



西湖凹陷古近系平湖组泥质岩地球化学特征及其地质意义

沈文超¹⁾, 邵龙义²⁾, 周倩羽¹⁾, 康世龙²⁾

1) 河北工程大学地球科学与工程学院, 河北邯郸, 056038;

2) 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京, 100083

内容提要:西湖凹陷是东海陆架盆地重要的富生烃凹陷之一, 平湖组是主要烃源岩和油气富集层系。为了探讨平湖组沉积期构造背景、源区性质及古环境, 本文对平湖组泥质岩地球化学特征进行了研究。地球化学分析结果表明, 平湖组沉积期同时具有大陆岛弧和活动大陆边缘构造背景。平湖组泥质岩的物源区母岩主要由上地壳岩石演化而来, 并通过对比周围隆起区母岩特征, 认为西侧的海礁隆起为西湖凹陷西部斜坡区平湖组沉积期的主要物源区, 母岩主要以上地壳的长英质火成岩为主, 并受到少量来自幔源岩浆和上地壳古生界变质岩系的影响, 母岩类型主要为花岗岩长岩和英安质凝灰岩, 少量安山岩和变质岩。泥质岩 CIA 分析表明, 平湖组泥质岩的母岩经历了中等—强烈的风化作用, 结合 Sr/Cu 值分析, 推断西湖凹陷在平湖组沉积期古气候较为温暖湿润。微量元素和古盐度分析结果以及对盆地地貌特征分析表明, 西湖凹陷平湖组沉积期自北向南沉积背景有明显的地区差异性, 北部(A-1)沉积水体为淡水, 主要发育河控三角洲沉积体系, 而中部(A-2)和南部(B-1)表现为淡水和半咸水交替演化的特征, 主要发育受潮汐影响三角洲沉积体系。平湖组泥质岩主要形成于含氧环境中。

关键词:泥质岩; 地球化学; 物源分析; 古环境; 平湖组; 西湖凹陷

泥质岩的地球化学特征能够反映物源区属性 (McLennan et al., 1993)、地形地貌 (Goudie et al., 2012)、古气候 (Yang Jianghai et al., 2017; Varela et al., 2018) 以及沉积环境 (Hofer et al., 2013; Lash et al., 2014; Zhang Xianguo et al., 2017) 等信息。泥质岩通常具有良好的均质性和沉积后的低渗透性, 后期的成岩作用过程中某些微量元素和稀土元素的含量及比值受影响较小, 因而具有指示沉积环境、古气候以及物源区性质的功能 (Hofer et al., 2013)。西湖凹陷已被证实油气勘探潜力大, 但所探明的大中型油气田并不多, 平湖组煤系烃源岩不仅是油气生成的主要物质基础, 同时平湖组也作为目前主要的勘探领域之一 (Zhou Xinhui, 2020), 而物源区属性和古环境特征则直接影响到平湖组砂岩储层的质量、砂体和煤系的分布以及烃源岩的生烃潜力。利用泥质岩地球化学特征分析西湖

凹陷物源区属性及古环境特征, 有助于深化西湖凹陷烃源岩及油气储层分布规律的认识。

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部浙东坳陷带内, 是中国海域重要的含油气凹陷之一 (Huang Zhichao et al., 2010), 平湖组煤系烃源岩是区内主力烃源岩层系 (Zhang Gongcheng et al., 2013; Liu Jinshui et al., 2020a, 2020b; Kang Shilong et al., 2020; Shen Yulin et al., 2021)。前人通过对地震剖面、钻井岩芯、古生物组合以及地球化学等资料的分析, 认为平湖组沉积时期为半封闭的海湾环境, 平湖组从早期到晚期海侵规模逐渐减小, 主要发育受潮汐影响的三角洲和潮坪沉积体系 (Li Shunli et al., 2018; Abbas et al., 2018; Jiang Yiming et al., 2020), 但对于水体介质受河流和海洋影响程度如何, 还存在较多争议。前人通过碎屑锆石 U-Pb 定年、重矿物组合及重矿物 ZTR 指数等资料的分析,

注: 本文为河北工程大学创新基金项目 (编号 SJ010002218, SJ2101003005) 和河北省自然科学基金资助项目 (编号 D2021402043) 联合资助的成果。

收稿日期: 2020-10-13; 改回日期: 2021-10-22; 网络发表日期: 2022-04-14; 责任编辑: 任东; 责任编辑: 周健。

作者简介: 沈文超, 男, 1989 年生。博士, 讲师, 从事沉积学及层序地层学研究。E-mail: spock00@163.com。通讯作者: 邵龙义, 男, 1964 年生。教授, 博士生导师, 从事沉积学及层序地层学研究。E-mail: shaol@cumtb.edu.cn。

引用本文: 沈文超, 邵龙义, 周倩羽, 康世龙. 2022. 西湖凹陷古近系平湖组泥质岩地球化学特征及其地质意义. 地质学报, 96(6): 2078~2093. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022287.

Shen Wenchao, Shao Longyi, Zhou Qianyu, Kang Shilong. 2022. Geochemistry of argillaceous rocks of the Eocene Pinghu Formation from Xihu depression in East China Sea basin and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 96(6): 2078~2093.

认为西湖凹陷西侧隆起区(虎皮礁隆起和海礁隆起)是平湖组沉积期主要物源区(Li Ning et al. , 2017; Zhao Ke et al. , 2020),但隆起区基底研究较少且缺乏钻探验证,平湖组沉积期物源还存在一些争论。沉积环境和物源区属性的争议,严重限制了平湖组沉积砂体的精细刻画及有利勘探目标的搜寻。

针对研究区存在的种种争议,利用沉积地球化学的方法对东海陆架盆地西湖凹陷 A-1、A-2 和 B-1 三口钻井采集的泥质岩样品进行分析,并据实验结果对研究区的物源区岩石性质、源岩风化作用、沉积背景、古构造背景及古环境演化进行分析,为西湖凹陷平湖组物源区、古构造、古气候及沉积环境演化研

究提供依据,从而为深入了解砂岩储层的质量以及砂体和煤系的分布提供理论基础。

1 地质背景

西湖凹陷地处东海陆架盆地东部坳陷带中部偏北,东接钓鱼岛隆褶带,西邻海礁隆起、虎皮礁隆起和渔山东低隆起,南部和北部分别与福江凹陷和钓北凹陷相邻(图 1a),呈北东向展布,面积约 5. 18 万 km²。西湖凹陷基底主要为 NNE 向和 NW 向两组断裂系统所控制,在 NNE 向断层控制下西湖凹陷呈北北东向长条形,在 NW 向基底断裂控制下西湖凹陷呈现南北分块的特点。西湖凹陷可划分为五个

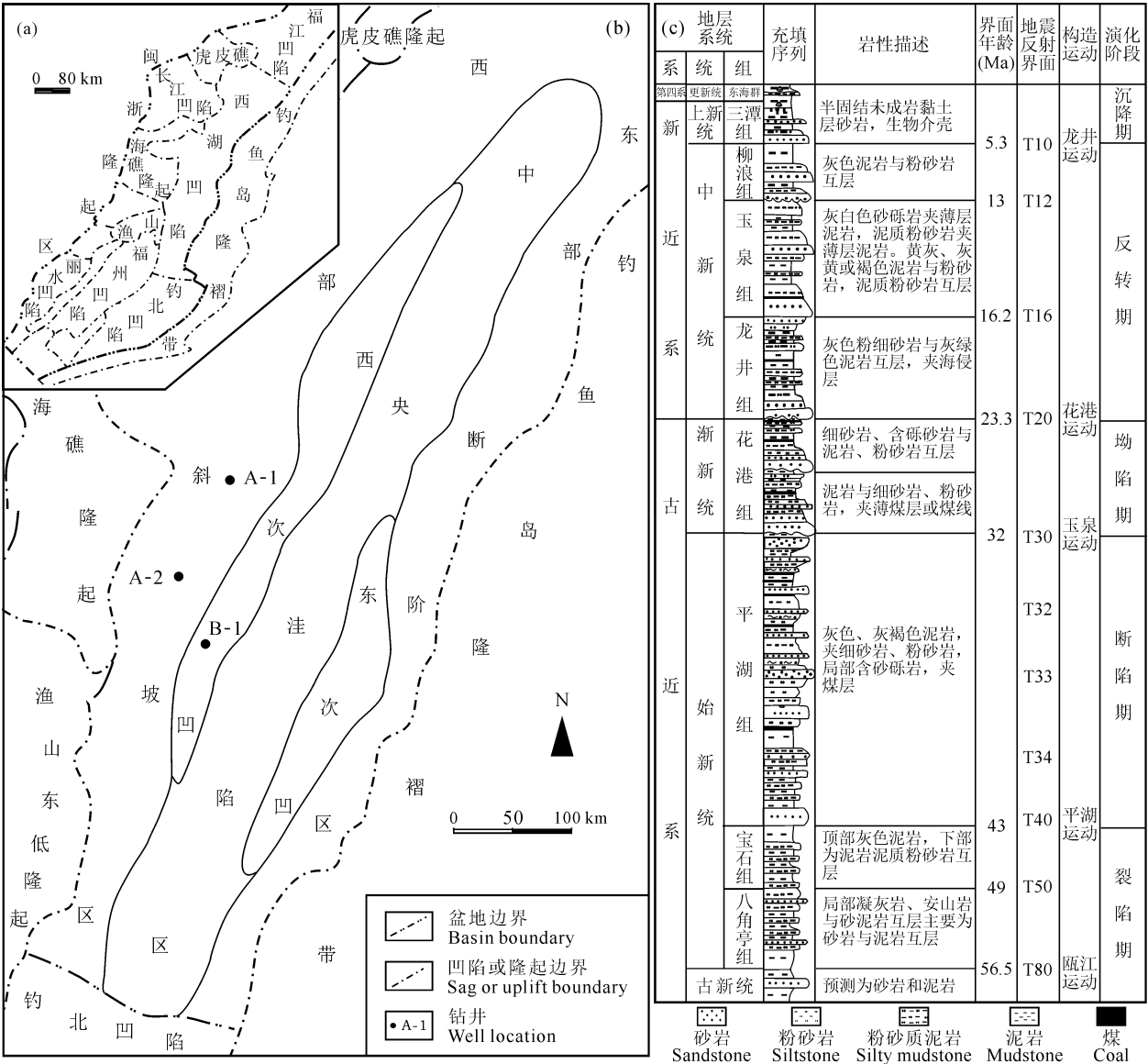


Fig. 1 Map showing the division of tectonic units of the Xihu depression (a, b, after Liu Jinshui et al. , 2020c) and the stratigraphic subdivisions of the Cenozoic in the Xihu depression (c, after Chen Zhongyun et al. , 2013)

构造单元,包括西部斜坡区、西次凹、中央洼陷区、东次凹及东部断阶区(图 1b)。

西湖凹陷同中国东部许多盆地构造演化一样,总体上经历了断陷、拗陷和整体沉降三个演化阶段,古新世—始新世为断陷期,渐新世—中新世为拗陷和构造反转期,上新世至今为整体沉降期(Liu Jinshui et al., 2020c)(图 1c)。

综合前人对西湖凹陷地层划分成果(Chen Zhongyun et al., 2013),并根据钻井资料,西湖凹陷地层由老到新为古新统、始新统(八角亭组、宝石组、平湖组)、渐新统(花港组)、中新统(龙井组、玉泉组、柳浪组)、上新统(三潭组)和第四系(东海群)(图 1c)。本文重点研究始新统平湖组,平湖组与下伏宝石组 and 上覆花港组地层呈不整合接触。

