

文章编号: 1000-0747(2018)06-0936-11 DOI: 10.11698/PED.2018.06.02

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义

付金华^{1,2}, 李士祥^{1,3}, 徐黎明^{1,3}, 牛小兵^{1,3}

(1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018; 2. 中国石油长庆油田公司, 西安 710018;
3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710018)

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973项目)“淡水湖盆细粒沉积与富有机质页岩形成机理”(2014CB239003);
国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05050, 2017ZX05001002)

摘要: 通过对鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段周缘露头剖面及盆内钻井取心共289块样品进行元素地球化学测试分析, 运用CaO/MgO·Al₂O₃、Sr/Cu、Rb/Sr、B元素含量、Rb/K₂O、Th/U和V/(V+Ni)等一系列古温度、古盐度和古氧化环境判别指标, 尝试恢复长7段沉积期的古气候、古盐度和古氧化还原条件等古环境特征。综合分析表明, 长7段沉积期为古气温大于15℃的温暖潮湿的温带—亚热带气候, 水体为陆相微咸水—淡水环境, 沉积物是在强还原条件下形成的。适宜的温度、大面积深水湖盆、强还原性的古沉积环境, 导致长7₃亚段有机质大量发育和富集保存, 既形成了一套优质烃源岩, 同时也为大规模页岩油的富集创造了有利条件。图7表1参43

关键词: 古气候; 古盐度; 古氧化还原条件; 元素地球化学; 古沉积环境; 长7段; 上三叠统; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China

FU Jinhua^{1,2}, LI Shixiang^{1,3}, XU Liming^{1,3}, NIU Xiaobing^{1,3}

(1. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, China; 2. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China; 3. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: Paleosedimentary environment of Chang 7 Member of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, including the paleoclimate, paleosalinity and paleoredox conditions were restored through geochemical element analysis of 289 samples collected from the outcrop sections around and wells drilled in the basin and using a series of identification indexes of paleoclimate, paleosalinity and paleoredox conditions, such as CaO/MgO·Al₂O₃, Sr/Cu, Rb/Sr, Rb/K₂O, Th/U, V/(V+Ni), the content of element B tested from the mudstone. Comprehensive analysis shows that in sedimentary period of the Chang 7, the paleoclimate was warm temperate to subtropical climate with temperature higher than 15℃, the water body was continental brackish water to freshwater, and the sediments were deposited under strong reduction conditions. Suitable temperature, extensively deep lake basin and strongly reductive paleosedimentary environment led to the blooming, enrichment and preservation of organic matter in the submember Chang 7₃. As a result, a set of high-quality source rock was formed, laying material foundation for large-scale accumulation of shale oil.

Key words: paleoclimate; paleosalinity; paleoredox conditions; element geochemistry; paleosedimentary environment; Chang 7 Member; Upper Triassic; Ordos Basin

引用: 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 936-946.

FU Jinhua, LI Shixiang, XU Liming, et al. Paleosedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 936-946.

0 引言

长庆油田于2014年在鄂尔多斯盆地三叠系延长组

长7段探明了中国首个亿吨级致密油田, 使该盆地致密油勘探取得了实质性进展。恢复长7段古沉积环境及演化特征, 对分析古沉积环境演化与富有机质页岩形

成的关系非常重要。古沉积环境恢复的研究方法众多, 常量元素和微量元素地球化学定量分析是最为常用的方法和手段, 在众多盆地沉积古环境恢复中被广泛应用^[1-7]。对于古气候的恢复, 通常用 Mg/Ca 比值法^[8-10]、MgO/CaO 比值法^[10]、CaO/MgO·Al₂O₃ 比值法^[11-14]、Sr/Cu 比值法^[3,8]等进行综合判识。对于古盐度的恢复, 常用 Sr/Ba 比值法^[7-8,15-17]、Rb/K 比值法^[16]、MgO/Al₂O₃ 比值法^[8,15]、B 元素法^[1,18-19]、V/Ni 比值法^[10]、Th/U 比值法^[10]、B/Ga 比值法^[20]。对于古环境氧化还原条件的恢复, 常选取对氧化还原敏感的元素来进行分析^[21], 一般采用 V/Cr^[3,21-22]、Ni/Co^[3,21]、V/(V+Ni)^[23-25]、Fe²⁺/Fe³⁺^[8]、U/Th^[21]、Ce/Ce*^[26-27]、Eu/Eu*^[26-27]、(Cu+Mo)/Zn 比值法^[28-29]等进行分析。

