

辽西义县四合屯义县组中部湖相沉积岩 地球化学及物源特征

柯霖^{1,2}, 高山^{1,2}, 潘永信³, 胡兆初^{1,2}

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 辽西北票上园镇四合屯地区义县组沉积层是热河生物群珍稀化石的重要产出层位之一, 其中蕴含丰富的地壳演化和古地理环境演化信息. 分析了四合屯剖面上 12 m 厚的含鸟化石沉积岩层的 50 件样品的微量元素组成和其中 10 件样品的主量元素组成. 结合前人已发表数据, 得出以下认识: (1) 该套沉积岩具有与下伏火山岩类似的地球化学特征: $Mg^\#$ 值较高, 大离子亲石元素含量较高. 稀土元素的分异程度较高, 在微量元素分布蛛网图中表现为明显的 Nb 负异常和 Pb 正异常等. 因此我们认为义县组高镁火山岩构成了该沉积岩的主要源区之一; (2) 样品的 $Eu/Eu^* = 0.48 \sim 1.81$, 其中大部分样品具负 Eu 异常. 正的 Eu 异常 (7 件样品) 主要由于含有长石造成; (3) 通过微量元素 Th-Co-Zr/10 沉积构造环境判别图解对区域构造环境进行分析, 结果表明该沉积岩物源区具有大陆岛弧和活动大陆边缘物源特征.

关键词: 四合屯; 中生代; 沉积岩; 微量元素组成.

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2008)04-0504-11

收稿日期: 2007-10-29

Geochemistry and Provenance of the Early Cretaceous Lacustrine Clastic Sedimentary Rocks of Yixian Formation from the Sihetun Section, West Liaoning

KE Lin^{1,2}, GAO Shan^{1,2}, PAN Yong-xin³, HU Zhao-chu^{1,2}

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: A wide range of well-preserved Jehol biota fossils have been found in the sedimentary rocks of the Yixian Formation from the Sihetun area in West Liaoning Province. We have analyzed major and trace element compositions of fifty samples of clastic sedimentary rocks from this section. Combined with data previously publicized by others, the conclusions are as follows; firstly, this set of sedimentary rocks share similar chemical characteristics to the associated volcanic rocks, with LREE enrichment, flat HREE, high- $Mg^\#$, high contents of large ion lithophile element (LILE) and variable REE anomalies. Their spider diagrams show significant negative Nb and positive Pb anomalies. It is deduced that the sedimentary rocks were mainly derived from the high- $Mg^\#$ volcanic rocks from the Yixian Formation. Secondly, these sedimentary rocks show variable Eu anomalies ($Eu/Eu^* = 0.48 \sim 1.81$) with the average value being 0.75. The positive anomaly is due to presence of plagioclase. Moreover, tectonic discrimination diagram of Th-Co-Zr/10 suggests that these sedimentary rocks were formed in a tectonic setting similar to the continental island arc and active continental margin.

Key words: Sihetun; Mesozoic; sedimentary rock; trace element composition.

基金项目: 教育部创新团队研究计划项目 (IRT0441); 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目 (No. 40521001); 高等学校学科创新引智计划项目 (B07039).

作者简介: 柯霖 (1982-), 女, 现正攻读地球化学专业硕士学位. E-mail: kelin916@sina.com

辽西地区早白垩世义县组由于含有大量长羽毛或毛状皮肤衍生物的恐龙和早期鸟类等珍稀热河动物化石而备受世界注目(Hou *et al.*, 1995; Chen *et al.*, 1998; Ji *et al.*, 1999; 季强等, 2004). 近 20 多年来, 很多学者对该区古地理环境、地层学、火山岩的岩石系列、演化、地球化学特征及岩浆起源等问题进行了深入广泛研究, 取得了重要的研究成果(陈义贤等, 1997; 彭艳东等, 2004; 张立东等, 2004; 张宏和张旗, 2005; 王晓蕊等, 2005; 邵济安等, 2006).

前人对相关火山岩及火山碎屑岩进行了详细的同位素定年, 结果表明四合屯地区义县组形成时代为早白垩世中期, 其中珍稀化石沉积层中凝灰岩的同位素年龄 120~125 Ma(罗清华等, 1999; Swisher *et al.*, 1999, 2001; 潘永信等, 2001; 王松山等, 2001a, 2001b; 彭艳东等, 2003; 陈文等, 2005). 同时认为这些生物的出现和化石的保存, 与在晚侏罗世晚期至白垩纪早—中期滨太平洋构造域东部地区强烈的构造—岩浆活动有密切的关系(郭正府等, 2003; 张立军和巩恩普, 2003).

北票地区的金岭寺—羊山盆地(金羊盆地)作为辽西地区最大、发育最为完整的中生代陆内盆地, 沉积了巨厚的中生代地层, 包含了辽西地区大量的中生代构造岩浆活动信息, 成为探讨辽西构造格局形成及燕—辽造山带地球动力学背景的重要窗口. 前人对义县组火山岩已有较多研究(季强等, 2004; 王晓蕊等, 2005; 张宏和张旗, 2005), 但是对义县组沉积岩的地球化学研究相对较少(丁秋红等, 2003; 刘艳青等, 2006). 对于该套沉积岩的地球化学研究不仅可提供有关构造背景的信息, 而且有可能进一步为所包含的珍稀生物群的形成环境提供重要制约.

本文通过四合屯剖面义县组中部含珍稀化石的湖相沉积岩主量和微量元素地球化学系统研究, 探讨其物质来源和形成的构造环境.

