

东海陆架盆地西湖凹陷平湖组元素 地球化学特征及地质意义*

李勇霖^{1,2} 王俊辉^{1,2} 代正明^{1,2} 武洋^{1,2,3} 陈锦霖^{1,2} 姜在兴⁴ 徐杰⁵

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司, 上海 200120

4 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

5 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

摘要 东海陆架盆地西湖凹陷 BW 地区始新统平湖组为该地区油气的主要储集层以及烃源岩, 但其沉积环境认识尚存在争议。本研究选取 19 块泥岩样品, 采用传统的全样总量分析法和醋酸选择性提取法分别提取其微量及稀土元素, 并基于多项地球化学指标, 系统分析了平湖组沉积时期的氧化还原状态、古气候特征及古盐度演化。结果表明: (1) 2 种方法揭示的元素分布特征具有一致性, 但醋酸选择性提取法所得元素质量分数显著低于全样提取法, 在利用特定元素指标判别沉积环境(特别是区分陆相与海相)时, 醋酸选择性提取法相较于传统的全样总量分析法更具优势。(2) 平湖组沉积时期, 研究区氧化程度整体为贫氧—富氧的偏氧化环境。该时期古气候与古盐度协同演化, 同步记录了 4 次连续变化, 表现为沉积初期为温暖湿润的淡水环境, 早期末为干旱咸水环境, 中期转变为温暖湿润的半咸水环境, 中期末则再次转变为干旱的咸水环境, 晚期又变回温暖湿润的淡水环境, 指示平湖组沉积时期研究区至少存在 2 次较大规模的海侵作用。上述结果对深化东海陆架盆地西湖凹陷油气勘探具有重要的科学指导意义和应用价值。

关键词 沉积环境 古气候 氧化还原条件 古盐度 元素特征 平湖组 西湖凹陷

第一作者简介 李勇霖, 男, 1996 年生, 博士研究生, 长期从事沉积学和地球化学研究。E-mail: liyonglin0702@163.com。

通讯作者简介 王俊辉, 男, 1988 年生, 副教授、博士研究生导师, 长期从事沉积学与实验地层学研究。E-mail: wangjunhui@cup.edu.cn。

中图分类号: P594 文献标志码: A

Elemental geochemical characteristics of the Pinghu Formation in Xihu sag, East China Sea Shelf Basin and their geological significance

LI Yonglin^{1,2} WANG Junhui^{1,2} DAI Zhengming^{1,2} WU Yang^{1,2,3} CHEN Jinlin^{1,2} JIANG Zaixing⁴ XU Jie⁵

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

* 国家自然科学基金项目(编号: 42172108)、中国科学院地质与地球物理研究所多圈层作用油气富集理论项目(编号: THEMSIE04010105)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42172108) and CAS research project of Theory of Hydrocarbon Enrichment under Multi-Spheric Interactions of the Earth (No. THEMSIE04010105)]

收稿日期: 2025-09-15 改回日期: 2026-03-27

3 Shanghai Offshore Oil & Gas Company, SINOPEC, Shanghai 200120, China

4 School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

5 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract The sedimentary environment of the Pinghu Formation in the BW area of the Xihu sag has long been controversial. In this study, 19 mudstone samples were collected and analyzed for trace elements and rare earth elements (REEs) using two methods: conventional whole-rock total digestion and selective acetic acid extraction. Based on the geochemical data obtained, multiple proxies were integrated to systematically analyze the redox conditions, paleoclimatic characteristics, and paleosalinity evolution during the depositional period of the Pinghu Formation. The results show that: (1) Element concentrations obtained via acetic acid extraction are significantly lower than those from whole-rock digestion, but both methods reveal consistent elemental distribution patterns. Moreover, the acetic acid extraction method is proven to be more effective than conventional whole-rock digestion when applying specific elemental proxies to identify sedimentary environments, especially for distinguishing terrestrial and marine facies. (2) The redox conditions during the depositional period of the Pinghu Formation were predominantly suboxic to oxic, indicating a relatively oxidizing environment; paleoclimate and paleosalinity evolved concurrently, characterized by an initial warm and humid freshwater setting, which shifted to an arid and saline environment by the end of the early stage. This was followed by a transition to a warm and humid brackish setting in the middle stage, a return to arid and saline conditions by the mid-stage, and finally a return to a warm and humid freshwater environment in the late stage. In light of the sedimentary context of the study area, the synchronous variations in paleoclimate and paleosalinity are interpreted as recording four successive changes, collectively indicating at least two major marine transgressions during the depositional period of the Pinghu Formation. The above results have significant scientific guiding significance and application value for deepening oil and gas exploration in the Xihu sag of the East China Sea Shelf Basin.

Key words sedimentary environment, palaeoclimate, redox state, paleosalinity, elemental characteristics, Pinghu Formation, Xihu sag

About the first author LI Yonglin, born in 1996, Ph.D. candidate, is engaged in researches on sedimentology and geochemistry. E-mail: liyonglin0702@163.com.

About the corresponding author WANG Junhui, born in 1988, associate professor, Ph.D. supervisor, is engaged in researches on sedimentology and experimental stratigraphy. E-mail: wangjunhui@cup.edu.cn.

西湖凹陷为东海陆架盆地内油气资源较为丰富的凹陷之一, BW 地区是位于西湖凹陷中北部的重要油气田。平湖组为 BW 地区主要的储集层以及烃源岩, 但对其沉积环境与沉积体系认识仍存在很大的分歧。在长达 30 多年的勘探过程中, 很多学者应用不同方法对 BW 地区平湖组内部不同层段的沉积相进行了研究, 结果主要集中于 6 种沉积体系: (1) 河控三角洲—潮汐改造三角洲—潮坪体系 (王泽宇等, 2021; 陈忠云等, 2022; 王健伟等, 2025); (2) 以海湾沉积和潮坪—沼泽沉积为主的

沉积体系 (杨彩虹等, 2013; 吴嘉鹏等, 2017; 王泽宇等, 2021; 王健伟等, 2025); (3) 潮河联控沉积体系 (杨彩虹等, 2013; 王泽宇等, 2021); (4) 受潮汐影响的辫状河三角洲沉积体系 (王泽宇等, 2021; 刘英辉等, 2022); (5) 潟湖—障壁岛体系; (6) 滨岸沉积体系 (朱振鑫等, 2026)。在沉积环境方面, 依据微体古生物化石资料, 蒋海军等 (2011) 认为该地区平湖组沉积早期为海相沉积, 晚期为陆相沉积, 且整个古近纪为亚热带气候。依据西湖凹陷的生物标志物以及微量元素等资

料,周洁(2012)认为平湖组有2套烃源岩,分别是氧化性较强的湖沼沉积以及弱还原—弱氧化的半深湖沉积;于水(2020)认为平湖组沉积时期是温暖湿润、弱还原—氧化且水体较浅的半咸水环境;张书迪(2021)认为平湖组沉积早期研究区处于水体较浅、咸度较低的氧化环境,中期转变为弱氧化—弱还原的沉积环境,晚期为氧化性较强的淡水环境。依据地球化学元素特征,刘伟(2008)认为西湖凹陷平湖组沉积时期为半咸水—咸水环境;谢国梁等(2013)认为研究区该时期为贫氧的淡水—半咸水海陆过渡环境。通过对比上述研究结果,不难发现前人的沉积体系对应于海陆过渡或者是海相沉积环境,然而在沉积环境方面却主要为淡水—半咸水环境,很少有咸水环境,两者不是很相符;同时,对沉积环境的具体分析也存在差异,主要体现在古盐度、古氧化还原环境以及古气候特征方面。

