



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308487

引用格式:张启燕,葛天助,刘晓,等.下扬子地区中上二叠系泥页岩元素分布特征及指示意义[J].科学技术与工程,2025,25(4):1349-1358.

Zhang Qiyang, Ge Tianzhu, Liu Xiao, et al. Distribution characteristics and indicative significance of elements in Middle-Upper Permian Shale in Lower Yangtze Region[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1349-1358.

下扬子地区中上二叠系泥页岩元素分布特征及指示意义

张启燕,葛天助,刘晓*,高卿楠,史维鑫

(自然资源实物地质资料中心,北京 100083)

摘要 下扬子地区中上二叠统泥页岩是区域重要的烃源岩,但以往对于其不同沉积相的元素特征研究还有所欠缺。本次对下扬子地区港地 1 井中上二叠系泥页岩岩心进行连续 X 射线荧光分析(X-ray fluorescence, XRF)元素扫描,分析中上二叠系地层 Si、Al、Ca、Fe 等主量元素和 Sr、Rb、Ti 等微量元素含量及其比值的变化规律,并结合样品矿物成分分析,讨论沉积环境演化特征。结果显示:垂向上对陆源沉积具有较强指示意义的 Al、Ti、Si、Rb 等元素具有较高-高-低的变化规律,而指示海相沉积的 Ca、Sr 等元素主要集中在上部的大隆组,其他层位含量较低。元素比值具有一定规律,其中 Rb/Sr、Ba/Sr 呈现低-高-低的变化趋势,Al/(Al+Fe+Mn) 比值最大值为 0.8,最小值为 0.4,平均值为 0.71,普遍大于 0.6,指示生物成因为重要的来源。中上二叠统整体属于过渡相-海相的还原环境,从下而上沉积环境从深水盆地相-深水陆棚相-海陆过渡相-浅水陆棚相变化,期间水体从较深-较浅-较深的整体变化趋势。其中孤峰组初期为深水盆地相,随后逐步进入到深水陆棚相,龙潭组以海陆过渡相为主。沉积时期相对海平面变化比较频繁,深水期岩性以自沉积的灰岩为主,对应元素 Ca 含量较高,浅水期则主要为浅灰色泥页岩沉积,对应的主要元素则变化为 Si、Al。而大隆组海平面发生短期沉降之后水体逐步加深,以陆棚沉积为主。

关键词 沉积环境; X 射线荧光分析(XRF); 元素分布; 中上二叠系; 下扬子地区

中图法分类号 P534.46;

文献标志码 A

Distribution Characteristics and Indicative Significance of Elements in Middle-Upper Permian Shale in Lower Yangtze Region

ZHANG Qi-yan, GE Tian-zhu, LIU Xiao*, GAO Qing-nan, SHI Wei-xin

(Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

[Abstract] The shale of Middle-Upper Permian in the Lower Yangtze area is an important source rock in the region, but the research on the elemental characteristics of different sedimentary facies is still lacking in the past. Continuous X-ray fluorescence (XRF) element scanning was performed on the shale core of the Middle-Upper Permian in Well Gangdi 1 in the Lower Yangtze Region. The contents of main elements such as Si, Al, Ca, Fe and trace elements such as Sr, Rb, Ti and their ratios in the middle and upper Permian strata were analyzed, and the evolution characteristics of sedimentary environment were discussed in combination with the quantitative analysis of mineral composition of samples. The results show that the elements such as Al, Ti, Si and Rb, which have strong indicative significance for terrestrial deposition, have a high-high-low variation in the vertical direction. The Ca, Sr and other elements indicating marine deposits are mainly concentrated in the upper Dalong Formation, and the content of other layers is low, and there are abnormal values in some areas. The ratio of element content has a certain rule, among which Rb/Sr and Ba/Sr show a low-high-low trend. The maximum value of Al/(Al+Fe+Mn) ratio is 0.8, the minimum value is 0.4, and the average value is 0.71, which is generally greater than 0.6, indicating an important source of biogenesis. The Middle-Upper Permian belongs to the transitional-marine reduction environment. From bottom to top, the sedimentary environment changes from deep-water basin facies to deep-water shelf facies to sea-land transition facies to shallow-water shelf facies. During this period, the water body changes from deep-shallow-deep. Among them, the early stage of the Gufeng Formation is the deep-water basin phase, and then gradually enters the deep-water shelf phase. The Longtan Formation is dominated by the sea-land transition phase, and the relative sea level changes frequently during the sedimentary period. In the deep-water period, the lithology is dominated by self-deposited limestone, and the corresponding

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2024-11-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20230601); 科技基础资源调查专项(2022FY101802)

第一作者: 张启燕(1988—), 女, 汉族, 青海西宁人, 硕士, 高级工程师。研究方向: 岩心数字化技术与应用。E-mail: zqy25105@163.com。

* 通信作者: 刘晓(1984—), 男, 汉族, 山东威海人, 硕士, 高级工程师。研究方向: 石油地质及岩心数字化应用。E-mail: sea_251@163.com。

element Ca content is high. In the shallow water period, it is mainly light gray mud shale deposition, and the corresponding main elements change to Si and Al. After the short-term subsidence of the sea level in the Dalong Formation, the water body gradually deepened, dominated by continental shelf deposition.

[**Keywords**] sedimentary environment; X-ray fluorescence(XRF); element distribution; Middle-Upper Permian; Lower Yangzi Region

X 射线荧光分析(X-ray fluorescence, XRF)是通过接收样品由于激发源而发生电子跃迁产生的二次 X 射线,分析特征荧光 X 射线光谱可以定性的分析元素的种类,并且利用射线强度和对应元素的浓度关系,进行定量分析所含元素的含量^[1]。该方法能快速、无损获取样品表面一定深度元素成分及含量,具有测试灵活、分辨率高、分析简单、能进行多元素同时分析等优点^[2-3]。