2 样品采集和实验方法

本次研究样品取自西湖凹陷平湖组北部 A-1 (3480~4325 m)、中部 A-2(3060~4010 m)和南部 B-1(3800~4800 m)3 口探井,共采集 39 个泥质岩岩屑样品,具体取样井位分布如图 1b 所示,样品位置及编号如图 2 所示。样品均选取能够较好地保存原始沉积环境信息、风化蚀变和成岩作用影响较弱的泥质岩,平湖组泥岩颜色为灰色或深灰色。样品的前期处理包括超纯水清洗,烘干及研磨,均在中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室完成。样品的化学处理及测试在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,分析精密度优于 5%。利用飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行主量元素分析测试,测试方法依据 GB/T14506.28—2010;微量元素分析测试仪器为 Element XR,测试方法依据 GB/T14506.30—2010。

3 实验结果

3.1 主量元素特征

样品的主量元素以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主,其中 SiO_2 含量介于 28.46%~57.10% 之间,平均 52.08%,除个别样品外,含量差异不大; Al_2O_3 含量介于 12.64%~23.15% 之间,平均为 18.61%,差异较小。其次为 Fe_2O_3 、 K_2O 和 MgO ; TiO_2 、 CaO 、 Na_2O 、 P_2O_5 及 MnO 含量极低(表 1)。

3.2 微量元素特征

样品的微量元素特征表现为亲铁性元素 Co、Ni 和 Cr 整体接近大陆上地壳,部分样品 Cr 在北部

(A-1)表现为轻微的富集。高场强元素 Th、Zr 等整体表现为接近大陆上地壳,部分样品 Zr 在南部(B-1)有亏损。亲硫性元素 Cu 和大离子亲石元素 Ba 含量相对于大陆上地壳较为富集。

大离子亲石元素 Sr 含量相对于大陆上地壳有亏损。Sc、V 含量接近大陆上地壳(表 2、图 3)。

3.3 稀土元素特征

稀土元素在不同的井区及同一钻井的不同深度表现出不同的分布特征,在北部(A-1)和南部(B-1)轻稀土元素(LREE:La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu)相对富集,而在中部(A-2)三个样品呈相对亏损特征,其余样品含量相当;重稀土元素(HREE:Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)在 A-1 和 B-1 井区除少量呈相对富集,其余均含量相当,而在 A-2 井区三个样品呈相对亏损特征,其余样品含量相当(表 3、图 3)。

4 讨论

4.1 构造背景讨论

不同构造背景的母岩被风化后,经搬运、沉积所形成的碎屑岩具有特定的沉积地球化学特征(Bhatia et al., 1986; Roser et al., 1988; McLennan et al., 1993)。本文根据 Bhatia et al. (1986)提出的 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 图解进行构造背景的判识,从图 4 中可以看出,除了少数泥质岩样品投点落在了被动大陆边缘和活动大陆边缘区域,大部分投点落在了大陆岛弧区域。西湖凹陷位于欧亚板块、菲律宾板块和太平洋板块汇聚的活动大陆边缘,侏罗纪时期西湖凹陷受到东亚多向汇聚构造体系影响,处于多向挤压环境,但未遭受强烈挤压变形,此时古亚洲特提斯构造体制处在大陆边缘拗陷演化阶段;白垩纪以来西太平洋板块俯冲和后撤,使凹陷进入太平洋构造体制的弧后裂陷演化阶段(Liu Jinshui et al., 2020c),从而造成西湖凹陷具有活动大陆边缘构造背景之外,还具有大陆岛弧构造背景。

4.2 物源区属性分析

Th/U、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、Cr/Zr 及稀土元素可以作为定性或定量化指标来分析母岩类型及来源(Bhatia, 1985; Taylor et al., 1985; McLennan et al., 1993; Hayashi et al., 1997)。

稀土元素球粒陨石标准化分布模式可用于判断物源区类型(McLennan et al., 1993),A-1 和 B-1 井稀土元素分配模式与上地壳十分相似(图 3),A-2 井除 59 号、52 号和 49 号样品,其余均与上地壳稀土分配模式相似。从稀土元素球粒陨石标准化分布

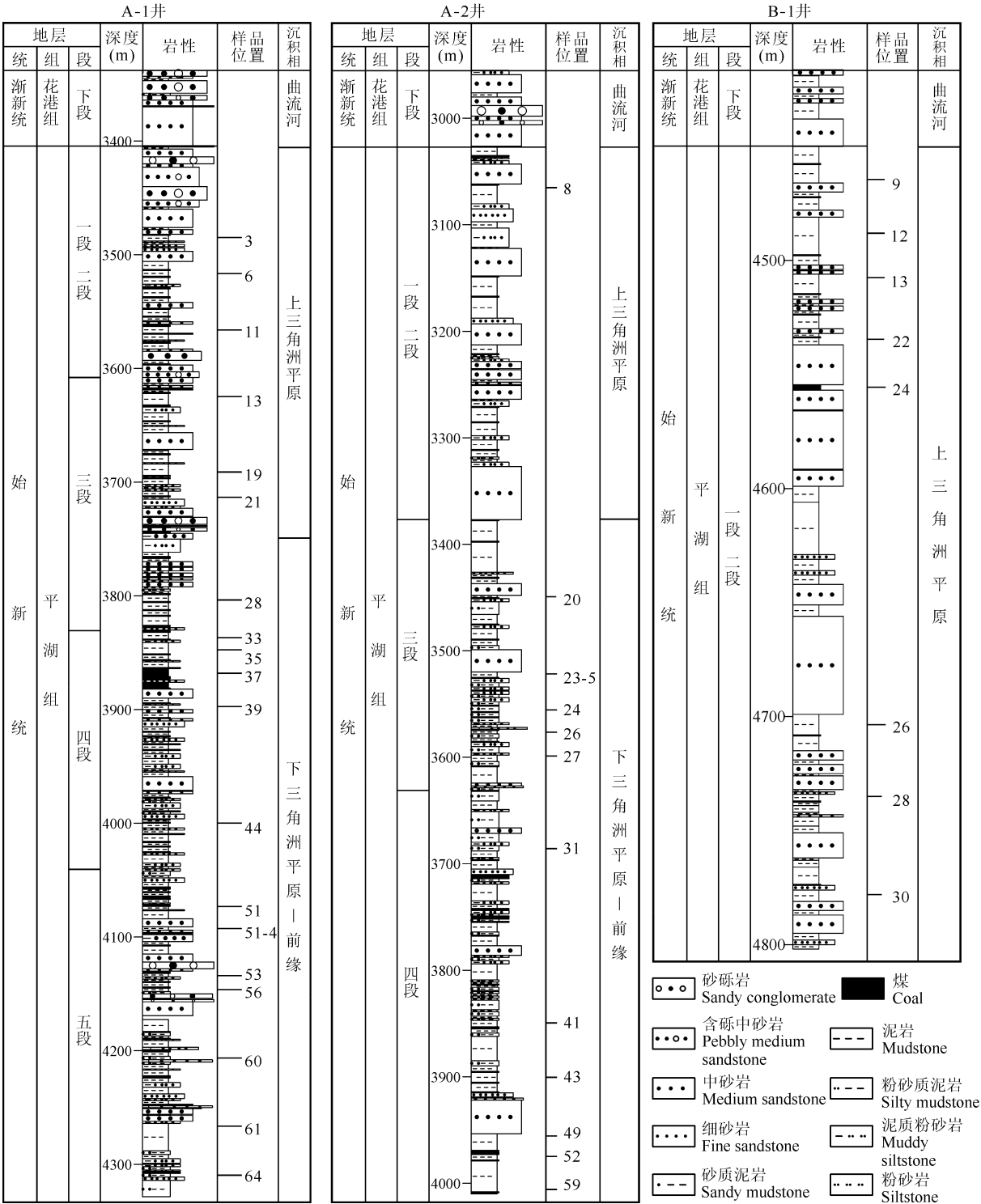


图 2 西湖凹陷平湖组地层柱状图及采样位置(钻井 A-1、A-2、B-1)

Fig. 2 Stratigraphic column showing sampling positions of the Pinghu Formation in the Xihu depression (wells A-1, A-2, and B-1)

模式可以得出,研究区平湖组泥质岩母岩主要是由上地壳岩石演化而来,部分来自于地幔。因稀土元素在风化、成岩和沉积过程中相对比较稳定,不易迁移,其含量特征可作为判断母岩类型的良好指标(Taylor et al., 1985, 1986; Bhatia, 1985)。例

如,铁镁质岩通常具有较低的 LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 值,且无 Eu 负异常;然而长英质岩却有较高的 LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 值及明显的 Eu 负异常(Taylor et al., 1985)。本次分析的样品表现出 LREE 富集($LREE/HREE=7.46\sim12.70$, $La_N/$

表 1 西湖凹陷始新统平湖组泥岩的主量元素测试结果(%)

Table 1 Major elements compositions (%) of Eocene argillaceous rocks from Pinghu Formation of the Xihu depression															
井号	样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃ / TiO ₂	K ₂ O/ Al ₂ O ₃	ICV	CIA _{corr}
A-1	3	57.10	19.46	7.02	2.24	0.252	0.560	4.33	0.041	0.779	0.074	24.98	0.22	0.89	83.41
	6	53.46	19.47	8.55	2.63	0.770	0.394	4.54	0.046	0.743	0.094	26.20	0.23	1.04	81.01
	11	56.14	19.06	6.63	2.63	0.876	0.383	4.47	0.035	0.785	0.078	24.28	0.23	1.00	80.05
	13	55.39	18.46	7.05	2.80	1.45	0.431	4.41	0.046	0.807	0.093	22.87	0.24	1.13	75.77
	19	53.23	15.85	7.51	2.81	3.47	0.653	3.45	0.123	0.733	0.146	21.62	0.22	1.53	61.31
	21	56.28	20.01	6.41	2.51	0.387	0.370	4.76	0.029	0.790	0.066	25.33	0.24	0.90	83.78
	28	51.17	16.33	6.66	2.62	3.07	0.512	3.59	0.069	0.716	0.116	22.81	0.22	1.37	64.34
	33	55.64	18.83	5.69	2.62	1.31	0.535	4.42	0.042	0.788	0.097	23.90	0.23	1.03	76.29
	35	52.20	18.26	6.37	2.80	1.99	0.504	4.21	0.059	0.751	0.124	24.31	0.23	1.17	72.16
	37	54.75	17.56	5.94	2.99	2.85	0.528	4.18	0.062	0.776	0.124	22.63	0.24	1.32	66.70
	39	56.38	20.61	5.18	2.62	0.319	0.391	4.96	0.024	0.792	0.063	26.02	0.24	0.86	84.23
	44	53.21	18.27	5.87	2.54	2.01	0.466	4.09	0.055	0.775	0.106	23.57	0.22	1.10	72.12
	51	55.03	17.33	6.01	2.72	2.83	0.538	4.07	0.067	0.788	0.131	21.99	0.23	1.29	66.59
	51-4	52.64	17.15	6.59	2.69	3.08	0.489	4.11	0.097	0.752	0.132	22.81	0.24	1.34	65.36
	53	52.30	18.92	9.93	2.40	0.784	0.451	4.54	0.061	0.731	0.080	25.88	0.24	1.09	80.21
	56	54.43	19.61	7.01	2.57	0.551	0.414	4.67	0.041	0.768	0.088	25.53	0.24	0.96	82.41
	60	49.78	18.16	7.61	2.51	1.39	0.330	4.05	0.080	0.697	0.130	26.05	0.22	1.09	76.92
	61	55.66	21.78	4.54	2.38	0.572	0.440	5.07	0.026	0.786	0.065	27.71	0.23	0.79	82.51
	64	54.19	20.06	5.78	2.50	0.644	0.465	4.54	0.050	0.789	0.109	25.42	0.23	0.90	81.76
A-2	8	47.48	15.29	3.67	1.35	0.155	0.416	3.42	0.013	0.765	0.038	19.99	0.22	0.75	78.74
	20	54.88	18.9	5.29	2.3	1.01	0.678	4.15	0.04	0.768	0.077	24.61	0.22	0.94	75.49
	23-5	55.99	18.76	5.23	2.34	0.959	0.629	4.12	0.042	0.793	0.081	23.66	0.22	0.94	76.02
	24	54.27	19.04	5.52	2.13	1.04	0.606	3.42	0.052	0.806	0.096	23.62	0.18	0.88	75.83
	26	55.75	17.73	5.71	2.21	1.21	0.742	3.44	0.049	0.798	0.104	22.22	0.19	0.99	72.29
	27	55.30	16.17	6.10	2.55	3.25	0.735	3.53	0.072	0.756	0.130	21.39	0.22	1.39	61.40
	31	56.28	20.27	4.51	1.96	0.491	0.645	4.15	0.029	0.810	0.071	25.02	0.20	0.76	79.17
	41	52.13	19.40	5.01	2.08	0.600	0.676	4.05	0.037	0.728	0.071	26.65	0.21	0.83	77.95
	43	28.84	15.06	3.27	0.93	0.186	0.322	2.49	0.021	0.435	0.032	34.62	0.17	0.57	77.74
	49	46.60	23.15	3.91	1.52	0.285	0.501	3.68	0.017	0.678	0.161	34.14	0.16	0.55	83.33
	52	40.08	20.16	4.35	1.26	0.216	0.378	3.11	0.016	0.599	0.041	33.66	0.15	0.55	82.34
	59	28.46	12.64	6.37	1.04	0.338	0.298	2.21	0.020	0.462	0.035	27.36	0.17	0.86	73.55
B-1	9	56.53	20.26	6.06	2.29	0.375	0.708	4.88	0.047	0.759	0.081	26.69	0.24	0.88	81.86
	12	47.72	17.24	6.36	1.94	0.764	0.557	4.02	0.068	0.690	0.076	24.99	0.23	0.97	78.84
	13	53.62	19.74	6.03	2.36	0.298	0.620	4.79	0.034	0.736	0.074	26.82	0.24	0.89	82.75
	22	54.07	20.30	4.87	2.12	0.187	0.625	5.04	0.018	0.748	0.057	27.14	0.25	0.81	83.49
	24	54.85	20.10	4.91	2.09	0.300	0.654	5.02	0.025	0.752	0.062	26.73	0.25	0.82	82.50
	26	56.61	19.05	5.83	2.33	0.560	1.00	4.55	0.053	0.769	0.091	24.77	0.24	0.96	78.40
	28	54.78	19.57	6.00	2.35	0.376	0.626	4.81	0.043	0.750	0.077	26.09	0.25	0.91	82.13
	30	48.04	17.80	5.73	2.02	0.209	0.697	4.44	0.024	0.679	0.068	26.22	0.25	0.90	82.22