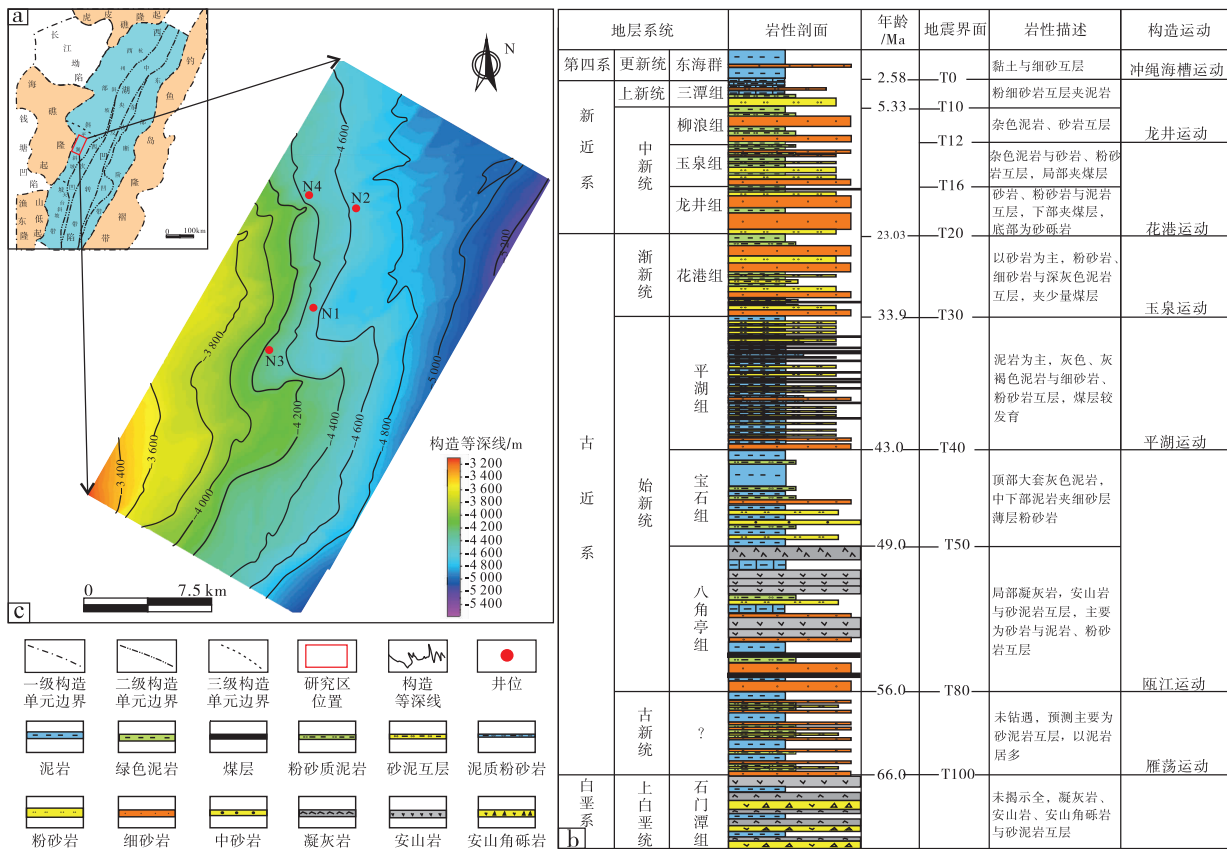
本研究选取王爱华等(2020)提出的醋酸选择性提取微量元素的方法以及传统全样总量分析

法,分别对BW地区始新统平湖组泥岩样品进行分析。在此基础上,选择相应的古环境指标,对BW地区平湖组沉积时期的古气候、古盐度以及古氧化还原环境进行分析;并结合前人对该地区沉积相的认识,比较2种样品提取方法所得结果用于沉积环境分析的优劣。

1 地质概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地中部,东部紧邻钓鱼岛隆褶带,西部与虎皮礁隆起、海礁隆起以及渔山东低隆起相邻,整体呈北东向展布,具有“东西分带、南北分块”的平面特征,面积约为 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,自西向东可依次划分为西部斜坡带、中央背斜带和东部断阶带(图1-a)(周心怀等,2019;李顺利等,2020;黄晓松等,2024;刘开道等,2025)。BW油气田位于西部斜坡带中部的平湖斜坡,是平湖斜坡内的重要油气田之一(图1-a)。

西湖凹陷自下而上发育上白垩统石门潭组,始



a—西湖凹陷构造分区图; b—地层综合柱状图; c—平湖组底部构造等 T40 图

图 1 东海陆架盆地西湖凹陷地质概况 (据蒋一鸣等, 2016; 有修改)

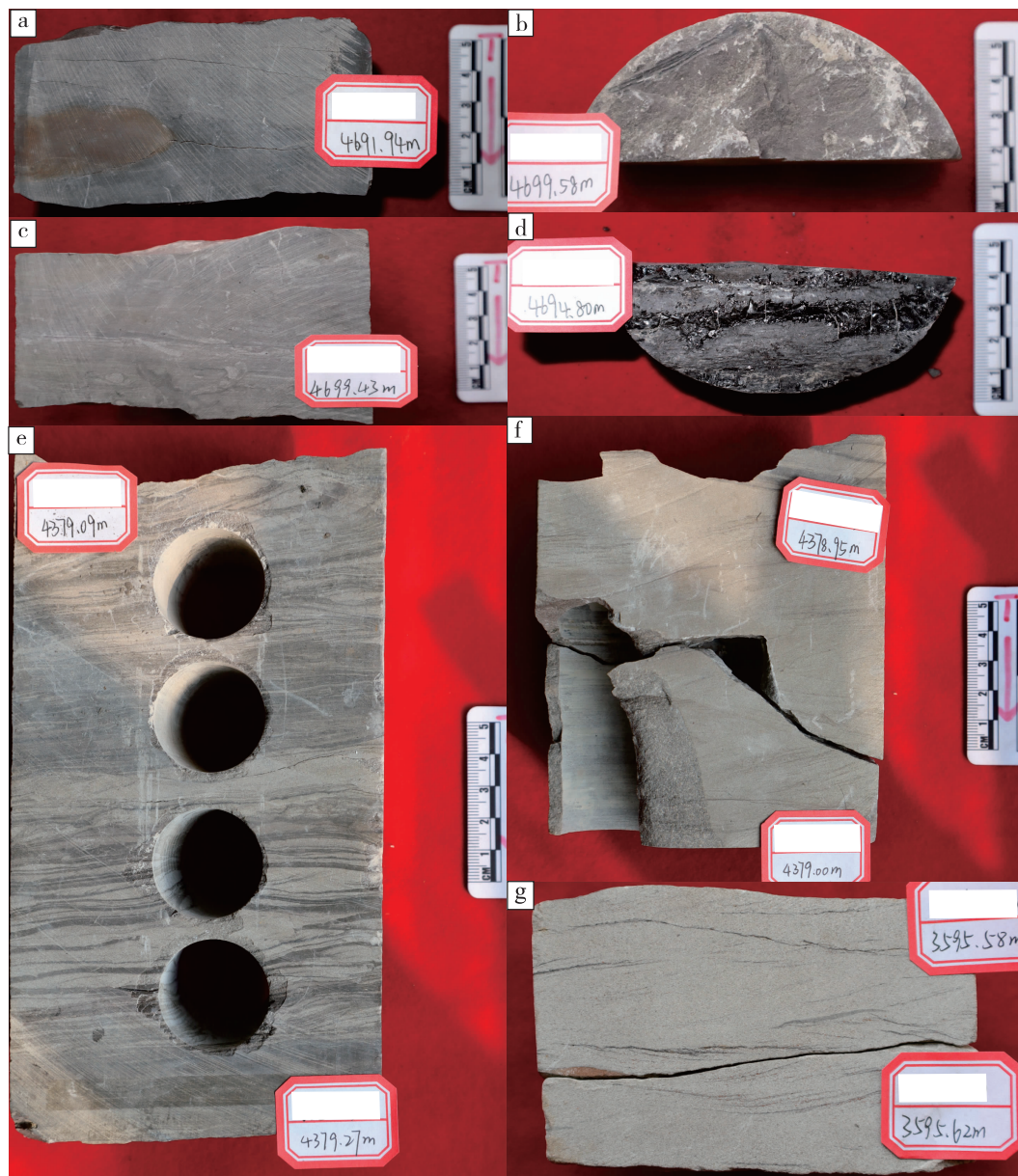
Fig. 1 Geological overview of the Xihu sag, East China Sea Shelf Basin (modified from Jiang et al., 2016)

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，上新统三潭组和更新统东海群(图 1-b)。其中，花港组和平湖组在整个凹陷分布最为广泛(张国华和张建培, 2015; 黄晓松等, 2024; 杨征等, 2024), 前者以砂岩为主, 含少量砂泥互层以及煤层(杨征等, 2024), 后者为本次研究的重点层位, 发育有大量泥岩和煤层, 且泥岩以灰黑色为主, 这是整个凹陷重要的烃源层, 同时还发育有少量的细砂岩和粉砂

