

北京地区中元古界下马岭组页岩地球化学特征及其地质意义

刘清俊¹, 刘雨鑫², 冯 辉¹, 孙小华³, 孟美杉¹, 曹 磊⁴

(1. 北京市地质勘察技术院, 北京 100039; 2. 首都师范大学 地球空间信息科学与技术国际化示范学院, 北京 100048;
3. 北京市地质矿产勘查开发局, 北京 100195; 4. 北京市地热研究院, 北京 102218)

摘 要: 对采自北京地区中元古界下马岭组的页岩样品, 进行了地球化学研究, 结果表明: 主量元素 Al_2O_3 、 CaO 和 Na_2O 含量明显偏低, K_2O 和 MnO 含量稍微偏低, SiO_2 、 TiO_2 及 Fe_2O_3^T 含量同上地壳基本一致。微量元素及其比值特征显示源岩为混合源岩。稀土元素总量较高, 轻稀土富集、重稀土平坦, 铈明显负异常、铈弱负异常, 各样品稀土元素配分模式与大陆上地壳一致, 显示了沉积物具有同源性。源岩为来自于内蒙古隆起的花岗岩类、闪长岩类及基性岩的混合。微量元素比值及铈弱负异常的特征表明中元古界下马岭组页岩为覆水较深的还原环境沉积, 源区构造背景为大陆岛弧。

关键词: 北京; 中元古界; 下马岭组; 页岩; 地球化学特征; 意义

中图分类号: P595; P588.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)02-0230-11

Geochemical characteristics of Mesoproterozoic Xiamaling Formation shales in Beijing and their geological significance

LIU Qing-jun¹, LIU Yu-xin², FENG Hui¹, SUN Xiao-hua³, MENG Mei-shan¹ and CAO Lei⁴

(1. Beijing Institute of Geo-exploration Technology, Beijing 100039, China; 2. College of Geospatial Information Science and Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Beijing Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Beijing 100195, China; 4. Beijing Geothermal Research Institute, Beijing 102218, China)

Abstract: Based on analyses of the sampled shales of field outcrops and well cuttings, the authors studied the geochemical characteristics of the shales of Mesoproterozoic Xiamaling Formation in Beijing. Al_2O_3 , Na_2O and K_2O are depleted whereas SiO_2 , TiO_2 and Fe_2O_3^T are relatively enriched. The shales show homogeneous REE content, relatively enrichment of LREE and depletion of HREE, obvious negative Eu anomaly, and slightly negative Ce anomaly. The REE distribution patterns from different shale samples showing an affinity reveal that they have the same source rocks including granitic, dioritoid and mafic rocks from the upper continental crust of Inner Mongolia uplift, and the ratios of trace elements show these features too. They were deposited in a reducing environment with relatively deep water. The tectonic setting of the source area seems to have been a continental island arc.

Key words: Beijing; Mesoproterozoic; Xiamaling Formation; shale; geochemical characteristics; significance

Fund support: Geo-environment Monitoring Network Operation in Beijing(PXM2017-158307-000001) to Neoproterozoic, Beijing area

收稿日期: 2017-05-08; 接受日期: 2018-01-24

基金项目: 北京市土壤地质环境监测网运行资助项目(PXM2017-158307-000001)

作者简介: 刘清俊(1974-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事基础地质、能源地质与环境地质研究, E-mail: Liuqingjun8@sohu.com;

通讯作者: 冯 辉(1980-), 女, 高级工程师, 学士, 主要从事化探勘查与研究, E-mail: fenghuimail@163.com。

稀土元素(REEs),微量元素(如 Y、Sc、Th、Zr、Hf、Cr 和 Co)在细粒碎屑岩中的分配特征是地质作用、源区及构造背景的良好指示剂(Bhatia and Taylor, 1981; Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; Cullers and Stone, 1991; McLennan *et al.*, 1993)。碎屑岩中的粗碎屑组分容易受到风化作用、搬运作用和成岩作用的影响丢失一些关键的信息。因此页岩相比其它碎屑岩而言,更能代表源区的地壳成分,它保留着源区更多的矿物成分信息,而它的化学组成则记录着源区近乎原始的特征,能更加真实的反映古风化条件(如 Pettijohn, 1975; Graver and Scott, 1995)。关于下马岭组的研究已有很多成果:主要集中在烃源岩特征(王杰等, 2001, 2004; 方杰等, 2002; 陈践发等, 2004; 周洪瑞等, 2006; 刘清俊等, 2014)和地层归属等方面(乔秀夫等, 1997; 高林志等, 2007, 2011; 李怀坤等, 2009),而对于下马岭组沉积物的源区及构造背景研究相对薄弱。

本文拟以地球化学分析为手段,进行北京地区中元古界下马岭组页岩的地球化学特征研究,并探讨其物源属性及形成的大地构造背景。以期对本地地区中元古界的研究以及对进一步开展中元古界的石油地质综合研究提供重要的资料。

1 区域地质背景

早元古代末期的吕梁运动,在南北方向的强烈挤压下,形成了研究区大致呈东西方向展布的“燕山裂陷槽”为轴向对称的两隆夹一洼的地貌景观,区内广泛出露中、上元古界长城系、蓟县系及青白口系地层(图1),为一套巨厚的碎屑岩和碳酸盐组合,长城系和青白口系主要为碎屑岩沉积、蓟县系主要为碳酸盐沉积(北京市地质矿产局, 1991)。自早元古代以来,华北板块北缘和南缘受到拉伸,板块内部发育了许多大陆裂谷,中元古代长城纪和蓟县纪处于这种环境中(Lu *et al.*, 2002; Peng *et al.*, 2008)。蓟县纪末期的芹峪运动,导致研究区大面积抬升,海水全部撤出,并经历一个短暂的剥蚀阶段,形成了较为普遍的风化壳。之后地壳再度下沉,海水又一次沿燕山海槽由东向西进入本区,沉积了富含有机质的下马岭组。新的测年数据将其界定为中元古界,而不再属于上元古界的青白口系(高林志等, 2007, 2011; 李怀坤等, 2009)。下马岭组沉积之后的蔚县

