

王萍, 王飞龙, 陈容涛. 黄河口凹陷南斜坡古近系沙一段古气候、物源及源区构造背景[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(11): 63-75.

WANG Ping, WANG Feilong, CHEN Rongtao. Paleoclimate, provenance, and tectonic setting of the First Member of the Paleogene Shahejie Formation in the southern slope of Huanghekou Sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(11): 63-75.

黄河口凹陷南斜坡古近系沙一段古气候、 物源及源区构造背景

王萍¹, 王飞龙², 陈容涛²

(1 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油实验中心, 天津 300452;

2 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

摘要:碎屑沉积岩的主微量元素记录了丰富的地球化学信息,可用于古气候、物源及构造背景的恢复。通过对黄河口凹陷南斜坡古近系沙河街组一段(沙一段, E₁s¹)碎屑沉积岩元素地球化学分析,探讨了沙一段沉积时期古气候、物源及构造背景。Th/Sc-Zr/Sc 图解和成分变异指数(ICV)表明,研究区沙一段物源为母岩风化后的首次沉积,成分成熟度较高;校正后的化学蚀变指数(CIA_{corr})和钾长石蚀变指数(PIA)表明沙一段物源经历了中等程度的风化作用,沙一段沉积时期气候温暖湿润;主、微量和稀土元素显示,沙一段物源主要表现为上地壳来源长英质火成岩的特征,具有明显的负 Eu 异常,主要来源于前寒武纪花岗岩类岩石和少量中基性混合物源;物源区具有活动大陆边缘和大陆岛弧的构造背景,较为复杂的构造背景与西太平洋板块向东亚大陆俯冲有关。

关键词:物源;古气候;构造背景;沙一段;黄河口凹陷

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.263

0 引言

碎屑沉积岩是物源区母岩风化形成的碎屑物质经过各种地质作用形成的,其成分主要受物源的原始成分控制^[1-3],通过碎屑沉积岩的元素组成能够反映物源区的母岩性质、构造背景和古气候条件,也记录了风化、分选、沉积和成岩作用^[2,4]。相比岩相学方法判别物源,地球化学方法在粗粒和细粒沉积岩中同样适用^[5],与粗粒沉积物相比,页岩和粉砂岩等细粒沉积物均质性好、元素比例均匀,具有与物源相似的化学成分,是更好的物源指示物^[6-7]。前人在物源和构造背景研究中,通过碎屑沉积岩的元素组成、含量和比值等提出了多种参数和判别图版,在砂岩和泥岩中均得到广泛应用。

渤海湾盆地发育了多种地层,岩石种类多样,盆地内隆起将各凹陷分割,沉积物源相对独立,凹陷以邻近的隆起为物源,搬运距离较短,各凹陷的沉积物源各不相同^[3,8]。前人研究认为,黄河口凹陷东洼沙一段物源为渤南低凸起和莱北低凸起出露的花岗岩、安山岩和凝灰岩^[9],靠近渤南低凸起的陡坡带物源以太古宙变质花岗岩为主,也存在古生界碳酸盐岩和中生代火成岩物源^[10]。研究区靠近莱北低凸起和垦东凸起,莱北低凸起及研究区基底主要为中生代大套的安山岩,局部含凝灰岩^[11]。有学者提出,莱北低凸起发育隐性逆冲物源,断层使底部古老的前寒武纪变质花岗岩出露成为物源,花岗岩物源的储层相比安山岩更加优质^[12]。垦东凸起物源区含太古界泰山群地层以及古生代和中生代多套地层^[13]。另外,研究区沙一、二段沉积期是火山活动的重要时期,多口井钻遇火山岩地层,主要为溢流相和火山通道相,岩性以玄武岩为主^[14-15]。地层的多样性和火山活动使物源存在多种可能性,本文通过对研究区碎屑沉积岩主微量元素分析,结

收稿日期: 2022-09-13

资助项目: 中海油“十三五”油气资源评价项目(yxky-2018-kt-01)

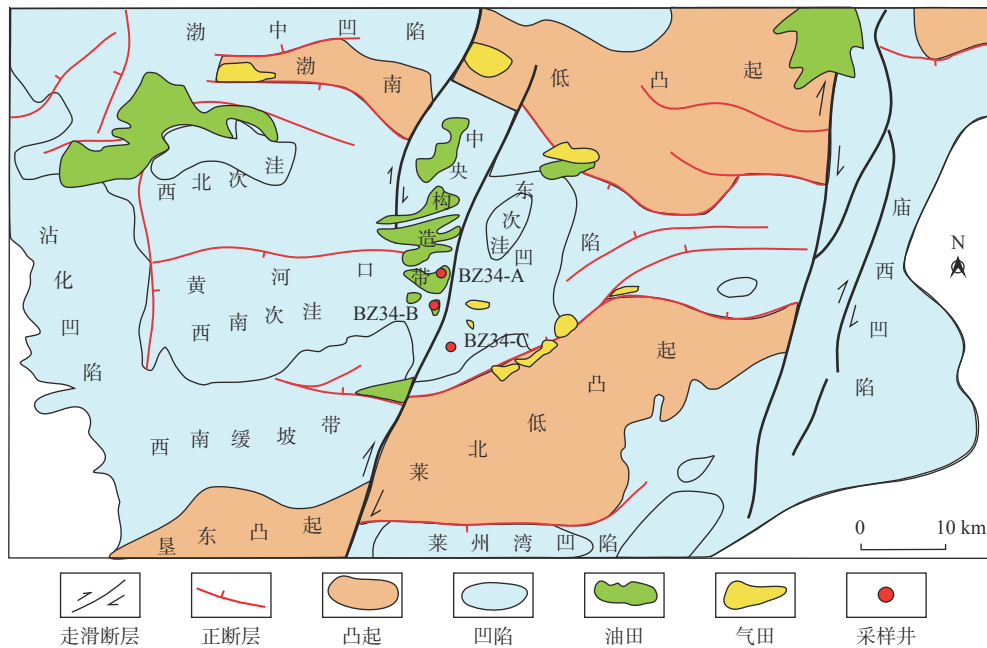
作者简介: 王萍(1997-),女,助理工程师,主要从事油气田勘探开发实验方面的研究工作. E-mail: 791976654@qq.com

合前人对构造演化和沉积相的研究,分析沙一段沉积岩的物源和源区构造背景,并对古气候进行恢复。

1 区域地质背景

黄河口凹陷位于渤中凹陷南部,北边为渤南低凸起,隔渤南低凸起与渤中凹陷相接,东南为莱

北低凸起,隔莱北低凸起与莱州湾凹陷相邻,西南为垦东凸起,凹陷东边与庙西凹陷相接,西边与沾化凹陷相接,凹陷总面积约为 3 300 km²[16](图 1)。发育近 EW 向正断层和 NNE 向的走滑断层,郯庐断裂纵穿整个凹陷的中部,在凹陷中部形成了中央构造带,并将凹陷切分为多个次洼^[11]。研究区位于南部的中央构造带附近,靠近莱北低凸起(图 1)。



底图据文献[17]修改

图 1 黄河口凹陷构造单元

Fig.1 Tectonic units of the Huanghekou Sag

黄河口凹陷是新生代发育的箕状凹陷,经历多期构造-沉积旋回^[16],北边为陡坡带,南边为缓坡带,呈现北陡南缓、西深东浅、凹中有隆的构造面貌^[17]。古近系地层发育较为完整,自下而上分别为孔店组、沙河街组和东营组,沙河街组自下而上可细分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段。孔店组、沙四段、沙三段和沙二段—东营组沉积时期分别对应 4 个裂陷期,新近系发育馆陶组、明化镇组和第四系平原组,属于裂后热沉降和新构造运动时期^[16]。沙一段主要发育辫状河三角洲沉积体系,岩性以砂岩和泥岩为主,储层物性较好^[18]。

2 样品与实验

本研究样品来自黄河口凹陷 BZ34-A、BZ34-B、BZ34-C 3 口井的沙一段岩芯,样品编号以 A、B、C

区分,共计 24 个样品,主要为泥岩和泥质粉砂岩。所有样品都进行了主、微量元素(包括稀土元素)测试分析,均由核工业北京地质研究院实验中心完成。主量元素分析采用 Axios-mAX 波长色散 X 射线荧光光谱仪进行测定,粉碎后的样品得到烧失量后,加入硝酸铵、氟化锂和少量溴化锂,混合后加入四硼酸锂熔融,制备玻璃样片并在 X 射线荧光光谱仪上测定,测试精度优于 5%,测试方法均遵循国标 GB/T 14506.28—2010。微量元素分析采用 ELEMENT XR 等离子体质谱仪进行测定,粉碎后的样品加入氢氟酸和硝酸加热到 190 °C 并恒温 24 h 进行消解处理,加入超纯水并蒸发至近干,再加入 2 mL(浓度为 6 mol/L)硝酸溶解,150 °C 加热 8 h,干燥后再加入 1 mL(浓度为 6 mol/L)硝酸溶解,稀释后并定容至 25 mL,使用等离子体质谱仪进行测定,测试精度优于 5%,测试方法遵循国标 GB/T 14506.30—2010。

