

doi: 10.12097/gbc.2023.05.010

关中盆地新近系泥岩地球化学特征：物源和古沉积环境恢复

兰华平^{1,2}, 任战利^{1,2,3*}, 张莹⁴, 祁凯^{1,2}, 邢光远^{1,2}, 夏岩⁵, 冯梦媛⁶
LAN Huaping^{1,2}, REN Zhanli^{1,2,3*}, ZHANG Ying⁴, QI Kai^{1,2}, XING Guangyuan^{1,2},
XIA Yan⁵, FENG Mengyuan⁶

1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;
 2. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;
 3. 西安市多种能源资源勘探开发重点实验室, 陕西 西安 710069;
 4. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075;
 5. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018;
 6. 陕西延长石油(集团)有限责任公司天然气研究院分公司, 陕西 西安 710075
1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;
2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;
3. Key Laboratory of Exploration and Development of Multiple Energy Resources, Xi'an 710069, Shaanxi, China;
4. Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;
5. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, Shaanxi, China;
6. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd. Natural Gas Research Institute Branch, Xi'an 710075, Shaanxi, China

摘要: 目前关中盆地开发利用的地热资源主要为新生界砂岩、砂砾岩孔隙裂隙型地热资源, 开发利用层位主要为新近系热储层。地热资源赋存特征、地热资源开发有利区展布、地热资源量等与物源、古沉积环境密切相关, 查明关中盆地新近系泥岩物源和古沉积环境特征, 有利于指示同沉积时期砂岩物源和古沉积环境特征, 对于关中盆地地热资源的开发利用重点层位确定、有利区预测及资源量计算具有指导意义。沉积岩中的元素地球化学特征记录了重要物源和沉积环境信息。依据关中盆地新近系泥岩岩心样品主量、微量和稀土元素特征对物源和沉积环境进行了综合研究, 研究结果表明: 关中盆地新近系泥岩的源区构造背景主要为活动大陆边缘, 源岩主要为关中盆地南缘太白岩体正长花岗岩、华山岩体黑云母二长花岗岩, 含有一定的中—基性火成岩; 化学蚀变指数(CIA)介于 61.34~76.78 之间, 平均值为 70.78, 反映新近系泥岩经历了中等程度风化作用, 指示高陵群和蓝田—灞河组沉积期处于暖湿气候环境, 张家坡组沉积期气候发生了转型, 由暖湿气候转变为冷干气候; 地球化学指标综合反映, 新近系泥岩沉积期主要处于还原环境, 水体古盐度整体表现为淡水、半咸水环境。

关键词: 关中盆地; 新近系; 物源特征; 古沉积环境

中图分类号: P534.62; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)10-1801-17

Lan H P, Ren Z L, Zhang Y, Qi K, Xing G Y, Xia Y, Feng M Y. Geochemical characteristics of Neogene mudstone in Guanzhong Basin: Provenance and paleosedimentary environment restoration. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(10): 1801-1817

收稿日期: 2023-08-14; 修订日期: 2024-09-13

资助项目: 陕西省重点研发计划项目《关中盆地中深层地埋管换热可持续开发关键技术研究及示范》(编号: 2021ZDLSF05-12)、陕西燃气集团有限公司项目《华州—华阴地区 3 口地热井井位论证及华州矿区地热资源综合评价技术》、长庆油田分公司勘探开发研究院合作项目《关中盆地地热资源调查及开发技术政策研究》

作者简介: 兰华平(1998-), 男, 硕士, 从事地热资源调查与评价研究。E-mail: 1689702193@qq.com

* 通信作者: 任战利(1961-), 男, 研究员, 从事盆地热演化史与油气评价、地热资源评价与开发。E-mail: renzhanli@nwu.edu.cn

Abstract: At present, the geothermal resources developed and utilized in the Guanzhong Basin are mainly Cenozoic sandstone and glutenite pore–fissure geothermal resources. The development and utilization horizons are mainly Neogene thermal reservoirs. The occurrence characteristics of geothermal resources, the distribution of favorable areas for geothermal resources development, and the amount of geothermal resources are closely related to the provenance and paleosedimentary environment. Identifying the characteristics of Neogene mudstone provenance and paleosedimentary environment is conducive to indicating the characteristics of sandstone provenance and paleosedimentary environment in the same sedimentary period. It has practical guiding significance for the determination of key horizons for the development and utilization of geothermal resources in the Guanzhong Basin, the prediction of favorable areas, and the calculation of resources. The geochemical characteristics of elements in sedimentary rocks record important provenance and sedimentary environment information. According to the characteristics of major, trace and rare earth elements of Neogene mudstone core samples in Guanzhong Basin, the provenance and sedimentary environment were comprehensively studied. The results show that the tectonic background of the source area of Neogene mudstone in Guanzhong Basin is mainly active continental margin, and the source rocks are mainly syenogranite of Taibai rock mass and biotite monzonitic granite of Huashan rock mass in the southern margin of Guanzhong Basin, which contain some intermediate–basic igneous rocks. The chemical alteration index (*CIA*) ranges from 61.34 to 76.78, with an average value of 70.78, reflecting that the Neogene mudstone has experienced moderate weathering, indicating that the Gaoling Group and the Lantian–Bahe Formation were in a warm and humid climate during the deposition period, and the Zhangjiapo Formation was deposited. The climate changed from warm and humid climate to cold and dry climate; geochemical indicators comprehensively reflect that the Neogene mudstone deposition period is mainly in a reducing environment, and the paleosalinity of the water body is generally in a freshwater and brackish water environment.

Key words: Guanzhong Basin; Neogene; provenance characteristics; paleosedimentary environment

关中盆地作为一个新生代断陷盆地,处于十字构造带的核心位置,与秦岭造山带相邻,深大断裂极发育,沟通了地球深部热源,沿秦岭山前断裂分布较多的地热异常区,地热资源丰富。诸多学者已对关中盆地深部热结构、地层特征、岩相古地理、地温场、地热资源量等开展了相关研究,并取得了一系列成果(张少泉等, 1985; 王贵玲等, 2004; 李智超等, 2016; 饶松等, 2016; 洪增林等, 2019; 任战利等, 2020; 周阳等, 2020),但对于新近系泥岩物源特征(源岩属性、源区构造背景)和古沉积环境(古气候、古盐度、古氧化还原环境)研究相对薄弱。目前关中盆地开发利用的地热资源主要为新生界砂岩、砂砾岩孔隙裂隙型地热资源,开发利用层位主要为新近系热储层,热储层岩性主要为砂岩、砂砾岩,地热资源赋存特征、地热资源量、地热资源开发有利区展布等与物源、古沉积环境密切相关,查明新近系泥岩物源和古沉积环境特征,能够指示同沉积时期砂岩物源和古沉积环境特征,对于关中盆地地热资源调查与开发利用意义重大。

沉积岩地球化学特征能够揭示沉积岩的源区属性、构造背景等信息,元素地球化学研究对于揭示和制约沉积岩物源特征、沉积古环境等具有重要意义。近年来,元素地球化学在理论和应用方面发展

迅猛,元素参数的精确性和高分辨率使其成为物源分析、重建古沉积环境的重要媒介(Paikaray et al., 2007; Prego et al., 2009)。相关的地球化学参数比值、图解不仅在粗粒沉积岩(如砂岩)中展现了较强的识别区分意义(Yang et al., 2012),在以泥岩为代表的细粒沉积岩中也表现出良好的适用性(Moosavirad et al., 2011; Hofer et al., 2013)。泥质岩粒度小,成分均匀且沉积期后不渗透,稀土元素含量更高(Lee, 2002),与稳定性较弱的主量元素相比,稀土元素可以更好地指示源区性质和判别构造背景。沉积岩的成分蕴含大量与沉积环境相关的信息,主量、微量及稀土元素地球化学特征对于沉积环境有良好的指示作用(Rimmer et al., 2004; Shao et al., 2011; Jia et al., 2013; 雷开宇等, 2017; 郭望等, 2020)。矿物岩石的基本单位是元素,沉积物中元素的分布除受沉积物自身的物理、化学性质影响外,也受古沉积环境的影响;各元素的配分、含量比值及演化历程,可以反映沉积环境的变迁(李乾等, 2018);相对于其他碎屑岩,泥质岩具有较强的均质性和致密性,较好地保存了物源区的原始信息,其地球化学特征与源区更接近,因此被广泛用于物源和风化作用研究中,并在此基础上进行沉积期古沉积环境恢复(罗情勇等, 2013)。

鉴于关中盆地新近系泥岩物源特征(源岩属性、源区构造背景)和古沉积环境(古气候、古盐度、古氧化还原环境)研究相对薄弱,但其对于地热资源调查与开发利用具有重大意义,笔者对关中盆地新近系泥岩的物源特征和古沉积环境开展了研究,利用化学蚀变指数(CIA)、相关元素比值、古生物资料等解析古气候环境,依据特定元素比值和相关图解分析新近系泥岩的物源特征、古盐度及古氧化还原环境。

1 区域地质概况

关中盆地位于陕西省中部,东西长约 360 km,南北宽 30~80 km,面积约 $2\times 10^4\text{ km}^2$ 。关中盆地大地构造位置独特,位于欧亚板块、特提斯板块、环太平洋板块共同作用的地带,介于鄂尔多斯地块与秦岭造山带之间,西与六盘山弧形断裂带末端相接,东临山西隆起带,走向近东西向,呈狭长带状分布,为一沉积厚度大、沉积地层新、形成时代晚的南深北浅不对称新生代箕状断陷盆地(韩恒悦等, 2002; 曹红霞等, 2008)。盆地断裂极发育,断裂走向以东西向和近东西向为主,北东向和北西向次之,控制了盆地的构造特征、地层沉积、盆地形成演化及地热资源分布。受

深大断裂切割围限,各构造单元呈凸起或凹陷状态,关中盆地可划分为 3 个大构造单元,分别为北部斜坡区、南部坳陷区、西部隆起区,根据地球物理资料、莫霍面特征、断裂规模及其活动性、沉积建造厚度、基底结构、地貌类型、地震分布等参数,又将关中盆地划分为 6 个次一级构造单元,分别为宝鸡凸起、咸礼凸起、西安凹陷、固市凹陷、临蓝凸起、蒲城凸起(穆根胥等, 2014)(图 1)。

关中盆地以太古宙花岗片麻岩、元古宙片岩、早古生代碳酸盐岩、花岗岩等为基底,上覆新生代地层。基底以渭河断裂为界分为南北两区,断裂以北以早古生代灰岩为主,局部残存石炭纪一二叠纪地层;长安-临潼断裂将南区基底划分为东西两区,断裂以东为太古宙花岗片麻岩和花岗岩混合分布,断裂以西为元古宙片岩,局部发育燕山期侵入岩(任战利等, 2020)。

关中盆地位于鄂尔多斯地块与秦岭造山带之间,出露地层自太古宇—新生界均有分布,前新生界及花岗岩体构成了盆地基底并出露于盆地边缘,巨厚的新生界形成了广阔的关中盆地。前人已对关中盆地各时代地层开展了大量研究,并取得了丰富的成果(薛祥煦, 1981; 李传夔等, 1984; 张云翔等,