1 地质背景和样品来源

辽西地区北部以赤峰—开原断裂为界, 与内蒙古—兴安造山带和松辽盆地相邻, 向西与东西向延

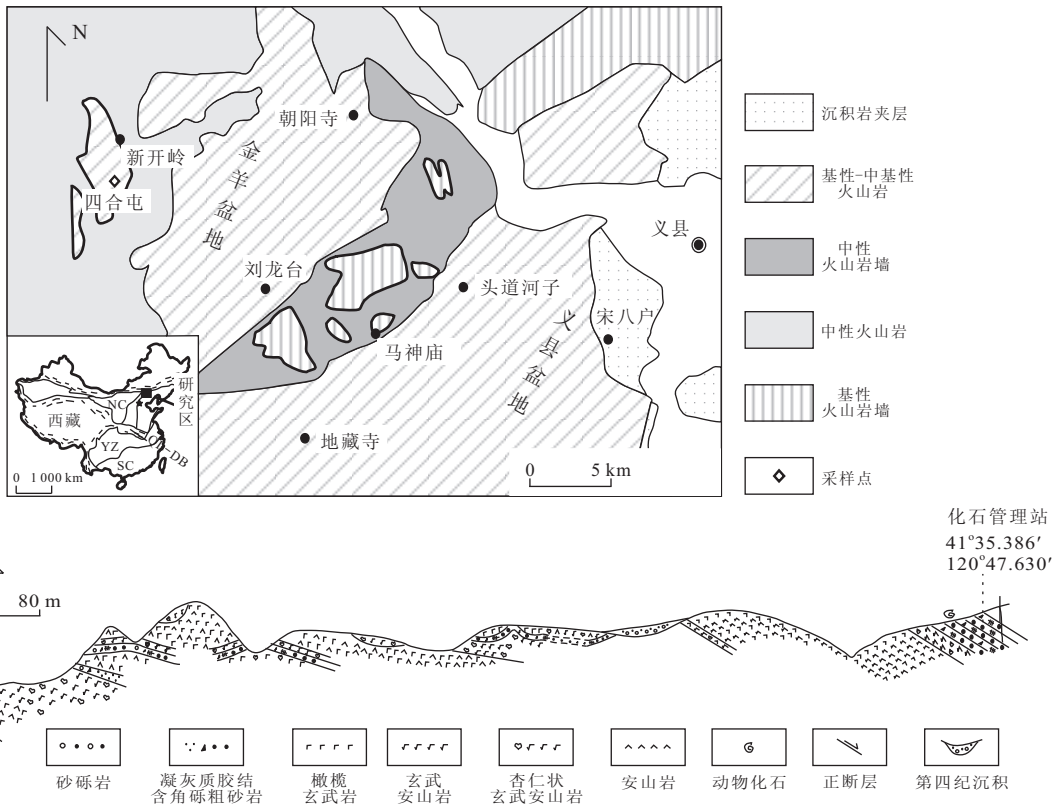


图 1 辽西四合屯地区区域地质简图及义县组剖面图(据王晓蕊等, 2005 修改)

Fig. 1 Geological sketch map and section of the Yixian Formation in Sihetun area, West Liaoning Province
NC. 华北克拉通; QL-DB. 秦岭—大别造山带; SC. 华南克拉通; YC. 扬子克拉通

表 1 样品描述
Table 1 Description of samples

深度(cm)	样品	样品描述
710	S53	凝灰质粉砂岩
715.5	S55	灰白色黏土
903	P63	页岩与粉砂岩互层
1 036	P90	黄褐色凝灰质细砂岩
1 067	P99	黄褐色凝灰质细砂岩
1 142	P120	灰色粉砂岩
1 176	P130	黄褐色凝灰质细砂岩, 风化强烈
662	S35	灰白色细砂岩
778	P13	深灰/黄/白色纹层
51	K09	灰色页岩
116	K33	灰色泥岩, 水平层理发育
225	G22	浅灰色页岩
246	G31	浅灰色泥岩
296	F6	黄色凝灰质砂岩
299	F7	灰白色页岩
346	F23	深灰色页岩
361	F29	褐黄色粉砂岩, 风化强烈
364	F30	灰色页岩, 水平层理发育
394	F41	灰色页岩, 水平层理发育
443	T14	化石层
496	T30	浅灰黄色泥岩
558	T54	灰色泥岩, 水平层理发育
584	S2	为浅黄火山灰
590	S4	深灰色粘土
598.5	S10	灰白色泥岩
657	S33	浅灰白色粘土质粉砂
661	S34	深灰色泥岩
663.5	S36	灰色泥岩
711.5	S54	灰色泥岩
823	P34	灰黑色页岩
846	P43	浅紫色细砂岩, 见塑性变形小构造
908	P64	灰色页岩, 页理发育, 夹薄层火山灰
913	P65	灰色页岩, 页理发育, 夹薄层火山灰
915	P66	黄褐色粉砂岩, 夹灰白色细砂岩小透镜体
921	P68-1	鸟板, 深灰色页岩
922	P68-2	鸟板, 深灰色页岩
926	P69-1	深灰色斑状页岩
929	P69-2	深灰色斑状页岩
932	P70	深灰色斑状页岩
947	P74-1	凝灰质粉砂质页岩
1 014	P86	黑褐色粉砂质泥岩, 夹数层薄层白色(火山灰?)
1 043	P92	深灰色页岩, 含动物化石
1 092	P105	灰色/灰白色粉砂质泥岩
1 118	P112	浅灰色粉砂岩
1 123	P114	灰色泥质粉砂岩
1 138	P119	灰色粉砂岩
1 180	P131	深灰色粉砂岩夹一薄层灰褐色粉砂岩
1 197	P138	深灰色薄层状粉砂岩和粉砂质泥岩, 含化石
1 200	P139	灰褐色泥岩, 风化后为褐黄色