3 实验结果

3.1 主量元素

主要氧化物含量详见表 1, 样品中氧化物以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, 砂岩中 SiO_2 含量最高(介于 68.32%~69.24%, 平均 68.78%), 泥岩中 SiO_2 含量较低(44.71%~60.79%, 平均 56.68%), 泥质粉砂岩介于二者之间(60.8%~66.74%, 平均 63.22%)。 Al_2O_3 在泥岩和粉砂岩均有较高的含量, 分别介于 14.93%~21.66%(平均 18.24%)和 13.43%~19.36%(平均 17.21%), 高于砂岩中 Al_2O_3 含量(均值 13.18%)。 Al_2O_3 主要赋存于黏土矿物中, 说明泥岩和泥质粉砂岩均含有较多的黏土矿物。 MgO 和 K_2O 在泥岩中的含量较高, Na_2O 和 CaO 在砂岩中含量较高。 样品中 MnO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量较低, 除个别泥岩中 TiO_2 含量 > 1% 以外, MnO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量普遍 < 1%。 沙一段样品主要氧化物相对上地壳平均组分(Upper continental crust, 简称 UCC)来看(图 2a), 泥岩和泥质粉砂岩主量元素分布特征较为一致, SiO_2 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 P_2O_5 普遍亏损, Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 相对富集; 砂岩除 SiO_2 富集以外, 其余主量元素均为亏损。 从元素地球化学划分来看(图 2d), 沙一段样品主要为页岩和杂砂岩, 2 个砂岩样品属于长石砂岩。 杂砂岩属于不成熟的沉积物, 含有大量物源碎屑, 能够保留物源区的化学成分^[19]。

3.2 微量和稀土元素

微量元素和稀土元素含量详见表 2。 微量元素中 Ba 含量最高, 为 $(728\sim 1660)\times 10^{-6}$, 平均 $1\ 151.2\times 10^{-6}$; 其次是 Sr, 含量介于 $(268\sim 475)\times 10^{-6}$, 平均 339×10^{-6} ; 泥岩、泥质粉砂岩及砂岩样品中的 Cr、Sr、Ba 相对上地壳均呈现富集, 含量差别不大且分布较为均匀(表 2, 图 2b)。 泥岩和粉砂岩的微量元素含量和分布较为相似, 而与砂岩存在较大差异, 砂岩中除 Cr 和 Ba 有较为明显的富集外, 其余微量元素均呈现不同程度的亏损(图 2b)。 在泥岩和泥质粉砂岩中的 Cr、Cu、Zn、Rb、Ba、Th 多为富集, 而 Co、Ni、U、Zr、Hf 多为亏损(图 2b)。

稀土元素使用球粒陨石进行标准化处理, 并对比了 UCC 分布模式。 沙一段泥岩中稀土元素总量

($\sum\text{REE}$)介于 $(206.07\sim 250.08)\times 10^{-6}$, 平均 229.05×10^{-6} ; 泥质粉砂岩 $\sum\text{REE}$ 为 $(140.65\sim 231.96)\times 10^{-6}$, 平均 208.25×10^{-6} ; 砂岩 $\sum\text{REE}$ 为 $(100.18\sim 113.71)\times 10^{-6}$, 平均 106.95×10^{-6} (表 2)。 相比 UCC 的稀土元素总量($\sum\text{REE}=146.37\times 10^{-6}$), 泥岩和泥质粉砂岩 $\sum\text{REE}$ 高于 UCC, 砂岩低于 UCC(图 2c)。 泥岩、泥质粉砂岩及砂岩样品具有相似的稀土元素配分模式, 与 UCC 配分模式整体一致, 轻稀土元素倾斜较大, 重稀土元素平缓(图 2c)。 所有样品轻稀土/重稀土元素(L/H)介于 9.55~12.30, 平均 11.27, La/Yb 介于 16.40~21.95, 平均 19.20, 表明样品轻稀土元素富集、重稀土元素亏损, 均出现负 Eu 异常(δEu 介于 0.61~0.80, 平均 0.69), 与上地壳($\delta\text{Eu}=0.63$)接近。

4 讨论

4.1 古气候

上地壳主要由斜长石、钾长石和石英组成^[23], 母岩在遭受风化过程中, 长石中的碱金属元素(如 Na、K、Ca)容易流失, 易风化形成相应的黏土矿物, 而 Al 活性较差, 长石中的 Na、K、Ca 元素的释放速率与风化强度相关^[24]。 NESBITT 和 YOUNG^[25] 在古元古代泥岩研究过程中提出, 化学蚀变指数 (Chemical index of alteration, 简称 CIA) 用于定量描述物源区的风化程度, 也被广泛用于古气候的研究。 其计算公式如下:

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100 \quad (1)$$

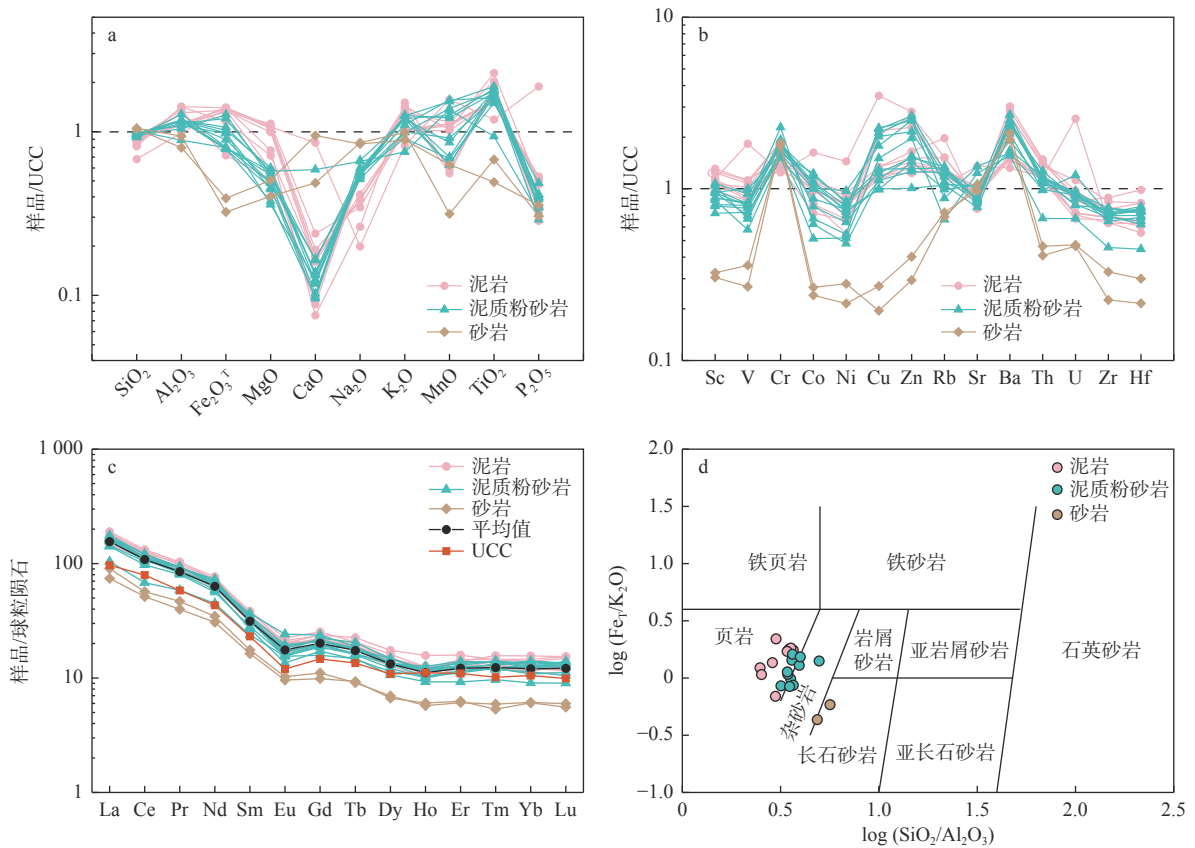
式中: 氧化物均以摩尔分数表示, CaO^* 仅代表硅酸盐矿物中的 CaO, 需扣除碳酸盐和磷酸盐中的 CaO。 MCLENNAN 等^[5] 提出了一种简化的方法计算 CaO^* , $\text{CaO}^* = \text{CaO} - 10/3\text{P}_2\text{O}_5$ 。 若计算结果中 $\text{CaO}^* < \text{Na}_2\text{O}$, 则 $\text{CaO}^* = \text{CaO}^*$; 若 $\text{CaO}^* > \text{Na}_2\text{O}$, 则 $\text{CaO}^* = \text{Na}_2\text{O}$ 。 另外, 在成岩过程中钾交代作用会影响 CIA 对风化程度和古气候的判断, 导致 CIA 计算结果偏低。 研究区样品在 A-CN-K (A= Al_2O_3 , CN= $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$, K= K_2O) 图上稍微偏离理论风化趋势线(红色箭头), 说明样品受较弱的钾交代作用影响, 可以通过对钾的校正进行恢复^[26], 校正 K_2O 表示为 $\text{K}_2\text{O}_{\text{corr}}$, 其计算公式如下:

$$\text{K}_2\text{O}_{\text{corr}} = [m \times \text{Al}_2\text{O}_3 + m \times (\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})] / (1 - m) \quad (2)$$

