

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.501>



黄陵隆起片麻岩和花岗岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其构造意义

吴 阳¹, 沈传波^{1,2*}, 邱华宁^{1,2}

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 黄陵花岗岩是研究扬子陆块构造演化和岩浆活动的关键对象, 高精度的⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年可以为确定黄陵花岗岩的构造演化提供准确的年代学依据. 采用⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段加热技术分别测定了黄陵隆起核部变质岩中角闪石、黄陵庙花岗岩中白云母和黑云母单矿物的年龄. 角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄(835.1±0.8) Ma, 白云母坪年龄为(830.0±1.7) Ma, 黑云母获得上凸型年龄谱, 没有形成明显的年龄坪. 分析认为, 角闪石年龄指示围岩受到花岗岩侵入烘烤重置的时间, 白云母年龄指示黄陵花岗岩冷却至 350 °C 的年龄, 岩体侵入时间不晚于 835 Ma, 在 835~830 Ma 经历快速冷却事件, 冷却速率为 50 °C/Ma. 黑云母低温阶段获得的年轻年龄 216 Ma, 记录了在晚三叠世黄陵地区缓慢差异隆升过程中发生的一期热事件.

关键词: 黄陵花岗岩; 黄陵隆起; ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年; 热扰动; 地球化学.

中图分类号: P597.3

文章编号: 1000-2383(2024)02-700-12

收稿日期: 2022-12-29

⁴⁰Ar/³⁹Ar Ages of Gneiss and Granite from Huangling Uplift and Their Tectonic Significance

Wu Yang¹, Shen Chunbo^{1,2*}, Qiu Huaning^{1,2}

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Huangling uplift, located in the front of the northeast corner of the Sichuan Basin, is composed mainly of Huangling granite. The granite is the geological record of the Jinning orogeny and the Rodinia supercontinent cracking in the Yangtze block, and it is critical for understanding the tectonic evolution and magmatic activity of the Yangtze block. To determine the formation time of the Huangling granite, abundant chronological data were published using isotope chronology methods such as U-Pb, K-Ar, and Rb-Sr. However, as a new chronology technique, ⁴⁰Ar/³⁹Ar is rarely used in studying Huangling granite. In this study, the age of amphibole in metamorphic rocks and muscovite and biotite in Huanglingmiao granite has been determined by ⁴⁰Ar/³⁹Ar stage heating technique. The plateau age of amphibole was (835.1±0.8) Ma, and the plateau age of muscovite was (830.0±1.7) Ma. The biotite sample yielded an age spectrum with an upward convex shape, and no obvious flat section was formed. It was concluded that the age of amphibole is much lower than the formation age and metamorphic age of metamorphic rocks, but slightly higher than the muscovite age of nearby granite, indicating the time when the surrounding rock was reset by granite baking and then cooled to 500 °C. The muscovite age indicates the time Huangling granite cooled to 350 °C. Both of them restrict the formation time of Huangling granite. Although no plateau age was obtained, the biotite sample gave a meaningful age

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41972152); 湖北省自然科学基金创新群体项目(No. 2021CFA031).

作者简介: 吴阳(1996-), 男, 在读研究生, 从事石油地质及⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究. ORCID:0000-0002-5235-3364. E-mail:wuyug@hotmail.com

* **通讯作者:** 沈传波, ORCID: 0000-0001-5641-9714. E-mail:cbshen@cug.edu.cn

引用格式: 吴阳, 沈传波, 邱华宁, 2024. 黄陵隆起片麻岩和花岗岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其构造意义. 地球科学, 49(2):700-711.

Citation: Wu Yang, Shen Chunbo, Qiu Huaning, 2024. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Ages of Gneiss and Granite from Huangling Uplift and Their Tectonic Significance. *Earth Science*, 49(2):700-711.

of 216 Ma in the low-temperature steps, which probably indicates the occurrence time of thermal disturbance in the later stage. The collision and merging of the North China and Yangtze plates caused the slow uplift of the Huangling, and activity of the NNW-trending faults in the Huangling area, and caused the thermal effect enough to affect the Ar closure of the biotite. The high precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age provides accurate chronological support for determining the tectonic evolution history of Huangling granite.

Key words: Huangling Granite; Huangling Uplift; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar dating; thermal events; geochemistry.

罗迪尼亚超大陆的汇聚和裂解一直是国内外前寒武纪研究的热点. 华南陆块是罗迪尼亚超大陆的重要组成部分, 其内大范围出露的新元古代花岗岩被认为是超大陆裂解在华南陆块的地质响应. 黄陵隆起位于华南陆块北缘, 正是超大陆汇聚和裂解的地方, 其主体黄陵花岗岩是华南新元古代花岗岩的典型代表. 岩浆活动在离散大陆边缘的张裂过程中起到决定性作用(孙珍等, 2021), 研究黄陵花岗岩的形成时间和热演化过程对确定华南陆块在这一时期的构造背景及其与超大陆裂解的关系具有重要意义.

为确定黄陵花岗岩的形成时间, 众多学者在此展开研究, 利用 U-Pb、K-Ar、Rb-Sr 等同位素年代学方法, 获得了丰富的年代学数据(表1). 但作为一种相对新颖的定年方法, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年在黄陵花岗岩中的运用尚不多见. 相比其他同位素定年方法, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法具有一些无可比拟的优势, 如年龄精度高, 样品用量少, 结合阶段加热可以揭示后期热事件, 矿物组合定年揭示矿物冷却历史等. 目前, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年已被广泛应用于成矿成藏、构造运动、岩浆活动乃至天体演化等各种地质事件的定年研究中. 本研究通过对黄陵杂岩中的角闪石、黑云母和白云母开展精细的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热定年, 探讨了黄陵花岗岩体的形成过程及中生代的热扰动事件, 这为华南陆块北缘的构造演化提供了新的证据.

1 区域地质背景

黄陵隆起位于扬子克拉通北缘, 是江南造山带以北和秦岭—大别造山带以南之间的相对稳定部位, 周围分布有秭归向斜、当阳向斜、香龙山背斜等多个构造单元. 其核部为一套新太古代—中元古代的变质岩系和侵入其中的新元古代的黄陵花岗岩, 四周由老到新环绕着南华系、震旦系和古中生界沉积盖层(图1)(葛翔等, 2016).

黄陵隆起核部变质岩系过去被统称为崆岭群变质岩或崆岭杂岩(马大铨等, 1997), 之后的研究和区调对这一变质岩系有更细致的划分和命名(熊

成云等, 1998). 通常认为崆岭群变质岩指黄陵隆起核北部和核西南部的变质岩系, 主要包括太古代东冲河 TTG 片麻岩、古元古代黄凉河组和中元古代力耳坪组变沉积岩. 崆岭群变质岩主要分布于隆起核北部和西南部, 总出露面积约 425 km². 北部崆岭群变质岩东、西、北 3 面与南华系不整合覆盖, 其南面被黄陵庙岩套侵入, 中部被圈崎淌钾长花岗岩侵入, 主要由闪长质—英云闪长质—奥长花岗质—花岗闪长质片麻岩、花岗质片麻岩、富铝片岩及榴线英岩为主的变沉积岩等组成(高山等, 2001; 蒋幸福等, 2021); 西南部崆岭群变质岩出露面积约 65 km², 西面被三斗坪岩套侵入, 并被南华系不整合覆盖, 其余 3 面被黄陵庙岩套侵入, 主要的岩石组合为片麻岩、斜长角闪岩和混合岩(彭敏, 2010). 大量同位素定年数据表明, 东冲河片麻岩原岩 TTG 花岗岩的侵入发生在 3.0~2.8 Ga(高山等, 2001; 魏君奇等, 2009; 赵敏等, 2012), 崆岭群变质岩的变质作用发生在 2.7~2.5 Ga(袁海华等, 1991; 凌文黎等, 1998; 高山等, 2001; 魏君奇等, 2009; 赵敏等, 2012), 圈崎淌钾长花岗岩和基性岩脉的侵入时间较为接近, 为 1 840~1 852 Ma(袁海华等, 1991; 彭敏, 2010).

