



六盘山盆地下白垩统乃家河组地球化学特征与古环境分析

董迎春¹, 赵晓辰², 庞强³, 马妍⁴, 黄雷¹, 李金涛²

1. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069;
2. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054;
3. 中国石油长庆油田分公司, 气田开发事业部, 陕西 西安 710016;
4. 中国石油长庆油田分公司, 天然气评价项目部, 陕西 榆林 719000

摘要 以典型陆相盆地(六盘山盆地)下白垩统乃家河组为研究对象, 对其陆相沉积特征和地球化学特征开展详细研究, 揭示陆相湖泊中记录的白垩纪古环境和古气候的演变信息。研究发现, 相较于上地壳的平均含量, 六盘山盆地乃家河组样品的主量元素中, Na_2O 、 TFe_2O_3 等较为富集, MgO 、 K_2O 、 TiO_2 相对较低; 微量元素中, Ba、Sr 和 Rb 相对富集而 Th、Zr 和 Hf 等相对较低。其主要的元素组成和其他地球化学指标(如 CIA、ICV 等)表明, 乃家河组样品经历了弱风化作用; 根据地球化学特征图解判断, 乃家河组的物源为长英质源岩, 主要来源于秦岭—祁连造山带的酸性岩浆岩; 多种地球化学指标表明, 乃家河组沉积于干旱、缺氧和高盐度的环境。研究认为, 作为华北地区一个典型的陆生盐湖, 六盘山盆地沉积水体的盐碱化和黑色页岩的形成可能与诸多早白垩世中国北部盆地类似, 均是对温室气候下的大洋缺氧事件的响应。

关键词 早白垩世; 古气候; 六盘山盆地; 陆相盐湖; 地球化学; 温室气候

中图分类号: P618.13 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-03-016

Geochemical characterization and paleoenvironmental analysis of the mudstone of the Lower Cretaceous Naijiahe Formation in the Liupanshan Basin

DONG Yingchun¹, ZHAO Xiaochen², PANG Qiang³, MA Yan⁴, HUANG Lei¹, LI Jintao²

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;
2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. Gas Field Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710016, China;
4. Natural Gas Evaluation Project Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Yulin 719000, China

Abstract This research delves into the Lower Cretaceous Naijiahe Formation in the Liupanshan Basin, which is a typical terrestrial basin. By conducting a detailed examination of sedimentary features and geochemical

收稿日期: 2025-11-02 修回日期: 2025-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(41802119、42230815); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102262508); 中国博士后科学基金项目(2019M663779)。

第一作者: 董迎春, 男, 从事盆地构造解析研究, 3073630473@qq.com。

通信作者: 赵晓辰, 男, 博士, 副教授, 从事沉积盆地分析研究, zxcnwu@126.com。

signatures, the study aims to decipher the paleoenvironmental and paleoclimatic evolution preserved in lacustrine systems. Geochemical analysis uncovers unique elemental distributions in the mudstones of the Naijiahe Formation. When compared with the average values of the upper crust, major elements such as Na_2O and TFe_2O_3 are enriched, while the concentrations of MgO , K_2O , and TiO_2 are lower. Among trace elements, Ba, Sr, and Rb are enriched, whereas Th, Zr, and Hf show depletion. Weathering indices, such as the Chemical Index of Alteration (CIA) and the Index of Compositional Variability (ICV), suggest that chemical weathering was relatively weak during sediment transport. Provenance discrimination diagrams, consistently imply that the source rocks are felsic, originating from acidic magmatic rocks in the Qinling-Qilian Orogenic Belt. Multiple geochemical proxies jointly indicate that the deposition occurred under arid, anoxic, and hypersaline conditions. As a representative terrestrial saline lake in North China, the salinization of water bodies and the formation of black shales in the Madongshan-Naijiahe Formation may well represent the regional responses to oceanic anoxic events during the greenhouse climate conditions of the Early Cretaceous.

Keywords early Cretaceous; paleoclimate; Liupanshan Basin; terrestrial salified lake; geochemistry; greenhouse climate

六盘山盆地位于华北板块西缘,南邻秦岭—祁连褶皱带,北接河西走廊过渡带,向东与鄂尔多斯盆地存在密切联系,是发育于元古代结晶基底和加里东褶皱基底之上的中生代小型盆地^[1]。因其特殊的构造位置和丰富的油气显示,前人围绕六盘山盆地的构造演化^[2]、沉积特征^[3]、含油气系统^[2]以及其他矿产^[4]等展开了多方面的研究。在过去的几十年里,六盘山盆地地下白垩统地层因其较好的潜在生烃潜力而受到极大关注。六盘山盆地地下白垩统广泛发育黑色泥页岩与薄层膏岩,油气显示丰富。针对白垩系的油气勘探,自 20 世纪 50 年代起至今已开展了大量工作。然而,前人对六盘山盆地在早白垩世时期的古气候特征研究较为缺乏,从而制约了对黑色泥页岩和薄层膏岩形成环境的理解^[1]。此外,六盘山群包含丰富的动植物化石,包括核形石(*Oncolite*)和假拟节柏(*Pseudofrenelopsis*)^[5]、石蚕巢(*Caddisfly*)^[6]、狼鳍鱼(*Lycopera*)^[7],这些化石资料可为追溯六盘山盆地古环境的变迁提供关键证据。特别值得注意的是,下白垩统乃家河组发育泥页岩互层夹膏岩层,岩性变化复杂,但目前缺乏对该层段的古气候研究。

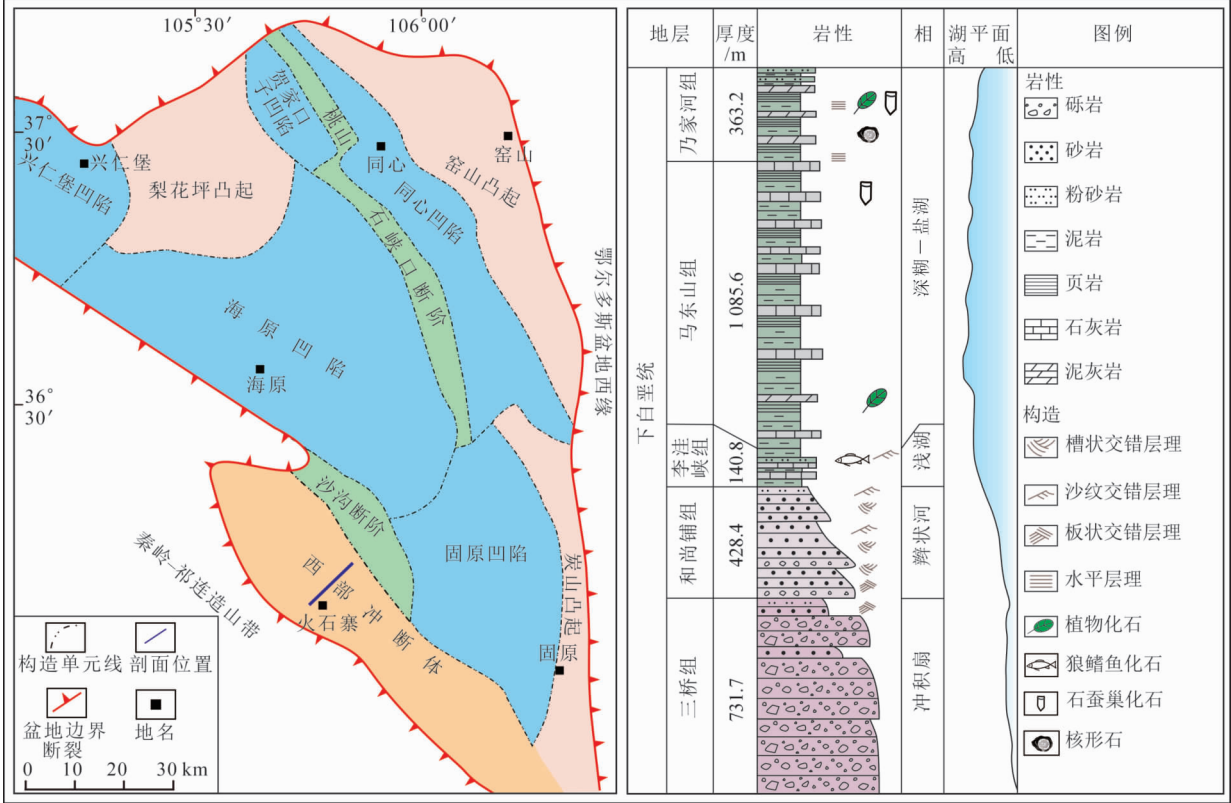
白垩纪在地质历史上是一个特殊时期,该时期发生了一些异常的地质事件,包括超级地幔柱活动、特殊的火成岩事件、超静磁带以及大火成岩省的喷发等。这些地质事件进一步导致了全球古气候和古生态系统的波动,这在大洋缺氧事件^[8]、海相红层^[9]以及生物大规模灭绝^[10]中都有记载。更重要的是,白垩纪也是典型的长期温室

期。多种证据表明,白垩纪经历了高大气二氧化碳浓度^[11-13]、海平面升高和深海高温^[14]等古环境。这些古气候重建主要来自海相地层,陆相地层的记录很少,白垩纪陆地背景下的古气候意义也不清楚。但是,一些古气候事件,特别是大洋缺氧事件,也对陆地生态系统有很大影响^[15-16]。加强对陆相盆地中记录的古气候特征的研究,可为揭示白垩纪温室气候事件提供重要信息^[17]。

为了更好地揭示六盘山盆地地下白垩统乃家河组时期的陆相湖泊沉积体系的古环境特征,本研究结合主、微量元素特征,从古气候、古盐度、古氧化还原条件以及物源条件等方面恢复乃家河组的古环境条件与湖盆演化过程,探讨湖盆咸化与大洋缺氧事件的对应关系。

