控制了地层围岩中伟晶岩的分布和规模,实际上还在一定程度上控制了伟晶岩的成矿强度。如前文所述,低侵位缓倾接触构造比低侵位陡倾接触构造的伟晶岩脉规模更大。更大规模的伟晶岩脉不仅含有更多的稀有金属元素总量,并且可产生更充分的岩浆分异演化,从而于岩脉内部晚期分带中形成更大规模、更高品位的稀有金属矿体。因此,低侵位缓倾接触构造比低侵位陡倾接触构造的伟晶岩脉总体成矿强度更高,这应是北部断峰山地区和南部仁里地区稀有金属矿床规模大,而桃源和板桥两地伟晶岩尚未发现稀有金属矿床的主要原因之一。

岩体接触带和断裂、剪切破裂、膝折面、层间剪切带等面状构造对同一地区稀有金属伟晶岩规模、产状和含矿性的空间变化也具有一定控制作用。以仁里地区为例,自北而南,随着与岩体接触带距离变大,围岩中伟晶岩脉的规模自大变小、岩脉产状由简单变复杂(周芳春等,2019a),主要成矿元素由  $\text{Nb}—\text{Ta} \longrightarrow \text{Nb}—\text{Ta}—\text{Li}—\text{Cs}$  变化(文春华,2017;刘翔等,2019),铌钽资源则主要集中在北部规模较大的 2、3、5、6 号岩脉(周芳春等,2019a)。仁里地区伟晶岩分布特征的形成机制可能如下:① 伟晶岩浆自花岗岩体顶(边)部向外运移、充填,导致自接触带向外岩浆量逐渐减少、伟晶岩脉的规模相应逐渐减小。② 靠近接触带的伟晶岩脉具更大规模而含有更多稀有金属元素总量,因此集中了主要的铌钽资源。③ 靠近接触带伟晶岩浆量大,较大规模的 NW 向断裂或层间剪切带成为主要容岩空间,因此伟晶岩脉产状总体较为稳定、简单;远离接触带伟晶岩浆量小,岩脉更多受不同产状的层面、剪切破裂、膝折面等小型构造控制而产状复杂。④ 伟晶岩浆在运移过程中发生结晶分异,导致岩浆演化程度自接触带向外逐渐升高,成矿元素相应由  $\text{Nb}—\text{Ta} \longrightarrow \text{Nb}—\text{Li}—\text{Cs}$  变化。

$\text{Ta}—\text{Li}—\text{Cs}$  变化。

## 8 结论

(1) 中生代—新生代早期,研究区自早至晚经历了早—中三叠世海相盆地、中三叠世后期—晚三叠世印支运动、晚三叠世晚期—中侏罗世早期类前陆盆地、中侏罗世晚期早燕山运动、晚侏罗世—早白垩世早期花岗质岩浆活动与成矿、早白垩世晚期—古近纪中期区域伸展与断陷盆地、古近纪中晚期 NE 向挤压等 7 期地质事件。

(2) 幕阜山岩体边界主要受 NW 向、NE 向和 NEE 向等 3 组断裂控制,其构造机制实质为岩体区断块和岩体外断块对岩浆侵位过程的控制。

(3) 岩体侵位构造可定性划分为低侵位缓倾接触构造、低侵位陡倾接触构造、高侵位缓倾接触构造和高侵位陡倾接触构造等 4 类,其中低侵位缓倾接触构造对花岗伟晶岩的形成最为有利。

(4) 控制伟晶岩脉(体)的构造包括层面或层间剪切面、逆断裂、岩体接触带等主导性控岩构造,以及走滑剪切破裂、膝折面等限制性控岩构造。层间剪切面主要形成于武陵运动,EW 向和 NWW 向逆断裂、NWW 向膝折面、NNE 向左行剪切破裂、NNW 向右行剪切破裂等形成于印支运动 SN 向挤压,NNW 向右行剪切破裂形成于早燕山运动 NWW 向挤压;仁里地区构造的走向为叠加后期顺时针旋转后的结果。

(5) 受岩体接触带和不同类型与规模的面状构造控制,仁里地区自北而南,围岩中伟晶岩脉的规模自大变小、岩脉产状由简单变复杂,主要成矿元素由  $\text{Nb}—\text{Ta} \longrightarrow \text{Nb}—\text{Ta}—\text{Li}—\text{Cs}$  变化。

致谢:审稿专家对论文进行了仔细审查并提出建设性的修改建议,在此表示衷心感谢。

## 注 释 / Note

① 湖南省地质局区域地质测量队. 1978. 平江幅 1:20 万区域地质调查报告.

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

柏道远, 熊延望, 王先辉, 马铁球. 2005. 湖南常德—安仁 NW 向断裂左旋走滑与安仁“y”字型构造. 大地构造与成矿学, 29(4): 435~442.

柏道远, 黄建中, 王先辉, 马铁球, 张晓阳, 陈必河. 2006. 湖南邵阳—郴州北西向左旋走滑暨水口山—香花岭南北向构造成因.