黄陵花岗岩在新元古代(833~770 Ma)侵入崆岭群变质岩地层(马国干等, 1984; 李志昌等, 2002), 总出露面积约 1 000 km², 是我国晋宁期花岗岩侵入岩群的典型代表, 其北部和西部与崆岭群变质岩呈侵入接触, 东部和南部被南华系下统莲沱组不整合覆盖. 根据岩性不同, 马大铨等(2002)将黄陵花岗岩划分为三斗坪、黄陵庙、大老岭、晓峰 4 个岩套和 14 个单元, 其中三斗坪岩套主要由英云闪长岩组成, 黄陵庙岩套主要由奥长花岗岩和花岗闪长岩组成, 大老岭岩套主要由二长花岗岩和二长闪长岩组成, 晓峰岩套主要由花岗斑岩和花岗闪长斑岩组成. 早期研究认为, 三斗坪、黄陵庙和大老岭岩套属同一期的岩浆作用的产物(胡世玲等, 1989), 但后来逐渐丰富的同位素年代学证据(表1)表明三斗坪和黄陵庙岩套的岩浆演化不同于大老岭岩套. 目前一般认为三斗坪和黄陵庙两个岩套形成于北侧

表 1 黄陵隆起同位素年代学数据整理

Table 1 Compilation of isotopic ages for igneous rocks and metamorphic rocks in the Huangling Uplift

岩性(岩石组合)	矿物	年龄(Ma)	年代学方法	解释	文献
辉绿岩脉	锆石	2 842±11	U-Pb	岩浆锆石年龄,TTG花岗岩的形成时间	[1]
		2 949±7			
		2 900±10			
辉绿岩脉	锆石	2 557	U-Pb	变质作用发生时间	[2]
		3 037±21		岩浆锆石,TTG古侵入体的形成时间	
		2 913		结晶锆石,脉岩形成时间	
角闪岩	锆石	2 511	U-Pb	变质锆石,构造热事件时间	[3]
		1 865~3 242		岩浆锆石,TTG花岗岩多期侵入时间	
奥长花岗岩片麻岩	锆石	2 583±240	U-Pb	变质锆石,变质事件事件	[4]
		3 051±12		岩浆锆石,TTG古侵入体的形成时间	
		2 739±18		变质锆石,片麻岩改造变质时间	
		2 947±5		奥长花岗岩的侵入年龄	
		2 895~2 938		岩浆锆石受后期元素活动扰动的指示后期改造年龄	
		1 992±16		奥长花岗岩岩浆的侵入年龄	
		2 903±10		锆石变质增生边部年龄,指示变质活动	
2 727±8	锆石核部年龄,指示古侵入体年龄				
2 901±8					
片麻岩	全岩	2 728±118	Sm-Nd	变质岩改造变质时间	[5]
斜长角闪岩	全岩	2 742±83		变质岩改造变质时间	
角闪斜长混合岩	锆石	2 830±30	U-Pb	角闪斜长混合岩的改造变质时间	[6]
		2 866±12	Pb-Pb	角闪斜长混合岩的改造变质时间	
钾质花岗岩	锆石	1 840±4	U-Pb	钾质花岗岩的侵入时间	[6]
		1 851±237	Pb-Pb	钾质花岗岩的侵入时间	
黑云斜长变粒岩	锆石	2 913±4	Pb-Pb	变质岩改造变质时间	[7]
变基性岩	锆石	2 940±8	Rb-Sr	变质岩改造变质时间	
钾长花岗质片麻岩	锆石	1 803±30	U-Pb	变质岩遭受构造-热事件改造的时间	[7]
		2 015±15		变质锆石,改造变质时间	
片麻岩	锆石	2 153±28	U-Pb	岩浆锆石	[8]
		2 283~2602			
		1 852±11		指示基性岩脉的侵入时间	
辉绿岩脉	锆石	1 852±11	U-Pb	指示基性岩脉的侵入时间	[9]
混合岩	锆石	2 916~2947	U-Pb	岩浆锆石,指示原岩的形成时间	[10]
混合岩	锆石	3 113~3253	U-Pb	锆石继承核,指示原岩的形成时间	
奥长花岗岩片麻岩	锆石	2 858±25	U-Pb	岩浆锆石,指示原岩的形成时间	
英云闪长质片麻岩	锆石	2 893±29	U-Pb	岩浆锆石,指示原岩的形成时间	
变沉积岩	锆石	1 974±25	U-Pb	指示了构造热事件	
砂岩	锆石	3 802±8	U-Pb	碎屑锆石年龄,记录扬子陆块几期主要的构造活动时间	
		3 145~3 309			
		2 901~2 976			
		1 928~1 961			
黄陵庙花岗岩、花岗斑岩	锆石	733~830	U-Pb	岩套的成岩年龄	[11]
		821±2			
		816±5			
		814±5			
		809±5			
砂岩	锆石	806±6	U-Pb	碎屑锆石,指示岩浆作用时间	[11]
		800±5			
		3 119.6~3 507.5			