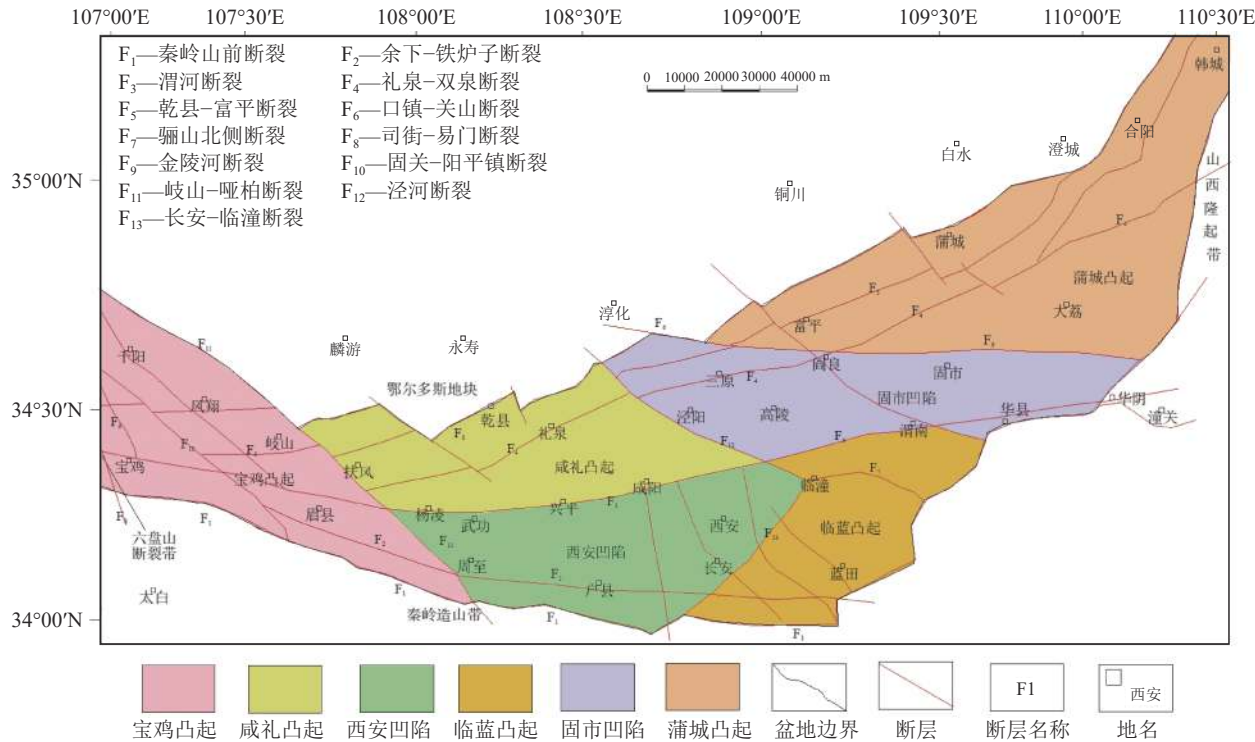


图 1 关中盆地构造位置和构造单元分布图(据穆根胥等, 2014 修改)

Fig. 1 Tectonic location and distribution map of tectonic units in Guanzhong Basin

1996; 刘护军等, 2004; 王建强等, 2015; 李智超等, 2016; 李兆雨等, 2021)。由于目前关中盆地开发利用的地热资源主要为新生界砂岩、砂砾岩孔隙裂隙型地热资源, 开发利用层位主要为新近系热储层, 本次只对关中盆地新生界新近系进行讨论。在前人工作的基础上, 依据沉积时代和岩性, 将关中盆地新近系划分为高陵群、蓝田-灞河组、张家坡组。高陵群包括冷水沟组和寇家村组, 冷水沟组厚度数米至百余米不等, 在西安凹陷中心埋深最大, 岩性主要为浅棕色、浅褐色、棕黄色泥岩, 底部为一套砾岩、砂砾岩, 与下伏白鹿原组呈不整合接触; 寇家村组在西安东郊毛西乡寇家村大庙沟有典型剖面出露, 在蓝田和渭南之间的横岭塬两侧也有出露, 岩性主要为棕黄色、砂质泥质, 夹棕黄色、灰白色砂岩, 底部发育砂砾岩或砾岩, 与冷水沟组整合接触(孙红丽, 2015; 李智超等, 2016; 李智超, 2017)。蓝田-灞河组由灞河组(N_2bh)和蓝田组(N_2l)共同组成, 灞河组由刘东生等于 1960 年创建, 标准剖面在陕西蓝田大庙沟-水家嘴(刘东生等, 1960)。关于灞河组时代属性前人已经进行过大量讨论(李传夔等, 1984; Kaakinen et al., 2003; Wang et al., 2014), 岩性主要为橘黄色砂砾岩、砂岩、橘黄色泥岩、棕红色泥岩, 主要出露于盆地东南部西安、渭南等地, 与下伏寇家村组呈假整合或整合接触; 蓝田组同样由刘东生等于 1960 年建立, 标准剖面在陕西蓝田泄湖镇水家嘴, 岩性主要为棕红色粘土, 主要分布于塬区, 与下伏灞河组呈不整合接触(刘东生等, 1960; 刘护军等, 2004; 孙红丽, 2015; 李智超等, 2016; 李智超, 2017)。张家坡组由原地质部陕西第三石油普查大队在石油报告中提出, 标准剖面在游河张家坡-卢家豪剖面, 岩性主要为泥岩、含砂泥岩夹疏松的砂泥岩, 主要出露于渭南沈河、赤水河、华县瓜坡等地(刘护军等, 2004; 孙红丽, 2015; 李智超等, 2016; 李智超, 2017)。

2 样品采集和分析方法

用于主量、微量和稀土元素分析的 19 个新近系泥岩样品均取自关中盆地地热井岩心, 关中盆地新近系岩性柱状图和泥岩采样位置见图 2。张家坡组泥岩样品颜色主要为灰色, 偶见浅棕红色, 泥质结构, 主要由粘土矿物组成, 层理不明显, 固结程度较强; 蓝田-灞河组岩心样品颜色为灰色、灰绿色与棕红色相混染, 泥质结构, 主要由粘土矿物组成, 含有少量的石英碎屑, 固结程度强, 岩心干燥; 高陵群泥

岩样品颜色呈棕红色, 不等粒结构, 主要由粘土矿物组成, 岩石中含有砾石, 砾石主要为石英和暗色矿物, 石英粒径可达 4 cm, 暗色矿物粒径为 0.2~1 cm, 泥岩固结程度强。

所有泥岩样品的主量、微量和稀土元素分析测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱仪分析, 分析误差小于 5%; 微量和稀土元素采用 Elan6100DRC 等离子体质谱仪(ICP-MS)进行, 测试的样品均采用国际标样 BHVO-1, BSR-1 和 AVG-1 作为标准, 质谱仪对 Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Zr、Nb、Hf、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu 等元素测试误差优于 5%, 其他元素测试误差介于 5%~10% 之间。

3 测试结果

3.1 主量元素

新近系泥岩主量元素分析测试结果见表 1, 高陵群泥岩以 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO 为主, 含量分别为 46.2%、13.48%、9.35%; 蓝田-灞河组样品主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 , SiO_2 含量介于 53.03%~60.00% 之间, 平均值为 56.70%; Al_2O_3 含量分布于 15.35%~18.81% 之间, 平均值为 16.81%; TFe_2O_3 含量介于 5.91%~9.39% 之间, 平均值为 7.26%; 张家坡组样品主量元素与高陵群相似, 均以 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO 为主, SiO_2 含量介于 48.02%~68.24% 之间, 平均值为 54.28%; Al_2O_3 含量介于 10.36%~15.77% 之间, 平均值为 13.97%; CaO 含量介于 5.1%~8.26% 之间, 平均值为 7.13%, 其余元素含量均较低。

3.2 微量元素

新近系泥岩微量元素分析测试结果见表 2。结果显示, 蓝田-灞河组样品微量元素 Li、Be、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Y、Nb、Cs、Ba 含量与张家坡组相比明显偏高, 整体而言, 蓝田-灞河组微量元素含量高于张家坡组。

通过大陆上地壳(UCC)微量元素对新近系泥岩微量元素进行标准化处理(图 3)。微量元素配分模式图显示, Li、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Y、Cs 与上地壳中元素相比整体呈正异常, 其中 Li、V、Cr、Zn 元素明显富集, Li 元素含量为 26.00×10^{-6} ~ 113.96×10^{-6} , 平均值为 59.60×10^{-6} ; V 元素含量为 58.10×10^{-6} ~ 173.80×10^{-6} , 平均值为 107.00×10^{-6} ; Cr 元素含量为 55.80×10^{-6} ~ 124.87×10^{-6} , 平均值为 87.15×10^{-6} ;

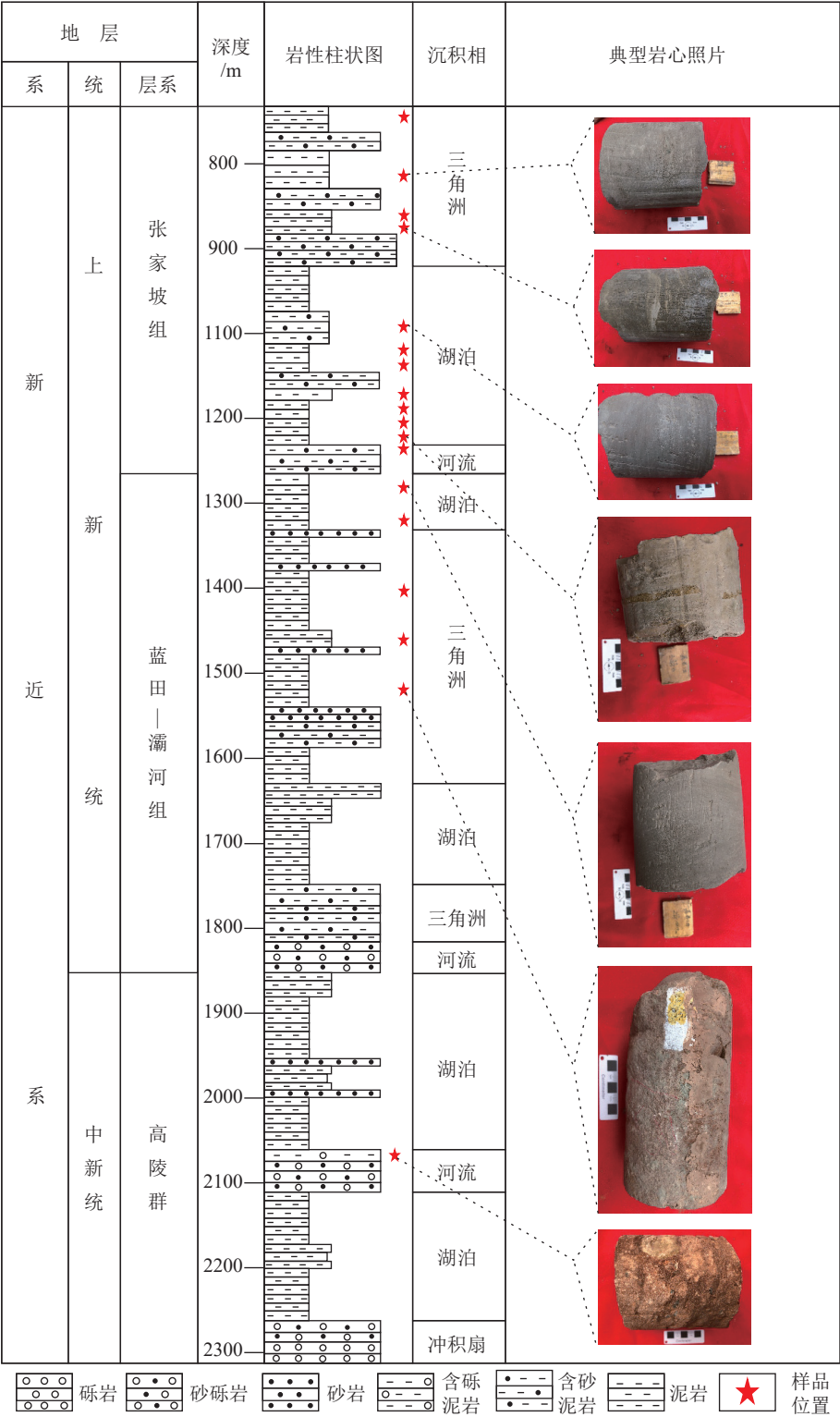


图 2 关中盆地新近系岩性柱状图和泥岩样品位置

Fig. 2 Neogene lithologic column diagram and mudstone sample location in Guanzhong Basin