- 中国地质, 33(1): 56~63.
- 柏道远, 倪艳军, 李送文, 马铁球, 王先辉, 彭云益, 李纲. 2009a. 江南造山带北部早中生代岳阳—赤壁断褶带构造特征及变形机制研究. 中国地质, 36(5): 996~1009.
- 柏道远, 邹宾微, 赵龙辉, 李泽泓, 王先辉, 马铁球, 肖冬贵, 彭云益. 2009b. 湘东太湖逆冲推覆构造基本特征研究. 中国地质, 36(1): 53~64.
- 柏道远, 刘波, 倪艳军, 马铁球, 王先辉, 彭云益, 李纲. 2010. 湘东北湘阴凹陷控盆断裂特征、盆地性质及动力机制研究. 资源调查与环境, 31(3): 157~168.
- 柏道远, 贾宝华, 钟响, 刘耀荣, 贾朋远, 黄文义. 2012. 湘东南印支运动变形特征研究. 地质论评, 58(1): 19~29.
- 柏道远, 姜文, 钟响, 熊雄. 2015. 湘西沅麻盆地中新生代构造变形特征及区域地质背景. 中国地质, 42(6): 1851~1875.
- 柏道远, 李银敏, 钟响, 李彬, 黄乐清, 伍贵华, 李超, 姜文. 2018. 湖南NW向常德—安仁断裂的地质特征、活动历史及构造性质. 地球科学, 43(7): 2496~2517.
- 柏道远, 李彬, 姜文, 李银敏, 蒋启生. 2020a. 湖南省主要内生成矿事件的构造格局控矿特征及动力机制. 地球科学与环境学报, 42(1): 49~70.
- 柏道远, 李彬, 姜文, 李银敏, 蒋启生. 2020b. 洞庭盆地湘阴凹陷南段构造特征及动力机制. 桂林理工大学学报, 40(2): 241~250.
- 柏道远, 李彬, 姜文, 李银敏, 钟响. 2021a. 湘东北隆起区前中生代抬升剥蚀过程的地层记录. 桂林理工大学学报, 41(4): 715~712.
- 柏道远, 蒋启生, 李彬, 姜文, 李银敏. 2021b. 湘东北冷家溪群沉积岩地球化学特征及其构造意义. 地质科技通报, 40(1): 1~13.
- 柏道远, 李彬, 李银敏, 陈迪, 凌跃新. 2021c. 湖南常德—安仁断裂印支期构造运动分段性:来自花岗岩的约束. 地质科技通报, 40(5): 173~187.
- 柏道远, 李彬, 周超, 孙骥, 魏方辉, 曾广乾, 姜文, 李银敏, 蒋启生. 2021d. 江南造山带湖南段金矿成矿事件及其构造背景. 岩石矿物学杂志, 40(5): 897~922.
- 柏道远, 唐分配, 李彬, 曾广乾, 李银敏, 姜文. 2022. 湖南省成矿地质事件纲要. 中国地质, 49(1): 151~180.
- 卞霄, 田晗钰, 吴限, 李社宏, 韦龙明. 2018. 粤北梅子窝钨矿区花岗岩体岩浆动力学特征分析. 矿产与地质, 32(4): 695~701.
- 曹创华, 程云涛, 邹光均, 黄建中, 刘俊峰, 文春华, 孟德保, 柳建新, 楼法生, 邓居智. 2022. 湘东北幕阜山—梅仙深部电性结构及其对稀有金属成矿的控制作用. 中国有色金属学报, 32(4): 1175~1186.
- 陈剑锋, 文春华, 黄建中, 张锦煦, 汪程, 唐勇, 吕正航, 周芳春, 陈虎, 曹创华, 陈宇鹏. 2021. 幕阜山南缘仁里稀有金属矿区7号伟晶岩脉、辉石闪长岩脉特征及地质意义[J/OL]. 大地构造与成矿学. <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2021.05.018>.
- 陈衍景, 薛莅治, 王孝磊, 赵中宝, 韩金生, 周可法. 2021. 世界伟晶岩型锂矿床地质研究进展. 地质学报, 95(10): 2971~2995.
- 杜杨松, 周殉若. 1989. 浙东南沿海地区中生代火山岩—侵入杂岩形成条件的实验模拟. 南京大学学报(自然科学版), 25(1): 83~91.
- 冯佐海, 王春增, 王葆华. 2009. 花岗岩侵位机制与成矿作用. 桂林工学院学报, 29(2): 183~194.
- 郭飞, 王智琳, 许德如, 董国军, 宁钧陶, 王展, 邓腾, 于得水, 崔宇. 2018. 湘东北地区栗山铅锌铜多金属矿床的成因探讨:来自矿床地质、矿物学和硫同位素的证据. 南京大学学报(自然科学), 54(2): 366~385.
- 郭飞, 王智琳, 许德如, 于得水, 董国军, 宁钧陶, 康博, 彭尔柯. 2020. 湖南栗山铅锌铜多金属矿床闪锌矿微量元素特征及成矿指示意义. 地学前缘, 27(4): 66~88.
- 湖南省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·湖南志. 北京: 地质出版社.