续表 1

岩性(岩石组合)	矿物	年龄 (Ma)	年代学方法	解释	文献
大老岭二长花岗岩	锆石	846±15	U-Pb	捕获成因锆石	
		794±7		结晶锆石,大老岭花岗岩侵入时间	
		746±10		新生锆石的形成年龄,或发生部分重置的年龄	
三斗坪英云闪长岩	锆石	795±8	U-Pb	三斗坪花岗岩侵入时间	[12]
		734±17		指示后期热事件	
		618±13		指示更晚期的热事件或Pb丢失	
晓峰浅成花岗岩	锆石	871±18	U-Pb	捕获成因锆石	
		737±13		晓峰花岗岩的侵入时间	
黑云母花岗岩闪长岩	黑云母	823±7	K-Ar	黄陵庙花岗岩形成时间	[13]
	锆石	819±7	U-Pb	黄陵庙花岗岩形成时间	
		818±5		黄陵庙花岗岩形成时间	
黄陵庙花岗岩	全岩	808±35	Rb-Sr	黄陵庙花岗岩形成时间	[14]
大老岭花岗岩	全岩	786±17	Rb-Sr	大老岭花岗岩形成时间	
晓峰花岗岩	全岩	750±57	Rb-Sr	晓峰花岗岩形成时间	
中粒闪长岩	全岩及组成矿物	805±4	Rb-Sr	黄陵隆起整酸性岩浆活动区域结束,基本稳定的时间	
	全岩	807±2			
	全岩	834±35			
三斗坪闪长岩	锆石	832±12	U-Pb	三斗坪岩体的形成年龄	[15]
	全岩及组成矿物	805±5	Rb-Sr	三斗坪岩体的Rb-Sr同位素体系封闭年龄	
黄陵庙似斑状黑云母花岗岩闪长岩	锆石	819	U-Pb	黄陵庙花岗岩的形成时间	
	全岩及组成矿物	800±2	Rb-Sr	黄陵庙花岗岩的Rb-Sr同位素体系封闭年龄	
花岗岩	黑云母	780~789	K-Ar	太平溪和黄陵庙花岗岩的K-Ar黑云母封闭年龄	[16]
	角闪石	738~799			
	白云母	799			
花岗伟晶岩脉	微斜长石、白云母	807±2	Rb-Sr	岩脉的侵入时间	
花岗闪长岩脉	独居石	801±24	U-Pb	岩脉的侵入时间	
花岗岩	锆石	837±7	U-Pb	花岗岩的侵入时间	
层凝灰岩	锆石	724±12	U-Pb	指示两期岩浆环带的存在,较年轻年龄指示莲沱组顶界年龄	[17]
	锆石	787±7			
三斗坪花岗岩	角闪石	844.0±4.2	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	三斗坪花岗岩的形成时间	[18]
辉长岩	锆石	857±11	U-Pb	岩石结晶年龄	[19]
橄榄辉长岩	锆石	854±14	U-Pb	岩石侵位年龄	
三斗坪英云闪长岩	黑云母	838.7±4.0	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	黑云母封闭年龄	[20]
		838.2±4.1			
		837.3±4.2			
三斗坪英云闪长岩	角闪石	844.0±4.2		角闪石封闭年龄	
黄陵庙花岗岩	锆石	815±9	U-Pb	黄陵庙岩套侵位时间	[21]
片麻岩	角闪石	835.1±0.8		角闪石受花岗岩侵入烘烤重置时间	
黄陵庙花岗岩	白云母	830.0±1.7	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	花岗岩冷却白云母封闭年龄	本文
	黑云母	216		花岗岩遭受后期热扰动时间	

注:[1]赵敏等(2012);[2]魏君奇等(2009);[3]Wei *et al.*(2020);[4]高山等(2001);[5]凌文黎等(1998);[6]袁海华等(1991);[7]赵风清等(2006);[8]Li *et al.*(2016);[9]彭敏等(2009);[10]Zhang *et al.*(2006a, 2006b, 2006c);[11]柳小明等(2005);[12]凌文黎等(2006);[13]马国干等(1984);[14]马大铨等(2002);[15]冯定犹等(1991);[16]李志昌等(2002);[17]高维和张传恒(2009);[18]周忠友等(2007);[19]Jiang *et al.*(2018);[20]李益龙等(2007);[21]惠博等(2022);年龄解释为对应文献中的解释

大洋板块向扬子板块俯冲期间,而大老岭岩套形成于两板块碰撞后的晚期隆起阶段(李志昌等, 2002),晓峰岩套则为更晚一期岩浆作用的产物,这期岩浆作用不仅导致了以七里峡复式岩体为代表的新生岩体对黄陵其他岩体的侵入,同时对部分早期岩体造成了热影响(马国干等,1984;马大铨等, 2002;凌文黎等,2006).

黄陵隆起经历的构造演化可划分为阜平、吕梁、扬子(晋宁)、加里东-印支、燕山-喜马拉雅等5个旋回,其中晋宁期构造运动控制了黄陵隆起核部地区地质构造和岩浆活动(熊成云等,1998).晋宁期之前,黄陵地区已经成为扬子板块的组成部分.晋宁期,华南陆块参与到罗迪尼亚超大陆的汇

聚和裂解之中,陆块北缘经历了挤压造山与伸展大陆断裂及相关的岩浆活动.830~780 Ma被认为是华南陆块聚合到罗迪尼亚超大陆和从中裂解的转折点(张少兵等,2019).

2 样品特征和实验方法

本文样品为采自黄陵隆起的花岗岩和片麻岩,样品信息见表2.样品9531为为中太古代东冲河片麻岩,采于NW向斜切黄陵岩基的雾渡河断裂北段附近,紧邻花岗岩体.样品5632和10SN7均为黄陵庙岩套花岗岩,5632样品采集自莲沱镇莲沱大桥附近,10SN7样品采集自雾渡河至下堡坪的公路旁,

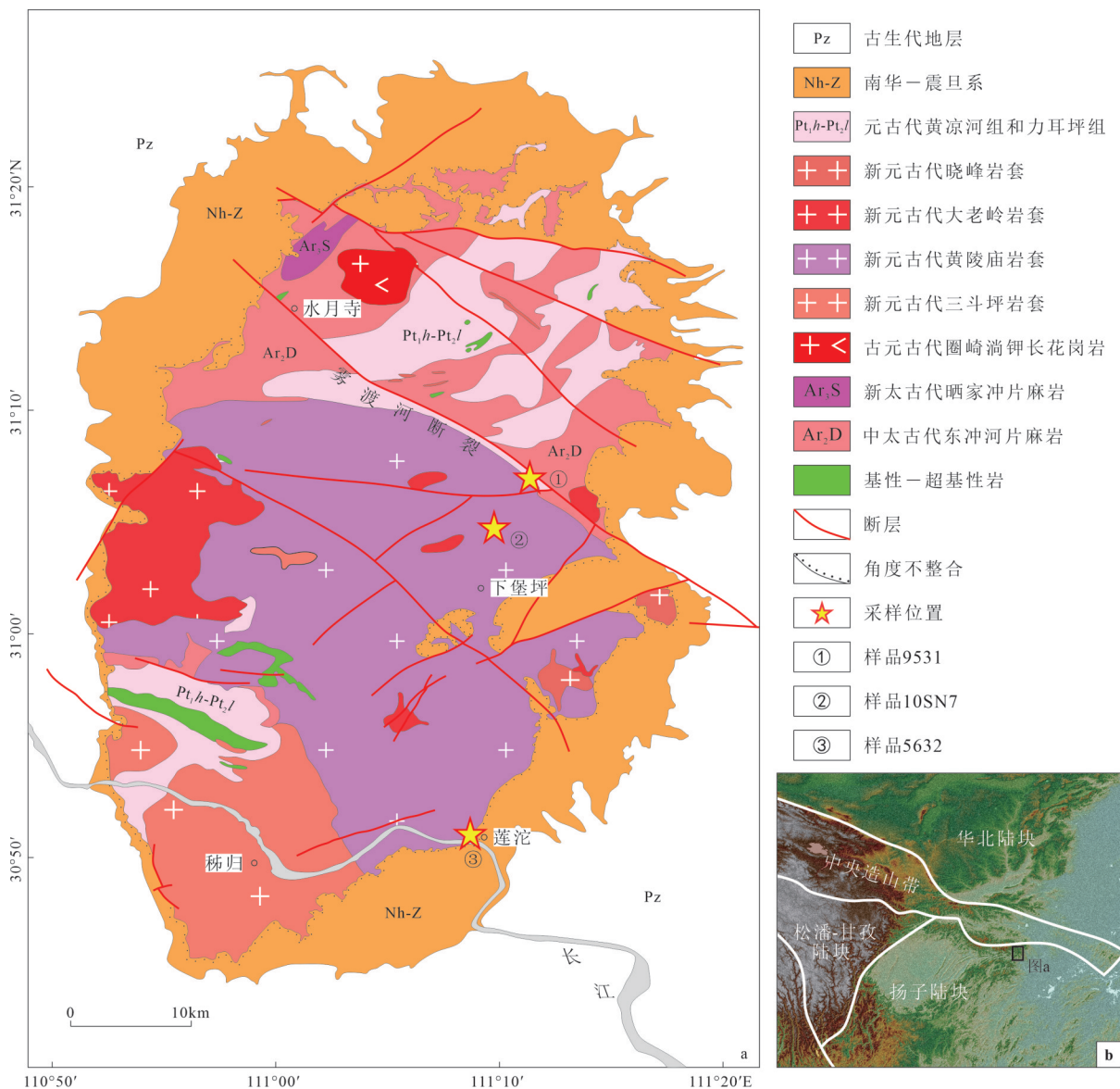


图1 黄陵地区地质简图及采样点位置图(a, 据研究区1:25万地质图);研究区大地构造位置图(b, 底图为DEM地形图)

Fig.1 Geological sketch map of the Huangling Uplift and locations of sampling (a) and tectonic position of study area (b)

位于岩体边缘.