岩(图 1-b)。

2 样品分析与测试

本次测试样品为平湖组暗色泥岩, 取自 N1 井、N2 井、N3 井、N4 井(图 1-c), 共计 19 件。其中采样位置附近以暗色泥岩为主, 发育煤层并富含植物碎屑(图 2-b), 偶见氧化色结核(图 2-a), 见生物扰动现象(图 2-c)。另外, 在岩心中可见灰色—红色泥岩, 发育水平及波状粉砂岩纹



a—氧化色结核; b—植物碎屑; c—生物扰动; d—煤层; e—脉状—波状—透镜状层理, 见双黏土层; f—双向交错层理, 发育黏土层;
g—双向交错层理、再作用面、浪成沙纹层理

图 2 西湖凹陷平湖组岩性及沉积构造特征

Fig. 2 Lithological and sedimentary structural characteristics of the Pinghu Formation in Xihu sag

层，夹极薄层煤(图 2-d)；见薄层细砂岩与粉砂岩、泥岩交互沉积，发育脉状一波状一透镜状复合层理，亦发育双黏土层构造(图 2-e)、浪成沙纹层理；顶部以较纯净的细砂—中砂岩为主，发育双向交错层理及再作用面、脉状层理(图 2-f, 2-g)。综上，该泥岩样品应为潟湖或潮坪沉积。

本次测试由南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。元素检测采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)，型号为 Agilent 7900 ICP-MS。传统的全样总量分析法采用 GB/T 14506.30-2010 硅酸盐岩石化学分析方法：44 个元素量测定的标准执行，但由于分析时使用了氢氟酸，这会直接破坏硅酸盐矿物的晶体结构，从而使原地沉积的锶、钡等元素与陆源碎屑中该类元素混合，导致测试结果不准确。醋酸选择性提取分析方法流程是：称取 0.25 g 样品研磨至 200 目，全部倒入 50 mL 离心管中，加入 10% 醋酸 25 mL 后在常温下振荡搅拌 1 h，提取上清液稀释后利用 ICP-MS 检测相关元素。这种方法采用的稀醋酸主要起到 2 个方面的作用，首先它可以有效地分解以碳酸盐形式存在的锶、钡等化合物，其次其分子结构中的羧基可与沉积物中处于离子交换态的锶、钡等元素发生配位反应，且该方法基本不会提取重晶石中的钡离子(王爱华等，2020)。

3 实验结果

3.1 微量元素特征

使用传统的全样总量分析和醋酸选择性提取分析 2 种方法对样品分别进行分析，发现两者在微量元素的含量方面存在很大的差异。使用传统的全样总量分析法提取到的微量元素平均含量大于 100 $\mu\text{g/g}$ 的元素有 V(114.70 $\mu\text{g/g}$)、Zn(100.02 $\mu\text{g/g}$)、Rb(152.27 $\mu\text{g/g}$)、Sr(143.57 $\mu\text{g/g}$)、Zr(105.56 $\mu\text{g/g}$) 以及 Ba(2759.45 $\mu\text{g/g}$) (附表 1)，而使用醋酸选择性提取法的结果中，微量元素平均含量大于 100 $\mu\text{g/g}$ 的元素只有 Ba (103.14 $\mu\text{g/g}$) (附表 2)。将测试结果与 UC (上地壳) 结果 (Taylor and McLennan, 1985; Cao *et al.*, 2012) 进行对比发现：在通过传统的全样总量分析法提取的微量元素中，Be、Sc、Co、Cu、Zn、Ga、Rb、Nb、Mo、Hf、W、Pb、Th、U 元素的比值接近于 1，与上地

壳的含量很接近；B、V、Ni、Cs、Ba、Tl、Bi 元素的比值远大于 1，相对于上地壳较为富集；Cr、Sr、Zr、Nb、Sn、Ta 等元素的比值都远小于 1，相较于上地壳相对亏损(附表 3)；而通过醋酸选择性提取之后，除 Bi 元素的比值在 1.57~2.53 之间外，其余元素的比值均远小于 1 (附表 4)。

除此之外，对比 2 种方法得到的相同元素的相对含量占比，发现 2 种方法提取的元素相对含量存在差异，其中，B、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Ba 元素采用醋酸选择性提取方法所得到的结果占优，其他元素都是采用传统的全样总量方法占优，甚至部分元素的占比高达 0.98~0.99 (表 1)。造成较大差异的原因可能是采用醋酸提取法通常只提取了元素可交换态和碳酸盐态的部分，元素的铁锰氧化物态、有机—还原态和残渣态(陆源碎屑矿物)基本上不会被提取(王爱华等，2020)。

表 1 西湖凹陷平湖组泥岩微量元素均值的相对占比
Table 1 Relative proportion of average values of trace elements of the Pinghu Formation mudstone in Xihu sag

元素	醋酸选择性提取法	全样法	元素	醋酸选择性提取法	全样法
Be	0.41	0.59	Nb	0.02	0.98
B	0.56	0.44	Mo	0.04	0.96
Sc	0.60	0.40	Sn	0.02	0.98
V	0.72	0.28	Cs	0.01	0.99
Cr	0.98	0.02	Ba	0.95	0.05
Co	0.77	0.23	Hf	0.01	0.99
Ni	0.77	0.23	Ta	0.02	0.98
Cu	0.86	0.14	W	0.01	0.99
Zn	0.92	0.08	Tl	0.02	0.98
Ga	0.13	0.87	Pb	0.86	0.14
Rb	0.68	0.32	Bi	0.05	0.95
Sr	0.99	0.01	Th	0.43	0.57
Zr	0.12	0.88	U	0.10	0.90

注：醋酸选择性提取法：醋酸平均值/(醋酸平均值+全样总量平均值)；全样法：全样总量平均值/(醋酸平均值+全样总量平均值)。

3.2 稀土元素特征

传统的全样总量分析法提取到的稀土元素含量(ΣREE) 在 115.18~290.38 $\mu\text{g/g}$ 之间(附表 5)，均值为 182.11 $\mu\text{g/g}$ ，略高于北美页岩的 173.21 $\mu\text{g/g}$ (Haskin *et al.*, 1968)，表明稀土元素总体上相对富集。轻稀土元素(ΣLREE) 含量在 104.95~205.50 $\mu\text{g/g}$ 之间，平均值为 165.18 $\mu\text{g/g}$ 。

重稀土元素 (ΣHREE) 含量在 $10.23 \sim 22.13 \mu\text{g/g}$ 之间, 平均值为 $16.93 \mu\text{g/g}$ 。 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值在 $7.33 \sim 10.88$ 之间, 平均值为 9.90 , 高于北美页岩的 7.44 (NASC) (Haskin *et al.*, 1968), 表明轻稀土元素相较于重稀土元素更加富集。结合稀土元素配分模式(图 3-a), 得到了与前人(谢国梁等, 2013; 徐波等, 2021; 徐博等, 2021) 相似的结论, 即平湖组泥岩在总体上呈现轻稀土元素相对富集、重稀土元素略微亏损的特征, 具 Eu 正异常、Ce 微弱负异常; 但 Dy 表现为正异常(图 3-a), 这与前人的结果不一致。

醋酸选择性法提取到的稀土元素含量远低于传统的全样总量分析法, 其值在 $1.16 \sim 63.89 \mu\text{g/g}$ 之间, 平均为 $13.01 \mu\text{g/g}$ (附表 6)。轻稀土元素含量在 $0.90 \sim 52.93 \mu\text{g/g}$ 之间, 平均为 $10.75 \mu\text{g/g}$, 重稀土元素含量在 $0.63 \sim 10.96 \mu\text{g/g}$ 之间, 平均为 $2.26 \mu\text{g/g}$, 两者整体上都远远低于北美页岩, 但配分模式(图 3-b) 与传统的全样总量分析法提取到的稀土元素结果一致。 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值在 2.88