式中: m 代表母岩中 $\text{K}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} +$

表 1 沙一段主量元素含量及相关参数
Table 1 Content of major elements and related parameters of the E_{1s}¹

岩性	样品编号	主量元素/%											主量元素相关参数										
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	Fe ₂ O ₃	烧失量/%	ICV	ClA _{corr}	PIA	K ₂ O/ Na ₂ O	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	F1	F2	F3	F4
泥岩	B-2	53.62	21.56	6.28	1.69	0.316	1.02	5.1	0.041	0.871	0.079	2.5	3.78	9.32	0.71	80.31	88.60	5.00	2.49	0.02	1.22	0.72	0.02
	B-3	56.75	19.78	6.07	1.29	0.398	2.18	4.46	0.08	1.01	0.057	3.37	2.7	7.84	0.78	72.67	78.18	2.05	2.87	0.46	2.48	1.12	-0.42
	B-7	60.79	20.44	3.21	1.13	0.369	2.11	4.64	0.039	0.951	0.064	2.1	1.11	6.19	0.61	73.63	79.45	2.20	2.97	-1.53	3.44	2.76	0.70
	B-11	54.45	21.53	5.19	1.57	0.687	2.04	4.84	0.072	1.14	0.095	3.42	1.77	8.24	0.72	73.13	78.82	2.37	2.53	-0.17	3.12	1.85	0.72
	C-1	60.52	16.49	5.99	2.19	0.673	1.61	3.42	0.076	0.766	0.106	3.74	2.25	8.11	0.89	72.16	77.94	2.12	3.67	-1.50	-1.36	-0.02	0.66
	C-2	59.23	16.85	6.3	2.3	0.719	1.5	3.51	0.078	0.772	0.102	3.62	2.68	8.54	0.90	72.76	78.71	2.34	3.52	-1.31	-1.54	-0.22	0.68
粉砂岩	C-3	59	17.07	6.18	2.31	0.731	1.48	3.52	0.078	0.77	0.101	3.55	2.63	8.64	0.88	72.95	79.01	2.38	3.46	-1.28	-1.51	-0.21	0.72
	C-4	59.42	16.69	6.29	2.39	0.795	1.49	3.44	0.078	0.759	0.106	3.61	2.68	8.47	0.91	72.23	78.07	2.31	3.56	-1.42	-1.76	-0.30	0.81
	C-5	58.27	17.07	5.9	2.46	0.999	1.34	3.45	0.071	0.779	0.101	3.38	2.52	9.52	0.88	72.05	77.92	2.57	3.41	-1.52	-1.78	-0.16	1.20
	C-6	44.71	14.93	6.13	2.35	3.59	0.774	2.79	0.11	0.593	0.377	3.01	3.12	23.62	1.09	75.18	63.32	3.60	2.99	1.83	-1.90	-1.92	0.54
	A-1	63.62	17.62	4.41	0.788	0.52	2.19	3.08	0.048	0.746	0.097	2.14	2.27	6.79	0.67	70.69	76.80	1.41	3.61	0.80	1.11	-0.21	-1.57
	A-2	61.98	17.07	5.4	1.21	0.565	1.99	3.35	0.097	0.882	0.083	4.01	1.39	7.36	0.79	70.95	76.62	1.68	3.63	-0.08	0.51	0.10	-0.67
砂岩	A-3	65.02	16.54	4.37	0.978	0.493	2.13	3.38	0.064	0.792	0.077	2.72	1.65	6.08	0.74	70.13	75.34	1.59	3.93	-0.84	1.12	0.99	-0.66
	A-4	66.74	13.43	3.59	1.26	2.46	2.56	2.55	0.095	0.468	0.063	2.59	1	6.66	0.97	54.08	55.56	1.00	4.97	-0.66	0.98	1.04	-0.85
	B-1	62.97	15.8	5.7	1.14	0.58	2.2	3.73	0.109	0.807	0.07	3.79	1.91	6.77	0.90	68.47	72.30	1.70	3.99	-0.83	1.26	1.22	-0.83
	B-4	64.36	17.82	3.51	0.826	0.411	2.6	4.04	0.044	0.839	0.058	1.91	1.6	5.46	0.69	69.06	73.35	1.55	3.61	-1.27	3.28	2.71	-0.21
	B-5	63.03	17.72	4.01	1.07	0.429	2.23	4.08	0.088	0.913	0.071	2.84	1.17	6.24	0.72	70.88	75.67	1.83	3.56	-1.63	2.46	2.47	0.30
	B-6	64.43	17.58	3.5	0.999	0.4	2.32	4.04	0.06	0.897	0.069	2.54	0.96	5.7	0.69	70.45	75.10	1.74	3.66	-1.96	2.66	2.82	0.42
砂岩	B-8	61.43	19.36	3.62	1.07	0.699	2.07	4.23	0.049	0.892	0.069	2.31	1.31	6.44	0.65	71.37	76.62	2.04	3.17	-0.94	2.79	2.11	0.24
	B-9	61.28	17.82	4.58	1.32	0.555	2.1	4.26	0.085	0.866	0.079	3.25	1.33	6.93	0.77	70.97	75.55	2.03	3.44	-1.58	2.18	2.31	0.37
	B-10	63.02	17.95	3.57	1.2	0.687	2.23	4.23	0.044	0.886	0.082	2.29	1.28	6.06	0.72	69.67	73.90	1.90	3.51	-2.04	2.74	2.96	0.75
	B-11	60.8	17.78	4.78	1.26	0.504	2.14	4.23	0.107	0.942	0.08	3.63	1.15	7	0.79	71.04	75.67	1.98	3.42	-1.44	2.26	2.26	0.36
	B-12	68.32	12.11	1.76	1.11	3.97	3.27	3.01	0.044	0.246	0.071	1.55	0.21	5.94	1.11	46.60	41.60	0.92	5.64	-1.62	3.90	5.14	-0.19
	B-13	69.24	14.25	1.45	0.888	2.04	3.33	3.35	0.022	0.338	0.061	1.19	0.26	4.64	0.80	53.84	54.02	1.01	4.86	-2.06	4.04	4.66	-0.38



UCC 数据引自文献 [20]; 球粒陨石数据引自文献 [21]; 图 2d 底图据文献 [22] 修改

图 2 主要氧化物 UCC 标准化 (a)、微量元素 UCC 标准化 (b)、稀土元素球粒陨石标准化 (c) 和沙一段碎屑沉积岩地球化学分类 (d)

Fig. 2 Major oxide UCC standardization (a), UCC standardization of trace elements (b), standardization of rare earth element chondrites (c), and geochemical classification of clastic sedimentary rocks in the E_{1s}^1 (d)

K_2O), 可以通过 A-CN-K 图(图 3)风化趋势线反向延长交于钾长石和斜长石连接线后获得^[26]。

为了消除钾交代作用的影响, FEDO 等^[27]对原有 CIA 进行改进, 提出了斜长石蚀变指数 (Plagioclase index of alteration, 简称 PIA), 用于更加精准地评价物源的化学风化程度, 其计算公式如下:

$$PIA = (Al_2O_3 K_2O) / (Al_2O_3 K_2O + CaO^* + Na_2O) \times 100 \quad (3)$$

一般认为, 未经风化的母岩 CIA 和 PIA 接近于 50, CIA 为 50~60, PIA 为 50~69, 反映低等的风化程度和寒冷干燥的古气候; CIA 为 60~80, PIA 为 69~86, 反映中等的风化程度和温暖湿润的古气候; CIA 为 80~100, PIA 为 86~100, 则反映强烈的风化程度和炎热潮湿的古气候^[27-29]。