注:ICV—成分变异指数(Index of compositional variability); CIA_{corr}—校正后的化学蚀变指数(Chemical index of alteration)。

Yb_N = 7.02~24.17), HREE 分布较为平缓(Gd_N/Yb_N = 0.88~4.18), 且具有明显的 Eu 负异常(平均值 = 0.75), 样品的上述特征指示其母岩很可能是长英质岩。

Th/U 值可作为确定物源区类型的参数之一(Taylor et al. , 1985; McLennan et al. , 1993), 现今地壳 Th/U 平均值为 4.25~4.30, 上地壳与上地幔分界值为 3.8, 上下地幔的分界值为 2.6(Paul et al. , 2003)。西湖凹陷 A-1、A-2 和 B-1 井泥质岩的 Th/U 平均值分别为 4.55、4.26 和 4.28, 与上地壳存在明显的亲缘关系。微量元素 Th/U-Th 判别图

可更好确认母岩来源(Taylor et al. , 1985; McLennan et al. , 1993), 北部(A-1)大部分样品投点落在上地壳区域, 仅 19 号样品和 60 号样品投点落在地幔区域; 中部(A-2)除底部 59 号、52 号和 49 号样品投点落在上地幔区域, 其余样品投点落在上地壳区域; 南部(B-1)全部样品投点落在上地壳区域(图 5a)。因此可得出平湖组泥质岩母岩主要由上地壳岩石演化而来, 少部分为地幔来源。在微量元素 La/Th-Hf 判识母岩类型图解中(Cox et al. , 1995), 大部分样品投点落在酸性岩浆弧物源区, 极

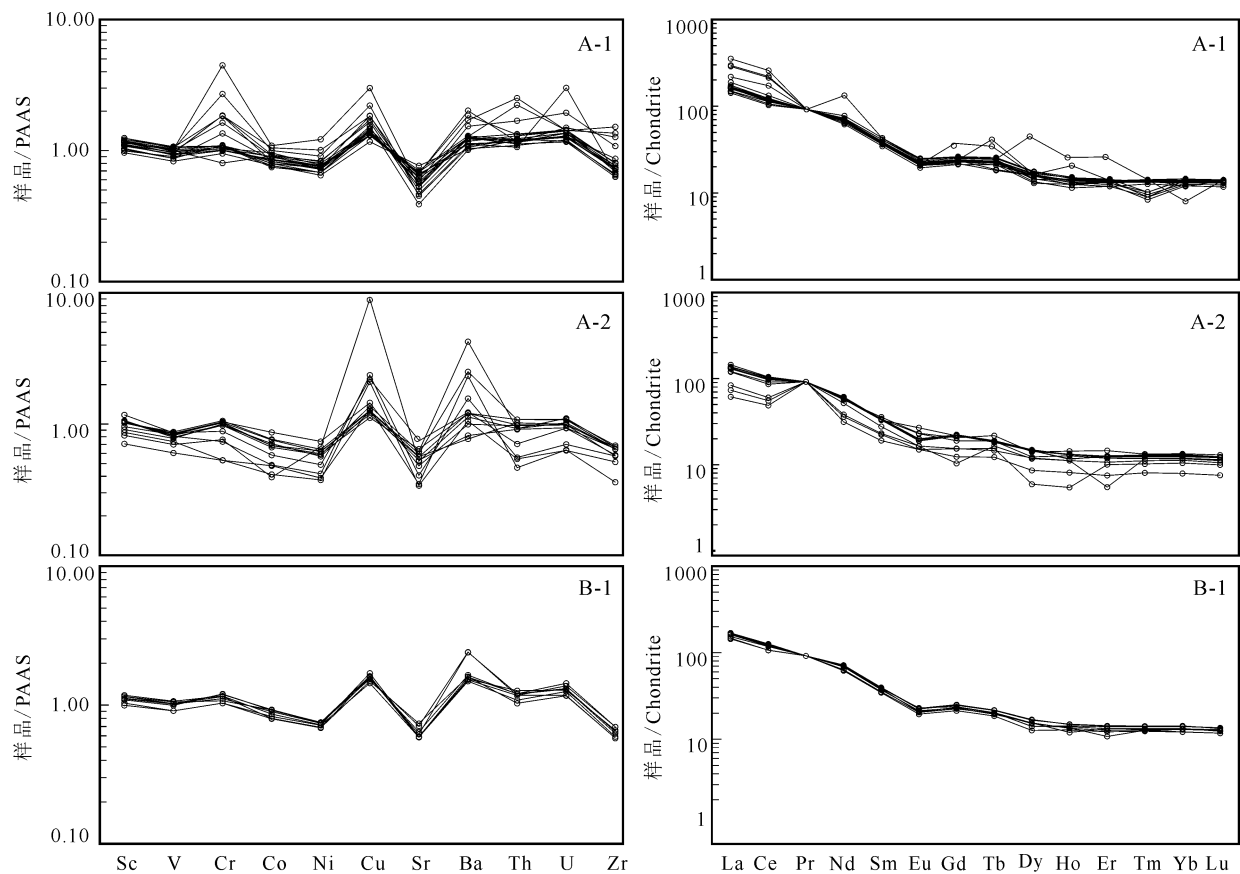


图 3 西湖凹陷始新统平湖组泥质岩微量元素 PASS 标准化模式图(标准化数据引自 Taylor et al. , 1985) 和稀土元素配分图(标准化数据引自 McLennan, 1993)

Fig. 3 The distribution patterns of the trace elements (standardized data from Taylor et al. , 1985) and REE (standardized data from McLennan, 1993) of the Eocene argillaceous rocks in the Xihu depression

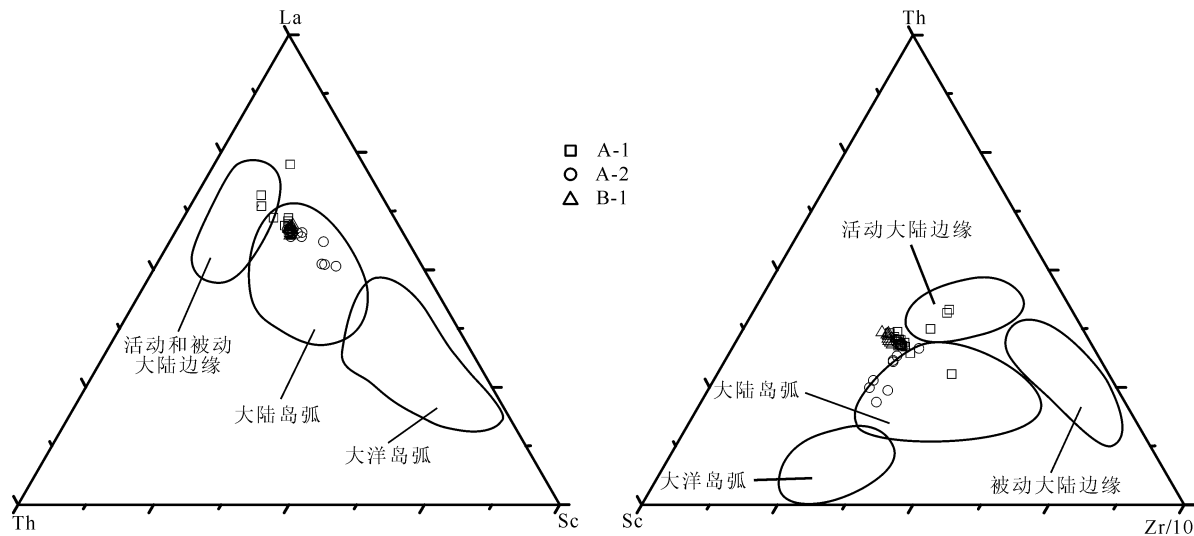


图 4 西湖凹陷平湖组泥质岩 La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 判别图解(底图据 Bhatia et al. , 1986)

Fig. 4 La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 discriminatory plots of the Pinghu Formation argillaceous rocks in the Xihu depression (base map after Bhatia et al. , 1986)

表 2 西湖凹陷始新统平湖组泥岩的微量元素测试结果(×10⁻⁶)

