

# 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

邱啸飞<sup>1,2</sup>, 赵小明<sup>2</sup>, 杨红梅<sup>1,2</sup>, 魏运许<sup>1,2</sup>, 吴年文<sup>2</sup>, 卢山松<sup>1,2</sup>, 江拓<sup>1,2</sup>, 彭练红<sup>2</sup>  
QIU Xiaofei<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaoming<sup>2</sup>, YANG Hongmei<sup>1,2</sup>, WEI Yunxu<sup>1,2</sup>, WU Nianwen<sup>2</sup>,  
LU Shansong<sup>1,2</sup>, JANG Tuo<sup>1,2</sup>, PENG Lianhong<sup>2</sup>

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学研究室, 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205

1. *Isotope Geochemistry Laboratory, Wuhan Center of Geological Survey, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China;*

2. *Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China*

**摘要:** 崧岭杂岩除太古宙结晶基底外, 还出露一套以含石墨和富铝矿物为特征的孔兹岩系。相对于结晶基底, 目前对于该套表壳岩系的同位素年代学研究有限。对该套孔兹岩系中代表性岩石类型榴线英岩开展了变质锆石U-Pb同位素年龄测定。研究表明, 榴线英岩变质年龄为 $1964 \pm 12$  Ma。结合前人在相近地层岩石组合中报道的锆石U-Pb年龄数据, 推测崧岭杂岩孔兹岩系原岩可能沉积于2.1~2.0 Ga。扬子陆核的古元古代变质-岩浆作用可能与全球广泛存在的同时期(2.1~1.8 Ga)碰撞造山事件有关, 暗示其很可能是Columbia超大陆的重要组成部分。

**关键词:** 扬子克拉通; 崧岭杂岩; 孔兹岩系; 锆石U-Pb年代学; 构造演化

中图分类号: P534.3; P597+.3 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2017)05-0706-09

**Qiu X F, Zhao X M, Yang H M, Wei Y X, Wu N W, Lu S S, Jiang T, Peng L H. Paleoproterozoic metamorphic event in the nucleus of the Yangtze craton: Evidence from U-Pb geochronology of the metamorphic zircons from the khondalite. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(5):706-714**

**Abstract:** Apart from the Archean metamorphic crystal basement, a series of khondalite-bearing graphites and Al-rich minerals are exposed in the Kongling Complex. However, relative to the study of metamorphic crystal basement, geochronological studies of the supracrustal rocks are still very insufficient. In this study, the LA-ICP-MS zircon U-Pb study was carried out for the typical samples of garnet-sillimanite quartzite in the khondalite series. The result shows that the garnet-sillimanite-quartzite was metamorphosed at  $1964 \pm 12$  Ma. Combined with the documented zircon U-Pb geochronologic data, the authors hold that the khondalite-series in the Kongling Complex was deposited at 2.1~2.0 Ga. The Paleoproterozoic metamorphism and magmatism recognized in the interior of the Yangtze craton are consistent with the worldwide coeval collision-related orogenic event during 2.1~1.8 Ga, indicating that this event may have been an important component in the Columbia supercontinent.

**Key words:** Yangtze craton; Kongling Complex; khondalites; zircon U-Pb geochronology; tectonic evolution

扬子克拉通是中国东部最重要的前寒武纪块体之一, 其早期形成与构造演化对充分认识中国大陆地壳早期陆核的形成、地壳生长、演化乃至全

球前寒武纪构造地质事件响应具有重要意义。然而, 由于显生宙巨厚沉积盖层覆盖, 前寒武纪地质体在扬子克拉通的出露范围十分有限, 阻碍了对

收稿日期: 2016-01-18; 修订日期: 2016-06-28

资助项目: 国家自然科学基金项目《扬子克拉通神农架地区新元古代基性岩墙时代、成因和构造意义的地球化学研究》(批准号: 41303026)、中国地质调查局项目《武当-桐柏-大别成矿带武当-随枣地区岩浆岩同位素年代学与地球化学调查》(编号: DD20160030)、《中南地区基础地质综合调查与片区总结》(编号: DD20160351)和中国地质调查局百名青年地质英才培养计划

作者简介: 邱啸飞(1985-), 男, 博士, 副研究员, 从事同位素地球化学和岩石地球化学研究。E-mail: qiu Xiaofei@geochemist.cn

于中国东部大陆地壳早期形成与演化过程的全面认识。已有研究表明,扬子克拉通在前寒武纪发生了多期次构造-岩浆/变质事件,其中研究最充分的为中-新元古代会聚和裂解相关事件,大多数研究者将其与Rodinia超大陆的拼合和裂解过程相联系<sup>[1-4]</sup>。

与此同时,随着对扬子克拉通前寒武纪地质体研究的逐步积累,越来越多的证据显示,其可能经历了更复杂的演化过程,可能由内部不同构造单元或块体之间相互作用,逐渐碰撞拼合而成<sup>[2-10]</sup>,要较完整地认识统一扬子克拉通的形成与演化历史,需要对其各组成陆块内不同陆核或次一级构造单元的基底岩系形成及地壳增生过程有所了解。位于扬子克拉通北部的崆岭杂岩作为扬子克拉通少数太古宙结晶基底出露区之一<sup>[11-15]</sup>,成为研究扬子克拉通早期地壳形成演化历史的“窗口”。