块、辽东隆起带及内蒙古—兴安造山带三者的过渡地带, 具有稳定型陆块与活动造山带之间的过渡型特征(陈义贤等, 1997; 王根厚等, 2001; 肖高强等, 2008)。区内出露义县组主体为基性、中基性火山岩及火山碎屑岩, 局部发育富含“热河生物群”化石的沉积层。

四合屯剖面位于辽西北票中生代陆相火山沉积盆地——金羊盆地的中部(图 1)。本文样品来自位于化石管理站的义县组中上部含化石的湖相沉积岩, 出露厚度约 12 m。其上覆地层为灰黄褐色杏仁状玄武安山岩及灰黑色玄武岩。该沉积层形成于义县组火山活动间歇期(陈树旺等, 2001; 郭正府和汪筱林, 2002; 丁秋红等, 2003; 王五力等, 2004; 张宏和王五力, 2004; 张立军等, 2005), 主要为浅灰白—深灰色薄层细砂岩、泥灰岩, 浅灰绿含钙质片状泥岩、页岩夹黄褐色薄层凝灰质砂岩、粉砂岩, 上部含有的主要化石类型是叶肢介, 下部含的化石种类更多, 包括哺乳动物、鸟类、鱼类和昆虫等等(王五力等, 2004)。本研究在此剖面由上到下连续取样, 选出 50 个样品进行测试(表 1)。这些样品已由朱日祥等人做了详细的地磁研究(Zhu *et al.*, 2007)。

2 分析方法

我们分析了全部 50 件代表性样品的微量元素含量, 并对其中 10 件样品进行了主量元素分析。用于主量和微量元素分析的样品用玛瑙研钵手工碎至 200 目。元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。主量元素分析采用 XRF (RIGAKU 2100 型) 玻璃熔片法完成。微量元素采用 ICP-MS (Perkin Elmer 公司具动态反应池的 Elan 6100 DRC) 法完成。样品溶解采用 1.5 mL HNO₃ + 1.0 mL HF + 0.05 mL HClO₄ 混合酸在 Teflon 高压溶样弹 (bomb) 中进行。对国际标准参考物质 BHVO-1(玄武岩)、BCR-2(玄武岩)、G-2(花岗岩) 和 AGV-1(安山岩) 以及重复样的分析结果表明, 主量元素分析精度和准确度优于 5%, 微量元素分析的精度和准确度一般优于 10%。研究样品的主量、微量元素分析结果分别见表 2 和表 3。

本文 Ce 异常值和 Eu 异常值分别采用下列公式计算: $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$, $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$, 其中 N 代表球粒陨石标准化值, 球粒陨石标准化数据采用 Sun and McDonough

伸的燕山造山带相连, 东部以依兰—伊通断裂带为界与辽东隆起带相隔。所处的构造部位属于华北陆

表 2 辽西四合屯地区义县组沉积岩样品主量元素含量(%)

Table 2 Major element compositions of sedimentary rocks from Yixian Formation in Sihetun area (%)

样品	G31		SHT-11		S2		P13		P63		P66		P90		P114		P119	
	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂
SiO ₂	48.27	57.40	67.00	71.24	53.06	61.73	61.55	67.92	57.96	61.86	62.70	68.45	56.35	60.70	70.22	75.70	66.96	72.08
TiO ₂	0.41	0.49	0.44	0.47	0.18	0.21	0.28	0.31	0.30	0.32	0.38	0.41	1.17	1.26	0.50	0.54	0.55	0.59
Al ₂ O ₃	9.33	11.10	13.07	13.90	14.00	16.29	13.68	15.10	14.16	15.11	10.84	11.83	18.09	19.49	10.16	10.95	11.21	12.07
TFe ₂ O ₃	2.62	3.12	2.13	2.26	3.29	3.83	4.33	4.78	8.69	9.28	6.74	7.36	4.49	4.84	3.52	3.79	4.34	4.67
MnO	0.18	0.21	0.01	0.01	0.10	0.12	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.13	0.14	0.02	0.02	0.03	0.03
MgO	2.49	2.96	1.65	1.75	4.28	4.98	2.94	3.24	4.17	4.45	2.79	3.05	1.42	1.53	1.79	1.93	1.91	2.06
CaO	16.44	19.55	1.75	1.86	8.60	10.00	2.70	2.98	2.13	2.27	2.91	3.18	5.27	5.68	1.51	1.63	1.92	2.07
Na ₂ O	0.73	0.87	2.06	2.19	0.93	1.08	1.49	1.64	2.33	2.49	1.42	1.55	2.26	2.43	0.97	1.05	1.07	1.15
K ₂ O	3.23	3.84	5.59	5.94	1.48	1.72	3.47	3.83	3.73	3.98	3.02	3.30	3.12	3.36	3.69	3.98	4.34	4.67
P ₂ O ₅	0.39	0.46	0.35	0.37	0.04	0.05	0.16	0.18	0.19	0.20	0.75	0.82	0.54	0.58	0.38	0.41	0.57	0.61
LOI	16.39	0.00	4.61	0.00	13.64	0.00	8.92	0.00	6.49	0.00	8.06	0.00	6.67	0.00	6.79	0.00	6.62	0.00
Total	100.48	100	98.66	100	99.60	100	99.54	100	100.18	100	99.66	100	99.51	100	99.55	100	99.55	100
Mg [#]		65.53		60.77		72.24		57.59		48.97		45.29		38.74		50.42		46.81
K ₂ O/Na ₂ O		4.42		2.71		1.59		2.33		1.60		2.13		1.38		3.80		4.06
Na ₂ O+K ₂ O		4.71		8.13		2.80		5.47		6.47		4.85		5.79		5.03		5.82

注: P₁ 为原始值; P₂ 为归一化值. SHT-11 引自王晓蕊等(2005).

(1989)的推荐值.

