

扬子陆核古元古代晚期构造热事件 与扬子克拉通演化

凌文黎 高山 张本仁 周炼 徐启东

(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074. Email: wlling@cug.edu.cn)

摘要 对扬子克拉通太古宙高级区域变质岩系变质事件进行了 Sm-Nd 同位素定年(1 939~1 958 Ma), 综合区内同类岩石的 SHRIMP 锆石 U-Pb 等相关年龄数据和地质事件, 确认这一时期构造热事件的存在并对其地质意义进行了解析. 通过与扬子克拉通其他地区早期基底岩系形成时代的对比分析, 表明古元古代晚期在整个扬子克拉通范围内存在一次重要的构造热事件, 并导致了扬子陆块统一基底的形成.

关键词 崆岭高级区 构造热事件 古元古代 统一基底

扬子克拉通是我国东部大陆重要的组成陆块之一, 了解其早期的形成与构造演化对充分认识中国大陆地壳的组成、构造格局的演变乃至全球构造事件均具有重要意义. 经过长期的研究积累, 对扬子陆块早期地质的研究取得了大量有意义的成果, 其中之一是对扬子陆块最早期陆核形成时代(2.7~3.2 Ga)的厘定^[1~3].

虽然崆岭地区作为扬子克拉通太古宙陆核已得到同位素年代学的充分证实, 但其周边克拉通内部广大地区, 早期主要基底岩系的形成时代却为约 1.9~1.6 Ga 的古元古代~中元古代. 因此, 了解克拉通陆核与其周围基底岩系之间的相互关系, 是较全面地认识扬子陆块的形成与演化的关键之一.

本工作对崆岭地区具代表性的太古宙变质岩类的早期变质事件进行了同位素年代学测定, 并对其地质意义进行了分析, 以期提高对扬子克拉通早前寒武纪陆壳增生历史与构造演化的认识.

1 样品与分析

在崆岭高级变质区, 较早期(太古宙)形成的岩类大致可划分成 3 类: 长英质 TTG 岩类、变基性(斜长角闪岩)岩类和副片麻岩(变沉积岩)类, 均经历了高角闪岩相变质作用. 在这一区域变质作用过程中, 部分斜长角闪岩和大量的副片麻岩(孔兹岩系)形成了石榴石等变质矿物. 由于石榴石矿物相对富集 HREE, 其 Sm/Nd 值常明显高于造岩矿物, 因而成为应用 Sm-Nd 同位素法确定地质体变质事件时代的理想矿物.

本次工作从野外采集的百余件样品中, 经显微镜下观察并结合矿物组成、主量和微量元素特征, 选取了两个具代表性的样品作为区内斜长角闪岩和副片麻岩的典型代表, 并从中分离出单矿物, 进行 Sm-Nd 法内部等时线年龄测定, 以期确定其变质作用发生的时间.

斜长角闪岩样品 KH35 采于崆岭黄凉河剖面, 岩石呈深灰色, 致密块状构造. 显微镜下造岩矿物角闪石和斜长石与石榴石呈镶嵌状花岗变晶结构, 并略具定向. 各矿物颗粒均具较好晶形, 斜长石和角闪石也基本未见蚀变现象. 矿物组成(体积比)为: 角闪石约 54%(0.25~0.7 mm)、斜长石约 43%(0.3~0.4 mm)、石榴石约 2%(0.075~0.375 mm)和少量以磁铁矿为主

的不透明矿物. 部分石榴石中含有以斜长石和石英为主的细小包裹体.

KH05 采于同一剖面, 为副变质长英质岩, 灰白色花岗(-鳞片)变晶结构和片麻状构造. 造岩矿物结晶粒度较 KH35 粗大, 可能与变质过程中的重结晶作用有关. 矿物组成为: 石英约 52%(0.5~2 mm)、斜长石约 45%(1~3 mm)、黑云母约 2%~3%(0.25~1 mm)、石榴石约 0.5%(0.2~0.4 mm)和少量磁铁矿等不透明矿物. 石榴石嵌于长石和石英颗粒间, 晶形较完整. 斜长石多发生一定程度的绢云母化.

样品岩石化学和 REE 含量分析由湖北省地质矿产局岩矿分析测试中心完成, 分析方法与质量参见文献[4]. Sm-Nd 同位素分析由国土资源部壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室的同位素实验室完成, 分析方法参见文献[1]. 分析过程中, La Jolla 仪器标准的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值测定值为 $0.511\ 864 \pm 0.000\ 010$ ($2s_m$), GBW04419 (Sm-Nd 法玄武岩国家标准) 测定值分别为: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 728 \pm 0.000\ 007$ ($2s_m$), $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1814$, $\text{Nd} = 10.21\ \mu\text{g/g}$, $\text{Sm} = 3.064\ \mu\text{g/g}$. 由于样品 REE 分析和同位素分析采用同一露头不同手标本, 故两手标本间 REE 含量存在一定程度的不均一性.

