

# 桂东北燕山早期岩浆作用与伸展动力学

周 洲

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月16日; 录用日期: 2026年8月14日; 发布日期: 2026年8月24日

## 摘 要

桂东北位于南岭构造带东段、扬子与华夏地块拼合边界, 是华南早中生代构造体制由特提斯向古太平洋俯冲体系转换的关键构造单元。本文系统整合锆石U-Pb年代学、Hf-Sr-Nd同位素及区域构造-沉积资料, 厘定桂东北燕山早期(早侏罗世-中侏罗世, 175~150 Ma)岩浆序列、岩石成因与伸展构造响应。结果表明, 区内燕山早期岩浆岩以A型花岗岩、双峰式侵入岩和基性脉岩组合为特征, 锆石U-Pb年龄集中于175~150 Ma, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 随成岩时代逐渐升高, 指示幔源物质持续加入。区域广泛发育拆离断层、走滑-伸展断裂、张性节理及断陷红盆, 构成典型的陆内伸展构造系统。动力学分析表明, 印支期陆陆碰撞增厚地壳后发生的岩石圈拆沉与软流圈上涌, 叠加早侏罗世古太平洋板块初始俯冲产生的远程拉张应力, 共同驱动了桂东北大规模壳幔相互作用与伸展型岩浆活动。本研究为理解华南早中生代构造体制转换及陆内伸展动力学提供了关键约束。

## 关键词

燕山早期, 桂东北, A型花岗岩, 锆石U-Pb, 壳幔相互作用, 陆内伸展, 古太平洋俯冲

# Early Yanshanian Magmatism and Extensional Geodynamics in Northeastern Guangxi, South China

Zhou Zhou

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: June 16, 2026; accepted: August 14, 2026; published: August 24, 2026

## Abstract

Northeastern Guangxi is located in the eastern segment of the Nanling tectonic belt, at the suture

boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks, and serves as a key tectonic unit recording the Early Mesozoic transition of South China from the Tethyan to the Paleo-Pacific subduction regime. This study systematically integrates zircon U-Pb geochronology, Hf-Sr-Nd isotopic data, and regional structural-sedimentary records to constrain the magmatic sequence, petrogenesis, and extensional tectonic response of Early Yanshanian (Early to Middle Jurassic, 175~150 Ma) magmatism in northeastern Guangxi. The results show that the Early Yanshanian igneous rocks in the area are characterized by A-type granites, bimodal intrusive rocks, and mafic dike swarms. Zircon U-Pb ages cluster at 175~150 Ma, and zircon  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values increase progressively with decreasing emplacement age, indicating continuous input of mantle-derived materials. Regionally, detachment faults, strike-slip extensional faults, extensional joints, and fault-controlled red basins are widely developed, constituting a typical intracontinental extensional tectonic system. Dynamic analysis suggests that lithospheric delamination and asthenospheric upwelling following the Indosinian continent-continent collision and crustal thickening, superimposed by far-field extensional stress from the initial Early Jurassic subduction of the Paleo-Pacific Plate, jointly drove large-scale crust-mantle interaction and extensional magmatism in northeastern Guangxi. This study provides key constraints for understanding the Early Mesozoic tectonic regime transition and intracontinental extensional dynamics in South China.

## Keywords

Early Yanshanian, Northeastern Guangxi, A-Type Granite, Zircon U-Pb Dating, Crust-Mantle Interaction, Intracontinental Extension, Paleo-Pacific Subduction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

华南板块燕山早期构造演化是东亚大地构造研究的核心议题之一，其中燕山早期岩浆活动的构造动力学机制长期存在争议。陈培荣等观点认为，华南燕山早期华北与华南陆陆碰撞以及古特提斯闭合，造成华南全区地壳加厚、岩石圈根增重；造山结束后增厚岩石圈重力失稳拆沉、软流圈上涌，早侏罗岩浆是造山垮塌产物，和古太平洋俯冲无直接关联[1]。同时，也有观点认为早侏罗世(~200 Ma)古太平洋板块已经低角度俯冲到华南陆壳之下，俯冲板片脱水弱化岩石圈，板片后撤引发弧后拉张，全区伸展岩浆受控于古太平洋俯冲体系[2]，不存在大范围印支后造山垮塌，印支碰撞仅提供先期构造薄弱带。

华南中生代发生剧烈的构造转折，由特提斯陆内挤压环境逐步转变为古太平洋俯冲控制的滨陆构造环境。印支构造事件受华北与华南陆陆碰撞、古特提斯洋东南缘俯冲增生共同控制，形成近 EW 向褶皱与大规模基底韧性剪切构造；早侏罗世早期(205~190 Ma)全区岩浆活动停滞，190~175 Ma 南岭东西向构造带集中产出 A 型花岗岩与双峰式火山岩，标志构造由挤压向伸展转换。中晚侏罗世(约 170 Ma)古太平洋板块开始向华南低角度俯冲，逐步改造华南内陆构造格局[3]。然而，现有研究多聚焦赣南、湘南、浙闽沿海等热点地区，桂东北地处南岭构造带东段关键衔接部位，区内燕山早期岩浆时空规律、伸展构造响应及动力学机制尚缺乏系统整合。