研究区沙一段泥岩 CIA_{corr} 为 72.05~80.31, 平均 73.71, PIA 为 63.32~88.6, 平均 78.00; 泥质粉砂岩 CIA_{corr} 为 54.08~71.37, 平均 68.98, PIA 为 55.56~76.80, 平均 73.54; 砂岩 CIA_{corr} 为 41.60~54.84, 平均 47.81。泥岩和泥质粉砂岩的 CIA_{corr} 和 PIA 明

显高于砂岩, 源区母岩风化搬运过程中, 受沉积分异作用影响, 砂岩中保留的黏土矿物含量较少, CIA 计算结果会偏低。前人研究表明, CIA 与砂岩粒度相关, 不适用于泥岩的古气候判别标准^[29-30], 相比之下, 泥岩具有较好的均值性和低渗透性, 更适合物源区风化程度和古气候的研究^[31]。沙一段泥岩 CIA_{corr} 和 PIA 均反映出沉积时期物源区受中等程度的风化作用, 具有温暖湿润的古气候条件。

4.2 物源

物源不仅可以来源于母岩风化产物, 也可来自早期沉积物的剥蚀搬运再沉积^[31]。研究区沙一、二段地层相对较薄, 与沙三段不整合接触, 沙三段沉积后地层抬升遭受剥蚀, 沙一段沉积物可能源自早期沉积物剥蚀搬运再沉积。因此, 分析物源之前应先判断是否受沉积再循环作用的影响。

MCLENNAN 等^[5]提出使用 Th/Sc-Zr/Sc 图版识别沉积分选及再循环作用, 沉积岩 Th/Sc 与物源区的比值相似, 其 Th/Sc 和 Zr/Sc 的正相关趋势反

表 2 沙一段微量及稀土元素含量及相关参数

Table 2 Contents of trace and rare earth elements and related parameters in the E_{1s}¹

样品编号	微量元素/10 ⁻⁶																								微量元素/10 ⁻⁶						稀土元素相关参数							
	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Th	U	Zr	Hf	Zr/Sc	Th/Sc	La/Th	La/Sc	Co/Th	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	\sum REE/10 ⁻⁶	L/H	La/Yb	Gd/Yb	δ Eu
B-2	17.8	120	128	19	41.6	33.5	117	221	268	1570	15.5	2.73	141	4.24	7.92	0.87	3.39	2.95	1.23	52.5	99	11.4	42.4	6.42	1.32	5.65	0.866	4.38	0.824	2.58	0.423	2.54	0.373	230.68	12.08	20.67	1.79	0.66
B-3	16.9	115	160	14	24	54.4	162	146	291	1482	14.6	3.14	160	4.8	9.47	0.86	3.95	3.41	0.96	57.7	100	12.4	46	6.94	1.33	5.86	0.953	4.82	0.88	2.93	0.509	3.27	0.494	244.09	11.38	17.65	1.45	0.62
B-7	14.6	109	149	16.9	30.4	51.7	189	171	307	1458	15.1	2.55	145	4.79	9.93	1.03	3.40	3.51	1.12	51.3	91.9	11.1	40.2	6.22	1.21	4.92	0.782	4.11	0.725	2.58	0.457	2.73	0.393	218.63	12.09	18.79	1.45	0.65
B-11	17.3	119	160	13.8	29.3	33.6	108	169	314	1660	15.9	2.38	169	5.72	9.77	0.92	3.72	3.42	0.87	59.1	107	12.6	43.5	6.6	1.56	6.11	0.902	4.78	0.877	3.04	0.469	3.05	0.495	250.08	11.68	19.38	1.62	0.74
C-1	13.3	91.3	120	16.9	35.3	28.4	94.7	135	339	872	12	1.88	125	3.52	9.40	0.90	3.81	3.44	1.41	45.7	88.3	10.5	36.8	5.95	1.43	5.5	0.865	4.53	0.762	2.69	0.394	2.29	0.363	206.07	10.85	19.96	1.94	0.75
C-2	15.3	100	123	18.6	39.7	29.2	98.6	144	322	849	13	2.02	129	3.78	8.43	0.85	3.87	3.29	1.43	50.3	95.7	11	40.1	6.85	1.5	5.48	0.872	4.68	0.911	2.53	0.389	2.4	0.413	223.13	11.62	20.96	1.84	0.73
C-3	14	104	110	16.9	35.8	29.4	99.1	134	323	811	12.6	1.98	120	3.64	8.57	0.90	3.95	3.56	1.34	49.8	92.6	10.5	38.2	6.25	1.45	5.73	0.882	4.65	0.889	2.67	0.403	2.45	0.398	216.87	11.00	20.33	1.89	0.73
C-4	15	95.3	122	16.5	36.6	30.4	87.8	144	359	827	11.9	2.03	130	3.65	8.67	0.79	4.26	3.38	1.39	50.7	97.7	11	40.4	6.77	1.42	5.69	0.896	4.81	0.796	2.64	0.403	2.68	0.374	226.28	11.37	18.92	1.71	0.68
C-5	14.8	91.7	114	12.3	28.8	31.8	102	146	355	815	12.6	2.42	132	3.77	8.92	0.85	4.40	3.74	0.98	55.4	105	11.9	44.1	7.49	1.65	6.55	0.976	5.2	0.898	2.87	0.381	2.58	0.436	245.43	11.34	21.47	2.05	0.70
C-6	15.5	196	106	27.7	63.6	87.1	200	117	475	728	12.5	7.17	121	3.22	7.81	0.81	3.92	3.16	2.22	49	96.6	10.8	42.7	7.47	1.48	6.14	1.07	5.62	1.13	3.34	0.466	2.93	0.478	229.22	9.83	16.72	1.69	0.65
A-1	11	85.9	159	17.3	42.8	44.5	178	98.7	472	893	10.6	2.58	123	3.97	11.18	0.96	4.22	4.06	1.63	44.7	84.2	11.4	39.7	7.14	1.78	6.17	0.892	4.43	0.844	2.67	0.385	2.37	0.339	207.02	10.44	18.86	2.10	0.80
A-2	12.9	85.5	152	18.6	34.8	53	183	119	365	920	12.6	2.61	138	4.58	10.70	0.98	4.09	3.99	1.48	51.5	90.7	11.3	41.6	6.08	1.4	5.43	0.873	4.31	0.855	2.7	0.459	2.73	0.408	220.35	11.40	18.86	1.61	0.73
A-3	9.79	78.1	129	14.9	33.3	24.7	102	111	371	1053	11.6	2.57	133	4.06	13.59	1.18	4.19	4.96	1.28	48.6	86.7	10.2	38.4	6.15	1.14	4.96	0.869	4.28	0.737	2.34	0.393	2.27	0.36	207.40	11.80	21.41	1.76	0.61
A-4	11.7	61.9	130	8.72	22.8	37.7	140	74.2	432	860	7.21	1.88	86.5	2.58	7.39	0.62	4.48	2.76	1.21	32.3	55.1	7.14	27	4.64	1.14	4.1	0.702	3.43	0.666	1.94	0.314	1.89	0.29	140.65	9.55	17.09	1.75	0.78
B-1	12.9	74.7	140	18.5	32.2	25	71.5	118	273	1153	10.5	3.37	135	4.33	10.47	0.81	4.17	3.40	1.76	43.8	78.8	9.82	33.8	5.5	1.15	4.8	0.769	4.24	0.871	2.83	0.446	2.67	0.436	189.93	10.13	16.40	1.45	0.67
B-4	10.8	82.6	139	11.4	23.9	50.4	153	123	312	1374	11.5	2.72	136	4.27	12.59	1.06	4.40	4.69	0.99	50.6	87	10.6	37.6	6.17	1.23	5.14	0.772	4.29	0.808	2.54	0.431	2.94	0.436	210.56	11.13	17.21	1.41	0.65
B-5	13	107	136	17	30.8	56.6	177	132	288	1333	12.2	2.55	138	4.34	10.62	0.94	4.27	4.01	1.39	52.1	92.4	11.4	38.9	6.13	1.34	5.63	0.858	4.32	0.909	2.93	0.445	2.56	0.454	220.38	11.17	20.35	1.77	0.69
B-6	12.1	87.5	151	17.5	33.5	55.6	189	143	343	1485	12.2	2.66	147	4.3	12.15	1.01	4.49	4.53	1.43	54.8	97.7	11.4	42	6.76	1.44	5.42	0.838	4.44	0.801	2.62	0.42	2.88	0.436	231.96	11.99	19.03	1.52	0.70
B-8	13.3	88.1	194	10.6	21.1	28.3	110	142	309	1381	12.6	2.66	132	4.49	9.92	0.95	3.92	3.71	0.84	49.4	88.2	10.1	35.5	5.26	0.994	4.44	0.691	3.67	0.743	2.44	0.398	2.68	0.403	204.92	12.25	18.43	1.34	0.61
B-9	14.2	71.7	138	20.9	36.4	30.8	108	151	301	1322	12.1	2.27	130	3.77	9.15	0.85	4.21	3.58	1.73	50.9	91	10.6	39.1	6.73	1.25	5.11	0.842	4.78	0.822	2.6	0.398	2.58	0.405	217.12	11.38	19.73	1.60	0.63
B-10	12	89.3	164	13.4	28.1	28	89.7	139	304	1296	12.2	2.24	146	4.26	12.17	1.02	4.31	4.38	1.10	52.6	90.8	10.4	39.3	6.27	1.17	5.07	0.755	3.93	0.719	2.4	0.396	2.62	0.412	216.84	12.30	20.08	1.56	0.62
B-11	14.6	100	154	20.2	37.3	32.6	93.3	148	296	1273	13.6	2.46	132	3.6	9.04	0.93	3.85	3.58	1.49	52.3	98	11.2	43.8	6.42	1.26	5.78	0.966	4.76	0.857	2.86	0.451	2.84	0.422	231.92	11.25	18.42	1.64	0.62
B-12	4.14	28.8	157	4.54	12.3	4.88	20.9	77	371	1068	4.38	1.3	42.8	1.25	10.34	1.06	5.25	5.56	1.04	23	41.5	4.86	18.4	3.19	0.705	2.56	0.441	2.15	0.434	1.32	0.173	1.27	0.179	100.18	10.75	18.11	1.63	0.73
B-13	4.41	38.3	152	4.08	9.46	6.78	28.6	81.6	342	1158	4.95	1.32	62.4	1.74	14.15	1.12	5.68	6.37	0.82	28.1	46	5.72	20.8	3.43	0.753	2.87	0.431	2.25	0.412	1.28	0.192	1.28	0.192	113.71	11.77	21.95	1.81	0.71

