

辽河坳陷大民屯凹陷古近系沙河街组三段 地球化学特征及其地质意义

张妮¹⁾, 武毅²⁾, 张霞³⁾, 黄舒雅³⁾, 李铁军²⁾, 张新培²⁾,
林春明³⁾, 江凯禧³⁾, 夏长发³⁾

1) 金陵科技学院材料工程学院,南京,211169; 2) 中石油辽河油田分公司勘探开发研究院,辽宁盘锦,124010;
3) 南京大学地球科学与工程学院,南京,210023

内容提要:对辽河坳陷大民屯凹陷沈检5井古近系沙河街组三段(简称沙三段, $E_{S_3}^3$)的地球化学特征进行分析,明确大民屯凹陷沙三段的母岩类型、恢复该区的古环境并对构造背景进行判别和讨论,从而确定最终物源。结果显示,大民屯凹陷沙三段的母岩以大陆上地壳的长英质火山岩和太古宙的古老岩石为主,并受到来自幔源的大陆岛弧中基性岩浆影响。A-CN-K、 SiO_2 - Al_2O_3 、Th-Th/U判别图显示源区的化学风化程度较弱。本文根据聚类分析选取出Sr/Cu、Sr/Ba、V/(V+Ni)值等10种元素组合,并根据其纵向分布特征对研究区的古环境进行了恢复。结果显示, $E_{S_3}^4$ Ⅱ至 $E_{S_3}^3$ Ⅲ沉积时期,大民屯凹陷的古气候以干热为主并整体呈增强趋势,该区古湖泊的水体盐度低,以弱还原环境为主。研究表明,古气候是控制沙三段元素分配的主因,这与研究区的沉积环境和较为封闭的构造环境有关。稀土元素参数和主微量元素判别图表明,大民屯凹陷同时具有大陆岛弧和被动大陆边缘构造背景。本文认为,研究区复杂的物源和构造背景与晚侏罗世—晚始新世阶段太平洋板块向欧亚板块俯冲的大背景有关。大民屯凹陷沙三段沉积岩主要来自太古宇变质岩基底中的混合花岗岩和混合片麻岩,以及中生代多期次构造运动过程中生成的中酸性火成岩,同时受中生代晚期的幔源物质影响。

关键词:辽河坳陷;大民屯凹陷;物源;地球化学;沙三段

辽河坳陷大民屯凹陷致密砂岩的储层类型多,单井产量高,油气勘探成效显著。目前大民屯凹陷的层序地层学、油气成藏条件研究和结合地震反演的地球物理研究成果丰富(Ye Xingshu et al., 2012; Zhu Huayu et al., 2013; Li Xiaoguang et al., 2019; Wu Yi, 2019; Li Zhixu, 2020),其砂砾岩体预测方面已达到相当高的精度(Liu Jialin et al., 2017; Zhang Wenwei, 2019; Yang Deqiang, 2020),但该区乃至整个辽河坳陷的元素地球化学研究甚少。沈检5井为2015年实施的取芯井,该井的取芯段长、岩芯样品保存好、样品新鲜,是化学试验区重点研究的一口取芯井。本文以大民屯凹陷为研究对象,以该区的主力含油层沙三段三亚段($E_{S_3}^3$)和沙

三段四亚段($E_{S_3}^4$)为研究目的层(埋深1275~2375 m),对凹陷中部静安堡-东胜堡构造带的沈检5井进行密集采样和元素地球化学分析,结合研究区地质概况,明确大民屯凹陷沙三段的母岩类型、对古环境进行恢复、对构造背景进行判别和解释,从而确定大民屯凹陷沙三段($E_{S_3}^3$)沉积岩的具体物源。

1 研究区地质概况

辽河坳陷是以前新生界潜山和古近系为主要勘探目的层的含油气坳陷,位于渤海湾盆地东北部。根据古近系底面古地貌、主要断裂特征及坳陷沉积与沉降特点,辽河坳陷被划分为包括大民屯凹陷在内的共7个次级构造单元,总体呈NE向展布,形成

注:本文为国家自然科学基金项目(编号41272124)和中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(编号2017E-1603)资助成果。

收稿日期:2020-04-15;改回日期:2020-08-13;网络发表日期:2020-08-24;责任编辑:周健。

作者简介:张妮,博士,从事矿物学、矿床学与沉积学研究,Email: zhangni@jtu.edu.cn。通讯作者:武毅,高级工程师,从事油田开发研究工作,Email: liaohewuyi@126.com。

引用本文:张妮,武毅,张霞,黄舒雅,李铁军,张新培,林春明,江凯禧,夏长发. 2021. 辽河坳陷大民屯凹陷古近系沙河街组三段地球化学特征及其地质意义. 地质学报, 95(2): 517~535, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020252.

Zhang Ni, Wu Yi, Zhang Xia, Huang Shuya, Li Tiejun, Zhang Xinpei, Lin Chunming, Jiang Kaixi, Xia Changfa. 2021. Geochemical characteristics and its implications of the third Member of the Paleogene Shahejie Formation from the Damintun sag, Liaohe depression. Acta Geologica Sinica, 95(2): 517~535.

“四凹”和“三凸”的构造格局(图 1a)。含油气丰度高的大民屯凹陷位于辽河坳陷的东北角,面积约 800 km^2 ,剖面上是一个南断北超的小型箕状断陷(图 1b、c)。大民屯凹陷基底为太古宇变质岩,是原始沉积岩和火山碎屑岩经历区域变质作用和混合变质作用后形成,故保留了原始构造(Zhu Yixiu et al., 2018)。辽河坳陷的太古宇变质岩基底多为中深变质岩,按区域主要有花岗岩、混合片麻岩、混合岩等分布区,均有可能成为大民屯坳陷古近纪地层的潜在物源(图 1d)。大民屯凹陷的古近纪地层以陆相扇三角洲—湖泊环境沉积物为主,为多旋回的砂泥岩沉积建造,碎屑类型以变质岩岩屑和混合花岗岩岩屑为主。古近系自下而上分为房身泡组(E_f),和沙河街组(E_s),后者由下至上分为沙四段(E_{s4})、沙三段(E_{s3})和沙一段(E_{s1})。沙三段为主要开发目的层,沉积地层厚度大、分布广,由下至上进一步划分为沙三段四亚段(E_{s3}^4)、沙三段三亚段(E_{s3}^3)、沙三段二亚段(E_{s3}^2)及沙三段一亚段(E_{s3}^1)四个沉积旋回段(Zhu Huayu et al., 2013),其中 E_{s3}^4 II、 E_{s3}^4 I 和 E_{s3}^3 III 为相邻的 3 个主力油层组。

大民屯凹陷在西北侧与东、南两侧边界断层长期活动中发生差异性沉降,导致其形态古近纪早期至晚期由 SW 高 NE 低转换为 SW 低 NE 高,因此物源主要来自 NE 方向(图 1c)。顺物源方向的连井剖面显示,凹陷中部静安堡-东胜堡构造带主要发育扇三角洲前缘亚相,并进一步划分为水下分流河道微相和水下分流间湾微相。由于大民屯凹陷形成时的湖盆规模较小,面积约 800 km^2 ,湖水较浅,风力作用于湖面的能量较小,故扇三角洲前缘亚相沉积受波浪改造强度相对较弱,扇三角洲前缘的河口坝微相和席状砂微相均不发育(Lin Chunming, 2019; 图 2)。凹陷内由 NE 至 SW 方向,静 66-60 井、沈检 3 井和沈检 5 井的水下分流河道中的砂岩粒度较粗,以砂砾岩、含砾砂岩、粗砂岩为主,水下分流河道发育,近物源特征明显。依次往 SW 方向分布的静 67-49 井、沈检 1 井、静 69-41 井和静 13 井的粗粒沉积物厚度显著递减,细砂岩、粉砂岩及泥岩等细粒沉积物厚度显著增大,水下分流河道减少,水体逐渐加深,显示这几口井离物源相对变远(图 2)。

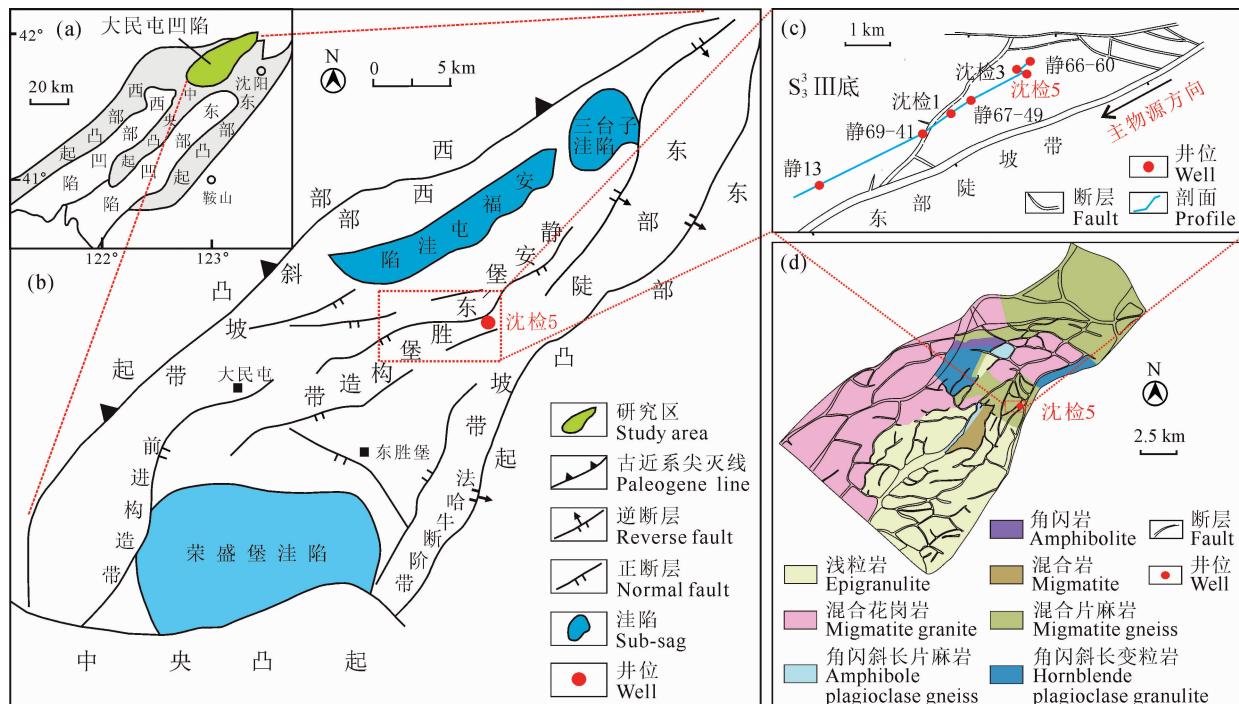


图 1 辽河坳陷构造位置图

Fig. 1 Geographical position of the Liaohe depression

(a)—辽河坳陷次级构造单元概略图;(b)—大民屯凹陷构造位置图;(c)—大民屯凹陷东北部连井剖面位置图;

(d)—辽河坳陷太古宇变质岩基底分布区(据 Zhu Yixiu et al., 2018 修改)

(a)—Secondary structural units in Liaohe depression; (b)—structural location of the Damintun sag;

(c)—location of the connecting wells section in the northeast Damintun sag;

(d)—distribution area of the Archean metamorphic basement in Liaohe depression (modified from Zhu Yixiu et al., 2018)

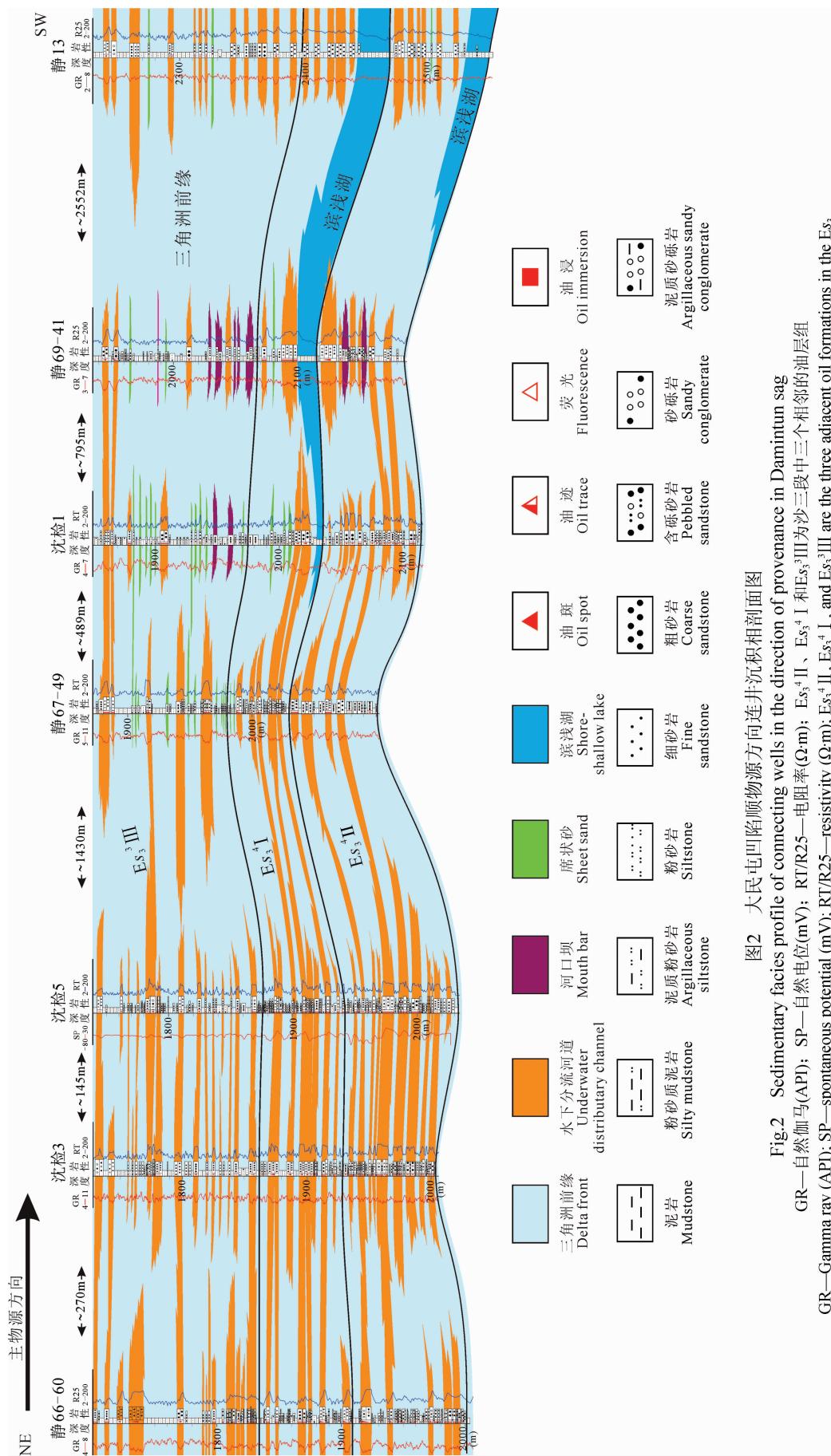


Fig.2 Sedimentary facies profile of connecting wells in the direction of provenance in Damintun sag
GR—自然伽马(API); SP—自然电位(mV); RT/R25—电阻率(Ω·m); E53⁴ I、E53⁴ II、E53³ I和E53³ III为沙三段中三个相邻的油层组
GR—Gamma ray (API); SP—spontaneous potential (mV); RT/R25—resistivity (Ω·m); E53⁴ I, E53⁴ II, E53³ I, and E53³ III are the three adjacent oil formations in the E53₃