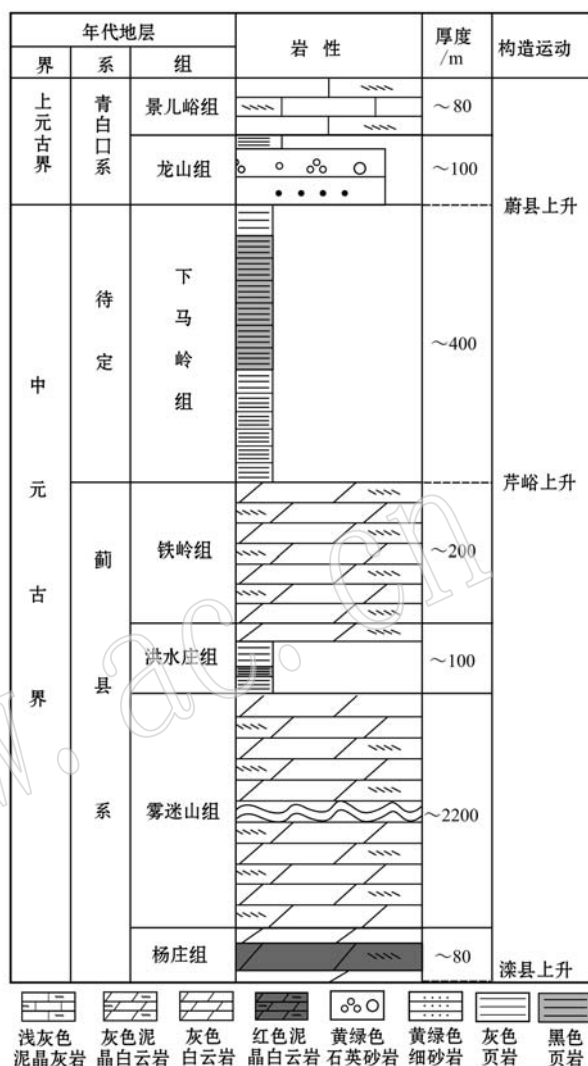


图1 北京地区中元古界中上部-上元古界地层柱状图

Fig. 1 Columnar section of the upper Mesoproterozoic strata

运动,导致下马岭组地层遭受剥蚀,密怀隆起、京西坳陷北部与西南部等处地层剥蚀殆尽,京西坳陷中部、东部及冀中坳陷西部的部分区域的地层保留(图2),其与上覆和下伏地层均为平行不整合接触(图1)。

2 样品采集与分析方法

样品主要采自北京西部山区的青白口村野外露头、北京西部门头沟平原区地热井、北京地区中部地热井及北京东南部平原区地热井(图2),共测试分析样品13件,采样点基本控制了该区域地层的分布。样品为下马岭组黑色、灰色页岩,泥质结构。

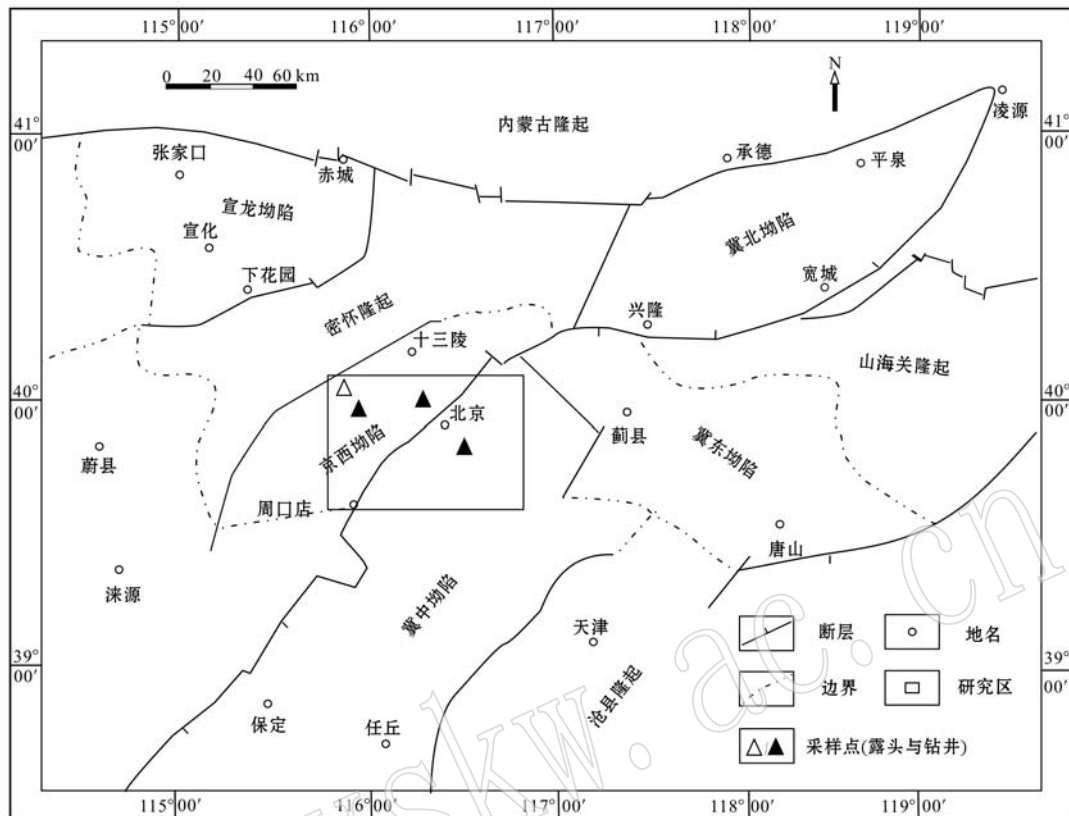


图2 区域地质图及采样位置

Fig. 2 Sketch map of tectonic setting and sampling locations

下马岭组页岩的地球化学测试分析均在任丘市华北石油邦达新技术有限公司完成。主量元素分析在 Axios max X 射线荧光光谱仪上完成, K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 MnO 、 Fe_2O_3 采用原子吸收法测定, P_2O_5 、 TiO_2 采用比色法测定; Al_2O_3 、 FeO 采用容量法测定; SiO_2 和烧失量 (LOI) 则采用重量法测定; 微量元素与稀土元素分析在 X Serise II 等离子体质谱仪上完成, 微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子质谱 (ICP-MS) 的方法测定。主量元素、微量元素与稀土元素的精度分别为 1% 和 5%。

3 测试结果

3.1 主量元素

中元古界下马岭组页岩样品常量元素的分析结果见表 1。同上地壳相比 (Taylor and McLennan, 1985) (图 3): Al_2O_3 、 CaO 和 Na_2O 含量明显偏低, 分别为 11.79% (7.07% ~ 18.94%)、1.87% (0.23% ~ 7.22%) 和 0.79% (0.32% ~ 2.29%)。 K_2O 和

MnO 含量稍微偏低, 分别为 2.90% (1.77% ~ 4.57%) 和 0.05% (0.01% ~ 0.13%); SiO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 显示了同上地壳基本一致的成分, 分别为 67.75% (56.42% ~ 78.81%)、0.64% (0.25% ~ 1.25%) 和 4.88% (1.10% ~ 10.87%)。 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 含量低表明岩石中长石、粘土矿物含量较少, K_2O 相对 CaO 、 Na_2O 含量偏高, 表明岩石中粘土矿物富钾 (刘清俊等, 2014)。

