

# 南岭中段中生代构造-岩浆活动 与成矿作用研究进展

柏道远 马铁球 王先辉 张晓阳 陈必河

(湖南省地质调查院, 湖南湘潭 411100)

**摘要:**对南岭中段北部湘东南地区中生代构造-岩浆活动及成矿作用进行了较系统研究,主要提出以下认识。(1)中三叠世后期—中侏罗世初(早中生代)为板内造山阶段。中三叠世后期在区域 NWW—SEE 向挤压构造体制下发生强烈的陆内俯冲、汇聚作用,形成大量东倾为主的 NNE 向逆冲断裂与褶皱。其中茶陵—郴州断裂以东隆起区的隔槽式褶皱形成机制为“厚皮式”而非“薄皮式”。NW 向基底隐伏断裂产生强烈左旋走滑,并使构造线产生逆时针旋转,形成了安仁“y”字型构造和水口山—香花岭南北向构造。挤压造山使地壳持续大幅增厚、深部地壳温度持续升高。中三叠世末—晚三叠世后期(233~210 Ma)区域挤压应力松弛,被加热的中地壳下部岩石熔融,同时存在幔源性岩浆底侵,从而于后碰撞环境下产生较大规模的花岗质岩浆活动。晚三叠世末—早侏罗世因同造山上隆伸展作用而形成裂陷盆地,中侏罗世初期在区域 NNE 向左旋汇聚走滑体制下形成逆冲断裂及山前冲断收缩盆地、NW 向右旋走滑断裂等。早中生代板内造山活动的动力机制主要与板块汇聚的远程挤压效应有关。(2)中侏罗世早期—白垩纪(晚中生代)为后造山—陆内裂谷伸展阶段。中侏罗世早期—晚侏罗世(174~135 Ma)因岩石圈拆沉而发生大规模花岗质岩浆活动与成矿作用。岩体的被动就位机制、暗色镁铁质微粒包体的发育、Sr—Nd 同位素特征、以(高钾)钙碱性岩类为主的岩石组成、构造环境的岩石地球化学判别、大规模有色金属成矿、区域构造演化背景等,指示该时期为后造山构造环境。白垩纪进入强烈的陆内伸展阶段,形成盆—岭构造和相关的离散走滑断裂,广泛发育各类岩脉,局部形成 AA 型花岗岩小岩体和基性火山岩。热年代学资料暗示盆—岭构造的演化先后经历了构造剥蚀和风化剥蚀—沉积两个阶段。(3)造成湘东南燕山早期花岗岩成矿能力远高于印支期花岗岩的原因,主要是区域构造环境暨构造体制差异,即燕山早期后造山伸展构造体制下岩体中矿质更易于向周围扩散并沉淀,而印支期后碰撞环境弱挤压体制下矿质则被封闭;其次是花岗岩岩石地球化学特征差异,即构造—岩浆演化历史和深部成矿流体的参与使燕山早期花岗岩具有更好的成矿岩石地球化学条件。(4)燕山早期钨锡多金属和铅锌多金属两类矿床组合的形成可能主要与岩石圈结构(厚度)和深部热扰动强度,以及相应的岩浆作用规模和岩体侵位深度等因素有关。

**关键词:**中生代;构造变形;岩浆活动;构造演化;成矿机制;湘东南

**中图分类号:**P588.12<sup>+</sup>1;P56 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2008)03-0436-20

湘东南地区属南岭构造带中段北部,地处扬子与华夏地块的交接地带(图 1)。区内中生代构造-岩浆活动强烈,并形成多个大型-超大型有色金属矿床。近年来笔者在该地区进行了 1:25 万区域地质调查,并承担了“湘东南中生代构造演化与成矿”研究专题,对中生代构造-岩浆活动及成矿作用进行了重点研究。笔者

就项目进展与成果认识予以系统介绍,并在项目成果基础上对部分问题进行了再认识。

## 1 区域地质及中生代构造演化概况

长期的多旋回的构造发展历史,形成了湘东南地区地层、构造、岩浆岩以及矿产诸方面复杂的地质

收稿日期:2007-12-03;改回日期:2008-02-20

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(200213000035)和湖南省“湘东南中生代构造演化与成矿”项目(2003-3)资助。

作者简介:柏道远,男,1967年生,教授级高级工程师,研究方向:构造学、岩石学、成矿学;E-mail:daoyuanbai@sina.com。

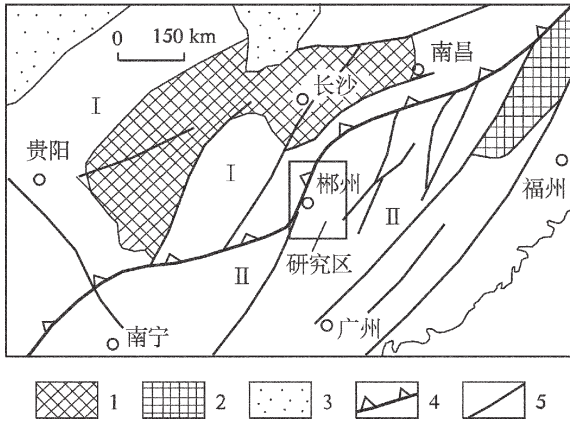


图 1 研究区大地构造位置图(据参考文献[1]修改)

I—扬子板块; II—华夏板块; 1—扬子基底隆起; 2—华夏基底隆起; 3—中生代盆地; 4—板块结合带; 5—断裂

Fig.1 Tectonic location of the study area (modified from Wang[1], 2000)

I—Yangtze block; II—Cathaysia block; 1—Yangtze basement uplift; 2—Cathaysia basement uplift; 3—Meso-Cenozoic basin; 4—Plate junction zone; 5—Fault

面貌(图 2)。

中元古代在洋盆环境下沉积了巨厚的冷家溪群陆源碎屑浊积物(区内未出露),中元古代末至新元古代早期扬子与华夏碰撞造山,盆地封闭。新元古代后期开始拉张裂解,至奥陶纪期间该区为陆内裂谷盆地<sup>[2]</sup>,沉积了一套以复理石、类复理石为主夹少量硅质岩与碳酸盐岩的岩系。志留纪发生加里东造山

运动,使区内前泥盆纪地层强烈褶皱,形成构造线近东西向的褶皱基底,尔后于后造山环境下形成志留纪花岗岩体<sup>[3]</sup>。本区中泥盆世开始再次发生区域伸展作用形成陆内海盆,沉积了中泥盆世跳马涧组—中三叠世早期石镜组,为一套稳定环境下以碳酸盐岩为主,陆源碎屑岩为次,并有少量硅质岩的陆表海沉积。

中三叠世晚期至白垩纪期间进入陆地环境阶段,经历了陆内碰撞→后碰撞→后造山→陆内裂谷的发展过程<sup>[4,5]</sup>(表 1),地质作用以多阶段构造变形与岩浆活动以及燕山早期为主的大规模成矿作用为特色。

中三叠世后期(II<sub>1</sub>)在区域 NWW—SEE 向挤压构造体制下发生强烈的陆内俯冲汇聚,造成区内泥盆纪—中三叠世早期地层褶皱回返,海洋盆地封闭,形成大量 NNE 向为主的逆冲断裂与褶皱,并使陆壳大幅增厚。走向 NNE、倾向 SE 的茶陵—郴州大断裂为主俯冲断裂,其活动形成东部隆起(炎陵—汝城隆起带)、西部拗陷(衡阳—桂阳拗陷带)的一级构造面貌。NWW—SEE 向挤压使常德—安仁和邵阳—郴州等 NW 向基底隐伏断裂产生强烈左旋走滑<sup>[6,7]</sup>。中三叠世末—晚三叠世后期(II<sub>2</sub>)挤压相对松弛,因地壳增厚而升温的深部地壳熔融,所形成花岗质岩浆在相对开放环境下向上侵位,形成了诸广山、桂东、锡田、将军庙、五峰仙、王仙岭等地的印支期后碰撞花岗岩体。晚三叠世末—早侏罗世(II<sub>3</sub>)为伸展

表 1 湘东南中生代地质事件序列的初步框架

Table 1 Preliminary framework of the Mesozoic geological events in southeast Hunan

年代/Ma	阶段	构造体制	火山与沉积建造	侵入岩组合	构造变形与变质作用	成矿作用	
K	陆内裂谷 IV	伸展	红色碎屑岩建造, 玄武岩-流纹岩	辉绿岩-煌斑岩	盆-岭构造, 正断裂	Sn,Nb,Ta,Bc	
135							
J <sub>3</sub>	后造山 III	伸展, 末期短 暂挤压		二长花岗岩-花岗闪长岩- 正长花岗岩	切割侏罗纪花岗岩的压扭 性断裂	大规模有色 金属成矿	
157							
174	J <sub>2</sub>	II <sub>4</sub>	汇聚走滑	类磨拉石			
178							
J <sub>1</sub>	陆内 造山 II	II <sub>3</sub>	伸展	含煤建造, 玄武岩	正断裂与断陷盆地		
205							
210		T <sub>3</sub>	II <sub>2</sub>	挤压松弛	二长花岗岩-花岗闪长岩		
227							
233	T <sub>2</sub>	II <sub>1</sub>	NWW-SEE 向 挤压		NNE 向褶皱与冲断构造, NW 向基底走滑断裂等		
241	前造山 I	弱伸展	海相碳酸盐 岩-碎屑岩				

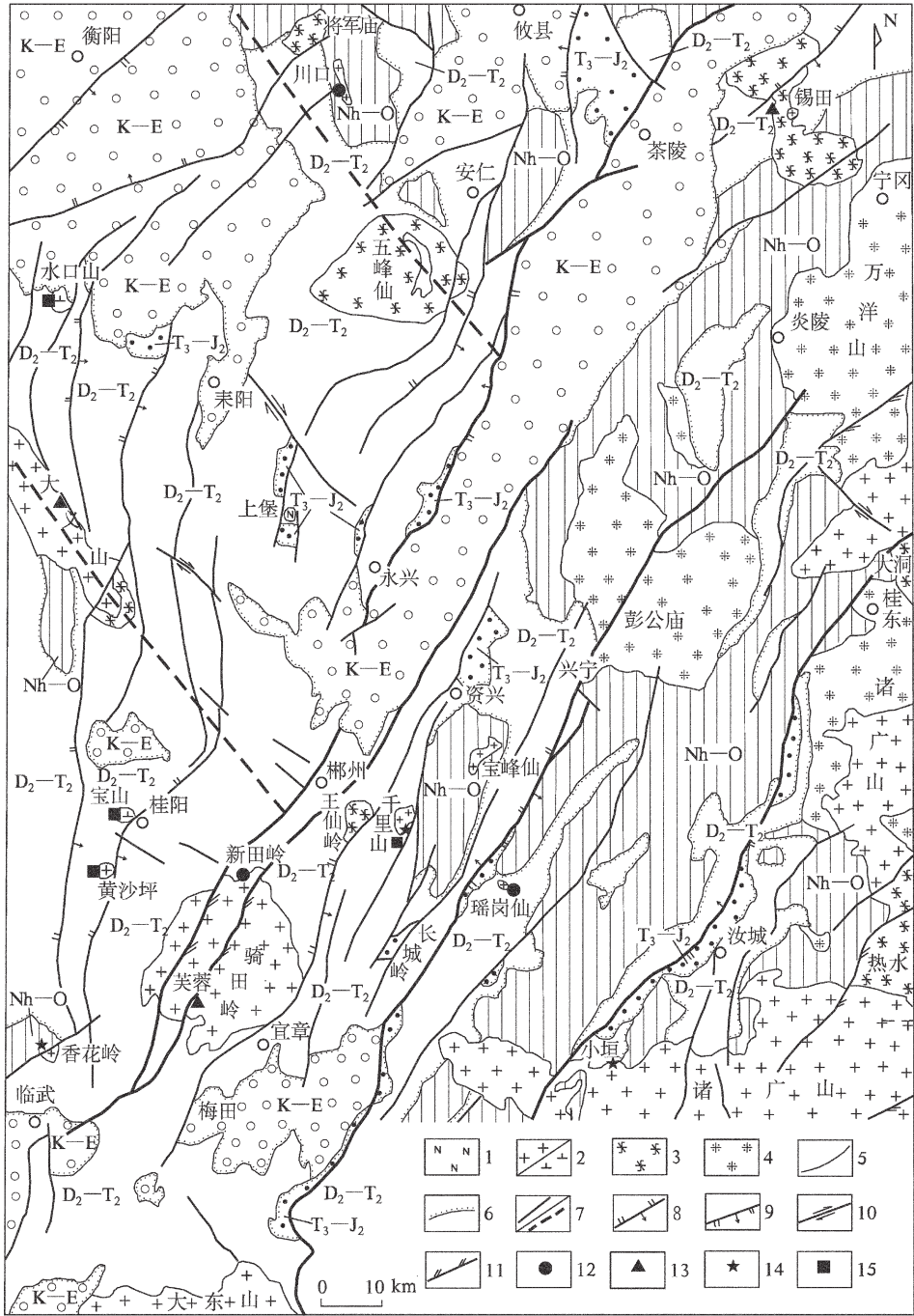


图2 湘东南地质矿产略图

K-E—白垩纪—古近纪地层; T<sub>3</sub>-J<sub>2</sub>—晚三叠世—中侏罗世地层; D<sub>2</sub>-T<sub>2</sub>—中泥盆世—中三叠世地层; Nh-O—南华纪—奥陶纪地层; 1—白垩纪花岗岩; 2—侏罗纪花岗岩/花岗闪长岩; 3—印支期花岗岩; 4—加里东期花岗岩; 5—地质界线; 6—角度不整合地质界线; 7—断裂; 8—逆断裂; 9—正断裂; 10—平移断裂; 11—压扭性断裂; 中高温矿床组合: 12—钨矿; 13—锡矿; 14—钨锡多金属矿; 中低温矿床组合: 15—铅锌(铜)矿