2 样品特征及测试方法

本次研究样品取自沈检 5 井沙三段的 3 个相邻主力油层组(由下至上为 $E_{s_3}^4$ II、 $E_{s_3}^4$ I 和 $E_{s_3}^3$ III), 对采集的 68 个岩芯样品进行主量和微量元素分析, 其中 $E_{s_3}^4$ II 油层组 14 个, $E_{s_3}^4$ I 油层组 35 个, $E_{s_3}^3$ III 油层组 19 个(图 3)。主量和微量元素分析均在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成。将制备好的碱熔玻璃片在 ARL9900 型 X 射线荧光光谱仪(XRF) 上进行主量元素分析测试。样品浓度 $>1.0\%$ 时, 分析测试精度在 $\pm 1\%$; 当样品浓度 $<1.0\%$, 精度则在 $\pm 10\%$ 。微量元素分析测试仪器为 Finnigan Element II HR-ICP-MS, 样品测定值的相对误差小于 10%, 且大多数值在 5% 以内。

3 地球化学分析结果

3.1 稀土元素特征

样品中稀土元素(REE)球粒陨石标准化配分曲线整体表现为右倾斜式, 呈轻稀土富集、重稀土亏损, $E_{s_3}^3$ III、 $E_{s_3}^4$ I、 $E_{s_3}^4$ II 的 $(La/Yb)_N$ 平均值分别为 12.24、12.07、10.88, LREE/HREE 平均值分别为 29.62、28.86、26.78, 轻重稀土元素分馏明显。Eu 负异常明显, δEu 介于 0.79~0.88 之间, 平均 0.82。样品中 ΣREE 含量差异较大, 其中 $E_{s_3}^3$ III 为 53.85×10^{-6} ~ 158.71×10^{-6} , 平均 88.88×10^{-6} , $E_{s_3}^4$ I 为 57.71×10^{-6} ~ 164.68×10^{-6} , 平均 96.30

$\times 10^{-6}$, $E_{s_3}^4$ II 为 42.28×10^{-6} ~ 167.19×10^{-6} , 平均 110.27×10^{-6} , 以上各层的 ΣREE 含量均低于大陆上地壳的平均值 148.14×10^{-6} (Rudnick et al., 2003; 表 1, 表 2, 图 4)。

3.2 微量元素特征

样品的微量元素特征整体表现为 Co、Ni 和 Cr 等亲铁性元素接近大陆上地壳, 部分样品有亏损。其中 $E_{s_3}^4$ II 时期有一个样品 Co、Ni 含量很高。样品的高场强元素中 Th、Ce、Nb 等接近大陆上地壳, Zr、Hf 等在部分样品中富集。样品的大离子亲石元素中 Rb、Sr、Ba 含量略有差异, 整体与大陆上地壳较为相近, 个别样品的 Sr、Ba 含量相对大陆上地壳较为富集。Mn 含量较高, 平均 502.18×10^{-6} , $E_{s_3}^4$ II、 $E_{s_3}^4$ I、 $E_{s_3}^3$ III 的 Mn 含量分别为 311.96×10^{-6} 、 399.77×10^{-6} 、 794.80×10^{-6} (表 3, 图 5)。

3.3 主量元素特征

样品中 SiO_2 和 Al_2O_3 含量普遍较高, 差异较大, SiO_2 含量介于 50.86%~86.61% 之间, 平均 71.61%, Al_2O_3 含量为 9.07%~14.91%, 平均 11.88%。 $MgO + Fe_2O_3$ 含量(1.32%~7.77%)和 K_2O/Na_2O 值(0.84~2.36) 均较高, $E_{s_3}^4$ II、 $E_{s_3}^4$ I 和 $E_{s_3}^3$ III 的 $MgO + Fe_2O_3$ 平均值分别为 3.90%、3.48% 和 4.17%, K_2O/Na_2O 平均值分别为 1.45、1.34 和 1.11, 均高于大陆上地壳的平均值。Th/U 值差异较大, 介于 1.08~6.43 之间, 大部分介于 3.0~5.0 之间(表 4)。

表 1 沈检 5 井沙三段稀土元素特征参数的对比($\times 10^{-6}$)

Table 1 Comparison of REE characteristic parameters of E_{s_3} in well Shenjian 5 ($\times 10^{-6}$)

构造背景	源区类型	La	Ce	ΣREE	LREE/HREE	La/Yb	$(La/Yb)_N$	δEu
大洋岛弧	未切割岩浆弧	8±1.7	19±3.7	58±10	3.8±0.9	4.2±1.3	2.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧	切割岩浆弧	27±4.54	59±8.2	146±20	7.7±1.7	11±3.6	7.5±2.5	0.79±0.13
活动大陆边缘	隆升基底隆起	37	79	186	9.1	12.5	8.5	0.6
被动大陆边缘	克拉通内高低	39	85	210	8.5	15.9	10.8	0.56
$E_{s_3}^3$ III	平均值	20.0	36.0	88.9	10.20	18.2	12.24	0.88
$E_{s_3}^4$ I	平均值	22.5	39.2	99.8	10.30	16.4	12.07	0.78
$E_{s_3}^4$ II	平均值	25.1	44.9	110.3	9.69	16.1	10.88	0.79

注: 特征参数据 Bhatia(1985)。

4 讨论

4.1 母岩类型分析

样品中稀土元素的球粒陨石标准化特征与大陆上地壳相近, 微量元素含量整体表现为 Co、Ni 和 Cr 等亲铁性元素相对大陆上地壳接近, 部分样品有亏损, 其中 $E_{s_3}^4$ II 时期有一个样品 Co、Ni 含量很高, 可能是受到少量岩浆-变质地体的影响。样品中 Th、

Ce 等高场强元素接近大陆上地壳, Nb、Zr、Hf 元素在部分样品中富集。由于 Nb、Zr 主要富集于副矿物中, 在大洋板块发生俯冲消减至一定深度时, 随同板块一同俯冲的沉积物与板块表层蚀变的玄武岩中的流体发生脱水作用, 伴随强活性元素一同流出, 而存在于副矿物中的高场强元素不随流体发生迁移(Riccardo et al., 2009), 因此, 部分样品中 Nb、Zr 等元素的富集说明物源中有来自大洋板块俯冲过程

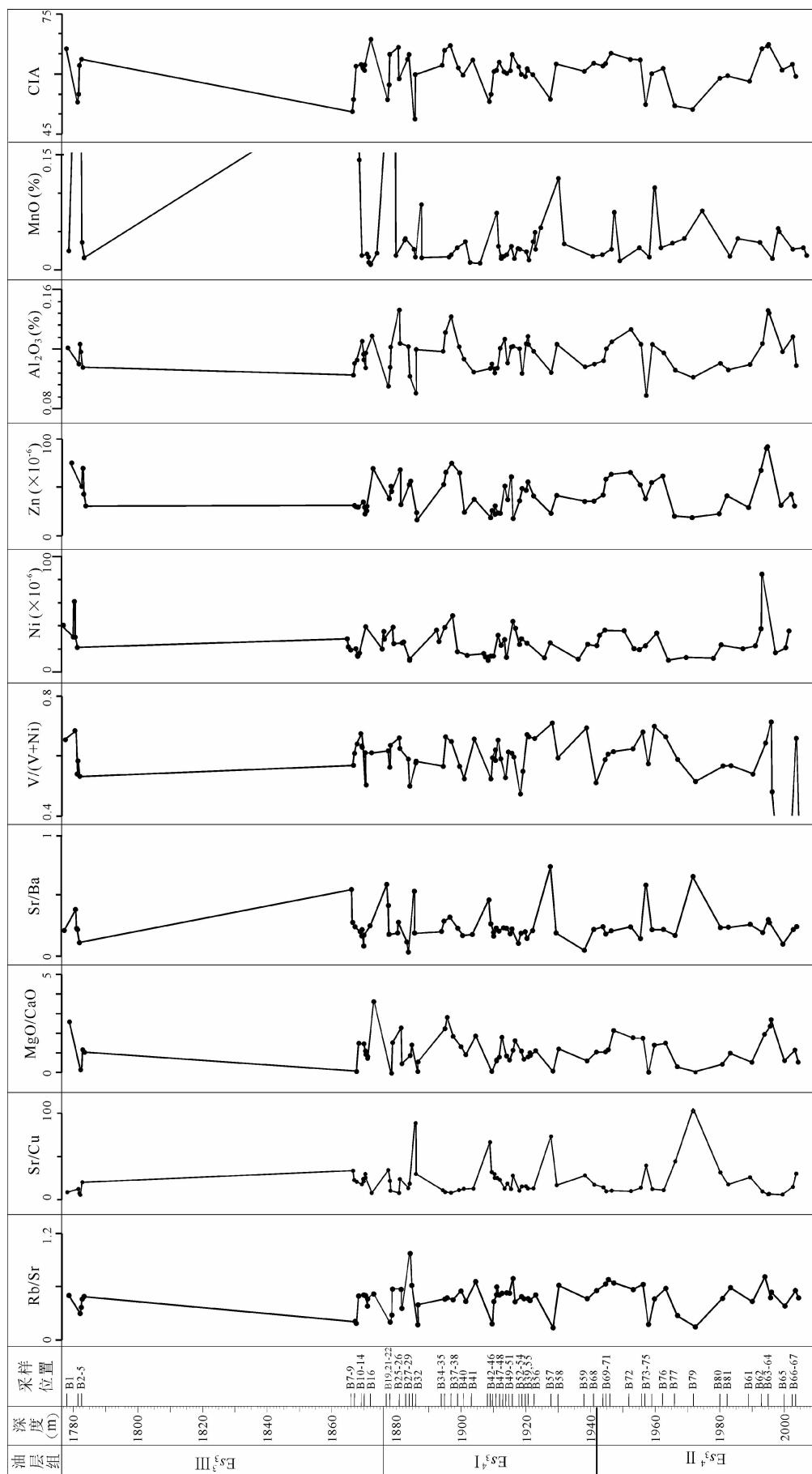


图3 沈检5井沙三段样品采集位置及元素纵向分布图
Fig.3 Samples location and vertical distribution of elements of Es₃ in well Shenjian 5

表 2 沈检五井沙三段稀土元素含量表 ($\times 10^{-6}$)Table 2 Rare earth element content ($\times 10^{-6}$) of E_{S_3} in well Shenjian 5