3.2 微量元素与稀土元素

中元古界下马岭组页岩样品微量元素含量见表 1。与上地壳相比: U、V、Cu、Ni、Cr、Zn、Y 等元素较富集, Sc、Co、Pb 微弱富集, Sr、Zr 和 Hf 亏损 (图 3)。Sr 元素明显亏损也反映了源岩中碳酸盐岩矿物含量较低 (Cullers, 2002), CaO 与 MgO 以碳酸盐矿物形式存在的量极少。从基性岩—中性岩—酸性岩—碱性岩, Zr、Hf 的含量逐渐升高, Zr 和 Hf 亏损也表明源岩中含有一定量的基、中性岩。

中元古界下马岭组细碎屑岩样品的稀土元素含量见表 1, 结果可以看出, 北京地区稀土元素 (不含

表1 北京地区中元古界下马岭组页岩常量、微量及稀土元素分析

Table 1 Major elements content, trace elements content and rare earth element data of Meso-Proterozoic Xiamaling Formation in Beijing

样品号	YR1-1	YR1-2	YR1-3	YR1-4	YR1-5	YR1-6	YR1-7	JR119-1	JR119-2	JR131-1	JR131-2	QBK-1	QBK-2	平均	$w_b/\%$
SiO ₂	68.10	69.60	62.71	62.65	78.81	62.86	57.88	69.12	76.77	77.46	56.42	66.09	72.32	67.75	
Al ₂ O ₃	10.80	10.59	11.27	11.30	8.51	18.94	18.78	10.79	9.02	7.07	12.85	14.58	8.83	11.79	
TiO ₂	0.63	0.57	0.82	0.80	0.35	1.25	1.03	0.62	0.41	0.25	0.62	0.67	0.34	0.64	
Fe ₂ O ₃ ^T	4.42	4.13	7.97	7.89	2.31	5.99	10.87	4.50	2.90	1.98	5.59	3.77	1.10	4.88	
CaO	2.92	2.31	2.14	2.25	1.18	0.55	0.70	1.95	1.46	0.89	7.22	0.23	0.49	1.87	
MgO	1.82	2.14	2.78	2.75	1.61	1.00	1.09	2.20	1.68	1.31	1.97	1.58	1.20	1.78	
K ₂ O	2.94	2.91	1.77	1.77	2.52	4.15	3.53	2.82	2.79	1.97	3.36	4.57	2.55	2.90	
Na ₂ O	0.67	0.79	2.29	2.27	0.32	0.92	0.37	0.60	0.40	0.33	0.45	0.36	0.51	0.79	
MnO	0.07	0.09	0.07	0.07	0.02	0.03	0.13	0.04	0.02	0.01	0.06	0.01	0.01	0.05	
P ₂ O ₅	0.47	0.69	0.46	0.45	0.54	0.05	0.07	0.67	0.49	0.24	0.13	0.12	0.20	0.35	
LOI	9.84	8.58	10.67	10.83	5.93	7.55	9.73	9.37	6.10	11.67	17.34	14.98	17.42	10.77	
Rb	102.70	96.39	51.70	51.71	81.92	193.30	187.90	88.25	99.10	66.69	153.10	186.40	100.10	112.25	
Sr	98.51	67.17	47.25	50.40	31.65	109.89	70.24	64.02	41.22	40.14	102.60	37.48	40.28	61.60	
Ba	568.23	504.25	312.30	319.40	318.70	390.20	428.17	677.04	421.94	276.60	438.31	573.53	395.30	432.61	
Pb	27.81	23.21	11.08	9.77	12.42	48.03	35.30	11.73	12.58	16.12	34.39	23.97	15.94	21.72	
Th	9.21	9.68	6.93	6.38	6.74	16.06	21.96	8.34	7.29	6.11	13.30	14.94	7.58	10.35	
U	4.20	6.33	5.89	5.82	2.04	1.96	3.25	9.96	2.99	2.66	2.32	4.89	4.66	4.38	
Zr	178.47	148.97	127.64	131.41	117.69	179.79	205.40	135.49	115.96	95.62	168.22	191.93	121.98	147.58	
Hf	4.62	3.95	3.40	3.43	3.28	4.65	5.27	3.55	3.02	2.51	4.34	5.25	3.18	3.88	
Y	38.10	49.83	39.34	33.24	29.38	34.05	41.62	43.20	31.24	29.24	28.27	26.58	32.67	35.14	
Sc	11.77	12.21	20.69	20.65	7.97	22.92	18.34	14.12	10.74	7.13	13.68	15.10	10.32	14.28	
V	186.50	257.10	283.50	280.10	140.60	140.10	103.90	273.80	182.10	64.47	82.63	282.60	132.30	185.36	
Cr	54.48	44.84	68.50	67.87	33.47	82.98	87.53	66.49	44.46	27.23	70.81	83.54	36.79	59.15	
Cu	109.60	107.20	127.50	110.10	42.88	32.75	35.77	148.90	62.87	50.91	30.26	47.86	39.61	72.79	
Co	10.78	10.33	21.63	20.63	3.72	16.39	22.15	13.63	6.73	3.67	14.74	4.10	1.23	11.52	