~ 5.96 之间, 平均 4.51 。

4 地质意义

4.1 古盐度

在自然界中, 元素 Sr 与 Ba 的化学性质相似, 但随着水体的逐渐咸化, 水体中的 Ba^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合生成 BaSO_4 沉淀, 而 Sr 的迁移能力比 Ba 强, 在此过程中会继续运移到更远的海相沉积中(韩永林等, 2007; 徐博等, 2021), 因此前人认为记录在沉积物中的 Sr 丰度和 Sr/Ba 值与古盐度呈明显的正相关, 可作为古盐度判别的指标(韩永林等, 2007)。前人在判断沉积环境时, 认为 $\text{Sr}/\text{Ba} < 0.5$ 为淡水(陆相)、 $0.5 \sim 1.0$ 为半咸水(海陆过渡相)、 > 1.0 为咸水(海相)(郑一丁等, 2015; 王旭影和姜在兴, 2021; Rahman *et al.*, 2022; 武瑾等, 2025; 张锡楠等, 2025; 朱筱敏等, 2025)。

在本研究中, 传统的全样总量分析法所得 Sr/Ba 值在 $0.03 \sim 0.14$ 之间, 平均 0.07 (表 2); 醋

表 2 西湖凹陷平湖组古盐度判别

Table 2 Paleosalinity indicators and discrimination for the Pinghu Formation in Xihu sag

井位	地层	至平湖组底部 距离/m	全样法			古盐度	醋酸选择性提取法			
			Sr/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Ba/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Sr/Ba		Sr/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Ba/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Sr/Ba	古盐度
N1	平下段	43.52	143.00	1367.00	0.10	淡水	70.14	74.23	0.94	半咸水
	平下段	67.52	94.16	2532.00	0.04	淡水	34.06	34.26	0.99	半咸水
	平下段	92.52	117.00	1985.00	0.06	淡水	36.86	44.98	0.82	半咸水
	平中段	481.52	151.10	1275.00	0.12	淡水	73.32	81.47	0.90	半咸水
	平中段	519.52	102.80	1328.00	0.08	淡水	30.90	52.14	0.59	半咸水
	平中段	526.52	156.50	6218.00	0.03	淡水	35.67	61.98	0.58	半咸水
	平上段	781.52	101.20	1193.00	0.08	淡水	31.93	23.55	1.36	咸水
	平上段	810.52	100.70	962.80	0.10	淡水	31.00	27.99	1.11	咸水
	平上段	1003.52	110.90	768.80	0.14	淡水	40.83	86.58	0.47	淡水
N2	平下段	93.00	172.40	4775.00	0.04	淡水	90.12	354.30	0.25	淡水
	平下段	93.00	193.40	7204.00	0.03	淡水	97.98	381.00	0.26	淡水
	平中段	443.00	142.90	3131.00	0.05	淡水	59.82	109.70	0.55	半咸水
	平中段	445.00	138.20	3926.00	0.04	淡水	106.30	132.00	0.81	半咸水
	平上段	892.00	214.20	5191.00	0.04	淡水	124.70	188.70	0.66	半咸水
N3	平下段	156.00	188.40	2201.00	0.09	淡水	129.00	135.80	0.95	半咸水
	平下段	158.00	185.70	1870.00	0.10	淡水	121.30	41.51	2.92	咸水
	平下段	160.00	184.70	1958.00	0.09	淡水	119.40	31.96	3.74	咸水
N4	平下段	142.00	104.60	1774.00	0.06	淡水	42.81	47.12	0.91	半咸水
	平下段	144.00	125.90	2770.00	0.05	淡水	35.88	50.48	0.71	半咸水
平均值			143.57	2759.45	0.07	淡水	69.05	103.14	1.03	咸水

盐度判断标准: Sr/Ba < 0.5 为淡水, Sr/Ba = 0.5 ~ 1.0 为半咸水, Sr/Ba > 1.0 为咸水。

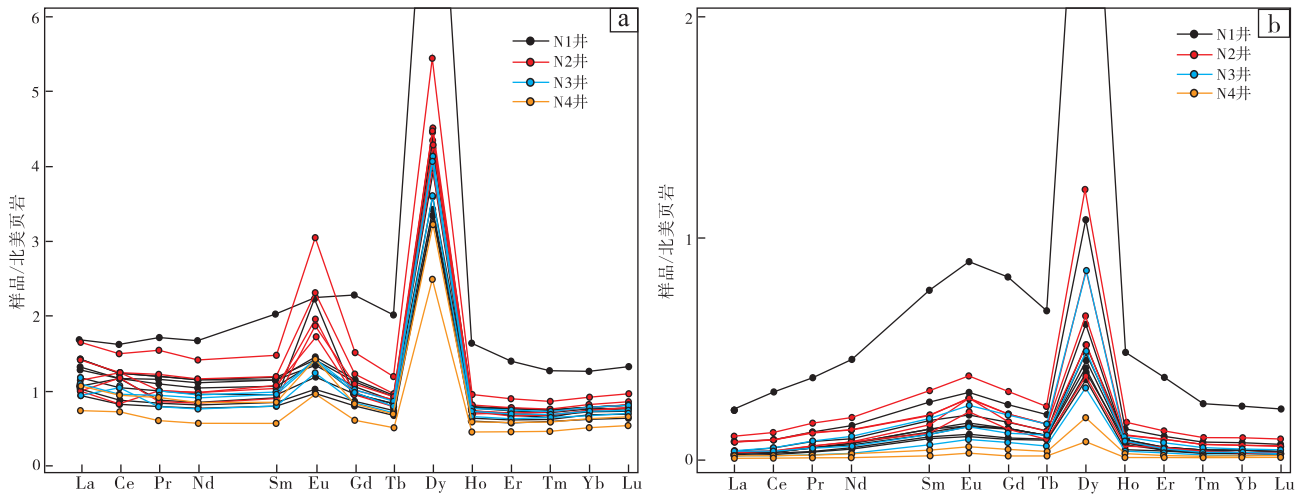


图 3 西湖凹陷平湖组北美页岩标准化稀土元素分配模式(a 为全样法; b 为醋酸选择性提取法)

Fig. 3 North American Shale Composite (NASC)-Normalized Rare Earth Element (REE) distribution patterns for the Pinghu Formation in Xihu sag (a: whole-rock digestion; b: acetic acid-selective extraction)

酸选择性提取所得 Sr/Ba 值在 0.25~3.74 之间,平均 1.03 (表 2)。根据上述 Sr/Ba 值判断标准,可以看出传统的全样总量分析法所得结论为平湖组沉积时期研究区整体处于淡水环境(图 4-a),这与刘伟(2008)、周洁(2012)和谢国梁(2013)等学者认为西湖凹陷在平湖组沉积时期为半咸水—咸水环境的结论严重不符。醋酸选择性提取法所得结论为平湖组沉积早期为淡水—半咸水环境,中期为半咸水环境,中晚期为咸水环境,晚期为淡水—半咸水环境(图 4-b),这与前人分析结果较为符合。显然,醋酸选择性提取的锶钡比(Sr/Ba-HAc)较全样总量的锶钡比(Sr/Ba-TTL)能更好地反映沉积时的水体盐度特征。据此,笔者认为研究区在平湖组沉积时期是偏向海陆过渡沉积环境和海相沉积环境,从早期

到晚期古盐度发生多次变化。

4.2 古气候

某些微量元素的相对含量对古气候的变化较为灵敏,可以作为古气候的判别指标。Sr 元素喜干, Cu 元素喜湿,因此 Sr/Cu 值可以指示古环境的干湿变化,值越低对应环境越湿润(何利等,2018)。其中, Sr/Cu 值为 1.3~5.0 指示温暖潮湿气候, 5.0~10.0 指示半潮湿—半干旱气候, 大于 10.0 指示炎热干旱的气候(Rahman *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024)。Rb/Sr 值变化趋势与 Sr/Cu 值相反, 值越小表明当时的环境越干旱,但在判定古环境时尚没有具体标准,结合前人研究结果(拜文华等,2019;徐波等,2021; Rahman *et al.*, 2022),以 Rb/Sr > 1.0 为