鉴于此，本文汇总已发表锆石年代、同位素实测数据，编制含样品编号、定年方法、实测年龄的数据统计表与区域伸展证据表，系统剖析岩浆成因与伸展动力学，完善南岭燕山早期构造演化框架。

## 2. 区域地质背景

桂东北见图 1 位于扬子与华夏地块的拼合过渡带,地处华夏地块西北缘、江南造山带南缘、南岭构造东段,受三条区域性超壳深大断裂共同约束,是华南特提斯构造域向古太平洋构造域转换的关键区域,也是剖析燕山早期陆内伸展过程的理想研究窗口[2]-[4]。区内发育元古宙变质结晶基底、古生代海相沉积盖层、中-新生代陆相碎屑-火山沉积三套地层系统,受多期构造运动改造,层序与岩相空间分异显著。区域断裂以 NE-NNE 向主干断裂为骨架、近 EW 向次级断裂为辅,继承早期构造薄弱带,燕山早期发生张性活化,直接控制盆地展布与岩浆侵位;其中郴州-临武超壳断裂为幔源岩浆上涌的重要通道,区内二级主干断裂控制了姑婆山等燕山早期岩体与半地堑盆地的发育。该区构造演化具有多期叠加特征:加里东期陆内造山奠定近 EW 向基础构造格架;印支期受远程挤压作用地壳大幅加厚,晚三叠世进入伸展前期;燕山早期构造应力反转为陆内伸展,岩石圈拆沉叠加古太平洋板块初始俯冲的拉张效应,诱发大规模 A 型花岗岩与断陷盆地同步形成;170 Ma 之后岩浆活动向东南沿海迁移,本区构造以间歇性局部挤压和盆地抬升改造为主[4]-[11]。



Figure 1. Study area in Northeastern Guangxi, South China Block (base map modified after Ref. [3])

图 1. 华南地块桂东北研究区(底图根据[3]修改)

## 3. 燕山早期岩浆时空、岩性与成因

依托锆石 LA-ICP-MSU-Pb、云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年代学数据、主微量元素及锆石 Hf 同位素实测结果(表 1(a)~(c)),系统梳理桂东北及邻区已发表的实测年代学、岩石学、构造与沉积数据,以岩浆岩、构造变形、沉积盆地三类伸展地质证据为核心(表 1(a)~(c)),明确燕山早期岩浆作用的时空分布与岩石学特征。

### 3.1. 岩浆时空分布规律

时间上,区内燕山早期岩浆活动时间集中于 175~150 Ma,对应中-晚侏罗世,呈现明显的阶段性幕式活动特征:175~170 Ma 为启动期,以宁远双峰式火山岩喷发为代表;165~160 Ma 为鼎盛期,A 型花岗岩大规模集群侵位,是岩浆活动的主峰;155~145 Ma 为晚期,以高分异脉岩、基性脉岩的沿裂隙侵位为特征见图 2。空间上,岩浆岩整体沿 NE 向深大断裂带呈带状分布,且具有显著的侧向分异规律:自北西向南东方向,岩体成岩年龄逐渐变新,幔源物质贡献比例持续升高。北西端桂北地区的岩体年龄偏老,以壳源特征为主;向东南至贺州、湘南、粤北地区,岩体年龄逐渐年轻,锆石 Hf、Nd 同位素更偏正,幔源混入比例更高,该空间梯度与古太平洋板块俯冲后撤产生的远程应力传递方向高度吻合,区域内代表性的燕山早期火成岩年代学及岩石学特征集成见表 1(a)。

自北西端的金紫山、白毛尖岩体向南东端的铜山岭、花山、姑婆山岩体,成岩年龄呈现出从~172 Ma 逐步年轻化至~152 Ma 的显著线性梯度,对应岩浆迁移速率约为 1.2 Ma/10km;与此同时,岩体的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均值也呈现同步演化趋势,由负值区间(-8~-4)向正值区间(-1~+2)逐步升高[11]-[13]。这一“年龄持

续年轻化、同位素组成更富放射成因”的精细空间梯度，不仅定量约束了区域岩浆作用的侧向分异特征，更为古太平洋板块自东南向西北的低角度俯冲过程，以及伴随的板片后撤动力学调控机制，提供了可靠的地球化学与年代学定量证据[14]。



**Figure 2.** Field outcrop of the Yanshanian granite at Tianhu, Quanzhou County, Guilin City, Northeastern Guangxi  
**图 2.** 桂东北桂林市全州县天湖燕山期花岗岩野外露头