Zn 元素含量为 $64.40 \times 10^{-6} \sim 141.61 \times 10^{-6}$, 平均值为 97.53×10^{-6} , 均远高于 UCC 中相应元素含量; Be、Sr、Nb、Hf 整体相对亏损, 其中 Sr 含量为 $184.36 \times 10^{-6} \sim 419.00 \times 10^{-6}$, 平均值为 283.24×10^{-6} , 明显低于 UCC 中 Sr 含量 (350.00×10^{-6}); Nb 含量为 $10.20 \times 10^{-6} \sim 19.54 \times 10^{-6}$, 平均值为 14.73×10^{-6} , 低于 UCC 中 Nb 含

表 1 关中盆地新近系泥岩主量元素分析测试结果和特定元素比值

Table 1 Main element analysis and specific element ratio of Neogene mudstone in Guanzhong Basin

层位	样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总计	ICV	CIA	Al ₂ O ₃ /TiO ₂
高陵群	S1	46.20	0.71	13.48	5.36	0.05	5.24	9.35	0.24	3.61	0.19	15.41	99.84	1.82	76.72	1.30
	S2	53.03	0.68	15.91	6.20	0.05	3.35	4.10	1.18	3.27	0.14	11.90	99.81	1.18	73.86	1.35
蓝田-灞河组	S3	60.00	0.75	15.35	5.91	0.06	3.11	3.34	1.58	2.94	0.14	6.61	99.79	1.15	71.56	1.39
	S4	59.16	0.81	16.75	7.18	0.07	3.45	1.38	1.61	3.31	0.15	5.72	99.59	1.06	74.28	1.34
	S5	56.84	0.81	17.96	7.99	0.09	3.68	1.22	1.34	3.46	0.09	6.31	99.79	1.04	75.84	1.32
	S6	53.34	0.80	18.81	9.39	0.11	4.16	1.23	1.18	3.75	0.14	6.75	99.66	1.10	76.78	1.30
	S7	57.81	0.81	16.10	6.87	0.09	2.89	3.28	1.56	3.08	0.20	6.90	99.59	1.15	72.20	1.38
	S8	48.02	0.67	15.77	6.90	0.09	3.71	6.03	1.51	3.24	0.17	13.69	99.80	1.40	71.58	1.39
张家坡组	S9	53.54	0.65	12.81	4.95	0.09	2.66	8.15	1.51	2.61	0.15	12.71	99.83	1.61	69.47	1.44
	S10	68.24	0.49	10.36	2.82	0.05	1.81	5.10	2.03	2.47	0.16	6.35	99.88	1.43	61.34	1.63
	S11	49.44	0.67	14.97	6.63	0.14	3.82	7.56	1.68	3.35	0.13	11.49	99.88	1.59	69.05	1.45
	S12	57.67	0.65	14.46	4.66	0.05	2.95	5.77	1.72	2.98	0.11	8.82	99.84	1.30	69.25	1.44
	S13	54.29	0.66	15.15	5.38	0.08	3.20	6.03	1.70	3.07	0.12	10.20	99.88	1.33	70.07	1.43
	S14	49.86	0.67	15.16	5.92	0.10	3.65	7.91	1.70	3.43	0.11	11.36	99.87	1.54	68.94	1.45
	S15	53.09	0.61	13.97	4.90	0.05	3.34	8.23	1.73	2.85	0.14	10.93	99.84	1.55	68.89	1.45
	S16	54.85	0.65	12.41	4.99	0.08	3.11	7.89	1.85	2.78	0.13	11.15	99.88	1.72	65.70	1.52
	S17	50.22	0.61	15.16	5.49	0.05	3.81	8.26	1.55	2.88	0.14	11.68	99.84	1.49	71.71	1.39
	S18	53.93	0.64	14.47	4.78	0.09	3.23	7.47	1.71	2.84	0.13	10.59	99.87	1.43	69.80	1.43
	S19	58.16	0.53	12.99	3.77	0.09	2.91	7.11	1.86	2.57	0.10	9.85	99.94	1.45	67.38	1.48
UCC		65.89	0.50	15.17	4.49	0.07	2.20	4.19	3.89	3.19	0.20					

注: 主量元素含量单位为%; UCC代表大陆上地壳元素含量平均值, 含量据Taylor et al., 1985; ICV表示成分变异指数; CIA表示化学蚀变指数

表 2 关中盆地新近系泥岩微量元素分析测试结果和特定元素比值

Table 2 Analysis results of trace elements and specific element ratios of Neogene mudstone in Guanzhong Basin

层位	样品 编号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ni/Co	V/Cr	Rb/Sr	Sr/Ba
高陵群	S1	92.43	2.27	13.37	81.53	81.88	16.55	44.11	34.63	96.73	19.10	138.36	184.36	25.45	209.60	13.89	22.66	311.01	4.67	2.67	1.00	0.75	0.59
	S2	61.21	2.91	17.30	102.71	91.02	17.32	42.49	31.56	101.05	24.83	143.62	195.34	26.89	171.36	13.97	10.13	572.98	3.91	2.45	1.13	0.74	0.34
	S3	75.84	4.03	16.46	114.04	91.25	23.75	52.73	38.79	94.84	21.11	142.53	230.71	32.71	219.38	17.15	11.30	601.68	5.46	2.22	1.25	0.62	0.38
蓝田-灞河组	S4	100.25	3.69	17.18	114.55	92.76	19.15	53.03	53.39	113.45	23.76	165.40	266.82	30.76	165.16	17.42	12.82	603.45	4.19	2.77	1.23	0.62	0.44
	S5	109.08	4.26	19.08	148.28	103.48	21.30	60.71	44.06	125.66	25.52	179.30	229.48	32.13	153.14	19.22	16.57	635.64	3.89	2.85	1.43	0.78	0.36
	S6	113.96	5.39	23.93	173.80	124.87	26.33	71.30	51.80	141.61	30.10	205.47	277.18	35.07	146.48	19.54	17.77	632.68	3.80	2.71	1.39	0.74	0.44
	S7	73.09	3.89	18.32	127.39	95.75	20.32	53.03	51.66	103.79	22.55	151.69	266.50	35.10	195.56	19.11	12.82	543.52	4.99	2.61	1.33	0.57	0.49
张家坡组	S8	66.52	2.93	8.57	127.42	108.05	19.93	56.81	45.06	121.15	24.32	65.05	232.03	22.25	132.95	14.48	10.65	529.28	3.13	2.85	1.18	0.28	0.44
	S9	39.16	2.26	14.88	99.58	89.69	16.12	42.74	33.69	77.98	19.46	111.67	355.13	26.67	200.28	13.73	8.16	536.54	4.75	2.65	1.11	0.31	0.66
	S10	26.00	1.47	7.50	58.10	55.80	8.44	23.10	19.80	64.40	12.50	83.10	248.00	22.60	252.00	10.20	4.89	524.00	6.98	2.74	1.04	0.34	0.47
	S11	46.90	2.39	11.70	109.00	87.80	18.50	51.50	29.20	92.00	20.60	126.00	291.00	26.80	156.00	13.20	10.90	586.00	4.64	2.78	1.24	0.43	0.50
	S12	42.90	2.16	11.50	98.10	82.70	13.20	38.20	32.30	88.70	19.00	111.00	252.00	28.20	209.00	13.70	9.33	586.00	5.74	2.89	1.19	0.44	0.43
	S13	39.00	2.09	12.10	97.20	83.00	16.10	46.60	35.00	88.70	19.30	116.00	258.00	28.70	231.00	13.50	9.02	407.00	5.89	2.89	1.17	0.45	0.63
	S14	50.20	2.44	14.00	108.00	88.10	16.80	45.60	38.90	101.00	21.10	132.00	334.00	27.20	161.00	13.90	11.70	691.00	4.76	2.71	1.23	0.40	0.48
	S15	38.90	2.00	15.80	94.10	75.00	15.30	42.00	33.50	80.90	18.10	113.00	419.00	25.40	210.00	13.40	8.87	412.00	5.99	2.75	1.25	0.27	1.02
	S16	37.00	1.90	11.50	89.40	74.30	15.30	41.10	33.90	85.30	17.70	108.00	419.00	26.00	209.00	14.20	8.34	411.00	6.03	2.69	1.20	0.26	1.02
	S17	39.90	2.10	17.00	106.00	81.50	17.50	44.30	53.00	92.30	20.10	120.00	353.00	25.50	198.00	13.50	9.36	412.00	5.69	2.53	1.30	0.34	0.86
	S18	46.10	2.13	12.20	101.00	80.20	15.70	41.80	34.90	92.50	19.70	122.00	310.00	28.20	192.00	14.30	10.40	652.00	5.51	2.66	1.26	0.39	0.48
	S19	33.90	1.63	10.10	82.80	68.60	12.40	33.40	55.90	91.10	15.90	102.00	260.00	21.80	187.00	11.50	7.01	369.00	5.38	2.69	1.21	0.39	0.70
UCC		20.00	3.00	11.00	60.00	35.00	10.00	40.00	25.00	71.00	17.00	112.00	350.00	22.00	190.00	25.00	3.70	550.00	5.80				

注: 微量元素含量单位为10⁻⁶; UCC代表大陆上地壳元素含量平均值, 含量据Taylor et al., 1985

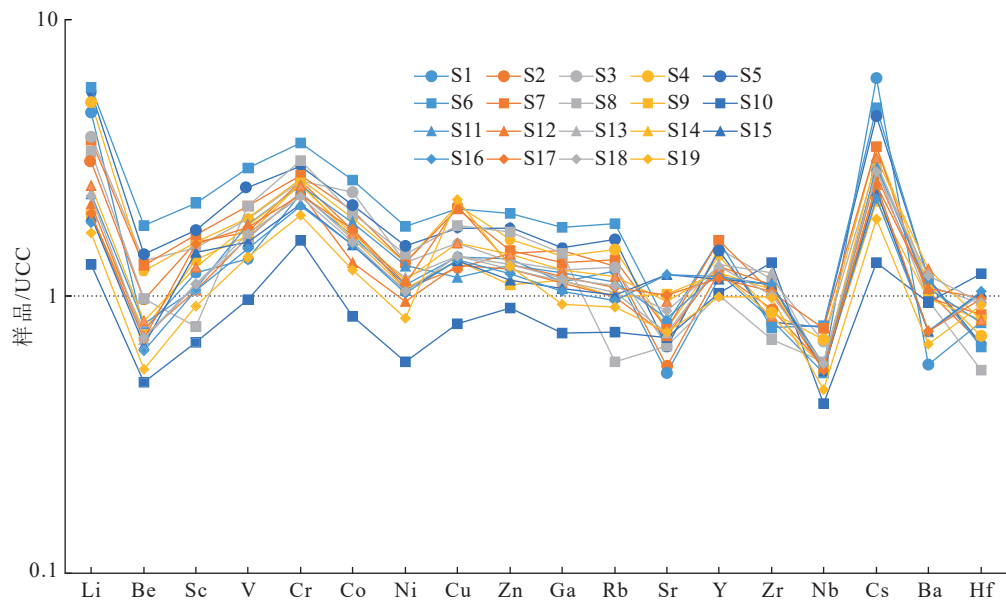


图 3 关中盆地新近系泥岩微量元素配分模式图

Fig. 3 Trace element partitioning model of Neogene mudstone in Guanzhong Basin

量 (25.00×10^{-6}), 呈负异常。

3.3 稀土元素

新近系泥岩稀土元素分析测试结果见表 3, 高陵群泥岩稀土元素总量(ΣREE)为 148.39×10^{-6} , 轻、重

稀土元素含量比值 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$) 为 8.67; 蓝田-灞河组稀土元素总量为 $173.06\times10^{-6}\sim247.07\times10^{-6}$, 平均值为 211.50×10^{-6} ; 轻稀土元素含量为 $157.02\times10^{-6}\sim224.18\times10^{-6}$, 平均值为 191.13×10^{-6} ; 重稀土元素含量