1 区域地质概况

六盘山盆地位于鄂尔多斯盆地西南缘,地处河西走廊东段,以鄂尔多斯地块、阿拉善地块、河西走廊带和秦岭—祁连造山带为界,总体呈 NW—SE 向展布,呈北宽南窄的倒三角分布。盆地可划分为中央坳陷和东部斜坡两个一级构造单元,进一步可划分为 5 个凹陷、3 个凸起和 2 个断阶共 10 个二级构造单元^[18-19](见图 1)。目前,盆地内具有弧形构造带和一系列凹陷和隆起的特征,这些凹陷和隆起沿着弧形断裂分布。六盘山地区在地质历史时期经历了多期构造事件,使得盆地发育多期断裂,内部结构复杂^[20-21]。



(a) 六盘山盆地构造单元划分(据文献[22]修改) (b) 六盘山盆地地下白垩统地层综合柱状图(据文献[21]修改)

图 1 六盘山盆地概况

Fig. 1 Regional overview of the Liupanshan Basin

六盘山盆地的早期演化受古祁连洋控制,在中生代早期进入陆内演化阶段,并与鄂尔多斯盆地联系密切,长期处于同一沉积体系之中^[23-24]。晚侏罗世受燕山运动影响,六盘山盆地与鄂尔多斯盆地之间的“古脊梁”发生隆起,导致两侧盆地分离,从此六盘山盆地进入独立演化阶段^[25](见图 2)。六盘山盆地的构造应力场反演表明:早白垩世早期,盆地在近 E—W 向拉张应力的作用下处于伸展断陷期,接受周缘多个构造单元的物质供给,沉积了一套巨厚的河湖相烃源岩地层;早白垩世晚期,应力场转变为 NW—SE 向挤压应力场,盆地结束断陷沉积,与鄂尔多斯盆地一起抬升剥蚀^[26](见图 2、3)。早白垩世,盆地自下而上沉积着三桥组、和尚铺组、李洼峡组、马东组、乃家河组,组内均为整合接触,与下伏侏罗系地层呈不整合接触(见图 3)。其中,乃家河组普遍为一套蓝灰、灰绿色间紫红色泥岩、泥灰岩、灰岩,常夹薄层石膏、盐岩层,属于咸化湖泊相沉积,是一套油气有利勘探目标层位^[3]。

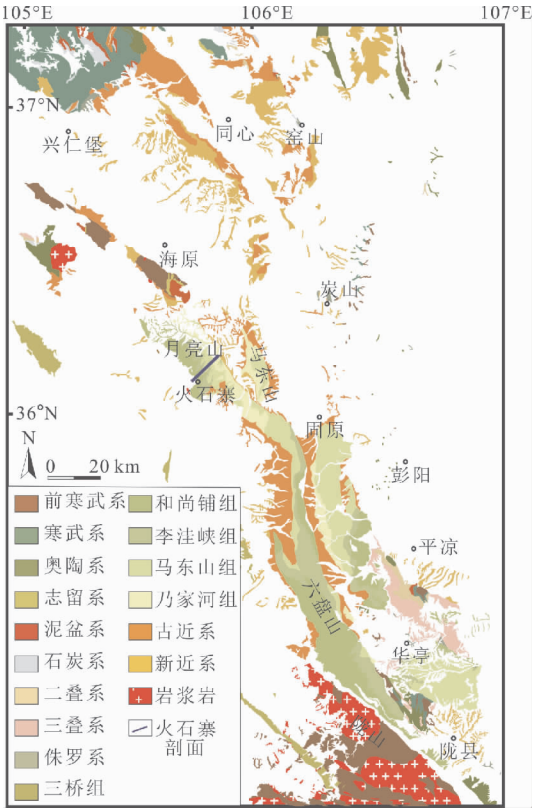
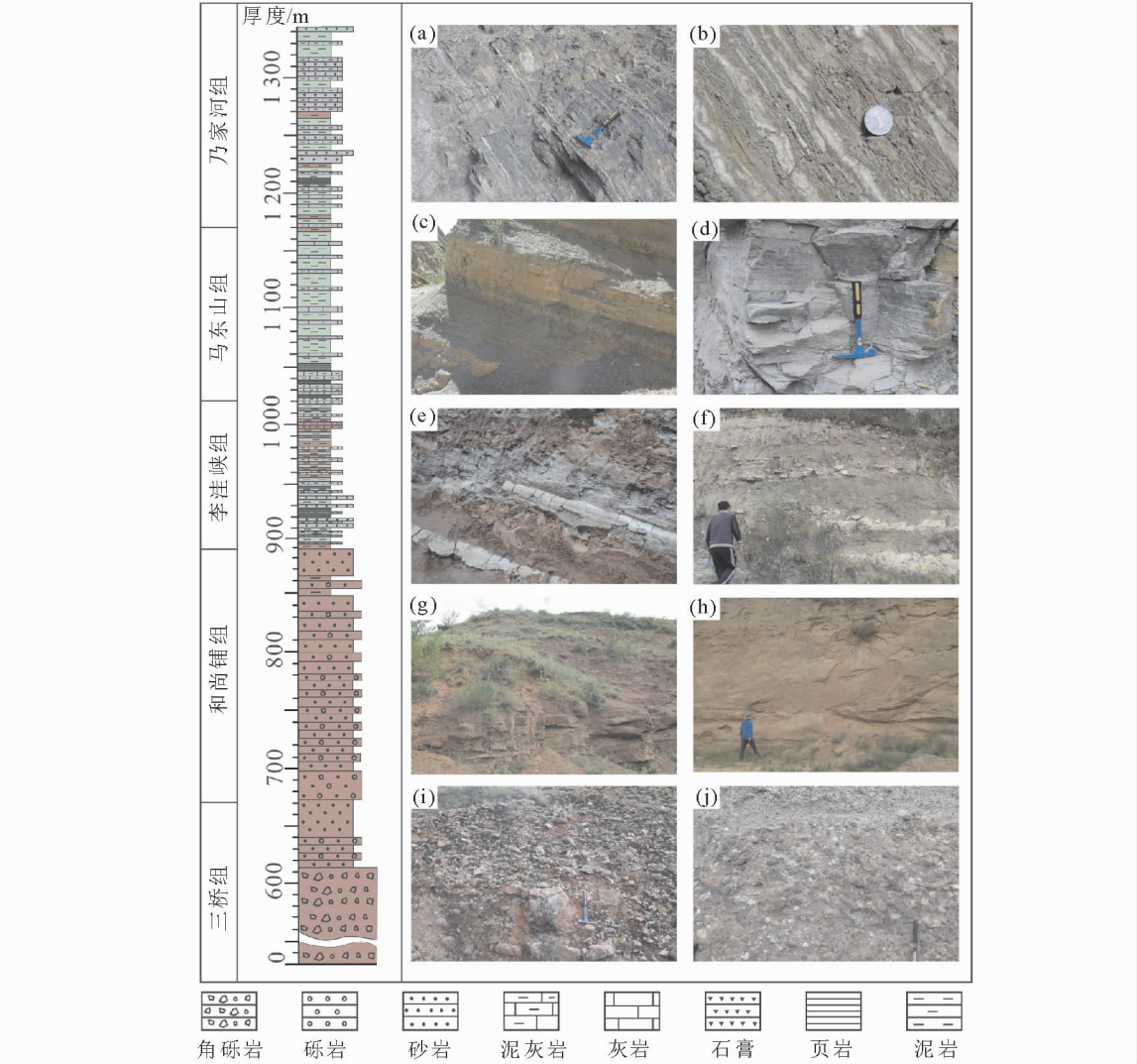


图 2 六盘山地区地质图(据文献[21]修改)

Fig. 2 Geological map of the Liupanshan Area



注:(a)、(b) 乃家河组;(c)、(d) 马东山组;(e)、(f) 李洼峡组;(g)、(h) 和尚铺组;(i)、(j) 三桥组。

图 3 六盘山盆地火石寨剖面岩性柱状图和露头照片

Fig. 3 Lithological column and outcrop photographs of the Huoshizhai Section, Liupanshan Basin

2 样品采集与测试方法

为确定早白垩世六盘山盆地乃家河组时期的元素地球化学特征,在盆地中部火石寨剖面采集了 10 个泥岩样品进行分析。全岩地球化学分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,对研究样品进行了全岩主元素和微量元素分析。用碳化钨球磨机将整块岩屑磨成约 75 μm。主量元素采用日本理学(Rikagu)产 RTX2100 型 X 射线荧光(XRF)分析,微量元素采用 Agilent 7500a 电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析,采用美国地质调查局(USGS)和国际岩石标准。制样分 7 个步骤:①将样品置于烘箱中,于 105 ℃烘干 3 h;

②取出样品,称取样品(50±1)mg 于高压密闭 Teflon 溶样器中,缓慢加入 1.5 mL 的高纯硝酸,1.5 mL 的高纯氢氟酸,0.01 mL 高纯氯酸;③在电热板上于 140 ℃将样品蒸至小体积,缓慢加入 1.5 mL 高纯硝酸,1.5 mL 高纯氢氟酸,加盖并旋紧溶样器钢套;④将装有样品的容器放入烘箱中,190 ℃保温加热 48 h;⑤待溶样器冷却后开盖,在电热板上于 140 ℃将溶液蒸干,再加入 3 mL 高纯硝酸蒸至湿盐状;⑥缓慢加入 3 mL 50% 的高纯硝酸,加盖并旋紧溶样器钢套,再次置于烘箱 150 ℃过夜,提取盐类;⑦待溶样器冷却后,将提取液用 2% 的硝酸稀释于清洗干净的 PET(聚酯)瓶中,至 80 g(稀释因子 1:1 600)密闭保存,上机完成测定。大部分主元素和微量元

素的分析精密度和准确度分别优于5%和10%。

3 元素地球化学特征

3.1 主量元素

六盘山盆地乃家河组所测泥岩样品的主量元素的质量分数中(见表1),SiO₂的质量分数为7.36%~52.06%,平均质量分数为32.12%,低于上地壳的平均含量(UCC)。Al₂O₃与CaO的质量分数分别为2.14%~19.98%、0.71%~34.28%,平均质量分数为10.22%和17.10%,均