Table 2 Trace elements compositions (×10 ⁻⁶) of Eocene argillaceous rocks from Pinghu Formation of the Xihu depression																	
井号	样号	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Sr	Ba	Th	U	Zr	Hf	B	Mo	B _c	Sr/Cu
A-1	3	18.7	140	80.2	18.2	43.1	38.4	77.8	606	17.6	3.99	182	5.22	75.2	0.85	148	2.03
	6	19.0	144	270	20.0	54.4	55.1	90.3	635	18.0	4.21	161	4.00	82.7	28.1	155	1.64
	11	18.5	140	163	18.2	50.1	41.3	92.8	653	18.0	4.22	170	4.90	85.1	15.6	162	2.25
	13	17.9	135	185	21.0	60.5	45.7	112	734	17.3	3.91	154	4.77	81.1	16.8	156	2.45
	19	15.4	116	94.9	15.4	38.8	29.2	153	671	15.5	9.32	140	4.09	72.7	1.99	179	5.24
	21	19.4	148	183	16.5	44.4	46.0	98.8	706	18.9	4.37	168	5.09	83.6	14.3	149	2.15
	28	15.9	126	100	16.9	45.2	32.5	133	620	16.0	3.74	136	4.01	80.1	2.82	190	4.09
	33	18.3	141	109	17.8	45.9	35.0	115	741	17.7	3.95	161	4.73	86.9	2.07	167	3.29
	35	17.5	137	103	18.0	47.9	35.3	123	676	16.9	4.02	156	4.54	86.0	1.57	174	3.48
	37	17.5	130	101	17.1	46.1	34.7	130	676	17.0	4.20	152	4.45	96.1	1.18	195	3.75
	39	19.9	150	108	15.9	44.2	37.0	107	753	19.5	4.46	168	5.13	94.3	0.77	162	2.89
	44	17.3	132	104	19.2	46.5	33.9	126	754	17.5	3.90	151	4.30	84.5	1.88	176	3.72
	51	16.6	122	135	17.0	45.7	32.9	141	776	17.8	3.66	139	4.28	90.4	6.91	189	4.29
	51-4	16.3	122	110	15.9	40.7	32.5	137	750	16.4	3.61	132	3.72	85.7	4.33	177	4.22
	53	18.4	143	447	21.8	73.0	74.9	106	919	24.6	6.01	227	9.98	87.1	62.4	163	1.42
	56	18.5	134	185	18.6	49.3	42.9	105	767	32.5	4.42	285	4.64	88.7	15.1	161	2.45
	60	17.8	129	108	14.9	40.9	36.3	133	1209	17.1	4.63	266	4.02	65.1	4.22	137	3.66
	61	19.9	146	109	15.3	40.8	35.2	117	1023	36.7	4.41	318	12.8	88.9	1.69	149	3.32
	64	19.0	138	106	16.5	43.1	34.1	134	1109	19.3	4.40	145	4.32	82.2	1.99	154	3.93
A-2	8	13.1	97.8	76.1	7.87	40.3	224	104	679	13.5	3.43	140	4.11	81.2	2.04	202	0.46
	20	16.3	118	102	13.7	37.4	29.5	112	725	15.8	3.35	135	4.32	101	2.41	207	3.80
	23-5	16.3	122	106	15.3	38.5	31.7	119	1503	15.8	3.37	144	4.46	90.1	1.94	186	3.75
	24	16.8	115	97.7	14.2	34.0	30.7	106	491	13.3	2.90	136	4.25	82.9	1.48	206	3.45
	26	15.3	116	103	15.1	36.8	31.5	113	462	14.9	3.09	135	3.70	82.9	4.89	205	3.59
	27	14.5	109	100	13.7	35.6	27.9	129	723	14.4	3.07	120	3.73	84.7	1.56	204	4.62
	31	16.6	119	104	17.3	44.2	36.3	96.0	597	14.2	3.05	140	4.31	91.2	4.8	187	2.64
	41	16.8	111	97.7	13.3	35.0	34.1	124	2548	13.5	3.17	136	4.12	96.0	2.35	201	3.64
	43	13.8	103	53.1	8.25	22.5	52.4	67.9	634	7.92	1.95	108	2.81	70.3	1.57	240	1.30
	49	18.8	120	88.1	11.6	29.4	55.1	454	736	10.3	2.88	122	3.76	79.0	1.99	182	8.24
	52	17.0	113	73.5	9.76	25.1	59.0	81.2	939	8.12	2.17	120	3.52	65.2	1.53	178	1.38
	59	11.3	84.3	52.9	9.61	23.3	32.6	69.8	1397	6.79	1.97	75.7	2.26	65.5	2.57	252	2.14
B-1	9	18.4	147	107	18.4	45.0	40.3	118	922	18.5	3.96	138	4.30	84.5	0.69	147	2.93
	12	16.5	127	103	16.5	42.8	35.9	117	889	15.8	3.87	124	3.80	63.0	2.4	133	3.26
	13	18.4	143	119	18.5	44.8	39.6	117	911	17.1	4.25	146	4.39	77.6	2.78	138	2.95
	22	18.8	149	116	17.2	43.1	42.3	118	952	17.6	4.44	146	4.47	85.4	1.1	144	2.79
	24	17.9	143	115	16.0	41.4	39.6	123	1436	17.6	4.07	135	4.18	84.6	1.67	143	3.11
	26	17.4	139	120	18.3	44.6	38.4	141	1442	17.1	3.63	121	3.73	89.7	2.57	168	3.67
	28	17.7	142	111	17.9	44.2	38.6	128	985	17.5	4.03	131	3.96	84.4	1.03	149	3.32
	30	15.9	127	103	15.9	41.0	37.1	147	959	15.0	3.61	121	3.76	72.5	1.3	139	3.96

注:B_c—校正后的 B 含量。

个别落在长英质、基性岩混合物源区,仅 A-1 井 53 号和 61 号样品投点落在老沉积物组分区(图 5b)。综上可得出研究区平湖组泥质岩母岩以上地壳岩浆岩为主,少量老沉积物组分和地幔岩浆岩。研究区中部多口探井钻遇一套以火山岩为主夹碎屑岩的地层,根据同位素地质年龄推断其岩浆活动为早、中始新世(Yang Chuansheng et al. , 2012),推测中北部(A-1 和 A-2)平湖组沉积早期,由于早、中始新世岩浆活动导致地幔物质涌出地表,使平湖组底部泥质岩母岩部分表现为地幔来源的特征。

Al₂O/TiO₂ 值能很好地指示母岩类型, Hayashi et al. (1997)认为 Al₂O₃/TiO₂ 值介于 3~8 之间,母岩为镁铁质火成岩;介于 8~21 之间,母岩为中性火成岩;介于 21~70,母岩为长英质火成岩。研究区样品的 Al₂O₃/TiO₂ 值介于 19.99~34.62,平均值为 25.39(表 2),表明平湖组泥质岩的母岩主要为长英质火成岩。仅在研究区中部 A-2 井中 8 号样品 Al₂O₃/TiO₂ 值为 19.99,指示中部地区平湖组一、二段泥质岩母岩可能有少量中性岩浆岩。K₂O/Al₂O₃ 值通常被用来定性判断沉积物母岩中碱性长

表 3 西湖凹陷始新统平湖组泥岩的稀土元素测试结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Rare earth elements compositions ($\times 10^{-6}$) of Eocene argillaceous rocks from Pinghu Formation of the Xihu depression

井号	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Eu/ Eu*	(La/ Yb) _N	(Gd/ Yb) _N	LREE/ HREE
A-1	3	50.2	94.2	11.2	40.7	7.30	1.53	6.07	1.11	5.36	1.07	3.03	0.33	3.02	0.47	0.70	11.21	1.62	10.03
	6	51.4	94.9	11.2	40.9	7.30	1.54	6.09	1.08	4.59	1.04	2.91	0.46	2.91	0.46	0.71	11.91	1.69	10.61
	11	49.1	94.5	11.2	40.5	7.16	1.52	5.63	0.86	5.06	1.01	2.92	0.29	2.94	0.47	0.73	11.26	1.55	10.64
	13	49.9	94.0	11.2	40.7	7.23	1.57	6.12	0.88	5.16	0.99	2.85	0.45	2.88	0.45	0.72	11.68	1.71	10.34
	19	45.7	85.9	10.9	38.3	7.05	1.51	5.85	1.05	4.33	0.82	2.50	0.29	2.61	0.41	0.72	11.80	1.81	10.60
	21	52.1	99.1	11.9	41.8	7.37	1.56	6.04	1.06	5.11	0.99	2.86	0.46	1.67	0.47	0.71	21.03	2.92	11.46
	28	44.0	83.0	10.0	37.0	6.72	1.43	5.51	1.00	4.16	0.90	2.49	0.41	2.52	0.39	0.72	11.77	1.76	10.48
	33	50.6	93.5	11.2	40.8	7.28	1.58	5.99	1.08	5.05	0.88	2.82	0.43	2.82	0.44	0.73	12.10	1.71	10.51
	35	46.4	90.7	10.9	39.6	7.12	1.55	6.00	0.99	5.07	1.00	2.79	0.43	2.78	0.44	0.73	11.25	1.74	10.07
	37	49.4	96.9	12.0	43.4	7.96	1.71	6.46	1.15	4.68	0.90	2.87	0.44	2.85	0.44	0.73	11.69	1.83	10.68
	39	53.9	99.3	11.8	42.6	7.43	1.56	6.02	1.07	5.10	1.01	2.73	0.33	2.99	0.47	0.71	12.15	1.62	10.98
	44	49.7	91.6	11.4	40.1	7.25	1.58	5.97	1.04	5.01	0.95	2.76	0.43	2.72	0.43	0.73	12.32	1.77	10.44
	51	50.3	94.1	11.4	42.1	7.62	1.64	6.25	1.10	5.24	0.99	2.74	0.31	2.71	0.45	0.73	12.51	1.86	10.47
	51-4	51.1	96.6	11.0	40.2	7.47	1.61	6.12	1.07	5.05	0.94	2.62	0.27	2.52	0.39	0.73	13.67	1.96	10.96
	53	67.4	139	13.8	42.2	7.58	1.67	6.23	2.65	5.25	1.48	2.92	0.45	2.96	0.46	0.74	15.35	1.70	12.13
	56	88.9	172	11.4	41.4	7.39	1.57	14.7	3.17	5.11	0.98	2.84	0.44	2.84	0.45	0.46	21.10	4.18	10.57
	60	91.6	178	17.8	43.1	7.97	1.78	6.61	1.18	5.58	1.05	2.98	0.44	2.86	0.45	0.75	21.59	1.87	16.09
	61	109	208	12.9	79.6	8.29	1.79	6.69	1.16	23.4	2.98	8.84	0.46	3.04	0.46	0.73	24.17	1.78	8.92
	64	58.3	107	13.3	46.4	8.36	1.83	6.78	1.21	5.68	1.09	2.77	0.46	2.48	0.46	0.74	15.85	2.21	11.24
A-2	8	37.5	73.5	8.65	31.1	5.40	1.20	2.68	0.78	3.78	0.80	1.15	0.38	2.45	0.37	0.96	10.32	0.88	12.70
	20	42.6	83.2	9.82	36.2	6.54	1.45	5.64	0.86	4.67	0.84	2.59	0.41	2.69	0.41	0.73	10.68	1.69	9.93
	23-5	44.8	84.6	9.92	36.8	6.60	1.68	4.91	0.89	4.67	0.95	2.63	0.41	2.68	0.41	0.90	11.27	1.48	10.51
	24	41.4	78.1	9.27	34.5	6.42	1.39	5.55	0.90	4.79	0.94	2.62	0.42	2.75	0.41	0.71	10.15	1.63	9.31
	26	42.3	82.1	9.76	36.1	6.66	1.40	5.77	0.90	4.59	0.94	2.56	0.40	2.58	0.40	0.69	11.05	1.80	9.83
	27	40.8	80.2	9.62	35.3	6.66	1.47	5.75	0.89	3.96	0.91	2.49	0.38	2.48	0.38	0.73	11.09	1.87	10.10
	31	42.2	82.9	9.65	35.9	6.44	1.46	5.66	0.88	4.69	0.83	2.66	0.42	2.62	0.41	0.74	10.86	1.74	9.83
	41	40.2	78.3	9.44	35.0	6.42	1.97	5.59	0.89	4.70	0.93	2.62	0.41	2.61	0.40	1.01	10.38	1.73	9.44
	43	22.7	44.7	5.60	21.6	4.35	1.10	3.96	0.73	1.91	0.39	2.10	0.33	2.18	0.33	0.81	7.02	1.47	8.39
	49	37.0	69.6	8.84	34.0	6.96	1.70	5.33	1.03	4.52	1.03	3.06	0.43	2.80	0.43	0.85	8.91	1.54	8.49
	52	25.9	48.6	5.99	22.9	4.49	1.21	3.99	0.69	3.84	0.80	2.24	0.36	2.35	0.35	0.87	7.43	1.37	7.46
	59	19.0	39.4	4.26	18.8	3.71	1.10	3.20	0.58	2.76	0.58	1.57	0.26	1.65	0.25	0.98	7.76	1.56	7.95
B-1	9	52.4	99.8	11.7	43.0	7.73	1.67	6.49	1.03	5.43	1.06	2.98	0.45	2.93	0.45	0.72	12.06	1.79	10.39
	12	45.6	86.0	10.2	38.1	6.87	1.50	5.81	0.94	4.88	0.97	2.26	0.41	2.70	0.42	0.73	11.39	1.74	10.24
	13	52.3	102	11.7	43.1	7.69	1.64	6.38	1.02	5.33	1.07	3.00	0.46	2.98	0.44	0.72	11.83	1.73	10.56
	22	51.2	99.4	11.2	42.1	7.45	1.52	6.05	0.96	4.51	1.02	2.93	0.45	2.92	0.45	0.69	11.82	1.67	11.04
	24	47.6	95.1	11.1	41.0	7.24	1.57	5.90	0.92	4.97	0.86	2.77	0.42	2.72	0.43	0.73	11.80	1.75	10.72
	26	50.0	98.2	11.4	42.2	7.53	1.69	6.14	0.96	4.97	0.96	2.65	0.41	2.54	0.39	0.76	13.27	1.95	11.09
	28	50.0	96.6	11.3	41.8	7.35	1.54	6.03	0.96	4.53	1.00	2.78	0.43	2.78	0.41	0.71	12.13	1.75	11.02
	30	44.6	86.3	9.62	37.1	6.73	1.43	5.52	0.88	4.07	0.92	2.56	0.40	2.53	0.39	0.72	11.88	1.76	10.76