利用 XRF 仪能够沿岩心原位方向,按一定间距逐点扫描岩心表面,并实时记录其 XRF 能谱图,通过分析获取每个测量点的主微量元素的成分和含量,从而得到钻井纵向各元素含量随深度的变化,并通过多元素组合分析地层变化。通过具有指示意义的元素的含量及比值变化,推断纵向地层沉积相等方面的信息^[4],进而研究当时地球化学特征及环境的变化情况,重建其古环境或古气候模型^[5-6],该方法在海洋、黑色岩系、湖泊等沉积环境研究较多^[7-9],效果良好。研究表明,S 和 Ca 可以指示沉积环境中硫酸盐和碳酸岩的存在,Si、Al、K、Ti 等含量变化一般与陆缘碎屑输入有关,Si 与沉积地层中粗碎屑岩性有关,K 和 Fe 元素与黏土质地层相关,而 Ti 元素与还原环境中泥质沉积有关^[10]。元素之间的比值对沉积环境也具有指示意义^[11],其中,Zr、Sr、Rb 元素存在状态的差异指示了沉积环境变化,Zr/Rb 比值可以指示沉积环境水动力变化,比值越大说明水动力越大,沉积物粒度越大,反之说明沉积环境平稳,小颗粒沉积物沉积稳定。Rb/Sr 比对于风化作用和气候变化具有指示意义,比值越小说明该地区风化作用加强,气候暖湿^[12-13]。

中国扬子地区的古生界海相地层在页岩气勘探方面潜力巨大,其中下扬子地区由于构造演化和沉积特征复杂,但该地区具有沉积厚度大,分布广,且发育良好的烃源岩,尤其在二叠统获得了良好的油气显示^[14],其中二叠系孤峰组的灰黑色硅质页岩(碳质泥岩)至大隆组黑色泥岩有机碳总量(total organic carbon, TOC)在 1.9%~3.0%,有机质成熟度(R_o)介于 1.0%~3.0%,具有形成页岩气良好的物质基础,是勘探的有利层位^[15-17]。沉积环境对于生成页岩气的地层矿物成分、有机质及其含量等具有重要影响,其中有利于页岩形成的是缺氧的沉积环境,且页岩有机质发育受沉积环境的影响和控制^[18],页岩为主的地层通常发育在水体

较深的半深湖-深湖相^[19]。鉴于此,本次研究主要通过 XRF 对港地 1 井二叠系泥页岩地层进行扫描,获取二叠系地层各元素含量的变化信息,为二叠系不同沉积地层岩性识别提供基础数据,总结不同沉积地层中各元素含量差异和富集规律,分析二叠系泥页岩地层沉积环境,为下一步研究提供数据支撑。

1 研究区地质概况

下扬子地块大地构造位置处于扬子板块东段,在北西方向以连云港-黄梅-郟庐断裂为界与华北板块相邻,南东方向以绍兴-江山断裂为界与华南板块相接,总体呈东南窄、东北宽以喇叭形向东北方向伸展^[20]。根据最新大地构造划分(图 1),又将其分为下扬子(苏皖)前陆盆地、下扬子被动陆缘、江南古岛弧和怀玉山-天目山被动陆缘盆地 4 个三级构造单元。下扬子地区经历了复杂的构造演化,是一个多期构造改造和叠加的叠合盆地^[21],从震旦纪到中三叠世,下扬子地区整体上处于海相沉积环境,纵向主要发育了下寒武统、晚奥陶统-早志留统和中-上二叠统三套海相黑色泥岩岩系,其中龙潭组为海陆过渡相沉积,中三叠世后,下扬子区海相沉积结束^[22]。

2 技术方法及样品介绍

2.1 X 射线荧光分析技术

本次使用的是奥林巴斯生产的 Vanta 系列手持式 X 射线荧光分析仪,该仪器具有便于携带,灵活原位无损测试、快读分析多元素及元素组合等优点^[23],可以测量元素周期表上从铝(Al_{13})到铀(U_{92})的元素,激发 X 射线光束窗口为直径大小为 0.5 mm,带 4 瓦特铑(Rh)阳极射线管,5~200 μA ,激发功率为 8~50 kV,内置高分辨率硅漂移 SDD 探测器,矿石模式元素 Al、Si、Ca、S、P、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Mo、Ag、Cd、Sn、Sb、Cl、K、W、Hg、Pb、Bi、Th、U。本次采用地球化学(双光束)模式,激发源为铑(Rh)和钨(W),光束 1 和光束 2 的最小检测时间和最大检测时间分别为 1 s 和 90 s。分辨率为 135.281~135.316。斜率为 0.02。偏移 -0.024 4~0.025 3。计数使用基本参数算法,自动对元素之间的影响进行校正(图 2)。

