

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.001

扬子克拉通黄陵基底的形成及演化

魏君奇¹, 王建雄², 王晓地², 裴康达¹, 付 强¹

WEI Jun-Qi¹, WANG Jian-Xiong², WANG Xiao-Di², PEI Kang-Da¹, FU Qiang¹

1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China

摘要: 扬子克拉通北缘的黄陵背斜核部出露的太古宙-元古宙杂岩, 构成扬子克拉通黄陵基底, 是研究扬子克拉通的最重要窗口。黄陵基底的组成主要包括太古宙花岗片麻岩和斜长角闪岩为主组成的陆核; 古元古代孔兹岩系构成的高级地体; 以及之后形成的新元古代蛇绿混杂岩、花岗岩类和基性岩脉等, 是 8 期岩浆事件($3.2 \sim 3.0$ Ga, $3.0 \sim 2.8$ Ga, $2.8 \sim 2.6$ Ga, $2.3 \sim 2.2$ Ga, 1.85 Ga, $1.0 \sim 0.97$ Ga, $0.86 \sim 0.79$ Ga, $0.77 \sim 0.75$ Ga)、2 期角闪岩相构造-热事件($2.6 \sim 2.5$ Ga, $2.0 \sim 1.9$ Ga)和克拉通化事件等共同作用的结果。黄陵基底的形成和演化过程, 经历了“水月寺运动”、“兴山运动”和“晋宁运动”的塑造和改造, 并对 Kenorland、Columbia 和 Rodinia 超大陆的聚合与裂解均有响应。

关键词: 扬子克拉通; 黄陵基底; 岫岭杂岩; 太古宙陆核; 古元古代克拉通化

中图分类号: P56

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-01-0001-14

Wei J Q, Wang J X, Wang X D, Pei K D and Fu Q. 2025. The Formation and Evolution of the Huangling Basement in the Yangtze Craton, South China. *South China Geology*, 41(1): 1–14.

Abstract: The Huangling basement, located within the Huangling dome on the northern margin of the Yangtze craton, represents the most extensive and highest-grade exposure of the Archean-Proterozoic metamorphic complex in the region. Hence, it provides an excellent opportunity for examining the formation and evolution of the Yangtze craton. The Huangling basement mainly consists of an Archean continental nucleus of granitic gneisses and amphibolites, a Paleoproterozoic high-grade terrane consisting of khondalite series, and Neoproterozoic intrusive units including ophiolitic mélange, granitoid and diabase dikes, etc. It is the result of the combined effects of eight magmatic episodes ($3.2 \sim 3.0$ Ga, $3.0 \sim 2.8$ Ga, $2.8 \sim 2.6$ Ga, $2.3 \sim 2.2$ Ga, 1.85 Ga, $1.0 \sim 0.97$ Ga, $0.86 \sim 0.79$ Ga, $0.77 \sim 0.75$ Ga), two-stage amphibolite facies tectono-thermal metamorphism ($2.6 \sim 2.5$ Ga, $2.0 \sim 1.9$ Ga), and cratonicization events. The formation and evolution of the Huangling basement were shaped by the “Shuiyuesit Movement”, “Xingshan Movement” and “Jinning Movement”, while recording the response to the amalgamation and break-up of the Kenorland, Columbia and Rodinia supercontinents.

收稿日期: 2025-02-10; 修回日期: 2025-02-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40972050, 41572171)

第一作者: 魏君奇(1964—), 男, 研究员, 从事岩石学研究, E-mail: 515986674@qq.com

Key words: Yangtze craton; Huangling basement; Kongling complex; Archean continental nucleus; Proterozoic cratonization

克拉通是地壳最主要的组成单元, 克拉通基底的形成及演化是早期地壳形成及演化的全部历史记录, 一直是地球科学的研究热点(Gao S et al., 2011; Zhai M G, 2011)。扬子克拉通是全球40多个主要克拉通之一, 其北缘的黄陵背斜核部, 出露的太古宙-元古宙杂岩构成扬子克拉通黄陵基底, 其杂岩称为黄陵基底杂岩。黄陵基底杂岩是扬子克拉通前寒武纪基底中面积最大、变质程度最高的高级地体, 是研究扬子克拉通的最重要窗口。此外, 扬子克拉通基底的规模和拼合时间问题, 即是具有统一的太古宙-中元古代基底(凌文黎等, 1999; Zheng J P et al., 2006; 郑永飞和张少兵, 2007; 周金城等, 2014), 还是直到晋宁期(0.9 Ga)才内部拼合成统一地块(张国伟等, 2013)也需要通过黄陵基底形成和演化的研究来解决。

扬子克拉通黄陵基底是构造-岩浆-沉积-变质事件共同作用的产物, 要揭示基底的形成及演化过程, 需要建立基底杂岩年代构造格架; 确定其岩浆作用的期次及大地构造背景; 恢复其表壳岩系的沉积建造; 解析其构造-热变质作用对基底的改造与再造; 并综合分析基底形成过程中对超大陆聚合、裂解等全球性事件的响应。

1 区域地质

扬子克拉通黄陵基底呈卵圆形出露于黄陵背斜穹隆核部, 总面积约 1300 km^2 。基底杂岩主要由太古宙-古元古代的崆岭杂岩(早期称为崆岭群), 新元古代的蛇绿混杂岩、花岗岩岩基和基性岩墙群组成, 整个基底外围被南华系、震旦系不整合覆盖。

崆岭杂岩出露面积约 330 km^2 , 可分为上、下两部分。下部为太古宙陆核, 面积约 220 km^2 , 厚度超过3.6 km, 主要由变质岩浆岩组成, 包括大量的TTG片麻岩、少量的斜长角闪岩类和花岗片麻岩。上部为古元古代变质表壳岩, 面积约 110 km^2 , 厚度约2.5 km, 主要岩石类型包括榴线英岩、石

墨片岩、变粒岩、长英质片麻岩、大理岩等, 属典型的孔兹岩系。其中赋存多个中、小型石墨矿、石榴子石矿。崆岭杂岩的变质程度达角闪岩相, 局部达麻粒岩相, 并发生深熔作用(混合岩化)。崆岭杂岩上、下两套岩石单元之间原应存在不整合面, 但经强烈韧性再造而呈现出构造接触关系。

黄陵花岗岩岩基面积约 970 km^2 , 大规模侵入黄陵背斜中部, 将崆岭杂岩分割为南、北两部分。北部的崆岭杂岩中零散分布有古元古代超镁铁质岩体或岩块, 并被1.85 Ga圈椅端钾长花岗岩岩体和基性岩脉侵入。南部的崆岭杂岩中, 分布有新元古代蛇绿混杂岩, 并被基性岩墙群侵入(图1)。

2 黄陵基底的形成及演化过程

2.1 太古宙陆核

2.1.1 古太古代($3.6\sim 3.2\text{ Ga}$)

崆岭杂岩中年龄 $>3.2\text{ Ga}$ 的岩石仅呈微小的岩石碎片零散分布, 但锆石U-Pb年龄为 $3.45\sim 3.22\text{ Ga}$ 的信息却不断出现, 它们或是TTG片麻岩中的继承锆石, 或是孔兹岩系中的碎屑锆石(Qiu Y M et al., 2000; Gao S et al., 2001; Zhang S B et al., 2006a, 2006b; Zheng J P et al., 2006; 焦文放等, 2009; Guo J L et al., 2014, 2015)。此外, 在崆岭杂岩出露区外围, 作为盖层的南华纪南沱组冰砾岩和莲沱组砂岩以及震旦纪莲沱组砂岩中, 大量碎屑锆石的U-Pb年龄为 $3.5\sim 3.3\text{ Ga}$ (柳小明等, 2005), 其中一颗碎屑锆石U-Pb年龄为 3.8 Ga 、Hf模式年龄为 4.0 Ga (张少兵和郑永飞, 2007)。这些研究结果说明, 黄陵地区存在过比崆岭杂岩更古老的地壳($>3.2\text{ Ga}$), 只不过这些古老地壳受黄陵背斜、圈椅端岩体(1.85 Ga)和黄陵花岗岩基(820 Ma)形成的热穹隆构造的长期影响, 被风化、剥蚀或熔融殆尽, 仅剩下难熔的锆石以矿物碎屑的形式存在。

2.1.2 中太古代($3.2\sim 2.8\text{ Ga}$)