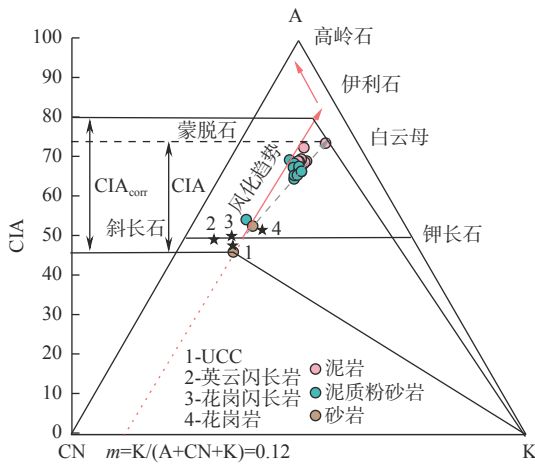
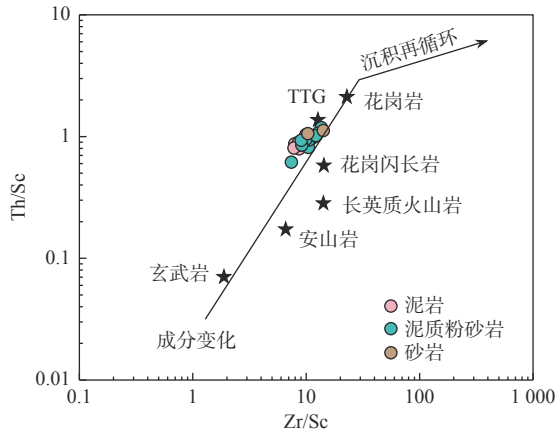


图 3 沙一段碎屑岩沉积岩 A-CN-K 图

Fig.3 A-CN-K diagram of clastic sedimentary rocks in the E_{1s}¹

映母岩岩浆分异的变化。Zr 主要富集在重矿物锆石中, 经历沉积再循环的沉积物会导致 Zr 的再富集, 表现出 Zr/Sc 明显增加, 而 Th/Sc 增加缓慢^[5], 借此可以判断是否发生沉积再循环作用。研究区沙一段样品 Th/Sc 和 Zr/Sc 整体分布集中, 在成分变化趋势线附近, Zr/Sc 没有明显的增加, Th/Sc 和 Zr/Sc 呈现较好的正相关关系(图 4), 表明物源来源成分变化不大, 沉积物直接来源于母岩风化沉积, 且未发生沉积再循环作用。



底图据文献 [5] 修改; TTG 为英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩

图 4 沙一段 Th/Sc-Zr/Sc 判别图

Fig.4 Th/Sc-Zr/Sc discrimination diagram of the E_{1s}¹

COX 等^[32] 使用成分变异指数 (Index of Compositional Variability, 简称 ICV) 判断泥岩成分成熟度和是否发生沉积再循环作用, 计算公式如下:

$$ICV = \frac{(Fe_2O_3^T + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3}{(Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3} \quad (4)$$

与黏土矿物相比, 非黏土矿物 Al₂O₃ 占比更低, 不同矿物和岩石中 ICV 有较大区别, 如辉石和角闪

石 ICV 介于 10~100, 碱性长石为 0.8~1, 斜长石为 0.6, 白云母和伊利石为 0.3, 蒙脱石为 0.15~0.3, 高岭石为 0.03~0.05^[32]。ICV < 1, 说明样品含较多的黏土矿物, 成熟度较高, 可能是沉积再循环作用或活动构造带强烈化学风化的首次沉积; ICV > 1, 说明沉积岩中非黏土硅酸盐成分较高, 成熟度较低, 可能是活动构造带首次沉积^[31,33]。研究区沙一段泥岩样品 ICV 介于 0.61~1.09 (平均 0.84), 泥质粉砂岩 ICV 为 0.65~0.97 (平均 0.76), 砂岩 ICV 为 0.80~1.11 (平均 0.95), ICV 普遍较低, 泥岩和泥质粉砂岩均含有较多的黏土矿物, 成分成熟度高于砂岩, 少数泥岩 ICV > 1, 研究区沙一段碎屑沉积岩是母岩风化搬运首次沉积的结果。

沉积岩的主、微量元素地球化学特征蕴藏着丰富的物源信息^[1], 高场强元素 (如 Zr、Nb、Hf、Y、Th 等)、过渡微量元素 (如 Cr、Co、Ni) 和稀土元素 (REE) 等微量元素沉积过程中的流动性相对较低, 在水体中的停留时间较短; 微量元素中 REE、Th、Sc、Co 和 Cr 受次生作用 (如成岩作用和变质作用) 的影响最小, 最适用于物源的研究^[1,6,30]。

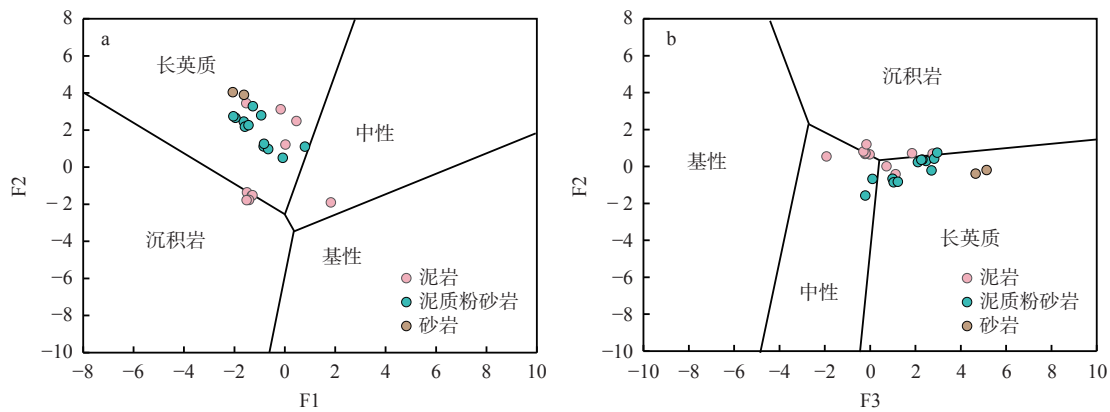
ROSER 和 KORSCH^[34] 利用主量元素判别函数区分砂岩和泥岩物源, 这种方法消除了碎屑岩粒度对物源判别的影响, 可以有效区分铁镁质、中性、长英质和沉积岩来源。在 F1-F2 判别图上 (图 5a), 沙一段样品主要落在长英质物源区, 少量泥岩落在沉积岩物源区。在 F3-F4 判别图上 (图 5b), 大多数样品落在长英质物源区, 少量落在中性物源区和沉积岩边界。大离子亲石元素对 K、Rb 可以敏感识别沉积物源, 高 Rb 含量 (>40×10⁻⁶) 指示中-酸性火成岩物源^[35]。研究区沙一段样品 Rb 含量介于 (75.2~221)×10⁻⁶, 均值为 131.9×10⁻⁶, 说明物源属于中-酸性火成岩。