样品 9531、5632 和 10SN7 被破碎至 40~60 目, 分别从中挑选出角闪石、白云母和黑云母用于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年. 选出的单矿物先后经过稀硝酸浸泡、去离子水反复清洗, 并在双目镜下提纯, 低温烘干后包装接受辐照. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年实验在德国弗莱贝格工业大学进行, 标样为 FCT 透长石国际标样. 采用高温熔炉提取角闪石中的气体, 采用 CO_2 激光阶段加热的方法提取云母矿物中的气体. 详细的实验方法见 Shen *et al.* (2012, 2020).

3 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果

3 件样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果列于附表 1 中, 本文文字及图表中所有误差均为 1σ . 样品 9531 角闪石采用温控熔炉的方式进行了 24 个阶段的加热, 温度从 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 逐步升温到最高 $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$, 前两次升温增量为 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 之后增速放缓, 大部分阶段增温不超过 $10\text{ }^\circ\text{C}$. 其中前 5 个 $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ 年龄变化较大, 对应年龄谱图中表观年龄变化较大, ^{39}Ar 释放量占比较低 (图 2a); 在第 6~22 阶段, $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ 和表观年龄相对稳定, 其中 6~20 阶段构成非常平坦的年龄坪, 坪年龄为 $835.1\pm 0.8\text{ Ma}$, ^{39}Ar 释放量占总量的 74%,

全熔年龄为 $(812.9\pm 0.6)\text{ Ma}$ (图 2a).

样品 5632 白云母和 10SN7 黑云母采用 CO_2 激光熔样的方式进行了 25 个阶段的测量. 5632 白云母在前 3 个阶段表观年龄快速上升, 第 1 阶段年龄为 491 Ma , 在 12~25 阶段较为稳定, 构成平坦的年龄坪, 坪年龄为 $(830.0\pm 1.7)\text{ Ma}$, ^{39}Ar 释放量占总体释放量的 65.6%, 全熔年龄为 $(827.5\pm 1.4)\text{ Ma}$ (图 2b). 10SN7 黑云母形成了上凸形的年龄谱, 在 1~17 阶段表观年龄由 216 Ma 逐渐上升到约 900 Ma , 在后续 8 个阶段逐渐下降, 没有形成明显的年龄坪, 全熔年龄为 $(780.4\pm 0.7)\text{ Ma}$ (图 3a). 反等时线图中, 前两个阶段得到等时线年龄为 $(201\pm 13)\text{ Ma}$ (图 3b), 与年龄谱第一个阶段年龄也即最小年龄接近.

4 讨论

4.1 黄陵庙花岗岩侵入年龄和冷却过程

9531 角闪石样品采自雾渡河断裂北段附近中太古代东冲河片麻岩, 该片麻岩中岩浆锆石 U-Pb 年龄揭示原岩 TTG 花岗岩的侵入时间为 $2\ 903\sim 3\ 051\text{ Ma}$, 变质锆石的 U-Pb 年龄揭示其变质时间约为 $2\ 727\sim 2\ 739\text{ Ma}$ (高山等, 2001; 赵风清等,

表 2 黄陵隆起样品信息

Table 2 Sample information of Huanglin Uplift

样品号	采样位置	纬度	经度	高程(m)	岩性	定年单矿物
9531	雾渡河镇花岗岩村	N31°06.542'	E111°11.386'	580	片麻岩	角闪石
5632	莲沱镇莲沱大桥附近	N30°51.019'	E111°09.029'	93	花岗岩	白云母
10SN7	雾渡河至下堡坪的公路旁	N31°04.898'	E111°09.456'	990	花岗岩	黑云母

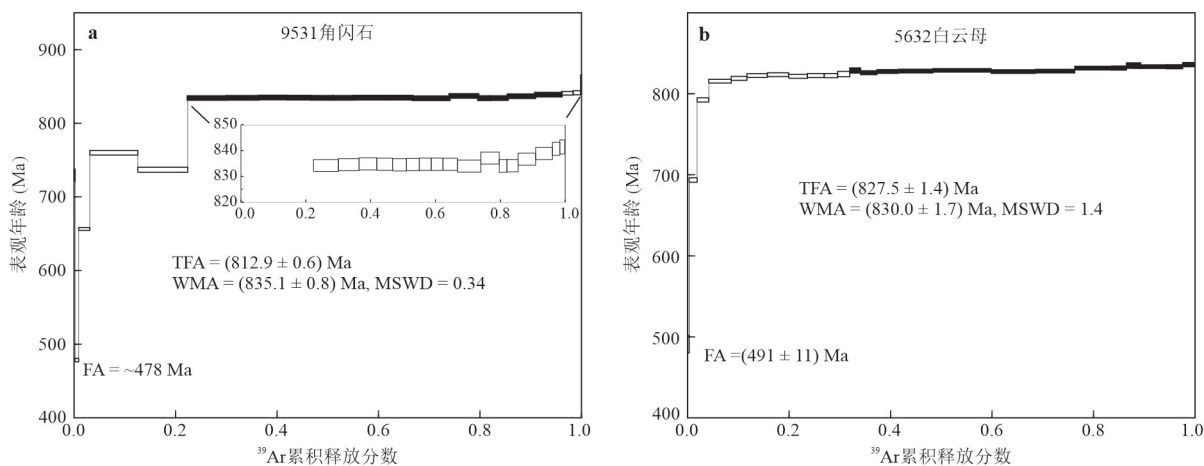
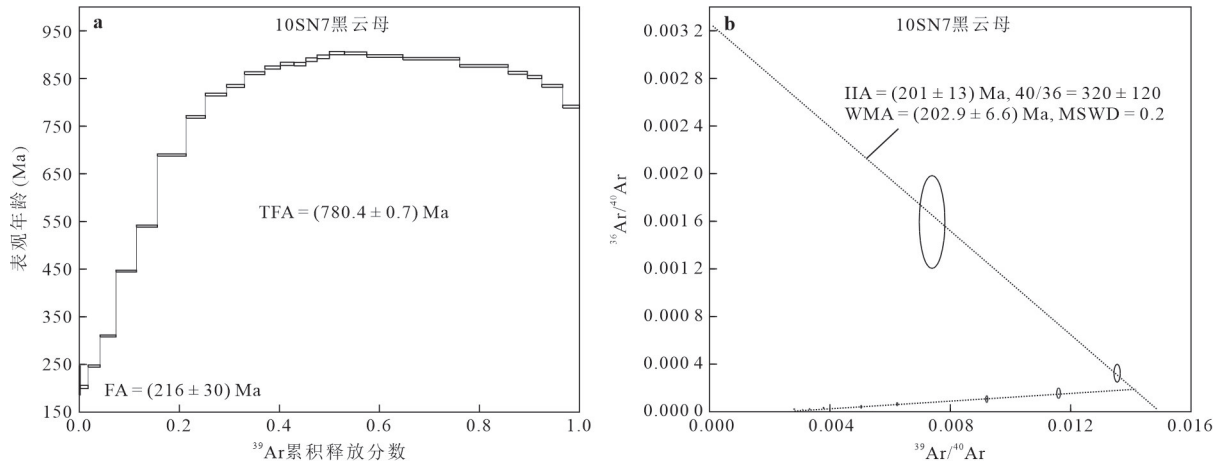


