

火山灰蚀变对细粒混积岩元素异常的影响及对古环境恢复的作用

——以三塘湖盆地条湖-马朗凹陷二叠系芦草沟组二段为例

潘永帅^{1,2}, 柳波^{1,2}, 杨易卓³, 屈童⁴, 黄志龙^{1,2,3}, 徐雄飞⁵

[1. 东北石油大学多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江大庆 163712; 2. 东北石油大学陆相页岩油气成藏及高效开发教育部重点实验室, 黑龙江大庆 163712; 3. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 4. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018; 5. 中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009]

摘要:火山灰输入对咸化湖盆沉积环境重建的影响较大,其丰富的微量元素随着沉降入湖并与沉积物共同保存,导致湖相地层的元素含量无法代表原始沉积特征。以三塘湖盆地条湖-马朗凹陷二叠系芦草沟组二段(芦二段)为例,开展主/微量元素、稀土元素、饱和烃气相色谱-质谱、全岩X射线衍射和有机碳含量测试分析以及薄片鉴定,研究火山灰蚀变对细粒混积岩元素异常的影响机制,恢复火山灰影响下的咸化湖相沉积环境。研究结果表明:芦二段由细粒凝灰质和碳酸盐两种组分混积形成,长英质和碳酸盐矿物总含量平均可达95%,属于广义上的相缘渐变混合沉积类型。大量热力学性质不稳定的盆缘火山灰物质在早期入水溶解和中、晚期脱玻化及有机酸溶蚀作用的影响下,向孔隙流体中释放出了高丰度的包括金属离子在内的多种营养性离子,对芦二段细粒混积岩中Ni、Co、S、P和Ga等元素产生了明显干扰,导致这些元素无法反映原始沉积环境信息。结合生物标志化合物和筛选校正后的主/微量元素分析发现,芦二段沉积期气候炎热干旱,湖盆水体供给有限,湖水盐度极高且含氧量较低。火山活动对芦二段沉积环境起到了明显的调控作用,当火山由强烈喷发期向间歇期过渡时,气候炎热干旱程度增强,水体蒸发量增大,水体盐度增高,含氧量增加,沉积形成了不同的岩石组合类型。

关键词:火山灰;咸化湖相;蚀变作用;元素异常;沉积环境;芦草沟组;二叠系;条湖-马朗凹陷;三塘湖盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Impacts of volcanic ash alteration on element anomalies in fine-grained mixed deposits and paleoenvironmental reconstruction: A case study of the 2nd member of the Permian Lucaogou Formation, Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

PAN Yongshuai^{1,2}, LIU Bo^{1,2}, YANG Yizhuo³, QU Tong⁴, HUANG Zhilong^{1,2,3}, XU Xiongfei⁵

[1. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Terrestrial Shale Oil and Gas Reservoir Formation and Efficient Development, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, Tuha Oilfield Company, PetroChina, Hami, Xinjiang 839009, China]

Abstract: Volcanic ash input holds significant impacts on the reconstruction of sedimentary environments in saline lacustrine basins. Specifically, when abundant trace elements from volcanic ash enter lakes and are preserved in tandem with sediment, the element contents in lacustrine strata cannot accurately reflect the original sedimentary setting. Focusing on the 2nd member of the Permian Lucaogou Formation (P_2l^2) in the Tiaohu-Malang Sag within the Santanghu Basin, we investigate the mechanisms by which volcanic ash alteration affects element anomalies in fine-grained mixed

收稿日期:2024-12-05;修回日期:2025-02-26。

第一作者简介:潘永帅(1995—),男,副教授,含油气盆地。E-mail: Panyongshuai@nepu.edu.cn。

通信作者简介:柳波(1983—),男,教授,非常规油气地质。E-mail: liubo@nepu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42402154)。

deposits using major, trace, and rare earth element analyses, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) of saturated hydrocarbons, whole-rock X-ray diffraction (XRD), total organic carbon (TOC) content determination, and thin section observation. Accordingly, the saline lacustrine sedimentary environment under the action of volcanic ash is reconstructed. The results indicate that the P_2l^2 consists of fine-grained tuffaceous materials and carbonates, with the total content of felsic and carbonate minerals reaching up to 95 % on average, suggesting gradational mixed sedimentation at facies margins in a broad sense. Under the influence of alteration such as early dissolution in water and mid-late devitrification and organic acid corrosion, substantial volcanic ash thermodynamically unstable released various high-abundance nutrient ions (including metal ions) into pore fluids, which significantly interfered with the elements including Ni, Co, S, P, and Ga in the fine-grained mixed rocks of the P_2l^2 . As a result, these elements cannot accurately reflect the original sedimentary environment. Biomarker compounds, together with the analysis of major and trace element data after screening and correction, reveal a hot and arid climate during the deposition of the P_2l^2 , featuring limited water supply to the lacustrine basin and extremely high salinity and low oxygen concentration of the lake. Volcanic activity played a significant role in regulating the sedimentary environment of the P_2l^2 . The transition from intense to intermittent volcanic eruptions corresponded to an increasingly hot and arid climate, along with elevated water evaporation, water salinity, and oxygen concentration, leading to the deposition of various types of rock assemblages.

Key words: volcanic ash, saline lacustrine facies, alteration, element anomaly, sedimentary environment, Lucaogou Formation, Permian, Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

引用格式:潘永帅,柳波,杨易卓,等. 火山灰蚀变对细粒混积岩元素异常的影响及对古环境恢复的作用——以三塘湖盆地条湖-马朗凹陷二叠系芦草沟组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 530–549. DOI: 10. 11743/ogg20250213.

PAN Yongshuai, LIU Bo, YANG Yizhuo, et al. Impacts of volcanic ash alteration on element anomalies in fine-grained mixed deposits and paleoenvironmental reconstruction: A case study of the 2nd member of the Permian Lucaogou Formation, Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 530–549. DOI: 10. 11743/ogg20250213.

沉积环境重建对于分析细粒沉积物的岩性和岩相特征、沉积演化过程以及有机质富集机理等具有重要意义^[1-3]。当前,湖相盆地沉积环境研究成果丰硕,研究手段主要是基于有机地球化学和无机地球化学等分析进行古环境的重建^[4-6]。当湖相或海相盆地的沉积环境发生变化时,沉积物中的元素含量和生物标志化合物种类会相应改变,因此可以通过分析这些差异来恢复沉积期水体环境的变化^[7-9]。咸化湖盆通常富含高丰度的低等水生有机质,是泥页岩的有利发育区,也是主/微量元素的重要储存库,富含多种对沉积环境敏感的元素^[10-12]。研究显示,在纹层状且有机质丰富的湖相细粒沉积物中,微量元素极易富集,尤其是在缺氧环境下;相反,在生物活动频繁且有机质贫乏的沉积体系中,微量元素富集程度相对较低^[7,13]。

尽管上述方法能有效恢复湖相盆地的沉积环境,但在火山活动频繁的区域,尤其是对于具有大量火山灰沉降的咸化湖盆,如何精确重建古环境目前仍面临着严峻的挑战。咸化湖盆广泛发育碳酸盐岩,会造成Sr等元素含量异常高^[14-15];同时,火山灰内部又含有大量包括金属离子在内的多种营养性离子,这些物质会

随着火山灰的沉降与湖盆中的原始沉积物共同保存下来^[6,16-17]。相较“水携型”火山灰的沉积,盆地内部“空降型”火山灰沉积对原始沉积物元素地球化学特征的影响更为剧烈,因为后者并未经过水流搬运而导致元素含量被稀释。火山灰的沉积成岩过程以脱玻化最为重要,其通常需要经过水解、脱硅、脱铝以及重结晶等多个阶段,每个阶段火山灰物质都会发生蚀变而导致元素迁移和扩散^[16-17]。另外,火山灰物质由于热力学性质不稳定而极易被酸性流体溶蚀,此过程往往会导致大量的碱金属离子向孔隙流体迁移或沉淀形成自生矿物^[17],但目前关于火山灰蚀变对细粒沉积物主/微量元素的含量和种类的影响机制研究还相对薄弱。更为重要的是,火山灰蚀变释放的元素是否会干扰原始湖相沉积物中元素的组成与分布,未经校正直接使用混积沉积物中的元素来分析古环境是否会产生偏差,以及沿用传统的沉积环境判别标准是否会导致分析不准,都是影响古环境重建准确性的关键因素。近年来的研究发现,通过对某些典型地区进行大量系统性的分析而建立的沉积环境指标和判断阈值可能并不适用于其他年代和沉积环境的地层,甚至不加以校正的直接使用会造成极大的误

差^[8,14]。因此,咸化湖相盆地沉积环境的精准重建工作仍有较多问题需要解决和注意。

三塘湖盆地条湖-马朗凹陷二叠系芦草沟组二段(芦二段)沉积期火山活动频繁,发育一套由凝灰质和碳酸盐两种组分构成的细粒混积物,火山灰和碳酸盐含量“此消彼长”,总计可达95%以上,是分析火山灰蚀变对细粒混积岩元素地球化学特征影响机制及火山灰影响下咸化湖相沉积环境重建的良好靶区。以往对于该特殊组分沉积环境的研究并没有考虑火山灰物质产生的影响,分析结果可能存在较大误差。据此,本研究以芦二段为例,采用有机地球化学(生物标志化合物等)和无机地球化学(主/微量元素等)分析等手段相结合的方法,对火山灰影响下咸化湖相沉积盆地的古环境进行重建,旨在明确火山灰蚀变对细粒混积岩元素异常的影响机制并剔除火山灰物质对湖相沉积环境指标的影响,为研究区及其他具有火山灰影响的湖相沉积盆地的古环境重建提供参考,提高页岩油勘探成功率。

1 区域地质概况

本研究聚焦中国西北部的小型叠合盆地—三塘湖盆地。该盆地沿中蒙边界呈狭长带状分布,西南侧受石头梅等断裂控制,紧邻天山山脉;东北侧则被汉水泉等断裂分隔,与阿尔泰山相接^[18-20]。受海西运动中-晚期、印支运动晚期、燕山运动中-晚期及喜马拉雅运动等多级次构造运动的影响,三塘湖盆地南北两翼变形强烈,西南部为强烈逆冲推覆区,东北部为正常斜坡沉积区,导致盆地具断陷式特点,沉积中心紧邻西南缘逆冲推覆带^[21-23]。盆地内部受多级北东向雁列式断裂作用影响,形成多个隆起与洼陷。其中,位于盆地中部的条湖-马朗凹陷是盆地内最重要的含油气区,也是本次研究的靶区(图1a)。通过对盆地边缘多口井的系统取心观察和录井岩性识别发现,仅在盆地西南缘M35井附近见到了少量火山角砾岩,其他地区均为细粒凝灰质和白云石混合沉积的岩石类型,说明该井附近距离火山口最近,而其他地区相对稍远^[17](图1a)。

自石炭纪以来,三塘湖地区火山活动十分剧烈且频繁,导致该区盆地以巨厚的石炭系火山岩为基底^[19,24]。二叠纪沉积早、中期,即芦草沟组沉积期,盆地内部火山活动和缓,但盆地边缘火山活动频繁,形成了一套由外源凝灰质物质和盆内自生碳酸盐为主的湖相混合沉积体系;而在二叠纪中、晚期,盆地内部和周围的火山开始剧烈活动,导致上覆条湖组形成了几千

米厚的火山岩层系^[22,25]。芦草沟组由下至上可细分为芦草沟组一段(芦一段)、芦草沟组二段(芦二段)和芦草沟组三段(芦三段),其中,芦二段沉积体系粒度细、有机质丰度高、厚度大且分布广,是研究区最重要的页岩油层段(图1b)。但受盆地周缘频繁火山活动的影响,芦二段沉积环境复杂多变,目前对于该区沉积环境的精准恢复工作仍待进一步开展,严重制约了对该区页岩油“甜点段”和有利区带分布规律等的研究,极大的降低了页岩油的勘探成功率。

2 样品采集与测试

本研究开展的主/微量元素、稀土元素、饱和烃气相色谱-质谱、全岩X射线衍射和有机碳含量分析,以及扫描电镜观察和薄片鉴定等实验,均采用钻井的岩心进行测试。研究区有多口连续系统取心井,单井取心长度最大可达200余米,取心层段可覆盖芦二段。为了准确分析火山灰对沉积环境指标的影响,在选择之前对所有连续系统取心井的岩心进行仔细观察和描述,并根据颜色、构造以及成分等特征密集钻取大量岩心样品(长6 cm、直径3 cm的岩心柱)。

在此基础上,对所有样品进行了全岩X射线衍射和有机碳含量分析,以及扫描电镜观察和薄片鉴定等,然后根据实验结果优选出不同火山灰含量的样品进行主/微量元素、稀土元素和饱和烃气相色谱-质谱等分析,确保可以将不同火山灰含量的样品进行对比分析。所有的分析测试均在东北石油大学多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室和陆相页岩油气成藏及高效开发教育部重点实验室完成,严格按照国家标准执行。另外,为了避免数据量过少而无法准确恢复古环境,还从中国石油吐哈油田勘探开发研究院以及前人的相关研究成果中收集了部分主、微量元素等分析数据。

3 火山灰影响下的混积岩特征

3.1 岩石学与矿物学特征

通过宏观岩心观察、微观薄片鉴定以及全岩X射线衍射分析等发现,芦二段细粒混积岩主要包括两大类矿物组分:碳酸盐矿物和长英质矿物(图2a)。其中,前者主要以白云石为主(平均含量约为22.8%),铁白云石次之(平均含量约为19.1%),方解石较少(平均含量约为4.1%);后者主要以石英为主(平均含