崆岭杂岩下部的变质岩浆岩, 主要由花岗片

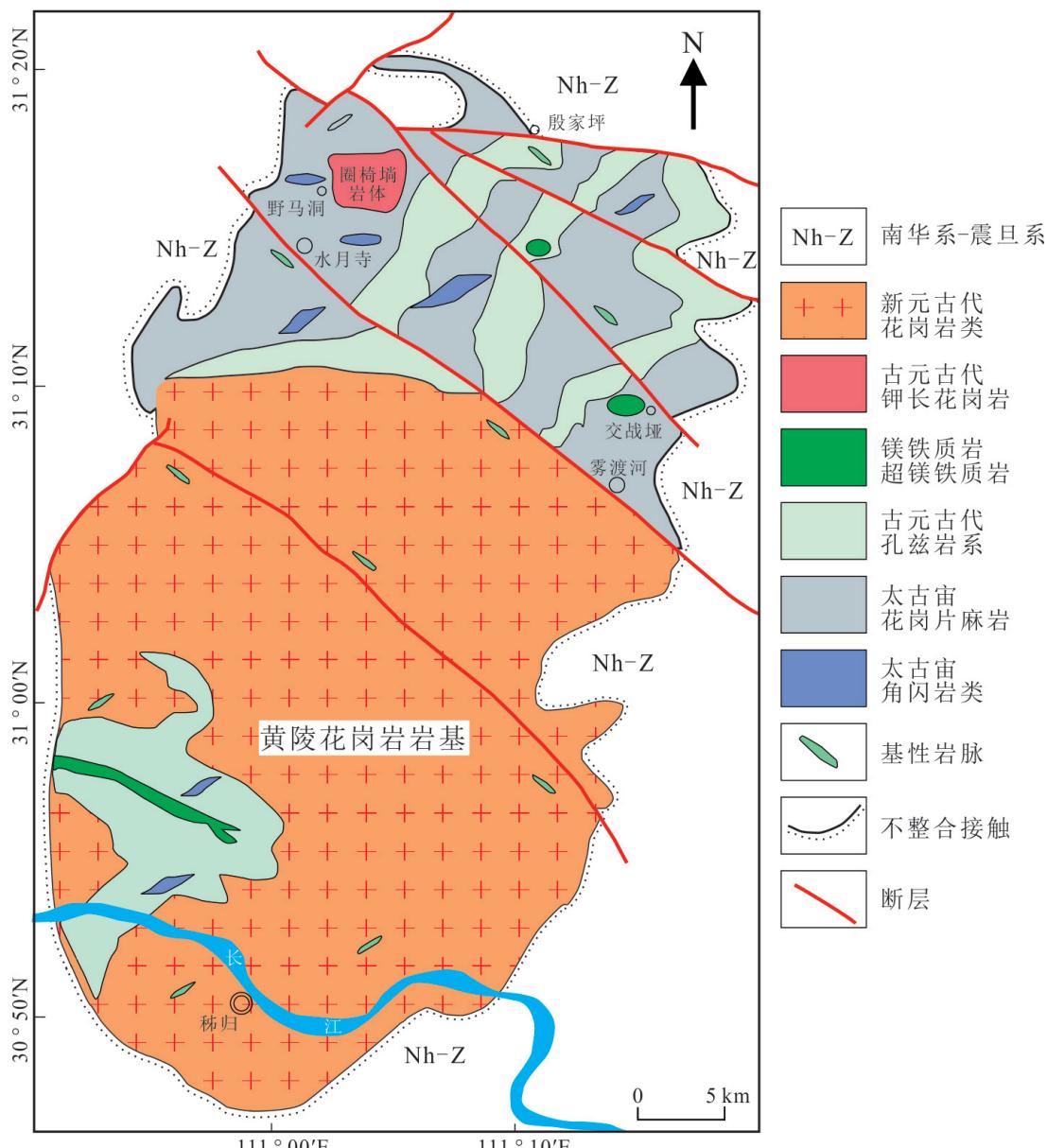


图 1 黄陵穹隆地质简图

Fig. 1 Regional geological sketch map of the Huangling dome

麻岩-角闪岩类组成, 属太古宙典型的花岗岩-绿岩带型地体。其中绿岩带面积约 6 km^2 , 主要分布于圈椅端岩体周边的野马洞、白果园、核桃园等地。它们被花岗岩体侵入并分割, 空间分布上极不连续, 单个块体较小。构成绿岩带的角闪岩类, 其岩石类型包括角闪片岩、条带状斜长角闪岩和块状斜长角闪岩。角闪片岩的 MgO (20% ~ 30%)、Cr、Co、Ni 含量高; Rb、Sr、Ba 和 REE 含量低; LREE 亏损而 HREE 富集, 属铝亏损型。块状斜长角闪岩的 MgO (13% ~ 16%)、Cr、Co、Ni 含量中等; Rb、Sr、Ba 和 REE 含量中等;

LREE 富集而 HREE 亏损。条带状斜长角闪岩的 MgO (5% ~ 9%)、Cr、Co、Ni 含量低; Rb、Sr、Ba 和 REE 含量高; LREE 富集而 HREE 亏损。岩相学和元素地球化学特征显示, 角闪片岩、块状斜长角闪岩和条带状斜长角闪岩的原岩分别为科马提岩、科马提质玄武岩和拉斑质玄武岩, 它们的锆石 U-Pb 年龄为 3.2 ~ 3.0 Ga (Wei J Q et al., 2020), 划为黄陵第 1 期岩浆事件。科马提岩为地幔柱尾部熔体; 拉斑质玄武岩为地幔柱头部熔体; 科马提质玄武岩的地质、地球化学特征更接近于拉斑玄武岩, 是拉斑玄武岩结晶分异的产物,

属于拉斑玄武岩的堆晶岩单元。这些高镁火山岩均形成于由地幔柱上升引发的大陆裂谷环境,它们组成了黄陵中太古代绿岩带(图2)(Wei J Q, 2021)。

TTG 片麻岩的原岩为由英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩组成的 TTG 岩套,其锆石 U-Pb 年龄为 3.0~2.8 Ga (高山和张本仁, 1990; Gao S et al, 2011),划为黄陵第 2 期岩浆事件。该岩套侵入绿岩带,两者共同构成黄陵中太古代 TTG-绿岩带(魏君奇和王建雄, 2012; 魏君奇和景明, 2013)。

2.1.3 新太古代 (2.8~2.5 Ga)

2.1.3.1 新太古代早期

崆岭杂岩中的少量花岗片麻岩,其原岩为富钾 A 型花岗岩,其锆石 U-Pb 年龄为 2.8~2.6 Ga (Chen K et al, 2013; Zhou G Y et al, 2015),划为黄陵第 3 期岩浆事件。由此可见,第二期到第三期岩浆成分发生了变化,即从 2.8 Ga 之前富 Na 的 TTG 演化为 2.8 Ga 之后富 K 的花岗岩类,2.8 Ga

成为岩浆作用成分演化的界线,反映了铁镁质地壳向长英质地壳的演变(Guo J L et al., 2015),指示地壳生长模式从地幔柱主导的垂向加厚向板块构造主导的侧向加积转变。

2.1.3.2 新太古代晚期

(1) 崆岭杂岩

全球太古宙与元古宙的分界时间为 2.5 Ga。我国华北克拉通太古宙末的褶皱运动称为“五台运动”,是根据新太古界五台群与古元古界滹沱群之间的角度不整合关系确定的。扬子克拉通太古宙与元古宙之间界线剖面的选定存在分歧。在大别地区,由“大别运动”导致了大别群与红安群或佛子岭群之间的角度不整合接触关系,但“大别运动”发生的时间存在 2.0 Ga (陈志强, 1985; 陈汉宗, 1987) 和 2.5 Ga (张业明等, 1996) 的分歧。在黄陵地区,太古宙崆岭杂岩与古元古代孔兹岩系之间表现为韧性剪切带构造接触关系,这可能是原始不整合面被强烈韧性剪切改造为“平行化不整合”接触关系,表征这次原始不整合面的构造运