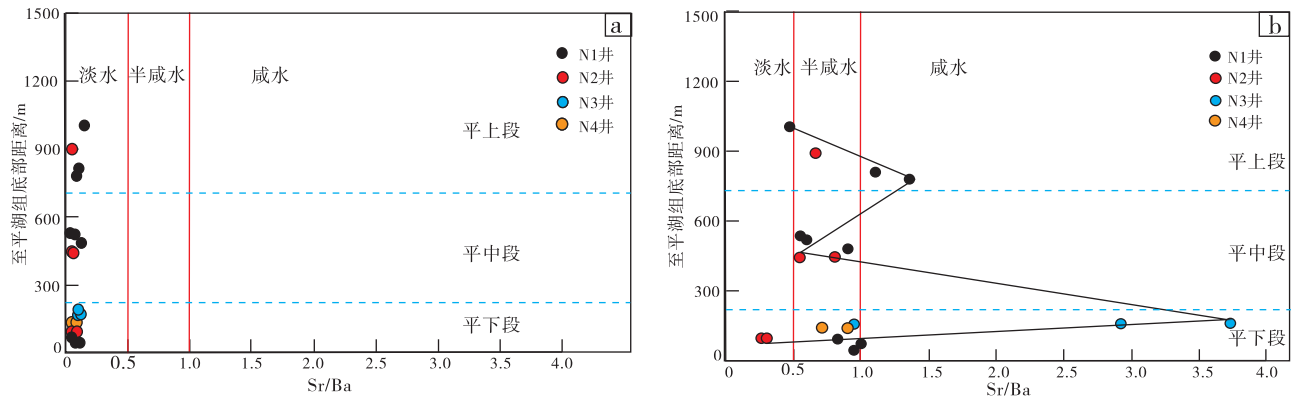


图 4 西湖凹陷平湖组 Sr/Ba 值及古盐度的判别(a 为全样法; b 为醋酸选择性提取法)

Fig. 4 Discrimination of Sr/Ba ratios and paleosalinity for the Pinghu Formation in Xihu sag (a: whole-rock digestion; b: acetic acid-selective extraction)

温暖湿润的环境。在本研究中,传统全样总量分析法所得Sr/Cu值在 2.87~6.84 之间,平均值为 4.60; Rb/Sr 值在 0.59 ~ 1.85 之间,平均值为 1.12 (表 3)。醋酸选择性提取方法所得Sr/Cu值在 2.86 ~18.98 之间,平均 9.59; Rb/Sr 值在 0.01 ~0.11 之间,平均 0.06 (表 3)。

依据Sr/Cu值的变化,平湖组的气候经历了 4 次变化(图 5)。传统的全样总量分析法表明,平湖组沉积早期为温暖湿润气候,早中期变为半湿润一半干旱气候,中期气候再次发生变化,逐步过渡到温暖湿润,中晚期变为半湿润一半干旱气候,晚期为温暖湿润气候(图 5-a)。醋酸选择性提取方法的结果同样表明平湖组沉积时期经历了 4 次气候变化,平湖组沉积早期为温暖湿润气候,早中期变为干旱气候,中期气候逐步过渡到温暖湿润,中晚期变为干旱气候,晚期为温暖湿润气候(图 5-b)。

4.3 氧化还原环境

沉积时水体的氧化还原环境是决定泥岩是否富

有机质的条件之一。一些微量元素的含量对水体氧化还原条件的变化较为敏感,如在还原环境中更容易富集的元素为 V、Cr、Th、Co、Sc、Ni、Mo、U 等,因此一些元素的质量分数比值可以用来指示水体的氧化还原环境,常用到的比值有 U/Th、 δU 、V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Mo 以及 Ce 异常等 (Elderfield and Greaves, 1982; 吴朝东和储著银, 2001; 拜文华等, 2019; 沈文超等, 2022)。

前人的研究认为,在富氧环境中 U/Th<0.75, 还原环境中 U/Th>1.25 (徐波等, 2021; 徐博等, 2021; 沈文超等, 2022)。传统的全样总量分析法所得 U/Th 值在 0.20~0.44 之间,平均值为 0.25 (表 4)。醋酸选择性提取方法所得 U/Th 值在 0.07 ~0.74 之间,平均值为 0.18。 δU 法的计算公式为: $\delta U = U/[0.5 \times (Th/3 + U)]$,在富氧的水体中 $\delta U < 1$, 缺氧还原环境中 $\delta U > 1$ (Wignall, 1994)。在本研究中,传统的全样总量分析法所得 δU 值在 0.74 ~ 1.14 之间,平均 0.84 (表 4)。醋酸选择性提取方

表 3 西湖凹陷平湖组古气候判别

Table 3 Paleoclimate indicators and discrimination for the Pinghu Formation in Xihu sag

井位	地层	至平湖组底部距离 /m	全样法		醋酸选择性提取法		古气候特征
			Sr/Cu	Rb/Sr	Sr/Cu	Rb/Sr	
N1	平下段	43.52	4.64	1.35	6.78	0.04	半潮湿一半干旱气候
	平下段	67.52	2.87	1.85	3.49	0.11	温暖潮湿
	平下段	92.52	3.96	1.53	4.52	0.09	温暖潮湿
	平中段	481.52	4.45	1.11	6.27	0.08	半潮湿一半干旱气候
	平中段	519.52	3.14	1.57	2.86	0.09	温暖潮湿
	平中段	526.52	3.58	0.78	4.26	0.06	温暖潮湿
	平上段	781.52	4.40	1.12	4.96	0.11	温暖潮湿
	平上段	810.52	4.19	1.24	5.64	0.09	温暖潮湿
	平上段	1003.52	3.04	1.68	3.61	0.10	温暖潮湿
N2	平下段	93.00	5.09	1.12	15.26	0.04	半潮湿一半干旱气候
	平下段	93.00	5.11	1.08	18.17	0.03	半潮湿一半干旱气候
	平中段	443.00	4.30	1.26	11.07	0.04	温暖潮湿
	平中段	445.00	4.66	0.94	8.83	0.02	温暖潮湿
	平上段	892.00	6.84	0.59	12.35	0.01	半潮湿一半干旱气候
N3	平下段	156.00	6.69	0.60	22.64	0.02	半潮湿一半干旱气候
	平下段	158.00	6.09	0.78	18.98	0.02	半潮湿一半干旱气候
	平下段	160.00	4.92	0.81	15.42	0.02	温暖潮湿
N4	平下段	142.00	3.52	0.95	8.44	0.04	温暖潮湿
	平下段	144.00	5.87	1.00	8.63	0.05	半潮湿一半干旱气候
平均值			4.60	1.12	9.59	0.06	

判别标准: Sr/Cu 值在 1.3~5.0 时为温暖潮湿气候; 5.0~10.0 为半潮湿一半干旱气候; 大于 10.0 为炎热干旱的气候; Rb/Sr 值越小越干旱。

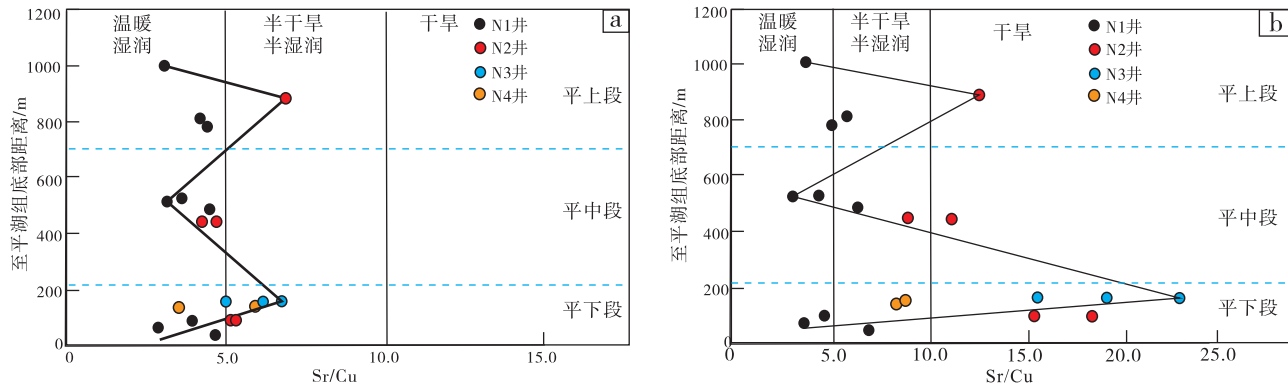


图 5 西湖凹陷平湖组 Sr/Cu 值及古气候的判别 (a 为全样法; b 为醋酸选择性提取法)
 Fig. 5 Discrimination of Sr/Cu ratios and paleoclimate for the Pinghu Formation in Xihu sag
 (a: whole-rock digestion; b: acetic acid-selective extraction)