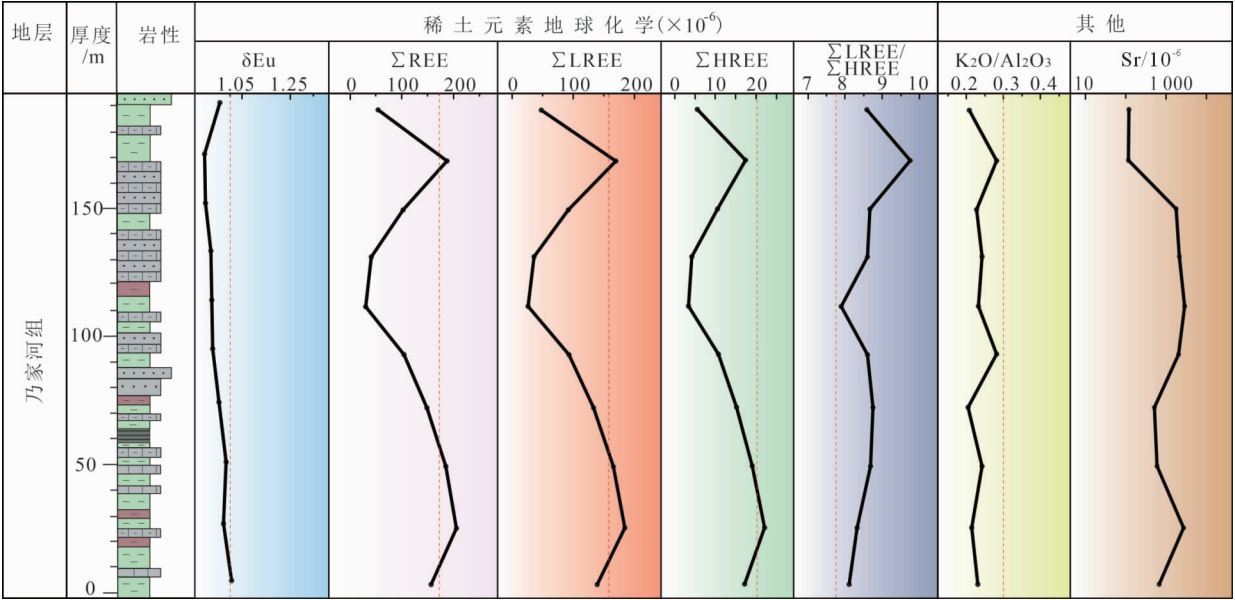
低于上地壳的平均含量。而TFe₂O₃与Na₂O的平均质量分数分别为4.15%和1.75%,高于上地壳值。此外,MgO、K₂O、TiO₂、MnO和P₂O₅的元素丰度略低于上地壳的平均含量。Cox等人提出,可以运用K₂O/Al₂O₃比值来反映控制主量元素富集的主要矿物类型^[27],其中,以黏土矿物为主的沉积岩中该比值通常小于0.3(见图4)。乃家河组样品的K₂O/Al₂O₃比值为0.20~0.28,均值为0.24,表明主量元素富集受控于黏土矿物,钾长石含量较低。

表1 六盘山盆地乃家河组样品中主量元素的质量分数

Tab.1 Mass fractions of major elements in samples from the Naijiahe Formation, Liupanshan Basin 单位:%

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI	Total	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	CIA	ICV	K ₂ O/Al ₂ O ₃
1	46.19	14.84	0.54	5.55	0.080	6.37	6.56	1.88	3.43	0.11	0.03	14.46	100.04	27.6	60.0	2.63	0.23
2	52.06	19.98	0.76	7.92	0.019	3.90	0.71	3.38	4.29	0.19	0.09	7.19	100.49	26.2	64.4	1.37	0.21
3	44.55	14.50	0.59	5.36	0.088	4.31	8.75	4.01	3.52	0.08	2.46	12.22	100.45	24.8	46.0	2.86	0.24
4	42.71	13.48	0.51	4.90	0.061	7.25	9.60	2.66	2.75	0.21	0.17	16.10	100.41	26.4	53.5	3.48	0.20
5	31.13	7.94	0.32	2.98	0.028	4.61	24.43	1.26	2.23	0.11	1.08	23.34	99.47	24.5	54.7	7.93	0.28
6	11.37	2.78	0.12	0.95	0.006	1.07	34.28	0.54	0.65	0.03	34.55	12.78	99.12	23.4	52.9	24.27	0.23
7	14.24	3.70	0.16	1.45	0.022	3.37	29.60	0.60	0.89	0.05	34.35	11.51	99.92	23.9	55.7	17.70	0.24
8	26.79	7.83	0.31	3.47	0.037	6.21	23.37	1.69	1.79	0.14	1.42	26.99	100.05	25.1	51.1	8.37	0.23
9	44.82	15.04	0.59	7.13	0.071	6.86	6.55	1.35	4.24	0.27	0.06	13.45	100.42	25.3	62.5	2.75	0.28
10	7.36	2.14	0.06	1.83	0.154	18.44	27.15	0.15	0.44	0.04	0.09	41.69	99.55	33.4	68.9	45.81	0.21
平均	32.12	10.22	0.40	4.15	0.06	6.24	17.10	1.75	2.42	0.12	7.43	17.97	99.99	26.05	56.98	11.72	0.24

注:LOI 点燃损失;CIA 化学风化蚀变指数;ICV 成分变异指数。



注:图中虚线为上地壳平均含量

图4 火石寨剖面乃家河组稀土元素地球化学特征

Fig.4 Rare earth element geochemical characteristics of the Naijiahe Formation in the Huoshizhai Section

3.2 微量元素

乃家河组泥岩样品的微量元素测试结果显示(见表 2),Sr(平均为 $1\,360.22 \times 10^{-6}$)和 Ba(平均为 368.47×10^{-6})的浓度在微量元素中占主导地位,其他元素的浓度均低于 100×10^{-6} 。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中[见图 5(a)],Nb、Ti 元素明显亏损,U、Hf 元素相对富集,各样品具有相同的变化趋势,表明其沉积时物源和沉

积环境较为稳定。此外,与上地壳平均含量和原始地幔标准值相比,泥岩样品中的 Sr 相对富集。Y 与上地壳平均含量相似,但显著高于球粒陨石和原始地幔标准化值[见图 5(a)]。Cu、Cs、U 略高于上地壳平均含量,Ba、Cr 和 Zr 明显低于上地壳平均含量、球粒陨石和原始地幔标准化值。其他元素(Sc、V、Co、Ni、Zn、Nb、Rb、Hf、Ta 和 Th)略低于上地壳平均含量。

表 2 六盘山盆地乃家河组样品中微量元素的含量

Tab.2 Trace element concentrations in samples from the Naijiahe Formation, Liupanshan Basin 单位: $\times 10^{-6}$

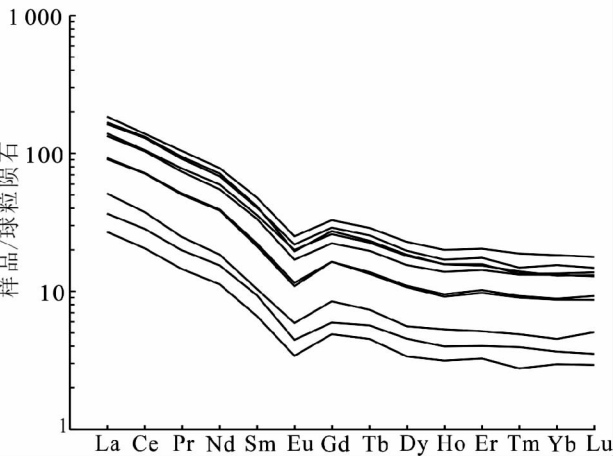
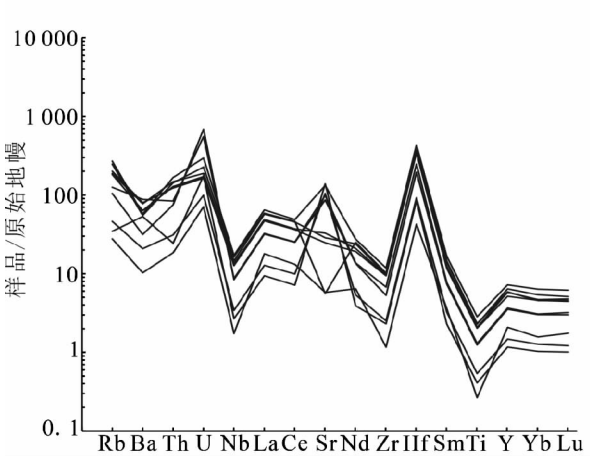
样品	V	Ni	Th	U	Rb	Sr	Cr	Co	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	105.20	32.97	10.22	3.37	124.8	680.7	60.86	16.23	25.93	33.00	64.63	7.36	27.79	5.45	1.15	5.32	0.84	4.57	0.89	2.60	0.34	2.28	0.35
2	133.60	49.62	13.87	6.06	167.9	2723	85.77	20.22	32.41	43.64	84.97	9.86	36.48	7.31	1.45	6.72	1.08	5.77	1.13	3.36	0.48	3.09	0.45
3	107.90	36.70	12.26	3.86	116.6	592.4	60.28	16.69	28.81	38.51	79.11	8.64	31.86	6.17	1.26	5.92	0.95	4.97	0.96	2.88	0.38	2.63	0.37
4	95.47	28.59	10.66	3.52	113.3	513.4	56.72	14.6	23.14	31.62	63.26	6.97	25.54	5.13	0.98	4.57	0.73	3.92	0.78	2.35	0.34	2.23	0.33
5	64.55	27.75	7.00	11.29	78.0	2041	36.03	12.86	16.47	21.88	43.99	4.85	18.27	3.40	0.67	3.35	0.51	2.77	0.54	1.68	0.24	1.50	0.23
6	20.02	15.32	2.04	3.62	21.6	2868	12.37	5.573	5.26	6.37	12.50	1.38	5.23	1.01	0.20	1.00	0.17	0.85	0.18	0.54	0.07	0.50	0.07
7	22.84	16.98	2.59	2.04	28.8	2160	17.04	6.132	6.64	8.63	17.31	1.88	7.17	1.43	0.26	1.21	0.21	1.15	0.23	0.66	0.10	0.62	0.09
8	76.28	30.90	6.26	14.02	65.0	1787	39.31	13.17	15.90	21.45	43.75	4.76	17.97	3.24	0.63	3.35	0.49	2.70	0.52	1.61	0.23	1.47	0.22
9	125.80	38.23	11.9	4.65	153.5	116.6	85.59	20.66	26.29	39.62	80.50	8.94	33.28	6.33	1.13	5.58	0.86	4.66	0.89	2.54	0.35	2.21	0.33
10	57.01	25.22	1.55	1.46	17.3	120.1	117.8	16.64	9.37	12.10	22.94	2.34	8.61	1.59	0.34	1.74	0.27	1.41	0.30	0.85	0.12	0.77	0.13
平均	80.87	30.23	7.83	5.39	88.68	1360.22	57.18	14.28	19.02	25.68	51.30	5.70	21.22	4.10	0.81	3.88	0.61	3.28	0.64	1.91	0.26	1.73	0.26
UCC	107	44	10.7	2.8	112	350	83	17	22	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	3.5	0.8	2.3	0.33	2.2	0.32