Fig.2 Geological and mineral resource sketch map of southeast Hunan

K-E—Cretaceous—Paleogene; T<sub>3</sub>-J<sub>2</sub>—Late Triassic—Middle Jurassic; D<sub>2</sub>-T<sub>2</sub>—Middle Devonian— Middle Triassic; Nh-O—Nanhuaian—Ordovician. 1—Cretaceous granite; 2—Jurassic granite/granodiorite; 3—Indosinian granite; 4—Caledonian granite; 5—Geological boundary; 6—Unconformity; 7—Fault; 8—Reverse fault; 9—Normal fault; 10—Strike-slip fault; 11—Transpressional fault; Meso- and hypothermal deposit assemblage: 12—Tungsten deposit; 13—Tin deposit; 14—Tungsten-tin-polymetallic deposit Meso- and epithermal deposit assemblages; 15—Lead-zinc (or copper) deposit

环境,形成 NNE 向裂陷含煤盆地,并在长城岭、汝城有高 Na 低 K 的拉斑玄武岩喷发。中侏罗世初期(Ⅱ<sub>4</sub>)发生 NNE 向左旋汇聚走滑,发育逆冲断裂且前期裂陷盆地反转成为山前冲断收缩盆地<sup>[8]</sup>。中侏罗世早期—晚侏罗世(Ⅲ)发生大规模花岗质岩浆活动与成矿作用,形成大义山、香花岭、川口、骑田岭、千里山、诸广山等大量花岗岩体,以及水口山、黄沙坪、柿竹园、瑶岗仙等一批大型—超大型矿床。侏罗纪末期可能存在一次挤压事件,形成一些切割侏罗纪花岗岩体(如骑田岭岩体)的 NNE-NE 向压扭性断裂形迹。白垩纪(Ⅳ)可能进入陆内裂谷阶段,伸展构造体制下形成盆-岭构造、双峰式火山岩和次火山岩,局部发育 AA 型花岗岩特征的小型岩体(上堡岩体)等。

## 2 早中生代板内造山活动特征

### 2.1 中三叠世后期强挤压构造活动

中三叠世后期发生印支运动,使研究区泥盆纪—中三叠世早期地层褶皱回返,海盆地封闭,造成晚三叠世末—侏罗纪陆相盆地沉积与中三叠世早期及以前地层之间的角度不整合。在 NW-SEE 向挤压构造体制下发生强烈的陆内俯冲、汇聚作用,形成大量 NNE 向为主的逆冲断裂与褶皱(图 2),构成区内主体构造格架。NNE 向断裂与褶皱轴面大多倾向东,反映自南东往北西逆冲的构造指向。其中茶陵—郴州大断裂为块体边界主俯冲断裂,断裂北西盘向南东盘的俯冲作用造就了东部隆起(炎陵—汝城隆起带)、西部坳陷(衡阳—桂阳坳陷带)的一级构造面貌,东部隆起区主要出露前泥盆纪褶皱基底,而西部坳陷区则主要分布泥盆纪—中三叠世沉积盖层。

在茶陵—郴州断裂以东隆起带内的印支期褶皱具隔槽式褶皱样式,并主要由泥盆纪跳马涧组与前泥盆纪褶皱基底间的不整合界面的变形所显示<sup>[9,10]</sup>。不整合界面(界线)的平面与剖面形态反映出背斜平缓开阔、向斜紧闭狭窄且侧翼呈上拱尖棱状的隔槽式褶皱特征:平面上,向斜出露宽度及延伸规模明显较背斜小,向斜转折端表现清楚且狭窄尖长,而背斜转折端没有清楚显示;剖面上,不整合界面靠近向斜核部产状陡,向两翼方向迅速变缓。前人曾指出区内隔槽式褶皱由中泥盆统一中下三叠统沉积盖层沿与前泥盆纪基底间不整合面发生滑脱所形成<sup>[11]</sup>。然而鉴于印支期褶皱呈 NNE 向横跨叠加在前泥盆纪褶

皱基底中的加里东期 EW-NWW 向褶皱之上,褶皱基底在印支运动中没有发生明显的弯滑褶皱作用;露头显示褶皱过程中盖层未沿不整合界面产生明显滑脱。因此上述隔槽式褶皱成因不同于经典的薄皮式滑脱模式,而应形成于基底横向收缩与压扁作用(厚皮式)<sup>[9,10]</sup>,其机制可能类似于窗棂构造(表现为宽而圆的背形和尖而窄的向形)(图 3);刚性的褶皱基底相当于窗棂构造的强硬层,上面的沉积盖层则相当于软弱层。盖层所构成的向斜“槽”并非由盖层沿其与基底间的界面滑脱所产生,而是随下伏基底发生收缩变形所产生的顶面向形或凹槽被动弯曲所形成。褶皱基底的收缩可能与俯冲造山作用造成褶皱基底与结晶基底之间发生大规模拆离<sup>[11]</sup>相耦合。

在茶陵—郴州断裂以西坳陷带内的印支期褶皱主要为中泥盆世—中三叠世地层变形的类侏罗山式褶皱,褶皱具有波长小且大小不一、垂向上褶皱不协调等特征,并伴生大量走向断裂,说明褶皱受不同层位软弱层顺层滑脱作用控制,且深层机制应与下伏基底收缩(图 3)和断裂逆冲活动有关<sup>[10]</sup>。

本次研究表明,邵阳—郴州和常德—安仁两条 NW 向主干断裂(南东段)在这次构造事件中产生过强烈的左旋走滑<sup>[6,7]</sup>。此两条断裂地表实体形迹发育较差,更多体现在岩浆岩的线状或带状分布,属较典型的基底隐伏断裂。在印支运动区域 NW-SEE 向挤压应力下,邵阳—郴州 NW 向断裂南东段及香花岭—阳明山 NW 向断裂产生基底左旋走滑,派生出近 EW 向挤压应力场并对区域构造线产生牵引,使区域 NNE 向构造线产生逆时针旋转而形成水口山—香花岭 SN 向构造带<sup>[6]</sup>。常德—安仁断裂的基底左旋走滑同样派生出近东西向挤压应力场并由走滑产生牵引作用,使安仁以西 NNE 向构造线产生逆时针旋转,从而形成 NNW 向褶皱。安仁以东由于紧邻 NNE 向茶陵—郴州主俯冲汇聚断裂,NW 向

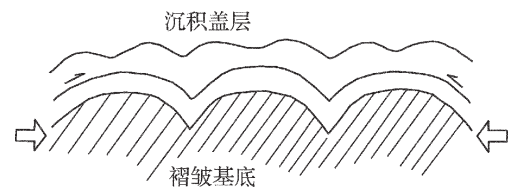


图 3 隔槽式褶皱形成机制—基底压缩示意图

Fig. 3 Mechanism of trough-like folds

断裂走滑量相对较小,派生应力与牵引效应小,而区域 NWW 向挤压应力大,从而于断裂两侧均形成与区域构造线一致的 NNE 向褶皱。上述 NNW 向与 NNE 向褶皱在平面上组成了“y”字型不协调构造<sup>[7]</sup>。常德—安仁断裂的左旋走滑对应于其北东面更强的挤压作用,使断裂北东面相对其南西面隆起(图 2)。

需要指出的是,对于 NW 向主干断裂的活动时代与成因等曾有多种认识。傅昭仁等<sup>[11]</sup>、李建威等<sup>[12]</sup>、李先福等<sup>[13]</sup>认为 NW 向断裂是燕山期 NNE 向陆内左旋走滑主断裂所派生的反向(右旋)R'断裂。彭和求等<sup>[14]</sup>认为邵阳—郴州断裂的东南段大义山一带在燕山期具左旋走滑,邱先前等<sup>[15]</sup>笼统提出邵阳—郴州断裂在印支—燕山运动时期表现出左行性质,但未作具体论述。笔者通过对常德—安仁和邵阳—郴州两条 NW 向断裂南东段相关褶皱构造及构造线的空间展布与变化特征等进行详细解析,明确了 NW 向基底隐伏断裂在印支运动中具有强烈的左旋走滑活动<sup>[6,7]</sup>。例如,根据卷入地层(上古生界)并结合构造变形期次分析,上述与 NW 向基底隐伏断裂左旋走滑密切相关的水口山—香花岭一带的南北向断裂与褶皱,无疑应形成于印支运动;其南北向定位也不可能由区域印支期 NNE 向经后期(燕山期)构造改造所形成,而应在印支期变形的同时定位<sup>[9]</sup>。

由于褶皱收缩和断片叠置,中三叠世后期强挤压构造活动无疑使地壳产生了巨大的增厚,这一事实可从热年代学研究得到佐证。对印支期五峰仙岩体进行的热年代学研究表明<sup>[16]</sup>,其在黑云母 K-Ar 封闭温度后冷却速率仅 2.07°C/Ma,说明冷却至 300°C 时岩体与围岩已基本达到热平衡,据此推断岩体侵位深度约在 10 km 以上。但现今岩体南面出露地层为早石炭世石磴子组—晚三叠世龙潭组,根据研究区中三叠世以前海相盖层的地层序列,意味着正常情况下岩体上覆盖层厚度只有 2300~4000 m,因此上覆围岩在岩体侵位之前可能因构造叠置产生了 6000~7700 m 的加厚。值得指出的是,这还只是地壳浅部增厚量,地壳整体增厚量可能更大。

鉴于本次构造事件形成于中三叠世早期海相沉积之后,造成晚三叠世末—侏罗纪陆相盆地沉积与中三叠世早期及以前地层之间的角度不整合;中三叠世末—晚三叠世后期印支期花岗岩形成于挤压作用减弱和应力相对松弛的条件之下(见后述),且花岗岩体未受本次构造事件之断裂切割作用,如产在

常德—安仁北西向断裂中的五峰岩体内未发育明显的 NW 向断裂形迹,因此这次构造变形的具体时代应为中三叠世后期。

## 2.2 中三叠世末—晚三叠世后期后碰撞花岗质岩浆活动

### 2.2.1 印支期花岗岩概况及物质来源

湘东南地区发育较多印支期花岗岩(图 2)。本次于锡田岩体中获得  $228.5 \pm 2.5$  Ma 的锆石 SHRIMP 年龄<sup>[17]</sup>,结合其他较为可靠的已有年龄资料,印支期花岗岩的具体时限为 233~210 Ma<sup>[4]</sup>,即中三叠世末—晚三叠世后期。印支期花岗岩总体属高钾钙碱性过铝质花岗岩,并可根据岩石特征差异分为 2 组<sup>[18]</sup>。第一组产于茶陵—郴州断裂以西的衡阳—桂阳拗陷区内 NW 向深断裂(常德—安仁断裂和邵阳—郴州断裂)中,包括大义山岩体南体和五峰仙岩体,其由角闪石黑云母花岗闪长岩、角闪石黑云母二长花岗岩和黑(二)云母二长花岗岩等组成;SiO<sub>2</sub> 平均含量总体较低,为 69.68%;大多为弱过铝,ASI 值为 0.96~1.29,平均为 1.08;具有相对较低的  $I_{Sr}$  值(0.7080~0.7168)和  $t_{2DM}$  值(1.48Ga~1.72 Ga),以及相对较高的  $\varepsilon Nd(t)$  值(-8.90~-5.83)。第二组位于茶陵—郴州断裂以东的炎陵—汝城隆起区及断裂以西衡阳—桂阳拗陷区将军庙次级隆起带,包括王仙岭、大洞、热水、将军庙等岩体,其由黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩组成;SiO<sub>2</sub> 平均含量相对较高,为 72.23%;总体为 ASI 值大于 1.1 的强过铝花岗岩,ASI 值 1.01~2.60,平均达 1.30;具有相对较高的  $I_{Sr}$  值(0.7159~0.7345)和  $t_{2DM}$  值(1.81 Ga~1.97 Ga),以及相对较低的  $\varepsilon Nd(t)$  值(-12.0~-9.85)。

已有研究表明,湘桂内陆带花岗岩的  $t_{DM}$  背景值为 1.8~2.4 Ga<sup>[19,20]</sup>;华夏地块的大部分地区基底岩石的  $t_{DM}$  在 1.8~2.4 Ga<sup>[21]</sup>。上述第二组花岗岩的  $t_{2DM}$  值为 1.81 Ga~1.97 Ga,与湘桂内陆带花岗岩背景值和区域基底的  $t_{2DM}$  值相吻合,指示源岩应为区域结晶基底。而第一组花岗岩的  $t_{2DM}$  值(1.48~1.72 Ga)明显小于区域花岗岩背景值和区域基底的  $t_{2DM}$  值,暗示其在形成过程中很可能有地幔物质的加入; $\varepsilon Nd(t)$  值相对较高,与相对较低的  $t_{2DM}$  值反映的信息一致。