层位	样品号	深度(m)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	(Gd/Yb) _N	δE_{U}
	B1	1778.1	35.32	65.31	7.77	28.89	5.38	1.27	4.54	0.73	3.81	0.74	2.09	0.34	2.15	0.36	158.71	9.75	11.10	1.71	0.77
	B2	1781.5	23.79	42.82	5.35	19.81	3.66	0.97	3.12	0.50	2.62	0.52	1.48	0.25	1.60	0.26	106.73	9.32	10.04	1.58	0.85
	B3	1781.9	23.63	43.11	5.44	20.06	3.97	1.09	3.39	0.56	2.98	0.58	1.60	0.26	1.64	0.27	108.57	8.63	9.73	1.67	0.89
	B4	1782.1	21.29	38.84	4.89	18.97	3.69	0.95	3.21	0.53	2.74	0.50	1.28	0.19	1.16	0.18	98.43	9.04	12.42	2.24	0.82
	B5	1782.7	17.23	30.45	3.71	13.58	2.53	0.69	2.08	0.34	1.75	0.33	0.88	0.14	0.83	0.13	74.66	10.53	13.92	2.01	0.90
	B7	1866.5	16.79	30.33	3.62	12.97	2.48	0.66	2.15	0.33	1.70	0.33	0.91	0.15	0.90	0.15	73.46	10.11	12.51	1.91	0.85
	B8	1866.9	12.04	22.02	2.92	10.61	2.00	0.55	1.66	0.27	1.43	0.29	0.81	0.13	0.82	0.13	55.67	9.06	9.86	1.62	0.90
	B9	1867.6	16.96	30.79	3.58	12.79	2.21	0.58	1.81	0.28	1.44	0.28	0.81	0.13	0.81	0.13	72.63	11.70	14.06	1.80	0.86
	B10	1869.2	19.33	35.03	4.14	14.75	2.64	0.66	2.19	0.34	1.79	0.35	1.00	0.16	0.99	0.16	83.52	10.98	13.22	1.79	0.82
	B11	1869.7	17.54	30.91	3.92	13.59	2.43	0.64	2.00	0.31	1.61	0.32	0.90	0.15	0.91	0.15	75.38	10.87	12.99	1.78	0.87
	B12	1869.8	15.85	28.50	3.48	12.39	2.21	0.58	1.81	0.29	1.50	0.30	0.85	0.14	0.86	0.14	68.91	10.70	12.44	1.70	0.86
	B13	1870.3	13.01	22.90	2.69	9.32	1.71	0.64	1.39	0.21	1.08	0.20	0.58	0.10	0.58	0.09	54.49	11.89	15.25	1.96	1.24
	B14	1870.4	13.33	21.81	2.73	8.88	1.64	0.47	1.37	0.21	1.14	0.23	0.65	0.11	0.67	0.11	53.85	10.99	13.90	1.65	0.93
	B16	1872.3	35.39	64.52	8.08	29.11	5.46	1.19	4.65	0.75	3.96	0.80	2.23	0.39	2.40	0.40	159.33	9.23	9.96	1.57	0.71
	B19	1877.4	22.94	40.25	5.01	17.95	3.41	0.82	2.91	0.46	2.39	0.47	1.34	0.23	1.40	0.23	99.79	9.60	11.05	1.68	0.78
	B21	1877.9	24.77	43.95	5.34	18.69	3.43	0.78	3.08	0.50	2.79	0.57	1.63	0.27	1.64	0.26	107.72	9.01	10.18	1.51	0.72
	B22	1878.1	25.39	45.51	5.44	18.91	3.52	0.78	2.99	0.50	2.81	0.59	1.77	0.32	2.00	0.34	110.86	8.80	8.57	1.21	0.72
	B25	1880.7	31.66	58.12	7.15	25.69	4.97	1.16	4.17	0.67	3.56	0.70	1.98	0.34	2.08	0.34	142.60	9.29	10.28	1.62	0.76
	B26	1881.0	37.16	52.97	5.65	17.41	2.39	0.56	2.08	0.31	1.70	0.35	1.06	0.18	1.14	0.18	123.15	16.57	21.98	1.47	0.75
	B27	1883.5	29.57	52.06	6.36	22.30	4.18	0.90	3.64	0.62	3.39	0.68	1.93	0.32	1.96	0.31	128.22	8.98	10.19	1.50	0.69
	B28	1884.0	26.88	46.80	5.67	20.24	3.80	1.23	3.26	0.53	2.79	0.55	1.51	0.25	1.50	0.24	115.25	9.84	12.12	1.76	1.05
	B29	1885.9	14.54	25.09	3.08	10.82	1.94	0.56	1.66	0.26	1.34	0.26	0.76	0.12	0.77	0.12	61.32	10.58	12.79	1.75	0.93
	B32	1886.0	13.75	23.31	2.96	10.55	1.87	0.56	1.53	0.23	1.21	0.23	0.67	0.11	0.69	0.12	57.78	11.06	13.42	1.78	0.99
	B34	1894.3	26.09	47.35	5.74	20.91	3.87	0.96	3.37	0.57	3.16	0.64	1.81	0.32	1.98	0.33	117.10	8.61	8.88	1.37	0.79
	B35	1895.0	32.75	58.64	7.08	25.66	4.68	1.16	3.94	0.62	3.18	0.62	1.77	0.29	1.81	0.30	142.51	10.36	12.17	1.75	0.81
	B37	1896.8	38.17	68.17	8.35	29.29	5.35	1.12	4.31	0.69	3.58	0.71	2.04	0.35	2.19	0.36	164.68	10.57	11.77	1.59	0.69
	B38	1899.3	29.41	50.88	6.31	22.86	4.30	1.00	3.61	0.59	3.05	0.61	1.70	0.29	1.74	0.29	126.62	9.67	11.38	1.67	0.76
	B40	1900.7	16.85	30.04	3.66	12.93	2.32	0.66	1.92	0.30	1.52	0.28	0.80	0.13	0.79	0.13	72.33	11.32	14.31	1.95	0.93
	B41	1903.8	19.95	34.58	4.17	14.46	2.68	0.65	2.38	0.41	2.35	0.50	1.45	0.25	1.56	0.26	85.66	8.34	8.61	1.23	0.77
	B42	1908.9	15.86	28.39	3.38	12.31	2.14	0.60	1.78	0.28	1.50	0.29	0.83	0.14	0.84	0.14	68.47	10.82	12.73	1.71	0.91
	B43	1909.4	16.27	29.23	3.74	12.92	2.29	0.58	1.85	0.29	1.47	0.28	0.80	0.13	0.81	0.13	70.80	11.27	13.49	1.84	0.83
	B44	1910.3	15.38	28.34	3.47	12.48	2.20	0.55	1.69	0.25	1.23	0.23	0.67	0.11	0.67	0.11	67.39	12.60	15.58	2.05	0.84
	B45	1910.3	14.81	20.32	3.24	11.46	2.03	0.54	1.62	0.26	1.37	0.27	0.76	0.13	0.78	0.13	57.71	9.85	12.73	1.67	0.88
	B46	1911.1	17.02	30.24	3.72	13.24	2.40	0.62	1.94	0.31	1.61	0.31	0.89	0.15	0.93	0.15	73.52	10.68	12.39	1.69	0.85
	B47	1911.9	16.30	27.74	3.44	12.65	2.24	0.58	1.83	0.29	1.49	0.29	0.81	0.13	0.83	0.14	68.74	10.85	13.29	1.78	0.86

续表2

层位	样品号	深度(m)	L _a	C _e	P _r	Nd	S _m	E _u	Gd	Tb	Dy	H _o	E _r	T _m	Y _b	L _u	Σ REE	LRREE/ HREE	(L _a /Yb) _N	(Gd/Yb) _N	δ E _u
	B48	1913.4	27.83	49.70	6.25	21.80	4.14	0.95	3.45	0.56	2.97	0.60	1.72	0.29	1.83	0.31	122.39	9.44	10.27	1.52	0.75
	B49	1914.3	21.08	36.49	4.57	16.13	2.87	0.73	2.36	0.38	1.97	0.39	1.13	0.19	1.20	0.19	89.69	10.47	11.81	1.58	0.83
	B50	1915.4	32.06	57.35	7.13	24.78	4.50	0.96	3.71	0.60	3.19	0.63	1.84	0.32	1.98	0.33	139.39	10.06	10.91	1.51	0.70
	B51	1915.9	15.33	27.24	3.47	12.16	2.15	0.56	1.70	0.26	1.34	0.26	0.73	0.12	0.76	0.12	66.21	11.52	13.64	1.81	0.87
Es ₃ ⁴ I	B52	1917.9	16.54	25.47	3.93	14.13	2.67	0.66	2.22	0.36	1.89	0.38	1.13	0.20	1.33	0.23	71.14	8.18	8.40	1.35	0.81
	B53	1918.7	28.29	50.50	6.18	21.83	3.90	0.92	3.10	0.46	2.27	0.42	1.16	0.18	1.12	0.18	120.52	12.56	17.02	2.23	0.78
	B54	1920.0	22.86	40.29	5.08	18.66	3.35	0.91	2.83	0.47	2.58	0.52	1.49	0.25	1.55	0.25	101.10	9.16	9.92	1.47	0.88
	B39	1920.6	28.57	50.70	6.11	21.30	3.95	0.99	3.37	0.55	2.95	0.59	1.69	0.29	1.74	0.29	123.09	9.73	11.10	1.57	0.81
	B55	1920.7	4.54	6.65	0.90	3.21	0.54	0.15	0.43	0.07	0.37	0.07	0.21	0.03	0.21	0.03	17.42	11.23	14.91	1.69	0.92
	B56	1922.3	22.21	40.02	5.02	17.60	3.37	0.87	2.91	0.50	2.80	0.57	1.69	0.29	1.77	0.29	99.90	8.24	8.47	1.33	0.83
	B57	1927.7	19.48	34.87	4.22	15.19	2.81	0.76	2.37	0.39	2.05	0.39	1.11	0.18	1.09	0.17	85.09	9.97	12.02	1.75	0.88
	B58	1929.5	24.45	42.86	5.24	18.95	3.38	0.80	2.75	0.45	2.44	0.48	1.40	0.24	1.48	0.24	105.18	10.09	11.15	1.50	0.77
	B59	1938.2	17.88	32.31	3.97	13.43	2.49	0.94	2.09	0.34	1.83	0.36	1.01	0.17	1.02	0.16	78.00	10.17	11.84	1.66	1.23
	B68	1941.1	20.74	36.72	4.54	16.01	2.89	0.71	2.34	0.37	1.94	0.37	1.04	0.17	1.08	0.18	89.11	10.90	12.98	1.75	0.81
	B69	1944.0	23.75	42.59	5.31	18.62	3.49	0.76	2.88	0.47	2.45	0.48	1.34	0.22	1.36	0.22	103.94	10.02	11.75	1.71	0.71
	B70	1944.8	37.61	67.86	8.21	29.53	5.68	1.19	4.76	0.80	4.35	0.85	2.39	0.39	2.42	0.39	166.43	9.18	10.49	1.59	0.68
	B71	1946.5	33.93	61.26	7.55	26.97	4.77	1.00	3.92	0.66	3.71	0.76	2.25	0.39	2.51	0.42	150.12	9.26	9.12	1.26	0.68
	B72	1952.5	36.01	64.45	8.07	28.42	5.26	1.19	4.41	0.73	4.05	0.81	2.36	0.41	2.59	0.43	159.19	9.08	9.36	1.37	0.74
	B73	1955.5	24.58	42.60	5.25	18.13	3.35	0.81	2.77	0.46	2.49	0.49	1.42	0.24	1.51	0.24	104.33	9.85	10.97	1.48	0.79
	B74	1957.2	21.35	38.06	4.87	18.36	3.51	0.81	2.75	0.41	2.15	0.44	1.28	0.22	1.39	0.23	95.84	9.80	10.35	1.60	0.77
	B75	1959.1	26.37	46.56	5.76	20.27	3.68	0.93	2.97	0.49	2.71	0.56	1.72	0.31	2.03	0.35	114.70	9.29	8.75	1.18	0.84
	B76	1962.6	33.28	59.39	7.25	25.40	4.68	1.03	3.89	0.64	3.55	0.72	2.09	0.37	2.36	0.40	145.05	9.34	9.50	1.33	0.72
	B77	1966.2	13.10	23.08	2.77	9.66	1.74	0.61	1.40	0.21	1.07	0.20	0.57	0.09	0.57	0.09	55.17	12.09	15.46	1.98	1.15
Es ₃ ⁴ II	B79	1971.7	15.82	28.34	3.50	12.45	2.32	0.66	1.98	0.33	1.77	0.34	0.94	0.15	0.90	0.14	69.63	9.64	11.90	1.78	0.92
	B80	1980.1	17.31	30.97	3.80	13.04	2.31	0.56	1.85	0.29	1.54	0.30	0.87	0.14	0.87	0.15	74.00	11.33	13.36	1.71	0.81
	B81	1982.6	23.63	42.10	5.43	18.91	3.71	0.84	3.39	0.57	3.07	0.59	1.58	0.25	1.51	0.24	105.84	8.44	10.57	1.82	0.71
	B61	1989.3	17.47	31.68	3.83	12.94	2.32	0.57	1.88	0.29	1.52	0.30	0.86	0.14	0.87	0.14	74.82	11.48	13.61	1.75	0.82
	B62	1993.2	29.93	54.25	6.60	22.97	4.23	0.93	3.53	0.58	3.21	0.64	1.88	0.33	2.07	0.24	131.49	9.47	9.74	1.37	0.72
	B63	1994.9	35.76	64.13	7.78	27.72	5.30	1.26	4.62	0.77	4.20	0.83	2.34	0.39	2.42	0.39	157.92	8.89	9.95	1.54	0.76
	B64	1995.2	37.05	68.17	8.33	30.27	5.71	1.23	4.83	0.81	4.32	0.85	2.40	0.40	2.43	0.39	167.19	9.18	10.26	1.60	0.70
	B65	1999.4	8.75	14.20	2.37	8.84	2.02	0.47	1.47	0.25	1.40	0.29	0.89	0.16	1.02	0.17	42.28	6.49	5.76	1.16	0.79
	B66	2002.6	24.19	43.12	5.37	19.09	3.50	0.85	2.89	0.46	2.43	0.47	1.29	0.21	1.28	0.20	105.34	10.41	12.73	1.82	0.80
	B67	2003.6	16.39	29.80	3.59	13.08	2.30	0.58	1.89	0.30	1.57	0.30	0.84	0.14	0.85	0.14	71.77	10.91	13.04	1.80	0.83

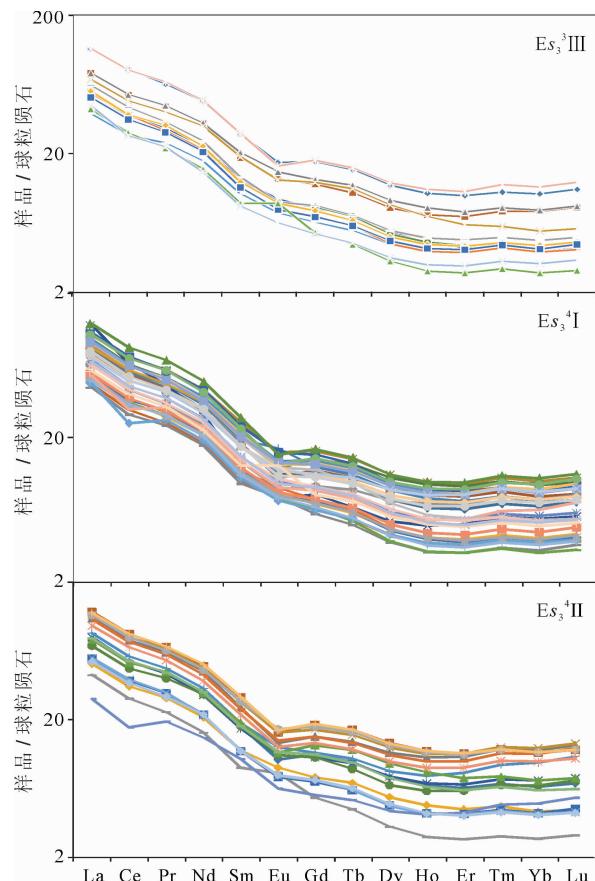


图 4 沈检 5 井沙三段 REE 配分图

(标准化数据引自 McLennan, 1993)