- 姜鹏飞, 李鹏, 李健康, 何雪梅, 冷双梁. 2021. 幕阜山东部麦埚铍矿伟晶岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及其地质意义. 矿床地质, 40(4): 723~739.
- 冷双梁, 谭超, 黄景孟, 周豹. 2018. 幕阜山花岗岩地区稀有金属成矿规律初探. 资源环境与工程, 32(3): 351~357.
- 李安邦, 黄勤, 冯超, 杨细华, 闫刚刚, 赵子娟, 董湘杰, 祝明明, 张金阳. 2021. 幕阜山复式花岗岩体锆石年代与微量元素对伟晶岩矿床成因的限定. 地球科学, 46(12): 4517~4532.
- 李乐广, 王连训, 田洋, 马昌前, 周芳春. 2019. 华南幕阜山花岗伟晶岩的矿物化学特征及指示意义. 地球科学, 44(7): 2532~2550.
- 李鹏, 李建康, 裴荣富, 冷双梁, 张旭, 周芳春, 李胜苗. 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.
- 李鹏, 李建康, 张立平, 黄志飚, 刘翔, 周芳春, 曾乐. 2019a. 幕阜山西南缘黄柏山稀有金属伟晶岩密集区的发现及意义. 矿床地质, 38(5): 1069~1076.
- 李鹏, 刘翔, 李建康, 黄志飚, 周芳春, 张立平. 2019b. 湘东北仁里—传梓源矿床5号伟晶岩岩相学、地球化学特征及成矿时代. 地质学报, 93(6): 1374~1391.
- 李鹏, 周芳春, 李建康, 刘翔, 黄志飚, 张立平. 2020. 湘东北仁里—传梓源铌钽矿床隐伏花岗岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及其地质意义. 大地构造与成矿学, 44(3): 486~550.
- 李鹏, 张立平, 李建康, 黄志飚, 周芳春, 姜鹏飞. 2021. 江南造山带中段幕阜山地区稀有金属成矿规律及其在找矿中的应用. 矿床地质, 40(4): 819~814.
- 李鹏春, 许德如, 陈广浩, 夏斌, 贺转利, 符巩固. 2005. 湘东北金井地区花岗岩成因及地球动力学暗示:岩石学、地球化学和Sr—Nd同位素制约. 岩石学报, 21(3): 921~934.
- 刘翔, 周芳春, 黄志飚, 李建康, 周厚祥, 肖国强, 包云河, 李鹏, 谭黎明, 石威科, 苏俊男, 黄小强, 陈虎, 汪宣民, 林跃, 刘晓敏. 2018. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型铌钽多金属矿床的发现及其意义. 大地构造与成矿学, 42(2): 235~243.
- 刘翔, 周芳春, 李鹏, 李建康, 黄志飚, 石威科, 黄小强, 张立平, 苏俊男. 2019. 湖南仁里稀有金属矿田地质特征、成矿时代及其找矿意义. 矿床地质, 38(4): 771~791.
- 马铁球, 陈立新, 柏道远, 周柯军, 李纲, 王先辉. 2009. 湘东北新元古代花岗岩体锆石SHRIMP U-Pb年龄及地球化学特征. 中国地质, 36(1): 65~73.
- 陕亮, 柯贤忠, 庞迎春, 刘家军, 赵辛敏, 王晶, 康博, 张鲲. 2017. 湘东北栗山地区新元古代岩浆活动及其地质意义:锆石U-Pb年代学、Lu-Hf同位素证据. 地质科技情报, 36(6): 32~42.
- 石红才, 施小斌, 杨小秋, 蒋海燕. 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.
- 石威科, 周芳春, 刘翔, 李鹏, 黄志飚, 文春华, 陈阡然, 苏俊男, 黄小强, 张宗栋, 张立平, 陈虎, 刘俊峰, 胡小芳. 2020. 湖南仁里矿田锂辉石白云母伟晶岩地质特征及其找矿意义. 地质学报, 94(3): 817~835.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用. 地质论评, 48(3): 249~260.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起, 王彬, 祖辅平. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化. 地质通报, 23(9): 876~884.
- 万天丰, 朱鸿. 2002. 中国大陆及邻区中生代—新生代大地构造与环