3 地球化学特征

3.1 主量元素

所研究样品的 SiO₂ = 57.40% ~ 75.70%, Al₂O₃ = 11.10% ~ 19.49%, Na₂O = 0.87% ~ 2.49%, K₂O/Na₂O = 1.14 ~ 4.42, MgO = 1.53% ~ 4.98%, Mg[#] 较高, 为 39 ~ 72, 均值 54. 不同样品之间的主量元素含量变化较大. 部分样品因为长石、粘土等富铝矿物的富集, Al₂O₃ 含量较高. 个别样品 CaO 含量较高系碳酸盐含量较高引起.

3.2 稀土元素

由稀土元素球粒陨石标准化曲线图(图 2)可以看出, 虽然所研究样品的稀土元素含量有较大变化范围, 但所有样品都具有轻稀土元素明显富集, 轻稀土与重稀土元素分异明显(La_N/Yb_N = 7 ~ 50, 均值为 15.6)的特征. 稀土元素总量分布不均, 平均含量为 128 × 10⁻⁶. 剖面中间偏下层位的样品 REE 总含量最低, 向顶部和底部有逐渐增加的趋势.

按照 Eu 异常值, 可将样品分为具 Eu 正异常(Eu/Eu* > 1.05)(图 2a, 2b), 不具 Eu 异常(Eu/Eu* = 0.95 ~ 1.05)(图 2c, 2d)和具 Eu 负异常(Eu/Eu* < 0.95)(图 2e, 2f)三组.

3.3 微量元素

由微量元素分布蛛网图(图 2)可以看出, 所有

样品的微量元素组成特征和含量变化趋势基本一致, 富集 Cs、Rb、Th、U、Ba 等大离子亲石元素, 且具 Nb、Ta 负异常和明显的 Pb 正异常; Sr 整体含量较高(Sr = 169 × 10⁻⁶ ~ 2 000 × 10⁻⁶, 均值 498 × 10⁻⁶), 高场强元素 Zr、Hf 具有弱的正异常.

4 讨论

4.1 沉积物质来源

细粒碎屑沉积岩(页岩、泥岩、粉砂岩)是出露地表的大陆上地壳岩石的天然混合样品(Taylor and McLennan, 1985, 1995). Taylor and McLennan(1995)指出由于 REE、Y、Th、Sc、Co 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作用的影响, 因此它们在细粒碎屑沉积岩中的含量定量指示了其在源区的含量. Th 和 La 倾向于长英质岩石中富集, 而 Sc 和 Co 则倾向于铁镁质岩石中富集, 所以这两类元素的比值对碎屑沉积岩源区岩石组成具有指示意义.

四合屯位于金岭寺—羊山盆地, 多期火山作用致使在盆地内的凹陷部位充填了爆发相、溢流相火山岩. 研究区新开岭至化石观察站剖面出露大量义县组火山岩, 是义县组珍稀化石层(尖山沟层)之下火山岩最发育、最完整的地区之一(王晓蕊等, 2005). 本研究发现, 含珍稀化石的湖相沉积薄层页