注: $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$, N 代表球粒陨石标准化值。

3.3 稀土元素

乃家河组总稀土元素质量分数(ΣREE)在 $30.06 \times 10^{-6} \sim 205.78 \times 10^{-6}$, 平均为 121.36×10^{-6} , 低于上地壳平均质量分数(146.37×10^{-6})和北美页岩的平均质量分数(NASC, 173.21×10^{-6})。其中,轻稀土元素($\Sigma LREE$ 平均 108.80×10^{-6})相较于重稀土元素($\Sigma HREE$ 平均 12.56×10^{-6})显著富集,且在球粒陨石标准化稀土分配模式图中呈现明显的分馏[见图 5(b)]。 $\Sigma LREE$ 和

$\Sigma HREE$ 均明显低于 NASC 和 UCC,轻、重稀土之比 $\Sigma LREE / \Sigma HREE$ ($7.89 \sim 9.75$, 平均 8.60)也略低于 PAAS,但略高于 NASC(见图 4)。铕元素异常程度(δEu)计算公式为 $Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$,其中 N 代表球粒陨石标准化值^[28],样品的 δEu 范围在 $0.89 \sim 1.01$,均值 0.94 ,表现为明显的铕负异常,而花岗岩中常见铕负异常^[29][见图 5(b)]。



(a) 六盘山盆地乃家河组稀土元素分配模式图 (b) 六盘山盆地乃家河组微量元素原始地幔标准化蛛网图

图 5 六盘山盆地乃家河组稀土元素及微量元素地球化学图解(标准化数值据文献[30])

Fig.5 Rare earth element and trace element geochemical diagrams of the Naijiahe Formation in the Liupanshan Basin

4 讨论

4.1 物源分析

4.1.1 古风化与沉积再循环

沉积岩岩石组分受古风化与再循环作用影响明显,风化条件在一定程度上也可以反映研究区的古环境。Nesbitt 等^[31]提出用化学风化蚀变指数(CIA)定量评估源岩的化学风化程度:较低的 CIA 值(50~70)指示较弱风化条件,而高 CIA 值则表明较强风化条件。CIA 值计算^[32]为 $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O)] \times 100$,其中, CaO^* 值为硅酸盐中 CaO 质量分数。 CaO^* 的值为 $[CaO - P_2O_5 \times 10 \div 3] \text{ mol}$, CaO^* 值大于 Na_2O 质量分数时,用 Na_2O 质量分数来代替。在乃家河组样品中, CIA 值为 46.0~64.4, 平均值为 57, 属于弱风化值范围。此外,在 A-CN-K 三元图解中,大部分样品位于钾长石-斜长石连线附近,呈线性趋势分布,反映其成分较为稳定且受化学风化作用影响较弱(见图 6)。成分变异指数(ICV)被广泛用于评估沉积物的再循环程度, $ICV = (TFe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + TiO_2) / Al_2O_3$ 。一般认为,高 ICV 值(>1)表明沉积物再循环作用不明显,矿物成分受风化作用影响较小,而低 ICV 值(<0.84)表示沉积物遭受强烈风化和多个沉积旋回^[27,33]。乃家河组的 ICV 值为 1.37~45.81,均大于 1,意味着乃家河组为第一次旋回产物,成分成熟度低。

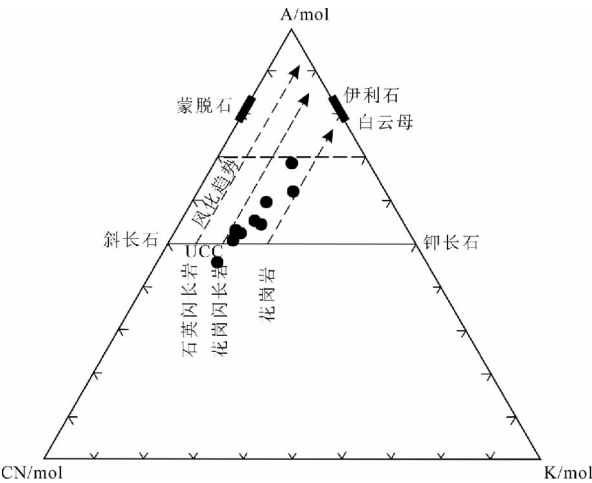


图 6 A-CN-K(三端元图(底图据文献[32]修改)

Fig. 6 A-CN-K ternary diagram

4.1.2 源岩类型

碎屑岩的碎屑矿物成分和元素组成受其物源

控制^[34-35]。一些微量元素(如 La、Zr、Th、Sc、Hf、Co)的迁移性弱,能提供可靠的源岩指示^[35]。通过微量元素的物源判别图(La/Th-Hf、Co/Th-La/Sc 和 Th/Sc-Zr/Sc)图解(见图 7),发现乃家河组样品中大多数都位于长英质源岩区^[35-37]。另外, Al_2O_3/TiO_2 比值也常被用来指示源岩类型,高比值(19~28)表示长英质源岩,低比值(<14)表示镁铁质源岩^[38]。如图 7 所示,所有样品的 Al_2O_3/TiO_2 比值为 23.4~33.4,显示长英质源岩的特征。一般而言,相较于基性岩石,长英质岩石的 Zr/TiO_2 比值更低,因此 TiO_2 -Zr 图解可以用于区分源岩是基性、中性还是长英质,乃家河组样品指示的源岩类型主要为长英质^[32,39-40](见图 7)。此外, TiO_2 -Ni 的关系图解也表明样品源岩类型为长英质酸性岩石^[28,41](见图 7)。

在六盘山盆地西南部的东祁连和西秦岭地区出露丰富的中酸性岩石,已确认为六盘山盆地三桥组、和尚铺组的物源^[21]。此外,李洼峡组、马东山组的碎屑锆石年龄分布与东祁连造山带和西秦岭造山带的碎屑锆石分布一致^[42]。综合前人研究成果以及主微量元素分析结果认为,乃家河组时期的物源大部分继承自三桥组—马东山组时期,以东祁连—西秦岭造山带酸性火成岩为主。

4.2 古环境条件

4.2.1 古气候条件

锶元素与铜元素比值(Sr/Cu)是揭示古气候条件的一个重要指标^[43-44]:当 Sr/Cu 比值小于 5.0 时,表明气候条件潮湿;当样品的 Sr/Cu 比值大于 5.0 时则表示气候条件干燥^[43-46]。乃家河组的 Sr/Cu 比值大多数远大于 5.0 (1.71~284.52),反映了干旱气候条件(见图 8)。乃家河组某些样品(例如 NX-20-38、NX-20-39)的 Sr/Cu 值极高,其 Sr 和 Ba 含量也极高,这表明其处于极端干旱的蒸发环境^[47]。锶与钡比值(Sr/Ba)不仅可用于指示古盐度,还可以指示古气候条件。一般而言,高 Sr/Ba 比值(>1.0)表示干旱的气候条件,低 Sr/Ba 比值(<0.50)表示潮湿的气候条件^[46]。乃家河组的 Sr/Ba 比值为 0.31~15.13,平均 4.71,表明了干旱气候条件。此外,铷与锶的比值(Rb/Sr)也是用于揭示不同古气候条件的一个重要指标^[48]。低的 Rb/Sr 比值表明气候条件较为干旱,高的 Rb/Sr 比值表明气候条件湿润^[48-50]。乃家河组的 Rb/Sr 比值较低(0.01~1.32,平均 0.22),也揭示了干旱的气候条件(见图 8)。从乃

家河组收集的假拟节柏(*Pseudofrenelopsis*)叶芽的碳同位素测值也表明了其阿尔布阶(*Albian*)晚期的干旱或半干旱气候^[51]。此外,假拟节柏^[5]和石蚕巢化石^[6](*Caddisfly*)的发现、高含量的克拉梭