- 境变迁. 现代地质, 16(2): 107~118.
- 王晶, 金巍, 田洋, 李乐广, 柯贤忠, 龙文国. 2020. 湖南岳阳—湖北通城地区 1:5 万区域地质调查成果与主要进展. 华南地质, 36(3): 213~220.
- 王臻, 陈振宇, 李建康, 李鹏, 熊欣, 杨晗, 周芳春. 2019. 云母矿物对仁里稀有金属伟晶岩矿床岩浆—热液演化过程的指示. 矿床地质, 38(5): 1039~1052.
- 汪相, 楼法生. 2022. 论岩浆热液矿床的成矿期——以南岭地区燕山期钨矿为例. 地质论评, 68(2): 507~530.
- 文春华, 陈剑锋, 罗小亚, 李胜苗. 2016. 湘东北传梓源稀有金属花岗伟晶岩地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 35(1): 171~177.
- 文春华. 2017. 幕阜山南缘地区伟晶岩矿物学、地球化学特征及含矿性分析. 矿物岩石地球化学通报, 36(1): 67~74.
- 许畅, 李建康, 施光海, 李鹏, 刘翔, 张立平. 2019. 幕阜山南缘似斑状黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. 矿床地质, 38(5): 1053~1068.
- 许德如, 邹凤辉, 宁钩陶, 邓腾, 王智琳, 陈根文, 张建岭, 董国军. 2017a. 湘东北地区地质构造演化与成矿响应探讨. 岩石学报, 33(3): 695~715.
- 许德如, 邓腾, 董国军, 宁钩陶, 王智琳, 张俊岭, 邹凤辉, 周岳强, 陈根文, 于得水, 叶挺威. 2017b. 湘东北连云山二云母二长花岗岩的年代学和地球化学特征: 对岩浆成因和成矿地球动力学背景的启示. 地学前缘, 24(2): 104~122.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 舒良树, 王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程. 中国地质, 36(3): 573~593.
- 杨晗, 陈振宇, 李建康, 李鹏, 熊欣, 王臻, 周芳春. 2019. 湘东北仁里—传梓源 5 号伟晶岩脉云母和长石成分的演化与成矿作用的关系. 矿床地质, 38(4): 851~866.
- 杨文采. 2018. 扬子区地壳密度扰动成像和华南燕山期花岗岩成因. 地质论评, 64(5): 1045~1054.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 姚安平. 2011. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学. 地学前缘, 8(3): 1~12.
- 张鲲, 胡俊良, 徐德明. 2012. 湖南桃林铅锌矿区花岗岩地球化学特征及其与成矿的关系. 华南地质与矿产, 28(4): 307~314.
- 张进, 马宗晋, 陈必河, 王宗秀, 李涛. 2010. 雪峰山中段古生代变形的特征及意义——以绥宁—靖州—天柱—新晃剖面为例. 地质通报, 29(1): 44~57.
- 张立平, 黄小强, 苏俊男, 李鹏, 刘翔, 黄志飚, 李建康, 曾乐, 徐美玲, 柳清琦. 2020. 湘东北幕阜山岩体南部稀有金属伟晶岩分带特征研究. 四川地质学报, 40(3): 375~381.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘, 16(1): 234~247.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3): 257~279.
- 郑亚东, 王涛, 王新社. 2007. 最大有效力矩准则及相关地质构造. 地学前缘, 14(4): 49~60.
- 周芳春, 刘翔, 李建康, 黄志飚, 肖国强, 李鹏, 周厚祥, 石威科, 谭黎明, 苏俊男, 陈虎, 汪宣民. 2019a. 湖南仁里超大型稀有金属矿床的成矿特征与成矿模型. 大地构造与成矿学, 43(1): 77~91.
- 周芳春, 李建康, 刘翔, 李鹏, 黄志飚, 石威科, 苏俊男, 陈虎, 黄小强. 2019b. 湖南仁里铌钽矿床矿体地球化学特征及其成因意义. 地质学报, 93(6): 1392~1404.
- 周芳春, 黄志飚, 刘翔, 苏俊男, 黄小强, 王臻, 陈虎, 张宗栋, 锤小荣, 李建斌, 李振红, 张立平, 曾乐, 李旭明. 2020. 湖南仁里铌钽矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 大地构造与成矿学, 44(3): 476~485.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生. 2009. 江南造山带形成过程中若干新元古代地质事件. 高校地质学报, 15(4): 453~459.
- Bai Daoyuan, Xiong Yanwang, Wang Xianhui, Ma Tieqiu. 2005&. "Y"-type structure in Anren county, Hunan, and the sinistral strike-slip of Changde—Anren NW-trending fault. Geotectonica et Metallogenica, 29(4): 435~442.
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Wang Xianhui, Zhang Xiaoyang, Chen Bihe. 2006&. Sinistral strike-slip motion of the NW-trending Shaoyang—Chenzhou fault and genesis of the N—S-trending Shuikoushan—Xianghualing tectonic zone in Hunan. Geology in China, 33(1): 56~63.
- Bai Daoyuan, Ni Yanjun, Li Songwen, Ma Tieqiu, Wang Xianhui, Peng Yunyi, Li Gang. 2009a&. A geometrical and kinematic analysis of the early-Mesozoic Yueyang—Chibi fold—thrust belt in southern Jiangnan orogen. Geology in China, 36(5): 996~1009.
- Bai Daoyuan, Zou Binwei, Zhao Longhui, Li Zehong, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, Xiao Donggui, Peng Yunyi. 2009b&. Basic characteristics of the Taihu thrust system in eastern Hunan. Geology in China, 36(1): 53~64.
- Bai Daoyuan, Niu Bo, Ni Yanjun, Ma Tieqiu, Wang Xianhui, Peng Yunyi, Li Gang. 2010&. Characteristics of basin-controlling faults, basin type and dynamic mechanisms of the Xiangyin Sag in northeastern Hunan. Resources Survey & Environment, 31(3): 157~168.
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Zhong Xiang, Liu Yaorong, Jia Pengyuan, Huang Wenyi. 2012&. Study on the deformation of Indosinian Movement in Southeastern Hunan. Geological Review, 58(1): 19~29.
- Bai Daoyuan, Jiang Wen, Zhong Xiang, Xiong Xiong. 2015&. Mesozoic—Cenozoic structural deformation characteristics of Yuanling—Mayang basin and regional tectonic setting. Geology in China, 42(6): 1851~1875.
- Bai Daoyuan, Li Yinmin, Zhong Xiang, Li Bin, Huang Leqing, Wu Guihua, Li Chao, Jiang Wen. 2018&. Geological features, activity history and tectonic attribute of NW-trending Changde—Anren fault in Hunan. Earth Science, 43(7): 2496~2517.
- Bai Daoyuan, Li Bin, Jiang Wen, Li Yinmin, Jiang Qisheng. 2020a&. Tectonic framework controlling characteristics and dynamic mechanisms of main endogenous mineralization events in Hunan Province, China. Journal of Earth Sciences and Environment, 42(1): 49~70.
- Bai Daoyuan, Li Bin, Jiang Wen, Li Yinmin, Jiang Qisheng. 2020b&. Structure characteristics and dynamic mechanisms of southern Xiangyin sag of Dongting basin. Journal of Guilin University of Technology, 40(2): 241~250.
- Bai Daoyuan, Li Bin, Jiang Wen, Li Yinmin, Zhong Xiang. 2021a&. Stratum records of Pre-Mesozoic uplift—denudation processes of Northeast Hunan uplift area. Journal of Guilin University of Technology, 41(4): 715~712.
- Bai Daoyuan, Jiang Qisheng, Li Bin, Jiang Wen, Li Yinmin. 2021b&. Geochemistry and tectonic implication of the sedimentary rocks in Lengjiaxi Group in northeastern Hunan. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(1): 1~13.
- Bai Daoyuan, Li Bin, Li Yinmin, Chen Di, Ling Yuexin. 2021c&. Segmentation of the movement in Indosinian of the Changde—Anren fault in Hunan: Constraints from granite. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(5): 173~187.
- Bai Daoyuan, Li Bin, Zhou Chao, Sun Ji, Wei Fanghui, Zeng Guangqian, Jiang Wen, Li Yinming, Jiang Qisheng. 2021d&. Gold