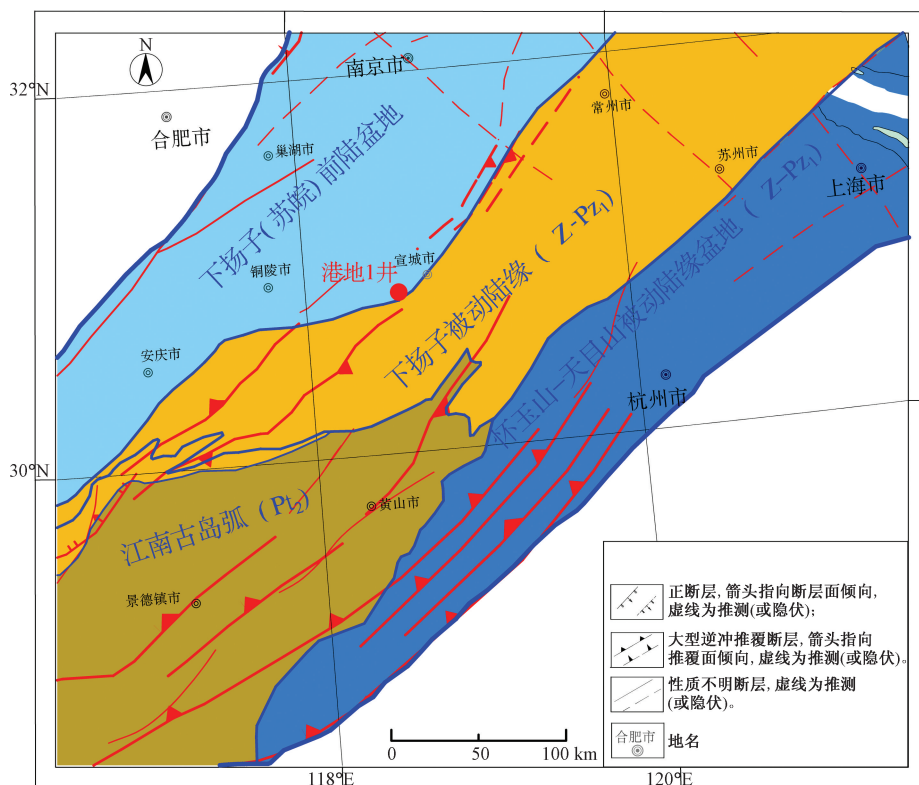


图1 下扬子地区构造单元

Fig. 1 Structural units in the Lower Yangtze Region



图2 XRF 仪器测试岩心

Fig. 2 XRF instrument test core schematic diagram

2.2 测试样品介绍

港地1井位于皖南-苏南凹陷,设计井深度为1500 m。岩心长1344 m(顶107.7 m,底1502 m),岩心获取率为96.4%。整体岩心缺失约51 m,主要集中在岩心初始部分。钻遇地层包括三叠系扁担山组、龙山组和殷坑组、二叠系大隆组、龙潭组、孤峰组、栖霞组和船山组以及下覆石炭系黄龙组(未钻穿)^[24],全井段岩心保存状况基本完整,二叠系大隆组受岩性、风化等因素影响,破碎较为严重。本

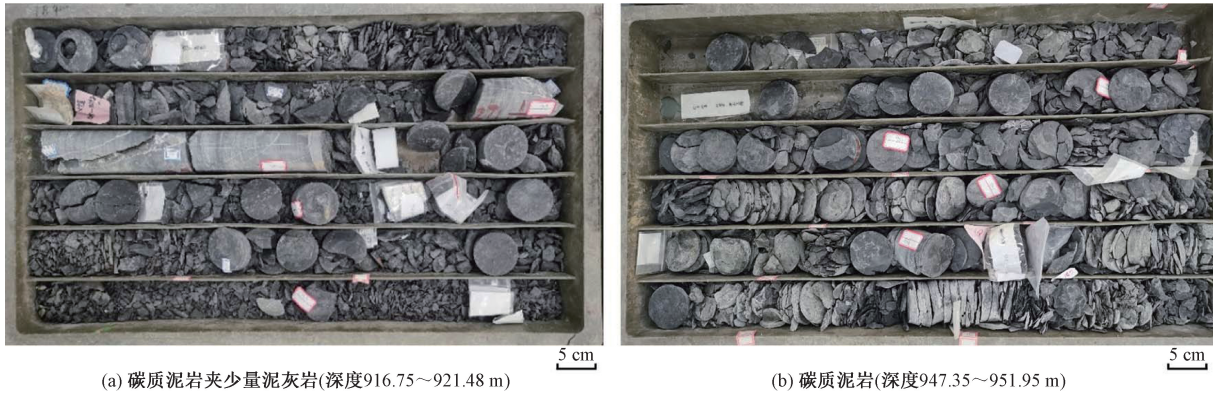
次测试样品为港地1井中-上二叠系泥页岩地层,该地层从上而下依次为大隆组(P_3d)、龙潭组(P_3l)、孤峰组(P_2g),全长313 m。

(1)大隆组(915.2~986.9 m)。该地层整体为深灰-黑色碳质泥岩、碳质页岩,偶见灰砾透镜体,部分泥岩段,岩心破碎(图3)。下部发育深灰色泥灰岩,偶见生物碎屑,从岩心上表现为深水还原环境,生物扰动程度较低。

(2)龙潭组(986~1189.7 m)。岩性主要为灰岩、碳质泥岩和砾岩,部分泥岩段岩心破碎。下部发育含砾石英砂岩、石英砂岩、细-粉细砂岩(图4)。水深整体表现为浅-较浅-较深-深水动力逐渐增加,呈现一个明显的正粒序特征。

(3)孤峰组(1189.7~1228.2 m)。岩性为硅质页岩、泥晶灰岩等细粒沉积物。临近盆地边缘相的岩性颜色以氧化色为主,向南水深逐渐加深,岩性颜色逐渐由变为灰黑色、黑色(图5)。

本次XRF测试根据岩心岩性差异和目标任务,采用“一段一策”的方法,即针对不同层位重点情况结合实际岩性保存情况,点距均有所差异。大隆组作为该井重点层段,地层厚度为71 m,岩性主要为碳质泥岩,对测试密度进行加密,测试距离为30 cm/点。龙潭组地层厚度182 m,岩性主要为

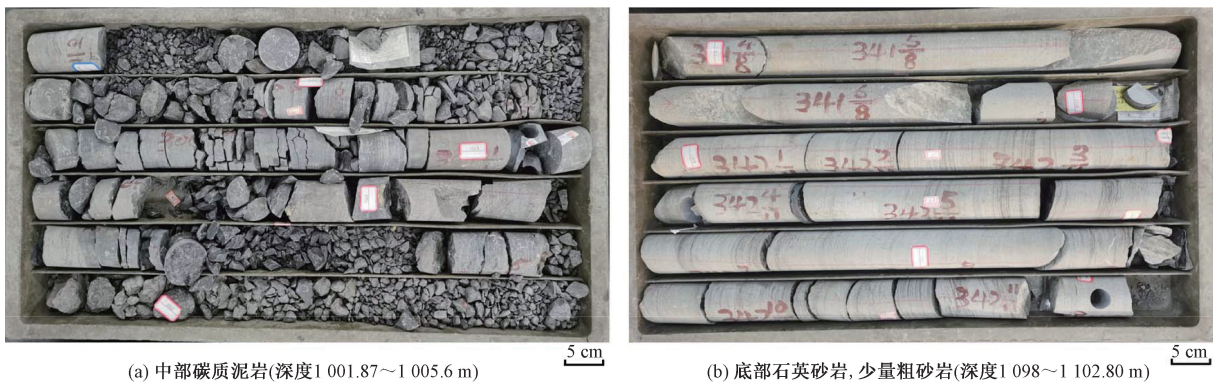


(a) 碳质泥岩夹少量泥灰岩(深度916.75~921.48 m)

(b) 碳质泥岩(深度947.35~951.95 m)

