

扬子克拉通后太古宙碎屑沉积岩 地球化学及其构造意义

王选策¹,高山^{1,2},刘勇胜¹

(1. 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074;2. 西北大学地质学系大陆动力学实验室,陕西西安 710069)

摘要:系统分析了扬子克拉通从中元古代到白垩纪不同时代8个碎屑沉积岩的主量元素和微量元素成分.这8个样品的REE分配模式与全球典型细粒碎屑沉积岩PAAS、NASC、ES及全球平均大陆上地壳一致.志留纪—泥盆纪样品以高 $w(\text{La})/w(\text{Co})$ 、 $w(\text{La})/w(\text{Sc})$ 、 $w(\text{Th})/w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Th})/w(\text{Sc})$ 比值为特征,物源上表现出北秦岭的特征,表明扬子克拉通曾与华北克拉通南缘的北秦岭在志留纪—泥盆纪对接.

关键词:碎屑沉积岩;源区;上地壳;地球化学;扬子克拉通.

中图分类号: P591 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2003)03-0250-05

作者简介:王选策(1978—),男,2001年毕业于中国地质大学(武汉),获学士学位.现在中国地质大学(武汉)研究生院攻读地球化学硕士学位. E-mail: wangxuancc@sina.com

细粒碎屑沉积岩是源区出露上地壳岩石的天然平均样品^[1]. Taylor等^[1]指出由于REE、Y、Th、Sc、Co等元素的水—岩分配系数很小,加之在碎屑沉积岩中副矿物不是它们的主要载体,且这些元素不受或较少受成岩和变质过程的影响,因此它们在细粒碎屑沉积岩中的含量定量指示了它们在源区中的含量^[1~11]. Th和La倾向于在长英质岩石中富集,而Sc和Co则倾向于在铁镁质岩石中富集,所以这两类元素的比值能够提供关于碎屑沉积岩源区岩石组成的信息.另一方面,由于地壳的岩石组成部分取决于所处的构造环境,因此对不同时代细粒碎屑岩的研究不仅可指示上地壳组成而且可研究构造环境随时间的演化^[1~9]. 本文分析了扬子克拉通后太古宙碎屑沉积岩的主量和微量元素含量,由此讨论扬子克拉通上地壳组成和源区的可能变化及其地质意义.

1 地质概况

湖北宜昌神农架和三峡地区是扬子克拉通震旦纪和显生宙地层标准剖面建立地区.区内出露太古

宙崆岭高级变质地体^[7,12],其在北部神农架地区为中元古代神农架群.该群主要由砂岩、泥质岩、碳酸盐岩组成,夹薄层玄武岩.神农架群被几乎连续的震旦纪冰积岩和震旦纪—中三叠世海相碎屑岩、页岩、碳酸盐岩和硅质岩覆盖,中三叠世以后主要为陆相的碎屑岩.

2 样品来源和分析方法

样品采自神农架地区神农架群和三峡地区震旦—白垩纪标准地层剖面.所分析样品为组合样.每个组合样品由同一时代同一岩性的若干个子样品组合而成.首先将子样品用玛瑙细碎机碎至160目以上,然后每个子样按所代表的地层厚度为权重称取重量,再经玛瑙细碎机充分研磨、混合,最终形成粒径约为200目的组合样.采用组合样品的目的是为了包括尽可能多的代表同一时代不同层位的同一岩性岩石,同时避免大量的样品分析量.

主量元素分析采用X荧光法,微量元素分析采用ICP-MS(ELAN 6100 DRC)法在西北大学教育部大陆动力学重点实验室完成.ICP-MS溶样采用酸消解分析流程.准确称取50 mg 200目岩石粉末样品置于7 mL Teflon溶样弹中,加入少量高纯水