续表 1
Continued Table 1

样品号	YR1-1	YR1-2	YR1-3	YR1-4	YR1-5	YR1-6	YR1-7	JR119-1	JR119-2	JR131-1	JR131-2	QBK-1	QBK-2	平均
Ni	61.42	88.92	68.68	66.95	27.03	21.63	21.67	95.83	46.43	37.84	26.03	50.19	60.11	51.75
Zn	315.10	474.40	214.90	234.00	152.60	69.34	90.84	188.70	172.10	105.50	65.51	61.13	53.68	169.06
La	42.50	41.50	29.27	24.42	27.28	53.07	71.43	35.34	26.66	22.35	47.19	31.38	26.70	36.85
Ce	80.84	76.87	57.91	48.36	50.03	103.59	140.94	66.71	48.72	43.04	96.39	67.95	47.58	71.46
Pr	10.10	10.28	7.52	6.34	7.01	12.98	16.92	8.86	6.74	6.08	10.93	8.35	6.76	9.14
Nd	37.46	39.70	30.01	25.09	26.81	46.77	60.73	34.39	25.97	23.80	39.32	33.44	25.51	34.54
Sm	7.29	8.04	6.33	5.34	5.42	8.82	11.10	6.94	5.36	5.06	7.24	7.70	5.48	6.93
Eu	1.68	1.78	1.63	1.33	1.11	1.85	2.24	1.54	1.11	1.00	1.54	1.42	1.06	1.48
Gd	7.00	7.97	6.43	5.46	5.12	8.09	10.16	6.76	5.04	4.92	6.52	5.83	4.99	6.48
Tb	1.19	1.44	1.17	0.99	0.90	1.32	1.58	1.19	0.89	0.88	1.05	0.95	0.95	1.11
Dy	6.78	8.40	6.93	5.84	5.09	7.13	8.44	7.03	5.24	5.10	5.65	5.07	5.72	6.34
Ho	1.44	1.83	1.51	1.27	1.10	1.47	1.72	1.56	1.15	1.11	1.14	1.07	1.27	1.36
Er	4.04	5.24	4.25	3.59	3.05	4.04	4.68	4.53	3.24	3.15	3.24	3.08	3.77	3.84
Tm	0.68	0.92	0.73	0.62	0.54	0.69	0.80	0.80	0.57	0.57	0.55	0.56	0.70	0.67
Yb	4.07	5.46	4.50	3.82	3.16	4.06	4.70	4.83	3.40	3.48	3.35	3.47	4.39	4.05
Lu	0.60	0.82	0.69	0.58	0.48	0.62	0.72	0.67	0.50	0.55	0.63	0.65	0.66	0.63
Σ REE	205.67	210.22	158.88	133.05	137.10	254.49	336.15	181.14	134.57	121.10	224.73	170.90	135.53	184.89
Σ LREE/ Σ HREE	6.97	5.56	5.06	5.00	6.05	8.29	9.25	5.62	5.72	5.13	9.16	7.27	5.04	6.47
La _N /Yb _N	7.05	5.13	4.39	4.31	5.82	8.81	10.26	4.94	5.28	4.33	9.50	6.10	4.10	6.16
La _N /Sm _N	3.67	3.25	2.91	2.88	3.16	3.78	4.05	3.20	3.13	2.78	4.10	0.29	0.35	3.27
Gd _N /Yb _N	1.39	1.18	1.15	1.15	1.31	1.61	1.75	1.13	1.20	1.14	1.57	1.36	0.92	1.30
δEu	0.71	0.67	0.78	0.75	0.63	0.66	0.63	0.68	0.64	0.61	0.67	0.62	0.61	0.67
δCe	0.91	0.87	0.92	0.92	0.85	0.92	0.95	0.88	0.85	0.87	0.99	0.91	0.83	0.90

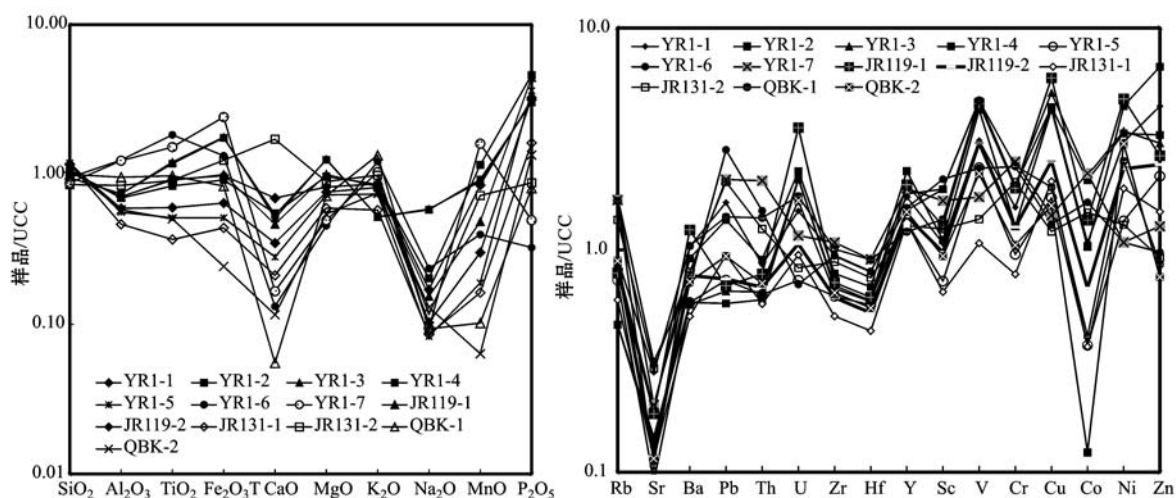


图3 北京地区中元古界下马岭组页岩主要元素与微量元素 UCC 标准化蜘蛛图解(据 McLennan *et al.*, 2006)

Fig. 3 Spider diagram of major and trace element compositions of shales in Meso-Proterozoic Xiamaling Formation in Beijing normalized against upper continental crust (UCC, after McLennan *et al.*, 2006)

Y)含量在 $121.10 \times 10^{-6} \sim 336.15 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 184.89×10^{-6} (图4),稍高于北美页岩稀土元素总量(173.21×10^{-6})和高于上地壳的 146×10^{-6} (Taylor and McLennan, 1985; 陈德潜等, 1996)。这是因为该地层富含有机质(王杰等, 2001, 2004; 方杰等, 2002; 刘清俊等, 2014),有机质导致了稀土元素的富集。 $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ 比值在 $5.00 \sim 9.25$ 之间,平均为 6.47,略低于北美页岩($\Sigma \text{LREE} /$

$\Sigma \text{HREE} = 7.5$, 陈德潜等, 1996), $\text{La}_N / \text{Yb}_N$ 在 $4.10 \sim 10.26$ 之间,平均为 6.16,以上表明轻重稀土元素分馏中等,相对富集 LREE; $\text{La}_N / \text{Sm}_N$ 比值在 $2.56 \sim 4.10$ 之间,平均为 3.27,轻稀土分馏中等; $\text{Gd}_N / \text{Yb}_N$ 比值在 $0.92 \sim 1.75$ 之间,平均为 1.3,重稀土分馏较低。 δEu 普遍在 $0.61 \sim 0.78$ 之间,平均为 0.67,明显亏损,与 PAAS (0.65) 和上地壳 (0.61) 相一致; δCe 在 $0.83 \sim 0.99$ 之间,平均为 0.90,弱亏损或无亏损。研究区页岩样品总体具有轻稀土富集、重稀土平坦以及明显 Eu 负异常和弱 Ce 负异常为特征。