表 3 关中盆地新近系泥岩稀土元素分析测试结果和特定元素比值

Table 3 Rare earth element analysis and specific element ratio of Neogene mudstone in Guanzhong Basin

层位	样品 编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	LREE/HREE	δEu
高陵群	S1	30.73	61.51	7.25	27.32	5.22	1.03	4.85	0.70	4.02	0.79	2.22	0.33	2.11	0.32	148.39	133.04	15.35	8.67	0.61
	S2	37.71	72.47	8.68	31.28	5.71	1.17	5.24	0.73	4.13	0.81	2.29	0.34	2.18	0.32	173.06	157.02	16.04	9.79	0.64
	S3	42.90	78.83	8.92	34.78	6.58	1.31	6.00	0.93	5.35	1.04	3.07	0.49	2.98	0.51	193.70	173.33	20.38	8.51	0.62
	S4	48.99	89.24	10.02	38.23	6.91	1.35	6.12	0.91	5.08	0.97	2.84	0.45	2.69	0.47	214.27	194.73	19.54	9.97	0.62
	S5	49.83	89.50	10.06	37.74	6.98	1.35	6.32	0.97	5.49	1.05	3.09	0.49	2.97	0.52	216.35	195.46	20.89	9.36	0.61
	S6	57.93	102.37	11.40	43.04	7.90	1.53	7.05	1.07	5.96	1.14	3.35	0.53	3.22	0.56	247.07	224.18	22.89	9.79	0.62
	S7	51.07	92.18	10.31	39.67	7.39	1.43	6.76	1.03	5.85	1.13	3.35	0.53	3.29	0.57	224.57	202.05	22.53	8.97	0.61
蓝田- 灞河组	S8	31.69	65.10	7.69	28.01	5.30	1.08	4.91	0.72	4.04	0.80	2.25	0.33	2.15	0.32	154.38	138.88	15.50	8.96	0.64
	S9	33.54	65.38	7.81	29.06	5.49	1.13	5.16	0.74	4.20	0.83	2.38	0.35	2.26	0.34	158.66	142.39	16.26	8.76	0.64
	S10	29.30	53.50	6.50	24.00	4.60	1.12	4.29	0.66	3.66	0.72	2.25	0.35	2.30	0.33	133.58	119.02	14.56	8.17	0.76
	S11	39.70	74.00	8.96	33.20	6.35	1.49	6.06	0.90	4.82	0.94	2.99	0.43	2.79	0.41	183.04	163.70	19.34	8.46	0.72
	S12	38.70	71.00	8.85	32.80	6.24	1.46	5.87	0.87	4.86	0.92	2.87	0.45	2.79	0.40	178.08	159.05	19.03	8.36	0.73
	S13	39.30	72.70	9.07	33.70	6.44	1.39	5.95	0.89	4.91	0.95	2.83	0.44	2.86	0.41	181.84	162.60	19.24	8.45	0.68
	S14	41.10	77.40	9.40	34.60	6.55	1.53	6.06	0.90	4.88	0.93	3.03	0.45	2.83	0.41	190.07	170.58	19.49	8.75	0.73
	S15	38.60	70.90	8.79	32.50	6.20	1.33	5.52	0.83	4.56	0.89	2.63	0.43	2.72	0.38	176.28	158.32	17.96	8.82	0.68
	S16	38.60	71.20	8.82	32.40	6.25	1.31	5.61	0.84	4.66	0.90	2.64	0.43	2.69	0.39	176.74	158.58	18.16	8.73	0.66
	S17	39.80	74.50	9.19	34.00	6.39	1.40	5.85	0.86	4.78	0.90	2.70	0.43	2.73	0.39	183.92	165.28	18.64	8.87	0.69
	S18	41.70	78.90	9.57	35.00	6.64	1.51	6.12	0.91	4.99	0.96	3.06	0.46	2.93	0.42	193.17	173.32	19.85	8.73	0.71
	S19	31.50	57.90	7.18	26.80	5.07	1.16	4.76	0.72	3.98	0.78	2.30	0.38	2.32	0.33	145.18	129.61	15.57	8.32	0.71
球粒陨石		0.31	0.81	0.12	0.60	0.20	0.07	0.26	0.05	0.32	0.07	0.21	0.03	0.21	0.03					

注: 稀土元素含量单位为 10^{-6} ; 稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}=\text{La}+\text{Ce}+\text{Pr}+\text{Nd}+\text{Sm}+\text{Eu}+\text{Gd}+\text{Tb}+\text{Dy}+\text{Ho}+\text{Er}+\text{Tm}+\text{Yb}+\text{Lu}$; 轻稀土元素 $\Sigma\text{LREE}=\text{La}+\text{Ce}+\text{Pr}+\text{Nd}+\text{Sm}+\text{Eu}$; 重稀土元素 $\Sigma\text{HREE}=\text{Gd}+\text{Tb}+\text{Dy}+\text{Ho}+\text{Er}+\text{Tm}+\text{Yb}+\text{Lu}$; LREE/HREE (轻稀土元素/重稀土元素) $=(\text{La}+\text{Ce}+\text{Pr}+\text{Nd}+\text{Sm}+\text{Eu})/(\text{Gd}+\text{Tb}+\text{Dy}+\text{Ho}+\text{Er}+\text{Tm}+\text{Yb}+\text{Lu})$; $\delta\text{Eu}=2\text{Eu}_N/(\text{Sm}+\text{Gd})_N$, 式中 N 表示经球粒陨石标准化比值, 球粒陨石稀土元素含量据 Boynton, 1984

为 $16.04 \times 10^{-6} \sim 22.89 \times 10^{-6}$, 平均值为 20.38×10^{-6} ; 张家坡组稀土元素总量为 $133.58 \times 10^{-6} \sim 193.17 \times 10^{-6}$, 平均值为 171.24×10^{-6} ; 轻稀土元素含量为 $119.02 \times 10^{-6} \sim 173.32 \times 10^{-6}$, 平均值为 153.44×10^{-6} ; 重稀土元素含量为 $14.56 \times 10^{-6} \sim 19.85 \times 10^{-6}$, 平均值为 17.80×10^{-6} 。新近系泥岩轻稀土元素含量均明显高于重稀土元素含量, 高陵群、蓝田-灞河组、张家坡组轻、重稀土元素含量比值的平均值分别为 8.67、9.40、8.62, 反映新近系泥岩轻稀土元素相对富集, 而重稀土元素相对亏损, 可能与新近系泥岩稀土元素吸附或解吸分馏有关, 其中蓝田-灞河组稀土元素总量平均值、轻稀土元素含量平均值、重稀土元素含量平均值及轻重稀土元素含量比值平均值均高于张家坡组, 可能与蓝田-灞河组泥岩稀土元素吸附或解吸分馏强烈有关。

用球粒陨石标准值对新近系泥岩稀土元素进行标准化处理, 稀土元素配分模式图(图 4-a)整体呈右倾趋势, 反映新近系泥岩轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, 与稀土元素分析测试结果一致; 稀土元素配分模式图中 Eu 元素处呈明显的“V”字形(图 4-a), 其 Eu 异常系数均小于 1 ($\delta\text{Eu} = 0.61 \sim 0.76$, 平均值为 0.67), 显示明显的 Eu 负异常。

4 讨论

4.1 物源特征

4.1.1 源岩属性

主量元素 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值是反映沉积物源岩属性的重要参数。Hayashi et al. (1997) 研究显示, 砂岩和泥岩中的主量元素 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值与源岩基本相同。

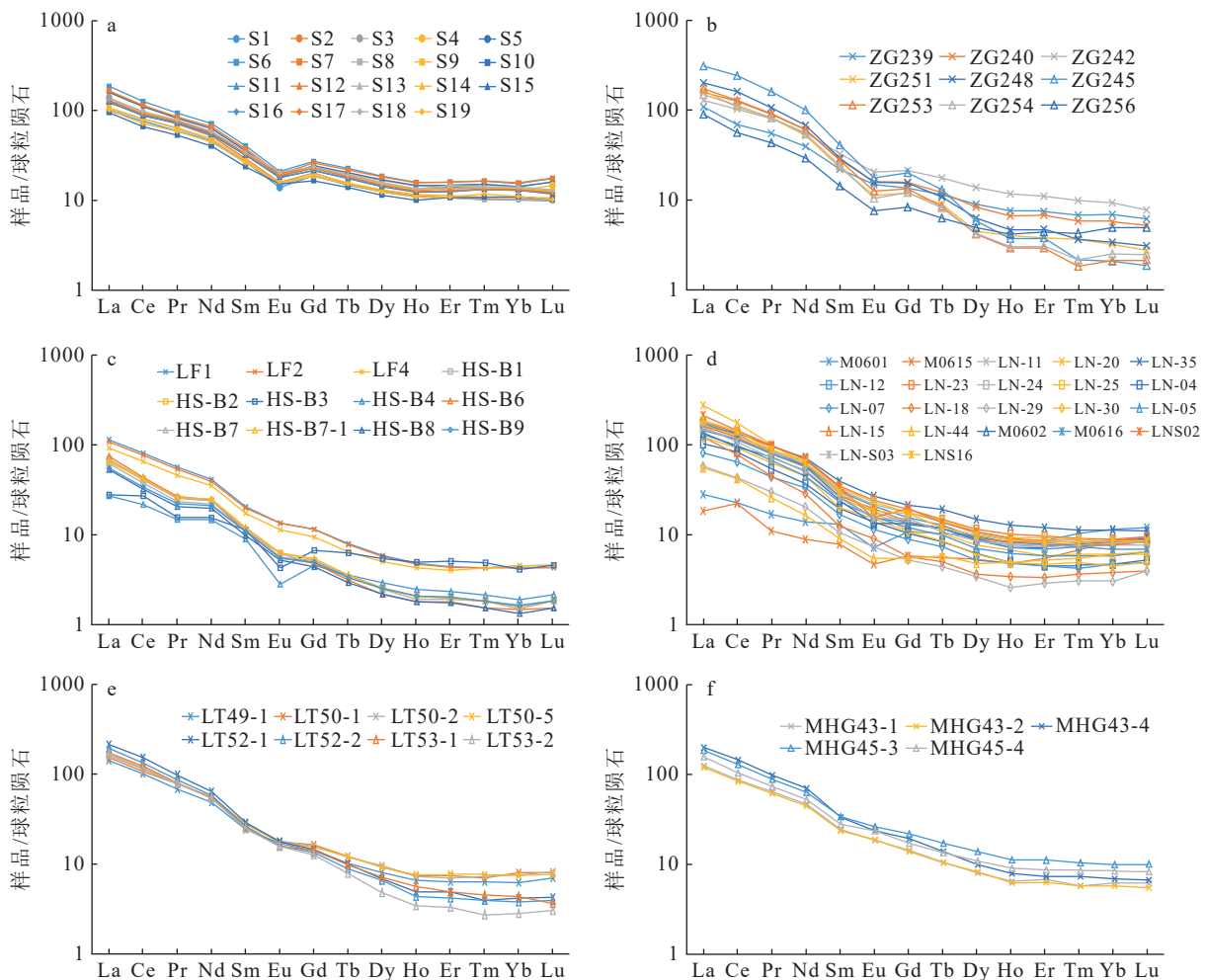


图 4 关中盆地新近系泥岩和邻区不同岩体稀土元素配分模式图

(b, c 数据据郭波等, 2009; 张志华等, 2014; 王建其等, 2015; 张兴康等, 2015; d, e, f 数据据齐秋菊等, 2012; 刘锐等, 2014; 球粒陨石标准化数据据 Boynton, 1984)