表 4 西湖凹陷平湖组采用传统全样总量分析法得到的氧化还原指标参数

Table 4 Redox condition indicator parameters using whole-rock digestion method for the Pinghu Formation in Xihu sag

井位	地层	至平湖组底部距离/m	U/Th	V/(V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	δU	Ce _{anom}
N1	平下段	43.52	0.27	0.76	1.37	2.95	0.89	-0.03
	平下段	67.52	0.26	0.75	1.45	2.59	0.87	0.08
	平下段	92.52	0.23	0.78	1.55	2.86	0.81	-0.01
	平中段	481.52	0.23	0.73	1.40	2.53	0.81	-0.03
	平中段	519.52	0.21	0.77	1.43	2.85	0.78	-0.03
	平中段	526.52	0.24	0.75	0.61	2.86	0.84	-0.02
	平上段	781.52	0.26	0.75	1.51	2.60	0.88	-0.03
	平上段	810.52	0.27	0.82	2.14	3.02	0.90	-0.03
	平上段	1003.52	0.24	0.76	1.53	2.61	0.84	-0.02
N2	平下段	93.00	0.25	0.77	1.30	3.02	0.86	0.09
	平下段	93.00	0.22	0.74	1.42	2.71	0.80	-0.02
	平中段	443.00	0.25	0.73	1.35	2.47	0.85	0.06
	平中段	445.00	0.20	0.70	1.06	2.60	0.74	-0.08
	平上段	892.00	0.20	0.73	1.25	2.39	0.74	-0.03
N3	平下段	156.00	0.20	0.76	1.57	2.82	0.74	-0.03
	平下段	158.00	0.21	0.80	1.80	2.85	0.77	-0.01
	平下段	160.00	0.25	0.77	1.83	2.30	0.85	0.07
N4	平下段	142.00	0.44	0.77	1.57	3.34	1.14	0.03
	平下段	144.00	0.24	0.75	1.29	2.75	0.85	-0.02
平均值			0.25	0.76	1.44	2.74	0.84	0.00
贫氧条件			> 1.25	> 0.84	> 4.25	> 7.00	> 1.00	> -0.10
氧化条件			< 0.75	< 0.46	< 2.00	< 5.00	< 1.00	< -0.10

法所得δU值在 0.36~1.38 之间, 平均 0.62 (表 5)。

V 元素相较于 Cr 元素对水体的氧化还原条件更加敏感, 在还原环境下其以有机络合物形式优先富集后沉淀下来, 因此前人用 V/Cr 值以及 V/(V+Ni)值来判别水体的氧化还原环境。其中, V/Cr<2.00 指示水体为氧化环境, V/Cr 值为 2.00

~4.25 时指示过渡环境, V/Cr>4.25 指示还原环境。Hatch 和 Leventhal (1992) 提出, V/(V+Ni) > 0.84 为厌氧还原环境, V/(V+Ni) 值在 0.60~0.84 之间为厌氧亚还原环境, V/(V+Ni) 值在 0.46~0.60 之间指示贫氧环境, V/(V+Ni) < 0.46 为富氧环境。在本研究中, 传统的全样总量分析法

表 5 西湖凹陷平湖组采用醋酸选择性提取方法得到的氧化还原指标参数

Table 5 Redox condition indicator parameters using acetic acid-selective extraction method for the Pinghu Formation in Xihu sag

井位	地层	至平湖组底部距离/m	U/Th	V/(V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	δU	Ce_{anom}
N1	平下段	43.52	0.74	0.63	1.01	1.22	1.38	-0.06
	平下段	67.52	0.17	0.53	1.04	2.32	0.68	-0.08
	平下段	92.52	0.14	0.39	0.65	1.78	0.61	-0.06
	平中段	481.52	0.14	0.43	0.05	1.52	0.59	-0.04
	平中段	519.52	0.07	0.42	0.64	1.46	0.36	-0.06
	平中段	526.52	0.10	0.49	0.95	1.52	0.46	-0.04
	平上段	781.52	0.08	0.45	0.60	1.18	0.39	-0.03
	平上段	810.52	0.13	0.31	0.49	1.35	0.56	-0.02
	平上段	1003.52	0.13	0.44	0.57	1.55	0.57	0.01
N2	平下段	93.00	0.13	0.43	0.61	1.21	0.56	-0.07
	平下段	93.00	0.10	0.41	0.82	1.36	0.44	-0.07
	平中段	443.00	0.14	0.29	0.53	1.28	0.60	-0.06
	平中段	445.00	0.09	0.42	0.59	1.92	0.43	-0.03
	平上段	892.00	0.11	0.44	0.62	1.66	0.51	-0.05
N3	平下段	156.00	0.18	0.32	0.53	0.94	0.69	-0.07
	平下段	158.00	0.12	0.51	0.64	1.16	0.54	-0.02
	平下段	160.00	0.09	0.48	0.58	1.25	0.41	-0.09
N4	平下段	142.00	0.21	0.28	0.35	1.58	0.77	-0.07
	平下段	144.00	0.53	0.31	0.37	1.57	1.23	-0.05
平均值			0.18	0.42	0.61	1.47	0.62	-0.05

所得 V/Cr 值在 0.61 ~ 2.14 之间, 平均 1.44; V/(V+Ni) 值在 0.70 ~ 0.82 之间, 平均 0.76 (表 4)。醋酸选择性提取方法所得 V/Cr 值在 0.35 ~ 1.04 之间, 平均 0.61; V/(V+Ni) 值在 0.28 ~ 0.63 之间, 平均 0.42 (表 5)。

元素 Ni 与 Co 在不同环境下的赋存形式也不一样, 其中 Ni 在还原环境下通常形成硫化物沉淀, 在氧化环境中则以离子形式存在, 而 Co 在氧化环境下以离子形式存在, 还原环境下则以固溶体形式进入自生黄铁矿中 (金艳和傅强, 2013; 拜文华等, 2019)。因此, Ni/Co 值可以作为判别氧化还原环境的指标, 通常 Ni/Co < 5 为氧化环境, Ni/Co 值在 5~7 之间为贫氧环境, Ni/Co > 7 为缺氧环境。在本研究中, 传统的全样总量分析法所得 Ni/Co 值在 2.30~3.34 之间, 平均 2.74 (表 4); 醋酸选择性提取方法所得 Ni/Co 值为 0.94~2.32, 平均 1.47 (表 5)。

稀土元素具有稳定性, 是重要的沉积环境地球化学指标。Ce 异常指标 (Ce_{anom}) 的计算方法为: $Ce_{anom} = \lg[3Ce_N / (2La_N + Nd_N)]$, 其中 Ce_N 、 La_N 与

Nd_N 都是与北美页岩进行对比后的标准化值。 $Ce_{anom} > -0.1$, 表示 Ce 正异常, 反映水体为缺氧环境; 反之, $Ce_{anom} < -0.1$, 则为负异常, 反映水体为氧化环境 (Elderfield and Greaves, 1982; 谢国梁等, 2013)。在本研究中, 传统的全样总量分析法所得 Ce_{anom} 值在 -0.08 ~ 0.08 之间, 平均值接近 0 (表 4); 醋酸选择性提取方法所得 Ce_{anom} 值为 -0.09~0.01, 平均值为 -0.05 (表 5)。

综合上述分析发现, 2 种方法在判断氧化还原环境方面所得结果虽然略有差异, 但是两者所得结论却是相同的 (表 4; 表 5), 均指示平湖组泥岩沉积时水体的氧化还原程度在贫氧—富氧之间, 整体环境偏氧化。整个平湖组沉积时期, 西湖凹陷 BW 地区沉积环境发生多次改变, 整体上表现为淡水 (温暖湿润) —咸水 (干旱) —半咸水 (半干旱) —咸水 (干旱) —淡水 (温暖湿润) 的变化, 且在整个沉积时期处于相对偏氧化环境。古气候与古盐度变化之间存在相关性, 依据两者的变化推测研究区在平湖组沉积早期和中晚期存在规模较大的海侵 (图 4; 图 5)。

5 结论

1) 采用醋酸选择性提取和全样提取 2 种方法对西湖凹陷 BW 地区始新统平湖组泥岩的微量与稀土元素进行分析时, 由于醋酸选择性提取方法可以剔除陆源碎屑的影响, 所以采用该方法所得元素质量分数整体上远低于传统的全样总量分析法。总体上, 2 种方法所得稀土元素特征一致, 表现为轻稀土元素相对富集、重稀土元素略微亏损, 具 Eu 正异常、Ce 微弱负异常。