上述第二组花岗岩为铝饱和指数(ASI 值)很高的强过铝花岗岩,应为典型 S 型壳源花岗岩<sup>[22,23]</sup>。第一组花岗岩铝饱和程度明显偏低,大多为弱过铝质,

暗示有更深部的物质加入。而 A/MF-C/MF 图解亦反映类似信息:图中第一组花岗岩成分点明显偏向基性岩区,总体位于碎屑岩区与基性岩区的过渡区域;而第二组花岗岩投点总体落在变质泥质岩与变质杂砂岩区<sup>[18]</sup>。结合王方正等<sup>[24]</sup>建立的湘南地区地壳结构模型(自上而下依次为浅变质岩和沉积岩组成的上地壳、结晶片岩和片麻岩等组成的酸性中地壳、(角闪)辉长岩—斜长岩等组成的基性下地壳),推断上述位于隆起区(带)内的第二组花岗岩源岩主要为中地壳结晶片岩、片麻岩等碎屑岩,而位于拗陷区内的第一组花岗岩源岩除中地壳岩石外,可能还有少量下地壳基性麻粒岩成分的加入<sup>[18]</sup>。

### 2.2.2 印支期花岗岩成因机制

根据上述花岗岩特征、产出构造部位及物源分析,结合构造演化背景,推断印支期花岗岩的形成主要与地壳增厚导致的增温以及幔源基性岩浆的底侵有关。

在岩石圈地温状态达稳态平衡或正常地温梯度条件下,由于区域地温曲线距离源区岩石固相线很远而难以熔融<sup>[25]</sup>。但王岳军等<sup>[26]</sup>进行的数值模拟表明,地壳挤压变形加厚至 45 km 时产生的热效应可以造成中地壳下部大规模熔融,从而形成现状规模的湖南印支期花岗岩。根据王岳军等<sup>[26]</sup>的分析思路,笔者提出湘东南印支期花岗质岩浆形成的挤压增厚熔融机理是:中三叠世后期陆内挤压造山过程中的褶皱收缩和断片叠置造成地壳强烈增厚,使单位截面积垂向柱体内的放射性生热量(或生热率)显著增高,同时断裂活动也产生出大量的剪切热,从而使深部地壳增温而打破了先期地温状态的稳态平衡。随着构造变形的持续进行,当地壳具有足够的增厚、深部地壳热量的积聚与温度的增高达到一定程度时,便引起中地壳下部的结晶片岩、片麻岩较大规模熔融(主要是白云母矿物脱水熔融<sup>[26]</sup>)而形成印支期花岗质熔浆。此外,印支期花岗岩体的地质特征显示于挤压减弱或应力松弛环境下就位(见后述),因此减压导致岩石熔点降低也是引起岩石熔融的叠加因素之一。

受矿物熔融温度条件限制,当研究区中、下地壳界面之上的片岩、片麻岩等熔融时,界面之下的基性麻粒岩类不可能熔融<sup>[26]</sup>。由此可以推断,上述第一组花岗岩中基性岩成分的加入很可能是由于源于地幔的玄武质岩浆底侵加热使下地壳熔融所致。第一组

花岗岩中存在地幔物质加入的印记(如前述),湖南道县 224 Ma 左右的辉长岩包体表明湘南早中生代早期即已存在基性岩浆的底侵作用<sup>[27]</sup>,数值模拟表明基性岩浆底侵能导致湘东南印支期地壳的深熔<sup>[26]</sup>等,亦均为存在底侵加热作用的推断提供了支持。

结合物源和构造背景分析,地壳增厚的热扰动与基性岩浆底侵加热两种机制对上述 2 组花岗岩形成的影响应存在差异。印支运动中,茶陵—郴州大断裂西盘向东俯冲消减,使断裂东盘因板片叠置而具有更大的厚度并相对隆起;相对五峰仙—大义山一带拗陷区而言,将军庙次级隆起带因印支运动中受到更强烈的挤压也具有相对更大的地壳厚度<sup>[7]</sup>。因此,产于隆起区带内的第二组花岗岩对应于更大的地壳增厚量,岩浆的形成主要与增厚热扰动导致中地壳下部片岩、片麻岩类熔融有关。可能由于地壳厚度较大,或是缺少深部断裂提供运移通道等缘故,与基性岩浆底侵相关的地幔物质及下地壳基性麻粒岩熔融物未能向上加入中地壳岩浆房,使得第二组花岗岩表现为典型的陆壳重熔型强过铝花岗岩。相反,第一组花岗岩产于拗陷区内的 NW 向深断裂中,因地壳增厚量相对较小,增厚热效应产生的中地壳熔浆相对较少;由于有断裂与深部沟通,且相对较薄的陆壳使深部物质更易于向上运移到中地壳岩浆房中,基性岩浆底侵作用产生的下地壳熔融物,以及少量地幔物质得以向上加入到中地壳片岩、片麻岩熔融岩浆房中,从而形成基性程度相对较高的花岗闪长岩,并具低  $t_{DM}$  年龄等 Sr-Nd 同位素特征。考虑到未见同期基性火山岩出露的事实,区内印支期花岗岩的形成机制总体上应以增厚热效应为主,基性岩浆底侵作用为辅。

### 2.2.3 印支期花岗岩形成的构造环境

花岗岩构造环境研究在 20 世纪 90 年代后期随着后碰撞构造环境和相关术语的提出而取得重要进展。1997 年在法国召开的“后碰撞岩浆作用”国际花岗岩会议将“后碰撞作用”单独划分出来,指时间比碰撞作用晚,但仍与碰撞作用有关系的构造作用。根据会议对碰撞作用、后碰撞作用、晚造山作用、板内环境的涵义所作的新规定,理想的造山演化过程为同造山→后造山→非造山(板内裂谷),其中同造山阶段经历了活动边缘(大洋板块的俯冲)→同碰撞(陆块初始主碰撞)→后碰撞演化过程<sup>[28]</sup>。笔者讨论花岗岩构造环境即参照上述概念。

湘东南地区印支期花岗岩体均未显示出明显的主动强力就位形迹,而是以受断裂控制的被动侵位机制为主。以王仙岭岩体与五峰仙岩体为例:王仙岭岩体岩石主要具块状构造;岩体长轴方向呈 NNE 向,与区域 NNE 向主干断裂方向一致;岩体边界线与围岩地层走向斜交或直交,反映出被动侵位机制<sup>[29]</sup>。五峰仙岩体边界线与围岩地层产状总体呈斜交或直交,岩体南面局部岩层产状呈与岩体边界一致的趋势,同样反映出被动侵位机制为主和弱挤压或挤压应力松弛环境下侵位<sup>[18]</sup>。如前述,常德—安仁北西向断裂在中三叠世后期挤压事件中产生过强烈左旋走滑活动,但产于其中的印支期五峰岩体内、岩体边部及接触带却未见明显的同侵位期 NW 向断裂活动的形迹。以上表明,印支期花岗岩是在印支运动强挤压变形之后,挤压减弱、应力相对松弛(但仍为挤压)的后碰撞环境下所形成。与此相一致,在 Maniar et al<sup>[30]</sup>提出的多组主元素构造环境判别图解和 Pearce et al<sup>[31]</sup>多组微量元素构造环境判别图解中,印支期花岗岩总体显示为同造山阶段后碰撞构造环境<sup>[18]</sup>。

基于后碰撞环境的认识,推断印支期花岗质岩浆活动于印支期主挤压增厚事件的末期开始。由于陆内主造山阶段(变形峰期阶段)的强挤压使地壳持续增厚,因此在强挤压—增厚过程的末期地壳增厚量达到最大,增厚热效应使深部地壳温度达到最高,导致中地壳下部熔融而出现花岗质岩浆活动。另一方面,在变形峰期之后区域挤压作用减弱,应力相对松弛,深部压力降低,也有助于岩石因熔点降低而熔融,并在相对开放的环境下向上侵位成岩。以上应是印支运动主变形期无花岗质岩体发育的主要原因。如前述,湘东南印支期花岗质岩浆活动具体时限为中三叠世末—晚三叠世后期,前后跨时约 23 Ma (233~210 Ma)。花岗质岩浆活动的结束显然与深部温度的下降密切相关。理论上,地壳增厚升温事件是在先期岩石圈稳态平衡温度场背景上所产生的热扰动事件,在增厚作用结束后,由于热传导机制下的能量散失会使深部地壳温度开始降低,直到温度场重新达稳态平衡。王岳军等<sup>[29]</sup>针对湖南印支期花岗质岩浆活动所进行的热模拟计算表明,在热传导机制控制下温度场达稳态平衡的时间约为 24 Ma,与上述约 23 Ma 的岩浆活动时间刚好吻合。此外,岩石熔融消耗热量也无疑是深部岩石温度降低的原因之

一,而熔融过程中低熔点的白云母持续消耗也会造成岩浆活动的减弱。

### 2.3 晚三叠世末至中侏罗世初构造变形与陆相盆地

湘东南地区发育晚三叠世末—中侏罗世初的陆相盆地,盆地大多呈窄条状分布于 NNE 向断裂旁侧,主要发育于茶陵、永兴、资兴、瑶岗仙、汝城等地。盆内地层自下而上为晚三叠世杨梅垅组、唐垅组,早侏罗世心田门组、高家田组,中侏罗世千佛岩组等。晚三叠世和早侏罗世地层总体为一套灰—灰绿色陆相湖盆砂、页岩夹煤层沉积,各地层单位间多为整合接触,唐垅组以其底部砾岩与杨梅垅组间呈假整合接触,显示出盆地形成过程中构造体制的脉动性。中侏罗世地层总体为粒度较粗的碎屑岩沉积。由于陆相盆地的差异性及后期剥蚀等原因,不同盆地地层发育完整性存在差异,部分盆地缺失下部晚三叠世地层。前人认为该期盆地为单一收缩盆地<sup>[11]</sup>。本次通过汝城盆地的重点解剖,发现盆地实际经历了 2 个具不同构造属性的发展阶段<sup>[8]</sup>,晚三叠世末—早侏罗世(早阶段)为同造山上隆伸展裂陷盆地,中侏罗世初期(晚阶段)为山前冲断收缩盆地。

汝城盆地早侏罗世心田门组与高家田组主要为内陆湖泊—沼泽相碎屑岩沉积,夹有明显受地壳混染并具低钾高钠特征的板内拉斑玄武岩<sup>[32]</sup>,暗示岩浆在形成至喷出地表曾受到过封闭以及有限拉张环境,早侏罗世盆地具同造山上隆伸展裂陷性质<sup>[8]</sup>。中侏罗世初期千佛岩组与下伏高家田组呈平行不整合接触;千佛岩组下部地层具类磨拉石沉积特征,上部地层中局部含高家田组玄武质火山碎屑;盆地中地层呈西倾单斜式,盆地西缘为逆断裂所压覆等,表明中侏罗世初期汝城盆地为挤压收缩盆地,形成于造山构造环境<sup>[8]</sup>。

晚三叠世末至早侏罗世的断陷盆地可能与由山根的均衡补偿产生的隆升和陡的地形梯度诱发的应力驱动,以及印支期岩浆热事件后的热衷减或冷却收缩有关,是一种造山崩塌或同造山上隆伸展。由于后期反转挤压构造形迹的叠加等原因,该期裂陷盆地相关的伸展断裂形迹已难以确认和甄别。

中侏罗世初期盆地转换的构造背景颇为清楚。该时期区域构造体制为 NNE 向左旋走滑兼挤压<sup>[11]</sup>,茶陵—郴州深大断裂成为区内一级走滑主断裂,受其深部汇聚走滑作用控制,于两侧陆块内形成大量

NNE 向次级压扭性断裂(常叠加在印支期断裂之上产生继承性活动),它们在地表常表现为逆冲性质,且东侧陆块内的断裂一般倾向西,并组成晚三叠世末—侏罗纪沉积盆地的西边界;而西侧陆块内的断裂一般倾向东,并组成盆地的东边界,从而与主走滑断裂一道构成典型的正花状构造。这些表层逆冲断裂直接导致晚三叠世末—早侏罗世裂陷盆地力学性质发生反转,成为山前冲断收缩盆地,从而造成两期不同性质盆地的原地叠加。此外,NNE 向左旋走滑断裂还派生出大量 NE 向压扭性断裂<sup>[11]</sup>和一些小规模 NW 向右旋平移断裂<sup>[6]</sup>。