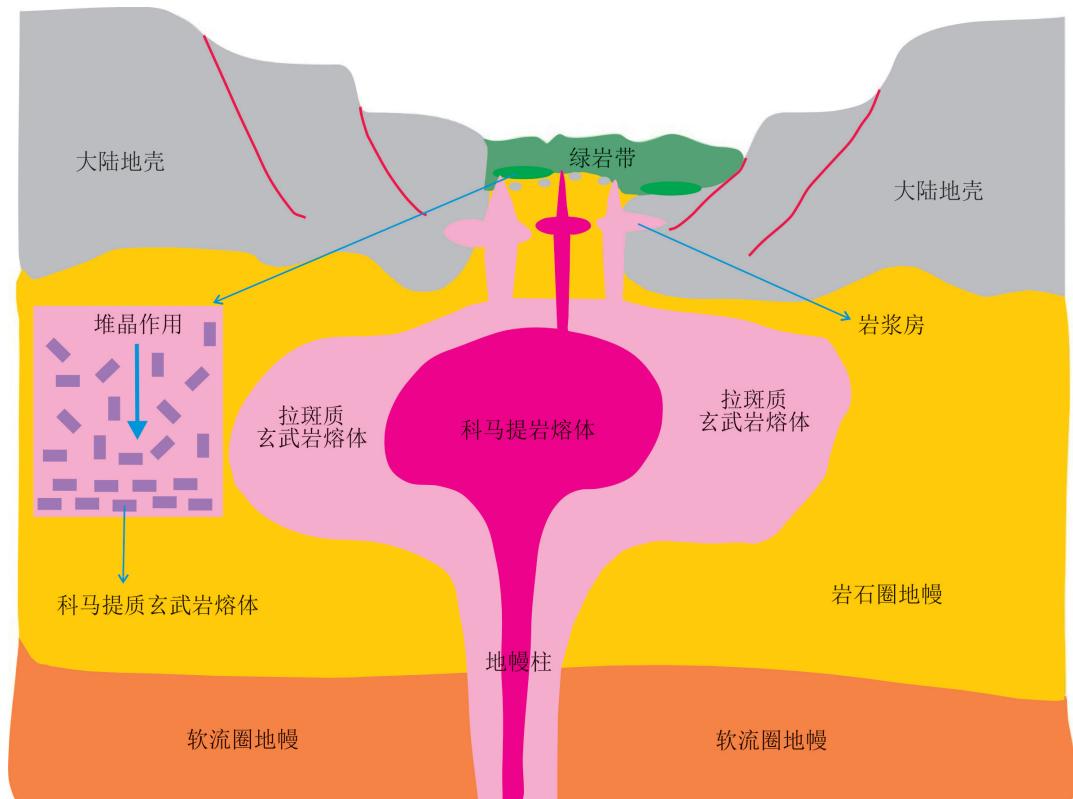


图 2 黄陵绿岩带中科马提岩、科马提质玄武岩和拉斑质玄武岩形成过程模式简图

Fig. 2 Simplified sketch geological model of the formation processes for komatiites, komatiitic basalts and tholeiitic basalts in the Huangling greenstone belt

动称为“水月寺运动”, 活动时间推测为 2.6~2.5 Ga (熊成云等, 2004)。然而, 该研究成果及“水月寺运动”的命名, 由于缺少直接的同位素年龄证据, 并未像“五台运动”一样著名而引起关注。

崆岭杂岩中存在 2583~2466 Ma 变质锆石 (魏君奇等, 2009; 赵敏等, 2012; Wei J Q et al., 2020); 黄陵背斜两翼的南华系和震旦系中, 碎屑锆石 U-Pb 年龄显示有 2.49 Ga 峰值 (Liu X M et al., 2008); 二者均指示黄陵地区存在 2.6~2.5 Ga 的构造-热变质事件, 划为黄陵第 I 期构造-热变质事件, 为“水月寺运动”的存在提供了支持。该期构造-热变质作用将绿岩带、TTG 和 A 型花岗岩分别转变为角闪岩类、TTG 片麻岩和花岗片麻岩, 它们共同构成太古宙典型的花岗岩-绿岩带型地体, 即黄陵基底的结晶陆核 (Wei J Q et al., 2020), 并造成黄陵地区太古宙/元古宙之间的不整合接触关系。此外, 目前认为最早的 Kenorland 超大陆聚合期为 2.7~2.45 Ga (李江海, 1998)。所以, 第 I 期构造-热变质事件 (2.6~2.5 Ga), 是扬子克拉通对 Kenorland 超大陆聚合的响应。

(2) 黄陵陆核周缘

扬子克拉通约 2.5 Ga 锆石 U-Pb 年龄信息见表 1。

扬子北缘: 扬子克拉通北缘为南秦岭构造带、神农架地块和大别地块等, 其基底岩系包括鱼洞子杂岩、佛坪-龙草坪杂岩、陡岭杂岩、武当群、神农架群、南黄片麻岩和双河榴辉岩等。在这些基底岩系中, 存在 U-Pb 年龄为 2555~2448 Ma 的岩浆锆石、变质锆石和碎屑锆石 (李亚林等, 2000; 涂荫玖等, 2001; 陈道公等, 2002; Sun W H et al., 2009; 凌文黎等, 2010; 王洪亮等, 2011; 胡娟等, 2013; 李怀坤等, 2013; Hui B et al., 2017, 2019; Zhou G Y et al., 2018; Chen Q et al., 2019)。其中鱼洞子杂岩、龙草坪杂岩和陡岭杂岩主要由约 2.5 Ga 的 TTG 片麻岩组成, 且陡岭杂岩中的 TTG 片麻岩源于俯冲带加厚地壳的部分熔融 (胡娟等, 2013; Wu Y B et al., 2014), 指示扬子克拉通北缘曾于 2.5 Ga 发生过俯冲碰撞作用。

扬子西缘: 扬子克拉通西缘为康滇古陆, 由中-新元古界康定杂岩、会理群、盐边群、东川群、

昆阳群、大红山群等组成。这些杂岩和表壳岩中, 部分碎屑锆石及少量残留锆石的 U-Pb 年龄为 2571~2439 Ma (陈岳龙等, 2004; Greentree and Li Z X, 2008; Sun W H et al., 2009; Zhao X F et al., 2010; Wang L J et al., 2012; Li H K et al., 2013; Chen Q et al., 2016), 指示该区可能存在隐伏的太古宙基底。

扬子东南缘: 扬子克拉通东南缘为江南古陆, 是扬子板块的基底拆离体 (丁道桂等, 2007), 或是华夏与扬子两板块碰撞形成的江南造山带 (郑永飞和张少兵, 2007; 于津海等, 2007; Zhao J H et al., 2011; 周金城等, 2014)。该区出露新元古界下江群、梵净山群、四堡群、冷家溪群、板溪群、双桥山群等, 且被煌斑岩脉侵入, 它们中的碎屑锆石和捕获锆石的 U-Pb 年龄为 2576~2457 Ma (甘晓春等, 1996; 尹崇玉等, 2003; Zheng J P et al., 2006; Wang X L et al., 2007; Zhou J C et al., 2009; 张彦杰等, 2010; Wang L J et al., 2010; 张玉芝等, 2011; Zhao J H et al., 2011; Wang W et al., 2012; Wang X C et al., 2012), 指示该区可能存在隐伏的太古宙基底。

总之, 黄陵陆核发生 2.5 Ga 的热变质事件, 尚未发现 2.5 Ga 的岩石; 其北缘发生 2.5 Ga 的岩浆-变质作用, 且 2.5 Ga 的 TTG 片麻岩形成于俯冲环境; 其西缘和东南缘的中-新元古界表壳岩中含 2.5 Ga 的碎屑锆石, 尚未发现 2.5 Ga 的岩石。上述现象指示, 在新太古代晚期约 2.5 Ga, 黄陵陆核及其北缘的鱼洞子杂岩、龙草坪杂岩和陡岭杂岩等, 均以微地块的形式拼合, 形成扬子克拉通统一基底。

2.2 元古宙地体

2.2.1 古元古代 (2.5~1.6 Ga)

黄陵太古宙陆核形成之后, 进入古元古代早期 (2.5~2.05 Ga) 长达 500 Ma 的相对静寂期。太古宙末期 (2.6~2.5 Ga) 的构造-热变质作用使陆核变形变质、地表高低起伏, 为风化、剥蚀、搬运提供了地貌条件。同时, 因构造-热事件挤压的地壳转换为应力释放的拉张地壳, 形成了陆内裂谷或陆缘浅海盆地, 为风化、剥蚀、搬运的产物提供了堆积场所。足够的时间和空间使太古宙陆核遭