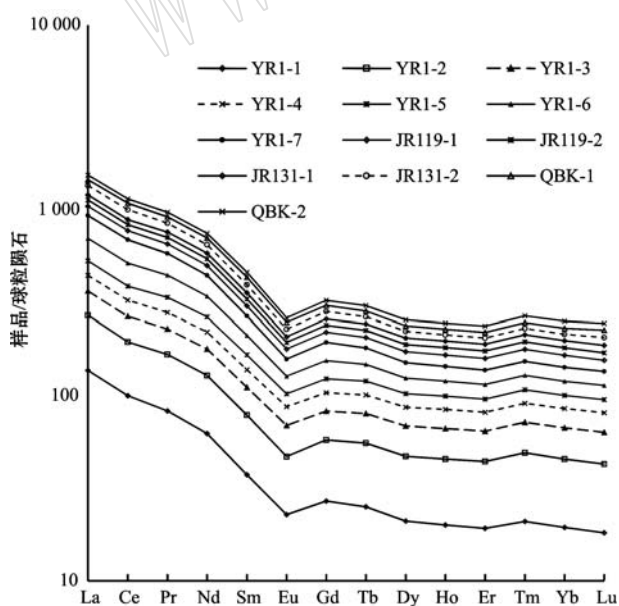


图4 北京地区下马岭组页岩稀土元素平均含量球粒陨石标准化图解(球粒陨石数据据 Boynton, 1984)

Fig. 4 Chondrite-normalized mean REE patterns in Meso-Proterozoic Xiamaling Formation shales from Beijing (after Boynton, 1984)

4 讨论

4.1 源岩特征

微量元素(如 Th、Co、Ni、Sc、Zr 与 Hf)在沉积过程中的稳定性,使其在确定源区成分中得到了普遍应用(Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; Floyd *et al.*, 1991; Shao *et al.*, 2001)。Feng 等(1990)指出高场强元素在长英质岩石中较铁镁质岩石中富集, Y、U、Pb 的富集与 Zr、Hf 的亏损表明源区铁镁质和长英质岩石共存。相容元素更富集于铁镁质岩而不是长英质岩石中。因此, Sc、V、Cu、Ni、Cr、Zn 等元素的富集表明源区具有一定的基性岩。 Th/Sc 和 La/Sc 比值能灵敏地指示沉积物源区岩石的成分特征(Taylor and McLennan, 1985)。长英质岩石中富集 La 和 Th, 铁镁质岩中富集 Co、Sc 和 Cr。从表2知, La/Sc 比值与 Th/Sc 比值分别为

表2 碎屑岩微量元素比值

Table 2 Ratios of trace elements of the clastic rocks

样号	La/Sc	Th/Sc	Th/Co	Th/Cr	Th/U	V/V + Ni
YR1-1	3.61	0.78	0.85	0.17	2.19	0.75
YR1-2	3.40	0.79	0.94	0.22	1.53	0.74
YR1-3	1.41	0.33	0.32	0.10	1.18	0.80
YR1-4	1.18	0.31	0.31	0.09	1.10	0.81
YR1-5	3.42	0.85	1.81	0.20	3.30	0.84
YR1-6	2.32	0.70	0.98	0.19	8.20	0.87
YR1-7	3.89	1.20	0.99	0.25	6.75	0.83
JR119-1	2.50	0.59	0.61	0.13	0.84	0.74
JR119-2	2.48	0.68	1.08	0.16	2.44	0.80
JR131-1	3.14	0.86	1.66	0.22	2.30	0.63
JR131-2	3.45	0.97	0.90	0.19	5.73	0.76
QBK-1	2.08	0.99	3.65	0.18	3.05	0.85
QBK-2	3.17	0.73	6.18	0.21	1.63	0.69
平均值	2.77	0.75	1.56	0.18	3.09	0.78
大陆上地壳	2.7	0.8	1.07	0.31		
大陆下地壳	0.3	0.029	0.03	0.005		

2.77(1.18 ~ 3.89)和0.75(0.31 ~ 1.2),与上地壳的2.7和0.8相似。Th/Co比值变化较大,野外露头样品比值较高(QBK-1 = 3.65、QBK-2 = 6.18),其它样品Th/Co比值较低,略低于上地壳值1.07,远远高出下地壳值0.03。样品Th/Cr比值为0.27(0.08 ~ 1.38),低于上地壳0.31,远远高于下地壳值0.005。Th/Co与Th/Cr比值特征也表明下马岭组具有一定的基性源岩。Th/U比值也是沉积岩中确定物源类型的重要标志(Bhatia, 1983; Bhatia and Taylor, 1981),当Th/U比值介于2.5 ~ 3之间时,其物源主要为岛弧火山岩;Th/U比值约为4.5时,其物源主要为沉积岩,可能有岛弧火山岩混入;当Th/U比值约为6时,可以肯定其物源主要是再旋回沉积岩。下马岭组页岩的Th/U比值在0.84 ~ 8.2之间,平均值为3.09,大部分样品Th/U比值低于4.5,说明其物源主要为岛弧火山岩兼有沉积岩或再旋回沉积岩。

稀土元素在岩石中的稳定性,使其成为判别沉积盆地物源的重要工具(Floyd *et al.*, 1991; McLennan *et al.*, 1993)。源自上地壳的稀土元素具有轻稀土富集、重稀土含量稳定和明显的Eu负异常等特征(McLennan, 1989; McLennan *et al.*, 1995; Shao *et al.*, 2001; Taylor and McLennan, 1985)。下马岭组页岩样品经球粒陨石标准化后,显示与上地壳基本一致的分布模式(图4),轻稀土富集、重稀土平坦和明显Eu负异常的右倾直线型,这说明研究区样品的原始物质应来自上地壳。为进一步揭示源区源岩属性,利用了La/Th-Hf源区判别图解(图5),图5表

明测试样品投点落在长英质物源区或者是聚集在长英质、基性岩混合物源区域中靠近长英质物源区一侧,说明其源岩主要来源于长英质岩,兼有一定的基性岩。这也同下马岭组页岩中 SiO_2 、 Fe_2O_3^T 、 TiO_2 含量较高,轻重稀土分异中等(6.29),明显的Eu负异常、弱Ce负异常、微量元素及其比值特征相吻合。

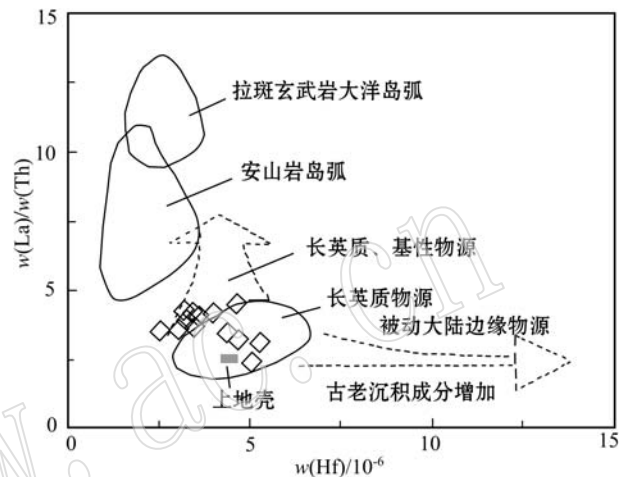


图5 北京地区中元古界下马岭组页岩La/Th-Hf图解
(据Floyd and Leveridge, 1987)