## 2.4 早中生代板内造山活动的动力机制

由前述可知,湘东南地区早中生代(中三叠世后期—中侏罗世初)总体属板内造山阶段,而造山运动属性主要体现在中三叠世后期 NWW-SEE 向强烈挤压作用下的陆内俯冲、汇聚作用,以及中侏罗世初期的 NNE 向汇聚走滑活动。其间则为中三叠世末—晚三叠世后期后碰撞环境下的花岗质岩浆活动,以及晚三叠世末—早侏罗世同造山上隆伸展作用,其均为中三叠世后期强烈陆内挤压造山的后效过程。板内造山一般被认为主要与板块汇聚的远程挤压效应有关<sup>[33,34]</sup>。亦有研究提出不同观点,如邵济安等<sup>[35]</sup>通过大兴安岭的研究提出伸展造山机制,其“造山”概念大致等同于“成山”;罗照华等<sup>[36]</sup>提出太行山中生代板内主造山期的挤压作用环境可能与幔源岩浆的注入和/或地壳本身的受热膨胀(花岗质岩浆活动)有关。据前文所述,湘东南早中生代板内造山过程显然源于区域挤压而非伸展,其间的花岗质岩浆活动是强烈挤压造山过程之后的结果,板内造山的根本力源与岩浆作用无关。因此,笔者认为湘东南早中生代的造山活动与板块运动的远程挤压效应有关<sup>[33]</sup>。事实上,湘东南及周边地区在印支运动中处于区域 NWW 向挤压应力场中,反映在湘中—湘东南及其邻侧桂东北、粤西北的广大区域内印支期主体构造线均呈 NNE 向(部分 NE 向)。

值得指出的是,研究区印支期 NWW 向挤压与华南地区总体近南北向挤压<sup>[37]</sup>或近东西向构造线<sup>[38]</sup>存在差异。其原因应与多板块格局<sup>[37]</sup>下复杂的边界条件有关,很可能系太平洋板块向北西挤压以及先期扬子地块与华夏地块 NE(E)向接合边界控制所致。有研究表明,在印支形变期华南以扬子块体为中心,并受到藏滇和印支板块向北推挤、华北板块向南

冲以及来自东南方向(古太平洋)的强烈挤压<sup>[1]</sup>,说明太平洋板块运动在湘东南及湘粤赣边区的印支运动构造变形中可起到重要作用。

## 3 晚中生代后造山岩浆活动及陆内伸展构造演化

### 3.1 中—晚侏罗世后造山岩浆活动与大规模成矿事件

继上述早中生代板内造山之后,湘东南开始发生大规模花岗质岩浆活动。根据本次获得锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、黑云母 <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 年龄等样品<sup>[17,39-41]</sup>,结合其他已有年龄资料,确定本期花岗岩的具体时限为 174~135 Ma<sup>[4]</sup>,即中侏罗世—晚侏罗世。近年来新获得的侏罗纪岩体大量锆石 SHRIMP U-Pb 法定年、黑云母 <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 法年龄主要集中于 154~163Ma 年龄段内,反映该时期为燕山早期花岗岩浆活动的高峰期。侏罗纪花岗岩在研究区内最为发育,主要有诸广山大部分岩体、万洋山岩体南部、川口、大义山北体、宝峰仙、千里山、瑶岗仙、骑田岭、香花岭、大东山等岩体(图 2)。岩石类型主要有黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩、二云母碱长花岗岩、黑云母正长花岗岩、黑云母花岗闪长岩等。

研究区燕山早期花岗岩体一般均无明显的主动侵位定向组构发育,亦未见同侵位挤压剪切构造形迹;岩体大多位于断裂(带)中,且岩体长轴方向与断裂走向一致,显示出岩体沿张性断裂充填的就位机制,如骑田岭岩体<sup>[45]</sup>和宝峰仙岩体<sup>[43]</sup>。燕山早期花岗岩体中大多发育大量因岩浆混合作用形成的暗色镁铁质微粒包体,如千里山岩体、骑田岭岩体<sup>[46]</sup>、诸广山南体<sup>[47]</sup>等。燕山早期花岗岩  $I_{\text{Sr}}$  值较低,一般为 0.706~0.720;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -6.14~-9.8,比典型的华南壳源型花岗岩明显偏高; $t_{\text{DM}}$  多在 1.22~1.76 Ga,比起华南中生代花岗岩的背景  $t_{\text{DM}}$  值(为 1.7~1.8 Ga)明显偏低<sup>[4]</sup>。上述均暗示燕山早期花岗岩形成过程中地幔物质的明显加入、壳幔相互作用及伸展构造环境。结合早中生代板内造山过程,且印支期花岗岩已具后碰撞花岗岩特征,进一步推断中—晚侏罗世花岗质岩浆活动时期已进入后造山阶段。与此相一致,在 Maniar et al<sup>[30]</sup>提出的多组主元素构造环境判别图解以及 Pearce 等<sup>[31]</sup>的微量元素构造环境判别图解中,燕山早期花岗岩大多明确显示为“后造山”环境,如骑田岭岩体<sup>[45]</sup>、千里山岩体<sup>[29]</sup>、宝峰仙岩



体<sup>[43]</sup>、诸广山南体<sup>[47]</sup>、大东山岩体<sup>[44]</sup>、川口岩体<sup>[48]</sup>等。此外,骑田岭岩体主体岩石具有后造山 A<sub>2</sub> 型花岗岩特征<sup>[45]</sup>。后造山花岗质岩浆活动的深层机制可能主要与岩石圈的拆沉有关(见下文 4.3 节)。

在后造山拉张构造环境下,伴随巨量花岗岩浆形成与大量花岗岩体的侵位,由于壳幔相互作用、深部能量和物质及大量深源或幔源流体向浅部传输,与地壳表层大量的张性构造(断裂与裂隙)和流体配套,组成巨大的岩浆-流体-成矿系统,形成了水口山铅锌金多金属矿、黄沙坪铅锌矿、柿竹园钨锡多金属矿、骑田岭芙蓉锡矿、瑶岗仙钨矿等一批著名的大型-超大型矿床,使研究区成为巨大的有色金属矿集区。

侏罗纪末期可能受太平洋板块俯冲挤压应力远程传导<sup>[33]</sup>的影响,区域构造体制发生短暂反转,在挤压条件下形成了切割侏罗纪花岗岩体的 NNE-NE 向压扭性断裂形迹。

值得指出的是,近些年来关于华南燕山早期花岗岩形成的构造环境一直存有争议,主要有“后造山”<sup>[49,50]</sup>和“大陆裂谷”<sup>[51,52]</sup>两种观点。出于以下考虑,笔者认为“后造山”认识更为合理。第一,华南南岭地区分布面积大、发育极为广泛的燕山早期花岗岩类主要为(高钾)钙碱性岩类,这种花岗岩常作为同碰撞岩石圈加厚之后伸展垮塌、向非造山板内活动过渡时期的岩浆作用产物出现,而陆内裂谷环境中则以发育数量很少的正长岩、二长岩等为主。第二,湘东南地区燕山早期发育大量与花岗岩有关的 W、Sn、Mo、Bi、稀有、稀土等金属矿床,其指示相关构造环境为“后造山”的可能性更大,因为这种富集成矿作用在大陆裂谷中一般是不发育的<sup>[53]</sup>。第三,如前所述,燕山早期花岗质岩浆活动是紧随早中生代板内造山过程之后发生,尤其是印支期花岗岩已具后碰撞(同造山后期)花岗岩特征,按“同造山→后造山”的一般构造演化规律,更可能为后造山环境。第四,沿湘南宁远—新田、湘东南宜章、汝城、赣南龙南—寻坞和闽西南永定等存在一条绵延长达 500 km 但宽仅 60 km 左右的早侏罗世末—中侏罗世初玄武质火山岩带,据认为源于软流圈地幔上涌和岩石圈伸展减薄<sup>[54,55]</sup>,可能属大陆裂谷环境的产物。但已有研究认为其形成机制是太平洋板块向西挤压中国东南部,使得早期近 EW 向断裂重新活化拉张所致<sup>[56,57]</sup>;而笔者对湘东南地区的研究认为与同造山上

隆伸展作用有关(见前述)。因此,该火山岩带代表的可能是华南燕山早期局部“裂解带”,并不指示整个华南地区已进入陆内裂谷发展阶段。

### 3.2 白垩纪陆内伸展构造活动

继中—晚侏罗世后造山花岗质岩浆活动之后,白垩纪进入更强烈的陆内伸展阶段,形成大量陆相红色断陷盆地和相关的 NNE 向离散走滑断裂,广泛发育各类岩脉,局部形成 AA 型花岗岩和基性火山岩等。

在陆内大规模伸展构造环境下,形成数量众多、大小不一的陆相断陷盆地,如衡阳盆地、攸县盆地、茶永(茶陵—永兴)盆地、临武盆地、宜章盆地等。盆地中地层主要为白垩纪红色砂砾岩、砂岩、泥岩等,局部发育古近纪泥灰岩。控盆断裂主要为 NNE 和 NW 向 2 组,并以 NNE 向居主导地位,断裂常为叠加在早中生代断裂之上的继承性断裂。断陷盆地与盆地间相对隆起的山岭组成典型的盆-岭构造;部分与山岭相关的变质褶皱基底和花岗岩基在正向滑脱断裂控制下呈断块迅速抬升。

本次盆-岭耦合事件得到热年代学资料的支持。研究表明<sup>[10]</sup>,大义山岩体和骑田岭岩体分别为 146.4~121.6 Ma 和 135.4~94.11 Ma 期间存在一次快速隆升,隆升剥蚀幅度达 4.7 km 左右。从空间位置来看,大义山岩体隆升与北面的衡阳盆地相耦合,骑田岭岩体与南面的宜章盆地相耦合(图 2)。上述同位素年龄数据显示大义山岩体快速隆升较骑田岭岩体早约 10 Ma。与此相对应,衡阳盆地沉积时间也明显早于宜章盆地:前者连续充填了早白垩世至古新世地层,而后者只有晚白垩世沉积<sup>[10]</sup>。颇有意味的是,上述大义山岩体和骑田岭岩体在燕山晚期的快速隆升时间分别早于其对应盆地的沉积充填时间,原因可能与构造活动机制有关<sup>[10]</sup>:盆-岭构造的形成首先是上部地壳自山体向外剥离伸展,其造成山体隆升和浅表地壳变薄——构造剥蚀,然后开始发生隆起区的风化剥蚀和盆地的沉积作用。由此可见,盆地沉积实际上滞后于相邻山岭的隆升剥蚀(包括构造剥蚀)作用。从此意义上讲,大义山和骑田岭岩体隆升的热年代学时间比对应盆地的沉积时间早,正好反映出燕山晚期的区域伸展构造活动。

区内发育大量白垩纪辉绿岩、煌斑岩等基性岩脉,及花岗岩斑岩与石英斑岩等酸性岩脉,但未见同期中性岩脉。汝城盆地中辉绿岩全岩 K-Ar 年龄为

( $112.1 \pm 3.2$ )Ma<sup>[32]</sup>, 九峰一带辉绿岩 K-Ar 年龄为 87.3 Ma, 酸性花岗质岩浆时代为 130~85 Ma<sup>[4]</sup>, 表明基性与酸性岩脉时代相近, 可构成双峰式次火山岩组合。发现的侵入花岗岩体只有永兴北西面的上堡岩体, 面积仅 2.1 km<sup>2</sup>, 为黑云母二长花岗岩, 其地球化学特征及相关图解显示为陆内裂谷环境的 AA 型花岗岩<sup>[4]</sup>。衡阳盆地冠市街一带发育有玄武岩, 夹于白垩纪神皇山组砂-泥岩中, 全岩 K-Ar 年龄为 71.8 Ma (笔者研究略偏低)。在临武南强盆地白垩纪戴家坪组中发育有流纹岩、流纹质火山角砾岩。

上述上堡 AA 型花岗岩、广泛发育的断陷盆地、双峰式次火山岩及衡阳盆地内的玄武岩等, 暗示白垩纪可能为燕山早期后造山之后的陆内裂谷环境。

## 4 燕山早期花岗岩成矿动力学机制

湘东南地区中生代有色金属成矿具有两个重要特征, 一是成矿岩体主要为燕山早期花岗岩, 发育较广的印支期花岗岩成矿很差<sup>[58,59]</sup>; 二是总体可分为中高温的钨锡多金属和中低温的铅锌多金属两类矿床组合, 各主要矿区或矿床通常以某一类型为主<sup>[60]</sup>。造成印支期与燕山早期两阶段花岗岩成矿差异, 以及形成燕山早期两类矿床组合的主要原因或深层机制是什么? 以下基于构造-岩浆活动特征和成矿作用理论对这两个关键问题进行探讨。

### 4.1 印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系

就钨锡多金属成矿花岗岩 (通常为 S 型花岗岩) 本身而言, 其成矿能力及成矿专属性主要取决于与成矿作用直接相关的成矿元素、挥发分和生热元素等组分含量, 以及氧化状态 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ) 和酸碱度等。一般而言, 岩石中成矿元素、挥发分和放射性元素含量越高, 氧化程度越低 (相对还原), 钾、碱越富集, 则越有利于钨锡成矿作用的进行。此外, 通常钨锡多金属成矿花岗岩 Li、Be、Rb 等稀有金属含量越高、Rb/Sr 比值越大、 $\delta \text{Eu}$  值越低则岩体具有更强的成矿能力, 其很大程度上与岩浆经历了更充分的分异结晶有关。