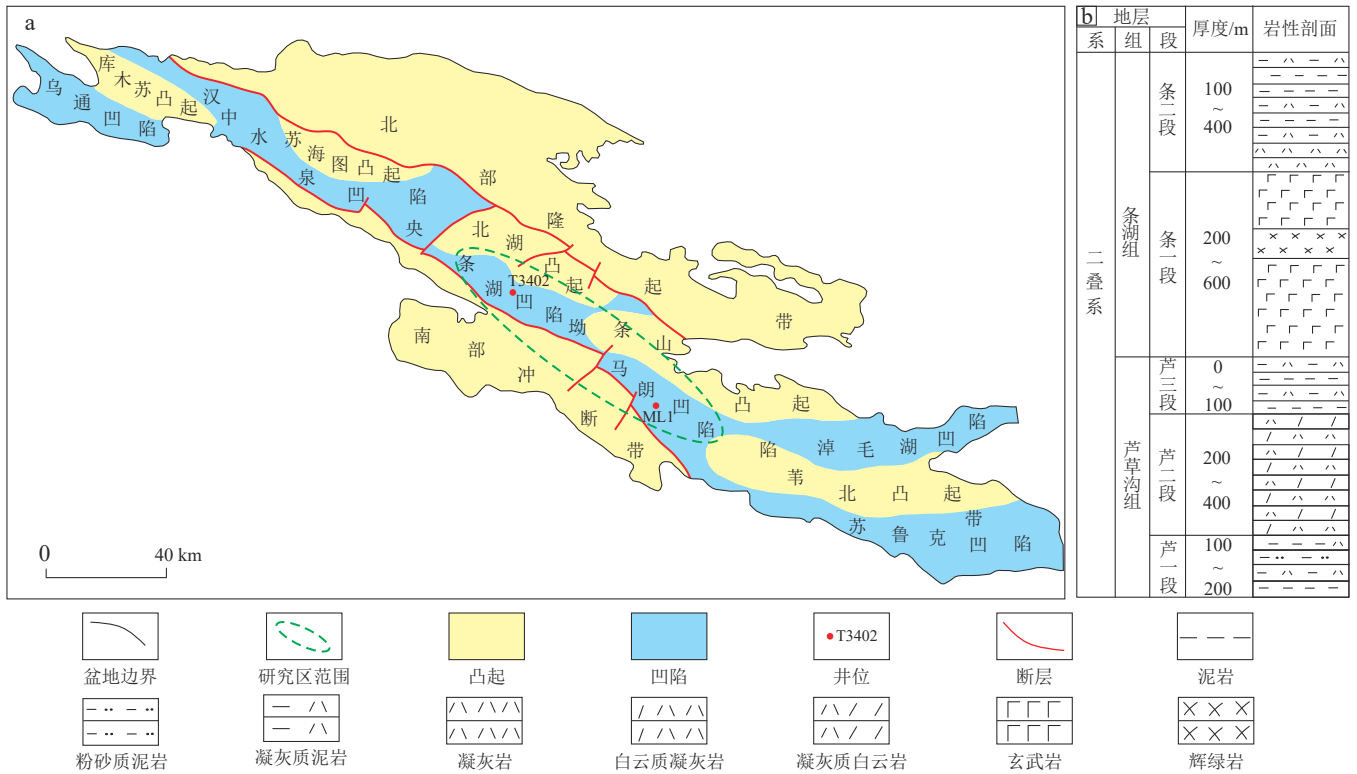
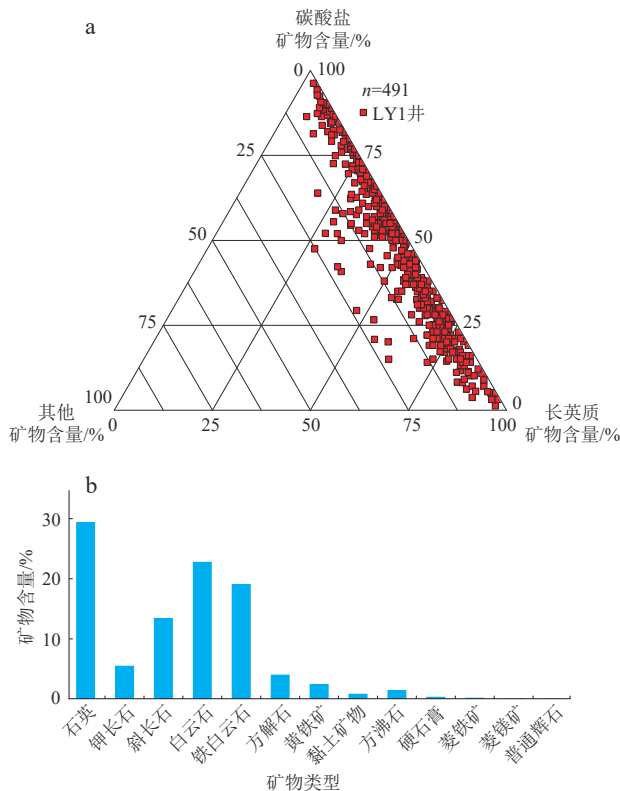


图1 三塘湖盆地地质概况(a)及二叠系地层综合柱状图(b)(据文献[16])

Fig. 1 Geological overview map (a) and the Permian composite stratigraphic column (b) of the Santanghu Basin (after reference [16])

图2 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段细粒混积岩矿特征
Fig. 2 Mineral characteristics of the fine-grained mixed deposits in the P_2L_2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a. 主要矿物含量三角图; b. 不同类型矿物含量分布柱状图

量约为 29.4 %), 长石次之 (平均含量约为 19.0 %) (图 2b)。芦二段细粒混积岩与其他地区泥页岩的矿物类型明显不同, 其几乎不含黏土矿物 (平均含量约为 0.9 %), 大部分井区的黏土矿物含量整体小于 5.0 %。另外, 芦二段细粒混积岩中还含有少量的黄铁矿、方沸石和硬石膏等矿物, 总体含量小于 5.0 % (图 2b)。微观显微镜下观察显示芦二段不同矿物组分之间高度混杂沉积, 没有明显界限 (图 3)。

芦二段细粒混积岩以明暗相间的毫米级和厘米级纹层状构造为主, 主要包含两种组分: 凝灰质和碳酸盐 (图 3)。其中, 凝灰质组分主要以长英质矿物为主, 对应于暗色纹层, 主要来源于盆地周缘频繁火山喷发沉降的火山灰物质 (图 3a—e)。该类组分在光学显微镜下很难见到晶体形态, 而在扫描电镜下可见到大量由火山灰脱玻化作用形成的具有良好晶体形态的自生石英和长石 (图 3j)。另外, 凝灰质组分在荧光照射下可见大量层状橙黄色藻类有机质发育 (图 3f)。碳酸盐组分以白云石和铁白云石为主, 对应于亮色纹层, 主要形成于咸化湖盆内的原生和次生白云化作用 (图 3g, h)。该类组分在光学显微镜下以泥晶为主, 在扫描电镜下可见菱形、球形以及不规则晶体形态, 而在荧光显微镜下则少见层状藻类有机质, 多以点状和条状分散状

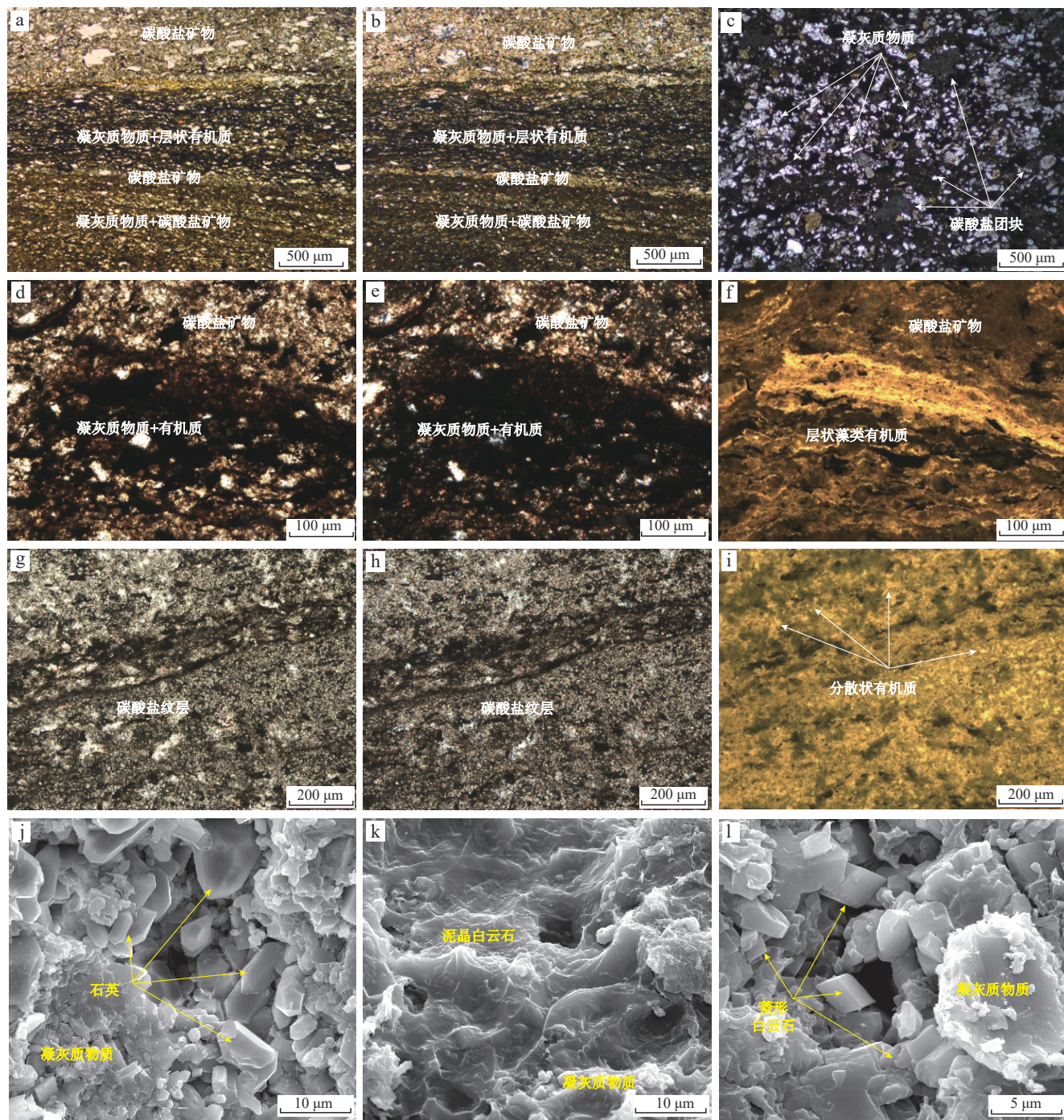


图3 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段细粒混积岩显微组分特征照片

Fig. 3 Microscopic characteristics of components in the fine-grained mixed deposits in the P_2L_2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin
a, b. M78井,埋深3 047.31 m,细粒凝灰质组分与碳酸盐组分呈纹层状混杂沉积,其中a和b分别为单偏光和正交光,铸体薄片;c. ML2井,埋深3 500.44 m,鸡骨架状和棱角状火山灰物质与团块状白云石混杂沉积,单偏光,铸体薄片;d—f. L1井,埋深3 080.76 m,细粒凝灰质组分含橙黄色荧光层状藻类有机质,其中d,e和f分别为单偏光、正交光和荧光,铸体薄片与荧光薄片;g—i. M708井,埋深2 213.32 m,细粒碳酸盐组分含少量分散状藻类有机质,其中g,h和i分别为单偏光、正交光和荧光,铸体薄片与荧光薄片;j. M78井,埋深3 040.13 m,凝灰质组分脱玻化形成六方双锥状自生石英和条状长石,扫描电镜照片;k. ML1井,埋深3 517.23 m,碳酸盐组分中含大量泥晶白云石和少量凝灰质物质,扫描电镜照片;l. ML1井,埋深3 558.81 m,碳酸盐组分中含菱形白云石和无晶型凝灰质物质,扫描电镜照片

有机质为主(图3i,k,l)。

结合岩石三级定名法则、前人对于混积岩的分类方案以及芦二段的实际地质情况^[26-31],本研究以长英

质矿物(凝灰质)含量和白云石含量为两大组分端元对芦二段细粒混积岩进行分类。为了全面反映沉积物的原始沉积特征,用长英质矿物含量代表凝灰质物质含

量。由于2大类矿物含量总和可达95%,考虑到简化原则,便以某一类矿物含量(长英质或碳酸盐)的75%,50%和25%为界限,将芦二段细粒混积岩进一步细分为凝灰岩(长英质矿物含量>75%)、白云岩[白云石含量(包含铁白云石)>75%]、白云质凝灰岩(长英质矿物含量50%~75%)以及凝灰质白云岩[白云石含量(包含铁白云石)50%~75%]4大类。该分类方案既简化了以往关于混积岩的复杂命名,又明确了不同岩石类型的组分和矿物含量。

3.2 元素地球化学特征

芦二段细粒混积岩含有丰富的主量元素和微量元素,为了比较不同类型元素的相对含量,本研究利用大陆上地壳(UCC)元素丰度对所有元素进行标准化处理。结果显示,部分元素含量明显高于上地壳的元素含量(图4)。其中,主量元素中Si的含量最高,介于5.4%~32.9%,平均含量可达19.7%;Ca的含量次之,介于2.3%~21.5%,平均含量可达9.9%;然后为Mg,Al,K,Fe和Na,其含量分别为0.2%~17.5%(平均6.5%),1.1%~12.3%(平均4.8%),0.3%~7.7%(平均2.3%),0.7%~5.4%(平均2.2%)和0.4%~4.8%(平均1.6%)(图4)。另外,还含有部分S(平均1.1%)和P(平均0.1%)等元素,且其平均含量要相对高于上地壳元素的丰度值(图4)。