粉类^[52-53](*Classopollis*)、大量石膏层的出现以及碳氧同位素等证据,均指示了早白垩世晚期乃家河组的极端干旱气候条件^[5,54]。

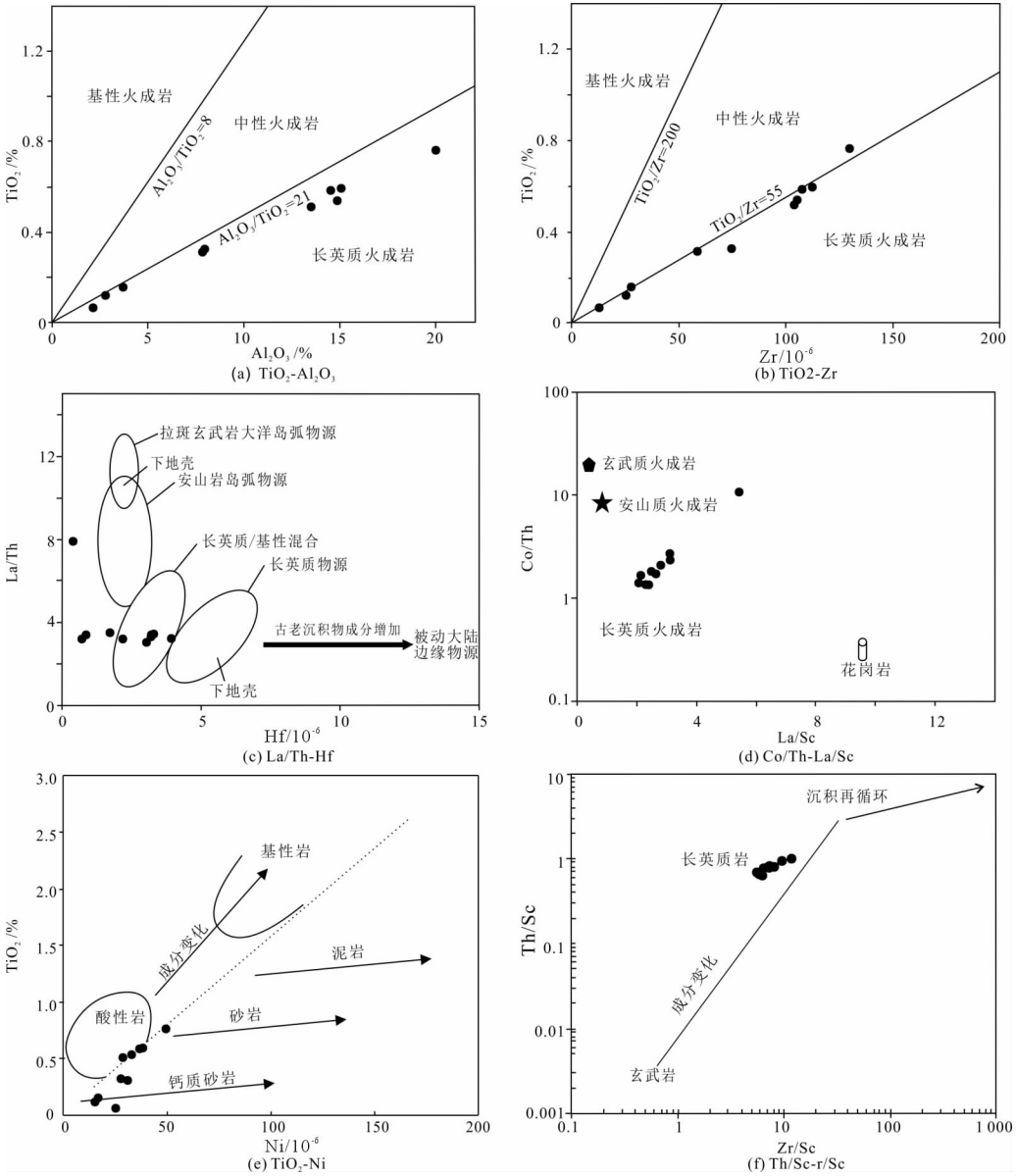


图 7 六盘山盆地乃家河组的源岩类型(底图据文献[32]修改)

Fig. 7 Source rock types of the Naijiahe Formation in the Liupanshan Basin

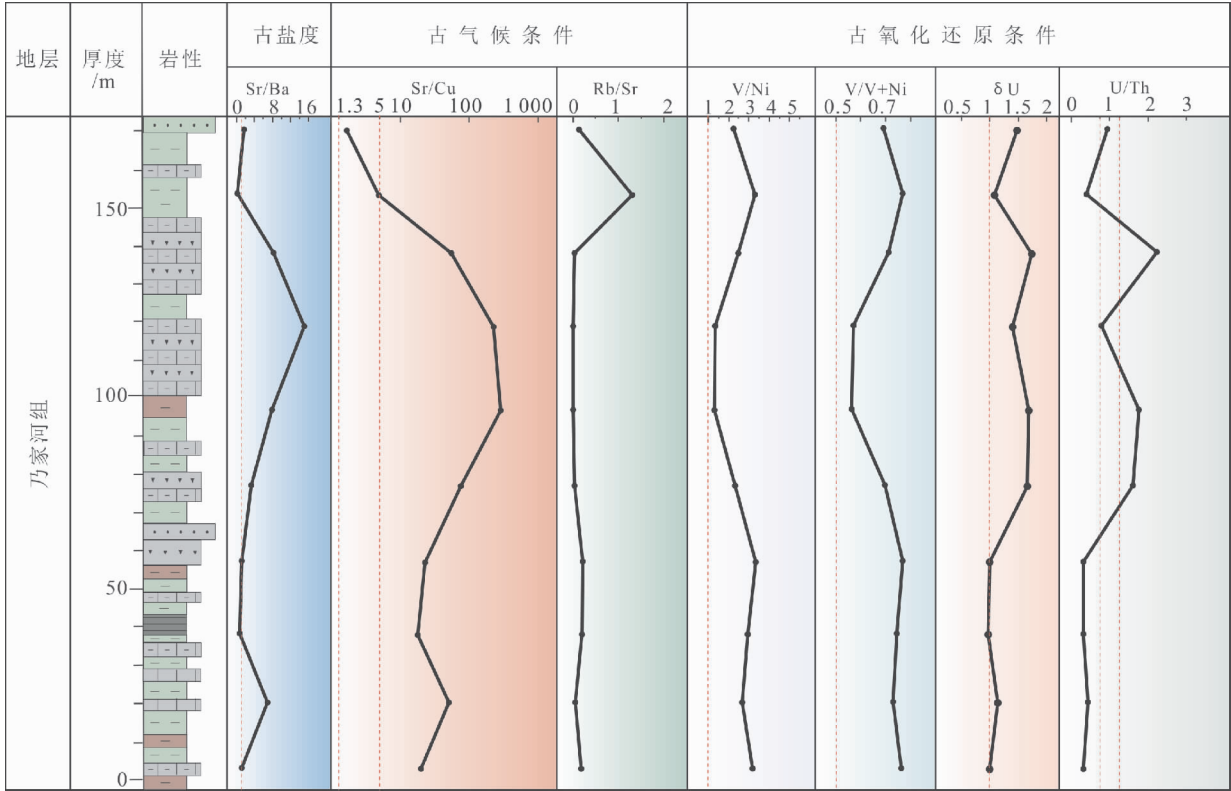
4. 2. 2 古氧化还原条件

学者常用 V/Ni 和 $V/(V + Ni)$ 等微量元素的比值作为恢复水体氧化条件的地球化学指标^[55-57]。Scheffler 等人研究认为, V/Ni 比值在还原条件下大于 1,在氧化条件下其值小于 1。 $V/(V + Ni)$ 比值小于 0.45 表示富氧条件^[58],大于 0.50 表示缺氧条件^[56]。乃家河组所有样品的 V/Ni 比值均大于 1(平均值为 2.52), $V/(V + Ni)$ 平均值为 0.70(见图 8),表明其水体处于中等分层的还原环

境^[49,59]。

水体中稀有金属元素 U 在氧化条件下易被氧化为可溶性 U^{6+} ,并导致沉积物中 U 的损失,而惰性元素 Th 通常以不溶性 Th^{4+} 的形式存在,较为稳定^[60]。因此, Th/U 比值和 δU 值 $[\delta U = 2U/(U + Th/3)]$ 被广泛用于恢复古氧化还原条件。 Th/U 比值在 0~2 表示还原条件^[61]; δU 值 < 1 表示氧化条件,其值 > 1 表示还原条件^[43,55]。乃家河组的 Th/U 值大多位于 0~2(0.31~2.24,平均

值 0.92),表明其处于还原条件(见图 8)。其高 δU 值(均值 1.31)也支持这一结论(见图 8)。



注:图中虚线为判别标准值

图 8 六盘山盆地乃家河组泥岩古环境条件指标

Fig. 8 Paleoenvironmental condition indicators of the mudstones from the Naijiahe Formation in the Liupanshan Basin

4.2.3 古盐度

古盐度是一个重要指标,可用于反映地质历史时期中水体的沉积环境^[62]。前人研究表明, Sr、Ba、B 等元素与古盐度密切相关,本研究主要选取 Sr/Ba、(100 MgO)/Al₂O₃ 比值指标对六盘山盆地的古盐度进行恢复^[35,63]。一般而言,水体中钡元素(Ba)相较于锶元素(Sr)更容易沉淀,当水体盐度增加后,锶元素以 SrSO₄ 的形式沉淀,因而沉积物中 Sr 的丰度和 Sr/Ba 比值与古盐度呈明显的正相关关系^[32]。因此, Sr/Ba 比值被广泛用于恢复古盐度,高 Sr/Ba 比值(>1.0)和低比值(<0.50)分别表示高盐度和低盐度水体环境^[43,46]。乃家河组的 Sr/Ba 比值较高,除个别异常样品外,均大于 1,平均为 4.71,表明该时期其水体处于高盐度环境。除了微量元素外,主量元素(100 MgO)/Al₂O₃ 的值也可以用作古盐度的指标。研究区所有样品的(100 MgO)/Al₂O₃ 值范围为 19.51~861.64,表明其存在于高盐度环境^[63]。六盘山盆地乃家河组中,石膏、核形石(*Oncolite*)和石蚕巢(*Caddisfly*)等标志化石的相继发现,也进一步印证这一时期明显的湖盆咸化特

征^[6,64]。水的盐度与古气候密切相关,炎热和干旱气候通常具有较高的蒸发速率,造成高盐度,而温暖和潮湿气候的蒸发速率较低,导致低盐度。古气候和古盐度的判别参数显示出相似的趋势,表明古气候在六盘山盆地的盐度波动中发挥着重要作用(见图 8)。

4.3 六盘山盆地乃家河组沉积模式的重建及其油气勘探意义

在地球化学分析的基础上,结合前人对乃家河组岩性、沉积、古生物学等特征的研究,建立了六盘山盆地乃家河组时期的古气候演化模型(见图 9)。由图 9 可以看出,在乃家河组沉积时期,六盘山盆地处于干旱、缺氧、高盐度的环境下,主要发育半深湖-浅湖相沉积^[21]。相较于马东山组时期,乃家河组沉积时期湖盆范围收缩,湖盆变浅,沉积中心由南向北迁移至海原凹陷。至此,六盘山盆地经历了早白垩世早期的河流-三角洲相沉积,到后来的半深湖-深湖相沉积,到早白垩世晚期的深湖-浅湖相沉积,最终湖盆消亡^[18,65]。湖盆发育至乃家河组时期,沉积范围缩小,岩性主要为泥岩、灰岩、页岩以及石膏互层。湖平面下降