表 1 扬子克拉通后太古宙碎屑沉积岩(泥质岩)化学组成

Table 1 Chemical composition of post-Archean pelites from Yangtze craton

	BHVO-1		AGV-1		中元古代	震旦纪	寒武纪	奥陶纪	志留纪	泥盆纪	三叠纪	白垩纪	UC	PAAS	NASC	
	测定值	推荐值	测定值	推荐值	D346	D325	D330	D331	D334	D336	D339	D343				
样品数					3	7	2	4	13	2	3	2				
SiO ₂					68.99	64.79	58.99	60.20	68.46	55.47	58.71	53.48				
TiO ₂					0.69	0.61	0.68	0.76	0.64	1.41	0.78	0.64				
Al ₂ O ₃					13.73	14.30	14.39	17.82	14.32	26.11	17.66	13.06				
Fe ₂ O ₃					3.09	3.66	3.51	2.64	3.41	1.21	1.96	4.42				
FeO					0.26	1.69	1.59	3.96	1.77	0.35	2.46	0.61				
MnO					0.01	0.09	0.05	0.09	0.08	0.01	0.03	0.07				
MgO					1.21	2.33	2.23	2.77	1.87	0.54	3.11	2.72				
CaO					0.29	1.96	1.20	0.71	0.34	0.15	3.88	9.85				
Na ₂ O					0.30	1.93	1.20	0.71	0.34	0.15	0.75	0.61				
K ₂ O					5.60	3.73	7.35	4.69	3.26	1.40	3.13	2.98				
H ₂ O ⁺					2.21	2.68	2.90	4.14	3.50	7.09	3.80	2.84				
CO ₂					0.03	0.96	2.15	0.44	0.14	0.96	2.95	8.12				
P ₂ O ₅					0.24	0.17	0.15	0.15	0.14	0.07	0.08	0.13				
S					0.25	0.02	0.55	0.05	0.03	0.03	0.01	0.01				
Org					3.23	0.21	4.27	0.28	0.86	4.44	0.17	0.17				
total					100.13	99.13	101.21	99.41	99.15	99.38	99.49	99.70				
Zr	177.00	179.00	233.00	227.00	183.32	207.37	167.50	151.01	173.74	309.27	168.83	104.43	190.00			
Hf	4.64	4.38	0.84	0.90	5.06	5.92	4.89	4.42	4.85	8.48	4.96	2.93	5.80			
Sc	32.63	31.80	12.36	12.20	14.80	12.31	13.43	16.03	12.33	16.31	13.68	11.00	11.00			
Cr	300.06	289.00	10.62	10.10	91.63	55.71	103.63	93.90	76.39	118.59	79.37	72.81	35.00			
Co	47.58	45.00	16.34	15.30	12.63	12.02	16.97	16.74	12.71	6.62	8.64	13.66	10.00			
La	16.57	15.80	40.44	38.00	63.16	32.63	37.53	41.57	39.51	61.53	42.14	34.25	30.00	38.00	32.00	
Ce	39.41	39.00	69.80	67.00	113.20	62.33	64.53	78.01	75.71	116.37	79.61	66.57	64.00	80.00	73.00	
Pr	5.44	5.70	8.40	7.60	14.56	7.67	7.83	8.92	8.90	12.75	8.95	7.64	7.10	8.90	7.90	
Nd	26.54	25.20	33.19	33.00	55.95	31.37	30.98	34.76	35.49	47.56	35.18	30.28	26.00	32.00	33.00	
Sm	6.37	6.20	5.73	5.90	8.69	6.14	5.66	6.20	6.39	8.68	6.08	5.59	4.50	5.60	5.70	
Eu	2.11	2.06	1.69	1.64	1.69	1.35	1.12	1.21	1.27	1.67	1.17	1.20	0.88	1.10	1.24	
Gd	6.44	6.40	5.40	5.00	8.57	5.96	5.51	5.93	6.29	8.17	5.78	5.55	3.80	4.70	5.20	
Tb	0.98	0.96	0.69	0.70	1.20	0.95	0.84	0.87	0.92	1.14	0.91	0.76	0.64	0.77	0.85	
Dy	5.34	5.20	3.52	3.60	6.93	5.46	4.77	4.77	5.15	6.31	5.32	4.20	3.50	4.40	5.80	
Ho	1.01	0.99	0.67	0.67	1.49	1.11	0.99	0.94	1.01	1.27	1.10	0.81	0.80	1.00	1.04	
Er	2.49	2.40	1.77	1.70	4.23	3.23	2.82	2.77	2.90	3.50	3.33	2.21	2.30	2.90	3.40	
Tm	0.35	0.33	0.26	0.25	0.66	0.48	0.43	0.41	0.43	0.54	0.51	0.33	0.33	0.40	0.50	
Yb	2.09	2.02	1.63	1.72	4.28	3.10	2.72	2.67	2.77	3.49	3.36	2.14	2.20	2.80	3.10	
Lu	0.32	0.29	0.26	0.27	0.72	0.48	0.42	0.41	0.43	0.56	0.51	0.33	0.32	0.43	0.48	
Pb	2.10	2.60	36.58	36.00	44.31	12.00	21.85	21.30	17.56	29.51	10.67	22.02	20.00			
Th	1.32	1.08	6.47	6.50	16.29	9.61	13.47	16.65	15.02	24.68	18.16	11.52	10.70			
REE					285.32	162.27	166.16	189.45	187.18	273.56	193.94	161.86	146.37	183.0	173.20	
(La) _n /(Yb) _n					9.74	6.94	9.10	10.29	9.41	11.65	8.29	10.56		9.20	7.00	
δ(Eu)					0.60	0.69	0.62	0.62	0.62	0.61	0.61	0.66		0.66	0.70	
δ(Ce)					0.87	0.91	0.87	0.94	0.94	0.96	0.95	0.95				
La/Th					3.88	3.39	2.79	2.50	2.63	2.49	2.32	2.97				
Th/Sc					1.10	0.78	1.00	1.04	1.22	1.51	1.33	1.05				
Th/Co					1.29	0.80	0.79	0.99	1.18	3.73	2.10	0.84				
La/Co					5.00	2.72	2.21	2.48	3.11	9.30	4.88	2.51				
La/Sc					4.27	2.65	2.80	2.59	3.20	3.77	3.08	3.11				
Sc/Co					1.17	1.02	0.79	0.96	0.97	2.47	1.58	0.81				
Zr/Hf					36.21	35.05	34.28	34.18	35.83	36.48	34.01	35.66				