微量元素中Sr的含量最高,介于226.0~11164.0 $\mu\text{g/g}$,平均含量高达1065.6 $\mu\text{g/g}$;Ba的含量次之,介于108.9~2130.0 $\mu\text{g/g}$,平均含量可达330.9 $\mu\text{g/g}$;然后为Li,V,Cr,Zr和Rb,含量分别为3.8~1080.0 $\mu\text{g/g}$ (平均146.8 $\mu\text{g/g}$),20.0~498.0 $\mu\text{g/g}$ (平均96.1 $\mu\text{g/g}$),

9.2~445.0 $\mu\text{g/g}$ (平均71.8 $\mu\text{g/g}$),12.1~545.3 $\mu\text{g/g}$ (平均63.7 $\mu\text{g/g}$)和7.2~114.5 $\mu\text{g/g}$ (平均39.3 $\mu\text{g/g}$)(图4)。除此之外,Nb(平均6.8 $\mu\text{g/g}$),Hf(平均1.9 $\mu\text{g/g}$),Cs(平均1.5 $\mu\text{g/g}$)及Be(平均0.8 $\mu\text{g/g}$)等元素含量相对较低,整体低于上地壳元素丰度值(图4)。芦二段细粒混积岩中一些高含量的元素可能与大量火山灰沉降入湖释放和沉积环境变迁有关。

3.3 混合沉积成因类型及分布特征

芦二段沉积期,三塘湖盆地水体盐度极高,陆源碎屑物质供给有限,岩心和镜下都未见砂质沉积物。芦二段细粒混积岩主要由火山灰和碳酸盐两种特殊组分组成,与常规陆源碎屑和碳酸盐两组分为主的混积岩明显不同,导致以往根据常规组分划分的4种混积岩成因类型并不适合芦二段^[26,32-34]。主要原因有以下几点:①芦二段的混合沉积过程虽然受盆地边缘的火山活动控制,但不同组分之间均是以前缘式的接触关系为主,而不是突变式;②芦二段细粒混积岩中的两大组分以相似厚度频繁互层沉积,与常规原地混合沉积中碳酸盐组分呈薄层状分布于陆源碎屑沉积物中明显不同;③芦二段细粒混合沉积物中的碳酸盐组分主要由咸化湖盆内的化学沉淀作用形成,而不是由盆外碳酸盐岩风化搬运而来,故不属于母源混合沉积。芦二段的混合沉积过程与常规相缘渐变混合沉积成因类型比较相似,但又存在不同。芦二段的沉积物来源主要为盆缘火山灰沉降和盆内自生碳酸盐沉淀,而不是传统相缘渐变混合沉积类型中由水流将盆外陆源碎屑物质搬运至湖盆与碳酸盐组分混积形成;另外,芦二段的混合沉积既具有互层型的混合特征,又具有组构型的混

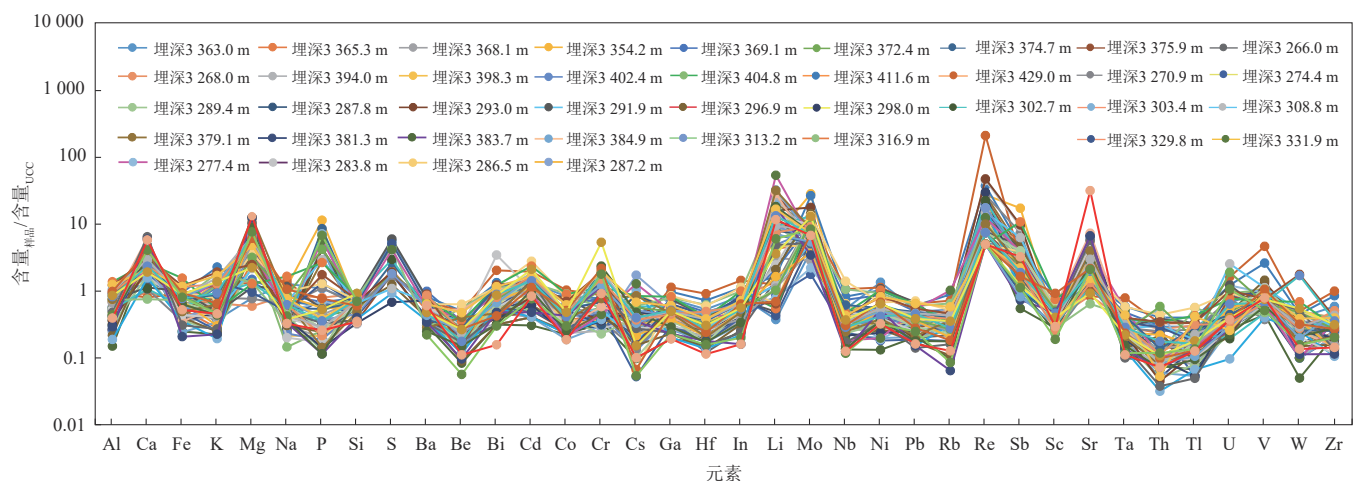


图4 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段细粒混积岩主、微量元素特征

Fig. 4 Characteristics of major and trace elements in the fine-grained mixed deposits in the P_2f_2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

合现象,分布十分广泛。

因此,本研究结合沉积构造类型、岩矿特征以及火山口位置等因素,认为芦二段的混合沉积过程可定义为广义的相缘渐变混合沉积类型,受控于火山喷发期次和沉积环境变迁。当火山活动强烈时,大量火山灰沉降导致研究区形成以凝灰岩和白云质凝灰岩为主的岩石类型;而当火山活动和缓时,咸化湖盆开始大量沉淀碳酸盐矿物,形成以白云岩和凝灰质白云岩为主的沉积物,不同组分之间频繁渐变式互层沉积(图5)。一次完整的火山活动控制了一次混合沉积过程,纵向上不同岩石类型的厚度和分布规律受控于火山灰沉降的持续时间和沉积环境的演变,平面上不同岩性的占比和分布受控于水体深度和火山口位置。

4 火山灰影响下咸化湖相沉积环境重建过程

4.1 火山灰蚀变对细粒混积岩元素地球化学特征的影响

火山灰物质属于光性方位特征不明显的硅铝酸盐沉积物,含有丰富的Si, Al, Na, K, Fe, Mn, Ca, Mg, S, P,

Ni, Co 和 Mo 等元素,结构成熟度低,性质不稳定,空落入湖盆后会经历快速且持续的蚀变作用^[6,16,35]。芦二段细粒混积岩受盆地周缘火山活动影响巨大,二叠系新疆东部地区多级次且频繁的火山活动喷发出了大量氟化氢和硫酸盐气溶胶等物质,与火山灰发生反应,并在其表面形成厚度较薄的盐膜,这些盐膜遇水后通常会在30 min内完全溶解,并释放出大量营养物质,促进藻类等低等水生生物勃发^[17]。芦二段细粒混积岩中所有高丰度的藻类有机质均与凝灰质物质伴生(图3d—f,图6a),凝灰质纹层的总有机碳含量(TOC)平均值可达6.8%,间接说明火山灰沉降入湖促进了低等水生生物的发育。

同时,火山灰本身也会发生强烈的脱玻化作用并持续进行至成岩中、晚期,这一作用过程可细分为水化作用阶段、脱硅阶段、脱铝阶段、富钠/富钾阶段以及最后结晶阶段^[17]。其中,水化阶段是脱玻化的初始阶段,在此过程中地层水内的H⁺会首先置换火山灰物质中的Na⁺, K⁺, Ca⁺及Mg²⁺等离子,如公式(1)所示。随后进入脱硅阶段, SiO₂会由于Si⁴⁺和O²⁻的高脱极化程度而沉淀形成微晶石英(图6b, c),导致大量碱性金属离子释放至流体介质中形成碱性成岩环境,促进碳酸盐矿物沉淀^[17](图3,图6e)。之后,火山灰物质继续经历

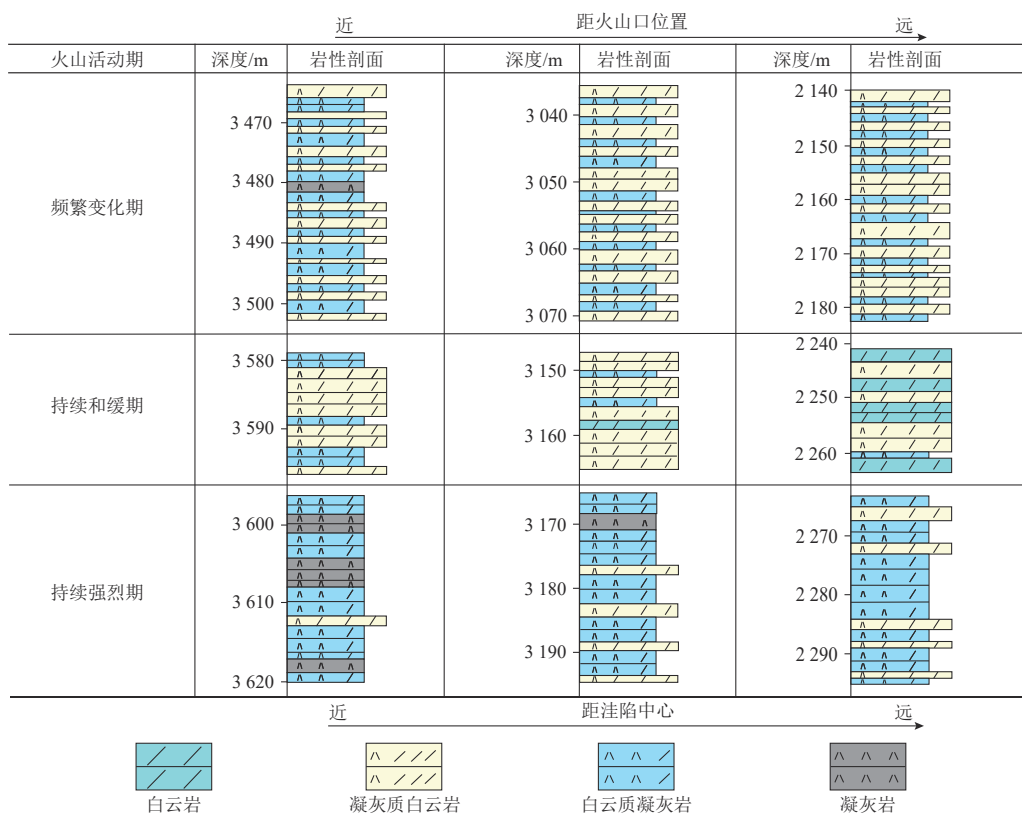


图5 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段细粒混积岩沉积成因模式

Fig. 5 Depositional genetic model of the fine-grained mixed deposits in the P₂f₂, Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

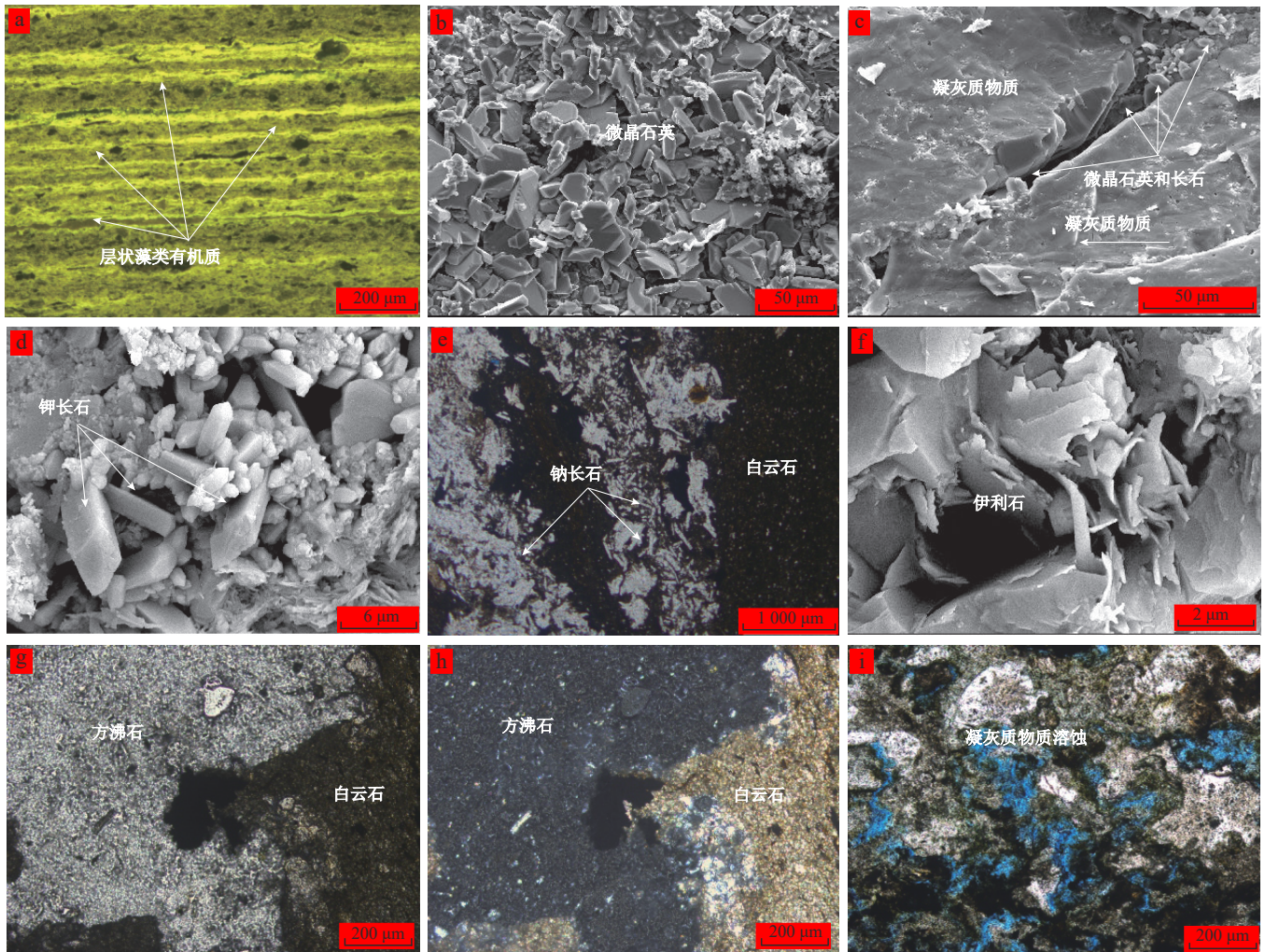
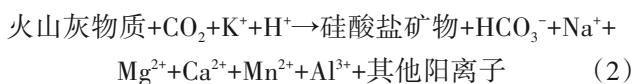
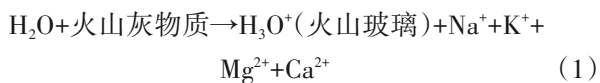