2) 西湖凹陷 BW 地区平湖组沉积时期古环境共发生 4 次变化, 其中平湖组沉积初期处于温暖湿润的淡水环境, 早中期为干旱的咸水环境, 中期转变为温暖湿润的半咸水环境, 中晚期是干旱的咸水环境, 晚期则是温暖湿润的淡水环境。整个平湖组沉积时期, BW 地区水体都处于相对偏氧化的环境。

3) 对比 2 种样品提取方法, 认为醋酸选择性提取法在区分陆相与海相沉积环境时具有较大的优势。西湖凹陷 BW 地区在平湖组沉积时期, 除早期与晚期为淡水环境外, 大部分沉积时期都处于海陆过渡环境或海相环境。

参考文献 (References)

- 拜文华, 王强, 孙莎莎, 梁峰, 张琴, 昌燕. 2019. 五峰组—龙马溪组页岩地化特征及沉积环境: 以四川盆地西南缘为例. 中国矿业大学学报, 48(6): 1276-1289. [Bai W H, Wang Q, Sun S S, Liang F, Zhang Q, Chang Y. 2019. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Wufeng-Longmaxi shales; a case study from southwestern margin of the Sichuan Basin. Journal of China University of Mining & Technology, 48(6): 1276-1289]
- 陈忠云, 杜学斌, 李帅. 2022. 东海西湖凹陷平湖斜坡带平湖组沉积体系平面分区特征及差异性展布. 石油实验地质, 44(5): 780-789. [Chen Z Y, Du X B, Li S. 2022. Distributional signatures of depositional system of Pinghu Formation, Pinghu slope, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin. Petroleum Geology and Experiment, 44(5): 780-789]
- 韩永林, 王海红, 陈志华, 王芳, 梁晓伟, 王成玉, 牛小兵. 2007. 耿湾—史家湾地区长 6 段微量元素地球化学特征及古盐度分析. 岩性油气藏, 19(4): 20-26. [Han Y L, Wang H H, Chen Z H, Wang F, Liang X W, Wang C Y, Niu X B. 2007. Paleosalinity analysis and trace element geochemistry of Chang 6 member in Gengwan-Shijiawan area, Ordos Basin. Lithologic Reservoirs, 19(4): 20-26]
- 何利, 宋春彦, 刘建清. 2018. 川南马边地区五峰—龙马溪组页岩地球化学特征及有机质富集机理. 东北石油大学学报, 42(4): 52-65. [He L, Song C Y, Liu J Q. 2018. Shale geochemical characteristics and enrichment mechanism of organic matter of Wufeng-Longmaxi Formation in the Mabian area of southeast Sichuan Basin. Journal of Northeast Petroleum University, 42(4): 52-65]
- 黄晓松, 张涛, 唐贤君, 刘建斌, 张少武, 李鑫. 2024. 东海盆地西湖凹陷中央背斜带平湖组、花港组生物地层厘定及其沉积环境、古气候探讨. 地层学杂志, 48(4): 440-452. [Huang X S, Zhang T, Tang X J, Liu J B, Zhang S W, Li X. 2024. Biostratigraphic division, sedimentary environment and paleoclimate of Pinghu Formation and Huagang Formation in central anticline belt, Xihu sag, East China Sea Basin. Journal of Stratigraphy, 48(4): 440-452]
- 蒋海军, 胡明毅, 胡忠贵, 柯岭, 徐艳霞, 吴联钱. 2011. 西湖凹陷古近系沉积环境分析: 以微体古生物化石为主要依据. 岩性油气藏, 23(1): 74-78. [Jiang H J, Hu M Y, Hu Z G, Ke L, Xu Y X, Wu L Q. 2011. Sedimentary environment of Paleogene in Xihu sag: microfossil as the main foundation. Lithologic Reservoirs, 23(1): 74-78]
- 金艳, 傅强. 2013. 东海盆地某油气田 A 井 P 层沉积体系研究. 海洋石油, 33(4): 19-23. [Jin Y, Fu Q. 2013. Study on sedimentary system of P formation in Well A in oil and gas field of East China Sea. Offshore Oil, 33(4): 19-23]
- 蒋一鸣, 周倩羽, 李帅, 张信. 2016. 西湖凹陷西部斜坡带平湖组含煤岩系沉积环境再思考. 中国煤炭地质, 28(8): 18-25. [Jiang Y M, Zhou Q Y, Li S, Zhang X. 2016. Reconsideration of Pinghu Formation coal-bearing rock series sedimentary environment in Western Slope of Xihu Depression. Coal Geology of China, 28(8): 18-25]
- 李顺利, 李竞, 陈彬滔, 许磊, 于兴河, 侯国伟, 高照普. 2020. 西湖凹陷渐新统花港组大型沿岸砂坝沉积特征及主控因素. 古地理学报, 22(3): 493-503. [Li S L, Li J, Chen B T, Xu L, Yu X H, Hou G W, Gao Z P. 2020. Sedimentary characteristics and controlling factors of large-scale longshore bar in the Oligocene Huagang Formation, Xihu sag. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(3): 493-503]
- 刘开道, 王俊辉, 阴国锋, 陈锦霖, 武洋, 李勇霖, 代正明, 姚文娇, 姜在兴, 徐杰. 2025. 东海陆架盆地西湖凹陷宝武地区平湖组石英溶蚀作用及机制. 石油与天然气地质, 46(4): 1349-1366. [Liu K X, Wang J H, Yin G F, Chen J L, Wu Y, Li Y L, Dai Z M, Yao W J, Jiang Z X, Xu J. 2025. Quartz dissolution and its mechanisms in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin. Oil & Gas Geology, 46(4): 1349-1366]
- 刘伟. 2008. 沉积物元素地球化学特征的古环境学意义. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Liu W. 2008. The paleoenvironmental significance of characteristic of element geochemistry in sediments. Masteral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 刘英辉, 蔡华, 段冬平, 荣乘锐, 常吟善, 徐清海. 2022. 西湖凹陷平湖地区平湖组海侵体系域潮控三角洲—潮坪沉积特征及模式. 海洋地质前沿, 38(1): 33-40. [Liu Y H, Cai H, Duan D P, Rong C R, Chang Y S, Xu Q H. 2022. The sedimentary characteristics of tidal delta and tidal flat in transgressive system tract of Pinghu Formation in Pinghu area, Xihu sag. Marine Geology Frontiers, 38(1): 33-40]
- 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. [Shen W C, Shao L Y, Zhou Q Y, Kang S L. 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]
- 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(6): 1226-1238. [Wang A H, Ye S Y, Liu J K, Ding X G, Li H L, Xu N C. 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(6): 1226-1238]
- 王健伟, 吕鹏, 王泽群, 严曙梅, 潘璐, 林立新, 王瑞, 徐晨, 刘舒, 黄小娟. 2025. 平湖组砂层组别沉积演化及主控因素: 以东海陆架盆地西湖凹陷W井区为例. 油气藏评价与开发, 15(5): 773-787. [Wang J W, Lyu P, Wang Z Q, Yan S M, Pan L, Lin L X, Wang R, Xu C, Liu S, Huang X J. 2025. Sedimentary evolution and main controlling factors of sand group levels in Pinghu Formation: a case study of well block W in Xihu sag, East China Sea Shelf Basin. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 15(5): 773-787]
- 王旭影, 姜在兴. 2021. 苏北东台坳陷古新统阜宁组三段微量、稀土元素地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 67(2): 355-366. [Wang X Y, Jiang Z X. 2021. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in the 3rd Member of Paleocene Funing Formation in Dongtai Depression, North Jiangsu Basin, and their geological significance. *Geological Review*, 67(2): 355-366]
- 王泽宇, 徐清海, 侯国伟, 张昌民, 朱锐, 刘思琦. 2021. 东海陆架盆地西湖凹陷W井区平湖组潮汐沉积模式. 海相油气地质, 26(2): 159-169. [Wang Z Y, Xu Q H, Hou G W, Zhang C M, Zhu R, Liu S Q. 2021. Tidal depositional model of Pinghu Formation in W well block of Xihu sag, East China Sea Shelf Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 26(2): 159-169]
- 吴朝东, 储著银. 2001. 黑色页岩微量元素形态分析及地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 20(1): 14-20. [Wu C D, Chu Z Y. 2001. Sequential extraction of trace elements and the geological significance of fractions in black shales, west Hunan and east Guizhou. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(1): 14-20]
- 吴嘉鹏, 张兰, 万丽芬, 赵千慧, 杨彩虹, 王英民. 2017. 西湖凹陷平湖组物源分析. 中国石油勘探, 22(2): 50-57. [Wu J P, Zhang L, Wan L F, Zhao Q H, Yang C H, Wang Y M. 2017. Provenance analysis of Pinghu Formation in Xihu sag. *China Petroleum Exploration*, 22(2): 50-57]
- 武瑾, 曾凡成, 唐晴, 杨立民, 邱振, 赵圣贤, 邹晓品, 李伟华. 2025. 川南地区五峰组—龙马溪组页岩岩相特征及沉积环境演化. 古地理学报, 27(5): 1227-1243. [Wu J, Zeng F C, Tang Q, Yang L M, Qiu Z, Zhao S X, Zou X P, Li W H. 2025. Lithofacies characteristics and sedimentary environment evolution of the Wufeng and Longmaxi Formations shale in southern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(5): 1227-1243]
- 谢国梁, 沈玉林, 赵志刚, 魏展航, 蔡佳, 周豪. 2013. 西湖凹陷平北地区泥岩地球化学特征及其地质意义. 地球化学, 42(6): 599-610. [Xie G L, Shen Y L, Zhao Z G, Wei Z H, Cai J, Zhou H. 2013. Distribution characteristic and geological significance of rare earth and trace elements of mudstone of Pingbei area in Xihu Depression. *Geochimica*, 42(6): 599-610]
- 徐波, 胡碧瑶, 顾智鹏, 洪婧. 2021. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组微量元素和稀土元素地球化学特征及其地质意义. 西安石油大学学报(自然科学版), 36(2): 28-37, 49. [Xu B, Hu B Y, Gu Z P, Hong J. 2021. Geochemical characteristics of trace elements and rare earth elements of Pinghu Formation in Pinghu slope belt of Xihu sag and their geological significance. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 36(2): 28-37, 49]
- 徐博, 曾文倩, 刁慧, 汤睿, 欧戈. 2021. 东海盆地西湖凹陷平湖组微量稀土元素对古生产环境的指示意义. 海洋地质与第四纪地质, 41(3): 72-84. [Xu B, Zeng W Q, Diao H, Tang R, Ou G. 2021. Trace rare earth elements in the Pinghu Formation of Xihu sag and its implications for paleo-production environment. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 41(3): 72-84]
- 杨彩虹, 高兆红, 蒋一鸣, 高伟中. 2013. 西湖凹陷平湖斜坡带始新统平湖组碎屑沉积体系再认识. 石油天然气学报, 35(9): 11-14. [Yang C H, Gao Z H, Jiang Y M, Gao W Z. 2013. Reunderstanding of elastic rock sedimentary facies of Eocene Pinghu Formation in Pinghu slope of Xihu sag. *Journal of Oil and Gas Technology*, 35(9): 11-14]
- 杨征, 吴胜和, 段冬平, 徐振华, 熊绮聪, 张玉飞. 2024. 西湖凹陷花港组浅水三角洲平原分流河道沉积构型. 古地理学报, 26(3): 525-544. [Yang Z, Wu S H, Duan D P, Xu Z H, Xiong Q C, Zhang Y F. 2024. Architecture characteristics of distributary channels in shallow water delta plain of the Huagang Formation in Xihu sag, East China Sea. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(3): 525-544]
- 于水. 2020. 西湖凹陷西斜坡平湖组烃源岩沉积成因分析. 地球科学, 45(5): 1722-1736. [Yu S. 2020. Depositional genesis analysis of source rock in Pinghu Formation of western slope, Xihu Depression. *Earth Science*, 45(5): 1722-1736]
- 张国华, 张建培. 2015. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨. 地质前缘, 22(1): 260-270. [Zhang G H, Zhang J P. 2015. A discussion on the tectonic inversion and its genetic mechanism in the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 260-270]
- 张书迪. 2021. 应用地球化学方法重建西湖凹陷平湖组古植被群落及古环境. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Zhang S D. 2021. Reconstruction of paleovegetation community and paleoenvironment of Pinghu Formation in Xihu Depression by geochemical methods. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 张锡楠, 王皖丽, 黄启彰. 2025. 东海盆地西湖凹陷平湖斜坡带典型井平湖组微量元素古环境差异及控制因素. 海洋地质前沿,