对与钨锡多金属有关的湘东南印支期与燕山早期 S 型花岗岩地球化学分析数据进行的统计表明<sup>[58]</sup>: (1) 燕山早期花岗岩与印支期相比, 总体上前者酸性程度略高于后者,  $\text{SiO}_2$  含量前者平均为 73.09%, 后者平均为 71.99%; 前者  $\text{K}_2\text{O}$  与全碱含量相对较高,

平均分别为 5.24% 和 8.13%, 后者分别为 4.68% 和 7.32%; 碱度指数 (NKA) 前者平均 0.80, 后者平均 0.69。 (2) 放射性产热元素含量燕山早期花岗岩明显高于印支期花岗岩, 前者 Th、U 含量 (微量元素含量单位均为  $\mu\text{g/g}$ , 下同) 平均分别为 44.1 和 15.5, 后者分别为 28.6 和 13.3。 (3) 燕山早期花岗岩挥发分含量及稀有金属含量相对较高, 主要组分平均含量为 F 2728、Li 146、Be 8.3、Rb 574; 印支期花岗岩分别为 F 1956、Li 144、Be 9.3、Rb 420。 (4) 主要成矿元素 W、Sn 含量, 燕山早期花岗岩平均值分别为 32.5 和 31.8, 印支期花岗岩分别为 11.1 和 21.2 (不考虑王仙岭岩体中极高值), 总体而言前者明显高于后者。 (5) 燕山早期花岗岩与印支期花岗岩相比: 前者  $\delta \text{Eu}$  值相对较小, 平均 0.23, 而后者平均 0.37; 前者 Rb/Sr 比值更高, 平均 32.9, 后者平均 18.1; 前者氧化程度相对较低,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值平均为 0.43, 后者平均为 0.65。

由上可见, 根据花岗岩 W、Sn 多金属成矿与岩石地球化学特征关系的论述, 湘东南燕山早期花岗岩相对印支期花岗岩显然具有更好的钨锡多金属成矿条件: 其成矿元素 W、Sn, 放射性生热元素 U、Th, 挥发分元素 F 及稀有金属 Be、B、Li、Rb 等组分的含量更高, 岩石氧化程度更低而碱性程度与岩浆分异演化程度更高。因此, 岩石地球化学特征差异应该是燕山早期花岗岩成矿能力明显或远远高于印支期花岗岩的主要原因之一。

造成两阶段花岗岩地球化学特征差异的原因可能与构造-岩浆演化历史和构造环境差异有关。如前所述, 中三叠世末—晚三叠世后期为挤压应力减弱、地壳相对松弛的后碰撞构造环境, 因增厚而温度升高的中地壳下部岩石产生部分熔融形成岩浆, 岩浆向上侵位而形成印支期花岗岩。在弱挤压构造体制下, 部分岩浆可能在深部岩浆房中直接冷却成岩 (花岗岩)。燕山早期晚阶段 ( $J_2$ — $J_3$ ) 发生大规模后造山岩浆活动, 深部印支期花岗岩可再次产生部分熔融, 造成 W、Sn、U、Th 等强不相容元素 (亲花岗岩元素) 再次富集, 从而导致燕山早期花岗岩中成矿元素和产热元素含量更高。此外, 一般拉张构造体制下岩浆侵位过程中的分离结晶作用比挤压构造体制下更强。因此, 形成于后造山伸展环境下的燕山早期花岗岩, 总体应比形成于后碰撞弱挤压构造环境下的印支期花岗岩经历过更强的分异演化, 从而具有更高

的不相容元素(包括 W、Sn 等成矿元素,U、Th 等产热元素,Li、Rb 等微量元素等)及挥发分含量,更大的 Rb/Sr 比值,更低的  $\delta \text{Eu}$  值以及更高的碱性程度等。

此外,两阶段花岗岩与成矿能力相关的地球化学特征差异可能还与深部成矿流体的参与程度有关。诸多证据表明,深部流体的参与可能在火成岩成矿作用中起到非常重要的作用,近来罗照华等<sup>[6]</sup>强调并详细讨论了透岩浆流体成矿作用的概念。湘东南印支期 S 型花岗质岩浆形成于后碰撞弱挤压构造环境,且主要与地壳增厚热扰动引发中地壳下部熔融有关;而燕山早期花岗质岩浆形成于后造山伸展环境下,且与深部下地壳和地幔具有较好的沟通条件。因此,从透岩浆流体成矿作用出发,相对于印支期花岗岩而言,深部成矿流体更易于向上运移并加入燕山早期花岗质岩浆中,从而使燕山早期花岗岩具有更好的成矿岩石地球化学条件。

#### 4.2 构造环境暨构造体制对印支期和燕山早期花岗岩成矿能力的意义

对印支期王仙岭岩体和燕山早期千里山岩体进行深入研究后发现,构造环境暨构造体制差异可能是造成湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异的更为关键的原因<sup>[9]</sup>。

印支期王仙岭岩体与燕山早期千里山岩体相距仅 2~3 km,地表出露面积分别为 16 km<sup>2</sup> 和 11 km<sup>2</sup>,均为小岩体(图 2)。两岩体成矿情况迥异:千里山岩体周围发育有柿竹园钨锡钼铋多金属矿、野鸡尾锡多金属矿、金船塘锡铋多金属矿、岔路口钨锡钼铋多金属矿、蛇形坪铅锌矿等大中型-超大型矿床。王仙岭岩体成矿情况很差,仅有以断裂热液充填型和云英岩型为主的小型钨矿床或矿点。

千里山岩体与王仙岭岩体在空间上紧密相邻,均位于区域茶陵—郴州深大断裂的东面,王仙岭岩体甚至更靠近茶陵—郴州断裂带(图 2)。两岩体及周边均有较多不同方向与规模的断裂发育,围岩均主要为晚古生代地层,且都有大量有利于成矿的碳酸盐岩与岩体接触。因此,围岩地层及断裂特征等基本地质构造条件不大可能是造成两岩体成矿差异的主要原因。

对千里山岩体和王仙岭岩体分析数据所进行的统计表明<sup>[9]</sup>:(1)前者酸性程度较高, $\text{SiO}_2$  含量平均为 75.75%,后者平均为 72.39%;前者  $\text{K}_2\text{O}$  与全碱

(ALK)含量相对较高,平均分别为 5.32%和 7.48%,后者分别为 4.19%和 6.48%;碱度指数(NKA)前者平均为 0.78,明显高于后者的 0.57。(2)前者放射性产热元素 Th、U 含量之和平均为 69.3,明显高于后者的 41.4。(3)挥发分和稀有金属含量方面,前者 F 平均为 2937、Li 为 77.2、Be 为 7.7、Rb 为 604;后者 F 平均为 3057、Li 为 205.2、Be 为 15.1、Rb 为 587。两岩体 F、Rb 含量非常相近,而 Li、Be 含量则后者显著高于前者。(4)后者的主要成矿元素 W、Sn 含量远远高于前者,前者平均分别为 10.2、19.7,后者分别为 204、115.9。(5)前者氧化程度相对较低, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值平均为 0.28,而后者平均为 0.44,但均位于成锡花岗岩比值范围。此外,前者  $\delta \text{Eu}$  值平均为 0.14,明显小于后者的 0.29。

以上表明,尽管千里山岩体酸性与碱性程度、分异演化程度及产热元素 Th、U 含量更高,氧化程度更低,但这些指标相差并不悬殊。而在挥发分、稀有金属与成矿元素 W、Sn 含量方面,两岩体 F、Rb 含量相近,Li、Be 含量则是王仙岭岩体明显高于千里山岩体,W、Sn 含量更是前者远远高于后者。因此,从挥发分与成矿元素这两项最为关键的影响成矿作用的花岗岩地球化学因素以及指示岩体成矿能力的稀有金属含量来看,王仙岭岩体理应具有更好的成矿条件。此外,成矿性地球化学判别图解也清楚显示王仙岭岩体与千里山岩体同样具有成矿花岗岩特征<sup>[9]</sup>。由上可见,岩体本身的地球化学特征也不大可能是造成王仙岭岩体与千里山岩体成矿现状如此悬殊的主要原因。

总体上千里山岩体与王仙岭岩体在地质与地球化学特征方面存在以下几方面的显著差异<sup>[9]</sup>:(1)千里山岩体边缘有较多的发育岩脉,而王仙岭岩体则缺乏。(2)王仙岭岩体的内蚀变作用尤其是云英岩化作用明显比千里山岩体普遍、强烈,普遍的云英岩化作用伴随有明显的钨锡矿化。(3)千里山岩体与碳酸盐岩围岩接触带均发育强烈的矽卡岩化,且矿物组合复杂,而王仙岭岩体周围的碳酸盐岩围岩接触带则以大理岩化为主,矽卡岩化仅在局部明显,且为简单矽卡岩。(4)王仙岭岩体中 W、Sn 含量总体上明显高于千里山岩体。根据上述地质证据,结合两岩体形成构造环境,推断其成矿差异可能主要与不同构造环境暨构造体制有关。

印支期王仙岭岩体形成于后碰撞弱挤压环境,在总体挤压的构造体制下,水流体被封闭在岩体内,

并与花岗岩发生较充分的反应,产生普遍而强烈的内蚀变作用。另一方面,挤压条件下冷凝壳与上覆围岩未产生足够破裂,因而缺乏脉体的发育,也未能在围岩中产生普遍的矽卡岩化。由于缺乏沟通的断裂裂隙构造,熔体或花岗岩中高丰度的 W、Sn 等矿质没有得到有效扩散,造成王仙岭岩体岩石中 W、Sn 含量高但却未发生良好成矿作用。

千里山岩体的情况则恰好相反。在区域后造山构造环境的伸展构造体制下,冷凝壳与围岩产生足够的破裂,从而于岩体边部形成较多的脉体。流体沿断裂和裂隙构造上升,并与碳酸盐岩反应而形成超大规模的矽卡岩矿床。与此同时,由于水流体未被很好地封闭在岩体内,因而内蚀变作用较王仙岭岩体弱。由于相对开放的环境与良好的沟通构造条件,熔体或花岗岩中丰富的 W、Sn 等矿质被大量萃取、运移,并于接触带附近沉淀而形成矿床,从而使得现今岩体中 W、Sn 含量比王仙岭岩体低。

综上所述,认为千里山岩体与王仙岭岩体成矿差异的主要原因,是由于不同区域构造环境下构造体制或区域应力场不同所致,即前者形成于后造山环境下的伸展构造体制中,而后者则形成于后碰撞环境下的弱挤压构造体制中。不同构造体制所导致的岩体中成矿物质向外扩散与沉淀过程的不同,是造成两岩体成矿差异的关键。

需要指出的是,构造体制虽然为两岩体成矿差异的主要原因,但上覆地层厚度等也可能起到一定作用。由前述可知,湘东南地区在中三叠世末—晚三叠世后期的印支期花岗岩形成之后,经历过晚三叠世末—早侏罗世同造山上隆伸展与剥蚀过程,尔后才是燕山期花岗岩侵位。因此千里山岩体形成时上覆围岩厚度应小于王仙岭岩体形成之时,前者相对较细的粒度组成也暗示其侵位深度较小<sup>[59]</sup>。显然,较小的围岩厚度意味着更小的静岩压力,从而使熔体内部的剩余压力更大,更有利于冷凝壳破裂、矿质扩散并成矿。

值得注意的是,小规模千里山岩体的超级成矿能力,王仙岭岩体较其他同期岩体高得多的成矿元素含量,以及它们紧邻茶陵—郴州深大断裂并位于该断裂与 NW 向大义山断裂(邵阳—郴州断裂南东段)的交汇部位(图 2)等地质事实,暗示有大量深部成矿流体的影响。尽管如此,两岩体成矿能力差异的产生可能与透岩浆流体成矿作用本身关系不大。因

为根据罗照华等<sup>[60]</sup>的透岩浆流体成矿系统模型,侵位深度更大的王仙岭岩体的含矿流体更应扩散至围岩和围岩接触带中,可上述事实却正好与此相反。

以上新揭示出构造体制在成矿过程中的突出作用,发现岩体中矿质向外有效扩散对矿床形成的重要性,对指导地质找矿显然具有一定的现实意义。第一,岩体就位时构造体制的伸展性越强、侵位深度越小(但不过小而导致能量过快散失),越有利于 W、Sn 多金属矿床的形成。同时在确定岩体侵位构造体制时,应在区域构造体制基础上作更细致的具体分析,因为受构造边界条件复杂性控制,整体挤压应力场中可存在局部拉张,而整体伸展拉张应力场中亦可存在局部的挤压。第二,应辩证看待岩体中矿质含量与成矿的关系。一般情况下,岩体成矿元素含量越高对成矿越有利,找矿前景越好。但在岩浆与岩体中矿物质未向围岩和接触带及局部强矿化带有效扩散的情况下可能会出现相反的情况。因此,在根据岩体矿质含量确定找矿方向、评价找矿潜力时,还应结合其他地质背景资料(如内蚀变、外蚀变、岩脉等),尽量查明岩浆与岩体中矿物质向外围及局部地带扩散的可能性以及扩散程度。