石的含量,Cox et al. (1995)指出当 K_2O/Al_2O_3 值大于 0.5 时,沉积母岩中含有较高含量的碱性长石,研究区泥质岩样品的 K_2O/Al_2O_3 值范围为 0.15~0.25,平均值为 0.22(表 1),表明母岩中碱性长石的含量较低,推测母岩可能为酸性花岗闪长岩或英安岩,并有少量中性安山岩或闪长岩。

前人通过二维地震资料和重磁资料的处理解释,认为海礁隆起基底以燕山期花岗岩、花岗闪长岩等侵入岩以及安山岩、英安质凝灰岩等喷发岩和火山碎屑岩为主,在中生界火山岩系之下可能存在古

生界变质岩系(Yang Chuansheng et al. , 2012;Zhu Lixin, 2016)。因此本文认为海礁隆起区为西湖凹陷西部斜坡区平湖组沉积期主要物源区,母岩整体以上地壳的长英质火成岩为主,北部(A-1)平湖组五段部分泥质岩母岩受到少量来自上地壳古生界变质岩系影响,中部(A-2)平湖组四段部分泥质岩母岩受幔源岩浆的影响,母岩类型主要为花岗闪长岩和英安质凝灰岩,少量安山岩和变质岩。西湖凹陷变质岩母源来源的砂体相对于岩浆岩母源的砂体具有更好的物性条件(Li Ning et al. , 2017),因此本

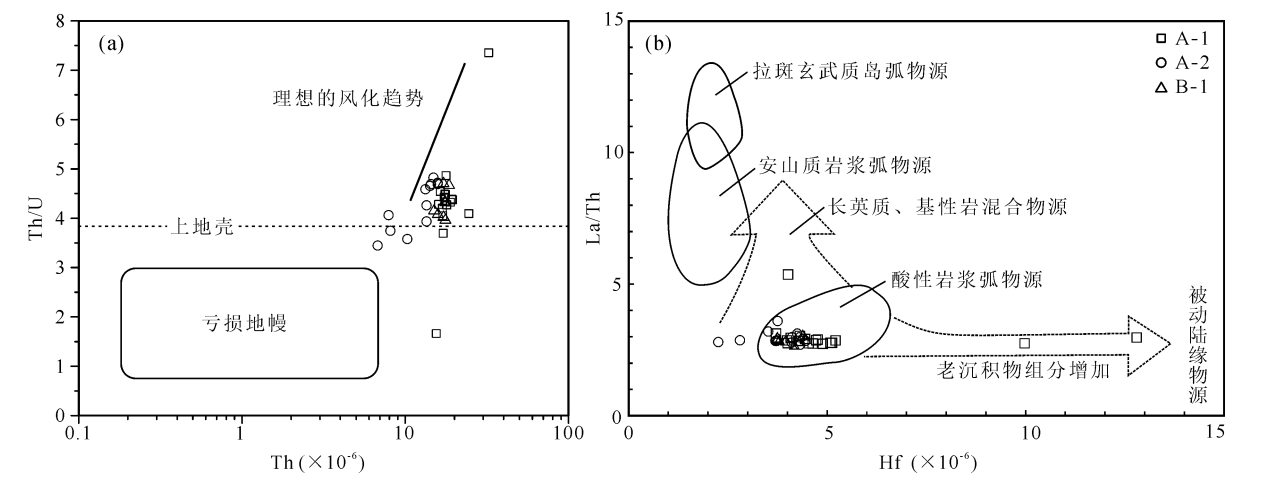


图 5 西湖凹陷平湖组泥质岩 Th/U-Th (a)(底图据 McLennan et al. , 1993)和 La/Th-Hf 判别图(b)(底图据 Cox et al. , 1995)

Fig. 5 Plot of Th/U versus Th (a) (base map after McLennan et al. , 1993) and La/Th-Hf discriminant diagram (b) (base map after Cox et al. , 1995) for the Pinghu Formation argillaceous rocks in the Xihu depression

文认为西湖凹陷北部(A-1)平湖组五段可能分布有物性条件较好的砂体。

4.3 物源区化学风化作用及其反映的源区古气候特征

物源区的化学风化强度受源区岩石类型、气候特征、构造背景、地形特征、植被条件等因素的影响(Berner, 1992;Oliva et al. , 2003)。化学蚀变指数CIA(Nesbitt et al. , 1982)可用于定量评价化学风化强度,计算公式为:

$$CIA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)]\times 100$$

其中氧化物为摩尔百分数,CaO* 是岩石中硅酸盐所含的 CaO。

由于碎屑岩在成岩过程中的钾交代作用及搬运、沉积过程都会造成钾的富集,因此在使用 CIA 指数时必须首先进行钾交代作用校正。本文采用 Nesbitt et al. (1984, 1989)提出的 A-CN-K(Al₂O₃-(CaO* + Na₂O)-K₂O)三角图解进行校正,结果如图 6 所示。其中 L 和 L'为预测未发生钾交代作用泥质岩风化趋势线,l 和 l'为实际泥质岩风化趋势线,从图 6 可以看出泥质岩样品存在一定程度的钾交代作用,A-1 和 B-1 井的泥质岩风化趋势线偏向 K₂O 端元的程度要强于 A-2 井。从 K 定点出发穿过实测数据点与 L 和 L'的交点即为剔除钾交代作用后泥质岩 CIA_{corr} 值。

另外在使用 CIA 值判断源区风化程度时必须考虑到泥质岩是否受到再旋回作用的影响,本文利用 Cox et al. (1995)提出的成分变异指数 ICV 来判断,计算公式为:

$$ICV=(Fe_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO+MgO+$$

$$MnO+TiO_2)/Al_2O_3$$

式中氧化物以摩尔百分数为单位。当 ICV>1 时,指示样品中含有少量的黏土矿物,属于构造活动背景下的首次沉积;ICV<1 时,指示样品中含有大量的黏土矿物,代表可能经受了再旋回作用或首次沉积条件下经历了强烈的风化作用。从本次研究的样品的 ICV 值(表 2)可知,大多数样品的 ICV 值均接近 1 或大于 1,表明为活动构造带的首次沉积;少数 A-2 井样品的 ICV 值位于 0.55~0.57,表明其可能经历了再循环沉积或首次沉积时经历了强风化作用。Zr/Sc 是常用的判断沉积物再旋回的指数(Hassan et al. , 1999),而 Th/Sc 可作为判断化学分异的指标(McLennan et al. , 1993),因此采用 Zr/Sc-Th/Sc 图解(McLennan et al. , 1993; Mongelli et al. , 2006),来判断低 ICV 值的样品沉积物是否经历再旋回作用的影响。从图 7 可以看出所有样品投点与成分趋势线非常接近,可初步得出样品并未遭受再旋回作用的影响,而低 ICV 值的样品所对应的 CIA_{corr} 值分布范围 77.34~83.33,因此可得出低 ICV 值的样品是首次沉积时强风化作用所导致的。

为了得到每一个样品的准确 CIA 值,本文采用 Panahi et al. (2000)提出的校正公式进行校正:

$$CIA_{corr}=[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O_{corr})]\times 100$$

$K_2O_{corr}=[mAl_2O_3+m(CaO^*+Na_2O)]/(1-m)$ 式中氧化物以摩尔百分数为单位,CaO* 是岩石中硅酸盐所含的 CaO, K₂O_{corr} 是指未发生钾交代作

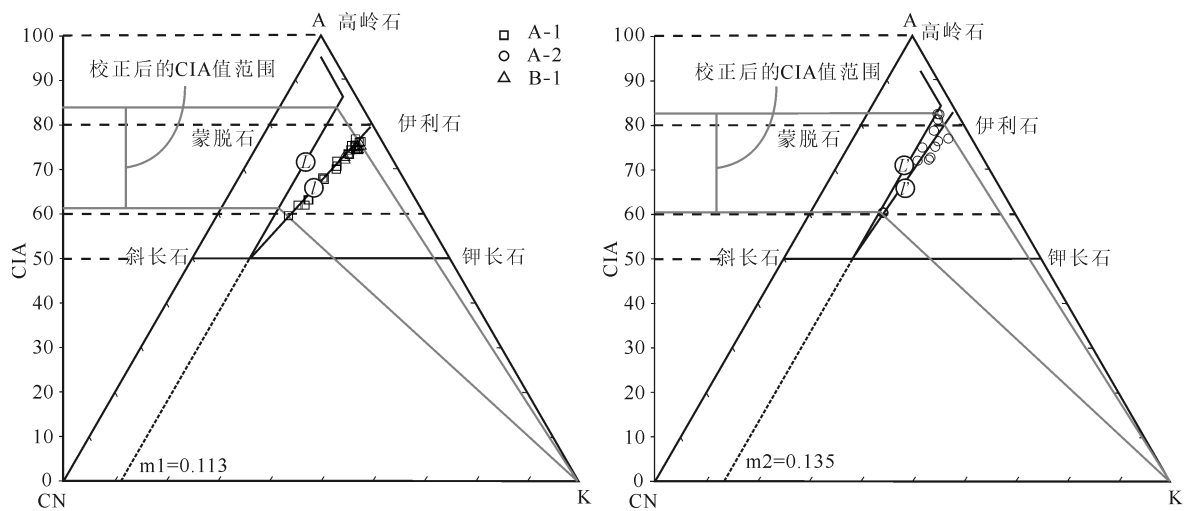


图 6 西湖凹陷平湖组泥质岩样品 A-CN-K 三角图解

Fig. 6 A-CN-K ternary diagram for the Pinghu Formation argillaceous rocks in the Xihu depression
L 和 L'—未发生钾交代作用的泥质岩风化趋势线; l 和 l'—代表发生钾交代作用的泥质岩风化趋势线
L and L' are the initial progressive chemical weathering trends; l and l' are the K-metasomatism trend that resulted from the diagenetic K addition to the saprolith

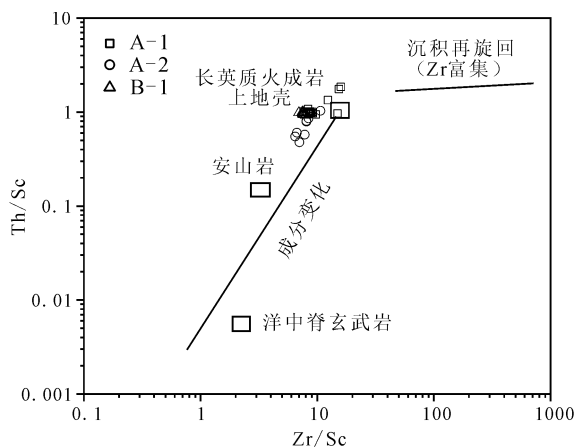


图 7 西湖凹陷平湖组泥质岩 Zr/Sc-Th/Sc 图解
(底图据 McLennan et al. , 2003)