Fig. 5 Scheme of La/Th versus Hf in Meso-Proterozoic Xiamaling Formation shales from Beijing (after Floyd and Leveridge, 1987)

在下马岭组沉积之前,北京周边有两个古隆起,一个是北京东部的山海关古隆起,另一个是北部的内蒙古隆起(崔盛芹等, 1979; 北京市地质矿产局, 1991)(图2)。山海关古隆起太古宙和早元古界基底发育片麻岩和花岗岩,因而遭受了长期的剥蚀,致使其风化程度比较高,这与岩石中仍有一定量的长石不相符(刘清俊等, 2014)。因而物源区不可能来自于东部,而是来自于北部的内蒙古隆起。

经过吕梁运动,华北古大陆最终形成较为稳定、统一的克拉通。但随后在中元古代初又发生了克拉通的伸展-裂解事件,伴随伸展裂解作用,岩浆侵入活动也十分强烈,其主要岩性为闪长岩、花岗闪长岩和黑云母斜长花岗岩等一系列钙碱性岩石组合(张臣, 2004)和一定量的变铁镁质岩(李俊建等, 2010)。中元古代晚期,在内蒙古隆阴山断隆闪长岩、石英闪长岩呈小型岩基或大型岩株产出,基性-超基性岩类零星分布(内蒙古地质矿产局, 1991)。

综合以上信息,认为中元古界下马岭组的原始

物质来自于内蒙古隆起的花岗岩类、闪长岩类岩石和基性岩,花岗岩类与闪长岩类为下马岭组页岩提供了大量的长英类物质,闪长岩类与基性岩为下马岭组页岩提供了铁镁质组分。

4.2 古环境

微量元素 $V/V + Ni$ 比值可以反映沉积介质的氧化还原特性。Hatch 等(1992)指出: $V/V + Ni > 0.46$ 为还原环境, $V/V + Ni < 0.46$ 为氧化环境。研究区内下马岭组页岩的 $V/V + Ni$ 值介于 0.63 ~ 0.87 之间,平均 0.78(表2);均远大于 0.46;表明研究区下马岭组为较强的还原环境,这对有机质的保存十分有利。

δCe 大小可以有效反映沉积时的氧化还原环境与水体的深度。朱笑青等(1994)和杨兴莲等(2008)指出, δCe 越小,水体越深,还原性越强; δCe 越大,水体越浅,氧化性越强。研究区下马岭组页岩

样品的 δCe 介于 0.83 ~ 0.99 之间,平均为 0.90(表1),呈现弱的负异常,反映了覆水较深的还原环境。

综合微量元素与稀土元素分析,研究区下马岭组为有利于有机质保存的覆水较深的较强的还原环境沉积。

4.3 源区构造背景

稀土元素特征常被用来判断现代和古代沉积物构造背景或物源区性质。Bhatia(1985)归纳总结了不同构造背景下砂岩的稀土元素特征值(表3),研究区下马岭组页岩与其进行对比,显示其岩石化学成分与活动大陆边缘和大陆岛弧比较相似。由于在相同的构造背景中,页岩的 ΣREE 比同期沉积的杂砂岩高 20% 左右(Bhatia, 1985),把下马岭组页岩 La 、 Ce 以及 ΣREE 的含量除以 120%,则分别为 30.71×10^{-6} 、 59.55×10^{-6} 、 154.08×10^{-6} ,则显示与大陆岛弧杂砂岩的特征相似。

表3 各种构造背景下砂岩的 REE 参数表(据 Bhatia, 1985)

Table 3 REE geochemical parameters of sandstone in different tectonic settings (after Bhatia, 1985)

构造背景	物源区类型	La	Ce	ΣREE	La/Yb	La_N/Yb_N	δEu
大洋岛弧	未切割的岩浆弧	8 ± 1.7	19 ± 3.7	58 ± 10	4.2 ± 1.3	4.2 ± 1.3	1.01 ± 0.11
大陆岛弧	切割的岩浆弧	27 ± 4.5	59 ± 8.3	146 ± 20	11.0 ± 3.6	7.5 ± 2.5	0.79 ± 0.13
活动大陆边缘	基底隆起	37	78	186	12.5	8.5	0.6
被动大陆边缘	基底隆起	39	85	210	15.9	10.8	0.82
研究区	下马岭组	36.85	71.46	184.89	8.86	6.16	0.67

碎屑岩的微量元素含量变化与构造背景之间有着内在的必然联系,分析研究碎屑岩的化学成分,可以很好地反映物源区的大地构造背景和构造演化特征。微量元素 Cr 、 Co 、 Th 、 Sc 、 La 和 Zr 在沉积环境中保持稳定,可以用来诊断特定的源岩性质和区分构造环境。在 $La - Th - Sc$ (图 6a)构造背景判别图上,数据点落在大陆岛弧范围内。在 $Th - Co - Zr/10$ (图 6b)构造背景判别图上,数据点主要落在大陆岛弧范围内,少量数据点落在活动大陆边缘。在 $Th - Sc - Zr/10$ (图 6c)构造背景判别图上,几乎所有的数据点落在大陆岛弧范围内。微量元素判别图解总体反映了源区为大陆岛弧的构造背景。

赵越等(2010)认为华北克拉通北部在中元古代期间并没有显示典型克拉通的稳定状态,间或有岩浆扰动事件发生。王荃等(1991)和陈琦等(1993)等认为华北板块北缘在中元古代由大陆裂谷发展成被动陆缘,新元古代(包含重新界定下的下马岭组沉积时期)开始转为活动陆缘。潘建国等(2013)认为

1 400 Ma 左右,即蓟县系铁岭组沉积后,华北地块北缘转变为活动大陆边缘,早期洋壳向华北地块低角度的俯冲造成弧后地区发生挤压(芹峪上升),导致铁岭组抬升和剥蚀,而后期洋壳高角度的俯冲又造成弧后区域发生强烈的伸展和断陷,沉积了下马岭组,并伴随辉绿岩的侵入。张臣(2004)认为华北地块北缘中元古代晚期已转入活动大陆边缘火山弧或碰撞造山带环境。前人的这些成果和本文源区构造背景为大陆岛弧相吻合。

5 结论

(1) 地球化学研究表明: Al_2O_3 、 Na_2O 和 CaO 亏损, SiO_2 、 TiO_2 、 $Fe_2O_3^T$ 相对富集。U、V、Cu、Ni、Cr、Zn、Y 等元素较富集, Sc 、 Co 、 Pb 微弱富集, Sr 、 Zr 和 Hf 亏损。稀土元素总量较高,轻稀土富集、重稀土平坦,明显 Eu 负异常、弱 Ce 负异常。