UC. 全球平均大陆上地壳成分^[8]; PAAS, NASC 分别为澳大利亚后太古宙平均页岩和北美页岩组合样^[11]; 欧洲页岩组合样(ES)数据略. 氧化物、S 和 Org 的单位为%, 微量和稀土元素单位为 10⁻⁶, 元素比值为质量分数之比.

润湿样品。用滴瓶加入高纯 HNO_3 、 HF 各 40 滴、 HClO_4 一小滴,在 $135\text{ }^\circ\text{C}$ 下蒸干;再用滴瓶加入高纯 HNO_3 、 HF 各 40 滴,将 Teflon 溶样器密封置于钢套中,在 $190\text{ }^\circ\text{C}$ 下加热 48 h;取出冷却 2~3 h,然后在 $135\text{ }^\circ\text{C}$ 蒸至湿盐状,再次用滴瓶加入 80 滴高纯 HNO_3 蒸至湿盐状;加 50% 的高纯 HNO_3 至 Teflon 溶样弹体积的一半,提取样品,在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 下加热 12 h。最后用移液器准确加入 1 g Rh 内标溶液,并且将溶液全部移入试剂瓶,用 1% 的 HNO_3 稀释至 80 g 摇匀,即可待 ICP-MS 测定。

主量元素的分析误差小于 5%。对国际标准参考物质(BHVO-1 和 AGV-1)的分析结果表明(表 1),绝大部分微量元素和 REE 的分析误差小于 5%,La、Gd、Co、Hf 等元素的分析误差在 5%~7% 之间。

3 结果与讨论

扬子克拉通碎屑沉积岩元素分析数据见表 1。

由图 1 可见,各时代泥质岩 REE 分配模式总体与扬子克拉通、南、北秦岭造山带及全球大陆上地壳的 REE 分配模式一致。结合表 1 可知,中元古代和泥盆纪泥质岩具有较高的 REE 含量,其余各时代泥质岩 REE 含量基本相似。 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 比值在泥盆纪最高(11.7),震旦纪最小(7.0),各时代的平均值为 9.50,接近 PAAS 和全球平均上地壳的 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 比值(分别为 9.20 和 9.02),而高于 NASC(7.0)和 ES(8.4)。

震旦纪和侏罗纪泥质岩的 $\delta(\text{Eu})$ 较高(分别为 0.69 和 0.66),其余时代泥质岩的 $\delta(\text{Eu})$ 相似(0.61~0.62),且与 PAAS、NASC 和 ES 相近。这可能是由于扬子克拉通晋宁期碰撞造山运动导致了沉积物源区有大量新生地壳物质加入^[13],从而使震旦纪沉积物中 $\delta(\text{Eu})$ 较高。同样由于三叠纪扬子克拉通与华北克拉通最终全面拼合^[14]对沉积物源区的影响导致了侏罗纪沉积物中 $\delta(\text{Eu})$ 较高。

扬子克拉通后太古宙泥质岩微量元素组成的另一个明显变化是,泥盆纪泥质岩表现出异常高的 $w(\text{Th})/w(\text{Sc})$ 、 $w(\text{La})/w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Th})/w(\text{Co})$ 、 $w(\text{La})/w(\text{Sc})$ 比值,表明沉积物源区有高 La、Th 物质的加入。这种变化与 Gao 等^[11]对南秦岭不同时代显生宙碎屑沉积岩源区研究揭示出志留纪—泥盆纪源区发生明显变化具有同步性。该研究表明,南秦岭