$$F1 = -1.773TiO_2 + 0.607Al_2O_3 + 0.76Fe_2O_3^T - 1.5MgO + 0.616CaO + 0.509Na_2O - 1.224K_2O - 9.09 \quad (5)$$

$$F2 = 0.445TiO_2 + 0.07Al_2O_3 - 0.25Fe_2O_3^T - 1.142MgO + 0.438CaO + 1.475Na_2O + 1.426K_2O - 6.861 \quad (6)$$

$$F3 = 30.638TiO_2 / Al_2O_3 - 12.541Fe_2O_3^T / Al_2O_3 + 7.329MgO / Al_2O_3 + 12.031Na_2O / Al_2O_3 + 35.402K_2O / Al_2O_3 - 6.382 \quad (7)$$

$$F4 = 56.5TiO_2 / Al_2O_3 - 10.879Fe_2O_3^T / Al_2O_3 + 30.875MgO / Al_2O_3 - 5.4041Na_2O / Al_2O_3 + 11.112K_2O / Al_2O_3 - 3.89 \quad (8)$$



(a)F1-F2 判别图; (b)F3-F4 判别图; 底图据文献 [34] 修改

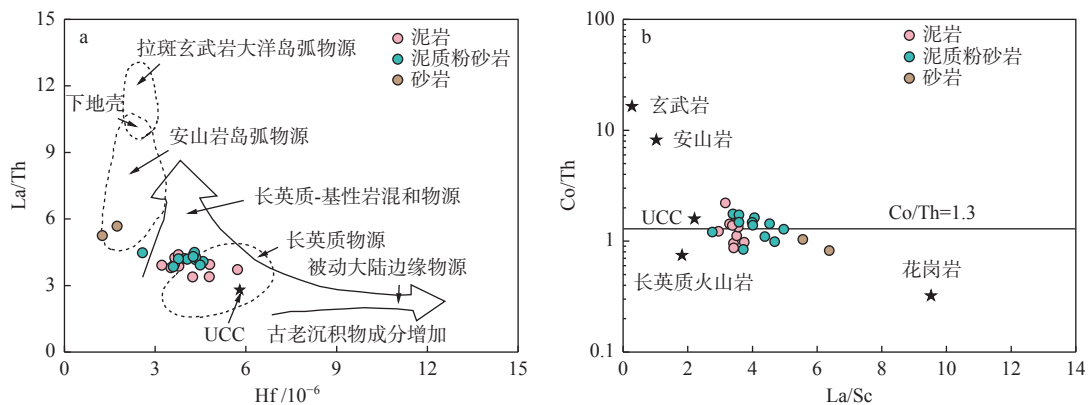
图5 沙一段碎屑岩判别图

Fig.5 Discrimination diagram of clastic rock provenance in E₁s¹

FLOYD 和 LEVERIDGE^[36] 使用 La/Th-Hf 图版判别沉积物源(图 6a), 沙一段所有样品 La/Th 介于 3.39~5.68, 平均 4.17, 除 2 个砂岩样品 La/Th 较高以外(5.25 和 5.68), 其余样品 La/Th 均 < 5, 大多数样品落在长英质物源过渡到长英质-基性混合物源区, 少数样品靠近或落在安山岩岛弧物源, 整体呈现长英质到安山岩物源的变化趋势, 说明沙一段可能存在长英质-基性或安山岩混合物源。Co/Th-La/Sc 判别图(图 6b)结果显示, Co/Th 较低且变化较小(Co/Th 介于 0.82~2.22, 平均 1.30), La/Sc 存在较大变化(La/Sc 介于 2.76~6.37, 平均 3.89), Co/Th 与 TTG 岩系接近, 样品主要落在 TTG 岩系之间, 靠近长英质火山岩物源和上地壳平均组分(图 6b)。A-CN-K 图上沙一段样品风化趋势线与钾长石和斜长石连线交点(图 3), 反映物源介于花岗闪长岩和花岗岩之间, 与上地壳来源较为接近。

稀土元素具有相对稳定的化学性质, 一般长英质物源具有较高的轻重稀土元素比和存在负 Eu 异

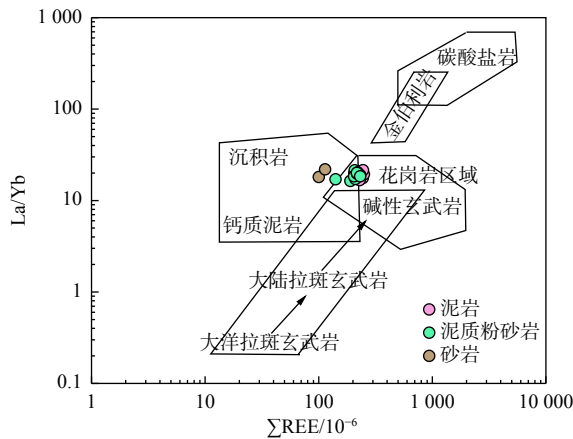
常, 而基性物源具有较低的轻重稀土元素比且无明显负 Eu 异常^[6]。研究区沙一段样品 L/H 介于 9.55~12.30, 平均 11.27, δEu 介于 0.61~0.80, 平均 0.69(表 2), 泥岩、泥质粉砂岩及砂岩的 L/H 和 δEu 相似, 存在较高的轻重稀土元素比和明显的负 Eu 异常(图 2c), 说明物源以长英质为主。La/Yb- ΣREE 判别图中, 泥岩和泥质粉砂岩样品主要落在花岗岩区域(图 7), 说明物源属于花岗岩类。泥岩、泥质粉砂岩和砂岩 La/Yb 变化极小且基本一致, 具有相似的稀土元素配分模式(图 2c), REE 含量不同可能是由于分选作用的结果, 泥岩和泥质粉砂岩的黏土组分中较为富集 REE。渤海湾盆地古近系沉积物 $\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 随着地层时代由老到新逐渐变大, 母岩区年龄逐渐变老^[3]。在地球演化初期, Gd 含量较高, 随着元素的分馏作用, Gd 随着地层变新而逐渐变少, $\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 也随之变小^[40-41], 太古宙地层 $\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N} > 2$, $\delta\text{Eu} > 0.85$, 后太古宙地层 $\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N} < 2$, δEu 介于 0.65~1^[40]。研究区沙一段 $\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 介于 1.34~



(a)底图据文献 [36] 修改; (b)底图据文献 [37] 修改

图6 La/Th-Hf 物源判别图 (a) 和 Co/Th-La/Sc 物源判别图 (b)

Fig.6 La/Th-Hf provenance discrimination diagrams (a), and Co/Th-La/Sc provenance discrimination diagram (b)



底图据文献 [38-40] 修改

图 7 La/Yb-ΣREE 物源判别图

Fig.7 Provenance discrimination diagram of La/Yb-ΣREE

2.1, 均值 1.68, δEu 为 0.61~0.80, 平均 0.69, 绝大多数样品 $Gd_N/Yb_N < 2$ 。因此, 推测沙一段沉积可能主要来源于太古宇, 也可能受混源输入的影响。

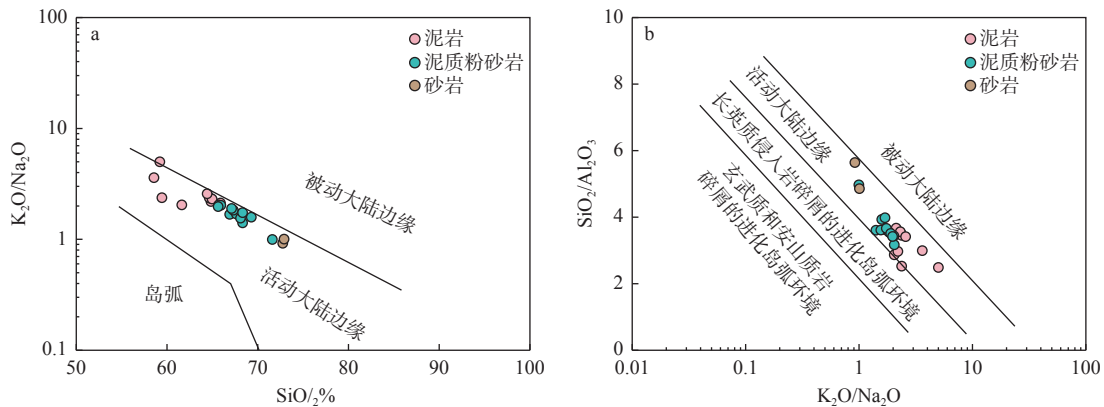
大部分学者对研究区沉积相的研究表明物源来源于西南的垦东凸起, 中央构造脊将南北物源分