(2) 主量元素、微量元素及稀土元素等分析表明

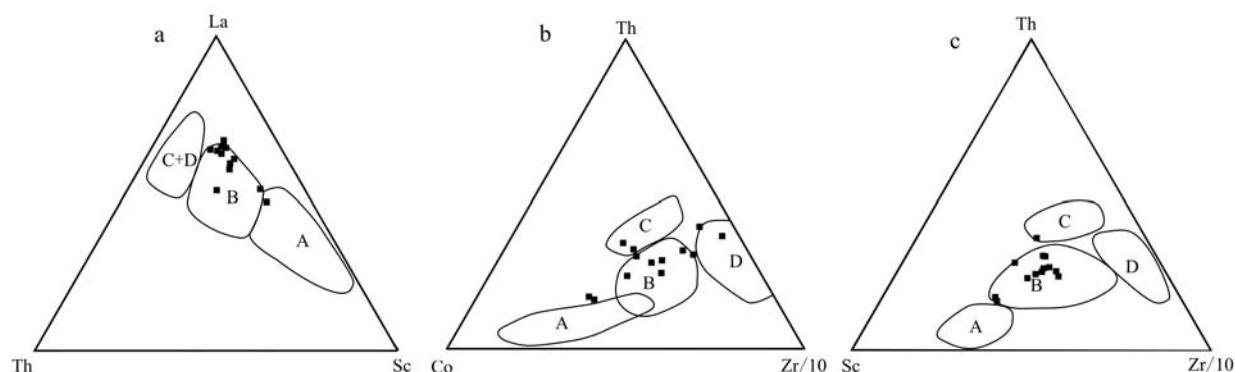


图6 下马岭组页岩 La-Th-Sc(a)、Th-Co-Zr/10(b)和 Th-Sc-Zr/10(c)构造背景判别图解(据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 6 Tectonic setting discrimination plots of La-Th-Sc(a), Th-Co-Zr/10(b) and Th-Sc-Zr/10(c) (after Bhatia and Crook, 1986) of Permian Xiamaling Formation from Beijing

A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘

A—oceanic island arc; B—continental island arc; C—active continental margin; D—passive continental margin

研究区为混合物源,源岩为来自于内蒙古隆起的花岗岩类、闪长岩类及基性岩。

(3) 微量元素 V/V + Ni 比值及 δCe 反映了研究区中元古界下马岭组页岩为覆水较深的还原环境沉积。

(4) 稀土元素、微量元素等分析表明源区构造背景为大陆岛弧。

References

- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *Journal of Geology* 9(6): 611 ~ 627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic greywackes and mudstones: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45: 97 ~ 113.
- Bhatia M R and Crook KAW. 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 92: 181 ~ 193.
- Bhatia M R and Taylor S R. 1981. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: a study from the Tasman Geosyncline Australia [J]. *Chem. Geol.*, 33: 115 ~ 125.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: meteorite studies[A]. *Henderson Ped. Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier, 63 ~ 114.
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Beijing Municipality (BGMNMR). 1991. Regional Geology of Beijing Municipality[M]. Beijing: Geological Publishing Houses, 1 ~ 598(in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Nei Mongol Autonomous Region (BGMNMR). 1991. Regional Geology of Nei Mongol Autonomous Region Municipality[M]. Beijing: Geological Publishing Houses, 1 ~ 725(in Chinese).
- Chen Deqian and Chen Gang. 1996. Applied Rare Earth Element Geochemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1 ~ 268 (in Chinese).
- Chen Jianfa and Sun Shengli. 2004. Preliminary study of geochemical characteristics and formation of organic matter rich stratigraphy of Xiamaling Formation of later Proterozoic in north China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 15(2): 110 ~ 114(in Chinese).
- Chen Qi, Qiu Ganlin, Xue Linfu, et al. 1993. Tectonic evolution of the paleo plate in the south of Inner Mongolia orogenic belt[J]. *Geological Review*, 39(6): 478 ~ 483(in Chinese).
- Cui Shengqin, Yang Zhenheng, Qiu Ganlin, et al. 1979. The evolution of lithofacies paleogeography of yanshan area in Late Proterozoic(Sinian Time)[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 4: 29 ~ 52(in Chinese).
- Cullers R L. 2002. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions and metamorphic studies of shales and limestones near puerblo, Co, USA[J]. *Chemical Geology*, 191: 305 ~ 327.
- Cullers R L and Stone J. 1991. Chemical and mineralogical comparison of the Pennsylvanian Fountain Formation, Colorado, USA an uplifted continental block to sedimentary rocks from other tectonic environments[J]. *Lithos*, 27: 115 ~ 131.
- Fang Jie, Liu Baoquan, Jin Fengming, et al. 2002. Source potential for generating hydrocarbon and exploration prospects of middle-upper