Fig. 4 REE distribution of Es_3 in well Shenjian 5
(Standardized data from McLennan, 1993)

中产生的残留体(表 2)。主量元素中较高的 SiO_2 含量说明石英或富含 SiO_2 的矿物(如长石)含量较高, 矿物成分成熟度较高, 较高的 $MgO+Fe_2O_3$ 含量显示母岩受到基性岩的影响较大(Zhang Ni et al., 2012a)。根据以上元素特征, 本文认为, 大民屯凹陷沙三段的母岩主要来自大陆上地壳, 但受到来自幔源的大陆岛弧火山岩的影响(Rudnick et al., 2003)。

微量元素判别图可更好地确认母岩类型。 Zr/Sc - Th/Sc 图中样品具有较高的 Th/Sc 、 Zr/Sc 值, 其中 Zr/Sc 值均高于大陆上地壳的(McLennan et al., 1993)。样品投影主要集中在上地壳的长英质火山岩附近, 并沿着锆石富集趋势线分布, 显示母岩主要来自上地壳的长英质火山岩, 且在沉积过程中受到分选作用或者再旋回作用的影响, 从而使 Zr 元素在沉积物中优先富集。 Es_3^4 I 中有两个样品沿着初始沉积循环线分布, 说明部分沉积物未经过源岩的循环搬运。总的来看, Es_3^4 II 至 Es_3^3 III 的沉积物中稳定组分比例下降, 沉积再旋回物质的影响逐渐减小, 反

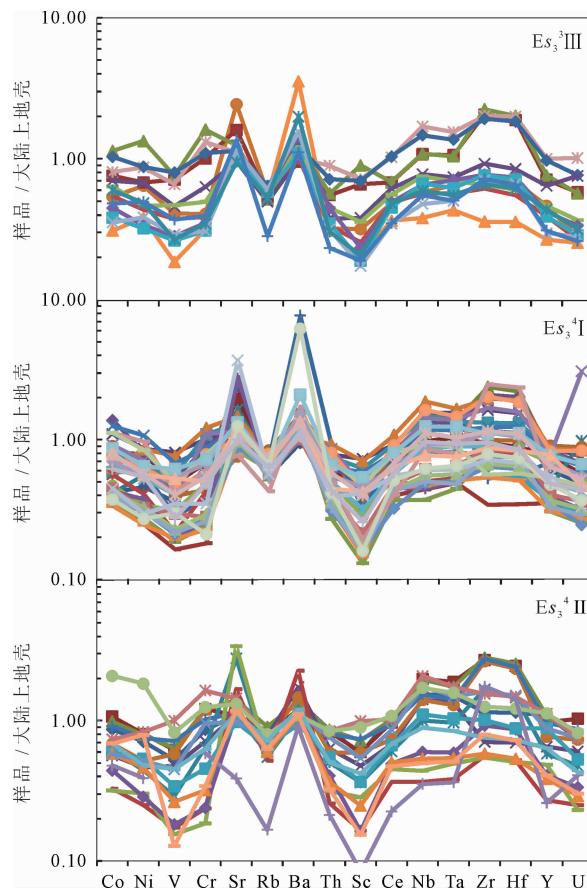


图 5 沈检 5 井沙三段微量元素分布图

(标准化数据引自 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 5 Distribution of trace elements of Es_3 in well Shenjian 5
(Standardized data from Taylor et al., 1985)

映了研究区的母岩成分在不断变化, 不稳定组分含量较高的物源供给在不断增加(图 6)。 $La/Th-Hf$ 图显示, 大部分样品落在长英质、基性岩混合物源区以及酸性岩浆弧物源区, 并含有较多老沉积物组分, 混源现象明显。 Es_3^4 II 至 Es_3^3 III 时期, 酸性岩浆弧物源影响明显降低, 老沉积物组分含量减少, 与 Zr/Sc - Th/Sc 判别图结果一致(图 7)。 $La/Sc-Co/Th$ 图显示, 样品的投点较为分散, 主要介于长英质火山岩和太古宙 TTG 岩系之间, 少量样品受到安山岩和玄武岩的影响(Taylor et al., 1985; 图 8)。本文认为, 大民屯凹陷沙三段的母岩以大陆上地壳的长英质火山岩和太古宙的古老岩石为主, 并受到少量来自幔源的大陆岛弧中基性岩浆影响, 且该影响在 Es_3^4 II 至 Es_3^3 III 期间逐渐增强。

4.2 源区的风化程度

化学蚀变指数(CIA)可定量评价化学风化强度, $CIA = n(Al_2O_3)/[n(Al_2O_3) + n(CaO^*) + n(Na_2O) + n(K_2O)] \times 100$, CIA 值越大风化作用越

表3 沈检五井沙三段微量元素含量表($\times 10^{-6}$)Table 3 Trace element content ($\times 10^{-6}$) of Es₃ in well Shenjian 5

层位	样品	深度(m)	Co	Ni	V	Cr	Sr	Rb	Ba	Mn	Th	Sc	Ce	Nb	Ta	Hf	Zr	Y	U
	B1	1778.1	17.83	41.26	77.53	100.62	161.26	80.34	778.45	221.46	7.51	9.74	65.31	17.66	1.23	370.15	9.72	20.44	2.07
	B2	1781.5	13.10	31.91	69.03	92.71	227.23	67.30	599.08	4420.70	5.80	9.22	42.82	12.95	0.95	397.38	9.98	14.93	1.57
	B3	1781.9	19.67	62.67	73.56	148.20	176.26	64.26	783.53	1872.06	5.97	12.56	43.11	13.02	0.94	433.99	10.70	15.98	1.53
	B4	1782.1	12.11	31.77	44.54	58.12	135.69	62.17	631.11	287.79	3.96	5.33	38.84	9.33	0.67	178.00	4.49	13.53	2.04
	B5	1782.7	10.33	22.80	25.98	31.88	134.74	65.68	1248.82	127.68	3.19	2.88	30.45	7.13	0.49	127.50	3.25	9.20	0.86
	B7	1866.5	9.32	30.32	39.76	37.45	346.10	71.56	637.76	2224.68	3.36	4.44	30.33	6.92	0.58	148.03	3.65	9.75	0.75
	B8	1866.9	8.37	23.26	35.92	36.34	191.71	35.40	699.95	1138.21	2.45	2.65	22.02	6.65	0.45	138.97	3.46	6.52	0.71
Es ₃ III	B9	1867.6	9.35	20.57	36.30	35.54	151.66	74.73	638.57	161.91	3.53	3.58	30.79	6.83	0.51	118.81	2.94	8.19	0.72
	B10	1869.2	11.01	21.76	45.50	45.59	150.11	75.79	757.65	194.25	4.70	5.03	35.03	9.01	0.62	126.06	3.20	9.79	0.99
	B11	1869.7	7.75	15.91	27.44	32.21	147.78	73.21	909.53	116.50	4.68	3.28	30.91	7.89	0.64	148.96	3.92	8.81	0.91
	B12	1869.8	6.62	15.14	25.60	28.48	146.66	72.81	684.41	82.48	3.64	2.66	28.50	8.00	0.56	147.10	3.78	8.22	0.77
	B13	1870.3	5.36	17.96	18.04	28.97	178.27	67.43	2221.87	66.19	3.25	2.81	22.90	4.56	0.39	69.28	1.90	5.63	0.69
	B14	1870.4	6.14	18.01	28.23	28.23	164.80	75.80	976.94	48.12	3.32	2.44	21.81	5.75	0.45	135.76	3.52	6.24	0.76
	B16	1872.3	13.94	40.81	63.91	120.88	156.95	81.00	636.89	165.24	9.39	10.05	64.52	20.34	1.40	388.73	10.57	20.96	2.74
	B19	1877.4	7.27	21.53	34.69	60.04	347.54	68.74	595.04	2998.63	5.82	6.05	40.25	11.63	0.93	223.17	5.88	12.55	1.33
	B21	1877.9	14.16	36.65	47.09	63.51	278.62	77.59	676.93	2305.58	6.27	6.55	43.95	11.76	0.94	181.97	4.74	15.74	1.54
	B22	1878.1	13.78	30.11	52.50	75.72	136.12	77.72	773.76	141.22	6.85	6.65	45.51	18.42	1.25	459.94	11.69	16.06	1.82
	B25	1880.7	18.98	40.44	78.44	92.72	163.08	92.58	868.85	314.85	8.25	10.21	58.12	18.75	1.40	314.17	8.16	18.58	2.04
	B26	1881.0	7.16	26.17	43.60	51.22	233.12	82.43	848.67	322.63	4.79	5.65	52.97	9.74	0.74	145.07	4.05	9.59	2.65
	B27	1883.5	15.56	26.79	38.50	40.33	107.69	104.75	949.88	222.03	8.00	4.92	52.06	16.43	1.29	191.02	5.23	19.01	2.39
	B28	1884.0	14.72	27.57	27.55	34.38	149.04	91.20	4858.94	141.33	9.58	4.47	46.80	14.03	1.45	101.81	3.02	14.40	1.49
	B29	1885.9	6.45	11.69	15.93	16.75	397.11	66.98	751.34	757.85	3.24	2.82	25.09	5.30	0.44	66.27	1.83	7.38	0.77
	B32	1886.0	5.85	12.90	18.02	22.24	164.77	64.91	882.86	102.54	2.85	1.83	23.31	4.44	0.40	159.29	4.20	6.45	0.68
	B34	1894.3	23.83	37.83	49.16	84.42	175.10	80.12	876.44	144.95	6.47	7.41	47.35	16.70	1.13	402.44	10.64	17.62	1.80
	B35	1895.0	10.12	27.96	55.11	100.48	185.66	87.72	654.04	145.73	7.83	8.69	58.64	18.03	1.21	254.83	6.96	17.19	1.73
	B37	1896.8	10.94	40.15	73.86	111.58	207.79	93.56	655.53	232.64	9.73	9.82	68.17	22.47	1.49	379.65	10.17	18.06	2.27
	B38	1899.3	21.66	50.32	65.45	80.71	167.50	91.79	740.45	279.11	6.70	8.16	50.88	14.17	1.04	236.83	6.56	16.17	1.75
	B40	1900.7	9.76	19.13	21.05	39.15	163.09	70.46	984.56	77.21	3.73	2.80	30.04	6.05	0.48	158.31	4.14	7.77	0.79
	B41	1903.8	8.08	15.90	30.39	44.65	117.05	76.62	669.99	67.39	5.11	3.98	34.58	13.39	0.92	173.26	4.59	14.27	1.35
	B42	1908.9	7.37	17.66	19.42	24.08	389.70	69.79	852.02	621.43	3.55	2.78	28.39	5.36	0.46	131.67	3.43	8.24	0.85
	B43	1909.4	6.36	14.65	21.40	24.33	174.08	74.75	664.03	250.37	3.80	2.15	29.23	5.61	0.46	103.23	2.85	7.75	0.80
	B44	1910.3	5.81	11.58	18.92	20.92	136.88	69.56	715.27	114.77	3.38	2.05	28.34	5.67	0.46	103.33	2.71	6.49	0.73
	B45	1910.3	6.29	14.42	20.36	25.33	125.84	74.89	783.30	136.95	3.26	2.30	20.32	5.88	0.46	122.93	3.27	7.42	0.66
	B46	1911.1	7.68	15.26	28.69	25.81	143.79	72.60	633.57	132.07	4.05	3.00	30.24	7.36	0.59	163.66	4.36	8.51	0.98
	B47	1911.9	7.22	15.35	22.15	26.37	138.08	72.27	682.91	118.67	3.83	2.63	27.74	6.64	0.51	128.82	3.42	7.74	0.86