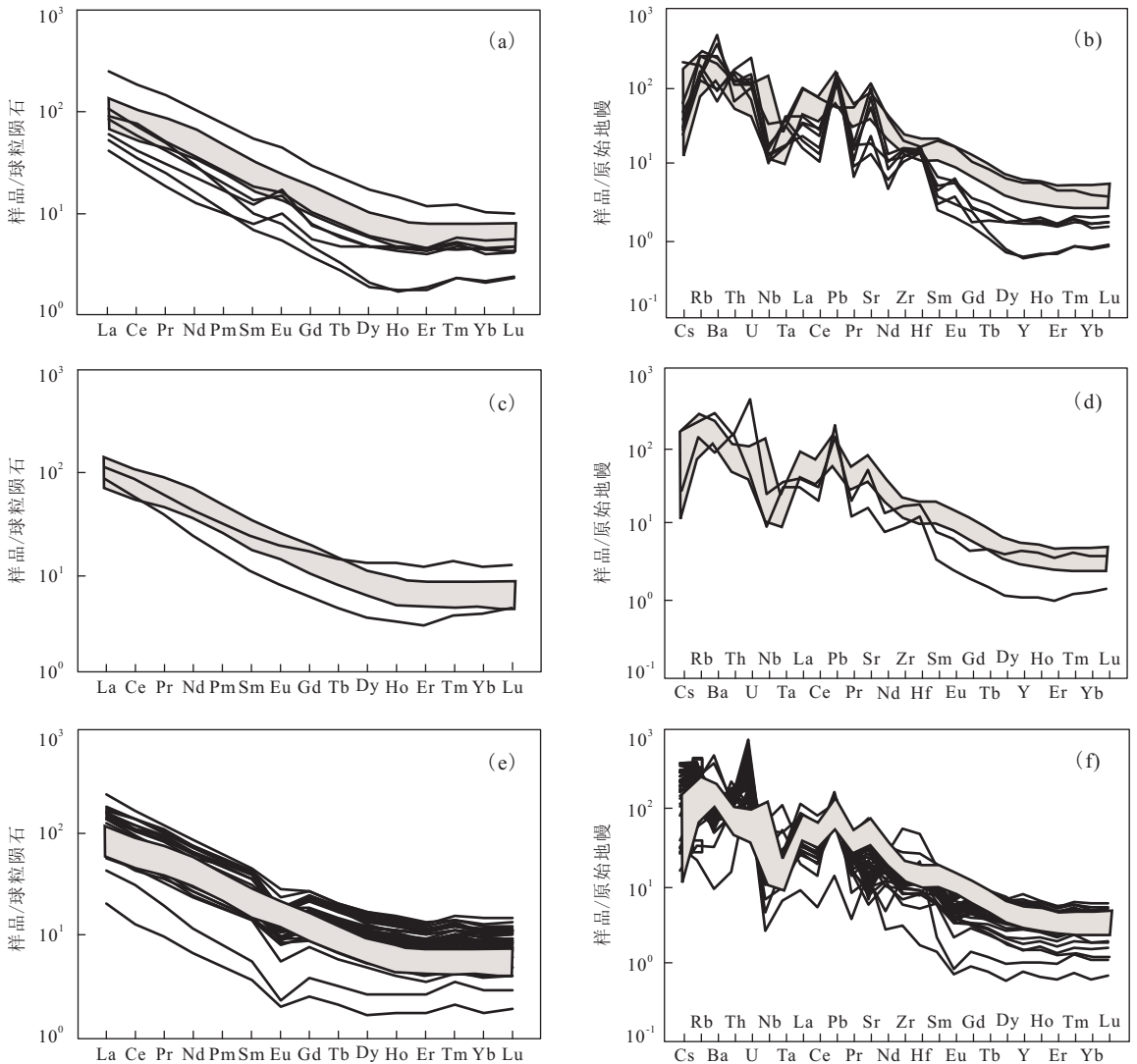


图 2 四合屯义县组沉积岩样品稀土元素模式分配图和微量元素分布蛛网图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns (a, c, e) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b, d, f) of Sihetun sedimentary rocks

a, b 为 Eu 正异常 ($Eu/Eu^* > 1.05$) 组样品; c, d 为无 Eu 异常 ($Eu/Eu^* = 0.95 \sim 1.05$) 组样品; e, f 为 Eu 负异常 ($Eu/Eu^* < 0.95$) 组样品; 阴影部分为四合屯义县组安山岩数据 (王晓蕊等, 2005)

岩、泥岩、粉砂岩具有与澳大利亚后太古宙页岩 (PAAS)、北美页岩和全球平均大陆上地壳一致的稀土分配模式 (Taylor and McLennan, 1985), 总体上表现为轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损以及负 Eu 异常的特征。

与下伏安山岩 (王晓蕊等, 2005) 相比, 除具有较明显的 Eu 负异常外, REE 模式基本一致。与 PAAS ($Mg^\# = 38$)、中国东部后太古宙平均页岩 ($Mg^\# = 30$) 和华北克拉通后太古宙平均页岩 ($Mg^\# = 38$) (Gao *et al.*, 1998) 相比, 该套沉积岩样品的 $Mg^\#$ (平均 = 54) 偏高, 与义县组安山岩更相近 ($Mg^\# =$

63) (图 2), 这说明义县组安山岩应是湖相沉积岩的主要物源。而该套沉积岩样品的 Eu、Sr 和 Ti 含量比义县组火山岩低, 这可能是因为火山岩在风化、剥蚀和搬运过程中, 一方面斜长石优先风化, 另一方面磁铁矿等副矿物富集在碎屑岩中形成。湖相沉积岩中发育有多个凝灰岩夹层 (潘永信等, 2001; 季强等, 2004), 也支持火山物质是湖相沉积物主要物质来源的说法。同时, 在四合屯剖面湖相沉积岩中, 可见次火山岩穿侵于湖相地层之中, 顶部为灰黑色橄榄安山岩压盖, 该期火山作用对化石沉积层产生了强烈的破坏作用。

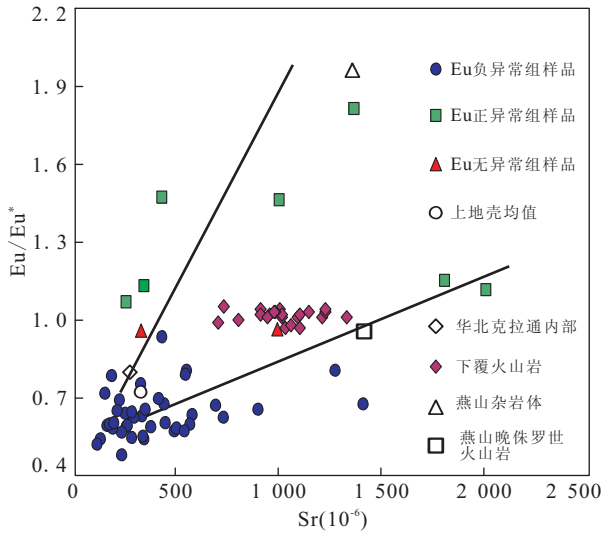


图 3 辽西四合屯义县组沉积岩 Sr 与 Eu/Eu^* 相关图及其与前人资料的对比

Fig. 3 Sr versus Eu/Eu^* plot for Sihetun sedimentary rocks 上地壳均值和华北克拉通内部数据来源于 Gao *et al.* (1998); 义县组火山岩数据来自王晓蕊等(2005); 燕山杂岩体数据来自苏尚国等(2006); 燕山晚侏罗世火山岩数据来自李晓勇等(2006)

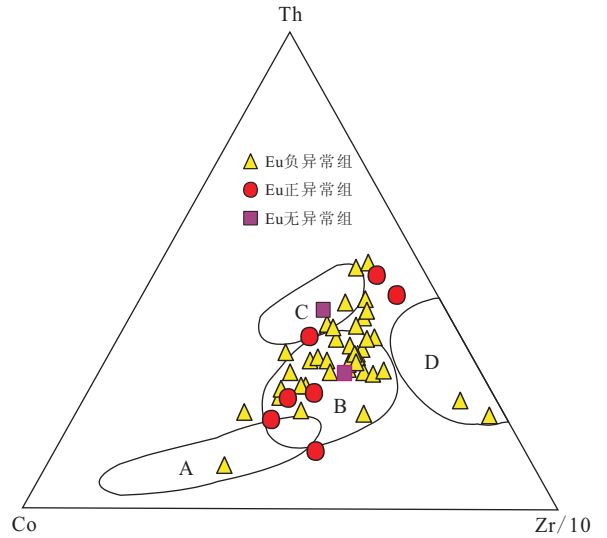


图 5 辽西四合屯义县组沉积岩 Th-Co-Zr/10 判别图解 (Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 5 Tectonic discrimination diagram of Th-Co-Zr/10 for Sihetun sedimentary rocks
A. 大洋岛弧(OIA); B. 大陆岛弧(CIA); C. 活动大陆边缘(ACM); D. 被动大陆边缘(PM)