2 元素地球化学特征

对所选两件样品的石榴石单矿物成分进行的电子探针分析表明, 从核部向其边缘, 石榴石成分没有明显变化, 这与其显微镜和背散射图像下均未发现环带结构的观察结果相符合, 显示矿物形成环境相对稳定, 且无后期次生增大现象, 是较理想的定年测定矿物. 矿物端元组成计算表明, 所有样品石榴石均以铁铝榴石(Al)为主要端元, 镁铝榴石(Py)次之. 但 KH35 石榴石的 Al 相对含量较 KH05 要低, 而锰铝榴石(Sp)和钙铝榴石(Gr)含量则相对要高.

样品的全岩岩石化学组成列于表 1. KH05 在 $\log(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O}-\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 判别图解上(图略)落入页岩区, 其过铝质(Al/(Ca + Na + K)摩尔数比约为 2.4)特征也表明了其副变质的原岩性质; 而 KH35 在 $\text{MgO}-\text{FeO}-(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图中落入拉斑玄武岩区^[4]. 样品的 REE 组成列于表 2, 其中 KH05 具 LREE 富集($\text{La}_N/\text{Yb}_N = 21.79$)和明显的 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.49$)特征. KH35 的 REE 配分曲线以 LREE 轻度富集, HREE 相对平坦且无明显 Eu 异常为特征, 原岩应属较高程度部分熔融岩浆成因(图 1).

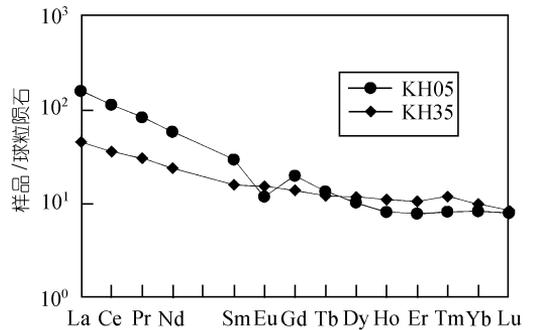


图 1 崆岭变质岩石 KH05 和 KH35 样品 REE 配分曲线

表 1 样品 KH05 和 KH35 岩石化学组成(%)

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	总和
KH05	64.76	0.59	16.45	5.90 ^{a)}		0.13	2.93	0.52	0.86	4.97	0.04		2.86	100.01
KH35	46.45	1.32	16.65	1.19	9.36	1.15	8.86	10.11	0.99	0.98	0.16	0.20	2.51	99.93

a) 以三价铁氧化物形式表示的全铁含量

表 2 样品 KH05 和 KH35 稀土元素组成(μg/g)

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
KH05	58.6	109	11.4	41.5	6.82	1.03	6.06	0.78	3.91	0.69	1.94	0.29	2.05	0.30	244.4
KH35	16.7	34.5	4.17	17.0	3.68	1.33	4.24	0.70	4.48	0.94	2.62	0.42	2.44	0.32	93.54

3 Sm-Nd 同位素年龄

样品 KH05 和 KH35 全岩及单矿物 Sm-Nd 同位素测定结果列于表 3. 对其中石榴石和斜长石单矿物进行了重复分析, 以检查数据的可信性. 两样品矿物-全岩内部等时线年龄(采用 ISOPLOT 软件^[5]计算)示于图 2.

表 3 KH05 和 KH35 及其单矿物 Sm-Nd 同位素组成^{a)}

样号	样品	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2S _m	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	Nd/μg · g ⁻¹	Sm/μg · g ⁻¹	t _{DM} /Ga ^{b)}	t _{2DM} /Ga ^{c)}
KH05-W	片麻岩	0.511 288	6 × 10 ⁻⁶	0.108 7	44.34	7.978	2.69	2.79
		(0.512 416)	15 × 10 ⁻⁶	(0.109 4)	(44.17)	(7.998)	2.71	2.77
KH05-Gt	石榴石	0.512 416	15 × 10 ⁻⁶	0.196 0	3.518	1.140		
KH05-Pl	长石	0.510 802	12 × 10 ⁻⁶	0.069 3	9.236	1.058		
		(0.510 814)	16 × 10 ⁻⁶					
KH35-W	斜长角闪岩	0.512 002	9 × 10 ⁻⁶	0.152 5	15.21	3.838	2.84	2.52
KH35-Pl	长石	0.511 334	17 × 10 ⁻⁶	0.101 5	4.812	0.808 0		
		(0.511 349)	23 × 10 ⁻⁶					
KH35-Gt	石榴石	0.517 879	16 × 10 ⁻⁶	0.609 8	1.099	1.108		
		(0.517 887)	19 × 10 ⁻⁶					
KH35-Hb	角闪石	0.512 158	9 × 10 ⁻⁶	0.151 5	18.57	4.656		
		(0.512 149)	11 × 10 ⁻⁶					