图3 大隆组岩心照片

Fig. 3 Core photos of Dalong Formation

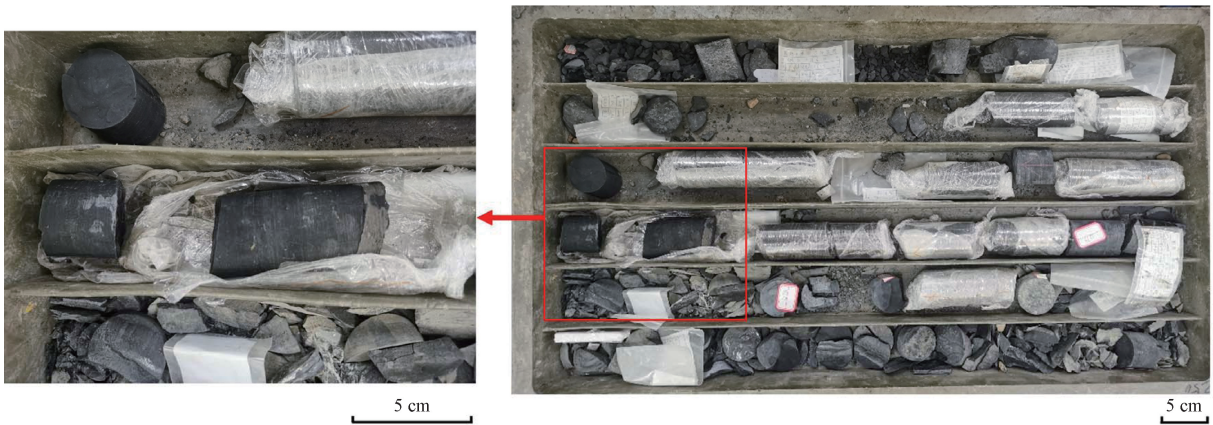


(a) 中部碳质泥岩(深度1001.87~1005.6 m)

(b) 底部石英砂岩, 少量粗砂岩(深度1098~1102.80 m)

图4 龙潭组岩心照片

Fig. 4 Core photos of Longtan Formation



深度1201.65~1206.0 m

图5 孤峰组岩心照片, 灰黑色硅质页岩

Fig. 5 Core photos of Gufeng Formation, gray black siliceous shale

灰岩、碳质泥岩和砾岩。岩性变化较为频繁的井段,测试距离为50 cm/点。孤峰组为硅质泥页岩,按照80 cm/点。共完成XRF测试点407个,如表1所示。单点测试时间约为90 s,此外为了保证测试结果的准确性,测试流程遵循技术标准规范进行,并对结果进行抽检和复测,测试误差均符合要求,大于3%。

3 结果与讨论

3.1 二叠系泥页岩元素特征

根据XRF测试结果可知,中上二叠系地层(大隆组、龙潭组和孤峰组)在垂向上各元素含量具有明显差异。本次对具有指示意义的Al、Fe、Ti、Si、Ca、Ba、Rb、Sr等元素在纵向的变化趋势进行分

表1 港地1井地层信息

Table 1 Formation information of Gangdi 1 well

系	组	厚度/m	主要岩性	XRF 测试数据(点数)
三叠系	扁担山组	398.9	灰岩	—
	和龙山组	273.9	灰岩	—
	殷坑组	253.4	灰岩	—
二叠系	大隆组	71.7	碳质泥岩	97
		11.1	生物灰岩	15
		24.0	碳质泥岩	30
	龙潭组	24.0	砾岩	30
		10.0	碳质泥岩	13
		46.5	灰岩	50
		97.2	砾岩	125
	孤峰组	38.5	硅质泥页岩	47
	栖霞组	185.2	灰岩	—
	船山组	37.5	灰岩	—
石炭系	黄龙组	47.7	灰岩	—

析(图6),发现Al元素含量整体呈现较高值,其中在中上段龙潭组和大隆组呈现高值,但在龙潭组Al元素含量变化较大,此外在孤峰组上部Al元素含量保持高值水平之后迅速下降,Al元素的富集与陆源碎屑具有较高的相关性,说明该段沉积环境发生了较大变化。Fe元素整体保持较低水平,只在部分层段(1 000~1 018 m和1 040 m)浓度明显变高。Si元素含量整体呈现由高到低的变化趋势,在大隆组整体浓度较低,随着进入龙潭组,浓度逐渐升高,在孤峰组底部达到最高值,在龙潭组各层段呈现高低起伏的特征,在孤峰组顶部突然降低,随后逐渐增高,达到最高值。主要与海相沉积的Ca元素从上而下整体呈现降低趋势,在大隆组处于高值水平,随后下降,基本处于低值,偶尔在部分层段(1 071~1 090 m)和孤峰组顶部存在局部高值异常。反映陆缘沉积物的Ti元素整体浓度不高,主要集中在龙潭组,上覆大隆组和下覆孤峰组Ti元素含量极低,在龙潭组,Ti元素也是分段出现,主要分布在碳质泥岩(998~1 022 m)、灰岩(1 059~1 092 m)和砾岩(1 092~1 090 m)。与陆相和海陆过渡相沉积物相关的Ba元素含量整体较低,主要分布在大隆组,其他层位含量较低。Rb元素变化趋势与Al元素相似,整体呈现较高-高-低的变化趋势,在大隆组浓度平均值基本在 80×10^{-6} ,在龙潭组浓度平均值基本在 100×10^{-6} ,其间多次高低相间,在孤峰组逐渐降低。与主元素Ca具有相似地球化学性质的Sr元素含量整体不高,整体变化特征不明显,主要集中在大隆组,出现短期高值。

除了上述主微量元素的变化趋势明显,元素比值在纵向呈现一定的变化规律(图7),其中反映物源及沉积环境变化的Rb/Sr比值在纵向变化明显,整体呈现低-高-低的变化趋势,特别在孤峰组达到