**Table 1.** (a) Geochronological data table of early Yanshanian igneous rocks in Northeastern Guangxi and its adjacent areas; (b) Thermochronological data of early Yanshanian Ductile Shear Zones in Northeastern Guangxi and adjacent areas; (c) Sedimentary and detrital zircon geochronological data of early Yanshanian fault-depressed basins in Northeastern Guangxi and adjacent areas  
**表 1.** (a) 桂东北及邻区燕山早期火成岩年代学数据表；(b) 桂东北及邻区燕山早期韧性剪切带与热年代学数据表；(c) 桂东北及邻区燕山早期断陷盆地沉积与碎屑锆石年代学数据表

| (a) |        |                  |                         |                                        |               |                     |              |
|-----|--------|------------------|-------------------------|----------------------------------------|---------------|---------------------|--------------|
| 序号  | 样品编号   | 采样详细地点           | 岩石类型                    | 测年矿物                                   | 结晶年龄 ± 误差(Ma) | 测试分析方法              | 数据来源         |
| 1   | GPS-1  | 广西贺州市姑婆山岩体       | A <sub>2</sub> 型斑状二长花岗岩 | 锆石                                     | 162.3 ± 1.6   | LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法 | 朱金初等, 2004   |
| 2   | JJL-01 | 桂湘交界界牌金鸡岭岩体      | 高分异 S-A 过渡型黑云母花岗岩       | 锆石                                     | 161.2 ± 1.3   | LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法 | 付建明等, 2015   |
| 3   | TSL-08 | 湖南江华县铜山岭岩体       | 含暗色微粒包体黑云母花岗岩           | 锆石                                     | 163.5 ± 1.1   | SHRIMP 锆石 U-Pb 法    | 王岳军等, 2008   |
| 4   | NY-B04 | 湖南宁远县宁远火山岩带      | 玄武岩 - 流纹岩 (双峰式火山岩)      | 锆石                                     | 172.5 ± 2.0   | LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法 | 时毓、郭峰等, 2019 |
| 5   | DX-M09 | 湖南道县基性脉岩群        | 碱性玄武质辉绿岩                | 锆石                                     | 152.4 ± 1.8   | LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法 | 李献华等, 2007   |
| 6   | JFL-05 | 湖南临武县尖峰岭岩体       | 富氟高分异 A 型花岗岩            | 锆石                                     | 160.2 ± 1.1   | LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法 | 袁顺达等, 2018   |
| (b) |        |                  |                         |                                        |               |                     |              |
| 序号  | 样品编号   | 采样详细地点           | 岩石/变形类型                 | 测年矿物/方法                                | 变形/热时限(Ma)    | 数据来源                |              |
| 1   | MS-G08 | 桂湘交界苗儿山 - 资源拆离带  | 变形石英岩                   | 石英流变学 + 交叉切割                           | 160~150       | 柏道远等, 2017          |              |
| 2   | DX-G03 | 湖南道县衡阳 - 道县伸展剥露带 | 断层角砾岩                   | 黑云母 K-Ar 测年                            | ~155          | 舒良树等, 2009          |              |
| 3   | YMS-04 | 湘南阳明山 - 金鸡岭构造隆起区 | 砂岩(裂变径迹)                | 磷灰石 AFT                                | 165~150       | 韦昌山等, 2016          |              |
| 4   | ZGS-T2 | 粤北 - 桂东交界诸广山主干断裂 | 糜棱岩                     | 钾长石 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar | 162.8 ± 1.4   | 孙涛等, 2012           |              |

续表

| (c) |        |                |              |              |                   |              |
|-----|--------|----------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|
| 序号  | 样品编号   | 采样详细地点         | 地层单元/岩性      | 测年/分析方法      | 沉积上限或底界年龄(Ma)     | 数据来源         |
| 1   | JH-S06 | 湘桂交界江华断陷盆地底部   | 陆相碎屑岩(含砾粗砂岩) | 碎屑锆石 U-Pb 测年 | ~165<br>(最年轻年龄峰值) | 广西地调局, 2008  |
| 2   | NY-P01 | 湖南宁远县宁远火山沉积盆地  | 火山岩夹层(流纹岩)   | 锆石 U-Pb 法    | 172.5 ± 2.0       | 时毓、郭峰等, 2019 |
| 3   | DX-P03 | 湖南道县红层盆地大叶塘组   | 陆相碎屑岩        | 碎屑锆石 U-Pb 谱系 | ~168<br>(最大沉积年龄)  | 朱焱群等, 2020   |
| 4   | QZ-D02 | 广西全州县全州 - 灌阳盆地 | 泥岩 - 砂砾岩互层   | 孢粉组合分析       | ~160<br>(沉积底界年龄)  | 广西地质队, 2015  |
| 5   | SX-01  | 广东始兴县始兴盆地底部    | 火山角砾岩        | 锆石 U-Pb 法    | 165.4 ± 1.8       | 巫建华等, 2017   |