Fig. 7 Plot of Th/Sc versus Zr/Sc for the Pinghu Formation argillaceous rocks in the Xihu depression
(base map after McLennan et al. , 2003)

用的泥质岩中的 K_2O 的摩尔百分数; m 值代表母岩中的 K_2O 的比例, 研究区地处海域, 无法得到母岩的信息, 因此根据图 6 中平行于 A-CN 连线 L 和 L' 的延长线与 CN-K 轴的交点即为 m 值。校正后 CIA_{corr} 值如表 1 所示, 其中 A-1 井 CIA_{corr} 分布范围为 63.34~83.41, 平均值为 75.63, A-2 井 CIA_{corr} 分布范围为 61.40~83.33, 平均值为 76.15, B-1 井 CIA_{corr} 分布范围为 78.40~83.49, 平均值为 81.52。Fedot et al. (1995) 指出 $CIA=50\sim60$, 反映物源区遭受弱风化作用影响; $CIA=60\sim80$, 指示了中等风

化作用; $CIA=80\sim100$ 则反映了强烈风化作用。因此可得出西湖凹陷平湖组泥质岩的母岩经历了中等—强烈的风化作用。

探讨化学风化作用强弱时应首先考虑其直接控制因素古气候(温度、湿度等)(Gislason et al. , 2009)。物源区风化作用强弱的定量指标, 可用来反演沉积期的古气候条件(Goldberg et al. , 2010; Yang Jianghai et al. , 2017)。始新世—渐新世时期全球古气候由温室期逐步过渡到冰室期(Kraatz et al. , 2010; Anagnostou et al. , 2016; Herman et al. , 2017)。古生物特征(Herman et al. , 2017; Rivero-Cuesta et al. , 2018), 大气中二氧化碳含量(Pearson et al. , 2009)、碳同位素以及氧同位素特征(Jicha et al. , 2009)均记录了此次显著的变冷事件。始新世平湖组泥质岩样品的 CIA 值分布范围为 61.40~84.23, 平均值为 76.99, 根据 Hao Lewei et al. (2018) 报道的渐新世花港组泥质岩样品的主量元素, 计算 CIA 值分布范围为 67.54~79.35, 平均值为 74.95(表 4)。对比分析不同时期的 CIA 值, 始新世平湖组泥质岩 CIA 值要明显高于花港组, 说明始新世平湖组沉积期风化作用要强于花港组, 这与始新世到渐新世时期由温室期向冰室期过渡有着很好的对应关系。Sr/Cu 值是判断古气候的重要指标, 通常认为 Sr/Cu 值位于 1.3~5.0 指示潮湿气候, 而大于 5.0 指示干旱气候(Wang Suiji et al. , 1997), 平湖组泥质岩 Sr/Cu 值位于 0.5~8.2

之间,平均 3.21(表 2、图 8),且 Sr/Cu 值与 CIA 值有很好的对应关系。综上可推断出西湖凹陷在始新世平湖组沉积期古气候较为温暖湿润。

表 4 西湖凹陷碎屑岩沉积地球化学特征

Table 4 The average and range values of geochemical compositions of the sedimentary rocks in the Xihu depression

地层年代		泥岩 CIA 平均值	泥岩 CIA 范围	数据来源
渐新世	花港组	74.95	67.54~79.35	Hao Lewei et al. 2018
始新世	平湖组	76.99	61.40~84.23	本次研究

4.4 古环境恢复

泥质岩的微量元素(B、Sr、Ba、Ga、Cu 等)和稀土元素(Ce 等)的地球化学特征可作为定量化的指标来判断不同的古环境条件(Hofer et al., 2013; Lash et al., 2014; Zhang Xianguo et al., 2017; Wang Tong et al., 2020)。

4.4.1 沉积背景分析

硼元素(B)在沉积物中的富集主要取决于沉积环境的盐度,在高盐度的海水中可达 4440 μg/L,而淡水中溶解度则为 18 μg/L(Martin et al., 1983)。因此 B 常被用来作为判断海相、海陆过渡相和陆相的指标之一(Hofer et al., 2013; Lash et al., 2014; Zhang Xianguo et al., 2017)。B 吸附于黏土矿物中,伊利石通常具有较高的 B 吸附能力,而碎屑岩粒度的变化与 B 的富集呈负相关。本次研究样品全部为泥质岩,因此可排除粒度变化对 B 富集的影响。为了减小黏土矿物组成等对 B 富集程度的影响,优化 B 对沉积背景的指示作用,本研究采用 Walker(1968)提出的相当硼法进行校正,其计算公式如下:

$$B_c = (B_i \times 8.5) / K_2O$$

式中,B_c为校正后的 B 含量(×10⁻⁶);B_i为实际测试的硼含量(×10⁻⁶);K₂O 为 K₂O 含量(%)。

校正后 B 含量如表 3 所示,A-1 井 B_c 含量分布范围 137×10⁻⁶~195×10⁻⁶,平均值为 165×10⁻⁶;A-2 井 B_c 含量分布范围 178×10⁻⁶~252×10⁻⁶,平均值为 204×10⁻⁶;B-1 井 B_c 含量分布范围 133×10⁻⁶~168×10⁻⁶,平均值为 145×10⁻⁶。Walker (1968)指出相当硼<200×10⁻⁶时,水较淡;介于 200×10⁻⁶~300×10⁻⁶时,为半咸水;介于 300×10⁻⁶~400×10⁻⁶时,为正常海水;>400×10⁻⁶时,为过咸和超咸水。据上述指标对西湖凹陷 A-1、A-2 和 B-1 井进行沉积背景分析,结果表明:平湖组五段沉积期,北部(A-1)相当硼含量呈增加趋势,但沉积

水体整体上为淡水;平湖组四段沉积期,北部(A-1)相当硼含量呈增加的趋势,但沉积水体整体上为淡水,中部(A-2)相当硼含量整体上呈减小的趋势,从相当硼含量变化可推断出在该时期沉积水体表现为淡水和半咸水交替演化的特征;平湖组三段沉积期,北部(A-1)相当硼呈减小的趋势,沉积水体整体上为淡水,中部(A-2)除少数样品相当硼含量低于 200×10⁻⁶,沉积水体为淡水,大部分样品相当硼含量大于 200×10⁻⁶,但小于 300×10⁻⁶,为半咸水;平湖组一、二段沉积期,北部(A-1)和南部(B-1)水体含盐度较低,为淡水,而中部(A-2)为半咸水(图 8)。

从古地貌角度来看,研究区在北部(A-1)的古地形高程要明显高于中部(A-2)和南部(B-1)(Cai Hua et al., 2019),古地形上的差异可能导致平湖组沉积期中部和南部更易受到海水的影响;从古生物特征来看,西湖凹陷南部发育钙质超微、有孔虫、介形虫、沟鞭藻等低丰度海相化石,且由南向北海相化石丰度逐渐降低,纵向上平湖组中下部发育低丰度海相化石,到平湖组上部发育有指示淡水的盘星藻、腹足类、蚌类、双壳类等化石(Zhou Xinhui, 2020)。

研究区内平湖组以三角洲沉积体系为主,多发育三角洲平原和三角洲前缘两种亚相类型(图 2)。前人认为西湖凹陷平湖组沉积期主要发育受潮汐影响的三角洲和潮坪沉积体系(Li Shunli et al., 2018; Abbas et al., 2018; Jiang Yiming et al., 2020)。通过古盐度指标判断,并综合古地貌及古生物特征分析,认为西湖凹陷平湖组沉积期自北向南沉积背景有明显的地区差异性,北部主要发育河控三角洲沉积体系,中部和南部则主要发育受潮汐影响三角洲沉积体系。

4.4.2 氧化还原条件分析

泥质岩微量元素可用来说明古水体的氧化还原特征(Hatch et al., 1992; Jones et al., 1994; Cullers, 2002; Lash et al., 2014)。Mo 和 U 元素在沉积物中含量很低,Mo 元素在 2.7×10⁻⁶左右,而 U 元素在 3.7×10⁻⁶左右(Taylor et al., 1985);且这两种元素在海水中具有较长的滞留时间(Mo 大约 780 ka,U 大约 450 ka),Mo 和 U 在海洋浮游生物中含量很低,沉积物中的 Mo 和 U 主要在缺氧条件下富集(Algeo et al., 2009)。Th 元素在富氧环境中通常比较稳定,并且趋向于富集在富含黏土的沉积物中(Wignall, 1988)。Jones et al. (1994)认为含氧环境中的沉积物 U/Th<0.75,研究区泥

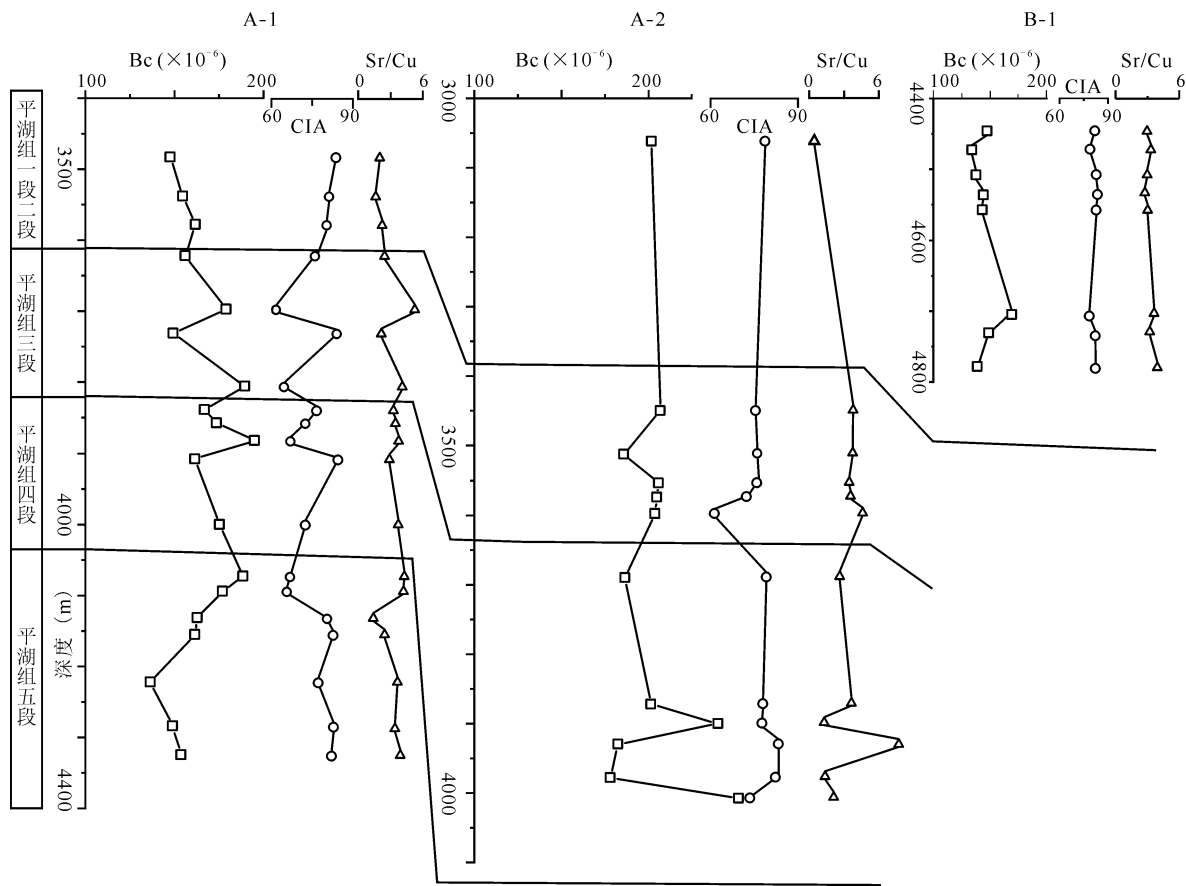


图 8 西湖凹陷 A-1、A-2 和 B-1 井相当硼含量、CIA 和 Sr/Cu 垂向变化趋势图
Fig. 8 B, CIA and Sr/Cu are plotted for wells A-1, A-2, and B-1 in the Xihu depression