续表 3

层位	样品	深度(m)	Co	Ni	V	Cr	Sr	Rb	Ba	Mn	Th	Sc	Ce	Nb	Ta	Zr	Hf	Y	U
	B48	1913.4	15.85	33.36	37.26	100.69	161.37	85.36	702.87	150.15	9.03	6.53	49.70	16.86	1.25	325.50	8.34	16.36	8.33
	B49	1914.3	11.80	24.66	39.08	52.26	167.87	88.04	741.84	210.06	5.24	4.44	36.49	10.35	0.81	172.30	4.46	10.40	1.15
	B50	1915.4	12.92	29.63	46.10	72.30	143.46	99.10	793.03	227.03	8.45	6.17	57.35	19.53	1.31	391.08	9.82	17.31	2.25
	B51	1915.9	6.77	14.26	21.06	23.80	155.65	66.46	708.34	99.37	3.42	2.19	27.24	6.04	0.43	150.13	3.92	6.91	0.77
Es ⁴ ₃ I	B52	1917.9	19.36	45.42	40.84	56.73	110.32	53.52	1078.94	134.11	5.16	2.68	25.47	10.22	0.72	481.60	12.49	10.29	1.20
	B53	1918.7	19.30	39.51	48.08	72.54	178.22	82.38	963.10	259.19	7.27	6.67	50.50	11.23	0.80	108.62	3.04	11.13	1.26
	B54	1920.0	12.13	25.45	51.97	62.21	190.19	88.10	963.15	314.88	5.84	6.34	40.29	11.17	0.84	216.72	5.57	14.61	1.48
	B39	1920.6	15.00	30.37	59.85	66.84	188.40	82.98	1315.31	372.20	6.93	7.56	50.70	14.91	1.11	211.73	5.89	16.15	1.81
	B56	1922.3	13.77	26.51	50.99	46.21	174.29	87.98	845.75	500.47	4.68	5.92	40.02	9.28	0.68	169.26	4.42	16.22	1.26
	B57	1927.7	7.73	13.88	33.89	32.16	524.39	70.72	717.68	1093.61	4.11	5.74	34.87	7.28	0.55	139.37	3.63	11.59	0.90
	B58	1929.5	13.37	26.86	39.15	50.07	154.29	94.53	823.66	285.69	6.09	5.60	42.86	13.35	0.93	222.65	5.80	13.47	1.41
	B59	1938.2	6.45	12.77	28.88	19.38	177.34	82.16	3904.32	150.98	4.39	2.25	32.31	7.47	0.59	152.08	3.93	10.01	1.00
	B68	1941.1	10.65	25.55	26.67	44.75	142.26	78.70	659.24	166.43	4.55	3.60	36.72	11.60	0.84	185.21	4.46	10.22	1.19
Es ⁴ ₃ II	B69	1944.0	11.10	24.33	34.68	47.79	144.98	91.18	608.32	230.50	5.48	5.39	42.59	11.61	0.82	197.00	4.94	13.58	1.36
	B70	1944.8	14.98	33.26	51.15	79.17	155.30	105.42	866.15	612.07	9.04	8.14	67.86	18.57	1.35	221.43	6.05	23.12	1.99
	B71	1946.5	18.53	37.79	60.16	111.26	154.71	99.00	755.08	96.31	8.71	8.36	61.26	23.79	1.70	523.88	13.03	20.55	2.79
	B72	1952.5	17.11	37.30	61.84	111.00	199.62	112.92	842.65	250.89	9.05	10.12	64.45	23.65	1.56	543.43	13.50	22.77	2.21
	B73	1955.5	9.79	21.88	46.38	65.55	154.15	96.10	1089.83	120.85	6.63	42.60	17.07	1.21	136.25	3.69	13.71	1.63	
	B74	1957.2	10.64	20.88	28.13	59.07	395.40	68.72	683.48	974.54	5.30	5.07	38.06	12.00	0.87	322.40	7.76	12.21	1.28
	B75	1959.1	11.82	24.23	56.09	110.23	197.41	91.08	923.91	199.15	6.21	8.29	46.56	16.88	1.16	512.87	12.45	16.14	1.98
	B76	1962.6	15.89	35.33	69.62	94.19	160.98	93.24	746.02	248.13	8.44	10.34	59.39	18.52	1.27	534.14	12.88	20.30	2.34
	B77	1966.2	5.65	11.73	16.77	21.79	238.11	64.89	1427.67	325.79	2.69	2.30	23.08	4.38	0.34	108.17	2.76	5.69	0.67
	B79	1971.7	5.50	14.16	15.04	17.02	483.55	69.57	744.47	693.43	3.29	3.98	28.34	5.29	0.45	105.02	2.68	10.20	0.62
	B80	1980.1	7.63	13.45	17.63	21.94	158.05	73.59	683.26	158.46	4.25	2.29	30.97	7.18	0.53	177.99	4.59	8.53	0.90
	B81	1982.6	10.33	25.09	32.95	41.87	139.10	81.65	592.96	277.12	5.76	5.12	42.10	13.26	0.94	196.03	4.67	18.61	1.43
	B61	1989.3	10.06	21.77	25.52	29.43	175.15	75.56	679.71	297.02	3.85	3.47	31.68	6.41	0.49	112.27	2.83	8.08	0.78
	B62	1993.2	10.07	24.20	43.58	88.39	138.34	98.10	724.57	137.11	7.92	7.56	54.25	21.01	1.35	311.28	8.02	18.48	2.03
	B63	1994.9	12.76	39.08	97.00	151.26	205.08	97.23	692.07	423.27	8.87	13.94	64.13	25.00	1.57	239.86	7.87	23.57	2.03
	B64	1995.2	36.05	86.30	79.92	114.89	187.09	100.21	687.20	373.84	8.89	12.56	68.17	20.62	1.43	242.69	6.47	23.70	2.21
	B65	1999.4	8.28	18.31	0.00	53.77	55.03	20.84	570.98	123.89	2.23	1.17	14.20	4.24	0.33	338.42	7.56	5.44	1.10
	B66	2002.6	11.87	22.62	43.64	57.96	161.90	89.66	753.29	232.41	5.29	43.12	10.74	0.76	145.92	3.88	13.34	1.15	
	B67	2003.6	11.90	37.12	12.40	31.42	167.07	78.87	698.70	152.43	3.39	2.15	29.80	5.95	0.46	153.69	3.85	8.53	0.81

强。式中各元素采用摩尔百分含量, CaO^* 仅代表样品硅酸盐中的 CaO 。通常硅酸盐中 CaO^* 与 Na_2O 之比为 1:1, 当全岩样品 CaO 摩尔含量大于

Na_2O 时, 取 $n(\text{CaO}^*) = n(\text{Na}_2\text{O})$; 而小于 Na_2O 时, 则取 $n(\text{CaO}^*) = n(\text{CaO})$, 本文所有涉及 CaO^* 的计算均依此方法处理(McLennan, 1993)。样品线与

表 4 沈检五井沙三段主量元素含量表(%)

Table 4 Main element content (%) of Es₃ in well Shenjian 5

层位	样品号	深度(m)	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
Es_3^3 III	B1	1778.07	71.31	0.955	12.33	6.03	0.025	1.21	0.47	1.82	2.23	0.128
	B2	1781.51	54.82	0.804	11.22	4.2	0.49	1.2	12.21	2.31	2.17	0.175
	B3	1781.86	61.68	0.876	12.58	6.25	0.216	1.44	4.47	2.45	2.07	0.21
	B4	1782.12	74.17	0.444	12.05	3.93	0.036	0.77	0.66	2.09	2.5	0.124
	B5	1782.74	77.24	0.223	10.99	2.12	0.016	0.37	0.36	1.91	2.28	0.059
	B7	1866.5	62.14	0.289	10.46	3.08	0.24	0.85	9.06	2.34	2.31	0.057
	B8	1866.86	70.35	0.256	11.27	2.49	0.143	0.58	5.54	2.16	2.42	0.1
	B9	1867.62	74.97	0.202	11.49	3.34	0.019	0.67	0.45	2.18	2.45	0.099
	B10	1869.21	74.29	0.313	12.78	3.71	0.021	0.79	0.54	2.38	2.59	0.145
	B11	1869.67	76.61	0.229	11.89	1.85	0.017	0.45	0.41	2.33	2.58	0.068
	B12	1869.77	78.53	0.235	11.51	1.57	0.01	0.35	0.38	2.28	2.57	0.065
	B13	1870.3	77.36	0.117	10.96	1.29	0.007	0.26	0.36	2.35	2.33	0.04
	B14	1870.36	76.14	0.126	11.98	1.54	0.008	0.3	0.37	2.29	2.61	0.039
	B16	1872.25	69.9	1.156	13.14	6.33	0.022	1.44	0.4	1.63	2.4	0.126
Es_3^4 I	B19	1877.36	51.67	0.481	9.7	3.78	0.349	1.06	14.41	1.82	2.22	0.096
	B21	1877.88	52.35	0.473	11	5.31	0.273	1.42	11.8	1.71	2.37	0.109
	B22	1878.06	73.24	0.878	12.38	3.16	0.019	0.76	0.5	1.87	2.5	0.104
	B25	1880.74	66.5	0.822	14.91	4.85	0.039	1.41	0.62	2.02	2.78	0.144
	B26	1880.96	72.15	0.357	12.63	3.25	0.041	0.6	1.34	2.09	2.74	0.047
	B27	1883.54	73	0.357	12.41	2.98	0.027	0.73	0.84	1.32	3.12	0.084
	B28	1884.02	75.99	0.31	10.38	2.3	0.017	0.52	0.37	1.22	2.72	0.065
	B29	1885.87	52.69	0.135	9.23	1.49	0.085	0.63	16.38	2.19	2.29	0.05
	B32	1885.95	75.86	0.121	12.22	1.24	0.016	0.27	0.5	2.74	2.56	0.057
	B34	1894.26	72.34	0.933	12.09	4.64	0.017	1.07	0.48	2.23	2.6	0.102
	B35	1894.98	70.67	1.009	13.38	5.12	0.02	1.43	0.51	1.94	2.6	0.115
	B37	1896.79	70.01	1.076	14.46	4.09	0.029	1.34	0.73	1.75	2.67	0.079
	B38	1899.25	70.64	0.561	12.4	6.04	0.037	1.48	1.13	1.73	2.63	0.063
	B40	1900.72	76.97	0.247	11.56	1.63	0.01	0.42	0.46	2.52	2.6	0.059
	B41	1903.75	76.78	0.546	10.67	2.16	0.009	0.5	0.27	1.73	2.59	0.047
	B42	1908.87	68.39	0.135	10.92	1.42	0.074	0.31	6.43	2.13	2.43	0.058
	B43	1909.39	75.76	0.134	11.23	1.51	0.031	0.3	1.48	2.2	2.67	0.059
	B44	1910.26	78.05	0.13	10.61	1.19	0.015	0.27	0.45	2.07	2.47	0.053
	B45	1910.3	77.5	0.136	10.9	1.45	0.018	0.3	0.46	2.03	2.68	0.057
	B46	1911.1	77.71	0.213	10.95	1.49	0.018	0.33	0.42	2.08	2.62	0.06
	B47	1911.91	73.94	0.84	12.3	2.81	0.02	0.77	0.43	2.12	2.74	0.105
	B48	1913.35	73.43	0.394	12.92	2.55	0.031	0.65	0.77	2.29	3	0.056
	B49	1914.25	76.62	0.145	11.29	1.13	0.015	0.3	0.47	2.39	2.48	0.064
	B50	1915.36	74.06	0.476	12.38	2.78	0.028	0.67	0.59	2.3	2.88	0.095
	B51	1915.94	74.21	0.681	12.43	2.85	0.027	0.68	0.42	1.73	2.89	0.095
	B52	1917.94	74.45	0.62	12.27	2.42	0.024	0.59	0.54	2.27	2.65	0.115
	B53	1918.72	78.15	0.205	10.58	1.34	0.013	0.3	0.44	2.2	2.45	0.062
	B54	1919.99	71.84	0.483	12.61	3.14	0.037	0.78	0.98	2.35	2.76	0.111
	B39	1920.57	69.97	0.656	13.11	4.71	0.049	1.12	1.11	1.97	2.77	0.128
	B56	1920.73	72.45	0.29	12.09	3.79	0.055	0.76	0.68	2.27	2.9	0.094
	B57	1922.32	64.69	0.215	10.64	1.9	0.119	0.44	8.37	2.04	2.27	0.095
	B58	1927.73	73.1	0.42	12.57	3.05	0.034	0.71	0.59	1.93	3.04	0.096
	B59	1929.5	78.25	0.132	11.03	1.17	0.018	0.24	0.4	2.07	2.79	0.048
	B68	1938.24	76.53	0.327	11.22	2.06	0.02	0.47	0.45	1.84	2.61	0.068

续表 4

层位	样品号	深度(m)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Es ₃ ⁴ II	B69	1941.14	75.87	0.341	11.44	2.66	0.027	0.69	0.66	1.65	2.86	0.064
	B70	1943.95	71.61	0.647	12.27	4.8	0.075	1	0.86	1.48	3.07	0.121
	B71	1944.82	73.87	1.113	12.74	3.1	0.012	0.92	0.43	1.77	2.87	0.105
	B72	1946.49	70.74	0.941	13.58	4.28	0.029	1.17	0.66	2.03	2.98	0.173
	B73	1952.47	73.56	0.743	12.57	2.6	0.017	0.75	0.43	1.94	3	0.08
	B74	1955.53	50.86	0.495	9.07	2.52	0.107	0.92	16.16	1.79	2.17	0.111
	B75	1957.18	71.7	0.966	12.56	3.05	0.029	0.91	0.65	2.49	2.83	0.132
	B76	1959.07	69.23	0.907	11.99	4.68	0.035	1.08	0.72	1.88	2.89	0.103
	B77	1962.57	76.32	0.126	10.8	1.11	0.041	0.53	1.77	2.54	2.34	0.04
	B79	1966.18	68.76	0.117	10.32	0.99	0.077	0.33	7.85	2.1	2.71	0.06
	B80	1971.7	77.82	0.156	11.27	1.15	0.018	0.27	0.64	2.3	2.68	0.07
	B81	1980.12	74.82	0.466	10.82	4.08	0.041	0.77	0.78	1.71	2.87	0.264
	B61	1982.57	76.27	0.182	11.19	1.55	0.036	0.46	0.88	2.18	2.63	0.071
	B62	1989.3	74.03	0.87	12.62	2.68	0.015	0.7	0.36	1.57	2.93	0.075
	B63	1993.16	62.32	1.253	14.88	7.58	0.054	2.07	0.88	1.74	2.66	0.128
	B64	1994.9	64.76	0.937	14.7	5.91	0.05	1.64	0.61	1.76	2.88	0.101
	B65	1995.22	74.16	0.915	12.06	1.79	0.027	0.52	0.85	2.05	2.59	0.132
	B66	1999.38	73.46	0.372	13.09	2.98	0.029	0.76	0.66	2.07	3.02	0.089
	B67	2002.59	76.97	0.149	11.11	1.21	0.019	0.29	0.55	2.19	2.76	0.068

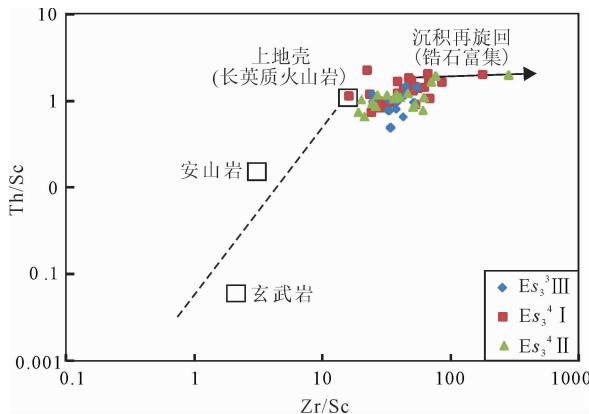


图 6 沈检 5 井沙三段 Zr/Sr-Th/Sc 判别图

Fig. 6 Zr/Sr-Th/Sc discrimination diagram of Es₃ in well well Shenjian 5

Pl-Ksp 线的交点反映样品的源岩成分与花岗闪长岩相近,且趋势线较好地指向黏土矿物,说明源区的化学风化主要以花岗闪长岩源岩中的斜长石向黏土矿物转化为主(Fedo et al., 2003)。图中的化学风化趋势线相对理想风化线发生右倾,可能与成岩作用或钾交代作用有关。由 Es₃⁴ II 至 Es₃³ III 期间,化学风化趋势线逐渐接近花岗闪长岩的理想趋势线,说明随着沉积的进行,高岭石的伊利石化和斜长石的钾交代作用逐渐减弱(图 9)。样品的 CIA 值总体在 48.78~68.60 之间,平均 60.54,反映源区所经历的化学风化作用较弱,也可能经历了较强烈的构造运动(Zhang Ni et al., 2012b)。Es₃⁴ II、Es₃⁴ I 至 Es₃³ III 的 CIA 平均值逐渐降低,分别为 60.72、60.57