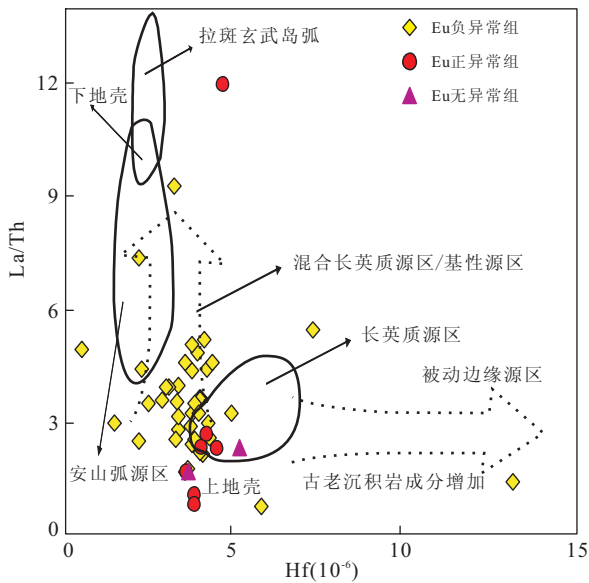


图 4 辽西四合屯义县组沉积岩 La/Th-Hf 源区判别图解 (Gu *et al.*, 2002)

Fig. 4 La/Th-Hf discrimination diagram of source rocks for Sihetun sedimentary rocks

本文研究的部分样品具有明显的 Eu 正异常, 说明其源岩成分可能较复杂。图 3 显示了本文研究样品以及前人研究样品中 Sr 与 Eu/Eu^* 的相关关系。可以看出, 具有明显 Eu 正异常的样品的 Sr 含

量相对较高。由于 Sr、Eu 在斜长石中的分配系数远远高于其他矿物(赵振华, 1997), 说明源区可能存在富斜长石的岩石, 造成 Eu 的正异常可能是继承了物源的特征, 而物源很可能来自附近地区的岩浆岩, 如燕山地区部分岩浆杂岩具有正的 Eu 异常($Eu/Eu^* = 1.96$)(苏尚国等, 2006)。在 La/Th-Hf 源区属性判别图解上(Gu *et al.*, 2002), 大多数样品落入长英质源区和混合长英质及基性源区(图 4)。

4.2 沉积构造背景探讨

由于地壳的岩石组成部分取决于所处的构造环境, 因此对细粒碎屑岩的研究可以反映物源区的大地构造背景和构造演化特征。Bhatia and Crook (1986)研究了东澳大利亚已知物源区构造环境的古生代泥岩及杂砂岩, 发现其稀土和微量元素含量与源区类型和构造背景之间存在对应关系, 并给出不同构造环境下的沉积岩稀土元素特征和微量元素 Th-Co-Zr/10 三元判别图解。

图 5 是研究沉积岩样品的 Th-Co-Zr/10 构造环境判别图。由图 5 可知, 研究区沉积岩的投点分布较零散, 可能是复杂构造背景的反映。在 Th-Co-Zr/10 图解中, 大部分样品集中在大陆岛弧区和活动大陆边缘区域。这也符合前人对辽西地区早白垩世沉积岩的构造背景的分析。在此期间辽西地区的构造环

境一方面具有华北地台稳定、次稳定的特征,另一方面还具有在太平洋构造域的影响下的大陆边缘活动带、岛弧的特征,表现出多种构造背景的叠加(刘艳青等,2006)。

5 结论

本文通过研究辽西四合屯义县组含珍稀化石的碎屑沉积岩的地球化学组成表明,该套碎屑沉积岩除 Eu 异常外,与义县组安山岩稀土元素分布模式一致,并具有高 Mg[#],富集大离子亲石元素,轻重稀土元素明显分异的地球化学特征。在微量元素分布蛛网图中表现为明显的 Nb 负异常和 Pb 正异常,推测该套碎屑沉积岩的物源主要来自下伏火山岩,其次来自附近的火山物质的风化。正的 Eu 异常表明沉积物源可能来自燕山地区岩浆杂岩。在碎屑沉积岩构造环境判别图上,样品的投点分布较零散,大部分样品分布在活动大陆岛弧和大陆边缘广泛的区域内,反映了早白垩世辽西地区较复杂的构造背景。

致谢:样品分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室和中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。期间得到了王建其、袁洪林、刘晔、柳小明、戴梦宁、宗春雷等人的帮助,同时也非常感谢与王晓蕊、张锦丽、肖高强等的有益交流。