- Proterozoic in the Northern China[J]. *Acta Petroli Sinica*, 23(4): 18~24(in Chinese).
- Feng R and Kerrich R. 1990. Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada: implications for provenance and tectonic settings[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 1 061~1 081.
- Floyd P A and Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, South Cornwall, Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *J. Geol. Soc. London*, 144: 531~542.
- Floyd P A, Shail R, Leveridge B E, *et al.* 1991. Geochemistry and provenance of Rhenohertzian synorogenic sandstones: implications for tectonic environment discrimination[A]. Morton A C, Todd S P and Haughton P D W. *Developments in Sedimentary Provenance Studies* [C]. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 57: 611~626.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Pang Weihua, *et al.* 2011. New geologic time scale of Meso-and Neoproterozoic of China and geochronologic constraint by shrimp zircon U-Pb Dating[J]. *Journal of Stratigraphy*, 35: 1~7(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Zhang Chuansheng, Shi Xiaoying, *et al.* 2007. Zircon shrimp U-Pb dating of the Tuffbed in the Xiamaling Formation of the Qingbaikouan system in North China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26: 249~255(in Chinese with English abstract).
- Graver J I and Scott T J. 1995. Trace elements in shale as indicators of crustal provenance and terraine accretion of the southern Canadian cordillera[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107: 440~453.
- Hatch J R and Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone Wabaunsee County, Kansas, USA[J]. *Chemical Geology*, 99: 65~82.
- Li Huaikun, Lu Songnian, Li Huimin, *et al.* 2009. Zircon and beddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1 396~1 404(in Chinese).
- Li Junjian, Luo Zhenkuan, Yan Changhai, *et al.* 2010. Structure framework and evolution of the North China Craton[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 25(2): 89~100(in Chinese).
- Liu Qingjun, Ke Bailin, Lin Hailiang, *et al.* 2014. Forming conditions and characteristics of shale gas in Mesoproterozoic Xiamaling Formation, Beijing[J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(2): 92~97(in Chinese with English abstract).
- Lu S N, Yang C L, Li H K, *et al.* 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 5: 123~131.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes[A]. Lipin B R and McKay G A. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements* [C]. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 21: 169~200.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, *et al.* 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[A]. Johnson M J and Basu A. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*[C]. *Colorado: Geol. Soc. Am. Spec.*, 284: 21~34.
- McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, *et al.* 1995. Early proterozoic crustal evolution: geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North American[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1 153~1 177.
- McLennan S M, Taylor S R and Hemming S R. 2006. Composition, differentiation, and evolution of continental crust: constraints from sedimentary rocks and heat flow[A]. Brown M and Rushmer T. *Evolution and Differentiation of the Continental crust*[C]. 92~134.
- Pan Jianguo, Qu Yongqiang, Ma Rui, *et al.* 2013. Sedimentary and tectonic evolution of the Meso-Neoproterozoic strata in the Northern Margin of the North China block[J]. *Geological Journal of China University*, 19(1): 109~122(in Chinese with English abstract).
- Peng P, Zhai M G, Ernst R E, *et al.* 2008. 1A 1178 Galargie igneous province in the North China Craton: The Xiongper volcanic province and the North China Dyke Swarm[J]. *Lithos*, 1: 260~280.
- Pettijohn F J. 1975. *Sedimentary Rocks*[M]. 3rd edition. Harper and Row Publishers, New York, 1~628.
- Qiao Xiufu and Gao Mai. 1997. Carbonate Pb-Pb isotopic dating of Qingbaikou System in North China and its significance[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 22(1): 1~7(in Chinese).
- Shao L S, Tattergger K and Carbe Schoenberge C D. 2001. Sandstone petrology and geochemistry of the Turpan Basin(NW China): implications for the tectonic evolution of a continental basin[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 71(1): 37~49.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its composition and evolution*[J]. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 312.
- Wang Jie and Chen Jianfa. 2001. Depositional environment and source potential for generating hydrocarbon of Middle upper Proterozoic in the Northern China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 12(3): 27~33(in Chinese).
- Wang Jie, Chen Jianfa and Dou Qilong. 2004. Evaluation of the hydrocar-

- bon generating potential for the possible hydrocarbon source rocks of the Middle upper Proterozoic in North Huabei area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(2): 206~211(in Chinese).
- Wang Quan, Liu Xueya and Li Jintie. 1991. Plate Tectonics Between Cathaysia and Angaraland in China[M]. Peking University Press(in Chinese with English abstract).
- Yang Xinglian, Zhu Maoyan, Zhao Yunlong, *et al.* 2008. REE geochemical characteristics of the Ediacaran-lower Cambrian black rock series in Eastern Guizhou[J]. *Geological Review*, 54(1): 3~15(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chen. 2004. Hot-Tectonic events and evolution of north margin of the North China Craton in Meso-Neoproterozoic[J]. *Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 40(2): 232~245(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Chen Bin, Zhang Shuanhong, *et al.* 2010. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas[J]. 37(4): 900~915(in Chinese).
- Zhou Hongrui, Mei Mingxiang, Luo Zhiqing, *et al.* 2006. Sedimentary sequence and stratigraphic framework of the Neoproterozoic Qingbaikou system in the Yanshan region, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 280~290(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaoping and Wang Zhonggang. 1994. Geochemical characteristics of seiment at hot water region in the Okinawa Trough [A]. Hu Ruizhong. Study on Geochemistry[C]. Beijing: Seismological Press, 108~112(in Chinese).
- 岩相古地理演化史[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 4: 29~52.
- 方杰, 刘宝泉, 金凤鸣, 等. 2002. 华北北部中-上元古界生烃潜力与勘探前景分析[J]. 石油学报, 23(4): 18~24.
- 高林志, 丁孝忠, 庞维华. 2011. 中国中-新元古代地层年表的修正-锆石 U-Pb 年龄对年代地层的制约[J]. 地层学杂志, 35(1): 1~7.
- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 等. 2007. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质通报, 26(3): 249~255.
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 等. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约[J]. 地质通报, 28(10): 1396~1404.
- 李俊建, 罗镇宽, 燕长海, 等. 2010. 华北陆块的构造格局及其演化[J]. 地质找矿论丛, 25(2): 89~100.
- 刘清俊, 柯柏林, 林海亮, 等. 2014. 北京地区中元古界下马岭组页岩气形成条件[J]. 地质科技情, 33(2): 92~96.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~725.
- 潘建国, 曲永强, 马瑞, 等. 2013. 华北地块北缘中新元古界沉积构造演化[J]. 高校地质学报, 19(1): 109~122.
- 乔秀夫, 高 励. 1997. 中国北方青白口系碳酸盐岩 Pb-Pb 同位素测年及意义[J]. 地球科学, 22(1): 1~7.
- 王 杰, 陈践发, 窦启龙. 2004. 华北北部中-上元古界生烃潜力特征研究[J]. 石油实验地质, 26(2): 206~211.
- 王 杰, 陈践发. 2001. 华北中上元古界烃源岩沉积环境及生烃潜力研究[J]. 天然气地球科学, 12(3): 27~33.
- 王 荃, 刘学亚, 李锦轶. 1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造[M]. 北京: 北京大学出版社.
- 杨兴莲, 朱茂炎, 赵云龙, 等. 2008. 黔东南震旦系-下寒武统黑色页岩系稀土元素地球化学特征[J]. 地质论评, 54(1): 3~15.
- 张 臣. 2004. 华北克拉通北缘中段中新元古代热-构造事件及其演化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 40(2): 232~245.
- 赵 越, 陈 斌, 张栓宏, 等. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. 中国地质, 37(4): 900~915.
- 周洪瑞, 梅冥相, 罗志清, 等. 2006. 燕山地区新元古界青白口系沉积层序与地层格架研究[J]. 地学前缘, 13(6): 280~290.
- 朱笑青, 王中刚. 1994. 冲绳海槽热水区沉积物的地球化学特征[A]. 胡瑞忠. 矿床地球化学研究[C]. 北京: 地震出版社, 108~112.

附中文参考文献

- 北京市地质矿产局. 1991. 北京市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~598.
- 陈德潜, 陈 刚. 1996. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~268.
- 陈践发, 孙省利. 2004. 华北新远古界下马岭组富有机质层段的地球化学特征及成因初探[J]. 天然气地球科学, 15(2): 110~114.
- 陈 琦, 仇甘霖, 薛林福, 等. 1993. 内蒙造山带南部古板块构造演化[J]. 地质论评, 39(6): 478~483.
- 崔盛芹, 杨振升, 仇甘霖, 等. 1979. 燕山地区晚元古代(震旦亚代)