Fig. 4 Distribution patterns of rare earth elements in Neogene mudstone and adjacent rock mass in Guanzhong Basin

多数情况下, 泥质岩与源岩之间的 Al 和 Ti 分馏不明显, 可能是因为风化后的岩石中绝大多数 Ti 赋存在绿泥石和其他粘土矿物中, 或以微量钛铁矿的内含物形式存在于硅酸盐矿物中, 而非以游离的钛铁矿颗粒形式存在, 因此, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值能很好地指示泥质岩的源岩, 特别是其源岩为火成岩时。Girty et al. (1996) 认为, 当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 14$ 时, 源岩可能来自铁镁质岩; 当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值介于 19~28 之间时, 源岩可能来源于长英质岩。新近系泥岩样品的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值分布于 18.99~24.89 之间, 平均值为 22.02(表 1), 说明新近系泥岩的源岩主要为长英质岩。

微量元素已被广泛用于沉积岩母岩特性研究, 利用 La/Sc-Co/Th 和 Hf-La/Th 图解进一步对源岩属性进行判别(Gu et al., 2002; Wang et al., 2012)。在 La/Sc-Co/Th 图解(图 5-a)中, 新近系泥岩样品的 La/Sc 值均高于长英质火山岩, Co/Th 值均介于长英质火成岩和安山岩之间, 总体落在靠近长英质火成岩端; 在 Hf-La/Th 图解中, 大部分样品点落在长英质源区, 个别落在长英质、基性岩混合物源区(图 5-b), 与 La/Sc-Co/Th 图解分析结果一致, 说明新近系泥岩的源岩以长英质岩为主, 同时存在一定的中—基性火成岩。综合主量元素比值和微量、稀土元素图解说明, 新近系泥岩的源岩主要为长英质岩, 含有一定的中—基性火成岩。

沉积岩稀土元素特征主要受物源区岩石组成控制, 能够反映源岩的稀土元素特征。相同来源的沉积岩稀土元素配分模式相似, 因此稀土元素配分曲线总体形态特征、倾斜程度、Eu 异常等特征的相互对比已成为物源研究中的重要判别指标(毛光周等, 2011)。为了进一步判别源岩属性, 笔者统计了近年来前人在盆地边缘已经发表的不同时期、不同岩体的稀土元素数据(郭波等, 2009; 齐秋菊等, 2012; 刘锐等, 2014; 张志华等, 2014; 王建其等, 2015; 张兴康等, 2015), 采用 Boynton (1984) 推荐的球粒陨石值对不同岩体进行标准化处理, 绘制相应的稀土元素配分模式图, 与关中盆地新近系泥岩稀土元素配分模式图进行对比分析(图 4)。

关中盆地新近系泥岩的稀土元素配分模式相似, 均表现为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型, 存在明显的 Eu 负异常, 说明新近系泥岩物源较一致, 相对稳定(图 4-a); 盆地南部的太白岩体、华山岩体稀土元素配分模式与关中盆地新近系泥岩稀

土元素配分模式相似(图 4-b, c)(郭波等, 2009; 张志华等, 2014; 王建其等, 2015; 张兴康等, 2015), 太白岩体、华山岩体均表现为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型, 太白岩体(δEu 值 0.58~0.83, 平均值 0.68)和华山岩体(δEu 值 0.42~0.86, 平均值 0.71)与关中盆地新近系泥岩 Eu 异常系数(δEu 值 0.61~0.76, 平均值 0.67)高度相似, 说明关中盆地新近系泥岩与盆地南缘太白岩体、华山岩体具有亲缘性。前人通过野外地质调查和岩相学手段对北部太白岩体和华山岩体进行鉴别, 结果显示, 北部太白岩体岩性为正长花岗岩, 华山岩体岩性为黑云母二长花岗岩(郭波等, 2009; 张志华等, 2014; 王建其等, 2015; 张兴康等, 2015), 因此, 新近系泥岩的源岩主要来自关中盆地南缘太白岩体正长花岗岩和华山岩体黑云母二长花岗岩。相比而言, 虽然老牛山岩体、蓝田岩体、牧护关岩体稀土元素配分模式特征也表现为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型(图 4-d~f)(齐秋菊等, 2012; 刘锐等, 2014), 但是其配分曲线形态、Eu 异常差异明显, 其中 Eu 异常弱甚至出现正异常, 说明三者并不是关中盆地新近系泥岩的母岩。

综合新近系泥岩的主量元素 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值、微量元素 La/Sc-Co/Th 和 Hf-La/Th 图解、稀土元素配分模式, 以及周缘不同岩体稀土元素配分模式分析结果, 关中盆地新近系泥岩的源岩主要为盆地南缘太白岩体正长花岗岩、华山岩体黑云母二长花岗岩, 含有一定的中—基性火成岩。

4.1.2 源区构造背景

基于新近系泥岩样品主量元素分析测试结果, 结合 McLennan et al. (1993) 提出的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图 6-a)判别源区构造背景, 样品点主要落在活动大陆边缘区, 大部分在长英质侵入岩碎屑的岛弧环境附近, 部分落在活动大陆边缘与被动大陆边缘交界部位, 说明新近系泥岩的源区构造背景主要为活动大陆边缘环境。

Bhatia et al. (1986) 根据更加稳定的 La、Sc、Zr 等微量、稀土元素特征, 总结出了适用泥岩样品的构造背景判别图解, 利用其可以对前述稳定性较弱的主量元素判别图解进行补充和论证。新近系泥岩样品 La/Sc-Ti/Zr 构造背景图解显示(图 6-b), 样品点主要落在活动大陆边缘区, 部分投点落在活动大陆边缘和大陆岛弧交界处。综合分析泥岩样品主

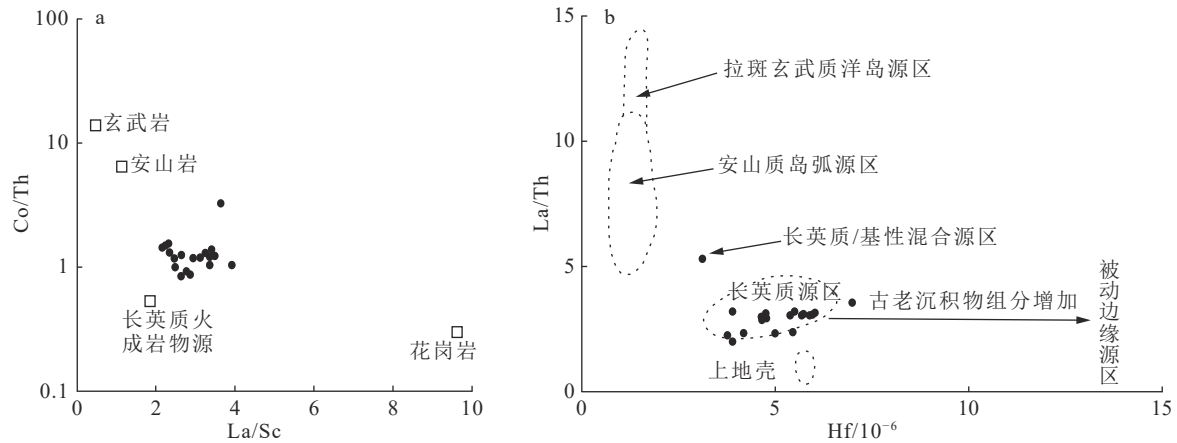


图5 关中盆地新近系泥岩源岩属性 La/Sc-Co/Th 图解(a)和 Hf-La/Th 图解(b)

Fig. 5 Attributes of Neogene mudstone source rocks in Guanzhong Basin La/Sc-Co/Th diagram (a) and Hf-La/Th diagram (b)

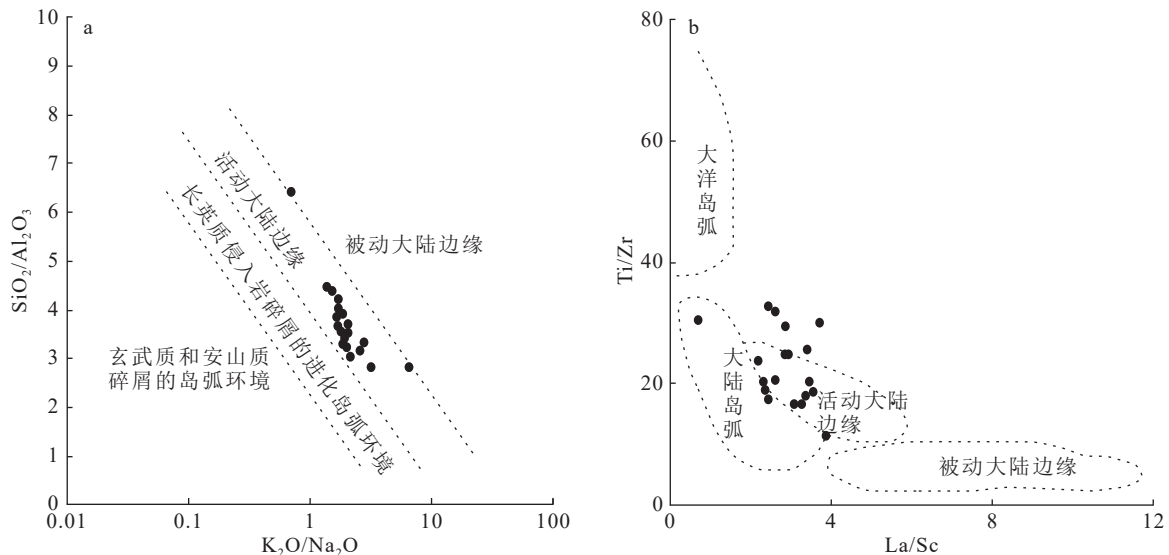


图6 关中盆地新近系泥岩源区构造背景 K₂O/Na₂O-SiO₂/Al₂O₃ 图解(a)和 La/Sc-Ti/Zr 图解(b)

Fig. 6 K₂O/Na₂O-SiO₂/Al₂O₃ diagram (a) and La/Sc-Ti/Zr diagram (b) of tectonic background of Neogene mudstone source area in Guanzhong Basin

量、微量、稀土元素构造背景判别图解, 关中盆地新近系泥岩的源区构造背景主要为活动大陆边缘环境。

关中盆地南部紧邻的秦岭造山带, 是华北板块与扬子板块长期汇聚形成的复合造山带 (Mattaue et al., 1985; Kröner et al., 1988), 其在前中生代长期受冈瓦纳、劳亚、古特提斯等古板块构造的控制, 形成以东西向为主的主造山期构造; 中新生代以来位于太平洋板块、印度板块和欧亚板块 3 个构造动力学系统的交汇复合部位, 东部更多受到太平洋板块的影响, 构造体制发生转变。侏罗纪末期—白垩纪初

期, 随着太平洋板块向欧亚板块的俯冲, 区域构造体制发生转换 (毛景文等, 2005), 秦岭造山带南北向挤压作用消失, 转换为强烈的伸展作用, 导致秦岭乃至中国东部地区岩石圈发生强烈抬升和拆沉, 引发幔源岩浆活动, 产生大量的岩浆作用, 形成大规模花岗岩类 (吴发富, 2013)。如在华北地块南缘形成大量的晚中生代花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得华山岩体的年龄为 133.8±1.1 Ma (郭波等, 2009), 太白岩体正长花岗岩年龄为 153.17±0.89 Ma 和 151.0±1.4 Ma (张志华等, 2014), 表明岩体形成于侏罗纪—白垩纪。前文已讨论了关中盆地新近系泥岩