图 2 9531 角闪石和 5632 白云母矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱

Fig.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of 9531 amphibole and 5632 muscovite

图中阴影部分指示年龄坪; TFA 为全熔年龄; WMA 为坪阶段加权平均年龄, 即坪年龄; FA 为年龄谱初始阶段的年轻年龄

图3 10SN7黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱及反等时线图Fig.3 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra and inverse isochron diagram of 10SN7 biotite

图中 IIA 为反等时线年龄, 40/36 为样品捕获的空气氩比值

2006). 同层位钾长花岗片麻岩中的锆石 U-Pb 年龄为 $(1\ 803 \pm 30)$ Ma, 与西北部圈崎淌钾长花岗岩和零星出露的基性脉岩的形成时间接近, 指示太古代东冲河片麻岩部分遭受吕梁运动、岩浆或热事件改造的时间.

9531 角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄显著年轻于原岩的侵入时间、变质或改造时间, 而与雾渡河断裂附近黄陵庙岩套的形成年龄接近. 雾渡河断裂是黄陵地区广泛发育的北北西向韧性剪切带的典型代表, 具有多期活动特征. 早期剪切变形变质作用为绿帘角闪岩相, 变形温度高, 叠加造山晚期花岗岩浆热液作用, 造成角闪石 Ar 计时器完全重置(角闪石 Ar 封闭温度约为 $500\ ^\circ\text{C}$, 据 Schneider *et al.*, 2013). 晚期剪切变形变质作用为绿片岩相, 变形温度较低, 不足以破坏角闪石的 Ar 封闭体系. 雾渡河断裂伴生石英脉的流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年显示原生包裹体年龄 (821.14 ± 3.05) Ma (1σ , 据刘昭茜未发表数据), 指示了雾渡河断裂活动停止构造趋于稳定的时间. 本次获得的角闪石年龄与该石英脉年龄可以很好地匹配, 反映了雾渡河断裂与岩浆活动的密切联系. 角闪石年龄 835 Ma 指示了黄陵庙花岗岩烘烤重置围岩的年龄, 因此花岗岩体的侵入时间应不晚于 835 Ma.

5632 白云母形成了可靠的坪年龄, 在 5~25 阶段表观年龄均相对稳定, 在 12~25 阶段获得了低误差的坪年龄, 坪阶段 ^{39}Ar 释放量占总释放量的 68.04%. 对于白云母这一富钾矿物而言, 该坪年龄毋庸置疑反映了白云母的结晶年龄. 该年龄指示了花岗岩体冷却到白云母封闭温度 ($350\ ^\circ\text{C}$) 的年龄,

可以代表黄陵庙岩套的结晶年龄. 白云母和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄表明黄陵庙岩套在 835~830 Ma 期间经历了快速冷却, 平均冷却速率为 $50\ ^\circ\text{C}/\text{Ma}$. 该快速冷却事件指示当时黄陵地区处在强烈的伸展构造背景之下(李益龙等, 2007), 可能罗迪尼亚超大陆的裂解有关. Zhang *et al.* (2013) 指出, 在罗迪尼亚裂解构造背景中, 华南陆块周缘及其内部都存在相似的强伸展裂解环境, 在板块周缘扩张裂解形成了现今华南大陆的雏形, 在板块内部裂解形成了一系列次级地块.

4.2 黄陵花岗岩中生代热事件

黑云母样品形成上凸形年龄谱可能有多种成因, 如过剩 ^{40}Ar 、缓慢冷却、后期热扰动以及矿物混合等. 它们的区别在于: (1) 过剩 ^{40}Ar 尽管通常被认为以鞍型年龄谱为特征, 即低温阶段过剩 ^{40}Ar 释放形成逐渐下降的异常高年龄, 高温阶段年龄逐渐上升, 中间阶段得到的最小表观年龄指示矿物的结晶年龄或最大结晶年龄(Lanphere *et al.*, 1976), 但若遭遇结晶后的热扰动, 年龄谱可能失去低温阶段的特征, 形成上凸形的年龄谱; (2) 缓慢冷却模型的低温年龄指示了最终冷却的时间, 高温年龄可能只反映冷却过程中的某一个时间点(Harrison *et al.*, 1982; Lovera *et al.*, 1989); (3) 热扰动形成的年龄谱中, 低温年龄指示热扰动的的时间, 高温年龄可能仍然记录原始结晶时间(Shi *et al.*, 2020); (4) 混合矿物形成的年龄介于多种矿物的真实年龄之间, 如果没有形成足够长的年龄坪, 表观年龄只反映某种比例的混合年龄, 不一定具有实际意义.

矿物结晶过程中捕获的 Ar 往往占据矿物的易

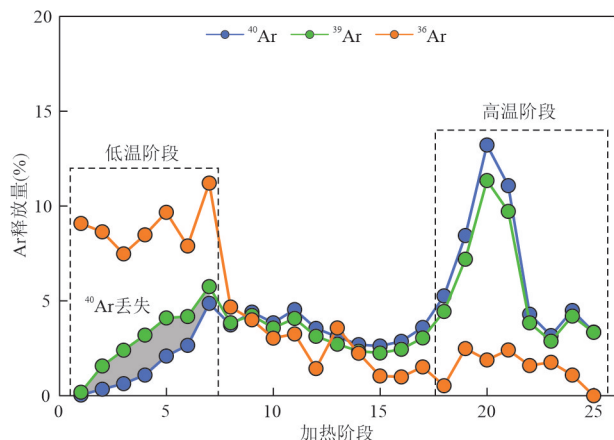


图4 10SN7黑云母样品Ar释放模式图

Fig.4 Argon releasing modal of 10SN7 biotite.

释气部位,即矿物内的各种表面、孔洞缝以及晶格的开放部位等.因此 ^{36}Ar 和非放射性成因 ^{40}Ar 往往在阶段加热实验的前期大量释出,后期 ^{36}Ar 消耗殆尽,晶格内部的放射性成因 ^{40}Ar 释气占主导,出现 ^{40}Ar 的释气高峰.10SN7黑云母的Ar的气模式图显示(图4), ^{36}Ar 在前几个阶段相对稳定,而在第7个阶段达到最高峰,指示矿物易释气部分可能在地质历史时期发生过一次释气,导致低温阶段缺乏明显的 ^{36}Ar 释气高峰.此外, ^{39}Ar 主要来自钾元素在中子活化过程中的衰变,与地质历史过程中钾元素原地衰变产生的 ^{40}Ar 应当占据相同或相似的位置,换言之,两者的释放曲线应该比较接近.因此,1~7阶段 ^{40}Ar 释放曲线中偏离 ^{39}Ar 曲线的部位(图4阴影部分),很可能指示了由最近一次热扰动事件造成的 ^{40}Ar 丢失.年龄谱第1阶段的年龄216 Ma指示了这一期热事件发生的时间.