- mineralization events of the Jiangnan Orogen in Hunan and their tectonic settings. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(5): 897~922.
- Bai Daoyuan, Tang Fenpei, Li Bin, Zeng Guangqian, Li Yinmin, Jiang Wen. 2022&. Summary of main mineralization events in Hunan Province. *Geology in China*, 49(1): 151~180.
- Bian Xiao, Tian Hanyu, Wu Xian, Li Shenhong, Wei Longming. 2018&. Analysis of magmatic dynamics of granitic bodies in Meiziwo tungsten ore area, northern Guangdong. *Mineral Resources and Geology*, 32(4): 695~701.
- Bradley D C, McCauley A D, Stillings L L. 2017. Mineral-deposit model for lithium—cesium—tantalum pegmatites. *Scientific Investigations report (NO. 2010-5070-O)*. US Geological Survey, New York. <https://doi.org/10.3133/sir20105070>.
- Brown M. 1994. The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma: migmatite-to-crustally-derived granite connection on thickened orogeny. *Earth Science Reviews*, 36: 83~100.
- Cao Chuanghua, Cheng Yuntao, Zou Guangjun, Huang Jianzhong, Liu Junfeng, Wen Chunhua, Meng Debao, Liu Jianxin, Lou Fasheng, Deng Juzhi. 2022&. Deep electrical structure and its control on rare metal mineralization of Mufu Mountain—Meixian in northeastern of Hunan Province, China. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 32(4): 1175~1186.
- Chen Jianfeng, Wen Chunhua, Huang Jianzhong, Zhang Jinxu, Wang Cheng, Tang Yong, Lü Zhenghang, Zhou Fangchun, Chen Hu, Cao Chuanghua, Chen Yupeng. 2021&. Characteristics of No. 7 pegmatite and pyroxene diorite in Renli rare metal deposit, south margin of Mufushan batholiths and its geological implications [J/OL]. *Geotectonica et Metallogenesis*. <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2021.05.018>.
- Chen Yanjing, Xue Lizhi, Wang Xiaolei, Zhao Zhongbao, Han Jinsheng, Zhou Kefa. 2021&. Progress in geological study of pegmatite-type lithium deposits in the world. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2971~2995.
- Chu Yang, Lin Wei, Faure Michel, Xue Zhenhua, Ji Wenbin, Feng Zhentian. 2019. Cretaceous episodic extension in the South China Block, East Asia: evidence from the Yuechengling Massif of central South China. *Tectonics*, 38: 1~28. <https://doi.org/10.1029/2019TC005516>.
- Du Yangsong, Zhou Xunro. 1989&. An experimental analogy to the conditions of formation of the Mesozoic volcanic intrusive complexes in the coastal area of southeastern Zhejiang Province. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 25(1): 83~91.
- Feng Zuohai, Wang Chunzeng, Wang Baohua. 2009&. Granite magma ascent and emplacement mechanisms and their relation to mineralization process. *Journal of Guilin University of Technology*, 29(2): 183~194.
- Guo Fei, Wang Zhilin, Xu Deru, Dong Guojun, Ning Juntao, Wang Zhan, Deng Teng, Yu Deshui, Cui Yu. 2018&. Genesis of the Lishan Pb—Zn—Cu polymetallic deposit in northeastern Hunan Province: evidences from the geology, mineralogy and sulfur isotope, *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 54(2): 366~385.
- Gu Fei, Wang Zhilin, Xu Deru, Yu Deshui, Dong Guojun, Ning Juntao, Kang Bo, Peng Erke. 2020&. Trace element characteristics of sphalerite in the Lishan Pb—Zn—Cu polymetallic deposit in Hunan Province and the metallogenetic implications. *Earth Science Frontiers*, 27(4): 66~88.
- Hunan Institute of Geology Survey. 2017&. *The Regional Geology of China*, Bejing: Hunan Province. Geological Publishing House.
- Ji Wenbin, Lin Wei, Faure Michel, Chen Yan, Chu Yang, Xue Zhenhua. 2017. Origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous peraluminous granitoids in the northeastern Hunan Province (middle Yangtze region), South China: Geodynamic implications for the Paleo-Pacific subduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 141: 174~193.
- Jiang Pengfei, Li Peng, Li Jiankang, He Xuemei, Leng Shuangliang. 2021&. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic composition of Be-pegmatites in Maiguo deposit, eastern Mufushan, and their geological implications. *Mineral Deposits*, 40(4): 723~739.
- Lapierre H, Jahn B M, Charvet J, Yu Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274(4): 321~338.
- Leng Shuangliang, Tan Chao, Huang Jingmeng, Zhou Bao. 2018&. Metallogenetic law of rare metals in the Mufushan granite area. *Resources Environment & Engineering*, 32(3): 351~357.
- Li Anbang, Huang Qin, Feng Chao, Yang Xihua, Yan Ganggang, Zhao Zijuan, Dong Xiangjie, Zhu Mingming, Zhang Jinyang. 2021&. Genesis of Mufushan pegmatite deposits constrained by U-Pb ages and trace elements of zircon from complex granitic batholith. *Earth Science*, 46(12): 4517~4532.
- Li Leguang, Wang Lianxun, Tian Yang, Ma Changjian, Zhou Fangchun. 2019&. Petrogenesis and rare-metal mineralization of the Mufushan graniticpegmatite, South China: insights from in situ mineral analysis. *Earth Science*, 44(7): 2532~2550.
- Li Peng, Li Jiankang, Pei Rongfu, Leng Shuangliang, Zhang Xu, Zhou Fangchun, Li Shengmiao. 2017&. Multistage magmatic evolution and cretaceous peak metallogenetic epochs of Mufushan composite granite mass: Constrains from geochronological evidence. *Earth Science*, 42(10): 1684~1696.
- Li Peng, Li Jiankang, Zhang Liping, Huang Zhibiao, Liu Xiang, Zhou Fangchun, Zeng Le. 2019a&. Discovery and significance of Huangbaishan rare metal pegmatite concentration area on southern margin of Mufushan. *Mineral Deposits*, 38(5): 1069~1076.
- Li Peng, Liu Xiang, Li Jiankang, Huang Zhibiao, Zhou Fangchun, Zhang Liping. 2019b&. Petrographic and geochemical characteristics of Renli—Chuanziyu No. 5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenetic age. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1374~1391.
- Li Peng, Zhou Fangchun, Li Jiankang, Liu Xiang, Huang Zhibiao, Zhang Liping. 2020&. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the concealed granite of Renli—Chuanziyu deposit, NE Hunan and geological significance. *Geotectonica et Metallogenesis*, 44(3): 486~550.
- Li Peng, Li Jiankang, Liu Xiang, Li Chao, Huang Zhibiao, Zhou Fangchun. 2020. Geochronology and source of the rare-metal pegmatite in the Mufushan area of the Jiangnan orogenic belt: A case study of the giant Renli Nb—Ta deposit in Hunan, China. *Ore Geology Reviews*, 116, 103237.
- Li Peng, Zhang Liping, Li Jiankang, Huang Zhibiao, Zhou Fangchun, Jiang Pengfei. 2021&. Metallogenetic regularity of rare metal deposits in Mufushan area of Central China, and its application in ore prospecting. *Mineral Deposits*, 40(4): 819~814.
- Li Peng, Li Jiankang, Chen Zhenyu, Liu Xiang, Huang Zhibiao, Zhou Fangchun. 2021. Compositional evolution of the muscovite of Renli pegmatite-type raremetal deposit, Northeast Hunan, China: Implications for its petrogenesis and mineralization potential. *Ore Geology Reviews*, 138: 104380.
- Li Pengchun, Xu Deru, Chen Guanghao, Xia Bin, He Zhanli, Fu Gonggu. 2005&. Constraints of petrography, geochemistry and Sr—