割, 垦东方向物源通过郯庐走滑断裂形成的古沟谷作为碎屑的搬运通道进行搬运^[17,42-44]。莱北低凸起基底主要为中生代安山岩为主^[9,11-12], 垦东凸起发育太古宙、古生代及中生代多套地层^[13], 研究区物源属性主要表现为花岗岩类, 证实了为莱北低凸起供源的可能性较小。综合来看, 研究区物源为西南方向的垦东凸起, 以花岗岩类岩石为主, 存在中基性物源混合输入。

4.3 源区构造背景

不同构造环境形成的沉积岩, 其地球化学特征有所不同, 利用沉积岩的元素组合可以有效识别构造背景, 构造背景对沉积岩的组成具有重要的控制作用^[45-47]。

ROSER 和 KORSCH^[47] 根据泥岩和砂岩主量元素建立 K_2O/Na_2O-SiO_2 和 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ 图版用于判别物源构造背景, 研究区沙一段样品在 K_2O/Na_2O-SiO_2 和 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ 图版中均落在活动大陆边缘(图 8a、b)。



底图据文献 [47] 修改

图 8 沙一段 K_2O/Na_2O-SiO_2 判别图 (a); 沙一段 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ 判别图 (b)

Fig.8 K_2O/Na_2O-SiO_2 discrimination diagram of Es^1 (a), and $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ discrimination diagram of Es^1 (b)

BHATIA 和 CROOK^[48] 根据杂砂岩微量元素地球化学特征, 建立了 $Th-Co-Zr/10$ 、 $Th-Sc-Zr/10$ 和 $La-Th-Sc$ 图版(图 9a、b、c)用于判别物源构造背景。研究区沙一段大多数样品在 $Th-Co-Zr/10$ 图中落在活动大陆边缘(图 9a); $Th-Sc-Zr/10$ 图中多数样品落在活动大陆边缘和大陆岛弧的边缘(图 9b), 部分样品落在活动大陆边缘和大陆岛弧; $La-Th-Sc$ 图中多数样品落在活动大陆边缘和被动大陆边缘及大陆岛弧的附近, 少数样品落在大陆岛弧(图 9c)。

BHATIA^[49] 总结了 4 种不同构造背景下杂砂岩的稀土元素特征(表 3), 从大洋岛弧到稳定的大

陆边缘, La、Ce 和 ΣREE 均逐渐增大, 来源于活动大陆边缘和被动大陆边缘构造背景的沉积物具有较高的 ΣREE 、轻稀土元素富集程度较强及较明显的负 Eu 异常; 来源于大洋岛弧构造背景的沉积物具有较低的 ΣREE 、轻稀土元素富集较弱且无负 Eu 异常。在相同构造背景下, 泥岩和泥质粉砂岩含有较多的黏土矿物, 稀土元素较杂砂岩高约 20%^[49], 因此, 将研究区泥岩和泥质粉砂岩 La、Ce 和 ΣREE 含量除以 1.2 后进行矫正^[50], 结果显示, 矫正后泥岩和泥质粉砂岩 La 含量较高, 而 Ce 和 ΣREE 含量总体特征与活动大陆边缘相似, δEu 介于活动大陆

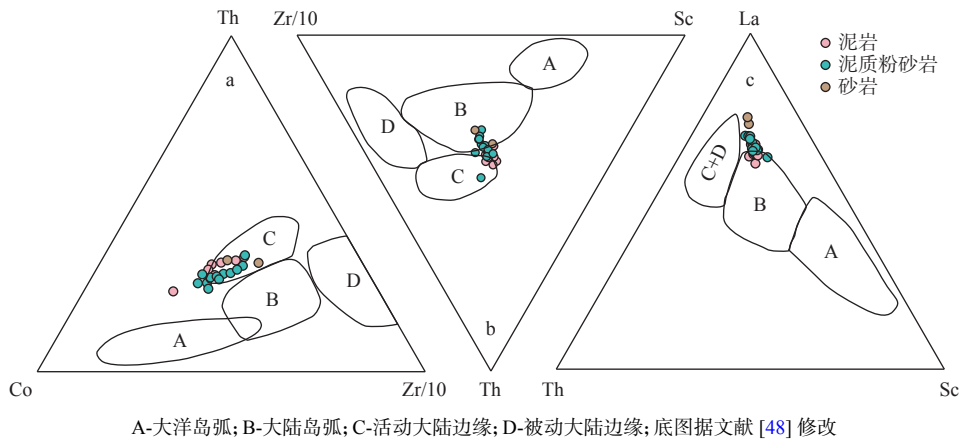


图9 沙一段 Th-Co-Zr/10 判别图 (a); 沙一段 La-Th-Sc 判别图 (b); 沙一段 Th-Sc-Zr/10 判别图 (c)

Fig.9 Th-Co-Zr/10 discrimination diagram of E_{1s}^1 (a), Th-Co-Zr/10 discrimination diagram of E_{1s}^1 (b), and Th-Co-Zr/10 discrimination diagram of E_{1s}^1 (c)

表3 研究区沙一段碎屑沉积岩与不同构造背景沉积盆地杂砂岩的 REE 特征对比

Table 3 Comparison in REE characteristics between clastic sedimentary rocks in E_{1s}^1 and greywacke of sedimentary basins in different tectonic settings

构造背景	源区类型	La/ 10^{-6}	Ce/ 10^{-6}	Σ REE/ 10^{-6}	L/H	La/Yb	La _N /Yb _N	δ Eu
大洋岛弧	未切割的岩浆弧	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	切割的岩浆弧	27(4.5)	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	上隆的基底	37	78	186	9.1	12.5	8.5	0.6
被动大陆边缘	克拉通内部构造高地	39	85	210	8.5	15.9	10.8	0.56
泥岩平均值		52.15	97.38	229.05	11.32	19.48	13.14	0.69
校正后泥岩		43.46	81.15	190.88				
泥质粉砂岩平均值		48.63	86.72	208.25	11.23	18.82	12.69	0.68
校正后泥质粉砂岩		40.53	72.27	173.54				
砂岩平均值		25.55	43.75	106.95	11.26	20.03	13.51	0.72

注: 括号内数值为标准偏差, 构造背景的数据引自文献[49]。

边缘和大陆岛弧之间(表3)。

结合主、微量元素和元素判别结果来看, 沙一段物源构造背景较为复杂, 但以活动大陆边缘构造背景为主, 同时具有大陆岛弧构造背景特征。

渤海湾盆地位于华北克拉通的东部, 新生代断陷盆地发育在古老地台基底之上, 基底由前寒武纪结晶基底和古生代至中生代的地层组成^[51]。在中侏罗世(约 165 Ma), 西太平洋板块向东亚大陆低角度高速俯冲, 西太平洋板块的俯冲造就了燕山运动 A 幕和郯庐断裂的平移活动, 俯冲的太平洋板块下插在太行山以东的华北克拉通东部之下, 使华北克拉通东部成为俯冲大洋板片之上的活动大陆边缘^[52-54]。到晚侏罗世晚期, 西太平洋板块低角度俯冲转变为高角度俯冲, 华北克拉通出现局部伸展与岩浆活动以及区域性隆升, 为弧后弱拉张背景。在早白垩世(130~120 Ma), 郯庐断裂带伸张活动剧烈, 华北克拉通在弧后拉张背景下被破坏, 表现强

烈而广泛的岩浆活动, 发育大量火山岩地层^[54-55], 板块活动使研究区具有大陆岛弧构造背景。

5 结论

(1) 钾交代作用对黄河口沙一段碎屑沉积岩影响较小, 泥岩校正后的 CIA_{corr} 和 PIA 反映出物源遭受中等程度风化, 沙一段沉积时期气候温暖湿润。

(2) Th/Sc-Zr/Sc 图解和 ICV 结果表明, 黄河口凹陷沙一段碎屑沉积岩未经历沉积再旋回作用影响, 属于物源风化后的首次沉积。通过主、微量及稀土元素分析, 物源具有上地壳和长英质火成岩的特征, 结合沉积相研究, 认为沙一段物源主要为垦东凸起古老基底的花岗岩类和少量中基性物源。