在综合调研古沉积环境恢复方法的基础上,系统对鄂尔多斯盆地周缘 19 条延长组露头剖面取样 160 块和盆地内 25 口井(剖面 and 井位置见图 1) 取样 129 块,共计 289 块,目的层长 7 段样品共 243 块,其中长 7_1 亚段、长 7_2 亚段和长 7_3 亚段样品数分别为 80 块、79 块和 84 块,延长组长 9—长 8 段、长 6—长 1 段等其他层位共有样品 46 块。对上述基本涵盖盆地整个区域的样品进行地球化学元素测试分析,选取常量和微量元素比值等适用性方法对长 7 段沉积期古环境进行恢复。基于盆缘及盆内大量样品分析测试数据,主要利用泥岩常量及微量元素,从全盆地区域内更加系统地对长 7 段沉积期古温度、古盐度、古还原氧化性进行定性或半定量地分析,以期更加系统地恢复整个盆地长 7 段古沉积环境。同时,深入分析长 7 段各小段的沉积环境变化规律,旨在认识环境演化对富有机质页岩发育的影响。

1 沉积背景

鄂尔多斯盆地晚三叠世为一持续沉降的大型陆相拗陷湖盆,主要发育冲积扇、河流、三角洲、湖泊等沉积相类型,沉积了一套厚度为 1 000~1 500 m 的陆源碎屑岩,延长组发育较完整,自上而下可划分为长 1—长 10 共 10 个段,其中长 7 段自上而下细分为长 7_1 、长 7_2 和长 7_3 共 3 个亚段。

晚三叠世鄂尔多斯湖盆经历了发生、发展、全盛、衰退乃至消亡的整个演化过程^[30], 延长组长 7 段沉积期是盆地湖盆发育的鼎盛时期, 湖泊面积最广, 半深湖、深湖区烃源岩广泛分布于盆地西南部 (见图 1), 面积约 $5.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 沉积了一套广泛分布的细粒沉积岩, 湖盆中部—西南部以富含有机质的泥页岩为主,