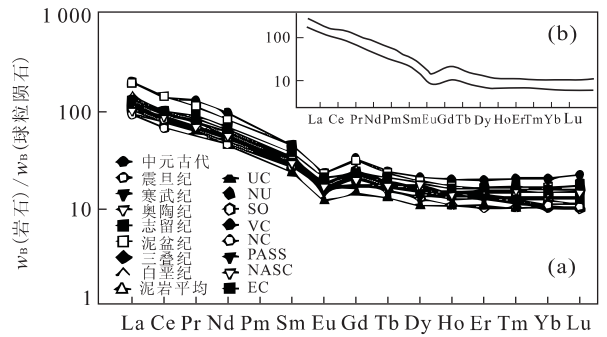


图 1 扬子克拉通后太古宙泥质岩稀土元素分配模式
Fig. 1 Chondrite-normalized REE distributions of post-Archean pelites from Yangtze craton
右上角插图(b)为扬子克拉通后太古宙不同时代泥质岩平均 REE 组成与全球平均大陆上地壳(a)的比较

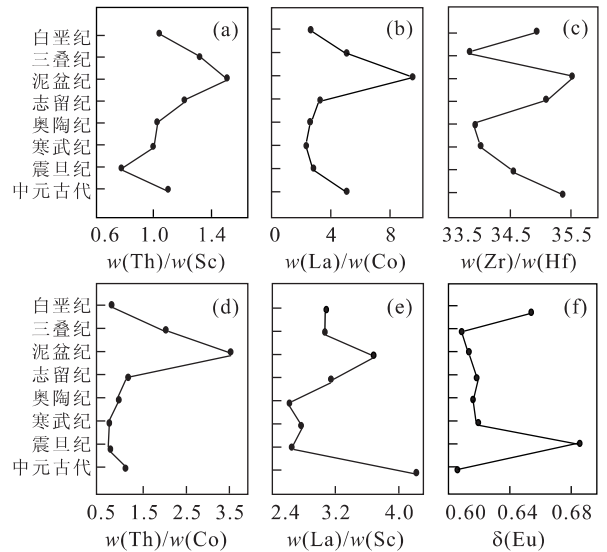


图 2 扬子克拉通后太古宙泥质岩元素比值变化
Fig. 2 Variation of element ratios in post-Archean pelites from Yangtze craton

碎屑沉积岩志留纪—泥盆纪源区变化指示物源来自北秦岭,进一步指示作为扬子克拉通最北缘的南秦岭此时已与作为华北克拉通最南缘的北秦岭对接。由于南秦岭是扬子克拉通的一部分,因此上述扬子克拉通泥盆纪源区的变化同样应指示来自北秦岭造山带物源的加入。与此同时,泥盆纪泥质岩中的 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 比值也显著增加(图 2),其成因有待进一步研究。

Ce 在氧化环境中形成 Ce^{4+} , 而不易溶于海水^[15], 因此 Ce 在海水和深海沉积物中亏损, 呈现负异常, 而在 Fe-Mn 结核中富集呈现正异常。缺氧环境时, Ce 与 La 和 Pr 行为相同, 以 +3 价状态释放

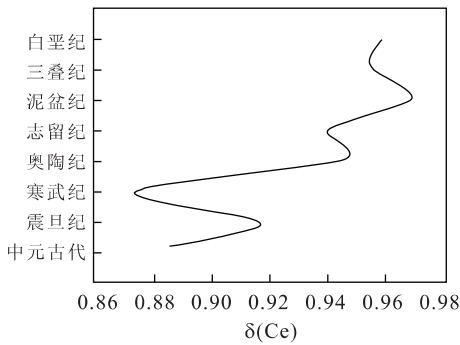


图3 扬子克拉通后太古宙泥质沉积岩全岩 Ce 异常

Fig. 3 Variation of Ce anomaly in post-Archean pelites from Yangtze craton

到水体中,导致海水和同期沉积物 Ce 不明显。此外,沉积岩 $\delta(\text{Ce})$ 还受沉积环境控制,从洋中脊至大陆边缘环境,沉积物从 Ce 负异常至无异常变化^[16,17]。图3可见,扬子克拉通中元古代和寒武纪泥质岩 $\delta(\text{Ce})$ 较低(0.87),其余时代 $\delta(\text{Ce})$ 相近,为0.91~0.95,异常不明显。由于寒武纪样品主要为碳质页岩,说明应处于还原环境,因此 $\delta(\text{Ce})$ 负异常的出现,说明其成因更可能与沉积环境距大陆边缘相对较远有关。而早元古代负 Ce 异常可能表明当时环境较氧化,或与寒武纪类似沉积环境相对远离大陆边缘。

参考文献:

[1] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985. 1-45.