最低比值(< 0.3),而在大隆组也呈现低(0.1)高(0.4)-低(0.1)的趋势,在龙潭组整体 > 0.5 ,但局部(987~1 015、1 022~1 028、1 046~1 056、987~1 015 m)呈现低值(< 0.5)。Al/(Al+Fe+Mn)比值是判断硅质成因的重要指标,从图7可以看出,Al/(Al+Fe+Mn)比值主要集中于0.4~0.8,且大部分大于0.6,表明硅质成因与生物沉积过程有重要关系。Ba/Sr也是反映物源和沉积环境变化的指标之一,在纵向上变化明显,呈现低-高-低的变化趋势,与Rb/Sr比变化趋势一致。V/(V+Ni)可以用来判断古环境的氧化还原情况^[25-26],主要分布在下覆孤峰组,其他地层分布较少,且V/(V+Ni)大于0.84,表明孤峰组沉积环境为极度缺氧的还原环境^[27]。Ti元素含量的变化是陆源物质加入程度的重要反映,可以反映沉积环境,Fe除了陆源碎屑的来源,热液活动也是其中主要的来源,因此Ti/Fe可以反映该地区的热液活动。

3.2 沉积环境特征

元素含量的变化是沉积环境指示的重要参数与指标^[28],通过对沉积岩中微量元素含量及分布,尤其是一些相关元素比值的研究,可以分析当时的沉积地质条件^[29]。根据主量元素及微量元素含量变化及相关比值的变化,结合部分矿物成份,分析下扬子地区二叠系中上统沉积环境,整体而言,下扬子泥页岩沉积于海陆过渡相-海相还原环境中(图8)。

3.2.1 孤峰组

整体为水下还原沉积环境,沉积体系为深水陆棚-深水盆地相向浅水陆棚相逐渐过渡。孤峰组早期,Al、Rb等元素含量处于整体最低值,且Al/Si低(< 0.2),Rb/Sr低(< 0.2),Si含量较高,说明在孤峰组早期处于较深的海平面之下,岩性主要为硅质页岩,石英含量较高,大于90%,以自生石英为主,粒度小,主要分布在0.2~10 μm ;草莓状黄铁矿相对较低,粒径小,圆度高,晶间接触紧密,主要为沉积期形成。随着水体变浅,Al、Ti、Rb等元素含量开始增加,Si含量相对降低,Ca元素含量增加,Al/Si高(> 0.5),Rb/Sr高(> 0.5),长石、黄铁矿、伊利石、白云石等矿物逐渐增加,表明该时段陆源沉积物增加,沉积环境由深水盆地相向深水陆棚相转变,主要发育富钙硅质泥页岩、硅质泥页岩、钙质泥页岩、碳质泥页岩。之后随着水体进一步变浅,高岭石、云母等陆源沉积物加入,碳酸盐矿物逐步减少,沉积环境进一步变为浅水陆棚相。

3.2.2 龙潭组

整体而言,该组指示陆源输入的Al、Ti、Si、Rb

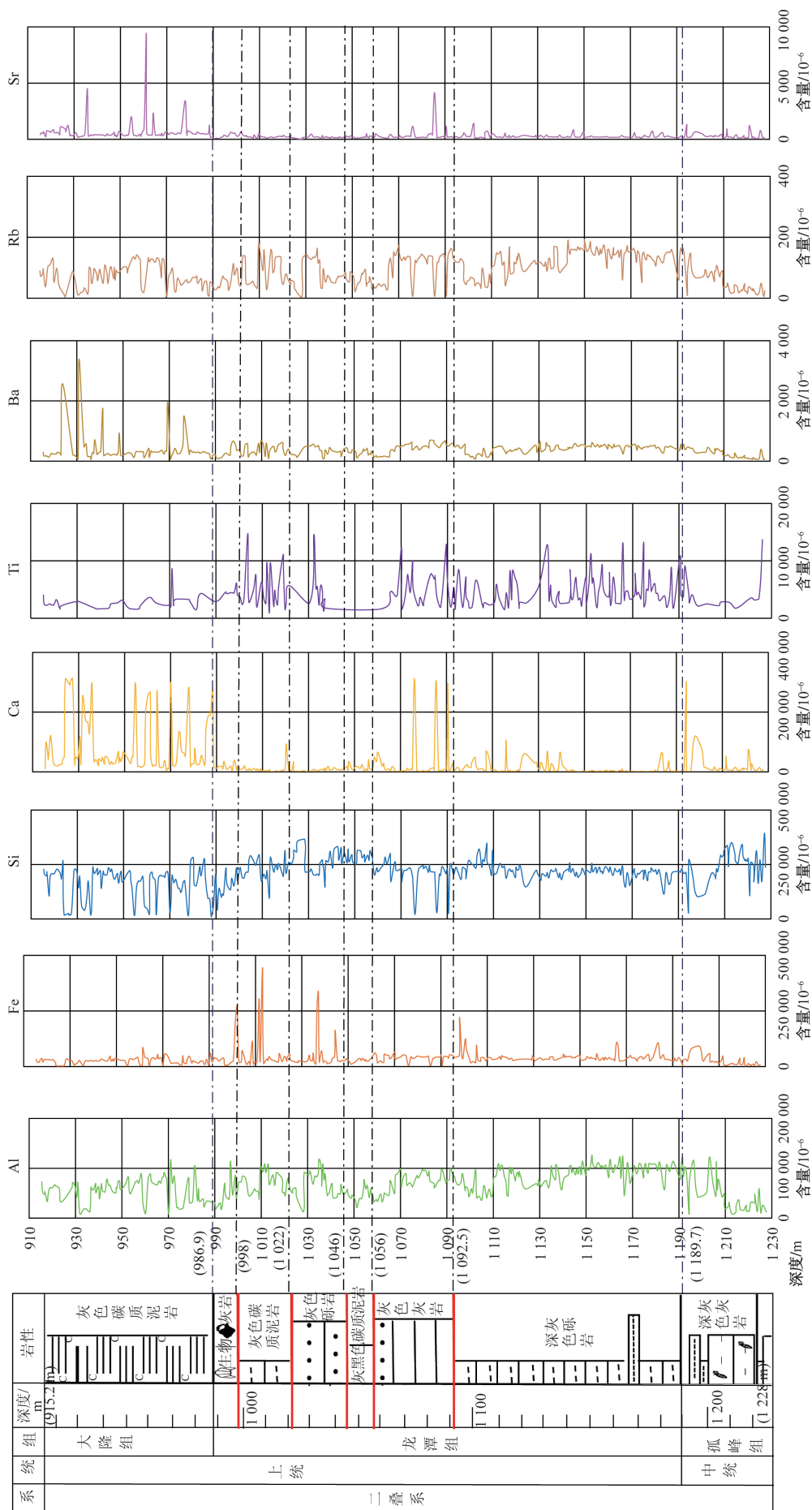


图6 二叠系中上统元素含量变化分析图
Fig.6 Analysis of element content change in Upper-Middle Permian