a) 括号内数据为重复测定结果; b) 采用 DMM $e_{Nd}(0) = +10(^{143}Nd/^{144}Nd = 0.513 15, ^{147}Sm/^{144}Nd = 0.213 7)$ 的线性演化模式计算; c) 二阶段亏损地幔模式年龄, 其中地壳 $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.118, t = 1.95$ Ga

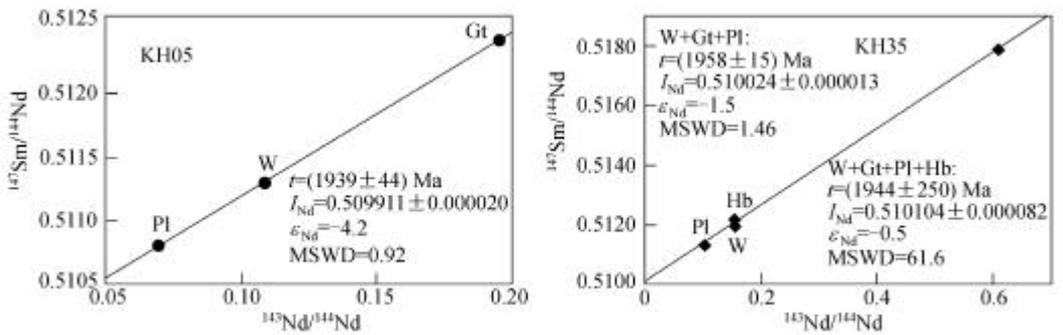


图 2 斜长角闪岩(KH35)与副片麻岩(KH05)Sm-Nd 内部等时线

W: 全岩; Gt: 石榴石; Pl: 斜长石; Hb: 角闪石

副片麻岩(KH05)由全岩、斜长石和石榴石构成的内部等时线具较好的线性(MSWD = 0.92), 其等时线年龄为(1 939 ± 44) Ma, $e_{Nd}(t)$ 为-4.2. 含石榴石斜长角闪岩(KH35)由全岩、石榴石和斜长石组成的等时线年龄为(1958 ± 15) Ma, $e_{Nd}(t)$ 为-1.5, 等时线也具有很好的线性(MSWD = 1.46), 但当回归等时线包括角闪石单矿物时, 等时线年龄值误差增大, 即(1 944 ± 250) Ma. 误差增大源于角闪石相对等时线的偏移(MSWD = 61.6), 可能与作为含水矿物的角

闪石的 Sm-Nd 同位素体系后变质期有一定程度的开放有关。

从统计学角度, 崆岭高级变质区斜长角闪岩和副片麻岩的内部等时线年龄谐合一致, 说明区内岩石于约 1 950 Ma 共同经历了一次构造热变质事件。

4 讨论

对于同位素年代学定年数据的检验通常有两种途径: 地质事实和其他独立的年代学方法互验。

在本研究工作完成前稍早时间, 本文作者从崆岭高级变质地体的 4 件样品(两件奥长花岗岩和两件副片麻岩)中进行了锆石单矿物分选, 并在澳大利亚西澳大学用 SHRIMP 对其进行了单颗粒 U-Pb 法测定^[2, 3]。除 2 644~3 275 Ma 的较老年龄外, 分别在奥长花岗岩和变沉积岩中得到了年龄为(1 992 ± 16)和(1 928 ± 18) Ma(误差均为 2s)的谐合年龄^[3, 6], 表明在约 1 990~1 930 Ma 期间于崆岭地区确有构造热事件存在, 并导致了新生锆石形成。

此外, 在崆岭高级区地体内部, 对斜长角闪岩进行的 K-Ar 年龄测定表明, 其峰期变质后体系封闭以来的时间是(1 891 ± 54) Ma^[7]; 而侵位于高级变质岩中的圈椅淌钾长花岗岩岩体(出露面积约 30 km²), 其锆石 U-Pb 年龄为(1 840 ± 4) Ma^[8]。