3.2. 岩石学与岩相特征

桂东北及邻区燕山早期岩浆岩以酸性花岗岩类为主体，伴生基性脉岩与双峰式火山岩，缺失中性岩类，构成典型的双峰式岩浆组合(表 1(a))：

1. A 型花岗岩类：是区内最主要的花岗岩类型，以姑婆山、花山、铜山岭、尖峰岭岩体为代表。姑婆山岩体位于广西贺州，锆石 U-Pb 年龄为  $162.3 \pm 1.6$  Ma，为典型 A2 型花岗岩，具高 FeOt/MgO 比值、强烈 Eu 负异常[10]，形成于拉张构造背景[10]。花山岩体位于广西钟山，年龄  $160.5 \pm 2.1$  Ma，为富氟碱性 A 型花岗岩，具高  $10000 \times \text{Ga/Al}$  值，指示岩石圈拉张减薄、软流圈上涌的构造环境[11]。铜山岭岩体发育大量暗色微粒包体(MMEs)与针状磷灰石，是壳幔岩浆混合作用的直接岩相学证据，指示伸展背景下幔源岩浆持续上涌并与地壳岩浆发生混合。

2. 高分异花岗岩类：以金鸡岭、白毛尖、金紫山岩体为代表。金鸡岭岩体为高分异 S-A 过渡型黑云母花岗岩，年龄  $161.2 \pm 1.3$  Ma，侵位温度较高，受深部幔源热流加热影响[13]。白毛尖岩体位于广西全州，年龄  $154.8 \pm 1.5$  Ma，呈脉状产出，为构造减压熔融的产物，形成于伸展晚期地壳抬升剥露阶段。金紫山单元位于广西资源苗儿山北缘，年龄  $158.2 \pm 2.0$  Ma，细粒二云母花岗岩切穿印支期逆冲构造线，直接记录了燕山早期构造体制由挤压向伸展的转换过程[9] [15]。

3. 基性脉岩与双峰式火山岩：宁远盆地发育的玄武岩 - 流纹岩组合为标准双峰式火山岩，年龄  $172.5 \pm 2.0$  Ma，是陆内拉张裂陷启动的岩浆标志。道县基性脉岩群为碱性玄武质辉绿岩，年龄  $152.4 \pm 1.8$  Ma，具 OIB 型地球化学特征，为软流圈减压熔融的产物，指示伸展作用已延伸至岩石圈地幔深度[16]-[19]。

4. 燕山早期伸展地质证据汇总

综合表(表 1(a)-(c))各分区资料，燕山早期桂东北与湘南、赣南、闽西南在岩浆、构造、沉积三方面发育近乎同步的伸展地质记录，不存在地域上构造环境的显著分异，说明燕山早期整个南岭构造带受统一动力学机制控制，印支增厚地壳拆沉叠加古太平洋初始俯冲远程拉张共同促成区域性陆内伸展。桂东北地处扬子 - 华夏地块拼接边界，伸展标志保存最为完整，是解析华南早中生代构造体制转换的关键窗口。

4.1. 岩浆岩伸展标识

岩石组合是判别构造环境最直观的微观 - 宏观标志，桂东北及邻区燕山早期广泛发育 A 型花岗岩 + 幔源基性岩脉的双峰式岩浆组合，缺少中性安山岩、花岗闪长岩等弧型中间组分，是典型陆内伸展岩浆

产物。桂东北区域内贺州姑婆山花岗质岩体中普遍产出辉长质暗色捕虏体, 锆石 Hf 同位素呈壳幔混合特征, 介于负值至正值区间, 指示深部软流圈上涌、幔源岩浆底侵地壳, 伸展减薄诱发地壳熔融成岩[16]; 沿恭城、贺州区域性断裂断续出露的辉绿岩脉, 成岩年龄与寄主花岗岩在误差范围内一致(表 1(a)), 证明基性岩浆与酸性花岗岩为同一伸展构造背景下同期岩浆作用产物。从同位素演化规律来看, 由桂东北向东南沿海, 岩体锆石逐步升高, 幔源物质贡献比例持续变大, 反映地壳拉伸程度自 NW 向 SE 不断增强, 与古太平洋板块远程俯冲诱发的递进伸展规律吻合。

## 4.2. 构造变形伸展标识

燕山早期, 桂东北及邻区构造体制发生根本性转换, 由印支期挤压逆冲彻底转变为伸展拆离与走滑拉张, 形成一系列受正断层控制的断陷盆地, 构造变形与沉积充填的耦合记录为陆内伸展过程提供了直接地质证据。