表 1 扬子克拉通约 2.5 Ga 锆石 U-Pb 年龄信息

Table 1 Zircon U-Pb age of about 2.5 Ga from the Yangtze craton

构造单元	采样位位置或岩石单元	岩石类型	锆石成因或来源	$^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}$ 年龄(Ma)	数据来源
黄陵陆核	水月寺	辉绿岩脉	变质锆石	2466±66, 2557±27	魏君奇等, 2009; 赵敏等, 2012
	殷家坪	辉绿岩脉	变质锆石	2517±94	Wei J Q et al., 2020
	野马洞	斜长角闪岩	变质锆石	2558±40, 2583±240	魏君奇和王建雄, 2012; Wei J Q et al., 2020
南秦岭构造带	南华系、震旦系	碎屑岩类	碎屑锆石	2490峰值	Liu X M et al., 2008
		磁铁石英岩	变质锆石	2555±24	王洪亮等, 2011
		黑云斜长片麻岩	岩浆锆石	2448±8	Hui B et al., 2017
	鱼洞子杂岩	花岗片麻岩	岩浆锆石	2471±23, 2477±18, 2516±49	Hui B et al., 2017; Chen Q et al., 2019
		TTG片麻岩	变质锆石	2488±50, 2501±29, 2503±35, 2513±38	Chen Q et al., 2019
	陡岭杂岩	TTG片麻岩	岩浆锆石	2469±22, 2479±12, 2496±25, 2497±21	胡娟等, 2013;
			变质锆石	2501±17, 2509±14, 2516±22	Wu Y B et al., 2014
		黑云斜长片麻岩	碎屑锆石	2460±21	胡娟等, 2013
	碧口地体	横丹群浊积岩	碎屑锆石	2480峰值	胡娟等, 2013
	龙草坪杂岩	TTG片麻岩	岩浆锆石	2492±26	Sun W H et al., 2009
神农架地块	武当群	石英砂岩	碎屑锆石	2503±40, 2506±24	李亚林等, 2000
	神农架群	硅质白云岩	碎屑锆石	2555	凌文黎等, 2010
				2471±4, 2472±19, 2491±4, 2498±4, 2509±12	李怀坤等, 2013
				2527±13, 2534±4, 2544±13, 2546±16	
	大别地块	南黄杂岩	TTG片麻岩	2493±19	涂荫玖等, 2001
		潜山县双河	榴辉岩	2489±25	陈道公等, 2002
		康定杂岩	花岗片麻岩	2468±11	陈岳龙等, 2004
		会理群	粗粒砂岩	2469±26	Sun W H et al., 2009
		盐边群	砂岩	2551±31, 2456±46, 2496±18	Sun W H et al., 2009; Chen Q et al., 2016
		澄江组	紫色砂岩	2447±28, 2478±23, 2558±25	Wang L J et al., 2012
康滇古陆		陡山沱组	砂岩	2492±22	Wang L J et al., 2012
		昆阳群	砂岩	2446±29, 2526±37	Wang L J et al., 2012
		大红山群	石英黑云母片岩	2571	Greentree and Li Z X, 2008
			碎屑锆石	2500峰值	Li H K et al., 2013
		东川群	石英岩、千枚岩	2439±32, 2457±30, 2462±2,	
			角砾岩、砂岩	2491±29, 2491±27	Zhao X F et al., 2010
		下江群	砂岩	2476±27, 2498±24, 2499±24	Wang L J et al., 2010
		贵州镇远	煌斑岩	2576±9	Zheng J P et al., 2006
		板溪群	凝灰质砂岩	2477±34, 2484±7, 2503±3	Wang X C et al., 2012
		丹洲群	粉砂岩	2535±21	Wang X C et al., 2012
江南古陆		沧水铺群	安山质火山岩	2495±27	Zhang Y Z et al., 2015
		高涧群	变玄武岩	2524±80	甘晓春等, 1996
		宁乡火山岩	煌斑岩	2485±8, 2487±8, 2492±8, 2525±7	Zheng J P et al., 2006
		南华系	沉凝灰岩	2457±64	尹崇玉等, 2003
		双桥山群	石英砂岩、板岩	2495±45, 2498±71, 2510±33,	Zhao J H et al., 2011
			碎屑锆石	2530±34, 2545±38	
			火山岩	2526±6	Zhao J H et al., 2011
		梵净山群	砂岩、片岩	2466±25, 2470±32, 2474±22, 2483±13, 2487±16	Wang L J et al., 2010;
			碎屑锆石	2491±29, 2494±24, 2496±23, 2496±29, 2497±7	Zhao J H et al., 2011
				2499±21, 2503±45, 2521±7, 2527±34, 2535±26	
冷家溪群		砂岩、千枚岩	碎屑锆石	2496±24, 2503±19	Zhao J H et al., 2011
		变玄武岩	捕获锆石	2530±22	甘晓春等, 1996

受强烈的克拉通化, 形成巨厚(>3 km)的碎屑、化学沉积岩系, 即孔兹岩系的原岩。孔兹岩系的原岩为硅铝质陆源碎屑沉积建造(杨金香, 2007), 其沉积环境为浅海相、泻湖相和潮坪相(田成胜等, 2011; 邱凤等, 2015)。

(1) 成铁纪(2.5~2.3 Ga)

条带状铁建造(BIFs)是成铁系的标志。黄凉河岩组下部发育长英质片麻岩、条状磁铁石英岩(2.5~2.4 Ga)等, 并形成多处磁铁矿点。较大的矿体长约 130 m, 厚约 11 m, 宽约 4 m, 以磁铁矿和石英为主, 全铁平均含量约 29%。磁铁石英岩原岩为 Si、Fe 质化学沉积岩, 属海底热水沉积形成的 BIFs (Chen Y et al., 2012)。

(2) 层侵纪(2.3~2.05 Ga)

黄凉河岩组中部, 以黑云变粒岩、石墨片麻岩和石墨大理岩为主, 夹少量似层状斜长角闪岩和花岗片麻岩(马大铨等, 1997)。黑云变粒岩的原岩为酸性火山岩, 其锆石 U-Pb 年龄为 2332 Ma (姜继圣, 1986)。花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 2213 Ma (Xu D L et al., 2017)。斜长角闪岩的原岩为基性火山岩或绿岩脉, 其全岩 Pb-Pb 等时线年龄为 2210 Ma (Lu S S et al., 2017)。上述结果说明, 黄陵陆核区发育少量 2.3~2.2 Ga 的基性-酸性岩组合和辉绿岩脉, 划为黄陵第 4 期岩浆事件, 它们可能是大陆裂谷背景下的双峰式火山岩和基性岩脉, 是扬子克拉通对 Kenorland 超大陆裂解的响应。

大理岩: 黄凉河岩组中部发育近 10 层大理岩, 均与石墨片岩伴生, 且常构成石墨矿的顶、底板。以白云质大理岩为主, 一般单层厚度 2~30 m, 银洞口地段厚度达 80 m, 方解石含量 33%~44%。大理岩层的厚度与石墨矿层的厚度及质量成正比(田成胜等, 2011), 这种大理岩+石墨的组合说明生物的光合作用吸收 CO₂, 造成碳酸钙沉淀; 生物形成大量多种碳酸盐质点; 生物的粘结作用和障积作用; 清澈透光的浅水, 阳光与氧气充足, 有利于生命的繁殖。

石墨矿: 黄陵地区是我国鳞片状晶质石墨的重要产区, 已探明大中型石墨矿床 4 个、小型矿点约 13 个。矿体呈层状, 厚 5~20 m, 矿石为鳞片

状晶质石墨, 固定碳含量 9%~14%(廖宗明等, 2016; 易承生, 2017), 石墨矿碳质来源于体藻类微生物(刘云勇和姚敬, 2017)。

微古植物: 在石墨片麻岩和石墨大理岩中, 发现少量结构简单、炭化程度较深的微古植物化石, 多为直径小于 20 μm 的小型个体。主要属种有小型光面小球藻、光球藻、坚壁原始球形藻、穴面球形藻、模糊多孔体等, 该微古植物组合代表了原核生物大发展早期的面貌(杨道政和李金华, 1990)。

总之, 孔兹岩系中部的大理岩、石墨矿和藻类微生物体, 分别代表水圈充氧、生物繁盛、碳同位素正漂移事件等, 是扬子克拉通对古元古代“大氧化事件”的响应。

(3) 造山纪(2.05~1.8 Ga)