- Nd isotopes on the Jinjing granitoids from northeastern Hunan province, China: implications for petrogenesis and geodynamic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 921~934.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and post orogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model. *Geology*, 35: 179~182. <https://doi.org/10.1130/G23193A.1>.
- Lin Wei, Wei Wei. 2018. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Craton and its adjacent regions: A review and synthesis. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2018.1477073
- Liu Xiang, Zhou Fangchun, Huang Zhibiao, Li Jiankang, Zhou Houxiang, Xiao Guoqiang, Bao Yunhe, Li Peng, Tan Liming, Shi Weike, Su Junnan, Huang Xiaoqiang, Chen Hu, Wang Xuanmin, Lin Yue, Liu Xiaomin. 2018&. Discovery of Renli superlarge pegmatite-type Nb-Ta polymetallic deposit in Pingjiang, Hunan Province and its Significances. *Geotectonica et Metallogenesis*, 42(2): 235~243.
- Liu Xiang, Zhou Fangchun, Li Peng, Li Jiankang, Huang Zhibiao, Shi Weike, Huang Xiaoqiang, Zang Liping, Su Junnan. 2019&. Geological characteristics and metallogenetic age of Renli rare metal orefield in Hunan and its prospecting significance. *Mineral Deposits*, 38(4): 771~791.
- Ma Tieqiu, Chen Lixin, Bai Daoyuan, Zhou Kejun, Li Gang, Wang Xianhui. 2009&. Zircon SHRIMP dating and geochemical characteristics of Neoproterozoic granites in southeastern Hunan. *Geology in China*, 36(1): 65~73.
- Ren Jianye, Tamaki Kensaku, Li Sitian, Zhang Junxia. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3~4): 175~205.
- Shan Liang, Ke Xianzhong, Pang Yingchun, Liu Jiajun, Zhao Xinmin, Wang Jing, Kang Bo, Zhang Kun. 2017&. Zircon La-ICP-MS U-Pb chronology, Lu-Hf isotopic characteristics and its geological significance of the Neoproterozoic magma activity in Lishan area from the northeastern Hunan Province. *Geological Science and Technology Information*, 36(6): 32~42.
- Shi Hongcui, Shi Xiaobin, Yang Xiaoqiu, Jiang Haiyan. 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.
- Shi Weike, Zhou Fangchun, Liu Xiang, Li Peng, Huang Zhibiao, Wen Chunhua, Chen Qianran, Su Junnan, Huang Xiaoqiang, Zhang Zhonglong, Zhang Liping, Chen Hu, Liu Junfeng, Hu Xiaofang. 2020&. Geological characteristics and the prospecting significance of the spodumene-muscovite pegmatite in the Renli ore-field, Hunan Province. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 817~835.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin. 2002&. Late Mesozoic tectonism of southeast China. *Geological Review*, 48(3): 249~260.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Yu Xinqi, Wang Bin, Zu Fuping. 2004&. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China. *Geological Bulletin of China*, 23(9~10): 876~884.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Wang Bo, Jiang Shaoyong, Yu Jinhai, Zhao Xixi. 2009. Mesozoic tectonic evolution of the southeast China block: New insights from basin analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 376~391. doi: 10.1016/j.jseas.2008.06.004.
- Shu Liangshu, Yao Jinlong, Wang Bo, Faure M, Charvet J, Chen Yan. 2021. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block. *Earth-Science Reviews*, 103596, doi: org/10.1016/j.earscirev.2021.103596.
- Uyeda S, Kanamori H. 1979. Back-Arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research*, 84 (B3): 1049~1061.
- Wan Tianfeng, Zhu Hong. 2002&. Tectonics and environment change of Meso—Cenozoic in China continent and its adjacent areas. *Geoscience*, 16(2): 107~118.
- Wang Jing, Jin Wei, Tian Yang, Li Leguang, Ke Xianzhong, Long Wenguo. 2020&. New progress in 1:50 000 regional geological survey in the area of Yueyang, Hunan Province—Tongcheng, Hubei Province. *South China Geology*, 36(3): 213~220.
- Wang Zhen, Chen Zhenyu, Li Jiankang, Li Peng, Xiong Xin, Yang Han, Zhou Fangchun. 2019&. Indication of mica minerals for magmatic—hydrothermal evolution of Renli rare metal pegmatite deposit. *Mineral Deposits*, 38(5): 1039~1052.
- Wang Xiang, Lou Fasheng. 2022&. On the ore-forming period of magmatic—hydrothermal deposits—A case study of the Yanshanian tungsten deposits in the Nanling Range. *Geological Review*, 68(2): 507~530.
- Watson M P, Hayward A B, Parkinson D N, Zhang Z M. 1987. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore China. *Marine and Petroleum Geology*, 4(3): 205~225.
- Wen Chunhua, Chen Jianfeng, Luo Xiaoya, Li Shengmiao. 2016&. Geochemical features of the Chuanziyuan rare metal pegmatite in northeastern Hunan, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(1): 171~177.
- Wen Chunhua. 2017&. Mineralogical—Geochemical characteristics and ore potentiality studies of pegmatite in southern margin of the Mufushan area, Hunan province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(1): 67~74.
- Xiong Yiqu, Jiang Shaoyong, Wen Chunhua, Yu Haoyu. 2020. Granite—pegmatite connection and mineralization age of the giant Renli Ta-Nb deposit in South China: Constraints from U-Th-Pb geochronology of coltan, monazite, and zircon. *Lithos*, 358~359: 105422.
- Xu Chang, Li Jiankang, Shi Guanghai, Li Peng, Liu Xiang, Zhang Liping. 2019&. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of porphyaceous biotite granite in south margin of Mufushan and their geological implications. *Mineral Deposits*, 38(5): 1053~1068.
- Xu Deru, Zou Fenghui, Ning Juntao, Deng Teng, Wang Zhilin, Chen Genwen, Zhang Jianling, Dong Guojun. 2017a&. Discussion on geological and structural characteristics and associated metallogeny in northeastern Hunan Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 695~715.
- Xu Deru, Deng Teng, Dong Guojun, Ning Juntao, Wang Zhilin, Zhang Junling, Zou Fenghui, Zhou Yueqiang, Chen Genwen, Yu Deshui, Ye Tingwei. 2017b&. Zircon U-Pb geochronological and geochemical characteristics of the Lianyunshan two-mica monzogranites in northeastern Hunan Province: implications for petrogenesis and tectonic setting associated with polymetallic mineralization. *Earth Science Frontiers*, 24(2): 104~122.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, Shu Liangshu, Wang Ruirui. 2009&. Early Mesozoic geotectonic processes in South China. *Geology in China*, 36(3): 573~593.
- Yang Han, Chen Zhenyu, Li Jiankang, Li Peng, Xiong Xin, Wang Zhen, Zhou Fangchun. 2019&. Relationship between the mineralization and the evolution of mica and feldspar components of Renli—Chuanziyuan No. 5 Pegmatite, northeast Hunan. *Mineral Deposits*, 38(4): 851~866.
- Yang Wencai. 2018&. Crustal density imaging of Yangtze Craton and