#### 4.3 燕山早期钨锡与铅锌多金属两类矿床组合形成的构造-岩浆动力学机制

湘东南燕山早期有色金属矿床总体可分为钨锡多金属和铅锌多金属两类组合,各主要矿区或矿床通常以某一类型组合为主。两类矿床组合形成的温度条件、成矿岩体、产出构造部位等存在差异<sup>[61]</sup>。钨锡多金属矿床组合的成矿温度主要为 280~500℃,为中高温。矿体产于茶陵—郴州断裂以东隆起区以及断裂以西坳陷区内的局部隆起地带(如香花岭、大义山、川口等)(图 2)。成矿岩体为中深成 S 型花岗岩;岩体一般规模较大,千里山、香花岭等地表出露规模小的岩体深部一般亦与较大规模的隐伏岩体相连。硫、铅、氢、氧等同位素特征显示成矿物质与成矿热液主要来源于岩浆。铅锌多金属矿床组合的成矿温度主要为 150~300℃,为中低温。矿体主要产于茶陵—郴州断裂以西坳陷区内。成矿岩体主要为小规模浅成—超浅成的 I 型花岗岩体(如水口山、宝山)和 S 型花岗岩体(黄沙坪)。此外,在千里山、香花岭等部分隆起区或局部隆起地带内的中深成 S 型花岗岩体的外围亦发育一定规模的铅锌矿。矿质与成矿热液主要来源于岩浆或壳幔混源熔浆,部分来自地层。

形成燕山早期两类矿床组合的主要原因或深层机制是什么?前人一般认为与成矿岩体的岩石类型或岩浆岩成矿专属性有关,即钨锡多金属矿床与传统壳源型(S型)中深成花岗岩有关,而铅锌多金属矿床则与传统壳-幔同熔型(I型)的中酸性花岗闪长岩类有关<sup>[62]</sup>。但研究表明与黄沙坪超大型铅锌矿有关的黄沙坪花岗岩体并非I型花岗岩,其岩石地球化学类型和特征与千里山、骑田岭等传统S型花岗岩相近,而与宝山、水口山等地的I型花岗岩(花岗闪长岩类)迥然不同<sup>[63]</sup>。由此可见,岩石成因类型差异不是形成两类矿床组合的关键原因。另有研究者<sup>[64]</sup>认为是由于NNE向茶陵—郴州断裂两侧岩石圈化学成分差异所致,即断裂东侧地壳成熟度较高,有利于亲壳的不相容元素富集成矿,形成钨锡多金属矿;而茶陵—郴州断裂西侧地壳发展较稳定,下基底又富含亲幔的相容元素,因此导致深源元素富集成矿,形成中低温的铅锌多金属矿。鉴于衡阳—桂阳坳陷区为一紧邻茶陵—郴州断裂的狭长带,宽度并不大,且西侧的大义山、香花岭等岩体成矿即以钨锡多金属为主,因此岩石圈成分差异造成两侧成矿元素组合差异的可能性较小。

笔者在对湘东南地区中生代构造-岩浆活动及上述矿床地质特征统筹研究后认为,燕山早期两类矿床组合的形成可能主要与岩石圈结构(厚度)和深部热扰动强度,以及相应的岩浆作用规模和岩体侵位深度等因素有关<sup>[60]</sup>。

#### 4.3.1 钨锡多金属矿床形成机制

茶陵—郴州断裂以东隆起区因印支运动自西向东的俯冲作用而具有更厚的陆壳和地幔岩石圈,至中—晚侏罗世后造山环境下岩石圈根发生大规模拆沉(图4)。这一推断可从最新的地学大断面研究成果得到佐证:邵阳—茶陵—永新段地学断面观测结果清楚显示出茶陵—郴州断裂以东地幔岩石圈显著变薄,即岩石圈下界面自茶陵开始往东迅速抬升<sup>[65]</sup>。强烈的壳幔作用及其引起的热扰动造成中地壳结晶片岩大量熔融,形成大规模S型岩浆房。同时,少量的源于地幔和下地壳的基性岩浆也沿深部断裂上侵,混入中地壳岩浆中,从而形成具混浆特征并有地幔物质印记(如高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、低 $t_{\text{DM}}$ 值特征)的酸性岩浆。由于岩浆量大,加之壳层厚,岩浆侵位于地表下相当深度时即停止上行,从而形成中深成岩体。另一方面,源于地幔或下地壳的偏基性岩浆由于

中地壳大规模岩浆房的屏蔽和阻挡作用,未能作为独立单元在上部地壳中就位,从而使得断裂以东缺乏偏基性的I型花岗岩体发育。东面隆起区西缘的酸性岩浆沿断裂等通道往上运移,并于茶陵—郴州断裂带这一有利容岩空间定位而形成较大规模的具I型花岗岩浆加入痕迹的骑田岭岩体。在茶陵—郴州断裂西面坳陷区内香花岭、大义山等地局部隆起地带,可能由不同规模、不同范围的岩石圈拆沉或幔源岩浆的底侵等深部过程引发较强热扰动而同样形成中深成S型花岗岩体。

总之,茶陵—郴州断裂以东隆起区、断裂带内以及断裂以西坳陷区内的局部隆起地带,燕山早期因强烈的热扰动而形成大规模岩浆房,岩浆上侵形成较大规模的S型花岗岩体。由于岩浆作用规模大,W、Sn等亲花岗岩元素或强亲石元素在成熟度较高的中地壳中含量高,并经部分熔融和分异演化过程在后期岩浆中高精度、大规模富集,从而为钨锡多金属矿床的形成提供了充足的矿质条件。与此同时,由于岩浆房的屏蔽作用,深部亲铜元素(Cu)及亲石亲铜元素(Pb、Zn、Au等)在向上运移过程中大多混入岩浆房中,在岩浆侵位结晶过程中由于其相容性相对较高难以得到充分富集,因而不易在地壳上部形成规模与品位可观的矿床。此外,中深成较大规模的岩体就位时具有较高的环境温度,并能在相当长时间内持续提供成矿所需能量,亦有利于形成中高温的钨锡多金属矿床。

#### 4.3.2 铅锌多金属矿床形成机制

相对东面隆起区而言,茶陵—郴州断裂以西坳陷区陆壳和地幔岩石圈较薄,岩石圈拆沉规模小,引起的热扰动作用较弱,中地壳结晶片岩小规模熔融,产生的酸性岩浆侵位于近地表而形成酸性小岩体(图4),如黄沙坪地区的细粒斑状黑云母二长花岗岩和花岗斑岩小岩体等。与此同时,少量源于地幔和下地壳的偏基性岩浆自深部沿断裂上侵,由于结晶分异最终以中酸性岩浆侵位于近地表而形成花岗闪长质小岩体,如水口山、宝山等地岩体。由于中地壳岩浆量少,深部偏基性岩浆在上移过程中没有受到上面酸性岩浆的阻挡,或者只受到少量酸性岩浆的混合等原因,花岗闪长质小岩体能以独立岩石单元定位于浅表。相对薄而简单的陆壳结构,使得岩浆能在区域伸展环境下沿断裂上侵于近地表,岩体呈浅成—超浅成产出。

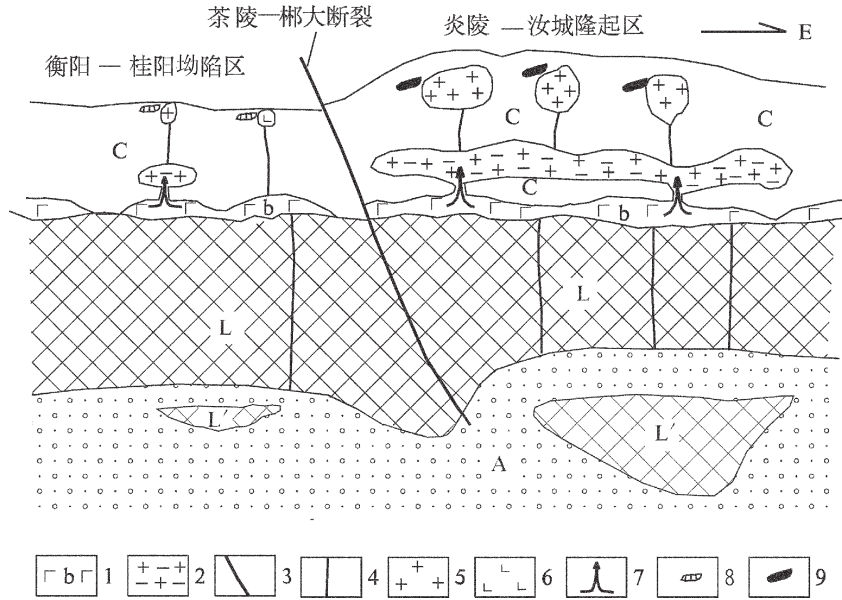


图 4 湘东南燕山早期两类矿床组合形成的构造-岩浆动力学机制示意图

C—地壳;L—岩石圈;L'—拆沉的岩石圈;A—软流圈;1—玄武质岩浆底侵的岩浆房;2—花岗质岩浆房;3—隆起区与坳陷区分界逆断裂;4—岩石圈破裂;5—花岗岩;6—花岗闪长质岩石;7—示基性岩浆底侵;8—中低温铅锌多金属矿床;9—中高温钨锡多金属矿床

Fig.4 Tectono-magmatic dynamic mechanisms of two types of early Yanshanian deposit assemblages in southeast Hunan C-Crust;L-lithosphere;L'-delaminated lithosphere;A-asthenosphere;1-Basaltic underplating magma chamber;2-Granitic magma chamber;3-Thrust fault separating the uplift from the depression;4-Lithospheric fault;5-Granite;6-Granodiorite;7-Underplating of basaltic magma;8-Meso- and epithermal Pb-Zn-polymetallic deposit;9-Meso- and hypothermal W-Sn-polymetallic deposit

由于地壳重熔岩浆量小,不能形成 W、Sn 等亲花岗岩元素的大规模富集。幔源和下地壳岩浆则沿着深断裂上侵,同时流体和 Pb、Zn、Cu、Au 等成矿元素可源源不断地运移到近地表而富集成矿。此外,小规模岩体不能提供维持高温所需的足够热量,岩体侵位于近地表还使热量易于散失而具低温环境条件,也应为坳陷区难以形成中高温钨锡多金属矿床,而主要形成中低温铅锌多金属矿床的原因之一。在黄沙坪矿区矿床下部发育有规模不大的中高温钨钼矿体,水口山铅锌矿区发育有黑钨矿等事实,暗示岩体侵位深度对两类矿床组合的形成所起作用可能相当显著<sup>[60]</sup>。

区内千里山、香花岭等中深成 S 型花岗岩体除 W、Sn 等中高温矿床极发育外,在离岩体较远部位尚存在一定规模的 Pb、Zn 等中低温矿床,这可能与复杂的边界条件导致成岩成矿过程中岩浆对深部 Pb、Zn 等成矿元素屏蔽作用较弱,以及地层铅的参与等因素有关。

需要指出的是,由于影响花岗岩成矿作用的地

质因素很多,因此以上进行的构造-岩浆动力学分析,只是从一个角度对两类矿床组合形成机制所作的探讨,这一认识并不排除其他因素在两类矿床组合形成中起到作用的可能,如岩浆源区成分与氧化状态及源区含矿性的差异、不同岩浆及其不同演化阶段的氧化状态对成矿元素行为的制约、岩浆结晶分异过程、岩浆挥发分含量,以及围岩地层对矿质和成矿流体的影响等。

### 5 小结

(1)中三叠世后期—中侏罗世初(早中生代)为板内造山阶段。中三叠世后期在区域 NWW-SEE 向挤压构造体制下发生强烈的陆内俯冲、汇聚作用,形成大量东倾为主的 NNE 向逆冲断裂与褶皱。其中茶陵—郴州断裂以东隆起区的隔槽式褶皱形成机制为“厚皮式”而非“薄皮式”。NW 向基底隐伏断裂产生强烈左旋走滑,并使构造线产生逆时针旋转,形成了安仁“y”字型构造和水口山—香花岭南北向构造。挤压造山使地壳持续大幅增厚、深部地壳温度持

续升高。中三叠世末—晚三叠世后期(233~210 Ma)区域挤压应力松弛,被加热的中地壳下部熔融,同时存在幔源性岩浆底侵,从而于后碰撞环境下产生较大规模的花岗质岩浆活动。晚三叠世末—早侏罗世因同造山上隆伸展作用而形成裂陷盆地,中侏罗世初期在区域 NNE 向左旋汇聚走滑体制下形成逆冲断裂及山前冲断收缩盆地、NW 向右旋走滑断裂等。早中生代板内造山活动的动力机制主要与板块汇聚的远程挤压效应有关。

(2)中侏罗世早期—白垩纪(晚中生代)为后造山—陆内裂谷伸展阶段。中侏罗世早期—晚侏罗世(174~135 Ma)因岩石圈拆沉而发生大规模花岗质岩浆活动与成矿作用。岩体的被动就位机制、暗色镁铁质微粒包体的发育、Sr-Nd 同位素特征、以(高钾)钙碱性岩类为主的岩石组成、构造环境的岩石地球化学判别、大规模有色金属成矿、区域构造演化背景等,指示该时期为后造山构造环境。白垩纪进入强烈的陆内伸展阶段,形成盆—岭构造和相关的离散走滑断裂,广泛发育各类岩脉,局部形成 AA 型花岗岩小岩体和基性火山岩。热年代学资料暗示盆—岭构造的演化先后经历了构造剥蚀和风化剥蚀—沉积两个阶段。

(3)造成湘东南燕山早期花岗岩成矿能力远高于印支期花岗岩的原因,主要是区域构造环境暨构造体制差异,即燕山早期后造山伸展构造体制下岩体中矿质更易于向周围扩散并沉淀,而印支期后碰撞环境弱挤压体制下矿质则被封闭;其次是花岗岩岩石地球化学特征差异,即构造—岩浆演化历史和深部成矿流体的参与使燕山早期花岗岩具有更好的成矿岩石地球化学条件。

(4)燕山早期钨锡多金属和铅锌多金属两类矿床组合的形成可能主要与岩石圈结构(厚度)和深部热扰动强度,以及相应的岩浆作用规模和岩体侵位深度等因素有关。

## 参考文献(References):

- [1] 王光杰,滕吉文,张中杰. 中国华南大陆及陆缘地带的大地构造基本格局[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(3):25-43.  
Wang Guangjie, Teng Jiwen, Zhang Zhongjie. The continental structure pattern of south China and its marginal regions[J]. Progress in Geophysics, 2000, 15(3):25-43(in Chinese with English abstract).
- [2] 柏道远,周亮,王先辉,等. 湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征对华南新元古代—早古生代构造背景的制约[J]. 地质学报,

2007, 81(6):755-771.