质岩样品 U/Th 值范围为 0.12~0.60, 平均值为 0.24, 因此可得出研究区泥质岩样品形成于含氧环境中。

Ni 和 V 存在于高度稳定的四吡咯结构(如卟啉)中, 这种结构最初来源于叶绿素, 并优先在厌氧条件下保存, 长期暴露于好氧条件下的有机物具有低的四吡咯含量, 因此 Ni 和 V 含量低(Lewan et al., 1982)。V 也可能吸附于黏土矿物, 也可能是成岩后的结果(Breit et al., 1991)。Cr 被认为仅与碎屑组分有关(Dill, 1986), 不受氧化还原条件的影响, 因此高 V/Cr 值(>2)被认为指示缺氧条件。Ni 和 Co 均存在于黄铁矿中, 但高 Ni/Co 值(>5)与缺氧条件有关(Rimmer, 2004)。V/Cr-Ni/Co 和 Mo-Ni/Co 图解可用来判断碎屑岩形成时的氧化还原条件(Rimmer, 2004)。从图 9 可以看出所研究的泥质岩样品主要在含氧环境中形成。

平湖组泥质岩样品有机地球化学特征显示伽马蜡烷含量极低, 并且具有较高的 Pr/Ph 值(Zhu Yangming et al., 2012; Cheng Xiong et al., 2020), 表明平湖组沉积期水体处于含氧环境中。原

油生物标志化合物反映凹陷自南向北陆源高等植物输入增多, 水体变浅, 平湖组沉积期整体上为浅水的沉积背景(Zhou Xinhui, 2020)。V/Cr-Ni/Co 和 Mo-Ni/Co 图解判识结果与煤系和原油有机地球化学判识结果较为一致, 因此本文认为研究区平湖组泥质岩主要形成于水体较浅的含氧环境中。

5 结论

(1) 泥质岩微量元素构造判识结果表明西湖凹陷平湖组沉积期同时具有大陆岛弧和活动大陆边缘构造背景。海礁隆起为西湖凹陷西部斜坡区平湖组主要物源区, 母岩主要以上地壳的长英质火成岩为主, 并受到少量来自上地壳古生界变质岩系和幔源岩浆的影响, 母岩类型主要为花岗闪长岩和英安质凝灰岩, 少量安山岩和变质岩。

(2) CIA_{corr} 计算结果的分析得出平湖组泥质岩的母岩经历了中等—强烈的风化作用。研究区平湖组泥质岩 Sr/Cu 值和化学蚀变指数 CIA 对古气候的反演结果较为一致, 即该时期古气候条件较为温暖湿润。

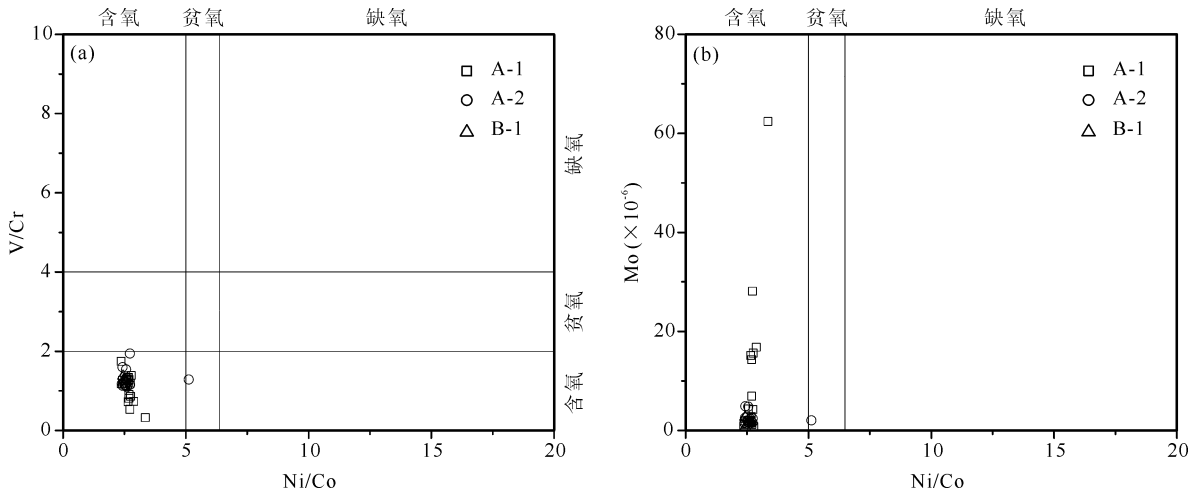


图 9 判别古氧化还原条件的微量元素比值交会图(底图据 Rimmer,2004)

Fig. 9 Crossplots of trace-element ratios used as paleoredox proxies (base map after Rimmer,2004)

(a)—V/Cr-Ni/Co 判别图;(b)—Mo-Ni/Co 判别图;V/Cr 和 Ni/Co 的范围据 Jones et al.,1994

(a)—V/Cr vs Ni/Co; (b)—Mo vs Ni/Co; ranges for V/Cr and Ni/Co are from Jones et al.,1994

(3) 西湖凹陷平湖组沉积期自北向南沉积背景有明显的地区差异性,具体表现为:北部(A-1)沉积水体整体上为淡水,主要发育河控三角洲沉积体系,而中部(A-2)和南部(B-1)沉积水体表现为淡水和半咸水交替演化的特征,主要发育受潮汐影响三角洲沉积体系。微量元素 U/Th 值, V/Cr-Ni/Co 和 Mo-Ni/Co 图解表明平湖组沉积期水体较浅,以含氧环境为主。

References

- Abbas A, Zhu Hongtao, Zeng Zhiwei, Zhou Xinhui. 2018. Sedimentary facies analysis using sequence stratigraphy and seismic sedimentology in the Paleogene Pinghu Formation, Xihu depression, East China Sea shelf basin. *Marine and Petroleum Geology*, 93: 287~297.
- Algeo T J, Tribouillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation. *Chemical Geology*, 268(3-4): 211~225.
- Anagnostou E, John E H, Edgar K M, Foster G L, Ridgwell A, Inglis G N, Pancost R D, Lunt D J, Pearson P N. 2016. Changing atmospheric CO₂ concentration was the primary driver of early Cenozoic climate. *Nature*, 533(7603): 380~384.
- Berner R A. 1992. Weathering, plants, and the long-term carbon cycle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 3225~3231.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45(1): 97~113.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181~193.
- Breit G N, Wanty R B. 1991. Vanadium accumulation in carbonaceous rocks: a review of geochemical controls during deposition and diagenesis. *Chemical Geology*, 91(2): 83~97.
- Cai Hua, Qin Lanzhi, Liu Yinghui. 2019. Differentiation and coupling model of source-to-sink system with transitional facies in Pinghu slope of Xihu sag. *Earth Science*, 44(3): 880~897 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhongyun, Lu Fawei, Zhang Jianpei, Zhang Tao. 2013. Age of Cenozoic sedimentary formations of the Xihu sag, East China Sea continental shelf. *Shanghai Land & Resources*, 34(1): 42~45 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Xiong, Hou Dujie, Zhou Xinhui, Liu Jinshui, Diao Hui, Jiang Yuhua, Yu Zhongkun. 2020. Organic geochemistry and kinetics for natural gas generation from mudstone and coal in the Xihu sag, East China Sea shelf basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 118: 104405.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919~2940.
- Cullers R L. 2002. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology*, 191(4): 305~327.
- Dill H. 1986. Metallogenesis of early Paleozoic graptolite shales from the Graefenthal Horst (northern Bavaria-Federal Republic of Germany). *Economic Geology*, 81(4): 889~903.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921~924.
- Gislason S R, Oelkers E H, Eiriksdottir E S, Kardjilov M I, Gisladottir G, Sigfusson B, Snorrason A, Elefsen S, Hardardottir J, Torssander P, Oskarsson N. 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(1-2): 213~222.
- Goldberg K, Humayun M. 2010. The applicability of the chemical index of alteration as a paleoclimatic indicator: an example from the Permian of the Paraná basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 293(1-2): 175~183.
- Goudie A S, Viles H A. 2012. Weathering and the global carbon cycle: geomorphological perspectives. *Earth-Science Reviews*, 113(1~2): 59~71.
- Hao Lewei, Wang Qi, Tao Huifei, Li Xiaoyan, Ma Dongxu, Ji Hongjie. 2018. Geochemistry of Oligocene Huagang Formation clastic rocks, Xihu sag, the East China Sea shelf basin: provenance, source weathering, and tectonic setting. *Geological Journal*, 53(1): 397~411.
- Hassan S, Ishiga H, Roser B P, Dozen K, Naka T. 1999.