造山纪早期: 造山纪发生的构造运动具全球性, 我国华北克拉通的“吕梁运动”与之对应。扬子克拉通对该期构造运动的响应, 见于黄陵基底与其北侧约 18 km 神农架地块之间的地带, 在该区的神农架群之下, 发育了西汉河组和孔子河组, 且西汉河组以角度不整合覆盖于崆岭杂岩之上(李福喜等, 1989; 胡正祥等, 2012)。不整合面上、下岩石的变质程度明显不同, 分别为绿片岩相和角闪岩相变质, 形成角度不整合的褶皱运动命名为“兴山运动”, 时限推测为 2.0 Ga (李福喜等, 1989)。然而, 由于缺少直接的同位素年龄证据, “兴山运动”并未像“吕梁运动”一样被广泛接受。近年来, 崆岭杂岩中大量变质新生锆石的 U-Pb 年龄值为 2.0~1.9 Ga, 说明黄陵地区存在 2.0~1.9 Ga 的角闪岩相构造-热变质事件, 划为黄陵第 II 期构造-热变质事件。该期构造-热变质作用对黄陵基底塑造和改造更为强烈, 其一是使太古宙陆核遭受第二次变质改造; 其二是将克拉通化形成的巨厚沉积建造变质为榴线英岩(狭义孔兹岩)、石墨片岩、变粒岩(2.4~2.1 Ga)、长英质片麻岩、大理岩等, 属典型的孔兹岩系(姜继圣, 1986; 李福喜和聂学武, 1987), 变质程度达角闪岩相, 局部达麻粒岩相, 并发生混合岩化(刘玉秀, 1987; 付强等, 2023), 形成高级变质结晶地体; 其三是将古元古代结晶地体与太古宙陆核焊结在一起, 共同构成黄陵结晶基底。

此外,该期构造-热变质事件的年龄(2.0~1.9 Ga)信息,不仅在黄陵基底获得,还在扬子克拉通及华夏地块广泛存在(凌文黎等,1998,2000; Zhang S B et al., 2006c; Yin C Q et al., 2013; 邱啸飞等,2016,2017,2019)。说明该期热变质事件波及扬子克拉通甚至整个华南地区,是扬子克拉通对Columbia超大陆聚合事件的响应。

造山纪晚期:第Ⅱ期构造-热变质事件之后,黄陵地区的构造环境由碰撞挤压转换为板内伸展,引发大规模岩浆活动,形成超镁铁质岩、辉绿岩脉、中酸性火山岩和A型花岗岩等,其成岩年龄集中在1.85 Ga左右(Xiong Q et al., 2009; Peng M et al., 2009, 2012; 邱啸飞等, 2015b; 刘浩等, 2017),划为黄陵第5期岩浆事件。超镁铁质岩类分布于交战垭、张家湾、后山寺、核桃园等地,以小岩体或零散的岩块状出露,岩石类型包括橄榄岩、橄榄辉石岩和辉石岩等,均发生了蛇纹石化、透闪石化、方解石化等。辉绿岩脉分布于殷家坪、坦荡河、交战垭、核桃园等地;白竹坪一带为安山质流纹岩、流纹斑岩;圈椅埫A型钾长花岗岩侵位于黄陵背斜的中心地带。上述这些岩浆岩类均未发生变形变质,从而限定黄陵基底的变形变质作用均发生在1.85 Ga以前。此外,辉绿岩脉形成于深大断裂环境,沿区域构造带展布,走向主要为NE、NW两个方向,局部地段构成岩墙群。一方面指示大而厚的黄陵结晶基底已具刚性,另一方面则代表扬子克拉通对Columbia超大陆裂解事件的响应。至此,扬子克拉通黄陵基底基本形成。

(4) 固结纪(1.8~1.6 Ga)

黄陵花岗岩基侵位形成的穹隆导致其顶部的固结系被剥蚀,但在神农架地块的神农架群之下,发育了西汉河组的石英绿泥绢云母片岩等(厚度>1054 m)和孔子河组的千枚岩、变质砂砾岩等(厚度>1225 m),且西汉河组以角度不整合覆盖于崆岭杂岩之上。西汉河组和孔子河组的成岩年龄为1891~1683 Ma(李福喜等,1989),其中碎屑锆石年龄峰值为2.0 Ga(旷红伟等,2019),可与我国华北的长城系对比,对应于国际地层表的固结系。

(5) 关于水月寺古元古代蛇绿混杂岩的商榷

黄陵背斜北部水月寺一带的交战垭、张家湾、后山寺、核桃园等地,零散分布有橄榄岩、橄榄辉石岩和辉石岩等岩体或岩块,均发生了蛇纹石化、透闪石化、方解石化等。这些超镁铁质岩类的锆石U-Pb年龄为2.15~1.95 Ga,从而被确定为古元古代水月寺蛇绿混杂岩(Han Q S et al., 2017)。但该观点,特别是对锆石年龄的解释值得商榷。其一,超镁铁质岩浆的Zr含量很低,且SiO₂不饱和,不可能结晶出岩浆锆石。其二,黄陵地区第Ⅱ期角闪岩相构造-热变质事件(2.0~1.9 Ga)强烈而广泛,如果这些超镁铁质岩形成于2.15~1.95 Ga,则必然发生角闪岩相变质,但他们仅发生部分低级蚀变,说明其形成于1.9 Ga之后。其三,我们亦从交战垭橄榄岩中挑选出大量锆石,其U-Pb年龄为2.0~1.95 Ga,但这些锆石具有典型的完全变质锆石或变质新生锆石的特点,与孔兹岩系中变质锆石的特点一致。上述现象说明,水月寺一带的超镁铁质岩中的锆石,是其在就位过程中从孔兹岩系围岩中捕获的变质锆石。因此,水月寺一带的超镁铁质岩类,不可能指示存在古元古代蛇绿混杂岩,可能属于本次划分的第5期岩浆事件,或者可与黄陵背斜南部的新元古代庙湾蛇绿混杂岩类比。

2.2.2 中元古代(1.6~1.0 Ga)

黄陵-神农地区古元古代结晶基底尚保存较好的连续性,应属同一个地体构造(李福喜等,1989)。黄陵花岗岩基侵位形成的穹隆导致其顶部的固结系及整个中元古代地层均被剥蚀,但可以神农架地块的神农架群和马槽园群为参照。

神农架群为一套巨厚的碳酸盐岩、陆源碎屑岩,含多层火山岩,总厚度大于12680 m。其中火山岩类的锆石U-Pb年龄为1.4~1.1 Ga,形成时代归属中元古代(Qiu X F et al., 2011; 胡正祥等, 2012; 李怀坤等, 2013; 田辉和李怀坤, 2022),对应于国际地层表的盖层系和延展系(1.6~1.2 Ga)。

马槽园群呈角度不整合覆盖在神农架群之上,造成该角度不整合接触关系的构造运动称为“神农运动”(熊成云等,2004)。马槽园群为一套复成分砾岩、砂岩、粘土岩、硅质岩和白云岩,含多层火山岩,发育重力流沉积构造,总厚度约

2153 m。其中火山岩类的锆石 U-Pb 年龄为 1165~1139 Ma (邓奇等, 2013; 邱艳生等, 2013), 对应于国际地层表的狭带系(1.2~1.0 Ga)。

2.2.3 新元古代 (1.0~0.54 Ga)

黄陵背斜南部的基底杂岩中, 新识别出新元古代早期庙湾蛇绿混杂岩(蒋幸福, 2014; 邱啸飞等, 2015a; Jiang X F et al., 2016; Deng H et al., 2017; Lu K et al., 2020), 主要包括形成于洋中脊环境的镁铁-超镁铁岩(>1100 Ma); 形成于岛弧环境的高镁中基性火山岩(1000~970 Ma), 划为黄陵第 6 期岩浆事件。

新元古代中期, 黄陵背斜中部被黄陵花岗岩岩基(860~790 Ma)大规模侵入, 岩基以花岗闪长岩为主, 少量辉长岩、闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩等(李志昌等, 2002; 马大铨等, 2002; 周忠友等, 2007), 形成于与俯冲作用相关的岛弧环境(Wei Y X et al., 2012), 划为黄陵第 7 期岩浆事件。此外, 扬子克拉通西北缘的米仓山-汉南花岗岩类(850~750 Ma), 同样形成于与俯冲作用相关的岛弧环境(Dong Y P et al., 2017)。因此, 黄陵花岗岩岩基与米仓山-汉南花岗岩类共同构成扬子克拉通西北缘的花岗岩带, 相关的构造运动称为“晋宁运动”, 是扬子克拉通对 Rodinia 超大陆聚合事件的响应。

新元古代中晚期, 黄陵背斜南部发育晓峰岩套(770~750 Ma), 包括七里峡辉绿岩墙群、闪长玢岩和花岗斑岩岩脉等, 均形成于伸展构造背景(周忠友等, 2007), 划为黄陵第 8 期岩浆事件。至此, 黄陵基底杂岩的形成及演化过程结束, 扬子克拉通黄陵基底完整形成。此外, 扬子克拉通南缘的江南造山带, 发育大量与伸展构造相关的基性岩脉和 A 型花岗岩类(800~780 Ma)(周金城等, 2014; 邓奇等, 2016), 对 Rodinia 超大陆旋回有强烈而广泛的记录(Li X H, 1999; Dong Y P et al., 2011; 李献华等, 2012; Yin C Q et al., 2013; Zhao G C, 2015; Chen Q et al., 2016; Geng Y S et al., 2020; Shi Z J et al., 2020; Wang K et al., 2020)。上述两者均是扬子克拉通对 Rodinia 超大陆裂解事件的响应。