崆岭杂岩中出露2套岩石,下部为一套TTG片麻岩基底,构成扬子克拉通古老结晶基底,另一套为覆盖于TTG片麻岩基底之上、以含富铝矿物和石墨为特征的变沉积表壳岩系,之前将其定名为孔兹岩系,认为其应是构造环境相对稳定条件下形成的一套陆棚-浅海相沉积物,物源区为稳定的硅铝质陆壳<sup>[16]</sup>。已有研究显示,该套孔兹岩系变质原岩主体为泥沙质岩石,推测为更早期陆壳物质再循环的产物<sup>[17]</sup>。因此,对扬子克拉通孔兹岩系开展同位素年代学研究,不仅可以获得其变质年龄、约束地层沉积时代,还能提供扬子克拉通地壳形成演化的重要信息,为早期华南陆块基底性质的深化理解提供重要证据。

本文报道了崆岭杂岩孔兹岩系高精度LA-ICP-MS变质锆石U-Pb年代学数据,结合该地区已获得的研究成果,对扬子克拉通核部古元古代构造热事件与早期构造演化过程进行探讨。

## 1 区域地质概况

华南陆块由西北部的扬子克拉通和东南部的华夏陆块组成<sup>[4-6]</sup>。崆岭杂岩为目前华南陆块已确认的少数太古宙结晶基底出露区之一,呈穹窿状出露,总面积约360km<sup>2</sup>,被后期古元古代圈椅墙A型花岗岩、新元古代黄陵侵入杂岩体和辉绿岩脉侵入<sup>[18-19]</sup>,被南华纪莲沱组和南沱组碎屑沉积岩不整

合覆盖(图1)。已有的研究表明,崆岭杂岩主体由高角闪岩相-麻粒岩相变质岩组成,并可大致分为古老结晶基底和沉积表壳岩系2个组成部分<sup>[20]</sup>。其中古老结晶基底由2类岩石构成,其一为闪长质、英云闪长质、奥长花岗质、花岗闪长质片麻岩(简称DTTG片麻岩),另一类岩石为少量出露的斜长角闪岩,这2套岩石总出露面积约200km<sup>2</sup>。此外,崆岭杂岩还含有一套覆盖于这些古老结晶基底之上的变沉积表壳岩系。该套变沉积岩主要为一套以含石墨、富铝矿物石榴子石、电气石、磁铁矿等为特征矿物的黑云斜长片麻岩、黑云片岩、云英片岩、夹大理岩、石英岩、斜长角闪岩、变粒岩等岩石组合。岩石中不同程度的混合岩化现象普遍,形成混合片麻岩与条带状混合岩<sup>[21]</sup>。姜继圣<sup>[16]</sup>最早将该套变沉积岩岩石组合定名为孔兹岩系,并强调岩石组合中存在指相岩石——石榴矽线石英岩(简称榴线英岩)。

作为华南陆块最古老的结晶基底,前人对崆岭基底岩系进行了大量的年代学研究。例如20世纪八九十年代,姜继圣<sup>[16]</sup>对二郎庙剖面变质岩进行了全岩Rb-Sr等时线定年,获得2010±114Ma的年龄;马大铨等<sup>[22]</sup>对DTTG片麻岩进行了Sm-Nd等时线定年,获得其原岩年龄为3.29~3.15Ga,同时还获得斜长角闪岩约2.0Ga的锆石U-Pb年龄。此外,Ling等<sup>[23]</sup>对黄凉河剖面斜长角闪岩进行了Sm-Nd全岩等时线定年,获得了2742±83Ma的年龄。李志昌等<sup>[24]</sup>利用La-Ce同位素在英云闪长质片麻岩及其斜长角闪岩包体中获得了精度不高的3292±417Ma等时线年龄。21世纪以来,随着研究工作的不断积累,崆岭杂岩基底岩系的年代学研究取得了突飞猛进的发展。例如,最近对其东北部混合片麻岩进行的LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果表明,其原岩形成于3218±13Ma,并具有2732±16Ma的变质年龄<sup>[12]</sup>。此外,魏君奇等<sup>[25]</sup>对崆岭杂岩中斜长角闪岩包体进行了LA-ICP-MS锆石定年,结果显示其形成于约3.0Ga,并经历了2.7Ga和2.5Ga的变质改造过程。最近,Gao等<sup>[13]</sup>对北部崆岭奥长花岗质片麻岩开展的LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果表明,其原岩年龄为3302±7Ma。Guo等<sup>[15]</sup>对崆岭杂岩中花岗岩片麻岩进行了SHRIMP锆石U-Pb测年,获得了3457±14Ma的年龄,这也是目前扬子克拉通乃至整个华南陆块报道的最古老岩石记录。与之相

图1 崆岭杂岩地质简图及其采样点(据参考文献[20]修改)

Fig.1 Sketch geological map of the Kongling Complex and sampling locations

1—DTTG片麻岩;2—孔兹岩系;3—大理岩;4—显生宙;5—超基性侵入岩;  
6—基性岩脉;7—钾长花岗岩;8—断层;9—采样点

比,对崆岭杂岩中变沉积岩的年代学研究比较缺乏。Ling等<sup>[26]</sup>对崆岭杂岩中副片麻岩进行了矿物-全岩Sm-Nd等时线年龄测定,获得了 $1939\pm$

44Ma的等时线年龄,并认为这一时期在研究区可能存在一期构造-热事件。Zhang等<sup>[5]</sup>对崆岭杂岩中的变泥质岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定