- Geochemistry of Permian-Triassic shales in the Salt Range, Pakistan; implications for provenance and tectonism at the Gondwana margin. *Chemical Geology*, (158): 293~314.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis limestone, Wabunsee County, Kansas, U.S.A. *Chemical Geology*, 99(1-3): 65~82.
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, Ohmoto H. 1997. Geochemistry of approximately 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115~4137.
- Herman A B, Spicer R A, Aleksandrova G N, Yang J, Kodrul T M, Maslova N P, Spicer T E V, Chen G, Jin J. 2017. Eocene-early Oligocene climate and vegetation change in southern China; evidence from the Maoming basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 479: 126~137.
- Hofer G, Wagreich M, Neuhuber S. 2013. Geochemistry of fine-grained sediments of the upper Cretaceous to Paleogene Gosau Group (Austria, Slovakia): implications for paleoenvironmental and provenance studies. *Geoscience Frontiers*, 4(4): 449~468.
- Huang Zhichao, Ye Jiaren. 2010. Petroleum resources and regional selection evaluation in the East China Sea. *Geological Science and Technology Information*, 29(5): 51~55 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yiming, Shao Longyi, Li Shuai, Zhao Hong, Kang Shilong, Shen Wenchao, Yi Qi. 2020. Deposition system and stratigraphy of Pinghu Formation in Pinghu tectonic belt, Xihu sag. *Geoscience*, 34(1): 141~153 (in Chinese with English abstract).
- Jicha B R, Scholl D W, Rea D K. 2009. Circum-Pacific arc flare-ups and global cooling near the Eocene-Oligocene boundary. *Geology*, 37(4): 303~306.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111: 111~129.
- Kang Shilong, Shao Longyi, Qin Lanzhi, Li Shuxia, Liu Jinshui, Shen Wenchao, Chen Xiaodong, Eriksson K A, Zhou Qianyu. 2020. Hydrocarbon generation potential and depositional setting of Eocene oil-prone coaly source rocks in the Xihu sag, East China Sea shelf basin. *ACS Omega*, 5: 32267~32285.
- Kraatz B P, Geisler J H. 2010. Eocene-Oligocene transition in Central Asia and its effects on mammalian evolution. *Geology*, 38(2): 111~114.
- Lash G G, Blood D R. 2014. Organic matter accumulation, redox, and diagenetic history of the Marcellus Formation, southwestern Pennsylvania, Appalachian basin. *Marine and Petroleum Geology*, 57: 244~263.
- Lewan M D, Maynard J B. 1982. Factors controlling enrichment of vanadium and nickel in the bitumen of organic sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(12): 2547~2560.
- Li Ning, Tang Rui, Zhao Hong, Tan Jun, Liu Yang. 2017. Provenance characteristics of Pinghu tectonic zone in Xihu sag. *Offshore Oil*, 37(2): 21~26 (in Chinese with English abstract).
- Li Shunli, Yu Xinghe, Steel R, Zhu Xiaomin, Li Shengli, Cao Bing, Hou Guowei. 2018. Change from tide-influenced deltas in a regression-dominated set of sequences to tide-dominated estuaries in a transgression-dominated sequence set, East China Sea shelf basin. *Sedimentology*, 65(7): 2312~2338.
- Liu Jinshui, Kang Shilong, Shen Wenchao, Qin Lanzhi, Zhou Qianyu, Li Shuxia, Ding Fei, Shao Longyi. 2020a. Petrology and hydrocarbon significance of the coaly source rocks from the Pinghu Formation in the Xihu sag, East China Sea shelf basin. *Energy Exploration & Exploitation*, 38(5): 1295~1319.
- Liu Jinshui, Li Shuxia, Qin Lanzhi, Yi Qi, Chen Xiaodong, Kang Shilong, Shen Wenchao, Shao Longyi. 2020b. Hydrocarbon generation kinetics of Paleogene coal in Xihu sag, East China Sea basin. *Acta Petroleica Sinica*, 41(10): 1174~1187, 1218 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jinshui, Xu Huaizhi, Jiang Yiming, Wang Jun, He Xinjian. 2020c. Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 675~691 (in Chinese with English abstract).
- Martin J M, Whitfield M. 1983. The significance of the river input of chemical elements to the ocean. Springer US, 265~296.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295~303.
- McLennan S M, Hemming S R, Mcdaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geological Society of America Special Paper*, 284: 21~40.
- McLennan S M, Bock B, Hemming S R, Hurowitz J A, Lev S M, McDaniel D K. 2003. The roles of provenance and sedimentary processes in the geochemistry of sedimentary rocks. In: Lentz D R, ed. *Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments*. Geological Association of Canada, *Geotext*, 4: 7~38.
- Mongelli G, Critelli S, Perri F, Sonnino M, Perrone V. 2006. Sedimentary recycling, provenance and paleoweathering from chemistry and mineralogy of Mesozoic continental redbed mudrocks, Peloritani mountains, southern Italy. *Geochemical Journal*, 40(2): 197~209.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutes. *Nature*, 299(5885): 715~717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523~1534.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology*, 97(2): 129~147.
- Oliva P, Viers J, Dupré B. 2003. Chemical weathering in granitic environments. *Chemical Geology*, 202(3-4): 225~256.
- Panahi A, Young G M, Rainbird R H. 2000. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(13): 2199~2220.
- Paul D, White W M, Turcotte D L. 2003. Constraints on the $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ratio (K) of the continental crust. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(12): 1102.
- Pearson P N, Foster G L, Wade B S. 2009. Atmospheric carbon dioxide through the Eocene-Oligocene climate transition. *Nature*, 461: 1110~1113.
- Rimmer S M. 2004. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian basin (USA). *Chemical Geology*, 206(3-4): 373~391.
- Rivero-Cuesta L, Molina E, Alegret L. 2018. Eocene (Bartonian) benthic foraminifera and paleoenvironmental changes in the western Tethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 503: 102~111.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67(1): 119~139.
- Shen Yulin, Qin Yong, Cui Min, Xie Guoliang, Guo Yinghai, Qu Zhenghui, Yang Tianyang, Yang Liu. 2021. Geochemical characteristics and sedimentary control of Pinghu Formation (Eocene) coal-bearing source rocks in Xihu depression, East China Sea basin. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(1): 91~104.
- Taylor S R, Rudnick R L, McLennan S M, Eriksson K A. 1986. Rare earth element patterns in Archean high-grade metasediments and their tectonic significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(10): 2267~2279.

- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. *The Journal of Geology*, 94(4): 57~72.
- Varela A N, Raigemborn M S, Richiano S, White T, Poiré D G, Lizzoli S. 2018. Late Cretaceous paleosols as paleoclimate proxies of high-latitude southern Hemisphere; Mata Amarilla Formation, Patagonia, Argentina. *Sedimentary Geology*, 363: 83~95.
- Walker C T. 1968. Evaluation of boron as a paleosalinity indicator and its application to offshore prospects. *AAPG Bulletin*, 52(5): 751~766.
- Wang Suiji, Huang Xingzhen, Tuo Jincai, Shao Hongshun, Yan Cunfeng, Wang Shouqing, He Zurong. 1997. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(1): 65~70 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tong, Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Chen Hehe, Su Bin, Liu Yu, Wu Wei. 2020. Trace elements as paleo sedimentary environment indicators: a case study of the Paleogene Anjihaihe Formation in the northwestern Junggar basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(12): 3830~3851 (in Chinese with English abstract).
- Wignall P B, Myers K J. 1988. Interpreting benthic oxygen levels in mudrocks: a new approach. *Geology*, 16(5): 452~455.
- Yang Chuansheng, Li Gang, Yang Changqing, Gong Jianming, Liao Jing. 2012. Temporal and spatial distribution in the East China Sea shelf basin and its adjacent regions. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(3): 125~133 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianghai, Du Yuansheng. 2017. Weathering geochemistry and palaeoclimate implication of the Early Permian mudstones from eastern Henan Province, North China. *Journal of Palaeogeography*, 6(4): 370~380.
- Zhang Gongcheng, Deng Yunhua, Wu Jingfu, Li Youchuan, Zhao Zhigang, Yang Haichang, Miao Shunde, Chen Ying, He Yuping, Shen Huailei, Zhang Yina. 2013. Coal measure source-rock characteristics and gas exploration directions in Cenozoic superimposed faulted depressions, offshore China. *China Offshore Oil and Gas*, 25(6): 15~25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xianguo, Lin Chengyan, Zahid M A, Jia Xiaopeng, Zhang Tao. 2017. Paleosalinity and water body type of Eocene Pinghu Formation, Xihu depression, East China Sea basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 158: 469~478.
- Zhao Ke, Du Xuebin, Jia Jixin, Yang Pan, Zhang Cheng, Peng Wei. 2020. Provenance analysis of the Pinghu slope belt in Xihu depression: evidence from detrital zircon U-Pb chronology and heavy minerals. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(3): 68~76 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhui. 2020. Geological understanding and innovation in Xihu sag and breakthroughs in oil and gas exploration. *China Offshore Oil and Gas*, 32(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lixin. 2016. Characteristics and regional background of Cenozoic igneous rocks in Xihu sag. *Offshore Oil*, 36(3): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yangming, Li Ying, Zhou Jie, Gu Shengxiao. 2012. Geochemical characteristics of Tertiary coal-bearing source rocks in Xihu depression, East China Sea basin. *Marine and Petroleum Geology*, 35(1): 154~165.

参 考 文 献

- 蔡华, 秦兰芝, 刘英辉. 2019. 西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源-汇系统差异性及其耦合模式. *地球科学*, 44(3): 880~897.
- 陈忠云, 鲁法伟, 张建培, 张涛. 2013. 东海陆架西湖凹陷新生代沉积地层时代厘定. *上海国土资源*, 34(1): 42~45.
- 黄志超, 叶加仁. 2010. 东海海域油气资源与选区评价. *地质科技情报*, 29(5): 51~55.
- 蒋一鸣, 邵龙义, 李帅, 赵洪, 康世龙, 沈文超, 易琦. 2020. 西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积体系及层序地层研究. *现代地质*, 34(1): 141~153.
- 李宁, 汤睿, 赵洪, 覃军, 刘洋. 2017. 西湖凹陷平湖构造带物源特征分析. *海洋石油*, 37(2): 21~26.
- 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 王军, 何新建. 2020. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化. *地质学报*, 94(3): 675~691.
- 刘金水, 李树霞, 秦兰芝, 易琦, 陈晓东, 康世龙, 沈文超, 邵龙义. 2020. 东海盆地西湖凹陷古近系煤的生烃动力学. *石油学报*, 41(10): 1174~1187, 1218.
- 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 邵宏舜, 阎存凤, 王寿庆, 何祖荣. 1997. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义. *沉积学报*, 15(1): 65~70.
- 王彤, 朱筱敏, 董艳蕾, 陈贺贺, 苏彬, 刘宇, 伍炜. 2020. 基于微量元素分析的古沉积背景重建——以准噶尔盆地西北缘安集海河组为例. *地质学报*, 94(12): 3830~3851.
- 杨传胜, 李刚, 杨长清, 龚建明, 廖晶. 2012. 东海陆架盆地及其邻域岩浆岩时空分布特征. *海洋地质与第四纪地质*, 32(3): 125~133.
- 赵珂, 杜学斌, 贾冀新, 杨盼, 张成, 彭伟. 2020. 西湖凹陷平湖斜坡带的物源分析: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学及重矿物的证据. *地质科技通报*, 39(3): 68~76.
- 张功成, 邓运华, 吴景富, 李友川, 赵志刚, 杨海长, 苗顺德, 陈莹, 何玉平, 沈怀磊, 张义娜. 2013. 中国近海新生代叠合断陷煤系烃源岩特征与天然气勘探方向. *中国海上油气*, 25(6): 15~25.
- 周心怀. 2020. 西湖凹陷地质认识创新与油气勘探领域突破. *中国海上油气*, 32(1): 1~12.
- 朱立新. 2016. 西湖凹陷新生代火成岩发育特征及区域背景分析. *海洋石油*, 36(3): 1~7.

Geochemistry of argillaceous rocks of the Eocene Pinghu Formation from Xihu depression in East China Sea basin and its geological significance

SHEN Wenchao¹⁾, SHAO Longyi^{*2)}, ZHOU Qianyu¹⁾, KANG Shilong²⁾

1) School of Earth and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2) College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

* Corresponding author: shaol@cumtb.edu.cn

Abstract

The Xihu depression in the East China Sea basin contains significant oil and gas resources. The Pinghu Formation coal measures are the primary source rock and oil-gas reservoirs. In order to better understand its tectonic setting, provenance characteristics and paleoenvironment, we conduct detailed geochemistry study of the argillaceous rocks of the Eocene Pinghu Formation. La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 diagrams indicate that the study area was mainly subjected to the continental island arc and active continental margin tectonic background. Argillaceous rocks were predominantly derived from upper crustal felsic igneous rocks based on the values Al_2O_3/TiO_2 , K_2O/Al_2O_3 , Cr/Zr, LREE/HREE, Eu, La_N/Yb_N , Gd_N/Yb_N and plots of Th/U-Th, and the fairly uniform REE patterns. By comparing the characteristics of the magmatic rocks in the uplift area, it is concluded that the parent rocks are mainly granitic amphibolite and ingenious tuff, with a few andesites and metamorphic rocks. The A-CN-K triangle showed that mudstones were affected by the K metasomatic processes, and in this regard, we corrected the chemical index of alteration (CIA). The Eocene Pinghu Formation mudstones have moderate to high K-corrected CIA (61.40~83.49), indicating moderate to intense chemical weathering conditions. By analyzing and comparing with the CIA of the Oligocene Huagang Formation, the chemical weathering history suggests that a warm and humid climate during the Eocene, whereas a cool and humid to semi-humid climate prevailed during the Oligocene. Using the corrected boron contents (Bc) and integrating the analysis of paleomorphological and paleontological features, it is concluded that there is regional variability in the depositional background of the Pinghu Formation. The northern part (A-1) shows a terrestrial depositional environment as a river-dominated deltaic depositional system. The central part (A-2) and southern part (B-1) were dominated by the marginal marine environments as the tidally influenced deltaic depositional system. Trace element U/Th ratios, V/Cr-Ni/Co and Mo-Ni/Co discrimination diagrams indicate that the mudstones of the Pinghu Formation were formed in an oxic environment.

Key words: argillaceous rocks; geochemistry; provenance analysis; paleoenvironment; Pinghu Formation; Xihu depression