的源岩属性, 母岩主要为花岗岩, 且考虑到前人认为华北陆块南缘的大规模花岗岩体形成于侏罗纪末期—白垩纪初期太平洋板块向欧亚板块的俯冲, 使得秦岭造山带南北向挤压构造环境转变为强烈的伸展构造环境, 与活动大陆边缘相关(张国伟等, 1996; 翟明国等, 2004; 毛景文等, 2005; 郭波等, 2009; 齐秋菊等, 2012; 刘锐等, 2014; 张志华等, 2014; 王建其等, 2015; 张兴康等, 2015)。通过对比发现, 本次研究的源区构造背景与其一致, 说明关中盆地新近系泥岩继承了母岩形成时的动力学背景。

4.2 古沉积环境

4.2.1 古气候

化学蚀变指数(*CIA*)、微量元素比值、古生物特征均能反映古气候特征, 对古气候演化具有重要的指示作用。随着泥质岩主量元素计算的化学蚀变指数(*CIA*)(Nesbitt et al., 1982)等概念的提出, 众多学者开始采用泥质岩指数定量分析物源区的风化程度和古气候, 这些指数对于重大气候事件具有重要指示作用。化学蚀变指数计算方法如下:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

CaO*计算公式为(McLennan, 1993):

$$CaO_{residual} = CaO - P_2O_5 \times \frac{10}{3} \quad (\text{若 } CaO_{residual} < Na_2O, \\ CaO^* = CaO_{residual}; \text{ 若 } CaO_{residual} > Na_2O, \\ CaO^* = Na_2O) \quad (2)$$

再旋回的母岩物质在经历二次风化后会导致 *CIA* 值发生改变, 从而无法准确反映源区的风化程度和古气候。成分变异指数(*ICV*)可用于判断物源区物质是否发生再旋回作用(Cox et al., 1995)。成分变异指数(*ICV*)计算公式为:

$$ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3 \quad (3)$$

当 *ICV* < 1 时, 代表物源区物质可能经历了再旋回作用; 当 *ICV* > 1 时, 可能属于构造活动背景下的首次沉积(Kamp et al., 1985)。根据关中盆地新近系泥岩主量元素分析结果计算了 *ICV* 值, 为 1.01~1.82, 平均值为 1.39。样品的 *ICV* 值均大于 1, 因此所有样品均可排除再旋回作用的影响。

前人研究显示, 当 *CIA* ≤ 50 时, 表示母岩未风化; 当 50 < *CIA* ≤ 65 时, 表示冷干气候条件下的弱风化;

当 65 < *CIA* ≤ 85 时, 表示暖湿气候条件下的中等风化; 当 85 < *CIA* ≤ 100 时, 表示热潮气候条件下的强烈风化(Nesbitt et al., 1982; Passchier et al., 2008)。关中盆地新近系泥岩样品化学蚀变指数见表 1。*CIA* 值为 61.34~76.78, 平均值为 70.76, 其中高陵群 *CIA* 值为 76.72; 蓝田—灞河组 *CIA* 值为 71.56~76.78, 平均值为 74.09; 张家坡组 *CIA* 值为 61.34~71.71, 平均值为 68.60。高陵群和蓝田—灞河组 *CIA* 值相近, 均高于张家坡组 *CIA* 值, 且在垂向上由高陵群至张家坡组 *CIA* 值呈逐渐减小的趋势。*CIA* 值指示, 高陵群和蓝田—灞河组在暖湿气候条件下经历了中等程度风化作用, 部分张家坡组样品 *CIA* 值小于 65, 指示张家坡组沉积期的古气候发生了转变, 由暖湿气候转变为冷干气候。

$Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O$ (A-CN-K) 三角图是对化学蚀变指数的图解表述(图 7)。关中盆地新近系泥岩样品点均落在靠近 Al_2O_3 端, 绝大多数样品点落在中等程度风化区域; A-CN-K 三角图亦显示新近系泥岩母岩主要为花岗岩, 同时存在一定的中—基性火成岩, 与源岩属性分析结果一致; 表 1 数据显示, 主量元素 K_2O 含量平均值为 3.08%, 与 UCC 中 K_2O 含量 3.19% 相当, 表示在成岩过程中存在轻微的钾交代作用, K 元素在沉积物成岩过程中发生了一定程度的重新分配, 本次 *CIA* 值计算采用校正后的 K_2O 含量, 使计算结果更准确。

沉积物中微量元素含量易受古气候影响而发生变化, 在不同气候条件下微量元素的富集程度差异明显, 如 Rb 元素在风化作用中相对稳定, 而 Sr 元素容易发生淋失。在气候湿润时由于降水较多、风化作用较强烈, Sr 易发生淋失, 导致 Rb/Sr 值增大; 在气候干旱时降水较少、风化作用较弱, 母岩中残留较多的 Sr, Rb/Sr 值减小(叶荷等, 2010), 即 Rb/Sr 高值指示湿润气候, Rb/Sr 低值指示干旱气候。根据关中盆地新近系泥岩微量元素分析结果计算 Rb/Sr 值为 0.26~0.78, 平均值为 0.48, 其中高陵群 Rb/Sr 值为 0.75; 蓝田—灞河组 Rb/Sr 值为 0.57~0.78, 平均值为 0.68; 张家坡组 Rb/Sr 值为 0.26~0.45, 平均值为 0.36。高陵群和蓝田—灞河组计算的 Rb/Sr 值相近, 均高于张家坡组 Rb/Sr 值, 且在垂向上由高陵群至张家坡组 Rb/Sr 值逐渐减小。微量元素 Rb/Sr 值反映, 高陵群和蓝田—灞河组沉积期处于湿润气候环境, 张家坡组 Rb/Sr 值差异较大, 指示张家坡组沉积期古气

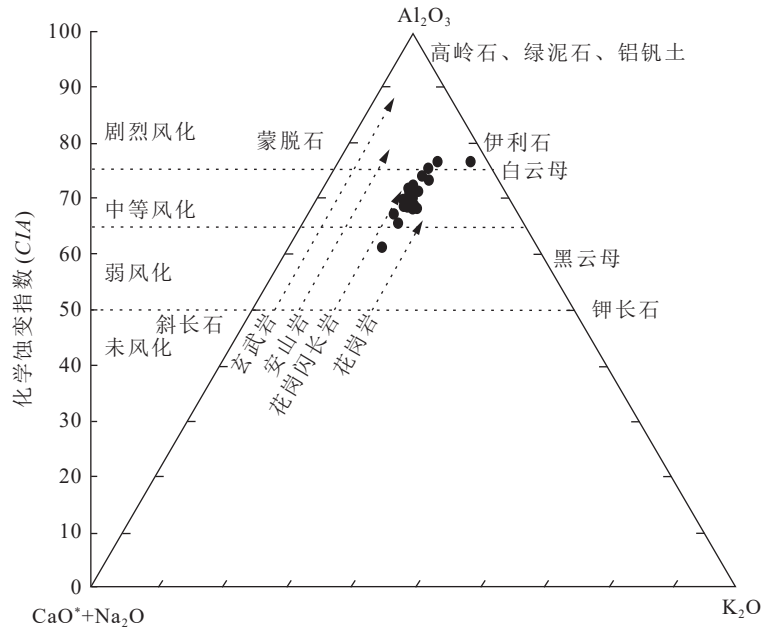


图7 关中盆地新近系泥岩 A-CN-K 图解

Fig. 7 A-CN-K diagram of Neogene mudstone in Guanzhong Basin

候环境由湿润气候环境转变为干旱气候环境。Rb/Sr 值变化规律与化学蚀变指数演变规律一致,再次印证高陵群和蓝田-灞河组沉积期处于湿润气候环境,张家坡组沉积期转变为干旱气候环境。

关中盆地钻井、周边野外露头孢粉资料及前人研究成果显示,高陵群早期湖泊分布广泛,介形类化石异常丰富,扁平河星虫、湖华虫、小玻璃虫等大量出现,在沱河野外剖面中也发现河蚌和大量介形虫化石,反映当时以气候非常湿润;根据固市凹陷荔参1井高陵群孢粉实验结果显示,高陵群植被以阔叶林为主,孢粉特征综合反映了高陵群沉积期处于暖湿气候环境(李克永等, 2021),高陵群孢粉特征与 CIA 和古气候指标 Rb/Sr 值综合反映的结果相匹配。孢粉资料显示,灞河组下段植被以阔叶树木为主,以暖湿气候为主;灞河组上段,草本植物占主要地位,以草原型植被为主,与灞河组上段相比气候发生转型,以干热气候为主;蓝田组哺乳类动物化石主要为森林型动物,三趾马类型发生变化,以森林型环齿三趾马为主,反映自然环境由草原转变为森林,气候由冷干向暖湿转变(刘护军等, 2004)。化石特征显示,蓝田-灞河组沉积期整体处于暖湿气候,中期存在暖湿向干冷转型,后期再次转变为暖湿气候,这与 CIA 值和微量元素 Rb/Sr 值反映的古气候结果一致。张家坡组在关中盆地沉积范围广,盆地内部孢

粉资料丰富。孢粉资料显示,张家坡组早期植物组合以阔叶林为主,代表暖湿的气候环境;之后植物类型转变为以针叶林为主的针阔叶混交林,代表干冷气候环境,即古气候由暖湿逐渐转变为干冷(薛祥煦, 1981; 张云翔等, 1999),孢粉资料反映的气候转型与化学蚀变指数和 Rb/Sr 值指示的结果相匹配。

4.2.2 古盐度

古盐度是反映古环境的重要指标之一,古盐度和沉积古环境的耦合关系对于沉积古环境分析具有良好的指示作用。随着古盐度的升高, Ba 元素以 BaSO_4 形式析出, Sr 以 SrSO_4 形式沉淀, Sr 含量、Sr/Ba 值与水体古盐度呈正相关关系,因此 Sr 含量、Sr/Ba 值可反映出地质历史时期的古盐度变化。前人研究显示,当 Sr 含量介于 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 之间时指示水体为淡水环境,含量介于 $800 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 之间时指示为咸水环境(刘刚, 2007);当 $\text{Sr/Ba} < 0.6$ 时表示淡水环境; $0.6 \leq \text{Sr/Ba} \leq 1.0$ 时为半咸水环境; $\text{Sr/Ba} > 1.0$ 时表示咸水环境(郑荣才等, 1999)。新近系泥岩样品微量元素分析测试结果显示(表 2), Sr 含量介于 $184.36 \times 10^{-6} \sim 419 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 283.24×10^{-6} ; Sr/Ba 值介于 0.34~1.02 之间,平均值为 0.57,新近系泥岩沉积期水体整体为淡水、半咸水环境,其中 Sr 含量和 Sr/Ba 值均指示高陵群和蓝田-灞河组沉积期水体表现为淡水性质;张家坡组 Sr 含量

介于 $232.03 \times 10^{-6} \sim 419 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 310.93×10^{-6} ; Sr/Ba 值分布于 0.43~1.02 之间, 平均值为 0.64, 古盐度比高陵群和蓝田-灞河组明显增大, 水体古盐度整体表现为淡水、半咸水质。古盐度的变化在一定程度上也反映了古气候的变化, 古气候条件通过蒸发/降雨量的变化直接控制了水体古盐度, 而古盐度变化也间接印证了张家坡组古气候发生转变, 由暖湿气候转为冷干气候。

4.2.3 古氧化还原环境

某些微量元素对氧化还原环境变化十分敏感, 表现为含量的差异性, 如 V、Ni 等微量元素易被粘土矿物等吸附沉淀, V 在还原条件下易被吸附, Ni 在还原环境下易于富集, 因此 $V/(V+Ni)$ 、 V/Ni 值可指示氧化还原环境。前人研究成果显示, 当 $V/Ni < 1$ 时为氧化环境, $V/Ni > 1$ 时为还原环境(李克永等, 2021); $V/(V+Ni) < 0.46$ 时为氧化环境; $V/(V+Ni)$ 介于 0.46~0.60 之间时, 指示贫氧环境; $V/(V+Ni)$ 介于 0.60~0.89 之间时, 指示还原环境(施春华等, 2004)。根据关中盆地新近系泥岩微量元素分析测试结果计算 V/Ni 、 $V/(V+Ni)$ 值, V/Ni 值介于 1.85~2.57 之间, 平均值为 2.31; $V/(V+Ni)$ 值介于 0.65~0.72 之间, 平均值为 0.70。两项参数综合反映新近系泥岩沉积期处于还原环境。