图2 崆岭杂岩榴线英岩野外露头照片

Fig. 2 Field outcrop of the garnet-sillimanite-quartzite in the Kongling Complex

年,获得了  $1.97 \pm 0.03 \text{ Ga}$  的上交点年龄,将该年龄解释为该套变泥质岩的变质年龄。最近, Yin 等<sup>[17]</sup>对崆岭杂岩变沉积岩进行的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作,同样获得了约 2.0Ga 的变质锆石年龄。综合看,崆岭杂岩下部 TTG 片麻岩和斜长角闪岩主要形成于 3.3~2.7Ga,而上部表壳岩系则形成于古元古代。

## 2 样品特征和分析方法

用于锆石定年的样品采自宜昌市兴山县老林沟附近的石榴子石矿采矿区,选取孔兹岩系中最典型的岩石类型榴线英岩为研究对象。岩石具有块状构造,细粒鳞片变晶结构-斑状变晶结构,镜下观察发现岩石中主要矿物为石榴子石(约 40%)、矽线石(约 30%)和石英(约 25%),以及少量石墨、斜长石等(<5%),副矿物包括磁铁矿、锆石等。石榴子石变斑晶肉眼可见,自形程度高,可见完整五角十二面体晶型,直径多为 0.3~1cm,最大直径可达 2cm,主要成分为铁铝榴石,在局部岩石露头上呈层状产出;浅色矿物主要为矽线石和石英,矽线石呈纤柱状产出,石英呈他形产出(图 2-a),部分露头可以看到榴线英岩中混有长英质片(麻)岩包体(图 2-b)。总体上,榴线英岩结构、构造和矿物组合特征暗示其原岩可能为一套砂泥质岩石。

在野外选取具有代表性的榴线英岩样品(约 5kg)用于锆石分选,样品采集后直接送往河北省地质矿产勘查开发局物化探区域地质调查研究所岩矿实验室进行锆石分选工作。锆石分选采用传统重磁技术完成。样品经破碎处理后于双目镜下分选出具有代表性的锆石颗粒,然后将其粘在环氧树脂上进行制靶,经抛光、喷碳等处理后用于阴极发光(CL)照相以确定锆石颗粒内部结构,方便用于锆石 U-Pb 定年过程中选择合适的区域。透射光、反射光及 CL 照相在配备英国 Gatan 公司生产的阴极荧光探头装置系统的 JSM6510 扫描电镜上完成。锆石制靶、透射光、反射光及 CL 图像均在北京锆年领航科技有限公司完成。

锆石的激光电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)U-Pb 同位素测试在中国地质科学院矿产资源所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。锆石分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型

MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。实验中采用氦气作为剥蚀物质的载气,分析时采用的激光束斑大小为  $25 \mu\text{m}$ ,剥蚀频率为 10Hz,能量密度为  $2.5 \text{ J/cm}^2$ 。锆石 U-Pb 同位素组成原始数据采用 ICPMSDataCal 软件进行处理<sup>[27]</sup>。将锆石 GJ-1 作为外标,同时将 NIST SRM610 作为元素含量测定标准。样品测试过程中,将 Plesovice 标样作为未知样品进行分析,分析结果与推荐值  $337.13 \pm 0.37 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ )<sup>[28]</sup>在误差范围内一致。详细测试流程见参考文献[29]。锆石 U-Pb 年龄谐和图绘制及加权平均值计算均用 Isoplot 3.0 软件完成<sup>[30]</sup>。

## 3 样品分析结果

### 3.1 崆岭杂岩孔兹岩系锆石 U-Pb 年龄

从崆岭杂岩榴线英岩样品 LLG-Zr 中分选出的锆石在颗粒形态上多为浑圆状或不规则状,自形程度差,CL 图像显示,大多数锆石发光强度很弱,图像质量较差,未显示振荡环带结构,且很多锆石发育有裂隙,为典型的变质成因锆石(图 3)。

对其中的 30 个锆石颗粒进行了 30 个点的 U-Pb 同位素分析,分析结果列于表 1。结果显示,这些锆石具有低 Th ( $1.52 \times 10^{-6} \sim 25.6 \times 10^{-6}$ )含量的特点, Th/U 值变化范围为 0.006~0.086,均小于 0.1,与变质成因锆石一致<sup>[31-32]</sup>。除 1 颗  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄明显偏老的锆石(点 LLG-11) 年龄略不谐和(谐和度 94%)外,其余所有分析点的 U-Pb 年龄均谐和且年龄相近,其  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $1964 \pm 12 \text{ Ma}$  ( $n=29$ , MSWD=0.75),本文将该年龄解释为崆岭杂岩中孔兹岩系的变质年龄(图 4)。

### 3.2 崆岭杂岩孔兹岩系锆石稀土元素组成

孔兹岩系中锆石的稀土元素含量组成见表 2。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 5)中,显示出重稀土元素相对富集的左倾型式,并具有正 Ce 异常和负 Eu 异常。需要特别指出的是,大部分锆石的中、重稀土元素之间并未显示出明显的分异现象,即显示相对平坦的重稀土元素配分模式,这与在石榴子石存在条件下形成的锆石特点一致<sup>[32]</sup>。在含石榴子石的高压-超高压变质岩中,稀土元素,尤其是重稀土元素主要受控于石榴子石,对于封闭体系,石榴子石的形成造成体系中重稀土元素的亏损。与此同时,重稀土元素在石