苗儿山-资源深部拆离断裂带是南岭西段重要伸展构造带, 活动时代为 160~150 Ma; 带内石英发育膨胀重结晶与亚晶粒旋转等低压动态重结晶特征, 指示其形成于 NW-SE 向陆内强伸展拆离应力场, 是岩石圈减薄过程在深部地壳的构造响应。诸广山主干断裂位于粤北-桂东交界, 韧性剪切年龄为  $162.8 \pm 1.4$  Ma, 该 NE 向断裂在此阶段发生强烈斜向拉张走滑, 既是区域伸展应力的集中释放带, 也为燕山早期大面积 A 型花岗岩侵位提供了充足的引张空间与岩浆上升通道。

越城岭-资源平移-伸展剪切带启动于~155 Ma, 白云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄是  $145.2 \pm 1.1$  Ma, 其糜棱岩带记录了印支期逆冲向燕山期斜向走滑拉张的构造体制转换过程, 为脆韧性伸展过渡的典型代表[17]-[20]。

## 4.3. 沉积盆地记录

伴随地壳伸展裂陷, 桂东北及邻区发育一系列独立的陆相断陷红盆, 盆地的充填序列、沉积相特征与构造边界均直接记录了伸展作用的演化过程。区内断陷盆地以江华断陷盆地、宁远火山沉积盆地、道县红层盆地、全州-灌阳盆地与始兴盆地为代表, 均受 NE 向同沉积正断层控制, 具有以下共同的伸展标识特征: ① 盆地与下伏地层呈角度不整合接触, 代表构造体制转换后的伸展裂陷启动; ② 沉积充填以紫红色河湖相碎屑岩为主, 盆地边缘发育巨厚冲积扇相粗砾岩, 具近源快速堆积特征; ③ 部分盆地夹有双峰式火山岩夹层, 与伸展背景下的岩浆喷发直接耦合。具体来看, 宁远盆地夹层火山岩年龄  $172.5 \pm 2.0$  Ma, 是区内最早的伸展盆地沉积记录, 对应裂陷启动阶段。江华盆地底部最年轻碎屑锆石峰值约 165 Ma, 盆地边缘巨厚粗砾岩与边界正断层对应, 是伸展鼎盛阶段的沉积响应。全州-灌阳盆地沉积底界约 160 Ma, 区内主要断陷盆地的沉积充填响应与最大沉积年龄约束详见表 1(c)。

## 4.4. 先存构造格局对燕山早期伸展作用的继承与改造

桂东北燕山早期的陆内伸展是对加里东、印支期先存构造薄弱带的继承与反转改造[18], 其控岩控盆规律与构造体制转换主要体现为两方面。

一是主干断裂的张性活化与属性转换。区内 NE-NNE 向主干深大断裂印支期以左旋挤压逆冲活动为主, 造成地壳叠瓦状加厚并形成基底高应变剪切带[19]; 至燕山早期(~175 Ma), 在 NW-SE 向伸展应力场作用下, 这些深达深部的断裂率先发生张性活化与浅部拆离滑脱, 其中越城岭-资源剪切带、诸广山主干断裂于~162~145 Ma 转变为斜向拉张走滑的张扭性正断层。断裂的负反转在浅部直接控制了江华、宁远、全州-灌阳等半地堑与断陷盆地的展布, 在深部则成为幔源岩浆上涌与构造减压熔融的通道, 制约姑婆山、花山等 A 型花岗岩体及同期基性岩脉沿断裂带的线性侵位。

二是 EW 向与 NE 向构造交汇处的“构造窗”效应。加里东期近 EW 向基底褶皱格架与燕山期活

化的NE向正断层系统空间上构成格子状交汇网络,断裂交汇节点是岩石圈应力集中的薄弱部位[3]-[8]。区域拉张应力作用下,交汇区地壳率先发生局部拉分破裂与显著减压,为深部软流圈物质上涌提供了有利空间。对先存构造继承性的探讨,使本区陆内伸展动力学框架更贴合桂东北多期构造叠加的地质实际。

5. 燕山早期岩浆 - 伸展作用动力学机制

结合桂东北岩体年代学、地球化学与区域资料,综合华南已有的构造演化研究成果,桂东北燕山早期的陆内伸展是印支造山后岩石圈拆沉的内因主导、古太平洋板块初始俯冲远程应力叠加为辅、耦合作用的结果(表 2),单一动力学模型可能无法完整解释本区岩浆与伸展构造发育规律。

Table 2. Stage division of extensional-magmatic-sedimentary coupling evolution in the early Yanshanian, Northeastern Guangxi and adjacent areas