稀土元素 Ce 异常可用于指示水体氧化还原环境, 在不同环境中 Ce 含量差异明显。氧化环境中 Ce^{3+} 被氧化为难溶解的 Ce^{4+} , 水体亏损 Ce 而沉积物中富集 Ce, 在还原环境下沉积物中的 Ce^{4+} 重新转化为 Ce^{3+} , 释放到水体中, 沉积物亏损 Ce。通常认为, 当 $\delta Ce > 1$ 时指示氧化环境; $\delta Ce < 1$ 时指示还原环境(Murray et al., 1990)。新近系泥岩稀土元素 δCe 值介于 0.89~0.98 之间, 平均值为 0.92, 其中高陵群 δCe 值为 0.96; 蓝田-灞河组 δCe 值介于 0.90~0.93 之间, 平均值为 0.92; 张家坡组 δCe 值分布于 0.89~0.94 之间, 个别可达 0.98, 平均值为 0.90。蓝田-灞河组和张家坡组 δCe 值变化范围相近, 但与 Ce 异常界限值 1 差距较大, 指示蓝田-灞河组和张家坡组沉积期主要为还原环境; 高陵群 δCe 值为 0.96, 个别张家坡组 δCe 值达 0.98, 与界限值 1 接近, 表示存在氧化-还原过渡环境。稀土元素 Ce 异常整体反映新近系泥岩沉积期主要为还原环境。综合各项氧化还原指标说明, 关中盆地新近系泥岩沉积期主要为还原环境, 存在氧化-还原过渡环境。

4.3 物源和古沉积环境恢复对地热资源的影响

新近系泥岩物源和古沉积环境恢复能够指示同沉积时期砂岩物源和古沉积环境特征。目前关中盆地开发利用的地热资源主要为新生界砂岩、砂砾岩孔隙裂隙型地热资源, 开发利用层位主要为新近系热储层, 热储层参数主要包括地层厚度、砂岩厚度、储层物性、地层温度等, 这些参数对于地热资源评价具有重要指示意义。物质来源对于地层平面展布特征和砂体平面展布特征具有重要控制作用, 与物源距离越近, 地层厚度和砂体厚度相应地增大, 查明物源特征对于关中盆地地热资源量计算和地热资源有利区划分具有现实指导意义。

关中盆地开发利用的地热资源主要是水热型地热资源, 水源补给成为不可或缺的一部分。地下热水的补给来源主要是大气降水、地表水、基岩裂隙水, 大气降水主要受气候条件控制, 因此气候环境对于地下热水补给具有重要影响。温暖湿润的气候环境雨水充沛, 水源补给充足, 大气降水能够沿着通道下渗并储存在热储层中, 温度高、水量大的热储层具有十分重要的开发利用价值。化学蚀变指数、微量元素比值、古生物特征及古盐度均能在一定程度上反映古气候特征, 查明古气候特征对于确定关中盆地地热资源开发利用重点层位具有现实意义。

5 结 论

(1) 关中盆地新近系泥岩的源岩构造背景主要为活动大陆边缘, 源岩主要为关中盆地南缘太白岩体正长花岗岩、华山岩体黑云母二长花岗岩, 含有一定的中-基性火成岩。

(2) 化学蚀变指数 CIA 值为 61.34~76.78, 平均值为 70.78, 反映新近系泥岩经历了中等程度的风化作用, 指示高陵群和蓝田-灞河组沉积期处于暖湿气候环境, 张家坡组沉积期气候发生转型, 由暖湿气候转变为冷干气候。地球化学指标反映, 新近系泥岩沉积期主要处于还原环境, 水体古盐度整体表现为淡水、半咸水环境。

(3) 查明新近系泥岩物源和古沉积环境特征对于地热资源量计算、地热资源甜点区划分及开发利用重点层位确定具有现实指导意义。

References

Bhatia R M, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of

- graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 92(2): 181–193.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 2(2): 63–114.
- Cao H X, Li W H, Chen Q H, et al. 2008. Center of Late Triassic Subsidence and depocenter for the Southern Ordos Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(2): 159–164 (in Chinese with English abstract).
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940.
- Girty G H, Ridge D L, Knaack C, et al. 1996. Provenance and Depositional Setting of Paleozoic Chert and Argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 107–118.
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al. 2002. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Turbidites in Hunan, South China: Geochemical Evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393–407.
- Guo B, Zhu L M, Li B, et al. 2009. Zircon U–Pb age and Hf isotopic composition of the Huashan and Heyu granites plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting[J]. *Petrological Journal*, 25(2): 265–281 (in Chinese with English abstract).
- Guo W, Zhang W G, Li Y H, et al. 2020. Geochemistry of 7 member shale of the dameigou formation in the Northern Qaidam Basin, China: significance and implication for provenance and source weathering in the late Middle Jurassic[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(3): 676–686 (in Chinese with English abstract).
- Han H Y, Zhang Y, Yuan Z X. 2002. The evolution of Weihe down–faulted basin and the movement of the fault blocks[J]. *Journal of Seismological Research*, 25(4): 362–368 (in Chinese with English abstract).
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115–4137.
- Hofer G, Wagreich M, Neuhuber S. 2013. Geochemistry of fine–grained sediments of the upper Cretaceous to Paleogene Gosau Group (Austria, Slovakia): Implications for paleoenvironmental and provenance studies[J]. *Geoscience Frontiers*, 4(4): 449–468.
- Hong Z L, Zhang Y L, Zhou Y. 2019. Research on the models of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin[J]. *Geology in China*, 46(5): 1224–1235 (in Chinese with English abstract).
- Jia J L, Bechtel A, Liu Z, et al. 2013. Oil shale formation in the Upper Cretaceous Nenjiang Formation of the Songliao Basin (NE China): Implications from organic and inorganic geochemical analyses[J]. *International Journal of Coal Geology*, 113(4): 11–26.
- Kaakinen A, Lunkka P J. 2003. Sedimentation of the Late Miocene Bahe Formation and its implications for stable environments adjacent to Qinling mountains in Shaanxi, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(1): 67–78.
- Kamp D V C P, Leake B E. 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science*, 76(4): 411–449.
- Kröner A, Compston W, Zhang G W, et al. 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone–gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single–grain zircon dating[J]. *Geology*, 16(3): 211–215.
- Lee Y I. 2002. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic–early Mesozoic mudrocks of the Pyeongan Supergroup, Korea[J]. *Sedimentary Geology*, 149(4): 219–235.
- Lei K Y, Liu C Y, Zhang L, et al. 2017. Element Geochemical characteristics of the Jurassic mudstone in the Northern Ordos Basin: implications for tracing sediment sources and paleo–environment restoration[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(3): 621–636 (in Chinese with English abstract).
- Li C K, Wu W Y, Qiu Z D. 1984. Chinese neogene: subdivision and correlation[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 22(3): 163–178, 257–258 (in Chinese with English abstract).
- Li K Y, Xu S K, Li W H, et al. 2021. Restoration of Neogene sedimentary paleoenvironment in Gushi Sag, Weihe Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 56(4): 1134–1146 (in Chinese with English abstract).
- Li Q, Xu S L, Chen H D, et al. 2018. Geochemical characteristics and paleo–environmental implication of Middle Permian Maokou Formation in Wangcang region, Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 45(3): 268–281 (in Chinese with English abstract).
- Li Z C. 2017. The lithofacies paleogeography and paleoenvironmental evolution of the cenozoic in the Weihe Basin, China[D]. Doctoral Dissertation of Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Li Z C, Li W h, Li Y X, et al. 2016. Cenozoic stratigraphy and paleoenvironment in the Weihe area, Shaanxi Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 40(2): 168–178 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Li Y X, Li W H, et al. 2021. Sedimentary characteristics of Paleogene–Neogene in Fenwei Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 56(4): 1120–1133 (in Chinese with English abstract).
- Liu D S, Ding M L, Gao F Q. 1960. Cenozoic stratigraphic profiles of Lantian, Xi'an[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(4): 199–208 (in Chinese with English abstract).
- Liu G. 2007. The application of geochemical analysis to study of sedimentary environment of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(4): 335–340 (in Chinese with English abstract).
- Liu H J, Xue X X. 2004. Discussion on the Cenozoic and its chronology in the Weihe River Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 26(4): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Liu R, Chen M, Tian X S, et al. 2014. Geochemical, zircon SIMS U–Pb geochronological and Hf isotope study on Lantian and Muhuguan

- plutons in Eastern Qinling, China: petrogenesis and tectonic implications[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(4): 469–480 (in Chinese with English abstract).
- Luo Q Y, Zhong N N, Wang Y N, et al. 2013. Geochemistry of mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation shales in Northern North China: implications for provenance and source weathering[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1913–1921 (in Chinese with English abstract).
- Mao G Z, Liu C Y. 2011. Application of geochemistry in provenance and depositional setting Analysis[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 33(4): 337–348 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in Northern China and corresponding geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 171–190 (in Chinese with English abstract).
- Mattauer M, Matte P, Malavieille A L J, et al. 1985. Tectonics of the Qinling Belt: build-up and evolution of eastern Asia[J]. *Nature*, 317(6037): 496–500.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 101(2): 295–303.
- McLennan S M, Hemming S, Mcdaniel D K, et al. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. *Special Paper of the Geological Society America*, 284(2): 21–40.
- Moosavirad S M, Janardhana M R, Sethumadhav M S, et al. 2011. Geochemistry of lower Jurassic shales of the Shemshak Formation, Kerman Province, Central Iran: Provenance, source weathering and tectonic setting[J]. *Chemie der Erde—Geochemistry*, 71(3): 279–288.
- Mu G X, Li F, Yan W Z, et al. 2014. The occurrence regularity and key technology of development and utilization of geothermal resources in Guanzhong Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Murray R W, Buchholtz T B M R, Jones L D, et al. 1990. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. *Geology*, 18(3): 268–271.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Paikaray S, Banerjee S, Mukherji S. 2007. Geochemistry of shales from the Paleoproterozoic to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: Implications on provenance, tectonics and paleoweathering[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(1): 34–48.
- Passchier S, Kriisek L A. 2008. Oligocene–Miocene Antarctic continental weathering record and paleoclimatic implications, Cape Roberts drilling Project, Ross Sea, Antarctica[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 260(1/2): 30–40.
- Prego R, Caetano M, Vale C, et al. 2009. Rare earth elements in sediments of the Vigo Ria, NW Iberian Peninsula[J]. *Continental Shelf Research*, 29(7): 896–902.
- Qi Q J, Wang X X, Ke C H, et al. 2012. Geochronology and origin of the Laoniushan complex in the southern margin of North China Block and their implications: new evidences from zircon dating, Hf isotope and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 279–301 (in Chinese with English abstract).
- Rao S, Jiang G Z, Gao Y J, et al. 2016. The thermal structure of lithosphere and heat source mechanism of geothermal field in Weihe Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(6): 2176–2190 (in Chinese with English abstract).
- Ren Z L, Liu R C, Ren W B, et al. 2020. Distribution of geothermal field and its controlling factors in Weihe Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1938–1949 (in Chinese with English abstract).
- Rimmer M S, Thompson A J, Goodnight A S, et al. 2004. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian–Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 215(1/2): 125–154.
- Shao Y B, Guo Y H, Qin Y, et al. 2011. Distribution characteristic and geological significance of rare earth elements in Lopingian mudstone of Permian, Panxian county, Guizhou province[J]. *Mining Science and Technology (China)*, 21(4): 469–476.
- Shi C H, Hu R Z, Yan J X. 2004. Sedimentary geochemistry of the Qixia Formation and its environmental implication[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(2): 144–148 (in Chinese with English abstract).
- Sun H L. 2015. The bearing features and genetic model for geothermal resources in Guanzhong Basin[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution[J]. *The Journal of Geology*, 94(4): 57–72.
- Wang B, Zheng H B, He Z, et al. 2014. Middle Miocene eolian sediments on the southern Chinese Loess Plateau dated by magnetostratigraphy[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 411(1): 257–266.
- Wang G L, Liu Z M, Lin W J. 2004. Tectonic control of geothermal resources in the peripheral of Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 44–51 (in Chinese with English abstract).
- Wang J Q, Liu C Y, Gao F, et al. 2015. Pre-Cenozoic geological characteristics and oil–gas significance in Weihe Basin, Shaanxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(10): 1981–1991 (in Chinese with English abstract).
- Wang J Q, Zhu L M, Guo B, et al. 2015. Characteristics of Sr–Nd and Pb isotopic composition and its geological significance of granitic plutons in the Huashan, Laoniushan and Heyu area at the southern margin of North China Craton[J]. *Mineralogy and Petrology*, 35(1): 63–72 (in Chinese with English abstract).
- Wang W, Zhou M, Yan D, et al. 2012. Depositional age, provenance, and tectonic setting of the Neoproterozoic Sibao Group, southeastern Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 192(1): 107–124.
- Wu F F. 2013. Research on magmatite and its metallogenic tectonic setting in the Shanyang–Zhushui area, Middle Qinling Orogenic Belt[D]. Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).