References

- Bhatia, M. R., Crook, K. A., 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181—193.
- Chen, P. J., Dong, Z. M., Zhen, S. N., 1998. An exceptionally well preserved dinosaur from the Yixian Formation of China. *Nature*, 391: 147—152.
- Chen, S. W., Zhang, L. D., Guo, S. Z., et al., 2001. Discovery of sedimentary tuff beds in basic and intermediate-basic volcanic rocks of Yixian F. in West Liaoning Province and its significance. *Liaoning Geology*, 18(1): 52—57 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W., Zhang, Y., Ji, Q., et al., 2005. Age of the valuable fossiliferous beds of the Sihetun Village—New evidence of Ar/Ar and SHRIMP U/Pb dating. *Journal of Stratigraphy*, 29(Suppl.): 582—588 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. X., Chen, W. J., et al., 1997. Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning Province and surrounding area—Geochronology, geochemistry and tectonic environment. Seis. Publ. House, Beijing, 1—279 (in Chinese).
- Ding, Q. H., Jin, C. Z., Zhang, L. D., et al., 2003. Sedimentary environment and geochemical anomaly on the bird fossil-bearing beds in Sihetun area. *Geology and Resources*, 12(3): 139—145 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., et al., 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1959—1975.
- Gu, X. X., Liu, J. M., Zheng, M. H., et al., 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72: 393—407.
- Guo, Z. F., Liu, J. Q., Wang, X. L., 2003. Mass mortalities, rapid radiation and its reason of the Jehol vertebrate fauna in western Liaoning, China. *Progress in Natural Science*, 13(6): 604—614 (in Chinese).
- Guo, Z. F., Wang, X. L., 2002. A study on the relationship between volcanic activities and mass mortalities of the Jehol vertebrate fauna from Sihetun, western Liaoning, China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 117—125 (in Chinese with English abstract).
- Hou, L. H., Zhou, Z. H., Martin, L. D., et al., 1995. A beaked bird from the Jurassic of China. *Nature*, 377: 616—618.
- Ji, Q., Luo, Z. X., Ji, S. A., 1999. A Chinese triconodont mammal and mosaic evolution of the mammalian skeleton. *Nature*, 398: 326—330.
- Ji, Q., Chen, W., Wang, W. L., et al., 2004. Mesozoic Jehol biota from the western Liaoning, China. Geological Publishing House, Beijing, 1—375 (in Chinese).
- Li, X. Y., Li, C. W., Fan, L. Y., 2006. Geochemistry of Mesozoic mafic-intermediate volcanic rocks and its constraints on lithospheric characteristics. *Geological Journal of China Universities*, 12(3): 319—327 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., Yang, Z. F., Lai, M. S., 2006. Geochemical characteristics of REE and trace elements of Mesozoic sedimentary rocks and its tectonic setting in western Liaoning. *Geological Review*, 52(4): 450—458 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Q. H., Chen, P. J., Zou, D. Y., et al., 1999. Age of Sinosauropteryx and Confuciusornis —⁴⁰Ar/³⁹Ar laser

- single-grain and K-Ar dating of the Yixian Formation, NE China. *Geochimica*, 28(4): 405—409 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. X., Zhu, R. X., Shaw, J., et al., 2001. Palaeomagnetic dating constraints on the age of deposition of the Sihetun fossil-bearing lake sediments, Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 46(8): 680—684 (in Chinese).
- Peng, Y. D., Zhang, L. D., Zhang, C. J., et al., 2004. Petrochemistry of volcanic rocks of the Yixian volcanic cycle in the Beipiao-Yixian area, western Liaoning. *Geology in China*, 31(4): 356—364 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Y. D., Zhang, L. D., Chen, W., et al., 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar dating of the Yixian Formation volcanic rocks, western Liaoning Province, China. *Geochimica*, 32(5): 427—435 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Chen, F. K., Lu, F. X., et al., 2006. Mesozoic pulsative upwelling diapirs of asthenosphere in West Liaoning Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 807—816 (in Chinese with English abstract).
- Su, S. G., Deng, J. F., Zhao, G. C., et al., 2006. Characteristics, origin and resource property of Xuejiashiliang complex, Beijing area and their relationship with the way of lithospheric thinning. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 148—157 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins. Geological Society Special Publications*, 42: 313—345.
- Swisher, C. C. III., Wang, Y. Q., Wang, X. L., et al., 1999. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 400: 58—61.
- Swisher, C. C. III., Wang, X. L., Zhou, Z. Q., et al., 2001. New evidence of isotope dating of the Yixian Formation and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Tuchengzi Formation. *Chinese Science Bulletin*, 46(23): 2009—2012 (in Chinese).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241—265.
- Wang, G. H., Zhang, C. H., Wang, G. S., et al., 2001. Tectonic framework of western Liaoning Province and its evolution during Mesozoic. *Geoscience*, 15(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. S., Wang, Y. Q., Hu, H. G., et al., 2001a. Geologic age of Sihetun vertebrate assemblage in western Liaoning, China: Evidence from U-Pb dating in zircon. *Chinese Science Bulletin*, 46(4): 330—333 (in Chinese).
- Wang, S. S., Hu, H. G., Li, P. X., et al., 2001b. Further discussion on the geologic age of Sihetun vertebrate assemblage in western Liaoning, China: Evidence from Ar-Ar dating. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 663—668 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. R., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2005. Geochemistry of high-Mg andesites from the Early Cretaceous Yixian Formation, western Liaoning: Implications for lower crustal delamination and Sr/Y variations. *Science in China (Series D)*, 35(8): 700—709 (in Chinese).
- Wang, W. L., Zhang, H., Zhang, L. J., et al., 2004. Standard section of Tuchengzi Stage and Yixian Stage and their stratigraphy, palaeontology and tectonic-volcanic actions. Geological Publishing House, Beijing, 114—116 (in Chinese).
- Xiao, G. Q., Gao, S., Huang, H., et al., 2008. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from Dasijiazhi area at Zhangwu, West Liaoning Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(2): 151—164 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Wang, W. L., Li, Y. T., 2004. Comprehensive correlation of the Yixian Formation in the Beipiao and Yixian areas, western Liaoning. *Geological Bulletin of China*, 23(8): 766—777 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Zhang, Q., 2005. Rare earth, trace element characteristics of high-Mg volcanic rocks of Yixian Formation in Sihetun, West Liaoning Province and its apocalypse. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 23(6): 736—741 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. D., Guo, S. Z., Zhang, C. J., et al., 2004. Volcanic structures in Beipiao-Yixian area and their relationship to fossil-bearing beds of Yixian Formation. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(6): 639—646 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. J., Gong, E. P., 2003. Discussion and analysis on the cause of bird mass mortality in the Sihetun area of Beipiao, Liaoning, in the Early Cretaceous. *Geological Review*, 49(4): 347—354 (in Chinese with English abstract).

stract).