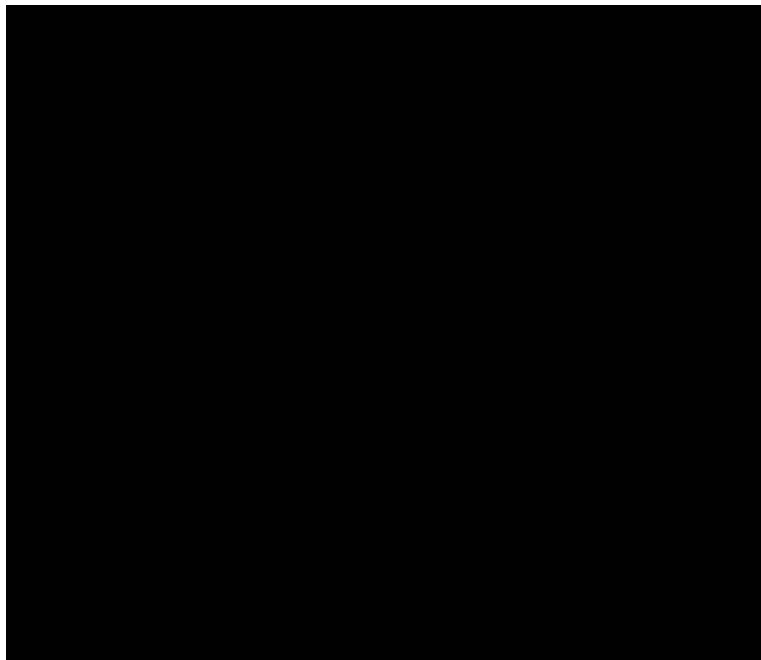


图3 崆岭杂岩榴线英岩典型锆石阴极发光(CL)图像  
Fig. 3 CL images of typical zircon grains from the garnet-sillimanite quartzite in the Kongling Complex

榴子石和锆石之间的分配系数大于1,即当锆石与石榴子石同时存在时,锆石矿物倾向于富集重稀土元素,封闭体系中的重稀土元素仍更倾向于赋存于石榴子石矿物中,从而造成之后形成的变质锆石的重稀土元素组成相对亏损。

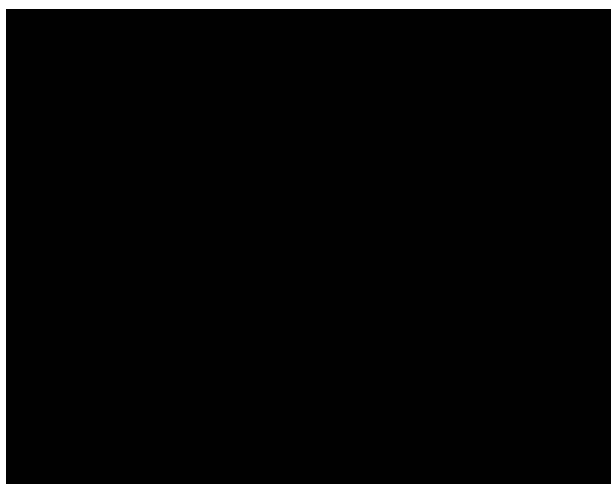


图4 崆岭杂岩榴线英岩锆石U-Pb年龄谐和图  
Fig. 4 U-Pb concordia of zircons from the garnet-sillimanite quartzite in the Kongling Complex

## 4 讨论

### 4.1 崆岭杂岩孔兹岩系的形成时代

对前寒武纪地层沉积时代进行测定,长期以来都是同位素年代学研究的难点之一,目前常将沉积岩中锆石U-Pb同位素年龄数据和锆石中微量元素进行综合分析,例如通过最年轻的碎屑锆石年龄约束最老的沉积年龄,同时根据副变质岩中变质锆石年龄约束地层沉积的最晚年龄,是有效获得沉积时代的方法之一。本次获得的孔兹岩系锆石具有低Th含量的特点,且具有平坦的重稀土元素配分模式和负Eu异常,暗示它们形成于石榴子石和斜长石稳定存在的角闪岩相变质条件下<sup>[33]</sup>。本文对孔兹岩系中代表性岩石榴线英岩开展的变质锆石U-Pb同位素测年结果显示,变质锆石年龄加权平均值为 $1964 \pm 12\text{Ma}$ ,表明崆岭杂岩沉积表壳岩系在古元古代遭受角闪岩相区域变质作用形成孔兹岩系,并以此年龄约束孔兹岩系原岩沉积下限。此外,结合区域上类似同层位地层的碎屑锆石年龄,其碎屑锆石年龄谱变化于3490~2131Ma之间<sup>[11,13,17,34]</sup>,进一步将扬子克拉通孔兹岩系原岩沉积时代限定在2.1~2.0Ga之间。

### 4.2 扬子克拉通核部的古元古代变质-岩浆事件

孔兹岩系是早期地壳演化过程中一类较特殊

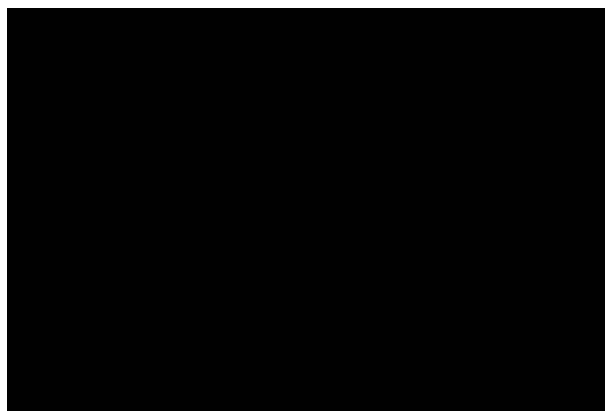


图5 崆岭杂岩榴线英岩锆石稀土元素配分模式图  
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from the garnet-sillimanite quartzite in the Kongling Complex