此外,10SN7黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱与胡世玲等(1989)发表的莲沱地区黄陵庙黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱极其相似,他们得到阶段上升形的年龄谱,第一阶段的年龄为 (142.9 ± 2.3) Ma,最大年龄为 (899.6 ± 0.2) Ma,他们将最后两个阶段视为年龄坪得到坪年龄为 (893.7 ± 6.7) Ma,认为其代表了岩体的形成时间.得利于研究实验技术的不断提高,本文相较前人开展了更细致的阶段升温实验,加热阶段更多,更精细地刻画了黑云母年龄谱的形态,尤其是在低温阶段,获得了由前两个低温阶段确定的合理的等时线年龄(图3b).在此基础上,我们认为这两件样品的年龄谱形态均是黑云母矿物遭受后期热事件影响的体现,高温阶段的老年龄可能指示黑云母样品捕获老矿物,或者反映了受热扰动影响

的黑云母晶体内部的Ar重分布;低温阶段的年轻年龄指示了黑云母矿物遭受的最后一期岩浆活动或热扰动影响的时间.黑云母的稳定性不如白云母,易受后期构造-热扰动影响,在矿物颗粒边缘丢失部分Ar.胡世玲等(1989)得到的更年轻的第一阶段年龄可能反映了局部地区与216 Ma热事件相区别的更晚一期热事件.

4.3 黄陵花岗岩构造-热演化历史

中元古代末期-新元古代,黄陵地区发生了一次巨大的造山运动,即晋宁运动.在该时期,黄陵地区的构造变形以逆冲推覆剪切和花岗岩侵入引发的底辟隆升为主要特征.早期的逆冲推覆剪切导致崆岭群变沉积岩内发生强烈的韧性剪切作用,TTG片麻岩再次发生新生面理替换,同时形成了一系列北西向的韧性剪切断裂带.之后花岗岩侵入持续烘烤围岩,导致断裂带附近片麻岩内角闪石发生完全重置,本文获得角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为835 Ma,即代表了花岗岩侵入后的再封闭时间($500\text{ }^{\circ}\text{C}$).

花岗岩侵入形成了隆起南部大范围出露的新元古代黄陵花岗岩,结合前人同位素定年结果(冯定犹等,1991;马大铨等,2002;凌文黎等,2006;周忠友等,2007;高维等,2009),黄陵花岗岩具有三期侵入的特征,第一期侵入形成了三斗坪和黄陵庙岩套,结晶时间为844~800 Ma,第二期侵入形成了隆起西侧大老岭岩套,时间为约794~786 Ma,第三期侵入形成了晓峰岩套,时间为750~737 Ma.本文对黄陵庙岩套边缘的白云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年得到坪年龄为830 Ma,确定了黄陵庙岩套开始冷却至 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间,岩体边缘冷却速率为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (图5).值得注意的是,目前获得的三斗坪和黄陵庙岩套的年龄分布范围较宽,且并不符合各年代学方法的封闭温度趋势,因此这些年龄并不能代表其侵入年龄,而只能代表其结晶后冷却年龄.一种可能的解释是岩体的侵入发生在晋宁期造山运动晚期,岩浆持续侵入烘烤围岩,接触带和岩浆内矿物组分均处于开放状态.在罗迪尼亚裂解构造背景下,华南陆块周缘及内部都处于伸展裂解环境(Zhang *et al.*, 2013),使得岩体整体快速冷却,但局部又存在冷却速率的差异,导致具有不同封闭温度的各个地质计时器失去应有的年龄差距.

中生代以来,黄陵背斜经历了几个不同规模的构造隆升阶段,尽管不同的学者的划分方案不尽相同(徐大良等,2013;葛翔等,2016),但至少包括4个

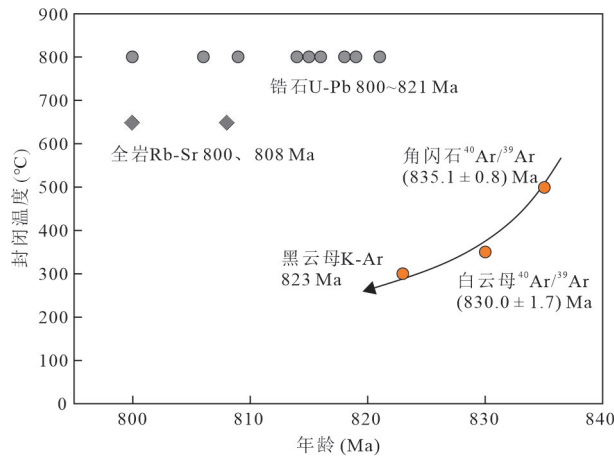


图5 黄陵庙岩套冷却曲线

Fig.5 The cooling curve of Huangling granitoids

锆石 U-Pb 数据来自马国干等(1984)、冯定犹等(1991)、Zhang *et al.*, (2006a)、慧博等(2022);全岩 Rb-Sr 数据来自冯定犹等(1991)、马大铨等(2002);黑云母 K-Ar 年龄来自马国干等(1984)

具有不同抬升速率的隆升阶段:中三叠世至侏罗纪(约 240~140 Ma),黄陵地区受基底控制出现缓慢的差异隆升;白垩纪(约 140~80 Ma),受秦岭—大别造山带和雪峰陆内造山带双向挤压,区域发生强烈的隆升作用;晚白垩世至始新世(约 80~40 Ma),黄陵地区相对稳定,隆升速率缓慢;晚始新世至今(约 40~0 Ma),隆升速率再次加快. 10SN7 黑云母样品得到的第一阶段的表观年龄 216 Ma,与黄陵地区绿帘石—石英细脉中的绿帘石的形成年龄一致(217 Ma \pm 7 Ma, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)(李志昌等, 2002),表明黑云母同位素体系封闭性的破坏与区域性构造事件相关联,即印支期华北与扬子板块的碰撞拼合造成黄陵地区开始缓慢隆升,并造成黄陵地区 NNW 向大断裂的活动,引发了足以影响黑云母封闭性的热效应.

5 结论

精细的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热定年技术赋予了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年揭示后期热事件年龄的能力,丰富了单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄的地质意义. 通过多种单矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年分析,厘定了黄陵花岗岩体侵入和冷却的时间序列:黄陵隆起核部片麻岩中角闪石 835 Ma 的年龄是花岗岩侵入烘烤重置围岩的结果,是黄陵地区在晋宁期造山运动晚期大规模花岗岩侵入的时间响应;白云母拥有相对较低的封闭温度,其年龄 830 Ma 代表了黄陵黄岗岩的主体黄陵庙岩套冷却至 350 °C 的年龄. 两种单矿物年龄指示在

835~830 Ma 期间存在一期快速冷却事件,可能发生于罗迪尼亚超大陆裂解相关的伸展环境.