和大量石膏互层的出现(见图 9),指示了古气候以极端干旱的高蒸发环境为主且气候波动强烈^[65]。结合中国北方区域古地理与古气候特征(见图 10、11)可见,受大洋缺氧事件的影响,与六盘山乃家河组同期的盆地(如吐哈盆地、酒泉盆地等),均出现代表气候干旱特征的膏岩以及化石等,由此可知,该时期六盘山盆地的古气候变化并不是个例。此外,乃家河组地层中的孢子粉

(如希指蕨孢 *Schizaeoisporites*、麻黄粉属 *Ephedripites* 等)和植物化石类群,以及假拟节柏(*Pseudofrenelopsis*)的叶状芽形态和表皮结构都指示了气候干旱^[5]。另一方面,随着湖盆萎缩以及干旱加剧,使得六盘山盆地的湖水咸化且处于缺氧的还原环境,乃家河组大量的核形石^[64]以及石蚕巢化石^[6]的出现也能证明这一点。此种条件更利于黑色页岩的发育,具有良好的有机质丰度。

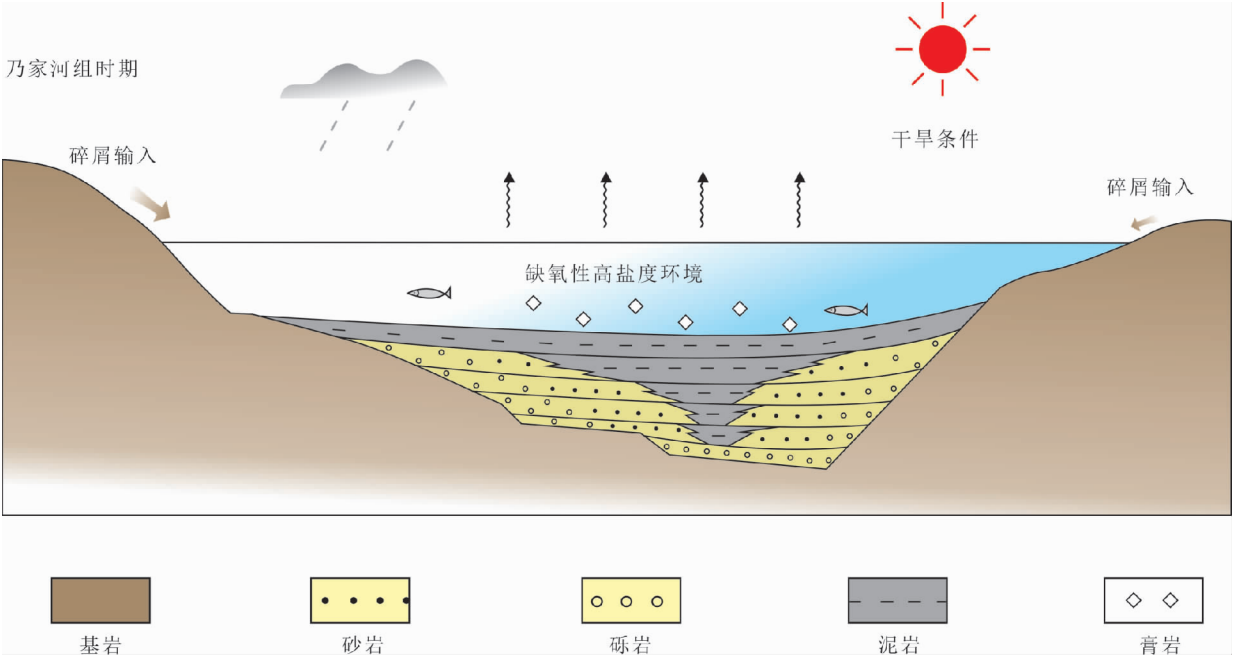


图 9 六盘山盆地乃家河组时期沉积模式

Fig. 9 Sedimentary model of the Naijiahe Formation in the Liupanshan Basin

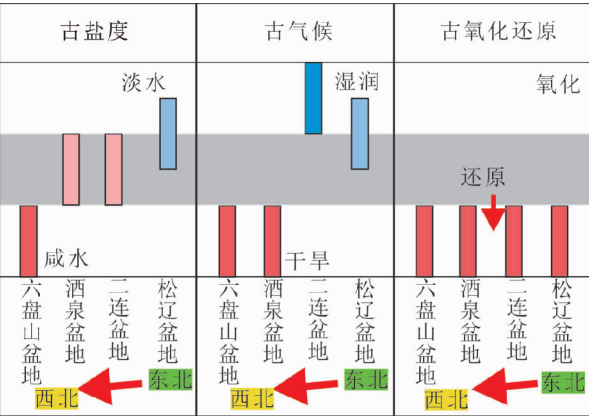


图 10 早白垩世中国北方部分典型盆地古环境特征 (据文献[66, 71-72]绘制)

Fig. 10 Paleoenvironmental characteristics of some typical basins in northern China during the Early Cretaceous

前人研究表明,由于乃家河组时期,沉积中心向盆地北部海原凹陷转移,盆地北部成为优质烃

源岩发育区^[18,22]。陈金燕所测试的盆地北部乃家河组样品中总有机碳质量分数(TOC)为0.31%~3.65%,均值1.58%,生烃潜量S1+S2和镜质体反射率Ro均值分别为6.03 mg/g和0.64%,氯仿沥青“A”范围为0.003%~0.350%,均值为0.082%^[18]。陈金燕认为,测试结果揭示了盆地北部乃家河组烃源岩以未熟-低熟的中等-好烃源岩为主^[18]。除了烃源岩的有机地球化学特征方法可以反映其形成环境、母质来源以及保存和演化外,盆地古环境的研究也可以从侧面反映烃源岩的形成与保存等情况^[18,66]。六盘山盆地乃家河组时期的湖相咸水环境使得水体分层更有利于有机质的保存,更有利于有机质向烃类转化;同时,高盐度抑制了微生物的降解活动^[66]。另外,缺氧条件下易形成富有机质页岩。因此,从烃源岩的角度来说,乃家河组时期的古环境条件有利于生油层的形成,能为油气勘探提供支持。

另外,干旱环境常伴随膏岩层的沉积,形成优质盖层^[67],垂向封堵油气。乃家河组膏岩-泥岩的互层能作为优质的盖层-烃源岩组合。

4.4 大洋缺氧事件在中国北方盆地的响应

白垩纪是一个“温室气候”时期,特别是乃家河组时期的干旱缺氧气候的形成,可能与全球“温室气候”有密切的关系。下白垩统地层在中国北方广泛分布,大多数早白垩世陆相盆地具有相似的沉积特征和盆地演化历史^[68-69]。这些盆地主要填充于断裂盆地系统之上,以阿普特阶(Aptian)湖泊沉积环境为特征,沉积了丰富的有机页岩;大洋缺氧事件时期(在 OAE1 期),由于受温室气候的影响,古气候炎热干燥,湖盆盐度升高,湖盆咸化形成大

量石膏(见图 11)^[70]。中国北部盆地,如六盘山、酒泉、辽西、胶莱等盆地的湖相沉积地层在 OAE1 期间,其地球化学以及有机碳同位素分析所得古气候结果与海相沉积地层有许多相似之处^[54,71-74]。这些证据进一步证实,OAE1 期事件在中国北方陆相盆地具有广泛的响应,并且在时间上与六盘山盆地乃家河组时期有较高的吻合度(见图 10)。这一时期由于受强干旱蒸发气候事件的影响,温暖、干旱气候交替发生,最终形成干旱气候,并导致了早白垩世中国西北地区大部分湖盆特别是六盘山盆地的盐渍化,以及从中国东北至西北的干旱程度的加剧(见图 10、11)^[54,70]。

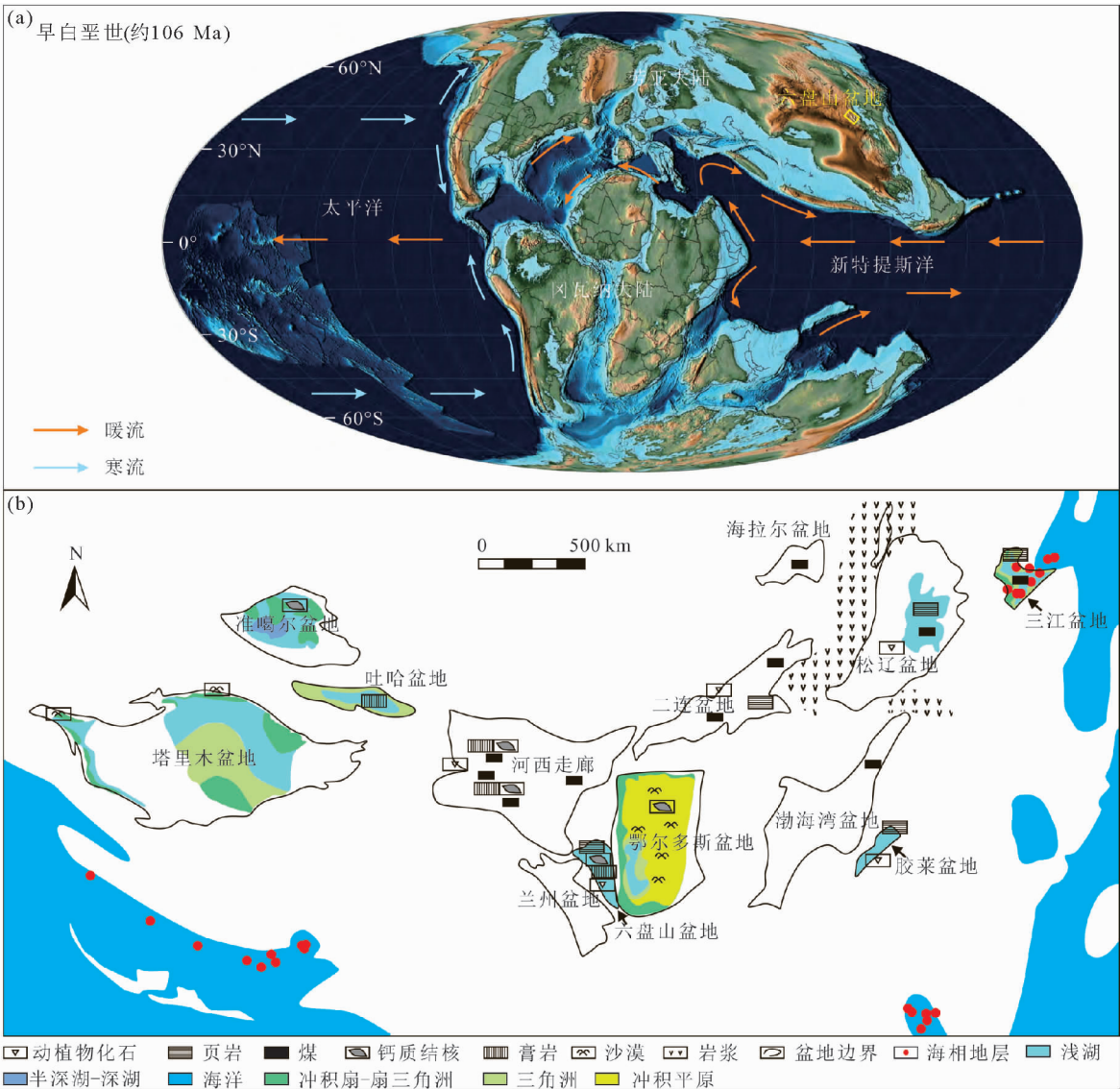


Fig. 11 Paleogeographic and paleoclimatic evolution of basins in Northern China during the Early Cretaceous (Aptian-Albian stages)