- Formation of the Yanshanian granites in South China. Geological Review, 64(5): 1045~1054.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Dong Yunpeng, Yao Anping. 2011&. Continental geology, tectonics and dynamics. Earth Science Frontiers, 18(3): 1~12.
- Zhang Kun, Hu Junliang, Xu Deming. 2012&. Geochemistry of granite and its relationship with mineralization in Taolin Pb-Zn deposit, Hunan Province. Geology and Mineral Resources of South China, 28 (4): 307~314.
- Zhang Jin, Ma Zongjin, Chen Bihe, Wang Zongxiu, Li Tao. 2010&. Paleozoic deformational characteristics of the central Xuefeng Mt. And implication—A case study on the Suning—Jiangzhou—Tianzhu—Xinhuang section, China. Geological Bulletin of China, 29(1): 44~57.
- Zhang Liping, Huang Xiaoqiang, Su Junnan, Li Peng, Liu Xiang, Li Jiankang, Zeng Le, Xu Meiling, Liu Qingqi. 2020&. On zonation of rare-metal pegmatite in the South of the Mufushan granite intrusive in northeast Hunan. Acta Geologica Sichuan, 40(3): 375~381.
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, Shu Liangshu. 2009&. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in south China during the Early Mesozoic. Earth Science Frontiers, 16 (1): 234~247.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 2012&. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 257~279.
- Zheng Yadong, Wang Tao, Wang Xinshe. 2007&. The maximum effective moment criterion (MEMC) and related geological structures. Earth Science Frontiers, 14(4): 49~60.
- Zhou Fangchun, Liu Xiang, Li Jiankang, Huang Zhibiao, Xiao Guoqiang, Li Peng, Zhou Houxiang, Shi Weike, Tan Liming, Su Junnan, Chen Hu, Wang Xuanmin. 2019a&. Metallogenetic characteristics and prospecting direction of Renli super-large rare metal deposit in Hunan Province, China. Geotectonica et Metallogenesis, 43(1): 77~91.
- Zhou Fangchun, Li Jiankang, Liu Xiang, Li Peng, Huang Zhibiao, Shi Weike, Su Junnan, Chen Hu, Huang Xiaoqiang. 2019b&. Geochemical characteristics and genetic significance of ore bodies in Renli Nb-Ta deposit, Hunan Province. Acta Geologica Sinica, 93 (6): 1392~1404.
- Zhou Fangchun, Huang Zhibiao, Liu Xiang, Su Junnan, Huang Xiaoqiang, Wang Zhen, Chen Hu, Zhang Zongdong, Luo Xiaorong, Li Jianbin, Li Zhenhong, Zhang Liping, Zeng Le, Li Xuming. 2020&. Re-Os dating of molybdenite from the Renli Nb-Ta deposit, Hunan province, and its geological significance. Geotectonica et Metallogenesis, 44(3): 476~485.
- Zou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. 2009&. Some Neoproterozoic geological events involved in the development of the Jiangnan Orogen. Geological Journal of China Universities, 15(4): 453~459.
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, Shu Lianshu, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in south China: a response to tectonic evolution. Episodes, 29(1): 26~33.
- Zhou Yueqiang, Xu Deru, Dong Guojun, Chi Guoxiang, Deng Teng, Cai Jianxin, Ning Juntao, Wang Zhilin. 2021. The role of structural reactivation for gold mineralization in northeastern Hunan Province, South China. Journal of Structural Geology, doi: 10.1016/j.jsg.2021.104306.