黄陵花岗岩中黑云母稳定性不如白云母,易受后期构造—热扰动影响,但低温阶段最年轻的表观年龄揭示了热扰动发生的时间. 认为黑云母样品低温阶段的最小表观年龄 216 Ma 指示了黄陵地区中生代以来经历的一次岩浆活动或热扰动,发生于三叠纪黄陵地区的首次缓慢隆升阶段.

附表见本刊官网:www.earth-science.net.

References

- Feng, D. Y., Li, Z. C., Zhang, Z. C., 1991. Intrusive Ages and Isotopic Characteristics of Massives in the South of Huangling Granitoids. *Hubei Geological*, 5(2):1–12 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Qiu, Y. M., Ling, W. L., et al., 2001. Studies on the Chronology of Single Grain Zircon SHRIMP U-Pb from the Kongling High Metamorphic Geologic Body- Discovery of the Continental Crust Material of the Yangtze Craton >3.2 Ga. *Science in China (Series D)*, 31(1):27–35 (in Chinese).
- Gao, W., Zhang, C. H., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the Huangling Granite and the Tuff Beds from Liantuo Formation in the Three Gorges Area of Yangtze River, China and Its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 28(1):45–50 (in Chinese with English abstract).
- Ge, X., Shen, C. B., Mei, L. F., 2016. Low-Temperature Thermochronological Constraints on the Mesozoic-Cenozoic Paleotopograph in the Huangling Massif. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4):654–662 (in Chinese with English abstract).
- Harrison, T. M., McDougall, I., 1982. The Thermal Significance of Potassium Feldspar K-Ar Ages Inferred from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age Spectrum Results. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 1811–1820. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90120-x](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90120-x)
- Hu, S. L., Liu, H. Y., Wang, S. S., et al., 1989. On the Age of Sinian Lower Boundary Inferred from the New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Data. *Chinese Journal of Geology*, 24(1):16–25 (in Chinese with English abstract).
- Hui, B., Dong, Y. P., Sun, S. S., et al., 2022. Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Northern Margin of the Yangtze Plate: Constrains from Magmatic Events. *Acta Geologica Sinica*, 96(9):3034–3050 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X. F., Peng, S. B., Han, Q. S., 2021. Petrogenesis and Geological Significance of ca. 860 Ma Dikes in Southern Huangling Anticline, Yangtze Craton. *Earth Science*, 46

- (6): 2117—2132 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X. F., Peng, S. B., Kusky, T. M., et al., 2018. Petrogenesis and Geotectonic Significance of Early-Neoproterozoic Olivine-Gabbro within the Yangtze Craton: Constraints from the Mineral Composition, U-Pb Age and Hf Isotopes of Zircons. *Journal of Earth Science*, 29(1): 93—102. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0821-5>
- Lanphere, M., Dalrymple, G., 1976. Identification of Excess ^{40}Ar by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age Spectrum Technique. *Earth and Planetary Science Letters*, 32: 141—148. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(76\)90052-2](https://doi.org/10.1016/0012-821x(76)90052-2)
- Li, Y. H., Zheng, J. P., Xiong, Q., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Implications of Paleoproterozoic Metapelitic Rocks in the Archean Kongling Complex from the Northern Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 276: 158—177. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.01.028>.
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Li, X. H., et al., 2007. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Plateau Ages of Biotite and Amphibole from Tonalite of Huangling Granitoids and Their Cooling Curve. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1067—1074 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. C., Wang, G. H., Zhang, Z. C., 2002. Isotopic Age Spectrum of the Huangling Granitic Batholith, Western Hubei. *Geology and Mineral Resources of South China*, 3: 19—28 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Gao, S., Cheng, J. P., et al., 2006. Neoproterozoic Magmatic Events Within the Yangtze Continental Interior and Along Its Northern Margin and Their Tectonic Implication: Constraint from the ELA-ICPMS U-Pb Geochronology of Zircons from the Huangling and Hannan Complexes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 387—396 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Gao, S., Zheng, H. F., et al., 1998. The Sm-Nd Isotope Geochronology of the Kongling Complex in Huangling Region of the Yangtze Craton. *Chinese Science Bulletin*, 43(1): 3—5 (in Chinese).
- Liu, X. M., Gao, S., Ling, W. L., et al., 2005. 3.5 Ga Detrital Zircon from the Yangtze Craton and Its Geological Significance. *Progress in Natural Science*, 15(11): 1334—1337 (in Chinese).
- Lovera, O., Richter, F., Harrison, T., 1989. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Thermochronometry for Slowly Cooled Samples Having a Distribution of Diffusion Domain Sizes. *Journal of Geophysical Research*, 941: 17917—17935. <https://doi.org/10.1029/JB094iB12p17917>.
- Ma, D. Q., Du, S. H., Xiao, Z. F., 2002. The Origin of Huangling Granite Batholith. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(2): 151—161 (in Chinese with English abstract).
- Ma, D. Q., Li, Z. C., Xiao, Z. F., 1997. The Constitution, Geochronology and Geologic Evolution of the Kongling Complex, Western Hubei. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 10—18 (in Chinese with English abstract).
- Ma, G. G., Li, H. Q., Zhang, Z. C., 1984. An Investigation of the Age Limits of the Sinian System in South China. *Bulletin of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences*, 8: 1—29 (in Chinese with English abstract).
- Peng, M., 2010. Paleoproterozoic Magmatism of Yangtze Craton: Timing and Geological Implications (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Peng, M., Wu, Y. B., Wang, J., et al., 2009. Paleoproterozoic Mafic Dyke from Kongling Terrain in the Yangtze Craton and Its Implication. *Chinese Science Bulletin*, 54(5): 641—647 (in Chinese with English abstract).
- Schneider, D. A., Cope, N., Holm, D. K., 2013. Thermochronology of the Mont Laurier Terrane, Southern Canadian Grenville Province, and Its Bearing on Defining Orogenic Architecture. *Precambrian Research*, 226: 43—58. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.11.006>.
- Shen, C. B., Hu, D., Min, K., et al., 2020. Post-Orogenic Tectonic Evolution of the Jiangnan-Xuefeng Orogenic Belt: Insights from Multiple Geochronometric Dating of the Mufushan Massif, South China. *Journal of Earth Science*, 31(5): 905—918. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1346-2>.
- Shen, C. B., Mei, L. F., Min, K., et al., 2012. Multi-Chronometric Dating of the Huarong Granitoids from the Middle Yangtze Craton: Implications for the Tectonic Evolution of Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 52: 73—87. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2012.02.013>.
- Shi, W. B., Wang, F., Yang, L. K., et al., 2020. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Basic-Felsic Dikes in the Sulu Orogen, Shandong Peninsula, China: Evidence for the Destruction of the Southeastern North China Craton. *Geological Journal*, 55(7): 5574—5593. <https://doi.org/10.1002/gj.3745>.
- Sun, Z., Li, F. C., Lin, J., et al., 2021. The Rifting-Breakup Process of the Passive Continental Margin and Its Relationship with Magmatism: The Attribution of the South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 770—789 (in Chinese with English abstract).
- Wei, J. Q., Wang, J. X., Wang, X. D., et al., 2009. Dating of Mafic Dikes from Kongling Group in Huangling Area and Its Implications. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 466—471 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Wei, J. Q., Wei, Y. X., Wang, J. X., et al., 2020. Geochronological Constraints on the Formation and Evolution of the Huangling Basement in the Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105707>.
- Xiong, C. Y., Wei, C. S., Jin, G. F., et al., 1998. Basic Characteristics and Metallogenetic Regularity of the Gold Ore Deposits in the Middle Core of Huangling Anticline, Western Hubei Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1:3–5 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. L., Peng, L. H., Liu, H., et al., 2013. Meso-Cenozoic Tectono-Sedimentary Response of Multiphased Uplifts of Huangling Anticline, Central China. *Geology and Mineral Resources of South China*, 29(2):90–99 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. H., Zhang, Z. L., Liu, W., et al., 1991. Direct Dating Method of Zircon Grains by $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. *Mineralogy and Petrology*, 11(2):72–79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Wang, Y. J., et al., 2013. Tectonics of South China Continent and Its Implications. *Science China: Earth Sciences*, 56:1804–1828, <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4679-1>
- Zhang, S. B., Wu, P., Zheng, Y. F., 2019. Mafic Magmatic Records of Rodinia Amalgamation in the Northern Margin of the South China Block. *Earth Science*, 44(12): 4157–4166 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006a. Zircon Isotope Evidence for ≥ 3.5 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of China. *Precambrian Research*, 146(1): 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.002>.
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006b. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Evidence for 3.8 Ga Crustal Remnant and Episodic Reworking of Archean Crust in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1): 56–71. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.027>.
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006c. Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotope Evidence for Paleoproterozoic Metamorphic Event in South China. *Precambrian Research*, 151(3): 265–288. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.08.009>.
- Zhao, F. Q., Zhao, W. P., Zuo, Y. C., et al., 2006. Zircon U-Pb Ages of the Migmatites from Kongling Complex. *Geological Survey and Research*, 29(2):81–85 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M., Wei, J. Q., Wang, J. X., 2012. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition from Yemadong Mafic Dikes in the Huangling Area. *Geology and Mineral Researches of South China*, 28(2):124–131 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. Y., Yang, J. X., Zhou, H. W., et al., 2007. Significance on Hubei Huangling Complex in the Rodinia Supercontinent of Evolution. *Resources Environment and Engineering*, 21(4):380–384 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯定犹,李志昌,张自超,1991. 黄陵花岗岩类基岩南部岩体侵入时代和同位素特征. 湖北地质, 5(2): 1–12.
- 高山, Qiu Y., 凌文黎, 等, 2001. 崆岭高级变质地体单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究——扬子克拉通 > 3.2 Ga 陆壳物质的发现. 中国科学(D辑:地球科学), 31(1): 27–35.
- 高维, 张传恒, 2009. 长江三峡黄陵花岗岩与莲沱组凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地层意义. 地质通报, 28(1): 45–50.
- 葛翔, 沈传波, 梅廉夫, 2016. 低温热年代对黄陵隆起中生代古地形的约束. 大地构造与成矿学, 40(4): 654–662.
- 胡世玲, 刘鸿允, 王松山, 等, 1989. 据 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子年龄新资料讨论震旦系底界年龄. 地质科学, 24(1): 16–25.
- 惠博, 董云鹏, 孙圣思, 等, 2022. 扬子板块北缘新元古代构造属性的岩浆事件制约. 地质学报, 96(9): 3034–3050.
- 蒋幸福, 彭松柏, 韩庆森, 2021. 扬子克拉通黄陵背斜南部 ~860 Ma 岩墙的成因及地质意义. 地球科学, 46(6): 2117–2132.
- 李益龙, 周汉文, 李献华, 等, 2007. 黄陵花岗岩基英云闪长岩的黑云母和角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及其冷却曲线. 岩石学报, 23(5): 1067–1074.
- 李志昌, 王桂华, 张自超, 2002. 鄂西黄陵花岗岩基同位素年龄谱. 华南地质与矿产, 3: 19–28.
- 凌文黎, 高山, 程建萍, 等, 2006. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束. 岩石学报, 22(2): 387–396.
- 凌文黎, 高山, 郑海飞, 等, 1998. 扬子克拉通黄陵地区崆岭杂岩 Sm-Nd 同位素地质年代学研究. 科学通报, 43(1): 3–5.
- 柳小明, 高山, 凌文黎, 等, 2005. 扬子克拉通 35 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义. 自然科学进展, 15(11): 1334–1337.
- 马大铨, 杜绍华, 肖志发, 2002. 黄陵花岗岩基的成因. 岩石矿物学杂志, 21(2): 151–161.
- 马大铨, 李志昌, 肖志发, 1997. 鄂西崆岭杂岩的组成、时代及地质演化. 地球学报, 18(3): 10–18.
- 马国干, 李华芹, 张自超, 1984. 华南地区震旦纪时限范围的研究. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 8: 1–29.
- 彭敏, 2010. 扬子板块古元古代岩浆事件年龄及其地质意义(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 彭敏, 吴元保, 汪晶, 等, 2009. 扬子崆岭高级变质地体古元古代基性岩脉的发现及其意义. 科学通报, 54(5): 641–647.