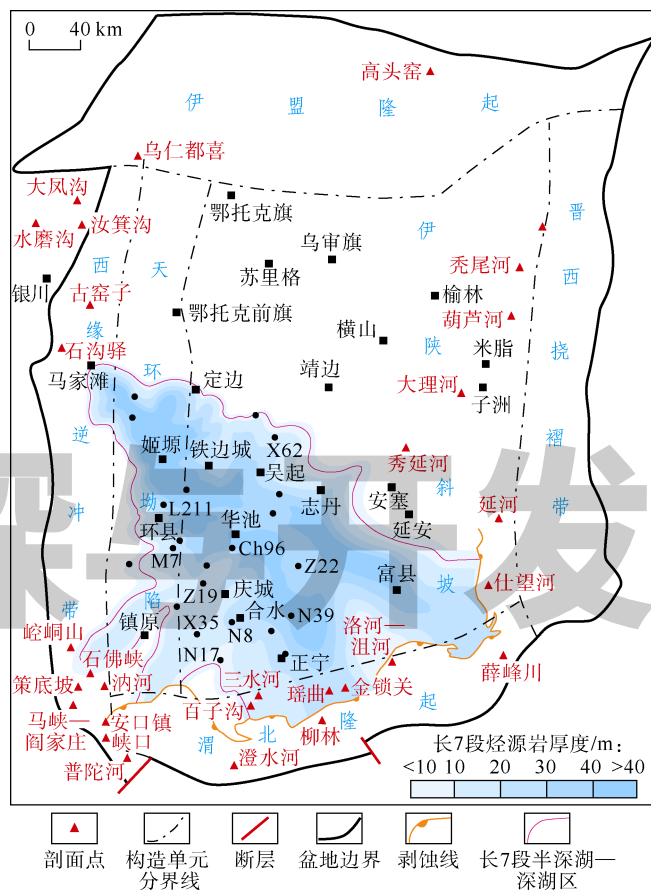


图 1 鄂尔多斯盆地构造区划及烃源岩展布图

这套泥页岩沉积奠定了延长组低渗—特低渗油藏、乃至长 7 段致密油大面积分布的烃源基础。

2 古气候判识

不同气候环境下沉积物的元素富集特征存在一定差异, 根据各元素的沉积环境特征, 通过对沉积物中的 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 K_2O 等常量元素和 Sr 、 Ba 、 Rb 等微量元素分析, 综合利用 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 比值法、 Sr/Cu 比值法和 Rb/Sr 比值法, 结合前人利用孢粉组合特征对古气候的研究, 对长 7 段沉积期古气候特征进行综合分析。

2.1 CaO/MgO · Al₂O₃ 比值法对古气温的判识

碳酸盐沉积记录主要反映湖泊原始沉积情况,基本上不受早期成岩作用的影响。对于陆源碎屑输入基本稳定的湖泊,内生碳酸钙沉淀直接影响沉积物碳酸盐含量的相对高低,而内生碳酸钙沉淀包含了许多气候变化信息^[11],其沉淀量与气温呈正比^[12]。湖泊沉积物中碳酸盐矿物主要为白云石和方解石, CaO/MgO 值基本反映了沉积物方解石与白云石比值的变化^[13-14]。淡水湖泊中的白云石主要来源于陆源碎屑,一般不是

内生沉淀的，而方解石则包含了由陆源搬运而来的外源组分和湖泊内生碳酸钙沉淀两部分^[13-14]，用 Al_2O_3 含量可以校正陆源碎屑输入量的变化^[14]。因此，对于陆源碎屑输入量基本稳定的长 7 段沉积期湖泊， $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 比值可灵敏地反映内生碳酸盐含量的相对高低，具有指示气温变化的意义，其高值指示温暖时期，低值指示相对寒冷时期^[12,14]。

长 7 段 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 平均值为 0.112，较长

9—长 8 段的 0.139、长 6—长 1 段的 0.148 及整个延长组的 0.117 要低（见表 1），反映了长 7 段沉积时湖盆发育鼎盛期的气温较延长组其他沉积时期稍低，这与鄂尔多斯盆地中晚三叠世湖盆演化及气候变迁吻合较好^[31-34]，总体反映湖盆形成早期为干旱炎热的气候特征；湖盆发育鼎盛的长 7 段沉积期，雨水充沛，形成了大面积发育的湖区，为温暖湿润的气候特征，之后湖盆萎缩阶段温度有所升高。