表 1 崆岭杂岩孔兹岩锆石 U-Th-Pb 同位素组成和年龄值  
Table 1 U-Th-Pb isotopic ratios and apparent ages of zircons  
from the khondalite in the Kongling Complex

点号	元素含量/ $10^{-6}$			同位素比值						表面年龄/Ma						
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	谐和度
LLG-1	117	2.73	336	0.1156	0.0033	5.345	0.14	0.3360	0.0041	1900	51	1876	23	1867	20	99%
LLG-2	115	2.04	323	0.1167	0.0023	5.515	0.11	0.3439	0.0041	1906	36	1903	18	1905	19	99%
LLG-3	102	1.92	294	0.1173	0.0026	5.416	0.15	0.3362	0.0067	1915	39	1887	23	1868	32	98%
LLG-4	107	2.16	298	0.1192	0.0021	5.633	0.10	0.3434	0.0035	1944	27	1921	16	1903	17	99%
LLG-5	106	1.85	304	0.1164	0.0050	5.193	0.16	0.3320	0.0101	1902	72	1852	27	1848	49	99%
LLG-6	89.4	1.52	245	0.1217	0.0029	5.793	0.14	0.3452	0.0040	1981	47	1945	21	1911	19	98%
LLG-7	115	2.01	313	0.1190	0.0020	5.713	0.10	0.3481	0.0033	1943	31	1933	15	1926	16	99%
LLG-8	104	2.07	285	0.1201	0.0023	5.716	0.11	0.3456	0.0038	1958	34	1934	17	1914	18	98%
LLG-9	110	1.96	299	0.1178	0.0024	5.600	0.11	0.3454	0.0037	1924	36	1916	17	1913	18	99%
LLG-10	113	2.03	313	0.1182	0.0022	5.578	0.11	0.3416	0.0038	1929	33	1913	17	1894	18	99%
LLG-12	119	2.20	325	0.1200	0.0022	5.661	0.10	0.3412	0.0033	1967	32	1925	16	1892	16	98%
LLG-13	104	1.74	283	0.1222	0.0022	5.742	0.10	0.3403	0.0036	1989	27	1938	15	1888	17	97%
LLG-14	119	2.03	322	0.1211	0.0019	5.743	0.094	0.3425	0.0032	1972	62	1938	14	1899	15	97%
LLG-15	113	1.87	307	0.1210	0.0019	5.723	0.088	0.3418	0.0032	1972	28	1935	13	1895	15	97%
LLG-16	96.5	1.62	259	0.1233	0.0022	5.855	0.099	0.3440	0.0035	2006	32	1955	15	1906	17	97%
LLG-17	100	1.62	265	0.1228	0.0023	5.9499	0.11	0.3496	0.0035	1998	32	1969	16	1933	17	98%
LLG-18	115	2.06	291	0.1242	0.0026	6.224	0.12	0.3611	0.0033	2017	37	2008	18	1987	16	98%
LLG-19	98.7	1.79	261	0.1186	0.0021	5.773	0.11	0.3503	0.0036	1936	33	1942	16	1936	17	99%
LLG-20	139	2.86	376	0.1221	0.0022	5.784	0.10	0.3414	0.0034	1987	33	1944	15	1893	16	97%
LLG-21	122	2.53	334	0.1227	0.0023	5.791	0.11	0.3393	0.0034	1995	33	1945	17	1884	16	96%
LLG-22	119	12.1	318	0.1229	0.0021	5.9270	0.10	0.3469	0.0033	1998	30	1965	15	1920	16	97%
LLG-23	121	2.31	331	0.1201	0.0020	5.688	0.092	0.3412	0.0032	1958	30	1930	14	1893	15	98%
LLG-24	103	3.52	280	0.1217	0.0021	5.818	0.10	0.3438	0.0029	1983	31	1949	15	1905	14	97%
LLG-25	146	3.23	400	0.1203	0.0018	5.728	0.087	0.3428	0.0029	1961	22	1936	13	1900	14	98%
LLG-26	109	2.19	297	0.1218	0.0020	5.835	0.094	0.3454	0.0033	1983	30	1952	14	1913	16	97%
LLG-27	98.8	2.53	278	0.1206	0.0021	5.610	0.11	0.3349	0.0035	1966	27	1918	16	1862	17	97%
LLG-28	115	2.25	326	0.1205	0.0020	5.641	0.093	0.3375	0.0030	1965	25	1922	14	1875	14	97%
LLG-29	115	2.67	320	0.1191	0.0020	5.664	0.097	0.3429	0.0033	1942	25	1926	15	1901	16	98%
LLG-30	65.7	14.1	177	0.1211	0.0026	5.9440	0.13	0.3549	0.0046	1973	33	1968	19	1958	22	99%
LLG-11	127	25.6	299	0.1460	0.0026	7.675	0.15	0.3791	0.0041	2299	30	2194	18	2072	19	94%

注:衰变常数: $^{235}\text{U}=9.8485\times 10^{-10}/\text{a}$ ;  $^{238}\text{U}=1.55125\times 10^{-10}/\text{a}$ 。 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.88$ ; 锆石谐和度(%)= $[(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U age})/(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U age})]\times 100$