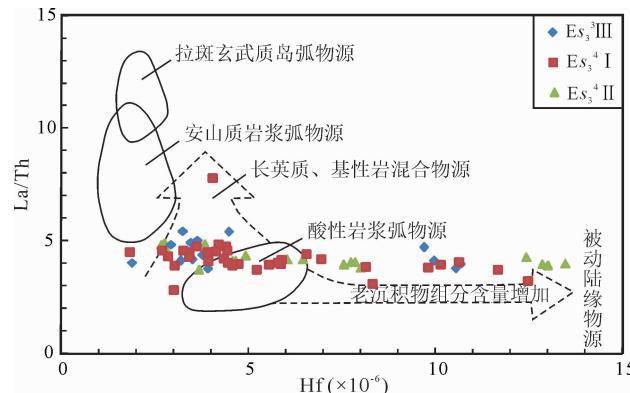


图 7 沈检 5 井沙三段 Hf-La/Th 判别图

Fig. 7 Hf-La/Th discriminant diagram of Es₃ in well Shenjian 5

和 60.24,说明化学风化作用可能在逐渐减弱。

稀土和微量元素也可以较好地反映源区的风化程度。稀土元素中的 $(La/Yb)_N$ 值较小时说明较多重稀土元素迁移并相对富集于当前沉积物中,即当前沉积物在沉积过程中经历了较高的风化作用或是经过了较长距离的搬运(Zhang et al., 2014; Gorty, 1996)。样品中的 $(La/Yb)_N$ 值平均为 11.73,明显高于平均大陆上地壳(9.19),说明源岩的化学风化程度或搬运距离较小。在化学风化过程中,稳定的阳离子(如 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Zr^{4+} 等)被保存在风化产物中,而不稳定的阳离子(Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 等)往往流失,元素的丢失程度取决于化学风化强度。由于 Sr 元素通常富集于斜长石中,因此,斜长石的风化分解可导致母岩中 Sr 的流失以及 K 通过离子交换而进

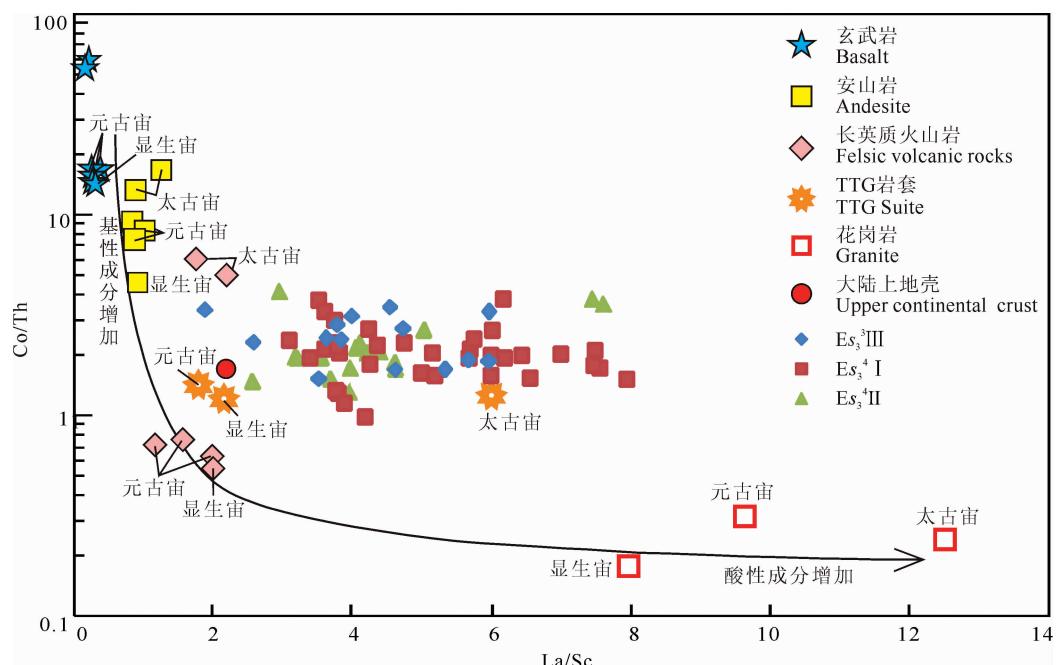


图8 沈检5井沙三段La/Sc-Co/Th判别图

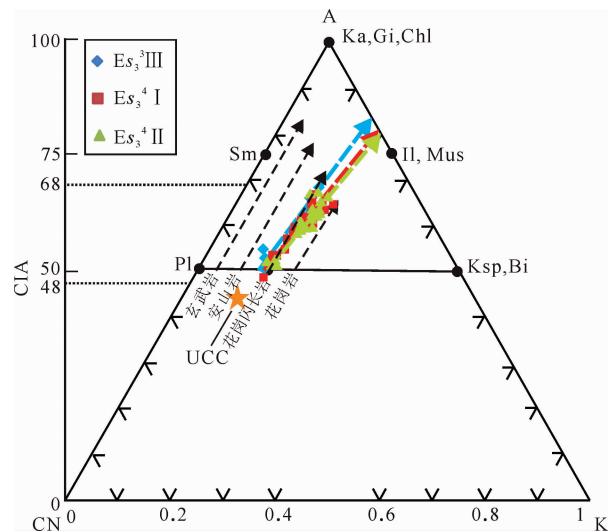
Fig. 8 La/Sc-Co/Th discrimination diagram of Es_3 in well Shenjian 5

图9 沈检5井沙三段A-CN-K判别图

Fig. 9 A-CN-K discriminant diagrams of Es_3 in well Shenjian 5

$A = n(Al_2O_3)$; $CN = n(CaO^+) + n(Na_2O)$; $K = n(K_2O)$; Ka—高岭石; Gi—水铝矿; Chl—绿泥石; Sm—蒙脱石; Il—伊利石; Mus—白云母; Pl—斜长石; Ksp—钾长石

$A = n(Al_2O_3)$; $CN = n(CaO^+) + n(Na_2O)$; $K = n(K_2O)$; Ka—kaolinite; Gi—bauxite; Chl—chlorite; Sm—montmorillonite; Il—illite; Mus—muscovite; Pl—plagioclase; Ksp—potash feldspar

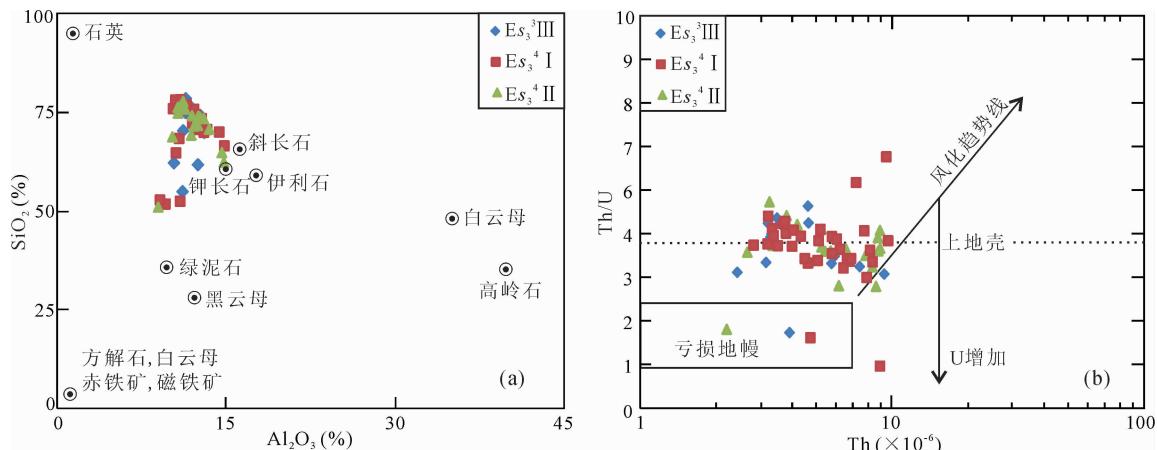
入黏土矿物。样品中的 Sr 元素相对大陆上地壳富集, $SiO_2-Al_2O_3$ 判别图显示样品中矿物成分主要在石英和斜长石之间变化, 也反映源区所经历的化学风化作用较弱(Cullers, 2000; 图 10a)。

源区的风化作用和沉积物的再旋回过程均可导致难溶的 U^{4+} 在风化作用过程中氧化为易溶的 U^{6+} , 导致 U 元素流失, 因此沉积岩的 Th/U 与风化作用强度呈正相关。具火山作用背景的沉积岩 Th/U 值 < 3.0 ; 当 Th/U 值 > 4.0 时, 沉积岩的形成与母岩的风化作用有关, 而当 Th/U 值 > 5.0 时, 表明母岩经历了明显的风化作用过程(McLennan et al., 1993)。Th-Th/U 图解显示, 样品的 Th/U 值差异较大, 主要集中在 1.8~6.4 之间, 但大部分接近上地壳平均值 3.8, 说明源区的化学风化程度整体较弱, 部分样品 Th/U 值 < 3.0 , 甚至接近亏损地幔, 受化学风化作用影响非常小(图 10b)。

综上所述, 大民屯凹陷的源区所经历的化学风化作用影响较弱, 可能是由于经历了强烈的构造运动后抬升地面并接受了快速剥蚀和沉积, 也可能是气候条件向着更适合于物理风化的方向演化。

4.3 古环境的恢复

由于岩层中元素的分配除了取决于元素本身的物理化学性质, 还受到古环境的密切影响。Kaufman et al. (1995) 通过大量数据分析研究认为 $Mn/Sr < 10$ 则表示样品基本未受到成岩蚀变的影响。样品中除了两个样品的 Mn/Sr 值高于 10, 其他所有样品 Mn/Sr 均小于 10, 平均 2.11, 说明样品未受到成岩作用的影响, 因此本文实验数据可代表原始沉积时期的元素地球化学特征值, 可用于沉积

图 10 沈检 5 井 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 判别图和 $\text{Th}\text{-Th}/\text{U}$ 判别图Fig. 10 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Th}\text{-Th}/\text{U}$ discriminant diagrams of Es_3 in well Shenjian 5

环境分析。在相对潮湿的气候条件下,沉积岩中的喜湿性元素 Fe、Al、V、Ni、Ba、Zn 和 Co 等含量较高;而在干燥气候条件下由于水分的蒸发,水介质的碱性增强,喜干性元素 Na、Ca、Mg、Cu、Sr 和 Mn 被大量析出形成各种盐类沉积在水底,所以它们的含量相对增高(Wang Liangchen et al., 1996)。

为了选取具有代表性的元素或元素比值来分析沈检 5 井元素分布的纵向变化,本文根据“聚类重新标定距离”将样品中距离小于 15 的主量元素和微量元素分为 4 组(①、②、③、④)。②组又可按距离小于 10 进一步分为②-1 和②-2 组。Fe、Al、V、Ni 和 Co 同属于相关性较高的②-1 组,所以它们之间的变化趋势是极其相似的,为避免重复,从②-1 组中挑选 Ni 和 Al 为代表,与②-2 组中的 Zn 进行对比,显示它们的变化趋势非常相似,符合喜湿性元素的分布规律(图 11)。同样,喜干性元素 Na、Ca、Sr 和 Mn 同属于相关性较高的③组,从中挑选 Mn 为代表。Mn 的变化趋势与喜湿性元素 Ni、Al 和 Zn 均相反,符合喜干性元素的分布规律。

根据上述相关性分析,选取 10 种元素和元素比值的纵向变化进行古环境的恢复(图 3)。Mn 在湖水中常以 Mn^{2+} 稳定存在,只有当湖水强烈蒸发而使 Mn^{2+} 浓度饱和时,它才会大量沉淀,从而在岩石中显示高值。这高值应是炎热干旱气候的标志,而平稳变化的低值区则表明较为持续的温湿或半干旱气候(Zhang Tianfu et al., 2016)。样品中 Mn 含量较高,由 $\text{Es}_3^4 \text{ II}$ 至 $\text{Es}_3^3 \text{ III}$ 的 Mn 含量分别为 311.96×10^{-6} 、 399.77×10^{-6} 、 794.80×10^{-6} ,说明气候环境干热,且干热程度加剧。元素比值能更好地反映古气候变化,比如喜干性元素 Sr 和喜湿型元素 Cu

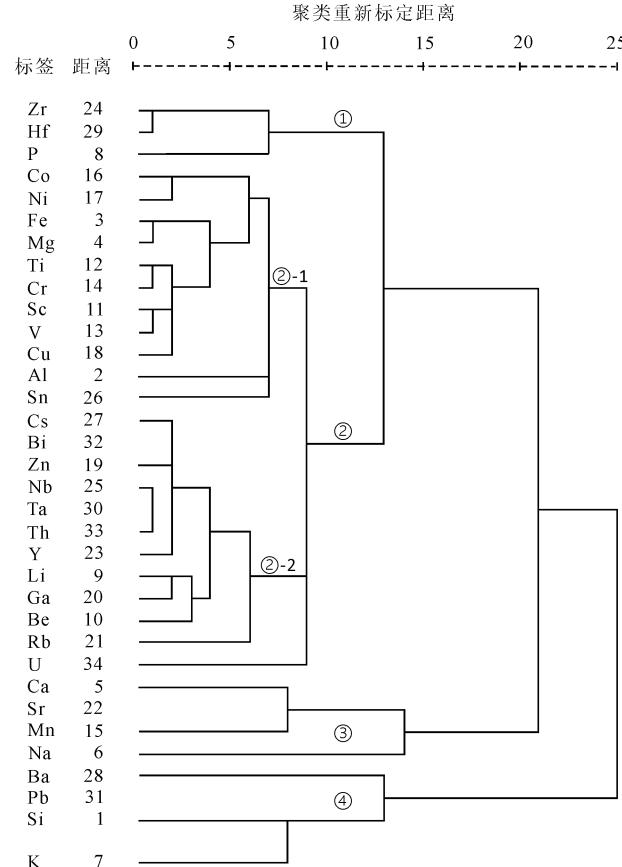


图 11 沈检 5 井沙三段碎屑岩主量和微量元素聚类分析图

Fig. 11 Cluster analysis of major and trace elements of clastic rocks from Es_3 in well Shenjian 5