新元古代晚期, 在伸展滑脱构造背景下(熊成

云等, 2004), 黄陵基底杂岩穹起遭受剥蚀。之后进入伸展垮塌阶段, 发育陆内稳定的沉积盖层, 在黄陵背斜的两翼, 新元古代南华纪的莲沱组、南沱组和震旦纪的陡山沱组, 直接不整合覆盖于黄陵基底杂岩之上。

3 结论

(1) 扬子克拉通黄陵基底的组成, 主要包括太古宙 TTG 片麻岩-斜长角闪岩陆核; 古元古代孔兹岩系高级地体; 新元古代蛇绿混杂岩、花岗岩类和基性岩脉等, 是 8 期岩浆事件(3.2~3.0 Ga、3.0~2.8 Ga、2.8~2.6 Ga、2.3~2.2 Ga、1.85 Ga、1.0~0.97 Ga、0.86~0.79 Ga、0.77~0.75 Ga)、2 期角闪岩相构造-热变质事件(2.6~2.5 Ga、2.0~1.9 Ga)和克拉通化事件等共同作用的结果。

(2) 扬子克拉通黄陵基底的形成和演化过程, 经历了“水月寺运动”、“兴山运动”和“晋宁运动”的塑造和改造; 在新太古代晚期与其北缘的微陆块(鱼洞子杂岩、龙草坪杂岩和陡岭杂岩等)拼接成扬子克拉通的统一基底; 在新元古代中期与其东南缘的微陆块(江南古陆等)拼合成华南大陆的统一基底; 并对 Kenorland、Columbia 和 Rodinia 超大陆的聚合与裂解均有响应。

参考文献:

- 陈道公, Deloule E, 夏群科, 吴元保, 程昊. 2002. 大别山双河超高压榴辉岩中变质锆石: 离子探针和微区结构研究 [J]. 岩石学报, 18(3): 369~377.
- 陈汉宗. 1987. 鄂东北早前寒武系地质年代学研究 [J]. 地球化学, 2: 153~160.
- 陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 李志红, 张宏飞, 宋彪. 2004. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 34(8): 687~697.
- 陈志强. 1985. 论大别运动 [J]. 地质论评, 31(6): 518~524.
- 丁道桂, 郭彤楼, 刘运黎, 翟常博. 2007. 对江南-雪峰带构造属性的讨论 [J]. 地质通报, 26(7): 801~809.
- 邓奇, 王剑, 汪正江, 邱艳生, 杨青雄, 江新胜, 杜秋定. 2013. 扬子北缘元古宇马槽园群时代归属新证据—对地层对比和古地理格局的启示 [J]. 地质通报, 32(4): 631~638.

- 邓奇,王剑,汪正江,崔晓庄,施美凤,杜秋定,马龙,廖世勇,任光明.2016.江南造山带新元古代中期(830-750 Ma)岩浆活动及对构造演化的制约[J].大地构造与成矿学,40(4):753-771.
- 付强,魏君奇,范堡程,裴康达.2023.扬子克拉通古元古代变质演化—来自黄陵穹窿石榴斜长角闪岩的证据[J].岩石矿物学杂志,42(2):173-190.
- 甘晓春,赵风清,金文山,孙大中.1996.华南火成岩中捕获锆石的早元古代-太古宙 U-Pb 年龄信息[J].地球化学,25(2):112-120.
- 高山,张本仁.1990.扬子地台北部太古宙 TTG 片麻岩的发现及其意义[J].地球科学-中国地质大学学报,15(6):675-679.
- 胡娟,刘晓春,陈龙耀,曲玮,李怀坤,耿建珍.2013.扬子克拉通北缘约 2.5Ga 岩浆事件:自南秦岭陡岭杂岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J].科学通报,58(34):3579-3588.
- 胡正祥,刘早学,张焱林,毛新武,冉瑞生,廖宗明,刘成新.2012.扬子地块北缘前南华纪神农架群底界的厘定及其地质意义[J].资源环境与工程,26(3):201-208.
- 姜继圣.1986.黄陵变质地区的同位素地质年代与地壳演化[J].长春地质学院学报,3:1-11.
- 蒋幸福.2014.扬子克拉通黄陵背斜庙湾蛇绿杂岩成因及大地构造意义[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 焦文放,吴元保,彭敏,汪晶,杨赛红.2009.扬子板块最古老锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J].中国科学 D 辑:地球科学,39(7):972-978.
- 旷红伟,耿元生,柳永清,王玉冲,夏晓旭,彭南,范正秀,陈骁帅,白华青.2019.扬子克拉通北缘“神农架群底界”的再厘定及其地层学意义[J].地质学报,93(1):72-93.
- 李怀坤,张传林,相振群,陆松年,张健,耿建珍,瞿乐生,王志先.2013.扬子克拉通神农架群锆石和斜锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J].岩石学报,29(2):673-697.
- 李福喜,聂学武.1987.黄陵断隆北部崆岭群地质时代及地层划分[J].湖北地质,1(1):28-41.
- 李福喜,聂学武,胡正祥,院祚兴.1989.试论黄陵断隆北缘中、下元古界的不整合关系[J].湖北地质,3(1):43-56.
- 李江海.1998.前寒武纪的超大陆旋回及其板块构造演化意义[J].地学前缘,5(增刊):141-151.
- 李献华,李武显,何斌.2012.华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解—观察、解释与检验[J].矿物岩石地球化学通报,31(6):543-559.
- 李亚林,王根宝,王成善,常红.2000.南秦岭龙草坪结晶杂岩锆石 U-Pb 同位素地质年代学研究[J].矿物学报,20(1):50-54.
- 李志昌,王桂华,张自超.2002.鄂西黄陵花岗岩基同位素年龄谱[J].华南地质与矿产,3:19-28.
- 廖宗明,姚燕,胡章章,胡明,陈长江.2016.湖北黄陵断穹北部东冲河石墨矿地质特征与选矿工艺[J].资源环境与工程,30(5):681-685.
- 凌文黎,高山,郑海飞,周炼,赵祖斌.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[J].科学通报,43(1):86-89.
- 凌文黎,程建萍,高山,张本仁,骆庭川.1999.扬子崆岭新太古代壳-幔地球化学特征及其与华北克拉通、大别造山带的对比[J].地球科学,24(3):240-245.
- 凌文黎,高山,张本仁,周炼,徐启东.2000.扬子陆核古元古代晚期构造热事件与扬子克拉通演化[J].科学通报,45(21):243-248.
- 凌文黎,段瑞春,柳小明,程建萍,毛新武,彭练红,刘早学,杨红梅,任邦方.2010.南秦岭武当山群碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J].科学通报,55(12):1153-1161.
- 柳小明,高山,凌文黎,袁洪林,胡兆初.2005.扬子克拉通 35 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义[J].自然科学进展,15(11):1334-1337.
- 刘浩,徐大良,魏运许,彭炼红,邓新,赵小明,陈铁龙,柯贤忠.2017.扬子陆核白竹坪火山岩建造形成时代的重新厘定—来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学的证据[J].地层学杂志,41(3):318-326.
- 刘玉秀.1987.宜昌黄陵背斜北部崆岭群变质作用的矿物共生分析[J].湖北地质,1(1):79-84.
- 刘云勇,姚敬.2017.湖北黄陵断穹北部石墨矿形成机制探讨[J].资源环境与工程,31(5):536-540.
- 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[J].地球学报,18(1):233-241.
- 马大铨,杜绍华,肖志发.2002.黄陵花岗岩基的成因[J].岩石矿物学杂志,21(2):151-161.
- 邱凤,高建营,裴银,张美云.2015.黄陵背斜石墨矿地质特征及成矿规律[J].资源环境与工程,2015,29(3):280-285.
- 邱啸飞,杨红梅,张利国,赵小明,段桂玲,卢山松,谭娟娟,施念.2015a.扬子陆块庙湾蛇绿岩中橄榄岩的同位素年代学及其构造意义[J].地球科学-中国地质大学学报,40(7):1121-1128.
- 邱啸飞,杨红梅,卢山松,谭娟娟,蔡应雄.2015b.扬子陆核古