- Bai Daoyuan, Zhou Liang, Wang Xianhui, et al. Geochemical Characteristics of Nanhuuan-Cambrian sandstones from southeastern Hunan, and its constraints on Neoproterozoic-Early paleozoic tectonic setting of South China [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6):755-771(in Chinese with English abstract).
- [3] 柏道远,黄建中,马铁球,等. 湘东南志留纪彭公庙花岗岩体地质地球化学特征及其构造环境[J]. 现代地质, 2006, 20(1):130-140.  
Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Ma Tieqiu, et al. Geology and Geochemistry of the Silurian Penggongmiao granitic pluton in the Southeastern Hunan Province and its implication for tectonic setting [J]. Geoscience, 2006, 20(1):130-140 (in Chinese with English abstract).
- [4] 柏道远,黄建中,刘耀荣,等. 湘东南及湘粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定[J]. 中国地质, 2005, 32(4):557-570.  
Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Liu Yaorong, et al. Framework of Mesozoic tectonic evolution in southeastern Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area [J]. Geology in China, 2005, 32(4):557-570(in Chinese with English abstract).
- [5] 柏道远,黄建中,李金冬,等. 华南中生代构造演化过程的多地质要素约束—湘东南及湘粤赣边区中生代地质研究的启示[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1), 1-13.  
Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Li Jindong, et al. Multiple geological elements constraint on the Mesozoic tectonic evolution of south China: apocalypse of the Mesozoic geological evolution in Southeastern Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1):1-13(in Chinese with English abstract).
- [6] 柏道远,黄建中,王先辉,等. 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[J]. 中国地质, 2006, 33(1):56-63.  
Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Wang Xianhui, et al. Sinistral strike-slip motion of the NW-trending Saoyang-Chenzhou fault and genesis of the N-S-trending Shuikoushan-Xianghualing tectonic zone in Hunan[J]. Geology in China, 2006, 33(1):56-63(in Chinese with English abstract).
- [7] 柏道远,熊延望,王先辉,等. 湖南常德—安仁 NW 向断裂左旋走滑与安仁“y”字型构造[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(4):435-442.  
Bai Daoyuan, Xiong Yanwang, Wang Xianhui, et al. “y”-type structure in Anren county, Hunan, and the sinistral strike-slip of Changde-Anren NW-trending fault [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(4):435-442 (in Chinese with English abstract).
- [8] 柏道远,汪永清,王先辉,等. 湘东南汝城盆地性质及其对华南燕山早期构造环境的启示[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(1), 47-54.  
Bai Daoyuan, Wang Yongqing, Wang Xianhui, et al. The nature of the Rucheng Basin in southeastern Hunan and its significance to the tectonic setting of South China during the early Yanshanian [J].

- Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, 26 (1):47-54(in Chinese with English abstract).
- [9] 柏道远, 陈建成, 孟德保, 等. 湖南炎陵印支期隔槽式褶皱形成机制[J]. 地球科学与环境学报, 2006, (4):10-14.  
Bai Daoyuan, Chen Jiancheng, Meng Debao, et al. Forming mechanism of Indosinian trouhg-like folds in Yanling region, Hunan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(4): 10-14(in Chinese with English abstract).
- [10] 柏道远, 王先辉, 马铁球, 等. 湘东南印支期褶皱特征及形成机制[J]. 华南地质与矿产, 2006, (4):50-57.  
Bai Daoyuan, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, et al. Characteristics and forming mechanism of Indosinian folds in the southeast Hunan[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2006, (4):50-57 (in Chinese with English abstract).
- [11] 傅昭仁, 李紫金, 郑大瑜. 湘赣边区 NNE 向走滑造山带构造发展样式[J]. 地学前缘, 1999, 6(4):263-272.  
Fu Zhaoren, Li Zijin, Zheng Dayu. Structural pattern and tectonic evolution of NNE-trending strike-slip orogenic belt in the border region of Hunan and Jiangxi Provinces [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4):263-272(in Chinese with English abstract).
- [12] 李建威, 李先福, 李紫金, 等. 走滑变形过程中的流体包裹体研究—以湘东地区为例[J]. 大地构造与成矿, 1999, 23(3):240-247.  
Li Jianwei, Li Xianfu, Li Zijin, et al. Fluid inclusions study in the process of strike slip faulting—a case study in eastern Hunan Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1999, 23(3):240-247(in Chinese with English abstract).
- [13] 李先福, 李建威, 傅昭仁. 湘赣边鹿井矿田与走滑断层有关的铀矿化作用[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1999, 24(5):476-479.  
Li Xianfu, Li Jianwei, Fu Zhaoren. Uranium mineralization related to strike-slip faults, Lujing orefield, border region between eastern Hunan and western Jiangxi [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(5):476-479(in Chinese with English abstract).
- [14] 彭和求, 伍光英. 湘南“大义山”式构造的厘定和地质意义[J]. 湖南地质, 2000, 19(2):87-89.  
Peng Heqiu, Wu Guangying. Determination of “Dayishan-style structure” in southern Hunan and its geological significance [J]. Hunan Geology, 2000, 19 (2):87-89 (in Chinese with English abstract).
- [15] 邱先前, 刘阳生. 湖南郴州—邵阳走滑构造岩浆岩带及其控矿意义[J]. 华南地质与矿产, 2003, (4):56-59.  
Qiu Xianqian, Liu Yangsheng. Characteristics of the Chenzhou-Shaoyang strike-slip tectonomagmatic belt and its ore-controlling significance, Hunan [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2003, (4):56-59(in Chinese with English abstract).
- [16] 柏道远, 黄建中, 孟德保, 等. 湘东南地区中、新生代山体隆升过程的热年代学研究[J]. 地球学报, 2006, 27(6):525-536.  
Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Meng Debao, et al. Meso-Cenozoic thermo-chronological analysis of the uplift process of mountains in Southeast Hunan [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(6):525-536(in Chinese with English abstract).
- [17] 马铁球, 柏道远, 王先辉. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. 地质通报, 2005, 24 (5):415-419.  
Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, Wang Xianhui. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, southeastern Hunan, and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (5):415-419(in Chinese with English abstract).
- [18] 柏道远, 周亮, 马铁球, 等. 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(3):197-212.  
Bai Daoyuan, Zhou Liang, Ma Tieqiu, et al. Genesis and tectonic setting of Indosinian granites in southeast Hunan [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(3):197-212(in Chinese with English abstract).
- [19] Hong Dawei, Xie Xilin, Zhang Jisheng. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny [J]. Res. Geol, 1998, 48:251-263.
- [20] Pei Rongfu, Hong Dawei. The granites of south China and their metallogeny[J]. Episodes, 1995, 18:77-82.
- [21] 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 等. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄[J]. 南京大学学报(自然科学), 1999, 35(6):649-658.  
Chen Jiangfeng, Guo Xinsheng, Tang Jiafu, et al. Nd isotopic model ages: implications of the growth of the continental crust of southeastern China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1999, 35(6):649-658(in Chinese with English abstract).
- [22] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45:29-44.
- [23] Zen E. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: some mineralogic and petrologic constraints [J]. Journal of Petrology, 1986, 27:1095-1117.
- [24] 王方正, 李红丽, 朱勤文, 等. 湘南火山岩深源包体组合及岩石圈岩石学模型[J]. 地质科技情报, 1997, 16(3):1-7.  
Wang Fangzheng, Li Hongli, Zhu Qinwen, et al. Assemblages of anatectic xenoliths from volcanic and the petrology model of lithosphere in south Hunan Province [J]. Geological Science and Technology Information, 1997, 16(3):1-7(in Chinese with English abstract).
- [25] 罗照华, 黄忠敏, 柯珊. 花岗岩质岩石的基本问题 [J]. 地质论评, 2007, 53(增刊):180-226.  
Luo Zhaohua, Huang Zhongmin, Ke Shan, et al. An overview of granitoid [J]. Geological Review, 2007, 53 (supp.):180-226 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王岳军, Zhang Y H, 范蔚茗, 等. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(6):491-499.  
Wang Yuejun, Zhang Y H, Fan Weiming, et al. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan Province: Basaltic underplating versus tectonic thickening [J]. Science in China (Ser.D), 2002, 45(11):1042-1056.



- [27] 郭锋, 范蔚茗, 林舸, 等. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨[J]. 科学通报, 1997, 42(15):1661-1663.  
Guo Feng, Fan Weiming, Lin Ge, et al. Chronology and petrogenesis of gabbro inclusion in Daoxian County, Hunan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(15):1661-1663(in Chinese).
- [28] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 21-36.  
Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. The Ways of Investigation on Granitoids [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:21-36 (in Chinese).
- [29] 柏道远, 陈建成, 马铁球, 等. 王仙岭岩体地质地球化学特征及其对湘东南印支晚期构造环境的制约 [J]. 地球化学, 2006, 35(2): 113-125.  
Bai Daoyuan, Chen Jiancheng, Ma Tieqiu, et al. Geochemical characteristics of Wangxianling granitic pluton and its constraints on Late Indosinian tectonic setting of Southeast Hunan[J]. Geochimica, 2006, 35(2):113-125(in Chinese with English abstract).
- [30] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geol Soc Am Bull, 1989, 101:635-643.
- [31] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. J Petrol, 1984, 25(4):956-983.
- [32] 贾大成, 胡瑞忠, 卢焱, 等. 湘南汝城盆地火山岩地球化学及其成因意义[J]. 矿物岩石, 2003, 23(2):49-54.  
Jia Dacheng, Hu Ruizhong, Lu Yan, et al. The geochemistry of the volcanic rocks and its origin significance in Rucheng basin, Southeastern Hunan [J]. J Mineral Petrol, 2003, 23 (2):49-54(in Chinese with English abstract).
- [33] 万天丰, 赵维明. 论中国大陆的板内变形机制 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2):451-463.  
Wan Tianfeng, Zhao Weiming. On the mechanism of intraplate deformation in Chinese continent[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2):451-463(in Chinese with English abstract).
- [34] 张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识 [J]. 地质学报, 2007, 81(11):1462-1480.  
Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, et al. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1462-1480(in Chinese with English abstract).
- [35] 邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 等. 中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制[J]. 岩石学报, 2005, 21(3):789-794.  
Shao Jian, Zhang Lǔqiao, Xiao Qinghui, et al. Rising of Da Hinggan Mts in Mesozoic: A possible mechanism of intracontinental orogeny [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 789-794(in Chinese with English abstract).
- [36] 罗照华, 魏阳, 辛后田, 等. 太行山中生代板内造山作用与华北大陆岩石圈巨大减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13(6):52-63.  
Luo Zhaohua, Wei Yang, Xin Houtian, et al. The Mesozoic intraplate orogeny of the Taihang Mountains and the thinning of the continental lithosphere in North China [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6):52-63(in Chinese with English abstract).
- [37] 万天丰, 朱鸿. 中国大陆及邻区中生代—新生代大地构造与环境变迁[J]. 现代地质, 2002, 16(2):107-118.  
Wan Tianfeng, Zhu Hong. Tectonics and environment change of Meso-Cenozoic in China continent and its adjacent areas [J]. Geoscience, 2002, 16 (2):107-118 (in Chinese with English abstract).
- [38] 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10):876-884.  
Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, et al. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9/10):876-884(in Chinese with English abstract).
- [39] 李金冬, 柏道远, 伍光英, 等. 湖南郴州地区骑田岭花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. 地质通报, 2005, 24 (5):411-414.  
Li Jindong, Bai Daoyuan, Wu Guangying, et al. Zircon SHRIMP dating of the Qitianling granite, Chenzhou, Southern Hunan, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (5):411-414(in Chinese with English abstract).
- [40] 伍光英, 马铁球, 柏道远, 等. 湖南宝山花岗岩冈长质隐爆角砾岩的岩石学、地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年 [J]. 现代地质, 2005(2):198-204.  
Wu Guangying, Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, et al. Petrological and geochemical characteristics of granodioritic cryptoexplosion breccia and zircon SHRIMP dating in the Baoshan area, Hunan Province [J]. Geoscience, 2005(2):198-204(in Chinese with English abstract).
- [41] 刘耀荣, 邝军, 马铁球, 等. 湖南大义山花岗岩南体黑云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年及地质意义[J]. 资源调查与环境, 2005, 26(4):244-249.  
Liu Yaorong, Kuang Jun, Ma Tieqiu, et al.  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  dating of biotite in south Dayishan granite and its geological significance[J]. Resources Survey & Environment, 2005, 26 (4):244-249 (in Chinese with English abstract).
- [42] 柏道远, 刘耀荣, 王先辉, 等. 湖南骑田岭岩体北东部角闪石黑云母二长花岗岩  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年及其意义 [J]. 资源调查与环境, 2005, 26(3):179-184.  
Bai Daoyuan, Liu Yaorong, Wang Xianhui, et al.  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  dating of the biotite monzogranite in northeast Qitianling granite body and its geological significance[J]. Resources Survey & Environment, 2005, 26(3):179-184(in Chinese with English abstract).
- [43] 江西根, 柏道远, 陈建超, 等. 湘东南宝峰仙地区燕山早期花岗岩地球化学特征及其构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(2): 206-219.  
Jiang Xigen, Bai Daoyuan, Chen Jianchao, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of Baofengxian Early Yanshanian granites, southeast Hunan [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(2):206-219(in Chinese with English abstract).
- [44] 马铁球, 柏道远, 邝军, 等. 南岭大东山岩体北部  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年及地球化学特征[J]. 地球化学, 2006, 35(4):346-358.  
Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, Kuang Jun, et al.  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  dating and