表 2. 桂东北及邻区燕山早期伸展 - 岩浆 - 沉积耦合演化阶段划分表

| 演化阶段                 | 时代(Ma)  | 岩浆响应                             | 构造响应                                    | 沉积响应                              | 核心动力学过程                               |
|----------------------|---------|----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 启动阶段<br>(拉张序幕)       | 175~170 | 宁远盆地发育双峰式火山岩,壳幔发生初始熔融交换          | 印支期逆冲断裂应力松弛,局部断裂张性活化,正滑分量显现             | 宁远断陷盆地初始沉降,充填河湖相碎屑岩夹火山岩夹层         | 岩石圈拆沉启动,叠加古太平洋初始俯冲远程拉张,应力沿先存断裂薄弱带释放   |
| 鼎盛阶段<br>(伸展主期)       | 165~160 | 姑婆山、花山等 A 型/高分异花岗岩集群侵位,壳幔混合作用达峰值 | 主干断裂斜向走滑拉张,深部拆离带活动,区域处于 NW-SE 向强伸展拆离应力场 | 断陷盆地快速沉降,发育冲积扇粗砾岩红层,见角度不整合与同沉积正断层 | 岩石圈拆沉达高峰,软流圈上涌、玄武质岩浆底侵;古太平洋俯冲后撤拉张遍及全区 |
| 持续剥露<br>阶段(伸展<br>晚期) | 155~145 | 高分异花岗岩脉、碱性基性岩脉及正长岩发育,软流圈来源物质占比升高 | 剪切带转为走滑伸展,低角度正断层广泛发育,盆 - 岭构造格局最终定型      | 盆地持续充填陆相红层,发育滑塌构造与同沉积断裂           | 岩石圈拆沉进入尾声,俯冲后撤成为伸展主控;地壳抬升剥露,伸展向走滑拉分转换 |

5.1. 印支增厚岩石圈拆沉与软流圈上涌

印支期受华北与华南地块陆陆碰撞、古特提斯洋北缘俯冲闭合的共同影响,华南地块发生强烈的陆内挤压造山作用,导致全区地壳显著增厚,岩石圈地幔根加厚加重[20],形成了重力不稳定的岩石圈结构。造山作用结束后,增厚的岩石圈根因密度大于下伏软流圈,在重力不均衡作用下逐渐发生失稳、下沉,最终发生拆沉断离。下沉的岩石圈根触发周边软流圈物质向上涌动,发生绝热减压熔融,形成原始的玄武质幔源岩浆[21]。软流圈上涌同时带来了巨量的热流,一方面造成上部岩石圈受热软化、发生伸展减薄,引发地壳拉张破裂,形成拆离断层与半地堑盆地;另一方面,幔源玄武质岩浆沿断裂向上底侵至下地壳底部,通过热传导诱发古老的华夏变质基底发生部分熔融,形成壳源酸性岩浆。壳源酸性岩浆与幔源基性岩浆在深部岩浆房发生不同程度的混合,最终形成了区内广泛分布的 A 型花岗岩与伴生的基性脉岩。岩体中发育的暗色微粒包体(MMEs)、针状磷灰石结构,以及基性岩的 OIB 型地球化学特征、花岗岩锆石 Hf 同位素的混合特征,均为岩石圈拆沉背景下壳幔相互作用提供了直接的地球化学与岩相学证据。