图6 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段火山灰蚀变显微照片

Fig. 6 Images showing volcanic ash alteration in the P_2L^2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a. ML1井,埋深3 617.61 m,层状橙黄色荧光藻类有机质广泛发育,荧光,荧光薄片;b. L1井,埋深3 019.43 m,火山灰脱玻化形成微晶石英,扫描电镜照片;c. M708井,埋深2 208.87 m,火山灰脱玻化孔中发育微晶石英和长石,扫描电镜照片;d. T3407井,埋深2 973.29 m,脱玻化孔中发育钾长石,扫描电镜照片;e. M708井,埋深2 166.85 m,凝灰质物质与钠长石共生,单偏光,铸体薄片;f. T3407井,埋深2 962.41 m,脱玻化孔中发育伊利石,扫描电镜照片;g, h. LY1井,埋深3 379.29 m,全消光方沸石,单偏光,铸体薄片;i. M708井,埋深2 166.91 m,大片凝灰质物质被溶蚀,单偏光,铸体薄片

蚀变直至脱铝、富钠钾和结晶阶段,释放大量的 Al^{3+} ,形成众多硅铝酸盐自生矿物,如钾长石、钠长石、方沸石和黏土矿物(图6c—h)。另外,火山灰物质极易被酸性流体溶蚀,内部丰富的 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Mn^{2+} 等离子在有机质成熟脱羧或微生物发酵等过程中持续向孔隙流体中迁移[公式(2);图6i]。因此,火山灰内大量的金属和营养元素会随火山灰沉积、一并被保存,这可能导致沉积物中部分元素含量出现异常。



据此,在进行分析前需筛选环境指标,确保所选的

无机地化指标不会受到火山灰自身元素组成的干扰,从而能够准确有效地进行古环境重建。

芦二段沉积期陆源碎屑物质供给有限,主要以外源火山灰和盆内碳酸盐混合沉积为主,长英质矿物来源于火山灰物质脱玻化,可以代表凝灰质物质含量。基于此认识,本研究分析了芦二段细粒混积岩中各种主/微量元素含量与长英质矿物含量(代表火山灰含量)的相关性。若结果显示两者之间相互影响,则意味着这种元素可能很大程度上受到火山灰蚀变的影响,从而不能代表原始地层的沉积信息,不适宜用于进一步的古环境分析;反之,则说明此种元素受火山灰沉降影响较小,可以考虑采用其相关指标进行古环境重建。通过对所有主/微量元素的分析发现,

芦二段细粒混积岩中的Ni、Co、S、P和Ga等元素含量与长英质矿物含量相互影响,说明这些元素可能大部分源于火山灰物质的蚀变和释放,并非原始沉积地层中含有的与沉积环境密切相关的元素,而其他元素受火山灰蚀变的影响较小(图7)。因此,为确保沉积环境重建结果的准确性和可靠性,本研究不采用这些与长英质矿物含量有显著正相关关系的元素及相关指标,旨在去除盆缘火山灰中的元素对无机地化指标产生的干扰。

4.2 碳酸盐内Sr元素异常的影响机制

前人对于湖盆古盐度的重建多会利用元素含量比值Sr/Ba、B/Ga及S/TOC等指标,而对于古气候恢复多利用元素含量比值Sr/Cu、Rb/Sr和C值 $[C=(Fe+Mn+Cr+Ni+V+Co)/(Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)]$ 等指标^[15,36-37]。经第4.1节分析得出,芦二段细粒混积岩中的S、P、Ni、Co和Ga等元素很大程度上受到了火山灰的影响,故B/Ga、S/TOC和C值等指标不适用于古环境的重建。然而,不受火山灰影响的Sr/Ba、Sr/Cu和Rb/Sr等指标中均含有Sr元素,说明其对湖盆古气候和古盐度重建至关重要。芦二段细粒混积岩中的微量元素含量最高的是Sr,平均含量可达1 065.6 $\mu\text{g/g}$,明显高于上地壳的元素丰度值(图4)。由图7a可发现,芦二段长英质矿物含量与Sr元素浓度间存在一定程度的负相关,这间接反映出Sr元素可能与白云石含量密切相关。前人研究表明,Sr²⁺极易于置换白云石或方解石中的Ca²⁺,高碳酸盐矿物含量可能导致Sr元素浓度异常偏高,从而造成碳酸盐内赋存Sr,干扰原始沉积物中的Sr元素浓度^[8,14-15]。另外,火山灰物质中含有丰富的Mg元素(平均含量约为6.5%),可以为白云石化提供足够的Mg²⁺来源,而且咸化湖盆环境极利于碳酸盐矿物发育,这也是芦二段白云石含量较高的主要原因(平均含量可达45.0%),进而造成Sr元素含量异常(图4)。因此,在排除了火山灰的潜在干扰后,本研究还需要分析碳酸盐赋存Sr对芦二段沉积环境重建的影响。

目前,最直接有效的方法是分析Sr元素含量或Sr/Ba值与无机碳含量或CaO含量的相关性,若存在显著正相关,则表明碳酸盐矿物中含有一定量的经置换而赋存下来的Sr元素^[8,14]。通常,细粒沉积岩中CaO含量约为2%~10%,CaO含量超出10%则可能指示碳酸盐矿物的存在^[8,14]。如图8所示,当CaO含量>10%时,大部分样品的CaO含量与Sr/Ba值呈明显正相关。因此,本研究在395个样品中剔除了142个二者之间相互影响的样品,旨在消除碳酸盐中经置换而赋存的Sr元

素的影响,仅使用CaO含量 $\leq 10\%$ 和其他无明显关系的样品进行古环境分析。

4.3 古氧化-还原环境重建及评价体系

近年来,国外学者在探索沉积体系氧化-还原特性方面取得了新进展,提出了一种评估和校正氧化-还原界限的方法^[14,38]。该方法依赖于两种元素指标间的共变趋势,若两指标间呈简单的正向线性关系,即斜率为正,这通常意味着两指标在某一环境下会同步富集,但难以确定其富集的先后顺序(图9a)。然而,当观察到“两段式”关系时,即存在两个斜率显著差异的区间时,便形成了复合共变模式,这揭示了其中一个指标会在某一环境下比另一个指标优先富集(图9b)。据此,较早富集的指标对应的氧化-还原阈值较低,而较晚富集指标的起始点则标志着一个特定的阈值,超过此值,两种指标开始共同反映环境特征^[14,38]。另外,在实际还原环境中,过渡金属元素普遍会发生一定程度的自然富集,使得两种金属元素之间的比例关系可能不如一个金属元素与一个氧化-还原不敏感元素(如Al)之间的比例关系更能准确重建古环境^[14,38-41]。

前人根据水体化学条件、氧化-还原相以及氧化-还原电子对[如NO₃/N₂, MnO₂/Mn²⁺, Re⁴⁺/Re³⁺, NO₃/NO₂, SO₄²⁻/H₂S, Fe³⁺/Fe²⁺, U⁶⁺/U⁴⁺和Mo(O)/Mo(S)]等因素构建了一个具有氧化-还原界限的框架^[38](图8)。其中,Re、U和Mo这3种元素及其对应的离子对尤为重要,因为它们在氧化环境中含量较低,而在还原环境中高度富集^[8,38]。同时,这3种元素的富集分别对应氧化-还原框架中的3种状态(T1:贫氧弱氧化,T2:贫氧弱还原,T3:绝氧),代表不同的氧化-还原条件(图10)。具体而言,Re、U和Mo这3种元素在弱氧化-弱还原条件下开始富集,且富集时的含氧量依次降低。此发现为评估这3种元素的富集程度以及它们与其他指标富集的相关性提供了一个有效的分析手段。为了提高分析结果的准确性,本研究在下面的分析中引用了部分笔者在之前相关研究中的元素数据,以确保数据量充足,减小误差。

芦二段细粒混积岩的Re_{EF}(下标“EF”表示该元素的富集因子)值为3.5~200.1(平均值为44.1),U_{EF}值为0.4~9.9(平均值为2.8),Mo_{EF}值为1.9~73.1(平均值为18.3)(图11),这与处于缺氧环境的黑海和萨尼奇湾相似^[38]。图11显示Re的富集最早,并具有“两段式”特征,在U_{EF}和Mo_{EF}明显增加时Re_{EF}值分别约为15.0和16.0,而当U_{EF}值约为0.7时,Mo的浓度开始显著增加,显示出Mo和U的富集过程几乎同步。因此,

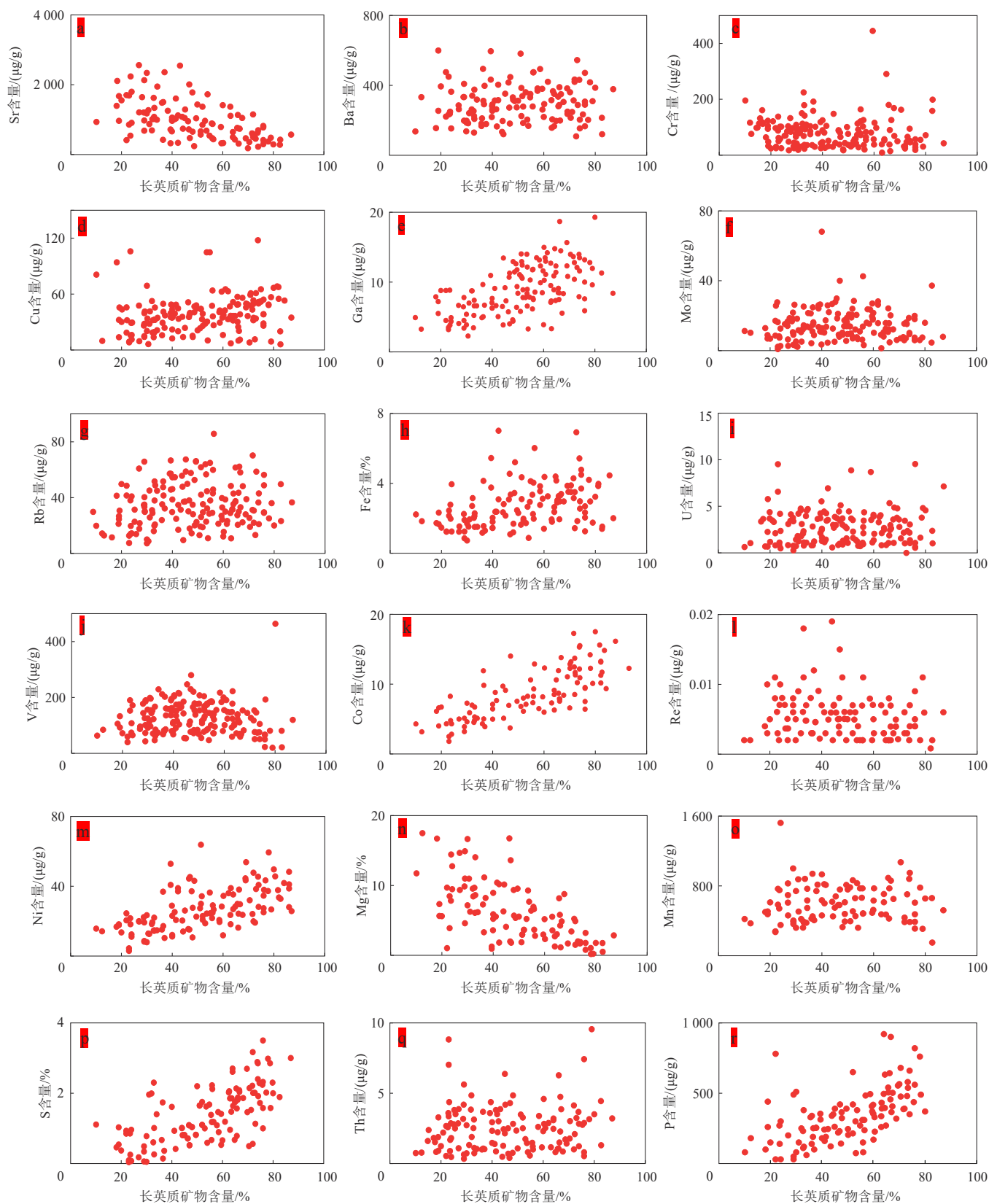


图7 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段细粒混积岩长英质矿物含量与不同类型元素含量交汇图

Fig. 7 Scatter plots of felsic mineral content vs. contents of different elements in the fine-grained mixed deposits in the P_2^2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a—r. 分别为Sr, Ba, Cr, Cu, Ga, Mo, Rb, Fe, U, V, Co, Re, Ni, Mg, Mn, S, Th, P元素含量与长英质矿物(凝灰质物质)含量交汇图