的副变质岩石组合。孔兹岩系在中国主要发育于华北克拉通前寒武纪地区,以集宁—大同一带为典型代表<sup>[35]</sup>。然而相对于华北克拉通,目前对于扬子克拉通孔兹岩系的认知仍有限。本文在崆岭杂岩孔兹岩系中获得了 $1964\pm 12\text{Ma}$ 的变质年龄,表明扬子陆核于古元古代存在一期明显的高压变质事件。这一认识同时得到了前人研究成果的支持<sup>[6,17,34]</sup>。近年来,随着研究工作的不断开展,在扬子陆核出现越来越多的古元古代变质—岩浆作用的报道<sup>[6,17,26,34]</sup>。Zhang等<sup>[34]</sup>在崆岭杂岩变泥质岩中获得了1979~

1948Ma的变质锆石U-Pb同位素年龄;此外,Wu等<sup>[6]</sup>在变泥质岩锆石中也获得了 $2010\pm 13\text{Ma}$ 的变质年龄。需要注意的是,古元古代变质事件在崆岭杂岩变质结晶基底中同样存在记录<sup>[5,14,36]</sup>。例如,魏君奇等<sup>[36]</sup>对崆岭杂岩中角闪岩类进行了年代学研究,在其变质新生锆石中获得了2043Ma的上交点年龄,表明扬子陆核存在2.1~1.9Ga的角闪岩相热变质事件。此外,Yin等<sup>[17]</sup>对崆岭地区基性麻粒岩、榴线英岩及大理岩中变质锆石进行了U-Pb同位素年代学研究,均获得了约2.0Ga的变质年龄,另外还识

表2 崆岭杂岩孔兹岩锆石稀土元素组成  
Table 2 REE compositions of zircon crystals from  
the khondalite in the Kongling Complex

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
LLG-1	0.026	0.14	0.03	0.38	1.45	0.85	13.4	4.98	44.1	10.3	29.7	4.75	34.7	5.12
LLG-2	0.0039	0.16	0.02	0.27	1.09	0.76	11.7	5.03	46.0	10.9	30.2	4.87	34.2	4.96
LLG-3	0.0055	0.09	0.02	0.39	1.42	0.61	12.1	4.54	39.3	9.48	25.8	4.13	31.1	4.30
LLG-4	0.043	0.33	0.05	0.33	1.38	0.84	10.1	4.41	40.3	9.54	26.3	4.20	30.5	4.54
LLG-5	0	0.10	0.01	0.17	0.83	0.52	8.80	3.68	35.9	8.76	23.3	3.57	28.2	4.13
LLG-6	0.0088	0.11	0.01	0.15	1.06	0.45	8.99	3.44	30.4	6.45	19.2	2.94	22.3	3.24
LLG-7	0.0067	0.19	0.01	0.31	1.38	0.85	11.9	4.69	41.9	9.94	28.1	4.55	32.4	4.89
LLG-8	0.081	0.43	0.07	0.42	1.38	0.82	8.90	3.51	31.2	7.30	20.6	3.26	24.1	3.55
LLG-9	0.0031	0.12	0.01	0.35	1.39	0.79	11.7	4.45	39.1	9.50	26.3	4.01	31.4	4.57
LLG-10	0.010	0.18	0.03	0.40	1.15	0.56	11.1	4.08	37.2	8.72	24.5	3.85	28.2	4.08
LLG-12	0.016	0.22	0.03	0.40	1.58	0.75	11.4	4.60	40.1	9.45	25.5	4.12	28.0	4.27
LLG-13	0	0.09	0.004	0.21	0.83	0.57	8.16	3.35	29.8	7.15	19.2	3.15	23.2	3.42
LLG-14	0.026	0.18	0.01	0.21	1.33	0.70	12.1	4.94	45.6	10.7	28.2	4.57	31.8	4.84
LLG-15	0.0031	0.10	0.01	0.20	0.96	0.74	11.1	4.08	38.9	9.59	27.4	4.22	31.0	4.97
LLG-16	0.0031	0.15	0.01	0.09	0.83	0.56	9.01	3.52	32.2	7.43	20.5	3.27	24.4	3.72
LLG-17	0.0084	0.17	0.02	0.37	1.05	0.51	8.99	4.02	36.7	8.56	23.8	3.90	28.0	4.54
LLG-18	0.029	0.31	0.05	0.47	1.07	0.53	9.71	3.90	34.6	7.89	23.1	3.42	24.8	4.35
LLG-19	0	0.12	0.00	0.15	0.81	0.48	9.23	4.14	37.7	9.25	24.0	4.19	30.3	4.96
LLG-20	0.0033	0.21	0.01	0.24	1.97	0.93	17.6	6.30	56.7	13.7	37.4	5.86	41.6	6.08
LLG-21	0.052	0.42	0.03	0.51	1.66	0.98	12.8	4.99	44.9	10.9	31.0	5.03	34.8	5.64
LLG-22	0.015	0.56	0.02	0.33	1.25	0.68	10.3	4.23	41.5	10.9	36.5	6.84	60.0	10.9
LLG-23	0	0.22	0.01	0.35	1.45	0.76	14.2	5.25	49.3	11.5	32.5	5.10	36.1	5.66
LLG-24	0.15	0.66	0.10	0.65	1.63	0.86	10.7	3.98	39.2	9.81	29.8	5.25	40.2	6.75
LLG-25	0.068	0.43	0.05	0.63	1.81	1.15	17.2	6.72	61.1	14.3	39.1	6.07	41.8	6.93
LLG-26	0.0030	0.14	0.02	0.22	1.17	0.63	11.7	4.46	38.4	9.51	26.5	4.03	29.7	4.50
LLG-27	0.015	0.17	0.01	0.40	0.85	0.48	9.85	4.05	39.5	10.1	30.0	4.77	40.2	6.22
LLG-28	0.23	1.21	0.19	1.28	2.04	1.25	14.7	5.48	48.2	11.5	32.0	4.95	34.5	5.45
LLG-29	0.051	0.53	0.08	0.70	1.69	0.92	12.7	4.68	40.7	10.0	29.1	4.43	33.2	5.19
LLG-30	0.082	18.9	0.11	2.19	4.64	2.06	23.1	7.62	79.7	25.8	95.8	17.7	150	26.6
LLG-11	0.037	4.40	0.06	0.49	0.96	0.71	7.55	3.24	31.9	9.71	38.9	8.91	94.9	20.6