- 元古代 A 型花岗岩的年代学与地球化学研究及其构造意义 [J]. 现代地质,29(4):884-895.
- 邱啸飞,杨红梅,卢山松,张利国,段瑞春,杜国民.2016.扬子克拉通崆岭杂岩孔兹岩系同位素年代学研究及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学,40(3):549-558.
- 邱啸飞,赵小明,杨红梅,魏运许,吴年文,卢山松,江拓,彭练红.2017.扬子陆核古元古代变质事件——来自孔兹岩系变质锆石 U-Pb 同位素年龄的证据 [J]. 地质通报,36(5):706-714.
- 邱啸飞,杨红梅,赵小明,卢山松,江拓,段瑞春,刘重范,彭练红,魏运许.2019.扬子克拉通崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩成因及其构造意义 [J]. 地质通报,44(2):415-426.
- 邱艳生,胡正祥,杨青雄,周世卿,田望学,李雄伟.2013.华南“马槽园组”年代及其他地层学意义 [J]. 资源环境与工程,27(3):328-334.
- 田成胜,黄如生,张清平.2011.湖北省夷陵区石墨矿地质特征及找矿前景分析 [J]. 资源环境与工程,25(4):310-312.
- 田辉,李怀坤.2022.扬子克拉通中元古代年代地层序列厘定 [J]. 华北地质,45(1):69-91.
- 涂荫玖,杨晓勇,郑永飞,李惠民.2001.皖东南黄片麻岩的锆石 U-Pb 年龄 [J]. 岩石学报,17(1):157-160.
- 王洪亮,徐学义,陈隽璐,闫臻,李婷,朱涛.2011.南秦岭略阳鱼洞子岩群磁铁石英岩形成时代的锆石 U-Pb 年代学约束 [J]. 地质学报,85(8):1284-1290.
- 魏君奇,王建雄,王晓地,单沐阳,郭海明.2009.黄陵地区崆岭群中基性岩脉的定年及意义 [J]. 西北大学学报(自然科学版),39(3):466-471.
- 魏君奇,王建雄.2012.崆岭杂岩中斜长角闪岩包体的锆石年龄和 Hf 同位素组成 [J]. 高校地质学报,18(4):589-600.
- 魏君奇,景明明.2013.崆岭杂岩中角闪岩类的年代学和地球化学 [J]. 地质科学,48(4):970-983.
- 熊成云,韦昌山,金光富,谭文清,李文羨.2004.鄂西黄陵背斜地区前南华纪古构造格架及主要地质事件 [J]. 地质力学报,10(2):97-112.
- 杨道政,李金华.1990.鄂西崆岭群微古植物的发现及其时代探讨 [J]. 中国区域地质,(1):90-94.
- 杨金香.2007.黄陵地区孔兹岩系岩石学特征及变质作用探讨 [J]. 资源环境与工程,21(3):226-230.
- 易承生.2017.湖北省宜昌地区黄陵断穹核北部含石墨地层岩性研究 [J]. 中国非金属矿工业导刊,(4):46-49.
- 尹崇玉,刘敦一,高林志,王自强,邢裕盛,简平,石玉若.2003.南华系底界与古城冰期的年龄:SHRIMP II 定年证据 [J]. 科学通报,48(16):1720-1725.
- 于津海,O'Reilly Y S,王丽娟,Griffin W L,蒋少涌,王汝成,徐夕生.2007.华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成 [J]. 科学通报,52(1):11-18.
- 张国伟,郭安林,王岳军,李三忠,董云鹏,刘少峰,何登发,程顺有,鲁如魁,姚安平.2013.中国华南大陆构造与问题 [J]. 中国科学:地球科学,43(10):1553-1582.
- 张少兵,郑永飞.2007.扬子陆核的生长和再造:锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究 [J]. 岩石学报,23(2):393-402.
- 张彦杰,周效华,廖胜兵,张晓东,武彬,王存智,余明刚.2010.皖赣鄣公山地区新元古代地壳组成及造山过程 [J]. 地质学报,84(10):1401-1427.
- 张业明,熊成云,韦昌山.1996.关于大别运动的新认识 [J]. 地球学报,17(1):11-18.
- 张玉芝,王岳军,范蔚茗,张爱梅,张菲菲.2011.江南隆起带新元古代碰撞结束时间:沧水铺砾岩上下层位的 U-Pb 年代学证据 [J]. 大地构造与成矿学,35(1):32-46.
- 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 [J]. 华南地质与矿产,28(2):124-131.
- 郑永飞,张少兵.2007.华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化 [J]. 科学通报,31(1):27-35.
- 周金城,王孝磊,邱检生.2014.江南造山带新元古代构造-岩浆演化 [M]. 北京:科学出版社.
- 周忠友,杨金香,周汉文,江麟生.2007.湖北黄陵杂岩在 Rodinia 超大陆演化中的意义 [J]. 资源环境与工程,21(4):380-384.
- Chen K, Gao S, Wu Y B, Guo J L, Hu Z C, Liu Y S, Zong K Q, Liang Z W, Geng X L. 2013. 2.6-2.7 Ga crustal growth in Yangtze craton, South China[J]. Precambrian Research, 224: 472-490.
- Chen Q, Sun M, Long X P, Zhao G C, Yuan C. 2016. U-Pb ages and Hf isotopic record of zircons from the late Neoproterozoic and Silurian-Devonian sedimentary rocks of the western Yangtze Block: implications for its tectonic evolution and continental affinity[J]. Gondwana Research, 31: 184-199.
- Chen Q, Sun M, Zhao G C, Zhao J H, Zhu W L, Long X P, Wang J. 2019. Episodic crustal growth and reworking of Yudongzi terrane, South China: Constraints from the Archean TTGs and posttectonic granites and Paleoprotero-

- zoic amphibolites[J]. *Lithos*, 326-327: 1-18.
- Chen Y, Peng S B, Kusky T M, Jing X F, Wang L. 2012. Granulite facies metamorphic age and tectonic implications of BIFs from the Kongling group in the Northern Huangling anticline[J]. *Journal of Earth Science*, 23(5): 648-658.
- Deng H, Peng S B, Polat A, Kusky T M, Jiang X F, Han Q S, Wang L, Huang Y, Wang J P, Zen W, Hu Z X. 2017. Neoproterozoic IAT intrusion into Mesoproterozoic MOR Miaowan ophiolite, Yangtze craton: Evidence for evolving tectonic settings[J]. *Precambrian Research*, 289: 75-94.
- Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, Liu X M, Genser J, Hauzenberger C. 2011. Tectonic evolution of Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213-237.
- Dong Y P, Sun S S, Yang Z, Liu X M, Zhang F F, Li W, Cheng B, He D F, Zhang G W. 2017. Neoproterozoic subduction-accretionary tectonics of the South Qinling Belt, China[J]. *Precambrian Research*, 293: 73-90.
- Gao S, Qiu Y M, Ling W L, McNaughton N J, Groves D I. 2001. SHRIMP single zircon U-Pb dating of the Kongling high-grade metamorphic terrain: Evidence for >3.2 Ga old continental crust in the Yangtze craton[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 44(4): 326-335.
- Gao S, Yang J, Zhou L, Li M, Hu Z C, Guo J L, Yuan H L, Gong H J, Xiao G Q, Wei J Q. 2011. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses[J]. *American Journal of science*, 311(2): 153-182.
- Geng Y S, Du L L, Kuang H W, Liu Y Q. 2020. Ca. 1.7 Ga magmatism on Southwestern margin of the Yangtze block: Response to the breakup of Columbia[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(6): 2031-2052.
- Greentree M R, Li Z X. 2008. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 289-302.
- Guo J L, Gao S, Wu, Y B, Li M, Chen K, Hu Z C, Liang Z W, Liu Y S, Zhou L, Zong K Q, Zhang W, Chen H H. 2014. 3.45 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: implications for Early Archean crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 242: 82-95.
- Guo J L, Wu Y B, Gao S, Jin Z M, Zong K Q, Hu Z C, Chen K, Chen H H, Liu Y S. 2015. Episodic Paleoarchean-Paleoproterozoic (3.3–2.0 Ga) granitoid magmatism in Yangtze Craton, South China: implications for late Archean tectonics[J]. *Precambrian Research*, 270: 246-266.
- Han Q S, Peng S B, Kusky T M, Polat A, Jiang X F, Cen Y, Liu S F, Deng H. 2017. A Paleoproterozoic ophiolitic mélange, Yangtze craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic suturing and microcontinent amalgamation[J]. *Precambrian Research*, 293: 13-38.
- Hui B, Dong Y P, Cheng C, Long X P, Liu X M, Yang Z, Sun S S, Zhang F F, Varga J. 2017. Zircon U-Pb chronology, Hf isotope analysis and whole-rock geochemistry for the Neoarchean-Paleoproterozoic Yudongzi Complex in the northwestern margin of the Yangtze craton, China[J]. *Precambrian Research*, 301: 65-85.
- Hui B, Dong Y P, Zhang F F, Sun S S, Liu X M, Cheng C, He D F. 2019. Geochronology and geochemistry of ca. 2.48 Ga granitoid gneisses from the Yudongzi Complex in the north-western Yangtze Block, China[J]. *Geological Journal*, 54(2): 879-896.
- Jiang X F, Peng S B, Polat A, Kusky T M, Wang L, Wu T Y, Lin M S, Han Q S. 2016. Geochemistry and geochronology of mylonitic metasedimentary rocks associated with the Proterozoic Miaowan Ophiolite Complex, Yangtze craton, China: Implications for geodynamic events[J]. *Precambrian Research*, 279: 37-56.
- Li H K, Zhang C L, Yao C Y, Xiang Z Q. 2013. U-Pb zircon age and Hf isotope compositions of Mesoproterozoic sedimentary strata on the western margin of the Yangtze massif[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56(4): 628-639.
- Li X H. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: Timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly[J]. *Precambrian Research*, 97(1-2): 43-57.
- Liu X M, Gao S, Diwu C R, Ling W L. 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze craton as revealed by detrital