位于崆岭高级区以南的黄陵花岗质杂岩体是扬子克拉通“晋宁运动”形成的具代表性的侵入岩体之一, 也是确定我国南方震旦系时代下限的重要标志。该岩体的侵位年龄为(819 ± 9) Ma(锆石 SHRIMP U-Pb 谐合年龄)^[9], 但其 Sm-Nd 同位素^[10]模式年龄(表 4)却揭示出成岩物质主要来源于壳内古基底岩系, 表现为其 t_{DM} 模式年龄变化于 3.60~2.18 Ga(二阶段模式年龄 t_{2DM} 为 2.64~2.14 Ga)之间, 且多数样品与崆岭高级区太古宙岩石的模式年龄相似, 显示出黄陵杂岩体岩浆主要源于古基底岩系的地壳深熔作用。但部分样品的模式年龄相对年轻, 约为 2.1~2.2 Ga, 其成因可解释为晋宁期或时代约为 1 950 Ma 的幔源岩浆与太古宙基底岩系混合的结果, 然而由于黄陵杂岩的 t_{DM} 均远大于晋宁期, 因此, 古元古代晚期幔源岩浆的加入应能更好地解释这一现象。

表 4 黄陵岩体 Sm-Nd 同位素组成^[10]及其亏损地幔模式年龄

样号	岩性 ^{a)}	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2s	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	Sm/μg · g ⁻¹	Nd/μg · g ⁻¹	$t_{DM}/Ga^b)$	$t_{2DM}/Ga^c)$
H12-1-1	闪长岩	0.511 650	49 × 10 ⁻⁶	0.136 6	4.4	19.46	2.95	2.54
H12-1-2	闪长岩中暗色包体	0.511 624	13 × 10 ⁻⁶	0.143 7	2.89	12.15	3.30	2.64
H12-11	闪长玢岩	0.511 670	11 × 10 ⁻⁶	0.151 5	3.96	15.81	3.60	2.63
H12-10-2	石英闪长岩	0.511 867	11 × 10 ⁻⁶	0.131 0	8.08	37.3	2.35	2.14
H12-10-3	石英闪长岩	0.511 977	12 × 10 ⁻⁶	0.169 4	7.8	27.83	4.00	2.30
H12-2-1	英云闪长岩	0.511 450	23 × 10 ⁻⁶	0.097 4	3.9	24.22	2.22	2.52
H12-15	英云闪长岩	0.511 478	54 × 10 ⁻⁶	0.097 0	2.95	17.78	2.18	2.47
H12-16	花岗闪长岩	0.511 500	19 × 10 ⁻⁶	0.106 4	2.75	16.61	2.33	2.52
H12-6	花岗岩	0.511 492	23 × 10 ⁻⁶	0.112 4	1.86	10.02	2.48	2.58
H12-14	花岗岩	0.511 493	20 × 10 ⁻⁶	0.102 0	3.77	22.51	2.25	2.49

a) 岩石定名引自文献[10]; b) 计算同表 3; c) 除 $t = 0.819$ Ga 外, 计算同表 3

综上所述, 约 1 950 Ma 定年值代表了崆岭高级区于古元古代晚期发生的一次较大规模的区域构造岩浆事件, 并以角闪岩相区域变质和下地壳深熔作用为主要标志。这一事件开始于

约 2 000 Ma, 并在约 1 850 Ma 基本结束. K-Ar 年龄应代表了基底岩系峰期变质后 K-Ar 同位素体系冷却封闭的时间, 并以钾长质花岗岩大型岩基的侵入标志构造岩浆事件的结束. 在这一事件过程中, 可能形成了部分初生地壳物质, 并具有较深的侵位, 其存在通过如黄陵花岗岩于晋宁期的地壳深熔作用揭示出来.

崆岭地区是目前惟一得到同位素年代学充分证实的扬子克拉通太古宙基底出露地区, 而广泛的扬子克拉通其他地区基底岩系的主要形成时代却为古元古代^[11]: 据对 244 件扬子克拉通不同岩类样品的 Sm-Nd 同位素数据统计^[12], 其 t_{DM} 模式年龄(按现代亏损地幔 $e_{Nd} = +10$ 的线性演化计算)频数峰值位于 1.6~2.0 Ga. Li 等人^[13]在对扬子克拉通南缘新元古代中期~震旦纪早期的细粒沉积岩做 Sm-Nd 同位素分析时发现, 随着大量初生地壳物质的加入, 沉积岩 t_{DM} 模式年龄从约 1.8 Ga 下降至约 1.3 Ga, 表明了该地区基底岩系的主要形成时代 ≥ 1.8 Ga. 陈江峰等人^[14]在对扬子克拉通北缘东段进行的类似研究(新元古代~古生代细粒沉积岩)也表明, 其 t_{DM} 值为 1.9~2.1 Ga. 张海祥等人^[15]近期对扬子克拉通东南部赣北地区元古宙沉积岩进行的 Sm-Nd 同位素分析也证实, 其基底岩系的形成时间为古元古代, 即 t_{DM} 值为 1.5~1.9 Ga. 大别造山带出露了扬子克拉通具最大剥蚀深度的岩系, 其榴辉岩的寄主岩, 即长英质片麻岩所具有的 t_{DM} 值也为 1.7~2.0 Ga^[16]. 以上研究暗示了这些地区的早期基底应为约 1.9~2.1 Ga 的早元古代岩系, 即时代上与崆岭高角闪岩相变质作用发生的时间基本同时. 事实上, 在除崆岭地区以外的扬子区, 已确认的最早地层均以古元古代为主, 仅在个别地区有零星的太古宙碎屑锆石年龄报道.