别出一套  $2002 \pm 9 \text{ Ma}$  的含石榴子石 S 型花岗岩, 提出其为同碰撞阶段地壳物质部分熔融的产物, 并将崆岭地区高压麻粒岩相变质作用的时间限定为  $2003 \pm 2 \text{ Ma}$ 。本次获得的变质年龄与前人报道的年龄互为印证。前人研究表明, 崆岭杂岩经历了高角闪岩相-麻粒岩相变质作用, 其  $p-T$  变质条件为  $7 \sim 8 \text{ kbar}$ 、 $750 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[6,17]</sup>。本文结果支持扬子陆核在古元古代存在一期高压变质事件。

孔兹岩带的形成常与碰撞造山带相联系, 可能代表了不同陆块之间碰撞拼合相关的变质记录<sup>[37]</sup>。对扬子陆核而言, 基于对崆岭杂岩表壳岩系的岩相学和锆石年代学研究, 有学者提出其在古元古代可

能经历了峰期条件为高压麻粒岩相的变质作用及随后的角闪岩相退变质过程, 暗示区域上可能存在古元古代弧陆或陆陆碰撞造山过程<sup>[6,17,34]</sup>。综合看, 崆岭杂岩古元古代变质-岩浆岩石组合包括基性麻粒岩、富 Al 副片麻岩、钙硅酸岩、大理岩及同碰撞 S 型花岗岩, 这一岩石组合与世界范围内碰撞造山构造环境下形成的孔兹岩系岩石组合相似<sup>[37]</sup>, 进一步为扬子克拉通存在古元古代碰撞作用提供了佐证。值得注意的是,  $2.1 \sim 1.8 \text{ Ga}$  全球范围存在一系列碰撞造山-裂解事件, 而这些事件被普遍认为与古元古代 Columbia 超大陆的聚合和裂解过程密切相关。例如, 华北克拉通  $1.95 \sim 1.85 \text{ Ga}$  的中央造山带

及出露的孔兹岩系可能代表了东、西陆块的拼合<sup>[38]</sup>;而在南非,卡普瓦尔和津巴布韦块体沿约 2.0Ga 的 Limpopo 造山带聚合<sup>[39]</sup>;西澳大利亚, Yilgarn 和 Pilbara 陆块沿 2.0~1.9Ga 的 Capricorn 造山带汇聚<sup>[40]</sup>等。本文和前人研究结果表明,扬子陆核古元古代变质-岩浆过程在时间上与上述事件具有一致性。华南陆块在前寒武纪超大陆重建中的位置长期以来都是国内外研究的热点<sup>[2,41]</sup>。目前对华南陆块在 Columbia 超大陆演化中扮演角色的理解相对有限,本文对扬子陆核古元古代与造山作用有关的构造-变质-岩浆作用进行识别,暗示扬子克拉通很可能是 Columbia 超大陆的重要组成部分之一,而古元古代构造-岩浆作用则是其在 Columbia 超大陆演化过程中的响应。

## 5 结 论

(1)对崆岭杂岩孔兹岩系中典型的榴线英岩进行的变质锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果表明,榴线英岩的变质年龄为  $1964 \pm 12\text{Ma}$  ( $n=29$ ,  $\text{MSWD}=0.75$ )。

(2)结合区域上已有的碎屑锆石 U-Pb 年龄数据,推测崆岭杂岩孔兹岩系原岩沉积于 2.1~2.0Ga,且经历了约 1.96Ga 的高压角闪岩相变质作用,扬子陆核可能存在古元古代与碰撞有关的构造-岩浆事件,暗示其可能为古元古代 Columbia 超大陆的重要组成部分。