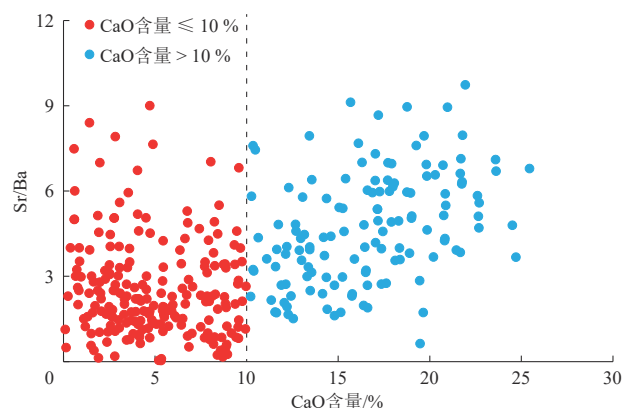


图8 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段细粒混积岩中碳酸盐内置换Sr筛选过程

Fig. 8 Sample screening based on Sr replacement in carbonates in fine-grained mixed deposits in the P_2^2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

根据上述构建的氧化-还原框架,本研究可以利用 Re_{EF} 、 U_{EF} 和 Mo_{EF} 三者之间的关系明确其他指标在不同氧化-还原状态下的阈值。

近年来,元素含量比值 V/Cr 、 U/Th 和 Ni/Co 值以及元素富集因子(如 Mo_{EF} 和 U_{EF})多被用来评价湖相沉积体系的氧化-还原条件,但按照上述要求去除火山灰的影响后,研究区仅可以采用 V/Cr 、 U/Th 、 Mo_{EF} 和 U_{EF} 这4个指标。其中, U/Th 值与 U_{EF} 重合度较大,故本研究只选择对 V/Cr 值进行校正。通过分析 V/Cr 值与 Re_{EF} 、 U_{EF} 和 Mo_{EF} 三者之间的关系发现,当 V/Cr 值约为1.1、1.2和1.8(依次对应T1、T2和T3)时, Re 、 U 和 Mo 开始显著富集(图12a—c),这与前人建立的氧化-还原界限存在一定不同: V/Cr 值小于2代表氧化环境^[42],说明不同地区需要根据实际情况重新评价和校正相应的指

标及阈值。值得注意的是, Cr_{EF} 与 Re_{EF} 、 U_{EF} 和 Mo_{EF} 的关系曲线并未呈现出清晰的“两段式”特征和拐点(图12g—i),而 V_{EF} 与 Re_{EF} 、 U_{EF} 和 Mo_{EF} 之间却具有这样的特征(图12d—f),表明经过校正的 V/Cr 值可用于分析芦二段的氧化-还原条件。此外,这也表明在氧化-还原条件变化时,若两种元素的含量呈同向增、减,则它们的比率可能不适于分析氧化-还原条件的变化。

4.4 有机和无机地球化学协同作用

近来的众多研究指出,要精确重建古环境,需结合多种方法^[48-49]。除无机地球化学指标外,有机地球化学指标也是良好的古环境重建工具。火山灰沉降会影响原始湖盆沉积物的元素组成,但不会对生物标志化合物造成太多影响。然而,有机地球化学指标却存在影响因素复杂和分析精度有限等劣势。因此,本研究挑选参与无机地球化学测试的典型样品进行饱和烃气相色谱-质谱等分析,采用主、微量元素和生物标志化合物分析相结合的方法综合重建火山灰影响下的湖相沉积环境。对表征同一环境的无机(上述筛选出的元素指标)和有机地球化学指标进行相关性检验,若它们展现出明显的相关性,则意味着这两种指标可以辅助使用,否则不宜使用。结果显示,表征古盐度(Sr/Ba)、古气候(Sr/Cu)和古氧化-还原条件(V/Cr 与元素富集因子)的无机地球化学指标与有机地球化学指标[伽马蜡烷指数(该指数通常用来表示古盐度条件,但古盐度与古气候密切相关,二者往往呈现正相关关系,因此也可用该指数表征古气候条件)与姥/植比(Pr/Ph)]之间具有良好的相关性(图13),表明本研究筛选出的无机地球化学指标具有有效性,可以与有机地球化学指标一起用于重建芦二段古环境。

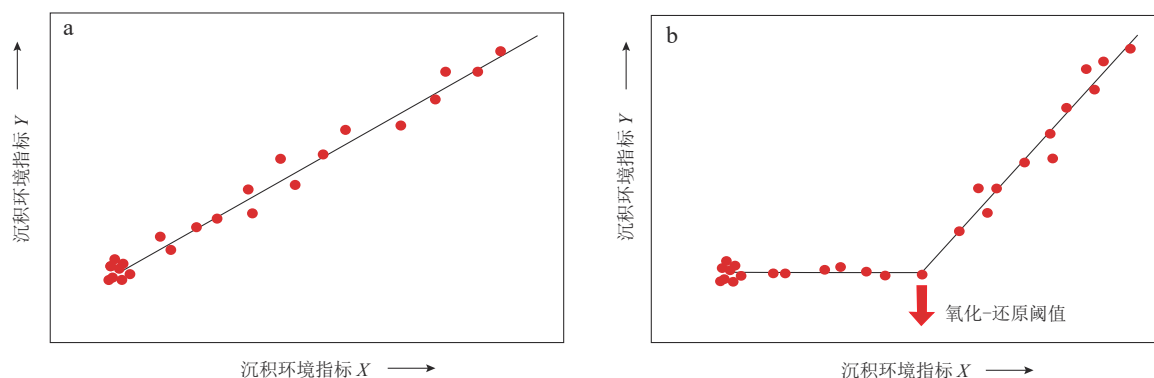


图9 两种沉积环境指标协同共变模式

Fig. 9 Covariation patterns between two indicators of sedimentary environments

a. 两种环境指标呈单一共变趋势,同时富集;b. 两种环境指标呈“两段式”复合共变趋势,X指标优先Y指标富集,两者开始同时富集的起点为特定氧化-还原界限点

E_h	氧化-还原标准	氧化-还原相	浓度/ μM	水体化学条件	Fe类	常用氧化-还原指标						
						Fe_T/Al	$\text{C}_{\text{有机}}/\text{P}$	U/Th	V/Cr	$\text{U}_{\text{自生}}$	Ni/Co	$\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$
1.0	基于沉积学和动物群标准区分氧化-还原相	富氧	> 60	O_2	$\text{Fe}_{\text{HR}}/\text{Fe}_T \leq 0.38$	≤ 0.60	< 50	< 0.75	< 2.00	< 5.00	< 5.00	< 0.46
		含氧	$15 \sim 60$									
0.5	$\text{Re}^{4+}/\text{Re}^{3+}$	(T1) 贫氧弱氧化	$0 \sim 15$	无 O_2 或 H_2S	$\text{Fe}_{\text{HR}}/\text{Fe}_T > 0.38$ 和 $\text{Fe}_{\text{py}}/\text{Fe}_{\text{HR}} \leq 0.80$	≤ 0.60	$50 \sim 100$	$0.75 \sim 1.25$	$2.00 \sim 4.25$	$5.00 \sim 12.00$	$5.00 \sim 7.00$	$0.46 \sim 0.60$
0	$\text{UO}_2(\text{OH})_2/\text{UO}_2$	(T2) 贫氧弱还原										
-0.5	$\text{Mo}(\text{O})/\text{Mo}(\text{S})$	(T3) 绝氧	< 11	H_2S	$\text{Fe}_{\text{py}}/\text{Fe}_{\text{HR}} > 0.80$	> 0.60	> 100	> 1.25	> 4.25	> 12.00	> 7.00	> 0.60

图 10 基于关键氧化-还原电子对和离子含量确定氧化-还原界限值框架(据文献[8,17,35,39-44],有修改)

Fig. 10 Redox threshold framework determined based on key redox couples and ionic contents (modified after references [8,17,35,39-44])

[Mo(O)为含氧钼酸盐;Mo(S)为含硫钼酸盐; Fe_{HR} 为高活性铁; Fe_T 为总铁; Fe_{py} 为黄铁矿。元素和化合物符号代表其含量。]

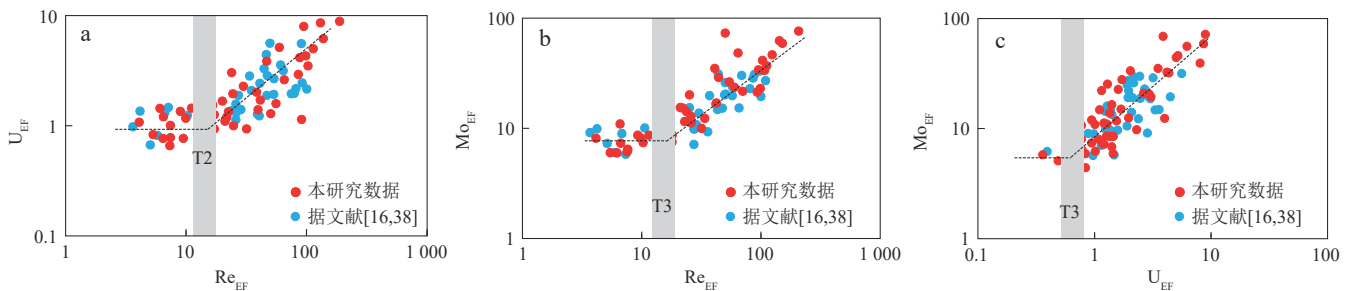


图 11 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段细粒混积岩的 Re_{EF} , Mo_{EF} 和 U_{EF} 值散点图

Fig. 11 Scatter diagrams of the Re_{EF} , Mo_{EF} , and U_{EF} values of the fine-grained mixed deposits in the P_2L^2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a. U_{EF} 与 Re_{EF} 交汇图;b. Mo_{EF} 与 Re_{EF} 交汇图;c. Mo_{EF} 与 U_{EF} 交汇图

5 沉积环境特征及变化规律

5.1 古气候

盆地的沉积过程与古气候条件密切相关,古气候可以影响盆地的物源输入程度、风化强度、古生物类型、水体深度、盐度以及pH值等条件^[5,37]。火山活动可以对古气候产生双重影响,一方面强烈的火山喷发会释放大量的热量和 CO_2 ,导致周围地表温度升高;另一方面火山喷发会携带大量的火山灰和硫酸盐气溶胶,前者会遮挡阳光,防止直射地表,后者会分散平流层的阳光辐射,造成对流层和地表温度下降^[37,49]。因此,明确古气候条件是重建沉积环境的关键。通过分析上述筛选出的古气候指标发现,芦二段细粒混积岩的 Sr/Cu 值介于 $4.50 \sim 155.30$ (平均值为 33.10),有

80%的样品该值远大于 10.00 (Sr/Cu 值范围为 $1.00 \sim 5.00$ 一般代表温暖-湿润的环境, $5.00 \sim 10.00$ 时指示半炎热-半湿润的气候条件,而大于 10.00 则代表炎热-干旱的环境)(图14a); Rb/Sr 值则介于 $0 \sim 0.30$,平均值仅为 0.10 (该值越低,表示气候条件越炎热、干旱)(图14b);伽马蜡烷指数介于 $0.25 \sim 0.75$,平均值为 0.41 (通常该值大于 0.30 代表咸水环境,间接反映古气候条件更加炎热、干旱)(图13)。这些数据均表明,芦二段沉积期整体炎热、干旱,这可能与盆地周边的火山活动密切相关。研究区在二叠纪早、中期进入碰撞后伸展阶段,火山活动频繁,盆地周缘存在大量的火山机构,表明芦二段沉积期火山喷发强烈,此时释放的大量 CO_2 和热量可能会导致研究区气温上升。

5.2 古盐度

古盐度受古气候、湖盆封闭性以及水体深度等因

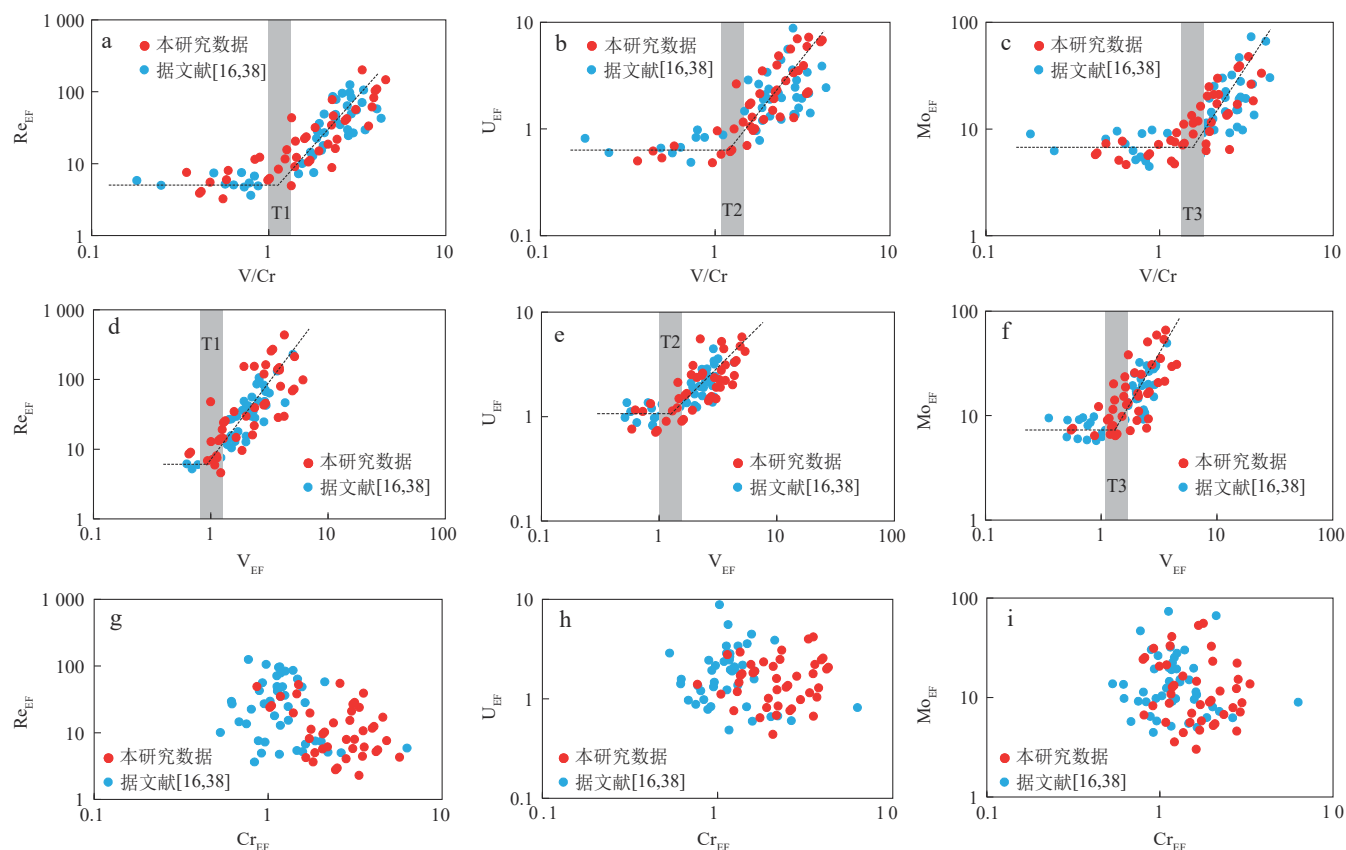


图12 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段细粒混积岩氧化-还原指标 V/Cr , V_{EF} , Cr_{EF} 与 Re_{EF} , U_{EF} , Mo_{EF} 交汇图