5 结论

于约 2.0~1.85 Ga 的古元古代晚期, 在整个扬子克拉通范围内发生了强烈的构造热事件, 并在区域上存在不同的表现形式: 在崆岭太古宙陆核区为强烈的角闪岩相区域变质和地壳深熔作用, 并可能存在一定规模的幔源岩浆底侵作用; 而在其他扬子周边地区, 则表现为一次重要的成壳事件, 并可能构成了这些地区主要的最早期初生地壳和基底岩系. 因此, 该构造事件导致了扬子陆块统一基底的形成, 并使之成为真正意义上的克拉通. 在这一意义上, 扬子克拉通与华北克拉通有着明显的区别: 华北克拉通基底岩系以太古宙岩石为主体, 表明其克拉通化于太古宙已基本完成.

然而, 上述有关扬子古元古代成壳事件的认识主要依据 Nd 同位素模式年龄的研究, 显然这一观点有待对这一时期幔源岩浆事件的发现来进一步佐证.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49603044, 49625305, 49873010, 49794043)和国土资源部壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室资助项目.

参 考 文 献

- 1 凌文黎, 高山, 郑海飞, 等. 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, 1998, 43(1): 86~89
- 2 高山, Qiu Y, 凌文黎, 等. 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 (待发表)
- 3 Qiu Y, Gao S, Mcnaughton N J, et al. >3.0 Ga continental crust in the Yangtze craton, South China: SHRIMP U-Pb Zircon and Nd isotopic evidence. Geology, 2000, 28(1): 11~14

- 4 Ling W L, Gao S, Cheng J P, et al. Geochemical characteristic of the Archean high-grade Terrain of the Kongling complex and early crustal evolution of the Yangtze craton. *Journal of China University of Geosciences*, 1998, 9(2): 100~108
- 5 Ludwig R K. ISOPLOT—A Plotting and Regression Program for Radiogenic-isotope Data, Version 2.96. Revision of U S Geological Survey Open File Report 91-445, 1998. 1~49
- 6 Gao S, Ling W L, Qiu Y, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metal sediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze Craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(13): 2071~2088
- 7 姜继圣. 黄陵变质地区的同位素地质年代及地壳演化. *长春地质学院学报*, 1987, (3): 1~11
- 8 富公勤. 黄陵断隆北部太古界花岗岩-绿岩地体的发现. *岩石矿物*, 1993, (1): 5~13
- 9 中国地质年表工作组. 中国地质年表. 北京: 地质出版社, 1987. 148
- 10 冯定犹, 李志晶, 张自超. 黄陵花岗岩类岩基南部岩体侵入时代和同位素特征. *湖北地质*, 1991, 5(2): 1~12
- 11 Wang H, Qiao X. Proterozoic stratigraphy and tectonic framework of China. *Geol Mag*, 1984, 121: 599~614
- 12 陆松年, 杨春亮, 蒋明媚, 等. 前寒武纪大陆地壳演化示踪. 北京: 地质出版社, 1996. 156
- 13 Li X H, McCulloch M T. Secular variations in the Nd isotopic composition of Late Proterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in SE China. *Precambrian Res*, 1996, 76: 67~76
- 14 陈江峰, 周泰禧, 邢凤鸣. 皖南浅变质岩和沉积岩钆同位素组成及沉积物物源区. *科学通报*, 1989, 34(20): 1572~1574
- 15 张海祥, 孙大中, 朱炳泉, 等. 赣北元古代变质沉积岩的铅钆同位素特征. *中国区域地质*, 2000, 19: 66~71
- 16 谢 智, 陈江峰, 董树文, 等. 大别造山带浅变质岩的锆石 U-Pb 年龄. *地球学报*, 1999, 20: 335~340

(2000-04-21 收稿, 2000-07-07 收修改稿)