孙珍,李付成,林间,等,2021.被动大陆边缘张一破裂过程与岩浆活动:南海的归属.地球科学,46(3): 770—789.

魏君奇,王建雄,王晓地,等,2009.黄陵地区崆岭群中基性岩脉的定年及意义.西北大学学报(自然科学版),39(3): 466—471.

熊成云,韦昌山,金光富,等,1998.鄂西黄陵背斜核部中段金矿基本特征及成矿规律.华南地质与矿产,1: 3—5.

徐大良,彭练红,刘浩,等,2013.黄陵背斜中新生代多期次隆升的构造—沉积响应.华南地质与矿产,29(2): 90—99.

袁海华,张志兰,刘炜,等,1991.直接测定颗粒锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄的方法.矿物岩石,11(2): 72—79.

张少兵,吴鹏,郑永飞,2019.罗迪尼亚超大陆聚合在华南陆块北缘的镁铁质岩浆岩记录.地球科学,44(12): 4157—4166.

赵风清,赵文平,左义成,等,2006.崆岭杂岩中混合岩的锆石 U—Pb 年龄.地质调查与研究,29(2): 81—85.

赵敏,魏君奇,王建雄,2012.黄陵野马洞基性岩脉中锆石的 U—Pb 年龄和 Hf 同位素组成.华南地质与矿产,28(2): 124—131.

周忠友,杨金香,周汉文,等,2007.湖北黄陵杂岩在 Rodinia 超大陆演化中的意义.资源环境与工程,21(4):380—384.

《地球科学》

2024年3月 第49卷 第3期 要目预告

云母和电气石矿物化学特征对西昆仑大红柳滩地区伟晶岩型锂矿化的指示	夏永旗等
青藏高原季节冻土山区河流溶解性碳输出的特征及控制因素	赵鲁松等
基于改进模糊综合评判法的断层封堵性综合评价	张 翥等
基于 PCA-GWR 的包气带不同土层饱和和导水率的传递函数及其回归克里金估计	湛 江等
广东省龙门岩溶热储温度计算及流体演化特征	王思佳等
坝后淤积条件下泥石流冲击拦挡坝动力响应研究	王东坡等
西藏松多地区蛇纹岩成因及其对松多古特提斯洋俯冲的约束	王 斌等
桂东北鹰扬关地区罗家山辉长岩的矿物化学特征及其构造意义	秦 亚等
海州湾弱透水层孔隙水的化学特征与盐分演变	李 静等