在兰州一河口、银额和六盘山盆地观察到的高含量的克拉梭粉类(*Classopollis*, 指示干旱气候)花粉,表明早白垩世晚期,中国西北地区以炎热、干燥和高蒸发的气候为主^[73]。因此,温室气候背景下的大洋缺氧事件在中国北方早白垩世晚期陆相沉积物(尤其是湖相烃源岩)的发育中发挥了重要作用。这一结论深化了对温室气候背景下,中国北方陆相湖泊系统古气候模式的理解。

5 结论

1)六盘山盆地早白垩世乃家河组沉积时期的风化作用较弱,沉积再循环作用可忽略不计,其物源主要为东祁连和西秦岭地区的长英质酸性岩石。

2)乃家河组沉积于干旱、缺氧的古气候中,为六盘山盆地湖盆发育的后期,干旱程度和古盐度均较高。

3)六盘山盆地乃家河组时期的古气候变化,与同期中国北方盆地相呼应,它们均受到全球性大洋缺氧事件(OAE1)的影响而形成特殊的古环境。

4)六盘山盆地乃家河组时期的咸水环境有利于有机质的形成,缺氧环境有利于有机质的保存。同时,该盆地保存有完好的盖层-烃源岩组合。研究区的古环境对油源的形成、存储与圈闭具有正向作用。

参考文献

- [1] 李克永,李文厚,刘哲,等. 宁夏六盘山盆地早白垩世六盘山群原型盆地特征[J]. 地质通报, 2016, 35(增刊1): 383-389.
LI K Y, LI W H, LIU Z, et al. Characteristics of Early Cretaceous prototype basin of Liupanshan Group in Liupanshan Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(Z1): 383-389.
- [2] 贺国庆,种俊丰,魏巍. 六盘山盆地地下白垩统烃源岩特征[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 23-25.
HE G Q, CHONG J F, WEI W. Characterization of hydrocarbon source rocks in the Lower Cretaceous of the Liupanshan Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 23-25.
- [3] 崔红庄,王金铎,尹克敏,等. 六盘山盆地早白垩世沉积演化特征分析[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(4): 411-416.

- CUI H Z, WANG J D, YI K M, et al. Characteristics of sedimentary evolution of Early Cretaceous in Liupanshan Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(4): 411-416.
- [4] 张字龙,贺锋,衣龙升,等. 六盘山盆地月亮山地区铀成矿地质特征分析[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(3): 185-197.
ZHANG Z L, HE F, YI L S, et al. Geological characterization of uranium mineralization in the Moon Mountain area of the Liupanshan Basin[J]. Advances in Geosciences, 2020, 10(3): 185-197.
- [5] DU B X, ZHANG M Z, DAI S, et al. Discovery of Pseudofrenelopsis from the Lower Cretaceous of Liupanshan Basin and its paleoclimatic significance[J]. Cretaceous Research, 2014, 48: 193-204.
- [6] 何欣,卢宗盛,翁平,等. 六盘山盆地早白垩世含盐地层中石蚕巢化石[J]. 地球科学, 2014, 39(1): 1-9.
HE X, LU Z S, WENG P, et al. Fossil *Caddisfly* cases from the Early Cretaceous aliferous strata in Liupanshan Basin, China[J]. Earth Science, 2014, 39(1): 1-9.
- [7] 梁积伟,常小斌,陶文星,等. 六盘山白垩纪狼鳍鱼化石的埋藏学及其古气候、古环境意义[J]. 地球科学, 2024, 49(1): 189-208.
LIANG J W, CHANG X B, TAO W X, et al. Taphonomy of *Lycoptera* fossils and its paleoclimate and paleoenvironment significance from the Cretaceous Liwaxia Formation in Liupanshan Area[J]. Earth Science, 2024, 49(1): 189-208.
- [8] HU X M, JANSAL, WANG C, et al. Upper Cretaceous oceanic Red beds (CORBs) in the Tethys: Occurrences, lithofacies, age and environments[J]. Cretaceous Research, 2005, 26: 3-20.
- [9] LECKIE R M, BRALOWER T J, CASHMAN R. Oceanic anoxic events and plankton evolution: Biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous[J]. Paleoceanography, 2002, 17(3): 1-29.
- [10] HU X M, SCOTT R W, CAI Y, et al. Cretaceous oceanic Red beds (CORBs): Different time scales and models of origin[J]. Earth Science Reviews, 2012, 115: 217-248.
- [11] BICE K L, NORRIS R D. Possible atmospheric CO₂ extremes of the Middle Cretaceous (late Albian-Turonian)[J]. Paleoceanography, 2002, 17(22): 1-17.
- [12] HUBER B T, NORRIS R D, MACLEOD K G. Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous[J]. Geology, 2002, 30: 123-126.

- [13] WANG Y D, HUANG C M, SUN B N, et al. Paleo- CO_2 variation trends and the Cretaceous greenhouse climate[J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 129:136-147.
- [14] FRIEDRICH O, NORRIS R D, ERBACHER J. Evolution of middle to Late Cretaceous oceans: A 55 my record of earth's temperature and carbon cycle[J]. *Geology*, 2012, 40:107-110.
- [15] LI W, DONG Y P, GUO A L, et al. Chronology and tectonic significance of Cenozoic faults in the Liupanshan Arcuate Tectonic Belt at the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 73:103-113.
- [16] LUDVIGSON G A, JOECKEL R M, LEZ L A G, et al. Correlation of Aptian-Albian carbon isotope excursions in continental strata of the Cretaceous foreland basin, eastern Utah, U S A[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80:955-974.
- [17] ZHANG X Y, LI S J, YAN M M, et al. Early Cretaceous black shale in the Fajiyang Formation (Lingshan Island, East China): Terrestrial record of hot-house climate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 191: 104200.
- [18] 陈金燕. 六盘山盆地早白垩世烃源岩沉积有机相研究[J]. *地球化学*, 2018, 47(4): 325-334.
CHEN J Y. Study of sedimentary organic facies of Early Cretaceous source rocks in Liupanshan Basin[J]. *Geochemica*, 2018, 47(4): 325-334.
- [19] 马风华, 张勇, 潘进礼, 等. 六盘山盆地白垩系马东山组泥页岩稀土元素地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2021, 67(1): 209-217.
MA F H, ZHANG Y, PAN J L, et al. Geochemical characteristics of rare earth element and their geological significance of mud-shale in Cretaceous Madongshan Formation, Liupanshan Basin[J]. *Geological Review*, 2021, 67(1): 209-217.
- [20] 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 737-747.
LIU C Y, ZHAO H G, WANG F, et al. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2025, 79(6): 737-747.
- [21] ZHAO X C, LIU C Y, WANG J Q, et al. Provenance analyses of Lower Cretaceous strata in the Liupanshan Basin: From paleocurrents indicators, conglomerate clast compositions, and zircon U-Pb geochronology[J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 31: 757-771.
- [22] 蔡利飘. 六盘山盆地南部白垩统烃源岩地球化学特征与生烃演化研究[J]. *地质科学*, 2021, 56(4): 1214-1226.
CAI L P. Study on geochemistry and hydrocarbon generation evolution characteristics of Lower Cretaceous source rocks in southern Liupanshan Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(4): 1214-1226.
- [23] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617-638.
LIU C Y, ZHAO H G, GUI X J, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617-638.
- [24] ZHAO X C, LIU C Y, WANG J Q, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Paleozoic sedimentary rocks from the eastern Hexi Corridor Belt (NW China): Provenance and geodynamic implications[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 339: 32-45.
- [25] 白云来, 王新民, 刘化清, 等. 鄂尔多斯盆地西部边界的确定及其地球动力学背景[J]. *地质学报*, 2006, 80(6): 792-813.
BAI Y L, WANG X M, LIU H Q, et al. Determination of the border line of the western Ordos Basin and its geodynamics background[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 792-813.
- [26] 施伟, 张岳桥, 马寅生, 等. 六盘山盆地形成和改造历史及构造应力场演化[J]. *中国地质*, 2006, 33(5): 1066-1074.
SHI W, ZHANG Y Q, MA Y S, et al. Formation and modification history of the Liupanshan Basin on the southwestern margin of the Ordos Block and tectonic stress field evolution[J]. *Geology in China*, 2006, 33(5): 1067-1074.
- [27] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2919-2940.
- [28] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [29] 刘俊海, 杨香华, 于水, 等. 东海盆地丽水凹陷古新统沉积岩的稀土元素地球化学特征[J]. *现代地质*, 2003, 17(4): 421-427.
LIU J H, YANG X H, YU S, et al. The ree geochemical characteristics of Paleocene-Eocene in the Lishui Sag of the Donghai Basin[J]. *Geoscience*, 2003, 17