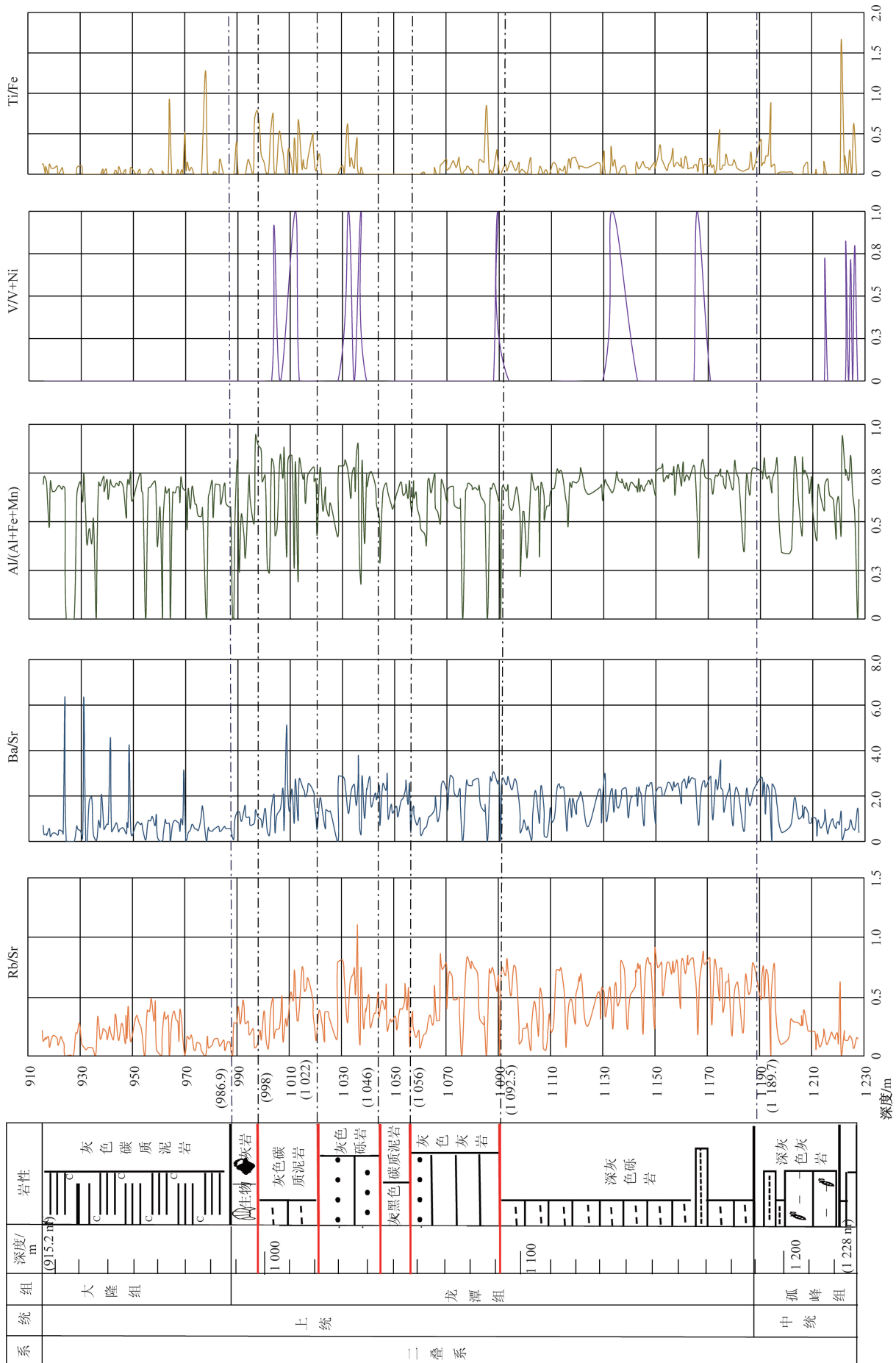


图7 二叠系中上统元素含量比值变化分析图
Fig.7 Analysis of the change of element content ratio in Middle-Upper Permian

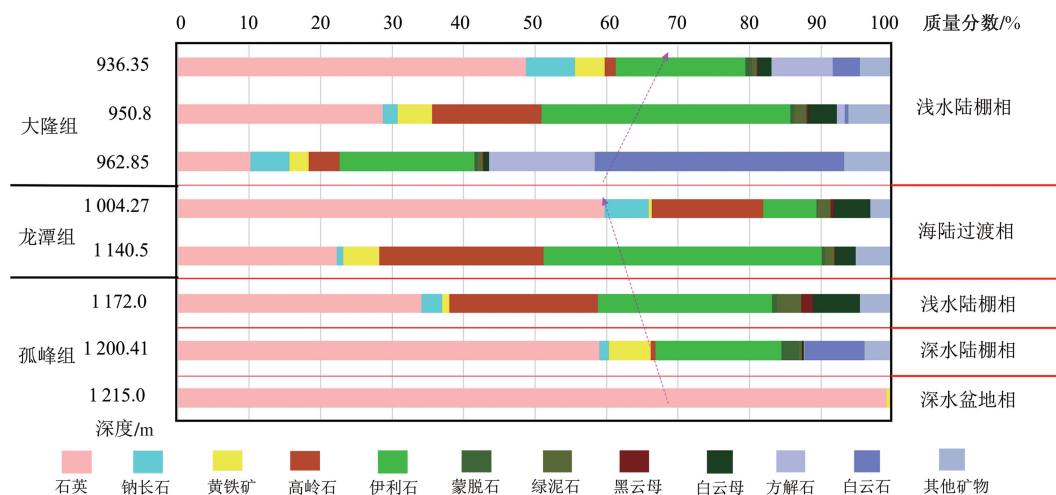


图8 二叠系中上统矿物含量变化分析图

Fig. 8 Analysis diagram of mineral content change in the Middle and Upper Permian system