Zhang, L. J., Gong, E. P., Xu, D. L., et al., 2005. Sedimentary facies of the Yixian Formation of Lower Cretaceous in Sihetun basin of Beipiao, Liaoning Province. *Journal of Palaeogeography*, 7(1): 70–78 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Z. H., 1997. The principle of trace elements geochemistry. Science Press, Beijing, 1–238 (in Chinese).

Zhu, R. X., Pan, Y. X., Shi, R. P., et al., 2007. Palaeomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating constraints on the age of the Jehol biota and the duration of deposition of the Sihetun fossil-bearing lake sediments, Northeast China. *Cretaceous Research*, 28: 171–176.

附中文参考文献

Swisher, C. C. III., 汪筱林, 周忠和, 等, 2001. 义县组同位素年代新证据及土城子组 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定. *科学通报*, 46(23): 2009–2012.

陈树旺, 张立东, 郭胜哲, 等, 2001. 辽西义县组基性、中基性火山岩内凝灰岩层的发现及其意义. *辽宁地质*, 18(1): 52–57.

陈文, 张彦, 季强, 等, 2005. 四合屯珍稀化石层的时代——Ar/Ar 和 SHRIMP U/Pb 年龄新证据. *地层学杂志*, 29(增刊): 582–588.

陈义贤, 陈文寄, 等, 1997. 辽西及邻区中生代火山岩年代学地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1–279.

丁秋红, 金成洙, 张立东, 等, 2003. 四合屯含鸟化石层地球化学异常及沉积环境. *地质与资源*, 12(3): 139–145.

郭正府, 刘嘉麒, 汪筱林, 2003. 辽西四合屯中生代脊椎动物集群死亡、快速辐射及其成因探讨. *自然科学进展*, 13(6): 604–614.

郭正府, 汪筱林, 2002. 火山活动与辽西四合屯脊椎动物集群死亡关系的初步研究. *岩石学报*, 18(1): 117–125.

季强, 陈文, 王五力, 等, 2004. 中国辽西中生代热河生物群. 北京: 地质出版社, 1–375.

李晓勇, 李超文, 范立勇, 2006. 燕山地区中生代中基性火山岩地球化学对岩石圈性质的约束. *高校地质学报*, 12(3): 319–327.

刘艳青, 杨忠芳, 赖木收, 2006. 辽西中生代沉积岩稀土、微量元素地球化学特征及其构造背景. *地质评论*, 52(4): 450–458.

罗清华, 陈丕基, 邹东羽, 等, 1999. 中华鸟龙与孔子鸟类的时代——辽西义县组火山凝灰岩激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定. *地球化学*, 28(4): 405–409.

潘永信, 朱日祥, Shaw, J., 等, 2001. 辽西四合屯含化石层古

地磁极性年龄的初步确定. *科学通报*, 46(8): 680–684.

彭艳东, 张立东, 张长捷, 等, 2004. 辽西北票—义县地区义县旋回火山岩的岩石化学特征. *中国地质*, 31(4): 356–364.

彭艳东, 张立东, 陈文, 等, 2003. 辽西义县组火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -K-Ar 法年龄测定. *地球化学*, 32(5): 427–435.

邵济安, 陈福坤, 路凤香, 等, 2006. 辽西中生代软流圈底辟体的脉动式上涌. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(6): 807–816.

苏尚国, 邓晋福, 赵国春, 等, 2006. 北京燕山地区薛家石梁杂岩体特征、成因、源区性质及岩石圈减薄方式. *地学前缘*, 13(2): 148–157.

王根厚, 张长厚, 王果胜, 等, 2001. 辽西地区中生代构造格局及其形成演化. *现代地质*, 15(1): 1–7.

王松山, 王元青, 胡华光, 等, 2001a. 辽西四合屯脊椎动物生存时代: 锆石 U-Pb 年龄证据. *科学通报*, 46(4): 330–333.

王松山, 胡华光, 李佩贤, 等, 2001b. 再论辽西四合屯脊椎动物生存时代: Ar-Ar 年龄证据. *岩石学报*, 17(4): 663–668.

王晓蕊, 高山, 柳小明, 等, 2005. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳拆沉作用和 Sr/Y 变化的指示. *中国科学(D辑)*, 35(8): 700–709.

王五力, 张宏, 张立君, 等, 2004. 土城子阶、义县阶标准地层剖面及其地层古生物、构造火山作用. 北京: 地质出版社, 114–116.

肖高强, 高山, 黄华, 等, 2008. 辽西彰武大四家子地区中生代火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(2): 151–164.

张宏, 王五力, 李云彤, 2004. 辽西北票和义县地区义县组综合对比研究. *地质通报*, 23(8): 766–777.

张宏, 张旗, 2005. 辽西北票四合屯地区义县组高镁火山岩的稀土、微量元素特征及启示. *中国稀土学报*, 23(6): 736–741.

张立东, 郭胜哲, 张长捷, 等, 2004. 北票—义县地区义县组火山构造及其与化石沉积层的关系. *地球学报*, 25(6): 639–646.

张立军, 巩恩普, 2003. 辽宁北票四合屯地区早白垩世早期鸟类集群死亡原因探析. *地质论评*, 49(4): 347–354.

张立军, 巩恩普, 徐德亮, 等, 2005. 辽宁北票四合屯盆地白垩统义县组沉积相. *古地理学报*, 7(1): 70–78.

赵振华, 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社, 1–238.