- Xue X X. 1981. An early pleistocene mammalian fauna and its stratigraphy of The River You, Weinan Shensi[J]. *Vertebrate Palasiatica*, 19(1): 35–44, 103–104 (in Chinese with English abstract).
- Yang X F, He D F, Wang Q C, et al. 2012. Provenance and tectonic setting of the Carboniferous sedimentary rocks of the East Junggar Basin, China: Evidence from geochemistry and U–Pb zircon geochronology[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 567–584.
- Ye H, Zhang K X, Ji J L, et al. 2010. Major and element characters of the sediments paleoclimatic evolution during about 23.1–5.0 Ma in Xunhua Basin, Qinghai[J]. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 811–820 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Meng Q R, Liu J M, et al. 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 11(3): 285–297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Meng Q R, Yu Z P, et al. 1996. Orogenic process and dynamic characteristics of Qinling orogenic belt[J]. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193–200 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S Q, Wu L J, Guo J M, et al. 1985. An interpretation of the Dss Date on Menyuan–Pingliang–Weinan profile in west China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 28(5): 460–472 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X K, Ye H S, Li Z Y, et al. 2015. Zircon U–Pb ages, Hf isotopic and geochemistry of Dafuyu granitoid pluton from Huashan complex batholith in Xiaolinling[J]. *Mineral Deposits*, 34(2): 235–260 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y X, Sun D H, An Z S, et al. 1999. Mammalian fossils from late pliocene (lower mn 16) of Lingtai, Gansu Province[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 37(3): 190–199 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y X, Xue X X. 1996. Discussus on subdivision of late miocene in Lantian area, Middle of Shaanxi[J]. *Northwest Geoscience*, 17(1): 59–62 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Lai S C, Qin J F. 2014. Petrogenesis and its geological significance of the Late Mesozoic syenogranite from the Taibai Mountain, North Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3242–3254 (in Chinese with English abstract).
- Zheng R C, Liu M Q. 1999. Study on paleosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 22–27 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y, Hong Z L, Zhang H, et al. 2020. Occurrence rules and resource estimation of shallow geothermal energy in Guanzhong Basin[J]. *Geological Survey of China*, 7(2): 21–29 (in Chinese with English abstract).
- 郭望, 张卫刚, 李玉宏, 等. 2020. 柴北缘大煤沟组七段页岩地球化学特征—对中侏罗世晚期物源及风化作用的指示及意义[J]. *沉积学报*, 38(3): 676–686.
- 韩恒悦, 张逸, 袁志祥. 2002. 渭河断陷盆地的形成演化及断块运动[J]. *地震研究*, 25(4): 362–368.
- 洪增林, 张银龙, 周阳. 2019. 关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J]. *中国地质*, 46(5): 1224–1235.
- 李传夔, 吴文裕, 邱铸鼎. 1984. 中国陆相新第三系的初步划分与对比[J]. *古脊椎动物学报*, 22(3): 163–178, 257–258.
- 李智超, 李文厚, 李永项, 等. 2016. 陕西渭河地区新生代地层及沉积环境演化[J]. *地层学杂志*, 40(2): 168–178.
- 李智超. 2017. 渭河盆地新生代岩相古地理及环境演化[D]. 西北大学博士学位论文.
- 李乾, 徐胜林, 陈洪德, 等. 2018. 川北旺苍地区茅口组地球化学特征及古环境记录[J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 45(3): 268–281.
- 李兆雨, 李永项, 李文厚, 等. 2021. 汾渭盆地古近系—新近系沉积特征[J]. *地质科学*, 56(4): 1120–1133.
- 李克永, 徐帅康, 李文厚, 等. 2021. 渭河盆地固市凹陷新近系沉积古环境恢复[J]. *地质科学*, 56(4): 1134–1146.
- 刘护军, 薛祥照. 2004. 对渭河盆地新生界及其年代的讨论[J]. *地球科学与环境学报*, 26(4): 1–5.
- 刘刚. 2007. 运用地球化学分析研究潜江凹陷潜江组沉积环境[J]. *地球学报*, 28(4): 335–340.
- 刘锐, 陈冕, 田向盛, 等. 2014. 东秦岭蓝田和牧护关岩体地球化学、锆石 SIMS U–Pb 年龄及 Hf 同位素特征: 岩石成因及构造意义[J]. *矿物学报*, 34(4): 469–480.
- 刘东生, 丁梦麟, 高福清. 1960. 西安蓝田间新生界地层剖面[J]. *地质科学*, 35(4): 199–208.
- 雷开宇, 刘池洋, 张龙, 等. 2017. 鄂尔多斯盆地北部侏罗系泥岩地球化学特征: 物源与古沉积环境恢复[J]. *沉积学报*, 35(3): 621–636.
- 罗情勇, 钟宁宇, 王延年, 等. 2013. 华北北部中元古界洪水庄组页岩地球化学特征: 物源及其风化作用[J]. *地质学报*, 87(12): 1913–1921.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1): 171–190.
- 毛光周, 刘池洋. 2011. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. *地球科学与环境学报*, 33(4): 337–348.
- 穆根胥, 李锋, 闫文中, 等. 2014. 关中盆地地热资源赋存规律及开发利用关键技术[M]. 北京: 地质出版社.
- 齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 2012. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据[J]. *岩石学报*, 28(1): 279–301.
- 饶松, 姜光政, 高雅洁, 等. 2016. 渭河盆地岩石圈热结构与地热田热源机理[J]. *地球物理学报*, 59(6): 2176–2190.
- 任战利, 刘润川, 任文波, 等. 2020. 渭河盆地地温场分布规律及其控制因素[J]. *地质学报*, 94(7): 1938–1949.
- 施春华, 胡瑞忠, 颜佳新. 2004. 栖霞组沉积地球化学特征及其环境意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 23(2): 144–148.
- 孙红丽. 2015. 关中盆地地热资源赋存特征及成因模式研究[D]. 中国地质大学 (北京) 博士学位论文.
- 王贵玲, 刘志明, 蔺文静. 2004. 鄂尔多斯周缘地质构造对地热资源形

附中文参考文献

- 曹红霞, 李文厚, 陈全红, 等. 2008. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世沉降与沉积中心研究[J]. *大地构造与成矿学*, 32(2): 159–164.
- 郭波, 朱赖民, 李彝, 等. 2009. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. *岩石学报*, 25(2): 265–281.

- 成的控制作用[J]. [地质学报](#), 78(1): 44–51.
- 王建强, 刘池洋, 高飞, 等. 2015. 陕西渭河盆地前新生界地质特征及其油气意义[J]. [地质通报](#), 34(10): 1981–1991.
- 王建其, 朱赖民, 郭波, 等. 2015. 华北陆块南缘华山、老牛山及合峪花岗岩体 Sr–Nd, Pb 同位素组成特征及其地质意义[J]. [矿物岩石](#), 35(1): 63–72.
- 吴发富. 2013. 中秦岭山阳一柞水地区岩浆岩及其成矿构造环境研究[D]. 中国地质科学院博士学位论文.
- 薛祥煦. 1981. 陕西渭南早更新世哺乳动物群及其层位[J]. [古脊椎动物与古人类](#), 19(1): 35–44, 103–104.
- 叶荷, 张克信, 季军良, 等. 2010. 青海循化盆地 23.1~5.0 Ma 沉积地层中常量、微量元素组成特征及其古气候演变[J]. [地球科学\(中国地质大学学报\)](#), 35(5): 811–820.
- 张少泉, 武利均, 郭建明, 等. 1985. 中国西部地区门源—平凉—渭南地震测深剖面资料的分析解释[J]. [地球物理学报](#), 28(5): 460–472.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. [中国科学\(D 辑\)](#), 26(3): 193–200.
- 张云翔, 薛祥煦. 1996. 陕西蓝田地区新第三纪地层划分的几点讨论[J]. [西北地质科学](#), 17(1): 59–62.
- 郑荣才, 柳梅青. 1999. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究[J]. [石油与天然气地质](#), 20(1): 22–27.
- 张云翔, 孙东怀, 安芷生, 等. 1999. 甘肃灵台上新世晚期红粘土中的哺乳动物化石[J]. [古脊椎动物学报](#), 37(3): 190–199.
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. [地学前缘](#), 11(3): 285–297.
- 张志华, 赖绍聪, 秦江锋. 2014. 北秦岭太白山晚中生代正长花岗岩成因及其地质意义[J]. [岩石学报](#), 30(11): 3242–3254.
- 张兴康, 叶会寿, 李正远, 等. 2015. 小秦岭华山复式岩基大夫峪岩体锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学特征[J]. [矿床地质](#), 34(2): 235–260.
- 周阳, 洪增林, 张卉, 等. 2020. 关中盆地浅层地热能赋存规律及资源量估算[J]. [中国地质调查](#), 7(2): 21–29.

《地质通报》第 43 卷第 11 期要目预告

- 北山造山带黑鹰山晚三叠世逆冲推覆构造特征及其对造山带演化的制约 邵兆刚等
- 柴达木盆地西部岩石圈电性结构研究 徐盛林等
- 贺兰山构造带深部电性结构与动力学机制 徐大兴等
- 六盘山盆地构造变形分析: 来自地震剖面的约束 王建伟等
- 北山南部西山煤窑地区晚中生代陆内构造变形特征与时限约束 韩乐乐等
- Hi-Climb 测线下速度结构辨识拉萨地体内的构造单元特征及其对青藏高原演化的指示 牛满等
- 多宝山矿集区岩石圈结构: 孙吴–劲松廊带深地震反射与大地电磁联合探测结果 侯贺晟等
- 松辽盆地四深 1 井区上古生界烃源岩原始品质特征恢复及排烃量估算 黎思成等
- 牛驼镇凸起深部结构对浅层地热田影响–来自深地震反射剖面的约束 刘宏凯等
- 华南陆块及邻区岩石圈热结构特征与构造指示 罗凡等
- 长江中下游成矿带物性结构揭示成矿深部背景和过程 张昆等
- 武陵山褶皱–冲断带地壳结构与形成机制 李珂等
- 湖南麻阳盆地深部电性特征及对构造和地热资源的指示 余爱民等