**致谢:**感谢中国地质科学院矿产资源所侯可军博士在锆石年代学测试过程中给予的帮助。

## 参考文献

- [1]Ling W L, Gao S, Zhang B R, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1): 111-140.
- [2]Qiu X F, Ling W L, Liu X M, et al. Recognition of Grenvillian volcanic suite in the Shennongjia region and its tectonic significance for the South China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2011, 191(3/4): 101-119.
- [3]Qiu X F, Yang H M, Lu S S, et al. Geochronology and geochemistry of Grenville-aged ( $1063 \pm 16\text{Ma}$ ) metabasalts in the Shennongjia district, Yangtze block: implications for tectonic evolution of the South China Craton[J]. *International Geology Review*, 2015, 57(1): 76-96.
- [4]邱啸飞, 凌文黎, 柳小明, 等. 扬子克拉通北缘神农架群火山岩锆石 Hf 同位素特征[J]. *地质通报*, 2013, 32(9): 1394-1401.
- [5]Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China[J]. *Precambrian Research*, 2006, 151(3): 265-288.
- [6]Wu Y B, Gao S, Gong H J, et al. Zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition of Kongling terrane in the Yangtze Craton: refining the timing of Palaeoproterozoic high-grade metamorphism[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2009, 27(6): 461-477.
- [7]彭松柏, 李昌年, Kusky T M, 等. 鄂西黄陵背斜南部元古宙庙湾蛇绿岩的发现及其构造意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(1): 8-20.
- [8]Peng S B, Kusky T M, Jiang X F, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Miaowan ophiolite, Yangtze craton: Implications for South China's amalgamation history with the Rodinian supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21(2/3): 577-594.
- [9]Wu Y B, Gao S, Zhang H F, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Paleoproterozoic arc related granitoid in the Northwestern Yangtze Block and its geological implications[J]. *Precambrian Research*, 2012, 200(2/3): 26-37.
- [10]邱啸飞, 凌文黎, 柳小明. 扬子陆核与神农架地块中元古代相互关系: 来自锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素的约束[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(2): 1-8.
- [11]Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of >3.2Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 2000, 28(1): 11-14.
- [12]Jiao W F, Wu Y B, Yang S H, et al. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U-Pb age and Hf isotope composition[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(9): 1393-1399.
- [13]Gao S, Yang J, Zhou L, et al. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses[J]. *American Journal of Science*, 2011, 311(2): 153-182.
- [14]Chen K, Gao S, Wu Y B, et al. 2.6 - 2.7Ga crustal growth in Yangtze craton, South China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 224: 472-490.
- [15]Guo J L, Gao S, Wu Y B, et al. 3.45Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 2014, 242(3/4): 82-95.
- [16]姜继圣. 黄陵变质地区的同位素地质年代及地壳演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 1986, 3: 1-11.
- [17]Yin C Q, Lin S F, Davis D W, et al. 2.1-1.85Ga tectonic events in the Yangtze Block, South China: Petrological and geochronological evidence from the Kongling Complex and implications for the reconstruction of supercontinent Columbia[J]. *Lithos*, 2013, 182: 200-210.
- [18]Peng M, Wu Y B, Wang J, et al. Paleoproterozoic mafic dyke from Kongling terrain in the Yangtze Craton and its implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 54(6): 1098-1104.
- [19]Zhang S B, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Origin of TTG-like rocks from anatexis of ancient lower crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic granitoids in South China[J]. *Lithos*, 2009, 113(3/4): 347-368.



- [20] Gao S, Ling W L, Qiu Y M, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(13): 2071-2088.
- [21] 湖北省地矿局. 湖北省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-662.
- [22] 马大铨, 李志昌. 鄂西崆岭杂岩的组成, 时代及地质演化[J]. *地球学报: 中国地质科学院院报*, 1997, 18(3): 233-241.
- [23] Ling W L, Gao S, Zheng H F, et al. Sm-Nd isotopic dating of Kongling terrain[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(1): 86-89.
- [24] 李志昌, 方向. 鄂西黄陵地区太古宙变质岩 La-Ce 同位素体系[J]. *地球化学*, 1998, 27(2): 117-124.
- [25] 魏君奇, 王建雄. 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*, 2012, 18(4): 589-600.
- [26] Ling W L, Gao S, Zhang B R, et al. The recognizing of ca. 1.95Ga tectono-thermal event in Kongling nucleus and its significance for the evolution of Yangtze Block, South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(4): 326-329.
- [27] Liu Y S, Kelemen P B, Zong K Q, et al. Geochemistry and magmatic history of eclogues and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 133-153.
- [28] Sláma J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 2008, 249: 1-35.
- [29] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481-492.
- [30] Ludwig K R. User's manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2001, No. 1a: 1-50.
- [31] Williams I S, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97: 205-217.
- [32] Bingen B, Austrheim H, Whitehouse M J, et al. Trace element signature and U-Pb geochronology of eclogite-facies zircon, Bergen Arcs, Caledonides of W Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 147(6): 671-683.
- [33] Schaltegger U, Fanning C M, Günther D, et al. Growth, annealing and recrystallization of zircon and preservation of monazite in high-grade metamorphism: conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134: 186-201.
- [34] Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon isotope evidence for  $\geq 3.5$  Ga continental crust in the Yangtze craton of China[J]. *Precambrian Research*, 2006, 146(1/2): 16-34.
- [35] 卢良兆, 徐学纯. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系[J]. *地质科技情报*, 1998, 9: 60-62.
- [36] 魏君奇, 景明明. 崆岭杂岩中角闪岩类的年代学和地球化学[J]. *地质科学*, 2013, 48(4): 970-983.
- [37] Santosh M, Tsunogae T, Li J, et al. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: implications for Paleoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11(3): 263-285.
- [38] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 2005, 136(2): 177-202.
- [39] Kröner A, Jaeckel P, Brandl G, et al. Single zircon ages for granulite gneisses in the Central Zone of the Limpopo Belt, Southern Africa and geodynamic significance[J]. *Precambrian Research*, 1999, 93(4): 299-337.
- [40] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: records in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2003, 6(3): 417-434.
- [41] Cawood P A, Wang Y J, Xu Y J, et al. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere?[J]. *Geology*, 2013, 41(8): 903-906.