(3) 主、微量和稀土元素分析结果表明, 黄河口凹陷南斜坡沙一段源区主要为活动大陆边缘构造背景, 同时具有大陆岛弧构造背景特征, 源区构造

背景与西太平洋板块向东亚板块俯冲角的变化有关。

参考文献:

- [1] ARMSTRONG-ALTRIN J S, MACHAIN-CASTILLO M L, ROSALES-HOZ L, et al. Provenance and depositional history of continental slope sediments in the Southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 95: 15-26.
- [2] BHATIA M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(6): 611-627.
- [3] 邵磊, 刘志伟, 朱伟林. 陆源碎屑岩地球化学在盆地分析中的应用[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 297-304.
- [4] 李乐, 姚光庆, 刘永河, 等. 塘沽地区沙河街组下部含云质泥岩主微量元素地球化学特征及地质意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2015, 40(9): 1480-1496.
- [5] MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. *Special Papers-Geological Society of America*, 1993, 284: 21-40.
- [6] CULLERS R L. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(22): 4955-4972.
- [7] CULLERS R L. The controls on the major-and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U. S. A.[J]. *Chemical Geology*, 1995, 123(1): 107-131.
- [8] 杜晓峰, 加东辉, 王启明, 等. 盆内局部物源体系及其油气勘探意义: 以渤海海域古近系为例[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 19-27.
- [9] 陈延芳, 杜晓峰, 王清斌, 等. 渤海黄河口东洼古地貌对沉积相的控制作用[J]. *石油地质与工程*, 2020, 34(3): 20-23.
- [10] 李森. 渤海湾盆地黄河口凹陷古近系混积岩“源-汇-岩-储”一体化优质储层预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2020. DOI: 10.27492/d.cnki.gzdu.2020.000042.
- [11] 王改卫, 张海义, 郭轩, 等. 黄河口凹陷古近系地层结构新认识与勘探潜力评价[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(5): 1-12.
- [12] 周晓光, 黄晓波, 马正武, 等. 渤海海域莱北低凸起隐性“逆冲物源”发育特征及地质意义[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(4): 26-29, 46.
- [13] 付兆辉, 秦伟军, 李敏. 渤海湾盆地垦东凸起构造演化及对沉积的控制作用[J]. *石油地质与工程*, 2011, 25(4): 7-10.
- [14] 朱红涛, 刘依梦, 王永利, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷BZ34-9区带火山岩三维刻画及火山喷发期次[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(9): 1309-1316.
- [15] 王昕, 柴永波, 姚佳, 等. 渤中34构造古近系受玄武岩控制砂岩储层成岩相展布特征及发育模式[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(2): 9-17.
- [16] 薛永安, 杨海风, 徐长贵. 渤海海域黄河口凹陷斜坡带差异贮藏作用及油气富集规律[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 65-74.
- [17] 张新涛, 周心怀, 牛成民, 等. 黄河口凹陷古近纪构造坡折带对沉积体系的控制[J]. *地质论评*, 2014, 60(2): 332-338.
- [18] 姚佳, 王昕, 王清斌, 等. 黄河口凹陷BZ34区古近系沙一二段储集层成岩相与有利储层预测[J]. *现代地质*, 2016, 30(6): 1339-1347.
- [19] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [20] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. *The Journal of Geology*, 1985, 94(4): 57-72.
- [21] BOYNTON W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[M]/HENDERSON P. *Rare Earth Element Geochemistry*. Am-sterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [22] HERRON M M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(5): 820-829.
- [23] WEDEPOHL K H. *Handbook of Geochemistry*[M]. Berlin: Springer, 1969: 59-60.
- [24] WOLLAST R, CHOU L. Surface reactions during the early stages of weathering of albite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(8): 3113-3121.
- [25] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [26] PANAH A, YOUNG G M, RAINBIRD R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199-2220.
- [27] FEDO C M, NESBITT H W, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [28] 郭望, 张卫刚, 李玉宏, 等. 柴北缘大煤沟组七段页岩地球化学特征对中侏罗世晚期物源及风化作用的指示及意义[J]. *沉积学报*, 2020, 38(3): 676-686.
- [29] JIAN X, GUAN P, ZHANG W, et al. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau: implications for provenance and weathering[J]. *Chemical Geology*, 2013, 360: 74-88.
- [30] ARMSTRONG-ALTRIN J S, LEE Y I, VERMA S P, et al. Geochemistry of sandstones from the upper Miocene Kudankulam Formation, Southern India: implications for provenance, weathering, and tectonic setting[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74(2): 285-297.
- [31] 徐小涛, 邵龙义. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素[J]. *古地理学报*, 2018, 20(3): 515-522.
- [32] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(14): 2919-2940.
- [33] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元

- 古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544.
- [34] ROSER B P, KORSCH R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. *Chemical geology*, 1988, 67(1/2): 119-139.
- [35] SHAW D M. A review of K-Rb fractionation trends by covariance analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1968, 32(6): 573-601.
- [36] FLOYD P A, LEVERIDGE B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [37] GU X X, LIU J M, ZHENG M H, et al. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3): 393-407.
- [38] ALLEGRE C J, MINSTER J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38(1): 1-25.
- [39] HU J J, LI Q, FANG N Q, et al. Geochemistry characteristics of the Low Permian sedimentary rocks from central uplift zone, Qiangtang Basin, Tibet: insights into source-area weathering, provenance, recycling, and tectonic setting[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(8): 5373-5388.
- [40] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. *The Continental Crust: its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [41] 张学敏, 岳琼申. 地球化学方法在化学风化作用和物源判别中的应用综述[J]. 华南地质与矿产, 2018, 34(1): 41-58.
- [42] 徐长贵, 加东辉, 宛良伟. 渤海走滑断裂对古近系源-汇体系的控制作用[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1871-1882.
- [43] 王孝轅, 黄江波, 杨海风, 等. 莱北低凸起构造成因演化及其对沉积体系的控制作用[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(2): 1-10.
- [44] 杨海风, 钱赓, 徐春强, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷中央构造脊沙河街组砂体展布规律与储层发育特征[J]. 地球科学, 2023, 48(8): 3068-3080.
- [45] MAYNARD J B, VALLONI R, YU H S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins[J]. *Geological Society*, 1982, 10(1): 551-561.
- [46] 杜利林, 郭敬辉, 耿元生, 等. 扬子西南缘盐边群时代及构造环境: 来自碎屑沉积岩的约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 641-672.
- [47] ROSER B P, KORSCH R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(5): 635-650.
- [48] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [49] BHATIA M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1/2): 97-113.
- [50] 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 449-456.
- [51] 金宠. 黄骅坳陷和济阳坳陷中生界构造特征、演化及动力机制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [52] 朱日祥. “华北克拉通破坏”重大研究计划结题综述[J]. 中国科学基金, 2018, 32(3): 282-290.
- [53] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [54] 朱日祥, 徐义刚. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(9): 1346-1356.
- [55] 朱光, 王薇, 顾承申, 等. 郯庐断裂带晚中生代演化历史及其对华北克拉通破坏过程的指示[J]. 岩石学报, 2016, 32(4): 935-949.

Paleoclimate, provenance, and tectonic setting of the First Member of the Paleogene Shahejie Formation in the southern slope of Huanghekou Sag

WANG Ping¹, WANG Feilong², CHEN Rongtao²

(1 CNOOC Experimental Center, CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China;

2 Tianjin Branch of CNOOC(China) Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: The major and trace elements in clastic sedimentary rocks record abundant geochemical information, and can be used to reconstruct paleoclimate, provenance, and tectonic setting. Geochemical analysis of inorganic element in clastic sedimentary rocks of the first member of the Paleogene Shahejie Formation (E_1s^1) in the southern slope of Huanghekou Sag was conducted, and the paleoclimate, provenance and tectonic setting of the E_1s^1 were discussed. Th/Sc-Zr/Sc diagram and index of compositional variability (ICV) indicate that the source of the E_1s^1 in the study area was the first deposition unit after weathering of the parent rocks, and the compositional maturity was relatively high. The corrected chemical index of alteration (CIA_{corr}) and plagioclase index of alteration (PIA) indicate that the source of the E_1s^1 underwent moderate weathering, and the sedimentary period was warm and humid paleoclimatic conditions. Major, trace, and rare earth elements show that the provenance of E_1s^1 is characterized by upper crust derived felsic igneous rocks, featuring obvious negative Eu anomaly, and the materials of provenance was mainly derived from Precambrian granitoids and some intermediate-basic mixture sources. The tectonic background of the provenance area was active continental margin and continental island arc. The complex tectonic background was related to the subduction of the Western Pacific plate to the East Asian continent.

Key words: provenance; paleoclimate; tectonic setting; the First Member of Shahejie Formation; Huanghekou Sag