Fig. 12 Scatter plots of V/Cr , V_{EF} , and Cr_{EF} vs. Re_{EF} , Mo_{EF} , and U_{EF} of the fine-grained mixed deposits in the P_2^2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a—c. 分别为 V/Cr 与 Re_{EF} , U_{EF} 和 Mo_{EF} 交汇图; d—f. 分别为 V_{EF} 与 Re_{EF} , U_{EF} 和 Mo_{EF} 交汇图; g—i. 分别为 Cr_{EF} 与 Re_{EF} , U_{EF} 和 Mo_{EF} 交汇图

素控制^[15,50]。一般而言,气候炎热干旱时,湖泊更加封闭,盆外水体补给减少,水位下降,盐度随之上升, Sr/Ba 值增大;反之盐度降低, Sr/Ba 值减小。去除火山灰影响后,芦二段细粒混积岩的 Sr/Ba 值约为 0.40 ~ 9.10(平均值为 3.10),有 95% 的样品该值远大于近年来经学者们重新评估校正后的咸水界限(Sr/Ba 值小于 0.20 代表淡水环境,大于 0.50 代表咸水环境,而介于二者之间代表半咸水环境)^[15,50](图 15a);伽马蜡烷指数介于 0.25 ~ 0.75(平均值为 0.41,有 92% 的样品该值大于 0.30)(图 15b),表明芦二段沉积期,研究区湖盆水体的盐度极高,整体达到咸水级别。该古盐度条件与上述分析的古气候条件相互呼应,表明芦二段沉积期炎热干旱,降雨量有限,陆源碎屑物质供给较弱,水体蒸发量大,盐度极高。同时高盐度的水体条件也可能与大量火山灰沉降入湖释放的金属元素有关。另外,以往大部分学者在分析古环境时几乎从未剔除碳酸盐内赋存的 Sr 元素含量的影响,可能导致部分 Sr/Ba 值和 Sr/Cu 值出现异常高的情况,使得分析认为古盐度极高且古气候极其炎热、干旱。例如,尤继元等在未剔

除火山灰和碳酸盐内赋存 Sr 元素影响的情况下对芦二段的沉积环境进行了恢复,利用 B/Ga 值和 Sr/Ba 值对古盐度进行重建,结果显示部分 Sr/Ba 值异常高^[51];王瑞利用 Sr/Cu 值对芦二段古气候进行重建,结果显示部分值远大于 200.00^[52],与本研究剔除碳酸盐赋存 Sr 元素影响后的数值相差较大,说明在碳酸盐含量较高的地区进行 Sr 元素校正是有必要的。

5.3 古氧化-还原条件

古氧化-还原条件是近年来众多学者探讨湖盆有机质富集机理等内容的重要关注点,其受古水深、古盐度以及湖盆水体稳定性等因素控制^[8,39-40]。通过分析上述筛选和校正后的氧化-还原指标发现,芦二段细粒混积岩的 V/Cr 值平均约为 2.70,整体介于 0.30 ~ 7.00(图 16),显著大于本研究校正后的缺氧界限值 1.80,虽然该阈值可能因为样本量有限会有些误差,但反映研究区在该值小于前人确立的固定阈值($V/Cr > 4.25$ 为缺氧环境)时便达到了缺氧条件。如果直接利用未经校正的阈值可能会使得分析结果出现一定误

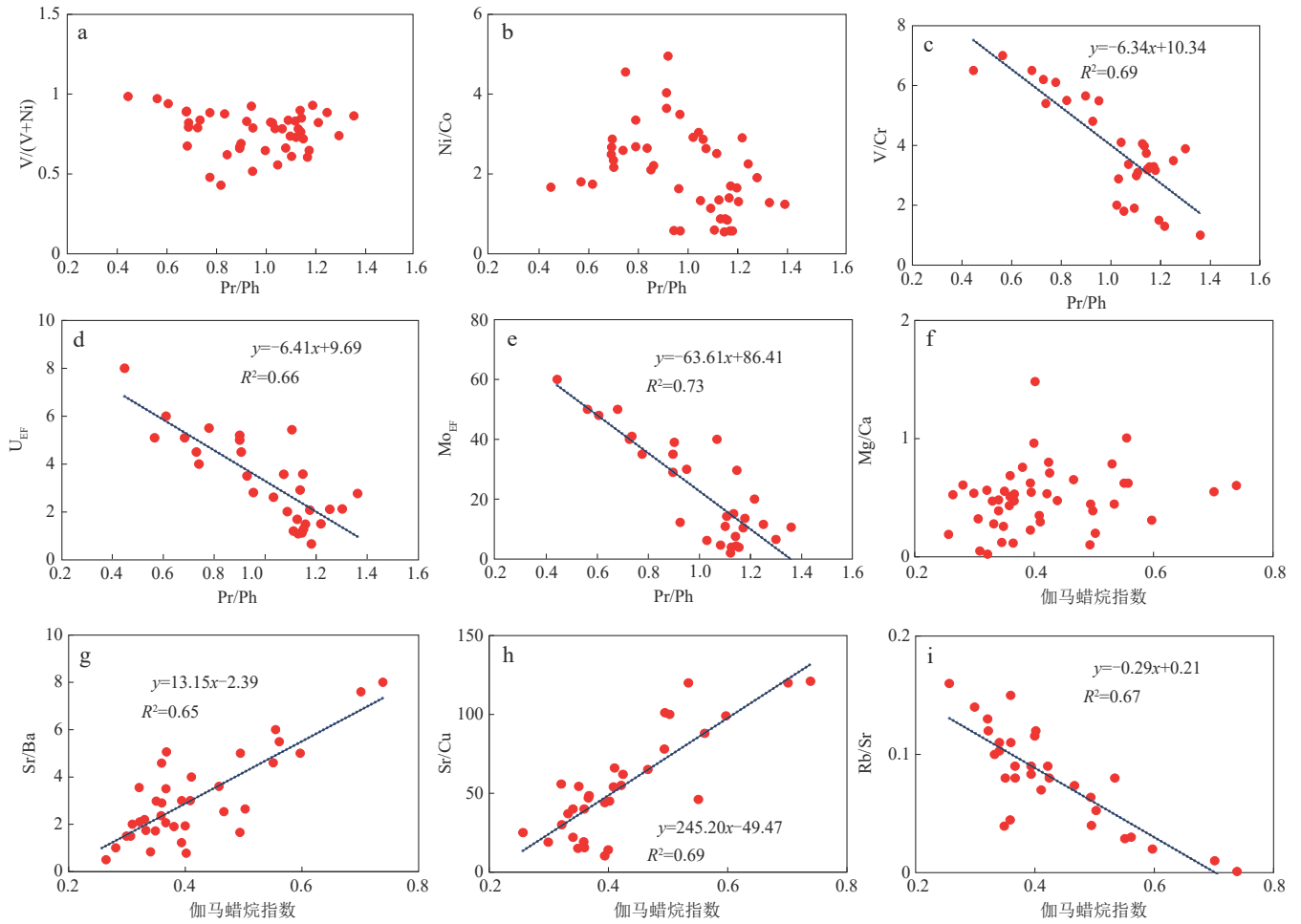


图 13 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段表征不同沉积环境的有机与无机地化指标交汇图

Fig. 13 Scatter plots of organic vs. inorganic geochemical indicators for characterizing different sedimentary environments of the P_2l^2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a, b. 分别为 Pr/Ph 与 V/(V+Ni) 和 Ni/Co 交汇图; c—e. 分别为 Pr/Ph 与 V/Cr, U_{EF} 及 Mo_{EF} 交汇图; f—i. 分别为伽马蜡烷指数与 Mg/Ca, Sr/Ba, Sr/Cu 及 Rb/Sr 交汇图

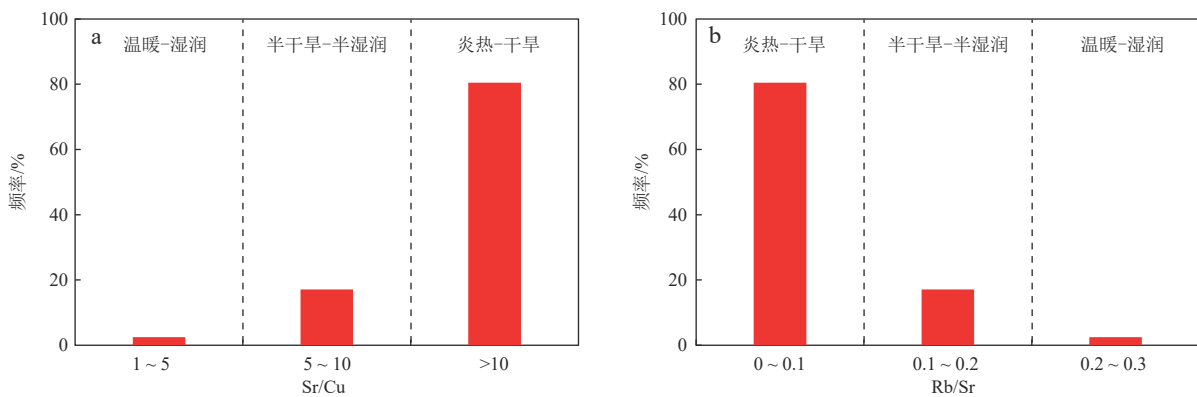


图 14 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段沉积期古气候特征

Fig. 14 Paleoclimate characteristics during the P_2l^2 deposition in the Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a. Sr/Cu 值频率分布直方图, 共 5 口井, 203 个样品; b. Rb/Sr 值频率分布直方图, 共 5 口井, 203 个样品

差,例如王瑞在使用 V/Cr 值对芦二段古氧化-还原条件进行恢复时认为,研究区的 V/Cr 值大部分小于 2.00,说

明水体处于氧化-弱还原环境^[52],这与本研究经过重新校正后发现 V/Cr 值其实大于 1.10 时水体便已经进入弱

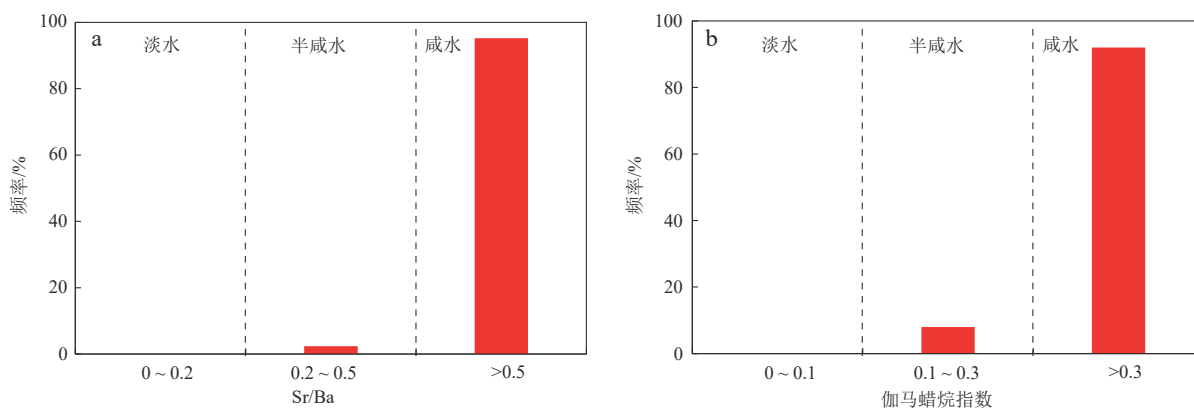


图15 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段沉积期古盐度特征

Fig. 15 Paleosalinity characteristics during the P_2L_2 deposition in the Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a. Sr/Ba值频率分布直方图,共5口井,203个样品;b. 伽马蜡烷指数频率分布直方图,共5口井,51个样品