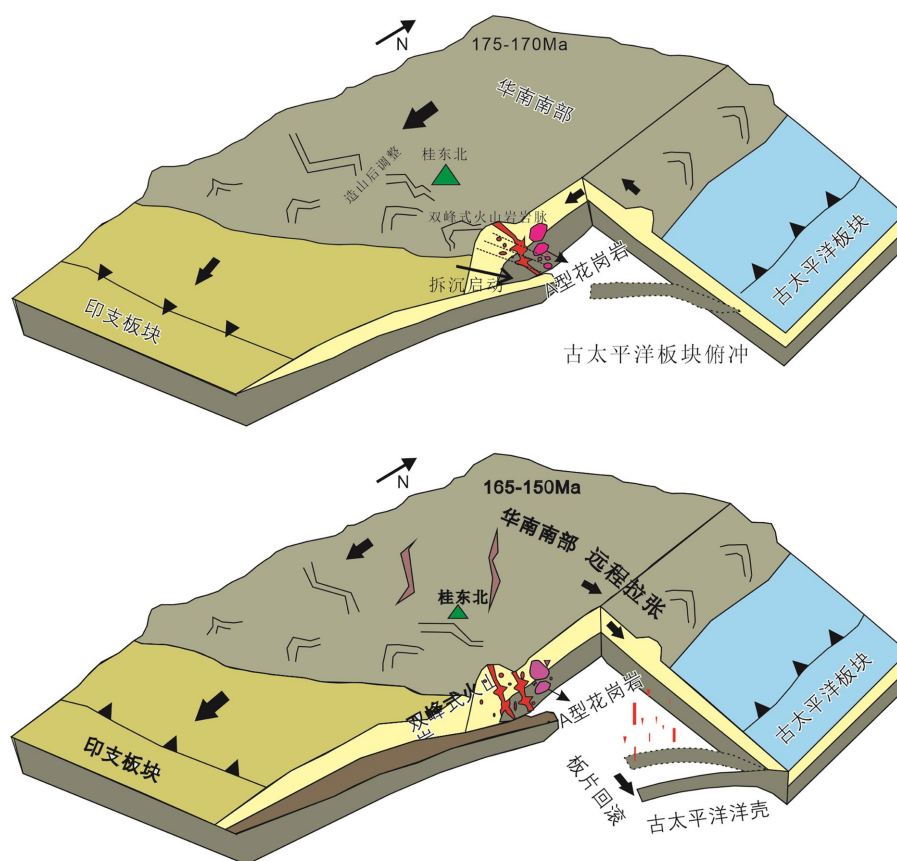
5.2. 古太平洋板块早侏罗世初始俯冲的远程构造效应

早侏罗世末期 - 中侏罗世,古太平洋板块沿华南东南沿海发生低角度俯冲并持续后撤,产生自 SE 向 NW 传递的远程拉张应力;该应力叠加于印支造山后已松弛减薄的岩石圈之上,进一步加剧陆壳伸展破裂,调控区域岩浆与构造的时空分布格局[22]。区域岩浆岩自 NW 向 SE 呈现成岩年龄渐新、锆石 Hf 与

Nd 同位素渐正、幔源物质贡献持续升高的空间梯度,与俯冲后撤的拉张应力传递方向完全一致[23][24]。

单一后造山垮塌模型虽可解释南岭近 EW 向带状 A 型花岗岩的分布,但无法解释岩浆与沉积盆地自 NW 向 SE 递进变新的空间极性;而单一古太平洋平板俯冲后撤模型,难以解释距沿海数百公里的内陆腹地为何发育大规模壳幔强烈混合的双峰式岩浆组合。因此,印支造山拆沉(内因主导)与古太平洋初始俯冲远程拉张(外因调控)的耦合模型见图 3 更契合区域地质事实。

地球物理与力学机制均支撑该耦合模式:高精度深部地震层析成像显示,南岭中西段上地幔 100~200 km 深度存在显著残留高速异常体,为侏罗纪增厚岩石圈重力失稳发生拆沉断离提供了直接实证;黏弹性大陆岩石圈的应力波导效应,可合理解释俯冲板片后撤产生的引张力能够无显著衰减地传递至桂东北等印支期构造薄弱带。印支后拆沉引发的软流圈绝热上涌(内因),与古太平洋俯冲引张触发的边界断裂开裂(外因)时空耦合,共同驱动了南岭内陆盆-岭构造格局的孕育与大规模岩浆爆发。至晚侏罗世,岩石圈拆沉作用逐渐衰退,古太平洋板块持续后撤成为伸展作用的主控因素,区域应力场由纯伸展向走滑拉分转换。



**Figure 3.** Schematic model of early Yanshanian tectonic dynamic evolution in Northeastern Guangxi (base map modified after Ref. [24])

**图 3.** 桂东北地区燕山早期构造动力学演化模式图(底图根据[24]修改)

综上所述,早侏罗世华南处于构造转换关键阶段:印支造山加厚岩石圈拆沉带来软流圈上涌与内源热扰动,奠定陆内伸展的基础;古太平洋板块初始俯冲产生远程拉张应力,进一步放大地壳伸展程度、控制岩浆空间分异。两类因素协同耦合,形成现今观测到的伸展地质记录。

## 6. 结论

(1) 桂东北燕山早期岩浆活动集中于 175~150 Ma, 可划分为启动(~175~170 Ma, 宁远双峰式火山岩)、鼎盛期(165~160 Ma, 姑婆山、花山等 A 型花岗岩大规模侵位)和晚期(155~145 Ma, 高分异脉岩与基性脉岩)。空间上, 岩浆岩沿 NE 向深大断裂呈带状分布, 自北西向南东成岩年龄逐渐变新、幔源物质贡献比例升高, 显示与古太平洋俯冲远程应力场的空间耦合关系。

(2) 区内发育典型的伸展构造组合: 苗儿山 - 资源拆离带(160~150 Ma)、诸广山走滑 - 伸展断裂(~162 Ma)、越城岭 - 资源剪切带(~145 Ma)及广泛发育的张性节理和低角度正断层; 同期形成宁远、江华、道县、全州 - 灌阳等断陷红盆, 充填紫红色河湖相碎屑岩, 底部角度不整合, 夹双峰式火山岩。岩浆 - 构造 - 沉积三者高度耦合, 共同记录了陆内伸展裂陷的完整演化过程。

(3) 桂东北燕山早期陆内伸展是印支造山后岩石圈拆沉与软流圈上涌的内因主导, 叠加古太平洋板块早侏罗世初始俯冲产生的远程拉张应力共同驱动的结果。两类动力学过程的协同作用不仅解释了区域幔源物质持续加入、壳幔混合及岩浆空间分异规律, 也揭示了华南早中生代构造体制由特提斯向古太平洋俯冲体系转换的关键机制。