的质量分数比值 Sr/Cu 值通常可以指示古气候的变化,一般 $1 < \text{Sr}/\text{Cu} < 10$ 指示温湿气候, $\text{Sr}/\text{Cu} > 10$ 指示干热气候(Fan Yuhai et al., 2012)。样品的 Sr/Cu 值差异明显,介于 $5.44 \sim 105.3$ 之间,大部分样品 Sr/Cu 值 > 10 ,平均 21.77 ,说明沙三段沉积时期研究区以干热气候为主,但期间出现 7 次气候干

热明显的波动。Rb、Sr 离子半径不同,离子半径较大的 Rb 元素容易在温湿条件下被黏土吸附富集,Sr 元素一般则是在偏干旱时沉积,所以温湿环境下 Rb/Sr 值呈高值(Li Minglong et al., 2019)。样品的 Rb/Sr 值很小,介于 0.13~0.71 之间,平均 0.46,说明气候干热,但有明显气候波动,波动情况与 Sr/Cu 值变化一致,说明干热现象突然明显。整体而言, $E_{s_3}^4$ II- $E_{s_3}^4$ I 至 $E_{s_3}^3$ III 的 Rb/Sr 平均值逐渐减小,分别为 0.49、0.48 和 0.42,显示该区气候的干热程度逐渐加强(图 3)。

MgO/CaO 值是气候变化的良好指示剂。样品中的主量元素以 SiO_2 为主,平均 71.43%,其次为 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O ,平均分别为 12.06%、3.09%、2.78%、1.96%,较高的 K_2O 和 Na_2O 含量表明易溶性盐类如钠盐和钾盐等参与了沉淀,因此, MgO/CaO 低值指示干热气候,高值指示温湿气候(Zhou Changyong et al., 2014; Lin Chunming et al., 2019)。样品的 MgO/CaO 值较低,但差异较大,介于 0.04~2.80 之间,平均 1.07,说明该区古气候变化差异较大。 $E_{s_3}^4$ II- $E_{s_3}^4$ I 至 $E_{s_3}^3$ III 的 MgO/CaO 平均值分别为 1.18、1.00 和 1.10,整体而言,呈逐渐减小的趋势,说明古气候干热程度增加。Sr/Cu 值、Rb/Sr 值与 MgO/CaO 值的纵向变化波动情况基本一致,说明 $E_{s_3}^4$ II ~ $E_{s_3}^3$ III 沉积时期,大民屯凹陷的古气候整体以干热为主,期间更是出现 7 次明显的干热加重。整体而言,随着沉积的进行,干热程度整体呈增强趋势。上述元素比值的波动情况与 CIA 指数的波动也很一致,即当气候变得更为干热时,元素比值的波动异常区域对应着 CIA 的低值区域,指示源区的化学风化强度直接受沉积期古气候的影响(图 3)。

Sr/Ba 值是判断海陆沉积相和盐度的有效指标。 Sr/Ba 值 < 0.6 代表陆相淡水沉积,0.6 < Sr/Ba 值 < 1.0 代表半咸水的海陆过渡相沉积, Sr/Ba 值 > 1.0 代表海相(咸化湖泊)咸水沉积(Tong Jinnan, 1997; Wang Aihua et al., 2020)。样品的 Sr/Ba 值介于 0.03~0.73 之间,平均 0.24,指示 $E_{s_3}^4$ II- $E_{s_3}^3$ III 沉积时期古湖泊中主要为淡水。由图 3 可见, Sr/Ba 的高值对应着 Sr/Cu 的高值、Rb/Sr 的低值、 MgO/CaO 的低值和 CIA 的低值,说明在 $E_{s_3}^4$ II 至 $E_{s_3}^3$ III 沉积时期,古湖泊的盐度虽然整体较低,但会受古气候的密切影响(图 3)。

Hatch et al. (1992) 指出,根据 $V/(V+Ni)$ 值可判别沉积环境: $V/(V+Ni) < 0.46$ 代表氧化环

境; $0.46 < V/(V+Ni) < 0.6$ 指示水体分层弱,为贫氧环境或弱还原环境;而 $V/(V+Ni) > 0.6$ 指示厌氧环境或还原环境。样品中的 $V/(V+Ni)$ 值介于 0~0.71 之间,平均 0.58(图 3)。说明研究区沉积环境以弱还原环境为主,沙三段沉积时期的湖水较浅,与前述的沉积相特征描述吻合,具体表现为水下分流河道砂岩以发育块状层理及递变层理为主,水下分流间湾沉积物以发育小型波状层理、透镜状层理及水平层理为主,分流间湾生物扰动发育。

本文认为,源区的化学风化程度、古湖泊的盐度和氧化还原程度的变化均与古气候的变化一致,这与研究区的构造特点有关。大民屯凹陷中部的静安堡-东胜堡构造带是一个四周被断层所夹持的背斜构造,构造不是很复杂,所以研究区控制元素分配的主要原因是古气候,从而决定了大民屯凹陷的化学风化程度、古湖泊的盐度和氧化还原程度等一系列古环境特征。

4.4 构造背景讨论

REE 特征参数可有效地指示不同构造背景下杂砂岩的地化特征。 Eu 的负异常表明母岩多可能为酸性火山岩或花岗岩沉积物,主要来自于大陆岛弧的构造背景。通过与特征参数的综合对比发现,样品的 La 、 Ce 、 ΣREE 、 δEu 、 $LREE/HREE$ 值与大陆岛弧接近, La/Yb 、 $(La/Yb)_N$ 值与大陆岛弧和被动大陆边缘均接近,说明研究区碎屑岩构造背景以大陆岛弧为主,其次为被动大陆边缘。值得注意的是,由 $E_{s_3}^4$ II 至 $E_{s_3}^3$ III 地层,以上各 REE 特征参数值逐渐趋近大陆岛弧特征,即随着该地区沉积的进行,其母岩的构造背景由大陆岛弧和被动大陆边缘共存逐渐过渡为以大陆岛弧为主(表 1)。

根据 Bhatia et al. (1986) 所建立的微量元素 Th-Sc-Zr/10 判别图显示,样品大部分落入大陆岛弧区域,少部分落入被动大陆边缘。这与 REE 特征参数判定的结果相一致(图 12a)。主量元素判别图显示,投点主要落在被动大陆边缘和大陆岛弧区域内。个别样品落在其他区域内,说明源岩在沙三段沉积时期发生了混源,尤其是在 $E_{s_3}^4$ II 和 $E_{s_3}^4$ I 时期,构造背景较为复杂。而 $E_{s_3}^3$ III 时期的物源相对简单(图 12b)。

辽河中新生代坳陷属渤海湾大陆裂谷盆地的一部分,太平洋板块自中生代开始不断向中国大陆俯冲、碰撞,引起大陆深部上地幔物质的运动,形成区域性隆起的构造背景。晚侏罗世时期(140 Ma),太平洋板块 NW 向欧亚板块俯冲,出现西太平洋典

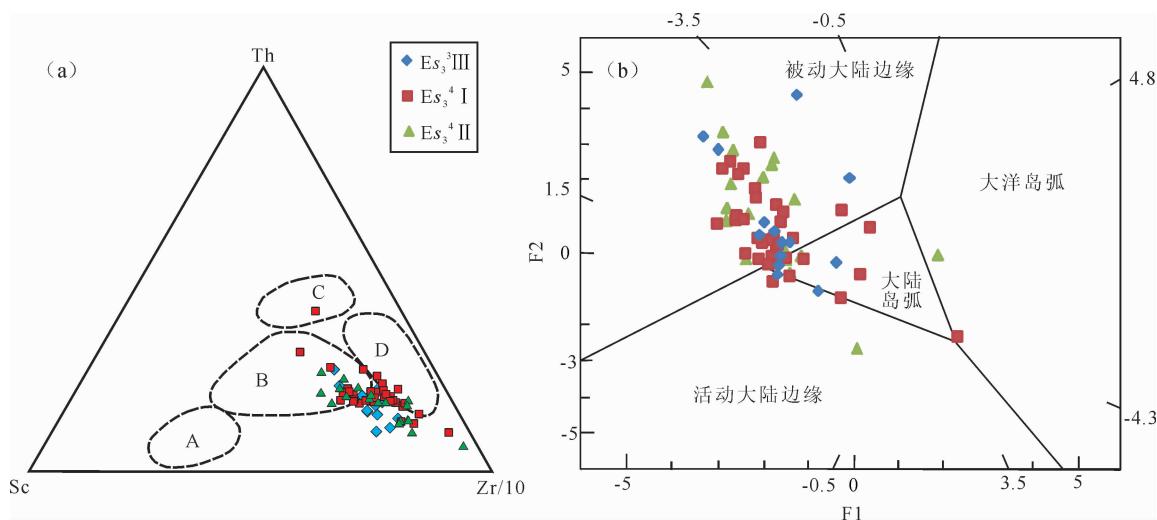


图 12 大民屯凹陷构造背景判别图

Fig. 12 Structural background of the Damintun sag

A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘; $F1 = (-1.773\text{TiO}_2) + (0.607\text{Al}_2\text{O}_3) + (0.760\text{Fe}_2\text{O}_{3T}) + (-1.500\text{MgO}) + (0.616\text{CaO}) + (0.509\text{Na}_2\text{O}) + (-1.224\text{K}_2\text{O}) + (-9.090)$; $F2 = (0.445\text{TiO}_2) + (0.070\text{Al}_2\text{O}_3) + (-0.250\text{Fe}_2\text{O}_{3T}) + (-1.142\text{MgO}) + (0.438\text{CaO}) + (1.475\text{Na}_2\text{O}) + (1.426\text{K}_2\text{O}) + (-6.861)$

A—Oceanic island arc; B—continental island arc; C—active continental margin; D—passive continental margin; $F1 = (-1.773\text{TiO}_2) + (0.607\text{Al}_2\text{O}_3) + (0.760\text{Fe}_2\text{O}_{3T}) + (-1.500\text{MgO}) + (0.616\text{CaO}) + (0.509\text{Na}_2\text{O}) + (-1.224\text{K}_2\text{O}) + (-9.090)$; $F2 = (0.445\text{TiO}_2) + (0.070\text{Al}_2\text{O}_3) + (-0.250\text{Fe}_2\text{O}_{3T}) + (-1.142\text{MgO}) + (0.438\text{CaO}) + (1.475\text{Na}_2\text{O}) + (1.426\text{K}_2\text{O}) + (-6.861)$

型的沟-弧-盆体系(Maruyama et al., 1997) 和 NNE 向的隆起与坳陷间列的盆-山体系。早白垩世时期(120 Ma),太平洋板块开始沿 NNW 向欧亚板块俯冲,俯冲角度的变化产生弧后扩张,郯庐断裂发生左行平移,兰聊断裂右行走滑,断层深切岩石圈并控制了渤海湾盆地的火山喷发和岩浆活动(Wang Peng et al., 2012),正是该时期的板块俯冲造成的一系列火山活动使研究区具有大陆岛弧构造背景。晚始新世全球板块运动事件发生之前,太平洋板块沿 NNW 向向亚洲大陆俯冲中的后撤作用导致中国大陆东部海域的裂陷盆地发育,诱使深部热物质上涌(Ren Jianye, 2018)。事件发生后,沙三段开始沉积,同时太平洋板块变为 NWW 向俯冲,造成郯庐断裂和兰聊断裂的右旋基底走滑,使处于两条断裂重叠部位的渤海湾盆地以斜向拉分盆地形式伸展,从而造成大民屯凹陷的沙三段除具有大陆岛弧构造背景外,还具有被动大陆边缘构造背景。

稀土微量元素特征及其判别图显示,大民屯凹陷沙三段的母岩主要来自长英质火山岩和太古宙 TTG 岩系,受到少量大陆岛弧中基性岩浆的影响,化学风化作用较弱。水下分流河道砂岩粒度较粗的沉积相特征和元素分析结果显示物源以近源为主。受辽河坳陷构造环境影响,大民屯凹陷于始新世进

入强烈断陷期,导致基底岩系发生变形并形成一系列地堑、半地堑和地垒构成的基底块断系统,古近系下部沉积盖层多卷入基底断裂中(Meng Weigong, 2006)。因此研究区源岩曾在经历强烈的构造运动后抬升地面并接受了快速剥蚀和沉积。研究区地质概况显示,大民屯凹陷位于辽河坳陷的东北端,凹陷周边分布的太古宇基底岩石主要为混合岩、混合花岗岩、混合片麻岩和浅粒岩等(图 1d)。沉积相研究表明,沙三段时期的碎屑岩主要来自凹陷的 NE 方向,由图可见,研究区的 NE 方向主要分布太古宇混合花岗岩和混合片麻岩。由于经历了多期次构造运动的改造,大民屯凹陷中生代地层中的中酸性火山岩也分布广泛,晚三叠世的中酸性岩浆岩脉的裂缝极为发育(Zhu Yixiu et al., 2018)。早白垩世时期板块俯冲过程中的弧后扩张又为大民屯凹陷提供了钙碱性的中基性幔源物质(Wu Tuoyu et al., 2014)。本文认为,在太平洋板块向欧亚板块俯冲的大背景下,大民屯凹陷沙三段的物源较为复杂,主要来自太古宇变质岩基底中的混合花岗岩和混合片麻岩,以及中生代多期次构造运动过程中生成的中酸性火成岩,同时受中生代晚期幔源物质的影响。

5 结论

(1) 大民屯凹陷沙三段源区的化学风化程度较

弱,古气候以干热为主且干热程度逐渐增强,古湖泊的水体盐度较低,以弱还原环境为主。古气候是控制沙三段元素分配的主因,这与研究区的沉积环境和较为封闭的构造环境有关。

(2)大民屯凹陷沙三段同时具有大陆岛弧和被动大陆边缘构造背景,与晚侏罗世至晚始新世期间太平洋板块向欧亚板块俯冲过程中的反复有关,在此期间,源岩曾在经历强烈的构造运动后抬升地面并接受了快速剥蚀和沉积。

(3)大民屯凹陷沙三段的母岩主要来自大陆上地壳的长英质火山岩和太古宙的古老岩石。结合地质概况和构造背景,本文认为具体物源为太古宇变质岩基底中的混合花岗岩和混合片麻岩以及中生代多期次构造运动过程中生成的中酸性火成岩,同时受中生代晚期的幔源物质影响。

致谢:岩芯观察和研究过程中得到了辽河油田樊佐春、蔡超、郑阳等协助和支持,实验测试在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室进行,得到有关老师的帮助,在此一并致以衷心的感谢!