- zircon studies[J]. American Journal of Science, 308: 421-468.
- Lu S S, Qiu X F, Jiang T, Peng L H, Zhao X M, Wei Y X, Duan R C, Wu N W. 2017. 2.2 Ga subduction-related mafic magmatic rocks in the Kongling complex: evidence for the assembly of the Columbia supercontinent[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 91(5): 1926-1927.
- Lu K, Li X H, Zhou J L, Peng S B, Deng H, Guo S, Yang C, Wu L G. 2020. Early Neoproterozoic assembly of the Yangtze Block decoded from metasedimentary rocks of the Miaowan complex[J]. Precambrian Research, 364: 105787.
- Peng M, Wu Y B, Wang J, Jiao W F, Liu X C, Yang SH. 2009. Paleoproterozoic mafic dyke from Kongling terrain in the Yangtze Craton and its implication[J]. China Science Bulletin, 54(6): 1098-1104.
- Peng M, Wu Y B, Gao S, Zhang H F, Wang J, Liu X C, Gong H J, Zhou L, Hu Z C, Liu Y S, Yuan H L. 2012. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope compositions of Paleoproterozoic aluminous A-type granites from the Kongling terrain, Yangtze Block: constraints on petrogenesis and geologic implications[J]. Gondwana Research, 22(1): 140-151.
- Qiu X F, Ling W L, Liu X M, Kusky T, Berkana W, Zhang Y H, Gao Y J, Lu S S, Kuang H, Liu C X. 2011. Recognition of Grenvillian volcanic suit in the Shangnongjia region and its tectonic significance for the South China Craton[J]. Precambrian Research, 191(3-4): 101-119.
- Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, Groves D I, Ling W L. 2000. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. Geology, 28: 11-14.
- Shi Z J, Li W L, Zhang J, Tian Y M, Wang Y, Yin G, Luo Q C. 2020. Major tectono-thermal events in the Yangtze craton: insights from U-Pb-Lu-Hf isotope records in zircons from End-Permian volcanic interlayers in Southwest China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 94(6): 2053-2076.
- Sun W H, Zhou M F, Gao J F, Yang Y H, Zhao X F, Zhao J H. 2009. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China[J]. Precambrian Research, 172(1-2): 99-126.
- Wang K, Dong S W, Yao W H, Zhao T Y. 2020. Nature and evolution of Pre-Neoproterozoic continental crust in South China: A review and tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 94(6): 1731-1756.
- Wang L J, Griffin W L, Yu J H, O'Reilly S Y. 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks[J]. Precambrian Research, 177(1-2): 131-144.
- Wang L J, Yu J H, Griffin W L, O'Reilly S Y. 2012. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks[J]. Precambrian Research, 222-223: 368-385.
- Wang W, Zhou M F, Yan D P, Li J W. 2012. Depositional age, provenance, and tectonic setting of the Neoproterozoic Sibao Group, southeastern Yangtze Block, South China[J]. Precambrian Research, 192-195: 107-124.
- Wang X C, Li X H, Li Z X, Li Q L, Tang G Q, Gao Y Y, Zhang Q R, Liu Y. 2012. Episodic Precambrian crust growth: evidence from U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircon in the Nanhua Basin, central South China[J]. Precambrian Research, 222-223: 386-403.
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Wang R C, Qiu J S, O'Reilly S Y, Xu X S, Liu X M, Zhang G L. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. Precambrian Research, 159(1-2): 117-131.
- Wu Y B, Zhou G Y, Gao S, Liu X C, Qin Z W, Wang H, Yang J Z, Yang S H. 2014. Petrogenesis of Neoarchean TTG rocks in the Yangtze craton and its implication for the formation of Archean TTGs[J]. Precambrian Research, 254: 73-86.
- Wei Y X, Peng S P, Jing X F, Peng Z Q, Peng L H, Li Z H, Zhou P, Zeng X W. 2012. SHRIMP zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Neoproterozoic granitoids in the Huangling anticline and its tectonic setting[J]. Journal of Earth Science, 23(5): 659-675.
- Wei J Q, Wei Y X, Wang J X, Wang X D. 2020. Geochronological constraints on the formation and evolution of the

- Huangling basement in the Yangtze craton, South China[J]. *Precambrian Research*, 342: 105707.
- Wei J Q. 2021. Petrology and geochemistry of the Archean Huangling greenstone belt in the Yangtze Craton, South China[J]. *Precambrian Research*, 364: 106340.
- Xu D L, Wei Y X, Peng L H, Deng X, Hu K, Liu H. 2017. A ca. 2.2 Ga acidic magmatic event at the Northern margin of the Yangtze craton: evidence from U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons from the Kongling complex[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(2): 872-873.
- Xiong Q, Zheng J P, Yu C M, Su Y P, Tang H Y, Zhang Z H. 2009. Zircon U-Pb age and Hf isotope of Quanyishang A-type granite in Yichang: significance for the Yangtze continental cratonization in Paleoproterozoic[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 436-446.
- Yin C Q, Lin S F, Davis D W, Zhao G C, Xiao W J, Li L M, He Y H. 2013. 2.1-1.85 Ga tectonic events in the Yangtze Block, South China: Petrological and geochronological evidence from the Kongling Complex and implication for the reconstruction of supercontinent Columbia[J]. *Lithos*, 182-183: 200-210.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Gao S, Wu F Y. 2006a. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China[J]. *Precambrian Research*, 146: 16-34.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Gao S, Wu F Y. 2006b. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3.8 Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 252: 56-71.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Gao S, Wu F Y. 2006c. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China[J]. *Precambrian Research*, 151: 265-288.
- Zhai M G. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review[J]. *Science China: Earth Sciences*, 54: 1110-1120.
- Zhao X F, Zhou M F, Li J W, Sun M, Gao J F, Sun W H, Yang J H. 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 182(1-2): 57-69.
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, Zheng J P, Li J W. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny[J]. *Geology*, 39: 299-302.
- Zhao G C. 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction[J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1173-1180.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Zhang M, Pearson N, Pan Y M. 2006. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton[J]. *Geology*, 34: 417-420.
- Zhou G Y, Wu Y B, Gao S, Yang J Z, Zheng J P, Qin Z W, Wang H, Yang S H. 2015. The 2.65 Ga A-type granite in the northeastern Yangtze craton: petrogenesis and geological implications[J]. *Precambrian Research*, 258: 247-259.
- Zhou G Y, Wu Y B, Li L, Zheng J P, Wang H, Yang S H. 2018. Identification of ca. 2.65 Ga TTGs in the Yudongzi complex and its implications for the early evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 314: 240-263.
- Zhou J C, Wang X L, Qiu J S. 2009. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coal arc magmatism and sedimentation[J]. *Precambrian Research*, 170: 27-42.
- Zhang Y Z, Wang Y J, Zhang Y H, Zhang A M. 2015. Neoproterozoic assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks: Evidence from the Cangshui Group and associated rocks along the Central Jiangnan Orogen, South China[J]. *Precambrian Research*, 269: 18-30.