- geochemical characteristics of the granites in North Dadongshan pluton, Nanling Mountains[J]. *Geochimica*, 2006, 35(4):346-358 (in Chinese with English abstract).
- [45] 柏道远, 陈建超, 马铁球, 等. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(4): 255-272.
- Bai Daoyuan, Chen Jianchao, Ma Tieqiu, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton in Southeast Hunan [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(4):255-272(in Chinese with English abstract).
- [46] 马铁球, 伍光英, 贾宝华, 等. 南岭中段郴州一带中、晚侏罗世花岗岩浆的混合作用——来自镁铁质微粒包体的证据[J]. *地质通报*, 2005, 24(6):506-512.
- Ma Tieqiu, Wu Guangying, Jia Baohua, et al. Middle-Late Jurassic granite magma-mixing in the middle segment of the Nanling Mountains, South China: evidence from mafic microgranular enclaves[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(6):506-512(in Chinese with English abstract).
- [47] 马铁球, 邝军, 柏道远, 等. 南岭中段诸广山南体燕山早期花岗岩地球化学特征及其形成的构造环境分析[J]. *中国地质*, 2006, 33(1):119-131.
- Ma Tieqiu, Kuang Jun, Bai Daoyuan, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of the early Yanshanian South Zhuguangshan granite in the central segment of the Nanling Mountains [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (1):119-131 (in Chinese with English abstract).
- [48] 柏道远, 汪永清, 王先辉, 等. 湖南衡阳燕山早期川口过铝花岗岩地球化学特征、成因与构造环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 2007, 27(2):49-59.
- Bai Daoyuan, Wang Yongqing, Wang Xianhui, et al. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of the early Yanshanian peraluminous granites in the Chuankou region, Hengyang, Hunan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2007, 27(2):49-59(in Chinese with English abstract).
- [49] 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球化学动力学背景[J]. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(4):279-289.
- Chen Peirong, Hua Renmin, Zhang Bangtong, et al. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: Petrological constraints on and geodynamic settings [J]. *Science in China(Ser.D)*, 2002, 45(8):755-768.
- [50] 朱金初, 张辉, 谢才富, 等. 湘南骑田岭竹视水花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学和岩石学[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 335-342.
- Zhu Jinchu, Zhang Hui, Xie Caifu, et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology, petrology and geochemistry of the Zhujianshui granite, Qitianling pluton, southern Hunan Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11 (3):335-342 (in Chinese with English abstract).
- [51] 陈志刚, 李献华, 李武显, 等. 赣南全南正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对华南燕山早期构造背景的制约[J]. *地球化学*, 2003, 32(3):223-229.
- Chen Zhigang, Li Xianhua, Li Wuxian, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the Quannan syenite, southern Jiangxi: Constraints on the early Yanshanian tectonic setting of SE China [J]. *Geochimica*, 2003, 32(3):223-229(in Chinese with English abstract).
- [52] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(9):981-991.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhenxian. Re-discussion on genetic type of Nanling granitoid and its tectonic significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(9):981-991(in Chinese).
- [53] 毛景文, 李红艳, 宋学信, 等. 湖南柿竹园钨锡钼多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1998:53-55.
- Mao Jingwen, Li Hongyan, Song Xuexin, et al. *Geology and Geochemistry of the Shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi Polymetallic Deposit, Hunan, China* [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1998:53-55(in Chinese with English abstract).
- [54] 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 等. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3):159-169.
- Fan Weiming, Wang Yuejun, Guo Feng, et al. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi Provinces and the lithospheric extension [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10 (3):159-169 (in Chinese with English abstract).
- [55] 王岳军, 廖超林, 范蔚茗, 等. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义[J]. *地球化学*, 2004, 33(2):109-117.
- Wang Yuejun, Liao Chaolin, Fan Weiming, et al. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi Province and its tectonic implications[J]. *Geochimica*, 2004, 33(2):109-117(in Chinese with English abstract).
- [56] 邢光福, 杨祝良, 毛建仁, 等. 东南大陆边缘早侏罗世火成岩特征及其构造意义[J]. *地质通报*, 2002, 21(7):384-391.
- Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Mao Jianren, et al. Characteristics of Early Jurassic igneous rocks on the continental margin of southeastern China and their tectonic significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21 (7):384-391 (in Chinese with English abstract).
- [57] 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J<sub>2</sub> 早期玄武岩[J]. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(7):587-605.
- Xie Xin, Xu Xisheng, Zhou Haibo, et al. Prelude of the Late Mesozoic large scale magmatism of southeastern China: early Middle Jurassic basalt [J]. *Science in China (Ser. D)*, 2005, 35(7): 587-605(in Chinese).
- [58] 柏道远, 贾宝华, 马铁球, 等. 湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(5), 387-398.
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Ma Tieqiu, et al. Relationship of petro-geochemical characteristics to metallogenic capacity differences between Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(5):587-598 (in Chinese with English abstract).

- [59] 柏道远, 贾宝华, 李金冬, 等. 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[J]. 矿床地质, 2007, 36(5):487-500.
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Li Jindong, et al. 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 [J]. Mineral Deposits, 2007, 26(5):487-500(in Chinese with English abstract).
- [60] 柏道远, 周亮, 王先辉, 等. 湘东南燕山早期钨锡与铅锌多金属矿床组合形成的构造-岩浆动力学机制 [J]. 地质学报, 2007, 81(9): 1238-1247.
- Bai Daoyuan, Zhou Liang, Wang Xianhui, et al.. Tectonic - magmatic mechanisms of the two types of Early Yanshanian W - Sn - polymetallic and Pb - Zn - polymetallic deposit assemblages in southeast Hunan [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (9):1238 - 1247(in Chinese with English abstract).
- [61] 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 等. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据[J]. 地学前缘, 2007, 14(3):165-183.
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, et al. Metallogeny by trans-magmatic fluids——theoretical analysis and field evidence[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (3):165-183 (in Chinese with English abstract).
- [62] 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999:224.
- Zhai Yusheng, Deng Jun, Li Xiaobo. Essentials of Metallogeny[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1999:224 (in Chinese with English abstract).
- [63] 姚军明, 华仁民, 林锦富. 湘东南黄沙坪花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征 [J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 688-696.
- Yao Junming, Hua Renmin, Lin Jinfu. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics of Huangshaping granite in southeast Hunan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 688-696(in Chinese with English abstract).
- [64] 张建新, 童潜明, 李荣清. 郴临深大断裂带及其两侧的地球化学特征[J]. 华南地质与矿产, 2000, (3):17-24.
- Zhang Jianxin, Tong Qianming, Li Rongqing. Regional geochemical characteristics across the Chenzhou-Linwu deep-seated fault [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2000, (3):17-24(in Chinese with English abstract).
- [65] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 四川黑水-台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2004, 31(5): 441-451.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structures of lithosphere and asthenosphere in Heishui of Sichuan-Hualian of Taiwan profile [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(5):441-451(in Chinese with English abstract).

## Progress in the study of Mesozoic tectono-magmatism and mineralization in the central segment of the Nanling Mountains—Summary of major achievements of the 1:250,000 geological survey in southeastern Hunan

BAI Dao-yuan, MA Tie-qiu, WANG Xian-hui, ZHANG Xiao-yang, CHEN Bi-he

(Hunan Institute of Geology Survey, Xiangtan 411100, Hunan, China)

**Abstract:** Mesozoic tectono-magmatism and mineralization in southeastern Hunan in the central segment of the Nanling Mountains have been systematically studied. The following ideas are put forward. (1) The period from the late Middle Triassic to early Middle Jurassic (early Mesozoic) was an intracontinental orogenic stage. The late Middle Triassic witnessed strong intracontinental subduction-convergence in a regional WNW-ESE compressional regime, which resulted in formation of large numbers of E-dipping, NNE-verging thrusts and folds. The formation mechanism of the trough-like folds in an uplift area east of the Chaling-Chenzhou fault were "thick-skinned" rather than "thin-skinned". NW-trending basement hidden faults underwent strong sinistral strike-slip movement under WNW compression, which led the NNE-directed lineament to rotate counterclockwise, thus forming the Anren "y"-type structure and the N-S-trending Shuikoushan-Xianghualing tectonic zone. The strong compression made the crust thicken substantially and caused the temperature of the deep crust rise continuously. In the terminal Middle Triassic-latest Triassic (233-210 Ma), the regional stress

weakened, the heated middle crust melted and mantle-derived basic magma underplated; as a result, large-scale granitic magmatism took place in a post-collisional setting. Down-faulted basins formed by syn-orogenic uplift-extension in the terminal Late Triassic-Early Jurassic. Piedmont thrust-compressional basins and thrusts and NW-trending dextral strike-slip faults occurred in a NNE-trending sinistral convergence and strike-slip regime at the beginning of the Middle Jurassic. The dynamic mechanism of early Mesozoic intracontinental orogeny is mainly related to far-field compression effects of plate convergence. (2) The early Middle Jurassic-Cretaceous (late Mesozoic) was a post-orogenic-intracontinental rifting stage. In the early Middle Jurassic-Late Jurassic (174-135 Ma), there occurred large-scale granitic magmatism and mineralization due to lithospheric delamination. The passive emplacement mechanism of the plutons, occurrence of mafic microgranular enclaves, Sr-Nd isotopic features, predominance of high-K calc-alkaline and calc-alkaline rocks in the plutons, geochemical discriminations of structural environment, large-scale nonferrous metal mineralization and tectonic evolution setting suggest a post-orogenic environment in the stage. The Cretaceous was a strong intracontinental extensional stage, when basin-range tectonics and related divergent strike-slip faults formed, various kinds of dikes were widely developed and small AA-type granite bodies and basic volcanic rocks originated locally. Thermochronological data suggest that the evolution of the basin-range tectonics progressed through the tectonic denudation stage and weathering erosion-sedimentation stage. (3) The cause for the fact that the ore-forming capacity of the early Yanshanian granites in southeastern Hunan was far larger than that of the Indosinian granites is mainly attributed to the differences in tectonic setting and tectonic regime. The ore materials in magma of granites could spread and be precipitated more easily in an Early Yanshanian post-orogenic extensional regime; on the contrary, the ore materials were confined in the pluton in an Indosinian post-collisional weakly compressional setting. The second cause of the difference in ore-formation capacity is due to the difference in geochemistry of granites, i.e. the tectono-magmatic evolution and introduction of deep ore-forming fluids caused the early Yanshanian granites to have better ore-forming geochemical conditions than the Indosinian granites. (4) The formation of the W-Sn-polymetallic and Pb-Zn-polymetallic deposit assemblage is probably mainly related to such factors as the structure (or thickness) of the lithosphere, intensity of thermal perturbations in the deep interior of the Earth and corresponding scale of magmatism and depth of pluton emplacement.

**Key words:** Mesozoic; structural deformation; magmatism; tectonic evolution; mineralization mechanism; southeastern Hunan

---

**About the first author:** BAI Dao-yuan, male, born in 1967, senior engineer, main research interests are on tectonics, petrology and metallogeny; E-mail: daoyuanbai@sina.com.