References

- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Province and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45: 97~113.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181~193.
- Cullers R L. 2000. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, 51: 181~203.
- Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, Yang Xianchao, Feng Yangwei. 2012. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: a case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin. *Geology in China*, 39(2): 382~389 (in Chinese with English abstract).
- Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 277~303.
- Gorty G H. 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 107~118.
- Hatch J R, Leven 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. *Chemical Geology*, 99: 21~24.
- Kaufman A J, Knoll A H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotope composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Research*, 73: 27~49.
- Li Minglong, Chen Lin, Tian Jingchun, Zhang Deshu, Xu Keyuan, Fang Xilin, Cao Wensheng, Zhao Jun, Ran Zhongxi. 2019. Paleoclimate and paleo-oxygen evolution during the Gucheng Period-early Nantuo Period of Nanhua System in the Zouma area, West Hubei: evidence from elemental geochemistry of fine clastic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 93(9): 2158~2170 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoguang, Liu Xingguo, Li Jinpeng, Tian Zhi. 2019. Comprehensive evaluation and exploration practice of Sha 4 lacustrine shale oil in Damintun sag, Liaohe depression. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 636~648 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhixu. 2020. Study on reservoir distribution characteristics of Shen 232 Block in Damintun sag. *Modern Chemical Research*, 3: 70~71 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chunming, Wang Bingjie, Zhang Xia, Zhang Ni, Jiang Kaixi, Huang Shuya, Cai Mingjun. 2019. Geological characteristics and paleoenvironmental significance of the Paleogene lacustrine dolomite in the Beitang sag, Bohai Bay Basin. *Geological Journal of China Universities*, 25(3): 377~388 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chunming. 2019. *Sedimentary Petrology*. Beijing: Science Press, 1~399 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jialin, Xue Ying, Qi Xianyou, Yan Hongxing, Liu Yan. 2017. Oil change characteristics in later stage of water injection development for high pour point oil in Shen84-An12 Block. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 24(4): 136~141 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama S. 1997. Pacific-Type Orogeny Revisited: Miyashiro-type orogeny proposed. *The Island Arc*, 6(1): 91~120.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295~303.
- Meng Weigong. 2006. Thereseach on distribution and formation regularity of oil and gas pool in the complicated slope of faulted basin. Southwest Petroleum University, 1~181 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jianye. 2018. Genetic dynamics of China offshore Cenozoic basins. *Earth Science*, 43(10): 3337~3361 (in Chinese with English abstract).
- Riccardo A M L, Massimo M, Leone M. 2009. Potassic and ultrapotassic magmatism in the circum-Tyrrhenian region: Significance of carbonated pelitic vs. pelitic sediment recycling at destructive plate margins. *Lithos*, 113(1): 230~249.
- Rudnick R, Gao Shan. 2003. Composition of the Continental Crust. Oxford, 1~64.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 94(4): 632~633.
- Tong Jinnan. 1997. The middle Triassic environstratigraphy of central-south Guizhou, SW China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~128 (in Chinese with English abstract).
- Wang Aihua, Ye Siyuan, Liu Jiankun, Ding Xigui, Li Hualing, Xu NaiCen. 2020. Discrimination between marine and terrestrial sedimentary environments by the selectively extracted Sr/Ba Ratio: A case of sediments in the Yellow River delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38: 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liangchen, Zhang Jinliang. 1996. *Sedimentary Environment and Facies*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1~273 (in Chinese without English abstract).
- Wang Peng, Liang Jianshe, Zhao Zhigang, Zhang Jinwei. 2012. Diaoyu Islands folded-uplift belt evolution characteristics and its importance on the hydrocarbon exploration in east China Sea Basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 26(6): 10~14 (in Chinese without English abstract).
- Wu Tuoyu, Fu Yongtao. 2014. Cretaceous deepwater lacustrine sedimentary sequences from the Northernmost South China Block, Qingdao, China. *Journal of Earth Science*, 25(2): 241~251.
- Wu Yi. 2019. Consideration and suggestion on development technology for Liaohe oilfield. *Special Oil and Gas Reservoirs*,

- 25(6): 96~100(in Chinese with English abstract).
- Yang Deqiang. 2020. Analysis on the lithology and reservoir conditions of Archaeozoic buried hill in Damintun depression. Exploration and Development, 27(1): 95~88(in Chinese with English abstract).
- Ye Xingshu, Gao Haihong, You Jianjun, Zhuang Sheng, Yuan Guosheng. 2012. Sedimentary characteristics and lithologic reservoir prediction in the Es₃ Member in the western slope of Damintun depression. Mineralogy and Petrology, 32(1): 82~88(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ni, Lin Chunming, Zhou Jian, Chen Shunyong, Zhang Meng, Liu Yurui, Dong Guiyu. 2012a. Geochemical characteristics of the 1st Member of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou depression of the North Jiangsu Basin, and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 86(2): 269~279(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ni, Lin Chunming, Zhou Jian, Chen Shunyong, Liu Yurui, Dong Guiyu. 2012b. REE characteristics of the 1st Member of Eocene Dainan Formation in Gaoyou depression of North Jiangsu Basin, and its significance in provenance instruction. Geological Review, 58(2): 369~378(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ni, Lin Chunming, Zhang Xia. 2014. Petrographic and geochemical characteristics of the Paleogene sedimentary rocks from the North Jiangsu Basin, Eastern China: Implications for provenance and tectonic setting. Mineralogy and Petrology, 108: 571~588.
- Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun, Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Ma Hailin, Lu Chao, Yang Cai, Guo Genwan. 2016. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3454~3472(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenwei. 2019. Microcosmic characteristics of fine-grained sedimentary reservoirs and its application——By taking S352 well in Anfutun area of Damintun sag as an example. Petroleum Geology and Engineering, 33(4): 11~15 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Changyong, Zhang Qiyue, Lu Tao, Hu Shixue, Xie Tao, Wen Wen, Huang Jinyuan. 2014. Geochemical characteristics and sedimentary environments of the fossiliferous layers of middle Triassic Luoping biota, Yunnan Province. Geological Review, 60(2): 285~298(in Chinese with English abstract).
- Zhu Huayu, YuZiliang. 2013. On the sedimentary system of Es₄ in Damintun sag. Journal of Oil and Gas Technology, 35(4): 11~16(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yixiu, Shan Junfeng, Wang Huan, Cai Guogang. 2018. Petrological characteristics of Archen metamorphic reservoir in central area of Damintun depression, Liaohe. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 48(5): 1304~1315 (in Chinese with English abstract).
- (9): 2158~2170.
- 李晓光, 刘兴周, 李金鹏, 田志. 2019. 辽河坳陷大民屯凹陷沙四段湖相页岩油综合评价及勘探实践. 中国石油勘探, 24(5): 636~648.
- 李之旭. 2020. 大民屯凹陷沈 232 块储层分布特征研究. 当代化工研究, 3: 70~71.
- 林春明, 王兵杰, 张霞, 张妮, 江凯禧, 黄舒雅, 蔡明俊. 2019. 渤海湾盆地北塘凹陷古近系湖相白云岩地质特征及古环境意义. 高校地质学报, 25(3): 377~388.
- 林春明. 2019. 沉积岩石学. 北京:科学出版社, 1~399.
- 刘家林, 薛莹, 齐先有, 同红星, 刘岩. 2017. 沈 84—安 12 块高凝油注水开发后期原油变化特征. 特种油气藏, 24(4): 136~141.
- 孟卫工. 2006. 断陷盆地复杂斜坡带油气分布与成藏规律研究——以大民屯凹陷西部斜坡带为例. 西南石油大学. 1~181.
- 任建业. 2018. 中国近海海域新生代成盆动力机制分析. 地球科学, 43(10): 3337~3361.
- 童金南. 1997. 黔中—黔南中三叠世环境地层学. 武汉:中国地质大学出版社, 1~128.
- 王爱华, 叶思源, 刘建坤, 丁喜桂, 李华玲, 许乃岑. 2020. 不同选择性提取方法锶钡比的海陆相沉积环境判别探讨——以现代黄河三角洲为例. 沉积学报, 38: 1~15.
- 王良忱, 张金亮. 1996. 沉积环境与沉积相. 北京:石油工业出版社, 1~273.
- 王鹏, 梁建设, 赵志刚, 张锦伟. 2012. 钓鱼岛隆褶带演化特征及其对东海盆地油气勘探的意义. 2012. 石油地质与工程, 26(6): 10~14.
- 武毅. 2019. 辽河油田开发技术思考与建议. 特种油气藏, 25(6): 96~100.
- 杨德强. 2020. 大民屯凹陷太古宇潜山岩性与储层条件分析. 石化技术, 27(1): 95~88.
- 叶兴树, 高海红, 尤建军, 庄升, 范国胜. 2012. 大民屯凹陷西斜坡沙三段沉积特征及岩性油气藏预测. 矿物岩石, 32(1): 82~88.
- 张妮, 林春明, 周健, 陈顺勇, 张猛, 刘玉瑞, 董桂玉. 2012a. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组一段元素地球化学特征及其地质意义. 地质学报, 86(2): 269~279.
- 张妮, 林春明, 周健, 陈顺勇, 刘玉瑞, 董桂玉. 2012b. 苏北盆地高邮凹陷始新统戴南组一段稀土元素特征及其物源指示意义. 地质论评, 58(2): 369~378.
- 张天福, 孙立新, 张云, 程银行, 李艳锋, 马海林, 鲁超, 杨才, 郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义. 地质学报, 90(12): 3454~3472.
- 张文伟. 2019. 细粒沉积岩储层微观特征研究方法及应用——以大民屯凹陷安福屯地区 S352 井为例. 石油地质与工程, 33(4): 11~15.
- 周长勇, 张启跃, 吕涛, 吕涛, 胡世学, 谢韬, 文艾, 黄金元. 2014. 云南中三叠世罗平生物群产出地层的地球化学特征和沉积环境. 地质论评, 60(2): 285~298.
- 朱华钰, 喻梓靓. 2013. 大民屯凹陷中部沙四段沉积体系研究. 石油天然气学报, 35(4): 11~16.
- 朱毅秀, 单俊峰, 蔡国刚. 2018. 辽河大民屯凹陷中央构造带太古宇变质岩储层岩性特征分析. 吉林大学学报(地球科学版), 48(5): 1304~1315.

参 考 文 献

- 范玉海, 屈红军, 王辉, 杨县超, 冯杨伟. 2012. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用: 以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例. 中国地质, 39(2): 382~389.
- 李明龙, 陈林, 田景春, 郑德顺, 许克元, 方喜林, 曹文胜, 赵军, 冉中夏. 2019. 鄂西走马地区南华纪古城期—南沱早期古气候和古氧相演化: 来自细碎屑岩元素地球化学的证据. 地质学报, 93

Geochemical characteristics and its implications of the third Member of Paleogene Shahejie Formation from the Damintun sag, Liaohe depression

ZHANG Ni¹⁾, WU Yi^{*2)}, ZHANG Xia³⁾, HUANG Shuya³⁾, LI Tiejun²⁾,

ZHANG Xinpei²⁾, LIN Chunming³⁾, JIANG Kaixi³⁾, XIA Changfa³⁾

1) College of Material Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing, 211169;

2) Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning, 124010;

3) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023

* Corresponding author: liaoherwuyi@126.com

Abstract

Based on the geochemical data from the third Member of Shahejie Formation (E_{s_3}), from the well Shenjian 5 in the Damintun sag, the sedimentary environment, geological structural background, parent rocks and provenance are studied in detail. Results show that the parent rocks of E_{s_3} are felsic volcanic rocks from the upper continental crust and the Archaean rocks. The A-CN-K, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, and the Th-Th/U discrimination diagrams display the low degree of chemical weathering in the Damintun sag. Based on cluster analysis, the vertical distribution characteristics of 10 element ratios such as Sr/Cu , Sr/Ba and $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ values are selected to reconstruct the paleoenvironment in the study area. Paleoclimate of the sag is mainly dry-heat from $E_{s_3}^4$ II to $E_{s_3}^3$ III, with low salinity and weak restore environment in the ancient lake. It shows that the significant influence of paleoclimate on the elemental distribution in the study area is mainly related to the depositional environment and closed tectonic environment in E_{s_3} . The Damintun sag was situated in a tectonic background characterized by both continental island arc and passive continental margin, under the general background of subduction of the Pacific plate beneath the Eurasian plate in the late Jurassic-late Eocene stage. It is speculated that the sediments of E_{s_3} mainly came from the Archean migmatite and migmatite gneiss in the Archean metamorphic basement in this area and intermediate acid igneous rocks formed in the Mesozoic. The parent rocks were also affected by the volcanic activities in the late Eocene.

Key words: Liaohe depression; Damintun sag; provenance; geochemistry; the third Member of Shahejie Formation