- (4):421-427.
- [30] MCDONOUGH W F, SUN S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [31] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [32] WANG Z W, WANG J, FU X G, et al. Geochemistry of the Upper Triassic black mudstones in the Qiangtang Basin, Tibet: Implications for paleoenvironment, provenance, and tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 160:118-135.
- [33] CHEN M, SUN M, CAI K D, et al. Geochemical study of the Cambrian-Ordovician meta-sedimentary rocks from the northern altai-Mongolian terrane, north-western Central Asian Orogenic Belt: Implications on the provenance and tectonic setting[J]. *Journal Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 69-83.
- [34] VERMA S P, ARMSTRONG-ALTRIN J S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins[J]. *Chemical Geology*, 2013, 355: 117-133.
- [35] LI J, TIAN J C, ZHANG X, et al. Geochemical characteristics and the constraints on paleoenvironment, provenance, and tectonic setting of Precambrian Xifangshan Formation in the northwestern Tarim Basin, NW China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109553.
- [36] WELTJE G J, VON EYNATTEN H. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171(1): 1-11.
- [37] ZHANG X L, GAO Z Q, FAN T L, et al. Element geochemical characteristics, provenance attributes, and paleosedimentary environment of the Paleogene strata in the Lenghu Area, northwestern Qaidam Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195: 107750.
- [38] GIRTY G H, RIDGE D L, KNAACK C, et al. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66: 107-118.
- [39] HAYASHI K I, FUJISAWA H, HOLLAND H D, et al. Geochemistry of ca. 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 4115-4137.
- [40] WANG Z W, WANG J, FU X G, et al. Organic material accumulation of Carnian mudstones in the North Qiangtang Depression, eastern Tethys: Controlled by the paleoclimate, paleoenvironment, and provenance[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 440-457.
- [41] RODDAZ M, VIERS J, BRUSSET S, et al. Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: Insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments[J]. *Chemical Geology*, 2006, 226(1): 31-65.
- [42] 宁奥杰. 六盘山白垩纪盆地沉积演化[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [43] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(6): 1265-1273.
- WANG F, LIU X C, DENG X Q, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [44] 于海田, 许中杰, 程日辉, 等. 北黄海盆地中侏罗世一早白垩世构造体制转换期的古气候演化及元素地球化学响应[J]. *地球科学*, 2021, 46(3): 1100-1118.
- YU H T, XU Z J, CHENG R H, et al. Paleoclimate evolution and elemental geochemical response during middle Jurassic-Early Cretaceous in tectonic regime transition period in the North Yellow Sea Basin[J]. *Earth Science*, 2021, 46(3): 1100-1118.
- [45] LERMAN A. Lakes chemistry and geology physics[M]. Texas: Geological Press, 1989.
- [46] MENG Q T, LIU Z J, BRUCH A A, et al. Palaeoclimatic evolution during Eocene and its influence on oil shale mineralization, Fushun Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 45: 95-105.
- [47] 代军, 王永栋, 周宁, 等. 鄂西秭归盆地地下侏罗统香溪组泥岩地球化学特征及其古环境意义[J]. *地层学杂志*, 2021, 45(1): 58-68.
- DAI J, WANG Y D, ZHOU N, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of mudstones from the Lower Jurassic Xiangxi Formation in the Zigui Basin, Western Hubei Province, China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2021, 45(1): 58-68.
- [48] CHEN H, TANG D Z, CHEN S D, et al. Geochemical characteristics of mudstones from the lower Cretaceous strata of the Jixi Basin, NE China: Implications for organic matter enrichment[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2022, 249: 103904.
- [49] 郑玉龙, 马志强, 王佰长, 等. 黑龙江省柳树河盆地

- 始新统八虎力组油页岩元素地球化学特征及沉积环境[J]. 古地理学报, 2015, 17(5): 689-698.
- ZHENG Y L, MA Z Q, WANG B C, et al. Geochemistry characteristics and sedimentary environment of oil shale from the Eocene Bahuli Formation in Liushuhe Basin, Heilongjiang Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(5): 689-698.
- [50] 马风华, 潘进礼, 马瑞赞, 等. 华北板块南缘六盘山盆地固参1井马东山组泥页岩段古沉积环境研究[J]. 地质论评, 2019, 65(5): 1123-1130.
- MA F H, PAN J L, MA R Y, et al. Paleo-sedimentary environmental study of mud-shale member of Madongshan Formation of well Gucan-1 in Liupanshan Basin, North China Plate[J]. Geological Review, 2019, 65(5): 1123-1130.
- [51] DU B X, LEI X T, ZHANG M Z, et al. Late-Early Cretaceous climate and $p\text{CO}_2$ estimates in the Liupanshan Basin, Northwest China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 503: 26-39.
- [52] 李建国, 杜宝安. 甘肃平凉安国镇白垩系六盘山群的孢粉植物群[J]. 古生物学报, 2006, 45(4): 487-497.
- LI J G, DU B A. Palynofloras from the Liupanshan Group (Cretaceous) at Anguo Town of Pingliang, Gansu[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2006, 45(4): 498-513.
- [53] 张明震, 戴霜, 张永全, 等. 六盘山地区寺口子剖面早白垩世晚期的孢粉组合及其环境意义[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 99-108.
- ZHANG M Z, DAI S, ZHANG Y Q, et al. Early Cretaceous palynological assemblage and its environmental significance in the sediments of Liupanshan Group (Sikouzi Section), Liupanshan Region, central China[J]. Arid and Geography, 2012, 35(1): 99-108.
- [54] LI X H, XU W L, LIU W H, et al. Climatic and environmental indications of carbon and oxygen isotopes from the Lower Cretaceous calcrite and lacustrine carbonates in southeast and northwest China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 385: 171-189.
- [55] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 缺氧环境及地球化学判别标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 365-372.
- TONGER, LIU W H, XU Y C, et al. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying indices[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2004, 22(2): 365-372.
- [56] 刘沅, 刘招君, 柳蓉, 等. 抚顺盆地始新统计军屯组油页岩地球化学特征及其沉积环境[J]. 世界地质, 2007, 26(4): 441-446.
- LIU F, LIU Z J, LIU R, et al. Geochemistry of oil shale from Jijuntun Formation of Eocene in Fushun Basin and its depositional environment[J]. Global Geology, 2007, 26(4): 441-446.
- [57] 李继东, 付玉鑫, 蒋飞虎, 等. 银额盆地地下白垩统巴音戈壁组泥岩地球化学特征及其古环境意义[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 48-56.
- LI J D, FU Y X, JIANG F H, et al. Geochemical characteristics and the irpaleoenvironmental significance of the mudstones from the Lower Cretaceous Bayingebi Formation in the Yin'e Basin[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2020, 41(3): 48-57.
- [58] SCHEFFLER K, BUEHMANN D, SCHWARK L. Analysis of Late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies response to climate evolution and sedimentary environment[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 240: 184-203.
- [59] 彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(2): 121-127.
- PENG X F, WANG L J, JIANG L P. Geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin and its environmental implications[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(2): 121-127.
- [60] MORFORD J L, MARTIN W R, CARNEY C M. Uranium diagenesis in sediments underlying bottom waters with high oxygen content[J]. Geochimica et Cosmochimica, 2009, 73: 2920-2937.
- [61] WIGNALL P B, TWITCHETT R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. Science, 1996, 272: 1155-1158.
- [62] CHENG Y, LIU W, WU W, et al. Geochemical characteristics of the lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Huize Area, east Yunnan: Implications for paleo-ocean environment and the origin of black rock series[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14: 1-16.
- [63] ZHANG S S. Application and research of Mg/Al ratio in the sedimentary rocks[J]. Bulletin of Mineral Geochemistry, 1988, 7(2): 112-113.
- [64] 钟福平, 钟建华, 由伟丰, 等. 六盘山地区下白垩统

- 六盘山群乃家河组核形石形成的环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(2): 206-212.
- ZHONG F P, ZHONG J H, YOU W F, et al. The formation environment and genesis of the oncolite in Lower Cretaceous Liupanshan Group of Liupan Mountain area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(2): 206-212.
- [65] 屈红军, 李文厚, 何希鹏, 等. 六盘山盆地白垩统沉积层序与含油气系统[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 70-74.
- QU H J, LI W H, HE X P, et al. Discussion on sequence stratigraphy and petroleum system of the Lower Cretaceous in Liupanshan Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2003, 33(1): 70-74.
- [66] 孙立东, 印长海, 刘超, 等. 松辽盆地营城组优质烃源岩地质特征及勘探意义[J]. 石油学报, 2019, 40(10): 1172-1179.
- SUN L D, YIN C H, LIU C, et al. Geological characteristics and exploration significance of high-quality source rocks in Yingcheng Formation, Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(10): 1172-1179.
- [67] 谢青. 六盘山盆地白垩统页岩油气生成、聚集条件评价及有利区预测[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [68] CAO K. Cretaceous terrestrial deposits in China[J]. *China Geology*, 2018, 3: 402-414.
- [69] XI D P, WAN X Q, LI G B, et al. Cretaceous integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 256-286.
- [70] ZHANG X Y, LI S J, WANG X X, et al. Expression of the early Aptian Oceanic Anoxic Event (OAE) 1a in lacustrine depositional systems of East China[J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 196: 103370.
- [71] CHEN G, GANG W Z, WANG N, et al. Geochemical characterisation of the Xiagou Formation carbonate-bearing mudstone in southwestern Jiuquan Basin, China: Implications for paleo-environment reconstruction and the origin of organic matter[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2018, 65(1): 121-134.
- [72] 饶耕玮, 刘晓东, 刘平辉, 等. 二连盆地川井坳陷白垩系地层元素地球化学特征及地质意义[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3023-3031.
- RAO G W, LIU X D, LIU P H, et al. Geochemical characteristics and geological significance of cretaceous strata elements in Chuanjing Depression, Erlian Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(8): 3023-3031.
- [73] 张明震. 早白垩世六盘山群、巴音戈壁组孢粉植物群及古气候古地理意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [74] ZHANG K, LIU R, LIU Z J, et al. Terrestrial records of Early Cretaceous paleoclimate fluctuations in the Yin'e Basin, northern China: Evidence from sedimentology and palynomorphs in lacustrine sediments[J]. *Sedimentary Geology*, 2022, 432: 106110.

(编辑 雷雁林)