等元素处于高值水平,而与海相环境沉积密切的Ca、Ba等元素含量较低,具有较高的Rb/Sr(>0.4)、Ba/Sr(>2)和Al/Si(>0.3),矿物成份以石英、长石、黏土矿物为主,说明龙潭组整体陆源碎屑供给相对较丰富,位于正常浪基面之上的浅海环境-海陆交互沉积环境为主。龙潭组内部变化也较为明显,其中龙潭组早期Al、Ti、Si、Rb等元素处于全段最高值,且较为稳定,Rb/Sr高(>0.5),Al/Si高(>0.5)说明该时段陆源碎屑供给丰富,海平面较低,属于三角洲-滨浅海沉积环境。随后水体逐渐变深,局部Ca元素含量增加,而Al、Si、Ti等元素相对减少,说明该时段水体加深,转变为滨浅海沉积环境。随着水体的加深,一直到龙潭组中期(1046 m)Al、Rb等元素含量持续减少,且Rb/Sr小于0.5,Al/Si小于0.3,但Ca元素含量并未随之增加,该时段沉积环境变为浅海沉积环境。经过一段时期的海相沉积之后,Al、Ti、Rb等元素含量开始增加,而Ca元素含量并未随之增加(1020~1030 m),Si元素有个局部升高,而Al元素反而下降,说明该层段砂砾岩明显增加,在1000~1020 m等段,Rb、Ti、Fe元素含量急剧升高,而Al元素反而下降,说明该段泥质含量增加,指示沉积环境具有丰富的铁质来源、水动力动荡的还原-弱还原沉积条件,均属于海平面较低,陆源沉积丰富的海陆过渡相/三角洲沉积环境。随着Al、Si、Ti、Rb等元素含量持续下降,Rb/Sr小于0.5,Al/Si小于0.4,说明龙潭组晚期水体加深,岩性也由陆源碎屑沉积逐渐向灰岩、生物碎屑灰岩等稳定水体沉积过渡。

3.2.3 大隆组

岩性以含粉砂硅质泥岩、泥岩,钙硅质、硅云质泥岩为主。整体而言指示陆源输入的Al、Ti等元素

含量较小,与海相环境沉积相关的Ca、Sr等元素含量较高,具有较低的Rb/Sr(0.1~0.4)和Ba/Sr(<1)。结合矿物成份,在大隆组早期,随着龙潭组晚期海水入侵,具有较小的Ba/Sr,碳酸盐矿物丰富,说明在大隆组早期出现短期的海水较深的陆棚沉积,而后期随着海平逐渐降低,Ba/Sr有所增大,与陆源沉积密切的石英、长石、黏土矿物等逐步增高,逐渐发育为浅水陆棚相。

4 结论

利用XRF分析下扬子地区二叠系中上统泥页岩地层元素含量变化,整体上,垂向上与陆源沉积相相关的Al、Ti、Si、Rb等元素具有较高-高-低的变化特征,而指示海相沉积的Ca、Sr等元素整体含量变化不大,在大隆组变化较大。元素含量比值在垂向也呈现一定的规律,其中Rb/Sr、Ba/Sr呈现低-高-低的变化趋势。基于元素含量变化规律结合矿物成分,分析下扬子地区二叠系中上统沉积环境,从下而上从深水盆地相-深水陆棚相-海陆过渡相-浅水陆棚相,期间水体从较深-较浅-较深的整体变化趋势。其中孤峰组初期为深水盆地相,逐步进入到深水陆棚相,龙潭组变化较大,期间经历了多次海进和海退,岩性和元素变化较大,而大隆组海平面发生短期沉降之后水体逐步加,沉积环境进入下一阶段。

参考文献

- [1] 成艾颖,余俊清,张丽莎,等. XRF岩芯扫描分析方法及其在湖泊沉积研究中的应用[J]. 盐湖研究, 2010(2): 7-13.
Cheng Aiyong, Yu Junqing, Zhang Lisha, et al. XRF core scanning and applications on lake sediments[J]. Journal of salt Lake Research, 2010(2): 7-13.