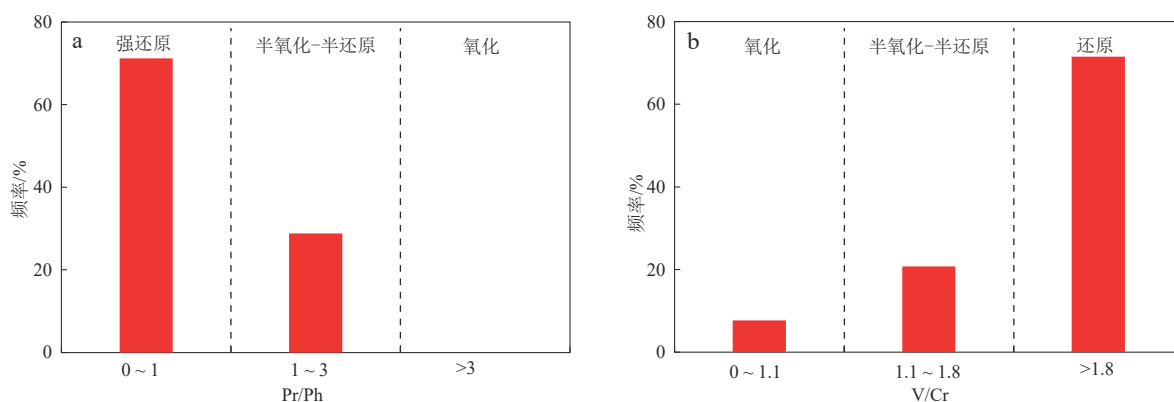


图16 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段沉积期古氧化-还原特征

Fig. 16 Paleoredox characteristics during the P_2L_2 deposition in the Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a. Pr/Ph值频率分布直方图,共5口井,51个样品;b. V/Cr值频率分布直方图,共5口井,203个样品

还原环境的认识存在一定差异。另外,芦二段细粒混积岩的 Re_{EF} 、 U_{EF} 和 Mo_{EF} 值分别介于3.50~200.10(平均值为44.10),0.40~9.90(平均值为2.80)和1.90~73.10(平均值为18.3)(图11),均反映出显著富集的特征,且超过了重新校正后的缺氧阈值;且其Pr/Ph值介于0.31~1.36,平均值为0.87(图16),也说明了研究区湖盆水体的缺氧状态。

另外,芦二段沉积期的缺氧环境也可以通过广泛发育的草莓状黄铁矿的粒径得到证实(图17)。前人研究表明,硫化环境中形成的草莓状黄铁矿的粒径相对较小,而氧化-贫氧环境中形成的草莓状黄铁矿粒径则相对较大,但学界尚未就具体的粒径界限达成一致。例如,Wilkin等根据草莓状黄铁矿粒径的不同,区分了不同水体的氧化-还原环境^[53];Rickard发现粒径介于2.9~10.9 μm 的草莓状黄铁矿主要形成于硫化环境中,而粒径介于3.1~20.9 μm 的草莓状黄铁矿则主要形成于氧化-贫氧环境中^[54];刘钰晨等认为鄂尔多

斯盆地长7段缺氧环境中发育的草莓状黄铁矿平均粒径一般小于8.0 μm ,而平均粒径大于8.0 μm 的草莓状黄铁矿则发育于贫氧环境中^[55]。通过对芦二段26个草莓状黄铁矿粒径的统计发现,其粒径介于3.0~17.0 μm ,平均值约为8.3 μm ,存在部分较大粒径(图17)。因此,与前人的研究成果对比可知,芦二段草莓状黄铁矿的粒径并不大,说明其发育于缺氧-贫氧环境中。

5.4 沉积环境变化规律

芦二段沉积期整体处于炎热干旱的气候条件,湖盆水体盐度高且只有还原性,但处于频繁波动的状态(图18)。结合作者在之前研究中对火山喷发旋回的划分结果^[16],芦二段由底至顶可分为4个小层(小层1—4),对应不同的火山喷发旋回(图18)。从纵向上看,由底部的第1小层至顶部的第4小层,研究区虽然整体处于炎热干旱的气候条件,但程度稍有下降,Sr/

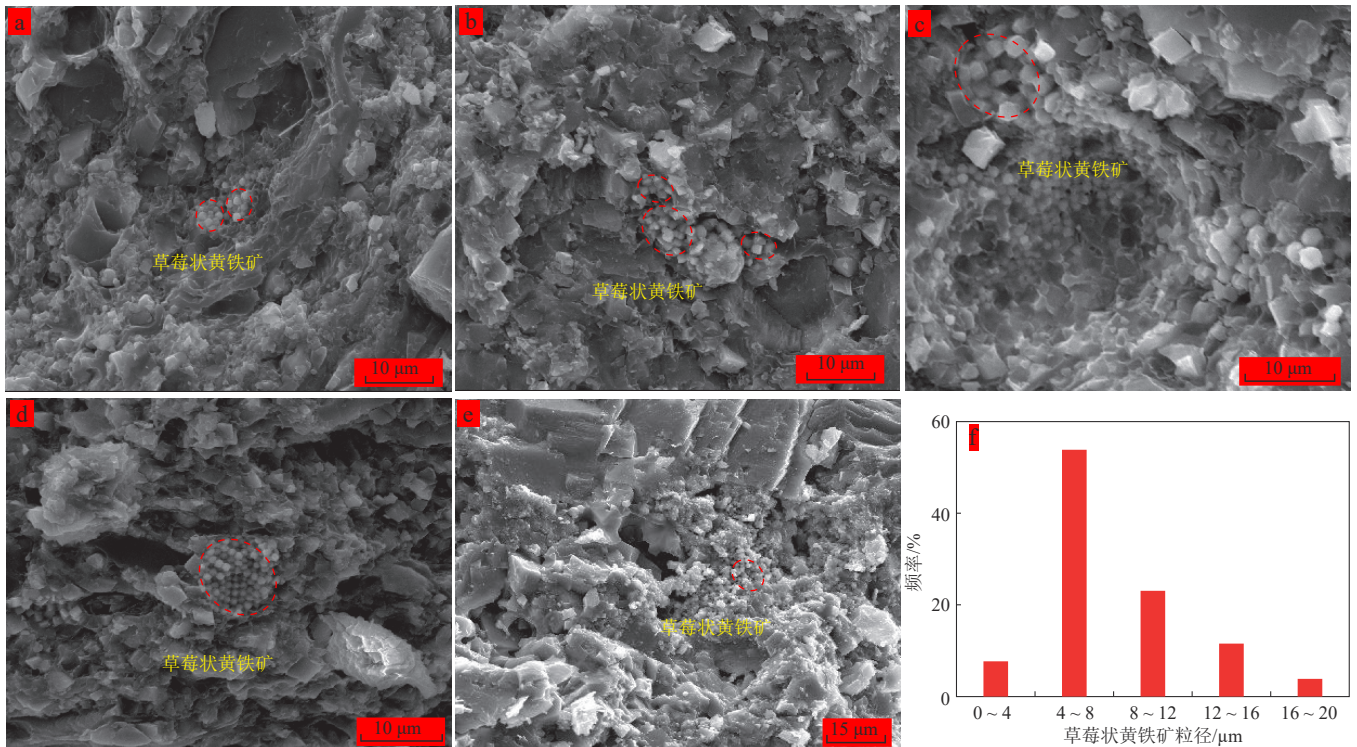


图17 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷芦二段草莓状黄铁矿粒径特征

Fig. 17 Particle size characteristics of pyrite framboids in the P_2^2 , Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

a. LY1井,埋深3 263.26 m,草莓状黄铁矿集合体,扫描电镜照片;b. LY1井,埋深3 276.24 m,多个草莓状黄铁矿集合体,扫描电镜照片;c. LY1井,埋深3 276.26 m,球形草莓状黄铁矿和未聚合草莓状黄铁矿,扫描电镜照片;d. LY1井,埋深3 277.87 m,球形草莓状黄铁矿,扫描电镜照片;e. LY1井,埋深3 354.89 m,球形草莓状黄铁矿和未聚合草莓状黄铁矿,扫描电镜照片;f. 草莓状黄铁矿粒径频率分布直方图

Cu平均值由1—3小层的47.90降至第4小层的25.50(图18)。另外,当盆地周缘火山活动处于强烈喷发期时,研究区的炎热干旱程度相对降低,Sr/Cu和Rb/Sr平均值分别约为23.80和0.08,这可能与大量硫酸盐气溶胶吸收阳光辐射和火山灰遮挡阳光照射有关。相反,当火山活动处于和缓期时,研究区的炎热干旱程度增强,Sr/Cu和Rb/Sr平均值分别约为57.50和0.03。

同时,芦二段的古盐度条件受控于古气候,Sr/Ba和伽马蜡烷指数平均值分别由1—3小层的3.50和0.48降低至第4小层的2.40和0.36,说明古盐度由底至顶也具有逐渐降低的趋势,而且与火山活动响应明显(图18)。在火山活动强烈期,湖盆盐度降低,芦二段细粒混积岩的Sr/Ba和伽马蜡烷指数均值分别减小至2.10和0.31,这主要因为气候炎热程度降低,外界水源间歇性少量供应,水体蒸发量相对减小。反之,在火山活动和缓期,湖盆盐度升高,Sr/Ba和伽马蜡烷指数平均值分别增大至4.80和0.46。另外,古氧化-还原条件也随着古气候和古盐度的变化而变化,V/Cr, Mo_{EF} 和Pr/Ph的平均值分别由1—3小层的2.60,18.20和0.80过渡到第4小层的1.80,12.10和1.00,表明含

氧量由底至顶逐渐增加(图18)。每一个火山喷发旋回过程中,水体的氧化性均相对增强,推测火山活动由强至弱时,湖盆的盐度和气候的干旱程度均呈增强趋势,水体蒸发量增大、深度相对降低,进而水体含氧量增加。

因此,芦二段沉积环境的变化规律与火山活动密切相关,二者共同控制混合沉积过程(图5,图18)。在火山活动和缓时期,炎热、干旱的气候和盐度极高的水体极利于碳酸盐的沉淀,而且由盆地中心向斜坡和盆地边缘过渡,水体逐渐变浅,强烈的蒸发导致碳酸盐矿物含量逐渐增加,白云岩占比逐渐增大(图5,图18)。相反,在火山活动强烈喷发时期,气候的炎热、干旱程度和水体盐度均相对降低,导致湖盆整体以白云质凝灰岩沉积为主,但由中心向盆缘过渡,碳酸盐含量仍相对增加(图5,图18),说明盆缘浅水区虽然也属于混合沉积区,但也受水体盐度、蒸发条件和深度等环境因素的影响。

6 结论

1) 芦二段细粒混积岩主要由两大类矿物组成,组

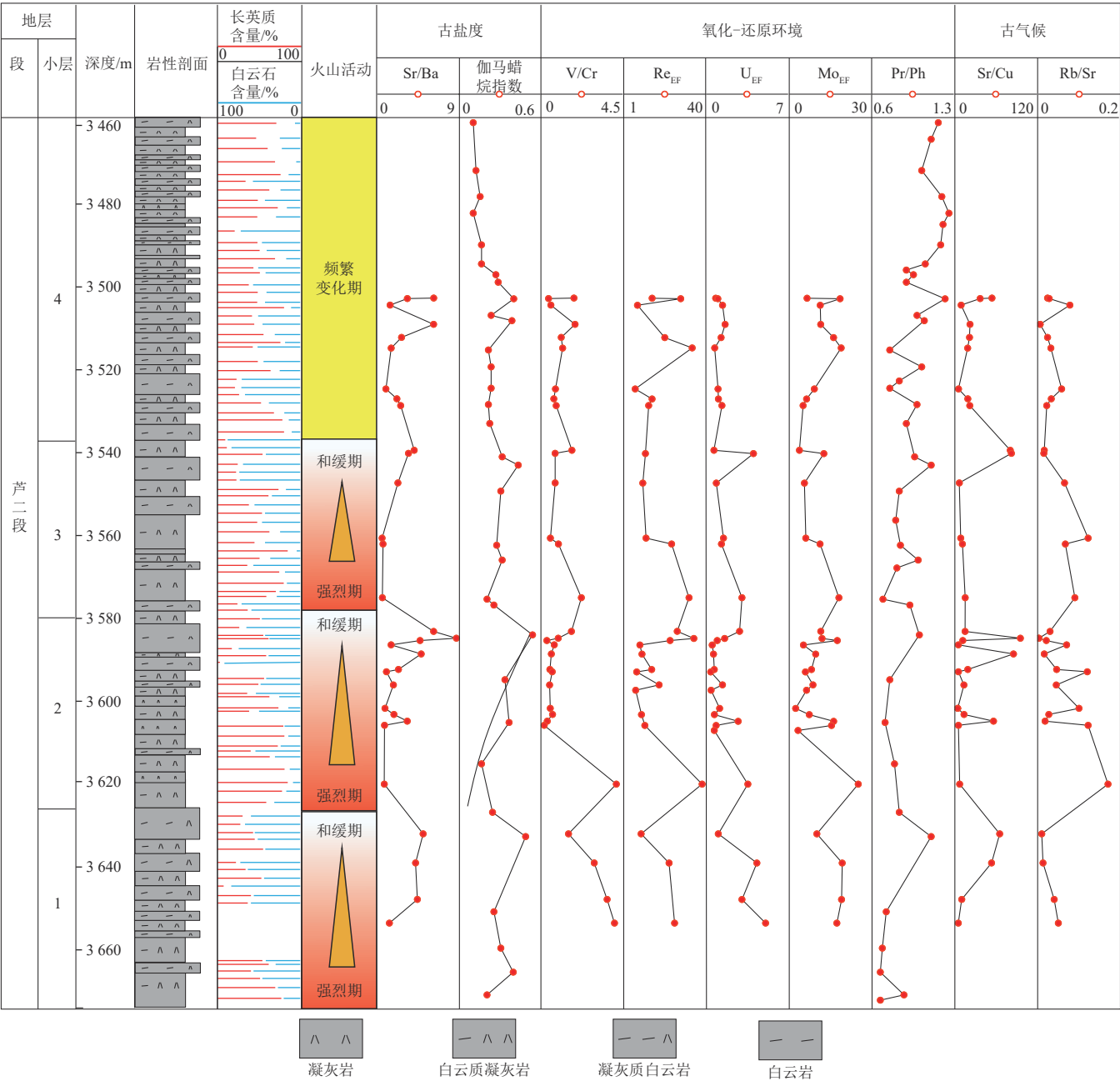


图 18 三塘湖盆地条湖-马朗凹陷 ML1 井芦二段沉积环境特征

Fig. 18 Characteristics of the P₂L₂ sedimentary environment in well ML1, Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin

分特殊,属于凝灰质物质和碳酸盐两组分高度混杂沉积形成,可划分为4大类岩性。该混合沉积过程与常规混合沉积成因类型明显不同,可定义为广义相缘渐变混合沉积成因,其沉积过程受控于火山喷发期次和沉积环境变迁。

2) 大量火山灰物质在经过早期入水溶解和中、晚期脱玻化及有机酸溶蚀等蚀变作用影响下,与孔隙流体进行了持续性的物质交换,导致芦二段细粒混积岩中的Ni,Co,S,P和Ga等元素含量异常,使得这些元素无法反映原始沉积环境信息。

3) 芦二段沉积期气候炎热、干旱,水体盐度高、还原性强,火山活动对芦二段沉积环境起到了明显的调控作用。由底至顶,芦二段气候炎热、干旱程度降低,水体盐度减小、含氧量增加。当火山由强烈喷发期向间歇期过渡时,气候炎热、干旱程度增强,水体盐度增高、含氧量增加。

参 考 文 献

[1] 曲长胜,邱隆伟,杨勇强,等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古湖泊学意义[J]. 地质学报, 2017, 91

- (3): 605–616.
- QU Changsheng, QIU Longwei, YANG Yongqiang, et al. Carbon and oxygen isotope compositions of carbonatic rock from Permian Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, NW China and their paleolimnological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(3): 605–616.
- [2] LIU Bo, BECHTEL A, GROSS D, et al. Middle Permian environmental changes and shale oil potential evidenced by high-resolution organic petrology, geochemistry and mineral composition of the sediments in the Santanghu Basin, northwest China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 185: 119–137.
- [3] 何文渊, 蒙启安, 付秀丽, 等. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩沉积环境特征及其有机质富集机理[J]. *沉积学报*, 2024, 42(5): 1799–1816.
- HE Wenyuan, MENG Qi'an, FU Xiuli, et al. Geochemical study of the sedimentary environment and its organic matter enrichment mechanism in Qingshankou Formation shale, Gulong Sag, Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1799–1816.
- [4] ALGEO T J, MAYNARD J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems[J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3/4): 289–318.
- [5] SHEN Jun, ALGEO T J, HU Qing, et al. Volcanism in South China during the Late Permian and its relationship to marine ecosystem and environmental changes[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 105: 121–134.
- [6] 张恒, 陈亚军, 伍宏美, 等. 火山喷发间歇期沉积岩层古沉积环境的地球化学示踪与判别[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(5): 1417–1436.
- ZHANG Huan, CHEN Yajun, WU Hongmei, et al. Geochemical tracing and discrimination of paleosedimentary environment of sedimentary rock intercalation during volcanic eruption intervals[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(5): 1417–1436.
- [7] BRUMSACK H J. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 232(2/4): 344–361.
- [8] WEI Wei, ALGEO T J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 341–366.
- [9] XU Shengchuan, HU Huabin, ZHANG Pu, et al. Major and trace elements in mid-Eocene lacustrine oil shales of the Fushun Basin, NE China: Concentration features and paleolimnological implications[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 121: 104610.
- [10] 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段异常高有机质沉积富集因素[J]. *石油学报*, 2022, 43(11): 1520–1541.
- LIU Hanlin, ZOU Caineng, QIU Zhen, et al. Sedimentary enrichment factors of extraordinarily high organic matter in the sub-member 3 of Member 7 of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(11): 1520–1541.
- [11] 刘全有, 李鹏, 金之钧, 等. 火山活动对海相和淡水湖相页岩形成的影响[J]. *地球化学*, 2022, 51(5): 556–569.
- LIU Quanyou, LI Peng, JIN Zhijun, et al. Effect of volcanic activity on the formation of marine shale and freshwater lacustrine shale[J]. *Geochimica*, 2022, 51(5): 556–569.
- [12] 赵喆, 白斌, 刘畅, 等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 327–340.
- ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 327–340.
- [13] 邓远, 陈世悦, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段细粒沉积岩形成机理与环境演化[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 811–823, 890.
- DENG Yuan, CHEN Shiyue, PU Xiugang, et al. Formation mechanism and environmental evolution of fine-grained sedimentary rocks from the second member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 811–823, 890.
- [14] ALGEO T J, LI Chao. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 8–26.
- [15] 魏巍, ALGEO T J, 陆永潮, 等. 古盐度指标与渤海湾盆地古近系海侵事件初探[J]. *沉积学报*, 2021, 39(3): 571–592.
- WEI Wei, ALGEO T J, LU Yongchao, et al. Paleosalinity proxies and marine incursions into the Paleogene Bohai Bay Basin lake system, northeastern China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(3): 571–592.
- [16] PAN Yongshuai, HUANG Zhilong, LI Tianjun, et al. Environmental response to volcanic activity and its effect on organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation of the Malang Sag, Santanghu Basin, northwest China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 560: 110024.
- [17] 潘永帅. 火山灰影响下咸化湖盆混积岩特征与优质储层形成机理——以三塘湖盆地芦苇沟组为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- PAN Yongshuai. Characteristics of mixed rocks and formation mechanism of high-quality reservoir in saline lacustrine basin affected by volcanic ash: A case study of the Lucaogou Formation in Santanghu Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [18] 刘艳. 三塘湖盆地构造演化及其与油气的关系[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010: 1–66.
- LIU Yan. The tectonic evolution in the Santanghu Basin and its relationship to oil and gas[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2010: 1–66.
- [19] 张军东. 三塘湖盆地石炭—二叠系地层分布特征研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2018: 1–56.
- ZHANG Jundong. Study on the distribution characteristics of Carboniferous-Permian in Santanghu Basin[D]. Xi'an: Xi'an

- Shiyou University, 2018: 1-56.
- [20] 范谭广, 徐雄飞, 范亮, 等. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组页岩油地质特征与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 125-136.
- FAN Tanguang, XU Xiongfei, FAN Liang, et al. Geological characteristics and exploration prospect of shale oil in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 125-136.
- [21] 柳波, 吕延防, 孟元林, 等. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义——以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 598-607.
- LIU Bo, LYU Yanfang, MENG Yuanlin, et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: A case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 598-607.
- [22] MA Jian, HUANG Zhilong, LIANG Shijun, et al. Geochemical and tight reservoir characteristics of sedimentary organic-matter-bearing tuff from the Permian Tiaohu Formation in the Santanghu Basin, Northwest China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 73: 405-418.
- [23] 陈旋, 刘俊田, 龙飞, 等. 三塘湖盆地二叠系凝灰岩致密油勘探开发实践及认识[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 771-780.
- CHEN Xuan, LIU Juntian, LONG Fei, et al. Practical experience and understanding of exploration and development of Permian tight tuff reservoir in the Santanghu Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 771-780.
- [24] 支东明, 李建忠, 周志超, 等. 三塘湖盆地油气勘探开发新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 115-132.
- ZHI Dongming, LI Jianzhong, ZHOU Zhichao, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration and development in Santanghu Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 115-132.
- [25] 陈旋, 刘小琦, 王雪纯, 等. 三塘湖盆地芦草沟组页岩油储层形成机理及分布特征[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(8): 1180-1189.
- CHEN Xuan, LIU Xiaoqi, WANG Xuechun, et al. Formation mechanism and distribution characteristics of Lucaogou shale oil reservoir in Santanghu Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(8): 1180-1189.
- [26] MOUNT J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments [J]. Geology, 1984, 12(7): 432-435.
- [27] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 31-34.
- ZHANG Xionghua. Classification and origin of mixed sedimentite [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2000, 19(4): 31-34.
- [28] 沙庆安. 混合沉积和混积岩的讨论[J]. 古地理论, 2001, 3(3): 63-66.
- SHA Qingan. Discussion on mixing deposit and Hunji rock [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2001, 3(3): 63-66.
- [29] 徐伟, 杜晓峰, 黄晓波, 等. 混合沉积研究进展与关键问题[J]. 沉积学报, 2019, 37(2): 225-238.
- XU Wei, DU Xiaofeng, HUANG Xiaobo, et al. Research advances and critical issues of "mixed siliciclastic and carbonate sediments" [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(2): 225-238.
- [30] 朱筱敏, 王晓琳, 张美洲, 等. 中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 873-892.
- ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, ZHANG Meizhou, et al. Sedimentary environments and lithofacies characteristics of fine-grained sediments in typical continental basins in China [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 873-892.
- [31] 蒲秀刚, 董姜畅, 柴公权, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段页岩高丰度有机质富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 696-709.
- PU Xiugang, DONG Jiangchang, CHAI Gongquan, et al. Enrichment model of high-abundance organic matter in shales in the 2nd member of the Paleogene Kongdian Formation, Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 696-709.
- [32] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 931-939.
- DONG Guiyu, CHEN Hongde, HE Youbin, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 931-939.
- [33] 李泉泉, 鲍志东, 肖毓祥, 等. 混合沉积研究进展与展望[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 153-167.
- LI Quanquan, BAO Zhidong, XIAO Yuxiang, et al. Research advances and prospect of mixed deposition [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 153-167.
- [34] 李天军. 胜北洼陷七台台组混积岩致密储层成因机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- LI Tianjun. A study on the genetic mechanism to mixed siliciclastic-carbonate rock tight reservoir of the Qiketai Formation in the Shengbei Sag [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [35] 周家全, 王越, 宋子怡, 等. 准噶尔盆地博格达地区中二叠统芦草沟组热液硅质结核特征及页岩油意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 789-800.
- ZHOU Jiaquan, WANG Yue, SONG Ziyi, et al. Characterizing hydrothermal siliceous nodules to guide shale oil exploration in the Middle Permian Lucaogou Formation, Bogda area, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 789-800.
- [36] LIU Bo, SONG Yu, ZHU Kai, et al. Mineralogy and element geochemistry of salinized lacustrine organic-rich shale in the Middle Permian Santanghu Basin: Implications for paleoenvironment, provenance, tectonic setting and shale oil potential [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 120: 104569.

- [37] 曲长胜, 邱隆伟, 杨勇强, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组火山活动的环境响应[J]. 地震地质, 2019, 41(3): 789–802.
- QU Changsheng, QIU Longwei, YANG Yongqiang, et al. Environmental response of the Permian volcanism in Lucaogou Formation in Jimsar sag, Junggar Basin, northwest China [J]. Seismology and Geology, 2019, 41(3): 789–802.
- [38] ALGEO T J, LIU Jiangsi. A re-assessment of elemental proxies for paleoredox analysis [J]. Chemical Geology, 2020, 540: 119549.
- [39] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12–32.
- [40] ALGEO T J, TRIBOVILLARD N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation [J]. Chemical Geology, 2009, 268(3/4): 211–225.
- [41] PAN Yongshuai, HUANG Zhilong, GUO Xiaobo, et al. A re-assessment and calibration of redox thresholds in the Permian Lucaogou Formation of the Malang Sag, Santanghu Basin, Northwest China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 135: 105406.
- [42] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/4): 111–129.
- [43] MILLERO F J, YAO Wensheng, AICHER J. The speciation of Fe (II) and Fe (III) in natural waters [J]. Marine Chemistry, 1995, 50(1/4): 21–39.
- [44] MORFORD J L, EMERSON S. The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(11/12): 1735–1750.
- [45] ERICKSON B E, HELZ G R. Molybdenum (VI) speciation in sulfidic waters: Stability and lability of thiomolybdates [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(7): 1149–1158.
- [46] LYONS T W, SEVERMANN S. A critical look at iron paleoredox proxies: New insights from modern euxinic marine basins [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(23): 5698–5722.
- [47] POULTON S W, CANFIELD D E. Ferruginous conditions: A dominant feature of the ocean through Earth's history [J]. Elements, 2011, 7(2): 107–112.
- [48] KAMO S L, CZAMANSKE G K, AMELIN Yuri, et al. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 214(1/2): 75–91.
- [49] ZHANG Kun, LIU Rong, LIU Zhaojun, et al. Influence of volcanic and hydrothermal activity on organic matter enrichment in the Upper Triassic Yanchang Formation, southern Ordos Basin, Central China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 112: 104059.
- [50] ALGEO T J, LYONS T W. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions [J]. Paleoceanography, 2006, 21(1): 1–23.
- [51] 尤继元. 三塘湖盆地中二叠世沉积相及沉积环境研究[D]. 西安: 西北大学, 2011.
- YOU Jiyuan. Study on sedimentary facies and sedimentary environment in Mid-Permian, Santanghu Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [52] 王瑞. 三塘湖盆地二叠系优质烃源岩形成特征与发育模式[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- WANG Rui. Formation characteristics and development model of high quality Permian source rocks in Santanghu Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.
- [53] WILKIN R T, BARNES H L, BRANTLEY S L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(20): 3897–3912.
- [54] RICKARD D. Sedimentary pyrite framboid size-frequency distributions: A meta-analysis [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 522: 62–75.
- [55] 刘钰晨, 赵卫卫, 高剑波, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长7段泥页岩黄铁矿成因及地质意义[J]. 断块油气田, 2024, 31(6): 978–984.
- LIU Yuchen, ZHAO Weiwei, GAO Jianbo, et al. Genesis and geological significance of shale pyrite in Chang 7 member of southeastern Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2024, 31(6): 978–984.

(编辑 张 晟)