[2] McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-seaturbidites: crustal evolution and plate tectonic associations [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54: 2015-2050.

[3] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends [J]. *J Geol*, 1991, 99: 1-21.

[4] McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust [J/OL]. *Geochemistry Geophysics Geosystem(G³)*, 2000GC00109, 2001-04-20.

[5] Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chem Geol*, 1993, 104: 1-37.

[6] Gao S, Wedpehl K H. The negative Eu anomaly in Archean sedimentary rocks: implications for decomposi-

tion, age and importance of their granitic sources [J]. *EPSL*, 1995, (133): 81-94.

[7] Gao S, Zhang B R, Zhu X M, et al. Silurian-Devonian provenance changes of South Qinling basins: implications for accretion of the Yangtze (South China) to the North China cratons [J]. *Tectonophysics*, 1995, 250: 183-197.

[8] Gao S, Ling W L, Zhang B R, 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]. *GCA*, 1999, 63(13/14): 2071-2088.

[9] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Review of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.

[10] 赵祖斌,高山,骆庭川,等. 华北克拉通碎屑沉积岩地球化学:异常太古宙—元古宙界线的初步研究[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 431-439.

ZHAO Z B, GAO S, LUO T C, et al. Geochemistry of clastic sedimentary rocks from the North China craton: a preliminary study of anomalous Archean-Proterozoic boundary [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2): 431-439.

[11] Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. *GCA*, 1998, 62(11): 1959-1975.

[12] 陈岳龙,罗照华,刘翠. 对扬子克拉通西缘四川康定—冕宁变质基底的新认识——来自 Nd 同位素的证据 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2001, 26(3): 279-285.

CHEN Y L, LUO Z H, LIU C. New recognition of Kangding-Mianning metamorphic complexes from Sichuan, western Yangtze craton: evidence from Nd isotopic composition [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(3): 279-285.

[13] 李献华, McCulloch M T. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义 [J]. *岩石学报*, 1996, 12(3): 359-369.

LI X H, McCulloch M T. Nd isotopic evolution of sediments from the southern margin of the Yangtze block and its tectonic significance [J]. *J Petrology*, 1996, 12(3): 359-369.

[14] 张宗清,张国伟,唐索寒,等. 秦岭黑河镁铁质枕状熔岩年龄和地球化学特征 [J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(1): 36-42.

ZHANG Z Q, ZHANG G W, TANG S H, et al. Age

- and geochemical character of mafic pillow lava from Qinling Heihe [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(1): 36—42.
- [15] De Baar H J W, Bacon M P, Brewer P G, et al. Rare earth elements in the Pacific and Atlantic oceans [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49: 1943—1959.
- [16] Murray R W, Buchholtz ten Brink R W, Jones M R, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18: 268—271.
- [17] Murray R W, Buchholtz ten Brink M R, Gerlach D C, et al. Rare earth, major and trace elements in chert from the Franciscan complex and Monterey Group, California; assessing REE sources to fine-grained marine sediments [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 155: 1875—1895.

Geochemical Evolution of Post-Archean Pelites from Yangtze Craton and Its Tectonic Significance

WANG Xuan-ce¹, GAO Shan^{1,2}, LIU Yong-sheng¹

(1. *Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

Abstract: The North China and Yangtze cratons, the most important tectonic units of China, finally coalesced via collision with the formation of the E-W-trending Qinling Mountains. The North Qinling and South Qinling belts constitute the southern active margin of the North China craton and northern China passive margin of the Yangtze craton, respectively. Both the North China and Yangtze cratons and the North Qinling belt, characterized by a relatively uniform, non-evolutionary composition of clastic sediments in post-Archean La-Th-Sc-Co system, can be distinguished from each other in provenance in terms of La/Co, La/Sc, Th/Co, Th/Sc ratios. Systematic chemical compositions are analyzed (by ICP-MS ELAN 6100 DRC) for Cretaceous to Meso-Proterozoic sediments from the Yangtze craton. The REE patterns of these clastic sedimentary rocks are similar to those of the global typical sedimentary rocks such as PAAS, NASC, ES and the global upper continental crust (UC). The Silurian and Devonian pelites are characteristic of North Qinling belt with high La/Co, La/Sc, Th/Co, Th/Sc ratios. The value of $\delta(\text{Eu})$ is sensitive to the mafic material. When the mafic material become a kind of provenance, the value of $\delta(\text{Eu})$ changes from 0.61—0.62 to 0.68—0.69, showing that the Yangtze craton accreted to the North Qinling on the southern margin of North China cratons in the Silurian-Devonian period.

Key words: clastic sedimentary rock; provenance; upper crust; geochemistry; Yangtze craton.