- [2] Zhou S B, Yuan Z X, Cheng Q M, et al. Quantitative analysis of iron and silicon concentrations in iron ore concentrate using portable X-ray fluorescence (XRF) [J]. *Applied Spectroscopy*, 2020, 74(1): 55-62.
- [3] Greenfield S, Bernard M, Burgess C, et al. Evaluation of analytical instrumentation; PART XXIII: instrumentation for portable X-ray fluorescence spectrometry [J]. *Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement*, 2008, 13(8): 453-464.
- [4] 古榕, 朱锐, 袁波, 等. 元素录井分析在复杂构造带超深钻井地层识别的应用——以准噶尔南缘中段上侏罗统-下白垩统为例[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(1): 155-164.
Gu Rong, Zhu Rui, Yuan Bo, et al. Application of elemental logging analysis in identification of ultra-deep drilling strata in complex structural zones: a case study of Upper Jurassic-Lower Cretaceous in the middle part of the southern margin of Junggar [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(1): 155-164.
- [5] 姚政权, 刘焱光, 王昆山, 等. 日本海末次冰期千年尺度古环境变化的地球化学记录[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(2): 119-126.
Yao Zhengquan, Liu Yanguang, Wang Kunshan, et al. Millennial-scale paleoenvironment change during the last glacial period recorded by geochemical variations in the Japan Sea [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(2): 119-126.
- [6] 周斌, 郑洪波, 杨文光, 等. 末次冰期以来南海北部物源及古环境变化的有机地球化学记录[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(3): 407-413.
Zhou Bin, Zhen Hongbo, Yang Wenguang, et al. Provenance and paleo-environment changes in the northern part of South China Sea since the last glacial period as recorded by organic geochemistry proxies [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(3): 407-413.
- [7] 龚刚, 周航兵, 韩善楚, 等. 震旦纪至寒武纪转折时期湘西北地区黑色岩系元素地球化学特征及其意义[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(31): 12734-12744.
Gong Gang, Zhou Hangbing, Han Shanchu, et al. Element geochemical characteristics and significance from the Sinian and Cambrian black rock series in northwestern Hunan Province [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(31): 12734-12744.
- [8] 陈诗越, 王苏民, 金章东, 等. 青藏高原中部湖泊沉积物中 Zr/Rb 值及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(4): 35-38.
Chen Shiyue, Wang Sumin, Jin Zhangdong, et al. Variation of Zr/Rb ratios in lacustrine sediments of the central Tibetan Plateau and its environment implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 35-38.
- [9] Kylander M E, Linda A, Barbara W, et al. High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence; new insights from chemical proxies [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2011, 26(1): 109-117.
- [10] Cuvén S, Pierre F, Scott F L. Estimation of grain size variability with micro X-ray fluorescence in laminated lacustrine sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 44(3): 803-817.
- [11] Boyle J F. Rapid elemental analysis of sediment samples by isotope source XRF [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2000, 23(2): 213-221.
- [12] Jin Z D, Cao J J, Wu J L, et al. A Rb/Sr record of catchment weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 31(3): 285-291.
- [13] Jin Z D, Wang S M, Shen J, et al. Chemical weathering since the Little Ice Age recorded in lake sediments: a high-resolution proxy of past climate [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(7): 775-782.
- [14] 宋腾, 陈科, 林拓, 等. 下扬子苏皖南地区上二叠统页岩油气地质条件研究[J]. *中国地质调查*, 2019(2): 18-25.
Song Teng, Chen Ke, Lin Tuo, et al. Study on geological conditions of Upper Permian shale oil and gas in Lower Yangtze area of southern Jiangsu-Anhui Province [J]. *Geological Survey of China*, 2019(2): 18-25.
- [15] 石刚, 黄正清, 郑红军, 等. 下扬子地区“三气一油”钻探发现及成藏地质条件——以皖南港地1井钻探发现为例[J]. *地质通报*, 2019, 38(9): 1564-1570.
Shi Gang, Huang Zhengqing, Zheng Hongjun, et al. “Three-Gas-One-Oil” drilling findings and reservoir formation geological conditions in the Lower Yangtze Area; exemplified by Gangdi 1 well in south Anhui [J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(9): 1564-1570.
- [16] 周东升, 许林峰, 潘继平, 等. 扬子地块上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J]. *天然气工业*, 2012, 32(12): 6-13.
Zhou Dongsheng, Xu Linfeng, Pan Jiping, et al. Prospect of shale gas exploration in the Upper Permian Longtan Formation in the Yangtze Massif [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(12): 6-13.
- [17] 陈平, 张敏强, 许永哲, 等. 下扬子巢湖—泾县地区上二叠统大隆组泥页岩储层特征[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2925-2935.
Chen Ping, Zhang Minqiang, Xu Yongzhe, et al. The shale reservoir characteristic of Dalong Formation Upper Permian in Chao-hu—Jingxian, Lower Yangtze area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(8): 2925-2935.
- [18] 董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 288-299.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 288-299.
- [19] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1): 14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of non-marine shale oil in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 14-26.
- [20] 张宗言, 何卫红, 韦一, 等. 下扬子中生代沉积盆地演化[J]. *地球科学*, 2014, 39(8): 1017-1033.
Zhang Zongyan, He Weihong, Wei Yi, et al. Evolution of Mesozoic sedimentary basins in the Lower Yangtze [J]. *Earth Science*, 2014, 39(8): 1017-1033.
- [21] 陈焕疆, 邱之俊. 中扬子区与上、下扬子区油气地质条件的对比分析[J]. *石油实验地质*, 1988, 10(4): 305-314.
Chen Huanjiang, Qiu Zhijun. Comparative petroleum geological study between Middle Yangtze Area and Upper and Lower Yangtze Area [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 1988, 10(4):

- 305-314.
- [22] 潘继平, 乔德武, 李世臻, 等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J]. 地质通报, 2011, 30(S1): 337-343.
Pan Jiping, Qiao Dewu, Li Shizhen, et al. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in Lower Yangtze Area, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(S1): 337-343.
- [23] 袁兆宪, 徐德义, 陈志军, 等. 便携式 X 荧光仪在研究矿化顺序中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(S2): 216-223.
Yuan Zhaoxian, Xu Deyi, Chen Zhijun, et al. Application of portable XRF technology for hand specimen scale geochemical imaging and identification of sequences of mineralization[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(S2): 216-223.
- [24] 丁江辉, 张金川, 石刚, 等. 皖南地区上二叠统大隆组页岩沉积环境与有机质富集机理[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 158-172.
Ding Jianghui, Zhang Jinchuan, Shi Gang, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanisms of the Upper Permian Dalong Formation shale, southern Anhui Province, China[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 158-172.
- [25] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 91-99.
Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 91-99.
- [26] 常海亮, 张宏伟, 杜春彦, 等. 鹿邑凹陷太原组-山西组泥岩元素地球化学特征及对沉积环境的指示[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 10845-10856.
Chang Hailiang, Zhang Hongwei, Du Chunyan, et al. Geochemical characteristics of elements in Taiyuan Formation-Shanxi Formation and their implications for sedimentary environment in Luyi Sag[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(25): 10845-10856.
- [27] 王立社, 张复新, 侯俊富, 等. 秦岭山阳水沟口组黑色岩系微量元素地球化学及其沉积成矿背景的指示意义[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 311-325.
Wang Lishe, Zhang Fuxin, Hou Junfu, et al. Trace element geochemical characteristics of the Shuigoukou Formation black rock series in Shanyang area of the Qinling Mountains and their indication significance for sedimentation-mineralization[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 311-325.
- [28] Zhai G Y, Li J, Jiao Y, et al. Applications of chemostratigraphy in a characterization of shale gas sedimentary microfacies and predictions of sweet spots: taking the Cambrian black shales in western Hubei as an example[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 109: 547-560.
- [29] 古榕, 朱锐, 袁波, 等. 元素录井分析在复杂构造带超深钻井地层识别的应用——以准噶尔南缘中段上侏罗统-下白垩统为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 155-164.
Gu Rong, Zhu Rui, Yuan Bo, et al. Application of elemental logging analysis in identification of ultra-deep drilling strata in complex structural zones: a case study of Upper Jurassic-Lower Cretaceous in the middle part of the southern Margin of Junggar[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 155-164.