- 41(7): 76-88. [Zhang X N, Wang W L, Huang Q Z. 2025. Paleo-environmental difference and controlling factor of trace elements in Pinghu Formation of typical wells in Pinghu Slope Belt of the Xihu sag, East China Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 41(7): 76-88]
- 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 王香增, 张丽霞, 姜呈馥, 程明, 俞雨溪, 田飞. 2015. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义. *天然气地球科学*, 26(7): 1395-1404. [Zheng Y D, Lei Y H, Zhang L Q, Wang X Z, Zhang L X, Jiang C F, Cheng M, Yu Y X, Tian F. 2015. Characteristics of element geochemistry and paleo sedimentary environment evolution of Zhangjatan shale in the southeast of Ordos Basin and its geological significance for oil and gas. *Natural Gas Geoscience*, 26(7): 1395-1404]
- 周洁. 2012. 东海盆地西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩地球化学特征. 浙江大学硕士学位论文. [Zhou J. 2012. Geochemical characteristics of Eocene Pinghu Formation coal-bearing source rocks in the Xihu Depression, East China Sea Basin. Masteral dissertation of Zhejiang University]
- 周心怀, 蒋一鸣, 唐贤君. 2019. 西湖凹陷成盆背景、原型盆地演化及勘探启示. *中国海上油气*, 31(3): 1-10. [Zhou X H, Jiang Y M, Tang X J. 2019. Tectonic setting, prototype basin evolution and exploration enlightenment of Xihu sag in East China Sea Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 31(3): 1-10]
- 朱筱敏, 李维, 王晓琳, 叶蕾, 董艳蕾, 张琴. 2025. 高邮—金湖凹陷古近系阜宁组细粒混积岩沉积环境. *古地理学报*, 27(4): 985-996. [Zhu X M, Li W, Wang X L, Ye L, Dong Y L, Zhang Q. 2025. Sedimentary environment of fine-grained mixed rocks from the Paleogene Funing Formation in Gaoyou and Jinhu sags. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 27(4): 985-996]
- 朱振鑫, 郝伟航, 李勇霖, 武洋, 陈锦霖, 李莉, 李馨瑜. 2026. 东海陆架盆地西湖凹陷西斜坡中部平湖组沉积特征及其控制因素. *海洋地质与第四纪地质*, 46(1): 133-146. [Zhu Z X, Hao W H, Li Y L, Wu Y, Chen J L, Li L, Li X Y. 2026. Deposition evolution and controlling factors of the Pinghu Formation in the central western slope of the Xihu sag, East China Shelf Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 46(1): 133-146]
- Cao J, Wu M, Chen Y, Hu K, Bian L Z, Wang L G, Zhang Y. 2012. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China. *Geochemistry*, 72(3): 245-252.
- Elderfield H, Greaves M J. 1982. The rare earth elements in seawater. *Nature*, 296: 214-219.
- Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, Wildeman T R. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. Origin and Distribution of the Elements. Amsterdam: Elsevier, 889-912.
- 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, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. *Chemical Geology*, 99: 65-82.
- Rahman T, Sarkar K, Niyogi A, Mahanandia A, Ahmad M S. 2022. Paleo-environmental study of the Raniganj and Barakar Formations: implications from the geochemical and geomechanical aspects of sandstone and shale. *Journal of the Geological Society of India*, 98: 1497-1504.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 312.
- Wang J R, Xu X, Chi L B, Li X, Wang Y C, Jiang M H, Chen J M, Li J, Fan X. 2024. Uncovering paleoenvironmental evolution in Xinghua Bay of Southern China during the mid-to-late Holocene: insights from studies of biogeochemical elements in sediments. *Journal of Paleolimnology*, 72: 365-379.
- Wignall P B. 1994. *Black Shales*. Oxford: Clarendon Press, 46.

(责任编辑 张西娟)