## 参考文献

- [1] 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春方. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(4): 279-289.
- [2] Li, Z.X. and Li, X.H. (2007) Formation of the 1300-Km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, **35**, 179-182. <https://doi.org/10.1130/g23193a.1>
- [3] Zhou, X.M., Sun, T., Shen, W.Z., Shu, L.S. and Niu, Y.L. (2006) Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, **29**, 26-33. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i1/004>
- [4] Li, J.H., Zhang, Y.Q., Dong, S.W. and Johnston, S.T. (2014) Cretaceous Tectonic Evolution of South China: A Preliminary Synthesis. *Earth-Science Reviews*, **134**, 98-136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.008>
- [5] 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 南岭西段花山-姑婆山侵入岩带锆石 U-Pb 年龄格架及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2270-2278.
- [6] 魏道芳, 鲍征宇, 付建明. 湖南铜山岭花岗岩体的地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 大地构造与成矿学, 2007(4): 482-489.
- [7] 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(4): 370-378.
- [8] 伍静, 苑宏伟, 甘能俭, 韦绍成, 廖娟, 张健, 梁华英. 广西丹池成矿带芒场矿田岩浆岩源区特征及锆石 U-Pb 年龄分析[J]. 岩石学报, 2020, 36(5): 1586-1596.
- [9] 时毓, 郭智超, 刘希军, 王新宇, 吴祥珂, 冯佐海, 杨金磊, 张晓晨. 桂东北富川鲁洞辉绿玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(2): 291-300.
- [10] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 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[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 234-247.
- [11] 贾小辉, 李响, 杨文强. 华南早侏罗世花岗岩侵入体的岩石成因及构造背景——兼论其关键金属成矿作用[J]. 华南地质, 2023, 39(2): 186-202.
- [12] Chu, Y., Lin, W., Faure, M., Xue, Z.H., Ji, W.B. and Feng, Z.T. (2019) Cretaceous Episodic Extension in the South China Block, East Asia: Evidence from the Yuechengling Massif of Central South China. *Tectonics*, **38**, 3675-3702. <https://doi.org/10.1029/2019tc005516>
- [13] Li, X.H., Chung, S.L., Zhou, H.W., Lo, C.H., Liu, Y. and Chen, C.H. (2004) Jurassic Intraplate Magmatism in Southern Hunan-Eastern Guangxi:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating, Geochemistry, Sr-Nd Isotopes and Implications for the Tectonic Evolution of SE China. *Geological Society, London, Special Publications*, **226**, 193-215. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2004.226.01.11>

- 
- [14] Zhang, H., Lü, Q.T., Wang, X.L., Han, S.C., Liu, L., Gao, L., *et al.* (2023) Seismically Imaged Lithospheric Delamination and Its Controls on the Mesozoic Magmatic Province in South China. *Nature Communications*, **14**, Article No. 2718. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37855-5>
- [15] 舒良树, 邓平, 王彬, 谭正中, 余心起, 孙岩. 南雄-诸广地区晚中生代盆山演化的岩石化学、运动学与年代学制约[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004, 34(1): 1-13.
- [16] 陶志军, 方适宜, 蔡松锋, 等. 新资深大断裂变质带特征, 成因及活动演化[J]. 铀矿地质, 2019, 35(3): 137-144.
- [17] 郭磊, 苏佳虎, 李礼, 等. 越城岭岩体西部韧性剪切带特征及各带与稀有金属成矿关系探讨[J]. 世界有色金属, 2018, 43(2): 123-124.
- [18] 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 2012, 33(3): 257-279.
- [19] Cochelin, B., Wang, B., Liu, J., Lu, S., Shu, L., Gumiaux, C., *et al.* (2022) Early Mesozoic Anatexis-Induced Strain Partitioning and Gneiss Doming in the Yunkai Massif, South China: A Response to Contrasted Dynamics of Paleo-Pacific and Paleo-Tethys Subductions? *Tectonics*, **41**, e2022TC007457. <https://doi.org/10.1029/2022tc007457>
- [20] 李建华, 董树文, 赵国春, 张岳桥, 辛宇佳, 王金铭, 卢运可. 华南晚中生代大陆变形、深部过程及动力学[J]. 地质学报, 2024, 98(3): 829-861.
- [21] 程顺波, 付建明, 马丽艳, 蒋桂新, 陈希清, 卢友月, 童喜润. 桂东北越城岭-苗儿山地区印支期成矿作用: 油麻岭和界牌矿区成矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1189-1201.
- [22] Tian, M.Y. and Di, Y.J. (2024) Petrogenesis of Jurassic Granitic Rocks in South China Block: Implications for Events Related to Subduction of Paleo-Pacific Plate. *Open Geosciences*, **16**, Article ID: 20220601. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0601>
- [23] 刘兴源, 李赛赛, 张洪瑞, 等. 晚白垩世特提斯洋盆向华南大陆俯冲: 来自桂东南六王石英斑岩的证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2022, 41(2): 374-387.
- [24] 郭万幸. 桂东南地区晚白垩世岩浆作用与构造动力学研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(5): 707-716.