## Mesozoic tectono—magmatic characteristics and their control on rare metal pegmatites in Mufushan area, northeastern Hunan

BAI Daoyuan<sup>1)</sup>, WEN Chunhua<sup>1)</sup>, HUANG Jianzhong<sup>1)</sup>, LI Bin<sup>1, 2)</sup>, ZHOU Fangchun<sup>3)</sup>,  
ZHANG Liping<sup>3)</sup>, CHEN Hu<sup>3)</sup>, CHEN Jianfeng<sup>1)</sup>, CHEN Xu<sup>1)</sup>

1) Hunan Institute of Geology Survey, Changsha, 410016;

2) State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, 330013;

3) Hunan Institute of Geological Disaster Investigation and Monitoring, Changsha, 410100

**Objectives:** Yanshanian large granite is developed in Mufushan (Mufu Mountains) area, with a large number of granitic pegmatite veins and related rare metal deposits or mineralized bodies formed. Although the predecessors have systematically studied the geological and geochemical characteristics, formation ages, spatial distributions and evolution processes of granite, pegmatite and rare metal deposits in this area, and achieved a lot of results, there is still a lack of research on the controlment of geological structures on granite and rare metal pegmatite.

**Methods:** In view of this, through the investigation of several geological sections across the contact zone of Mufushan granite, combined with the characteristics of regional geology and mineral development, this paper studied the Mesozoic tectono—magmatic evolution and the controlment of structures on granite, pegmatite veins and contact metamorphic zones in Mufushan area.

**Conclusions:** The main achievements are as follows:

(1) From Mesozoic to early Cenozoic, the study area experienced 7 tectonic stages, from early to late, such as ① marine basin of Early—Middle Triassic, ② Indosinian movement of late Middle Triassic to Late Triassic, ③ semi-foreland basin of late Late Triassic—early Middle Jurassic, ④ Early Yanshanian movement of late Middle Jurassic, ⑤ granitic magmatism and mineralization of Late Jurassic to early Early Cretaceous, ⑥ regional extension and faulted basins of late Early Cretaceous to middle Paleogene, and ⑦ NE compression in the middle—late Paleogene.

(2) The boundary of Mufushan granite is mainly controlled by three groups of fault with NW-, NE- and NEE-trending, whose structural mechanism is essentially the controlment of fault blocks in or outside the granite area on the magma emplacement.

(3) The granite emplacement structures of the granite can be qualitatively divided into four types: low emplacement—gently dipping contact structure, low emplacement—steep dipping contact structure, high emplacement—gently dipping contact structure and high emplacement—steep dipping contact structure. Among them, low emplacement—gently dipping contact structure is the most favorable for the formation of granitic pegmatite.

(4) The structures controlling pegmatite veins include the dominant controlling structures such as bedding or interlayer shear planes, thrust faults, granite contact zones, and the restrictive controlling structures such as strike-slip shear fractures and axials of kink. The interlayer shear planes were mainly formed during the Wuling Movement; EW- and NWW-trending thrust faults, NWW-trending axials of kink, NNE-trending sinistral shear fractures and NNW-trending dextral shear fractures were formed under SN compression of Indosinian Movement; NWW-trending dextral shear fractures were formed under NWW compression of Early Yanshanian movement. The strike of the structures in Renli area is the result of the later superposition of clockwise rotation.

(5) Controlled by the granite contact zone and planar structures of different types and scales, the scale of pegmatite dikes in the surrounding rocks in Renli area changes from large to small, the occurrence of dikes changes from simple to complex, and the main ore-forming elements change from Nb—Ta —>Nb—Ta—Li—Cs from north to South.

**Keywords:** Mufushan (Mufu Mountains); Mesozoic; granite; pegmatite; tectonic evolution

**Acknowledgements:** This article is a research achievement of the key research and development project of Hunan Provincial Department of Science and Technology (No. 2019SK2261), the project supported by the open fund of the Key Laboratory of nonferrous metal metallogenic prediction and geological environment monitoring of the Ministry of Education (No. 2021YSJS04), and the scientific research project of Geological Bureau of Hunan Province (No. HNGSTP202105, 201917)

**First and corresponding author:** BAI Daoyuan, male, born in 1967, senior engineer, is mainly engaged in regional geological survey and basic geological research; Email: daoyuanbai@sina.com

**Manuscript received on:** 2022-08-13; **Accepted on:** 2022-10-31; **Network published on:** 2022-12-20

**Doi:** Doi: 10.16509/j.georeview.2022.12.023

**Edited by:** GAO Zuoyu