表 1 鄂尔多斯盆地延长组地球化学元素及元素比值统计表

层位	$\text{B}/10^{-6}$	$\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Sr/Ba	$\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$	Th/U	Sr/Cu	$\text{Rb}/\text{K}_2\text{O}$	Rb/Sr
长 9—长 8 段	8.1~74.3	0.057~0.295	0.21~1.94	0.56~0.91	1.34~14.54	2.52~25.24	2.86~6.21	0.07~1.66
	34.13(30)	0.139(30)	0.44(30)	0.76(30)	6.38(30)	7.09(30)	4.18(29)	0.62(30)
长 7 ₃ 亚段	3.1~87.6	0.001~0.514	0.06~0.94	0.51~0.97	0.28~12.38	0.88~29.37	2.52~7.37	0.01~6.72
	33.25(82)	0.101(82)	0.38(80)	0.79(82)	4.48(52)	8.19(50)	4.41(81)	0.69(83)
长 7 ₂ 亚段	3.05~78.9	0.002~0.313	0.07~0.88	0.68~0.97	0.28~9.77	1.75~28.22	2.52~7.57	0.12~2.15
	32.10(76)	0.112(76)	0.34(79)	0.78(76)	5.26(61)	7.20(61)	4.30(76)	0.63(76)
长 7 ₁ 亚段	7.25~86.4	0.027~0.239	0.13~0.91	0.59~0.91	0.96~15.67	2.54~26.70	1.70~7.11	0.07~2.28
	32.67(76)	0.125(77)	0.33(80)	0.77(76)	6.10(62)	6.71(62)	4.11(77)	0.70(77)
长 7 段	3.05~87.6	0.001~0.514	0.06~0.94	0.51~0.97	0.28~15.57	0.88~29.37	1.70~7.57	0.01~6.72
	32.69(234)	0.112(235)	0.35(239)	0.78(234)	5.33(175)	7.31(174)	4.28(234)	0.67(236)
长 6—长 1 段	9.95~104	0.067~0.213	0.19~0.73	0.70~0.89	3.11~9.21	2.17~23.78	3.28~5.87	0.25~2.23
	46.29(16)	0.148(16)	0.38(16)	0.75(16)	6.43(16)	7.44(16)	4.42(16)	0.68(16)
延长组	3.05~104	0.001~0.514	0.06~1.94	0.51~0.97	0.28~15.67	0.88~29.37	1.70~7.57	0.01~6.72
	33.62(280)	0.117(282)	0.36(285)	0.78(280)	5.55(221)	7.24(220)	4.27(280)	0.66(283)

注：表中数值分子为最小值~最大值，分母为平均值，括号内数值为样品数

为了纵向上能更细致地研究长 7 段沉积期各个阶段古气温的变化，对长 7 段盆地周缘 122 块露头剖面样品和盆地内部钻井取心 121 块样品，共 243 块样品的 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 比值，分长 7₃ 亚段、长 7₂ 亚段和长 7₁ 亚段进行对比分析，其 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 均值分别为 0.101、0.112、0.125（见表 1），长 7₁ 亚段最高，长 7₂ 亚段次之，长 7₃ 亚段最低。纵向上长 7₃ 亚段 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 低值点较长 7₂ 亚段和长 7₁ 亚段要多，自长 7₃ 亚段到长 7₁ 亚段，比值有微弱增大的趋势（见图 2）。为分析盆缘与盆内古沉积环境是否存在差异，对长 7 段的 3 个小段分盆缘和盆内两个种类做了元素及元素比值的分布箱线图（见图 3）。 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 箱线图中，自长 7₃ 亚段到长 7₁ 亚段，盆缘样品和盆内样品分布的中位数均呈增大趋势（见图 3），反映了长 7 段古气温自沉积早期到晚期呈逐渐上升的特点。长 7₃ 亚段和长 7₂ 亚段盆缘样品的中位数值小于盆内，长 7₁ 亚段盆缘样品中位数值与盆内基本相当，总体反映了不同区域温度存在一定差异，但差异较小。综上所述，水体深度最大、水域面积最广的长 7₃ 亚段沉积期气温较长 7₂ 亚段和长 7₁ 亚段沉积期气温稍低，盆缘古气温较盆内稍低，整个长 7 段沉积期自早期到晚期存

在温度微弱变高的变化特征。

同时，为了分析区域及纵向上的差异，选取了位于湖盆中部深水区的一口长 7 段全取心井 Z22 井（井位置见图 1）进行系统采样分析，包括长 6 段底部和长 8 段顶部，取样长度共 125 m，基本等间距地选取了 27 块样品进行了地球化学元素分析。总体而言，长 7 段 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 值分布在 0.010~0.174，长 7₃ 亚段、长 7₂ 亚段和长 7₁ 亚段平均值分别为 0.062、0.068 和 0.072，呈增高的趋势（见图 4），与上述分析的整个盆地长 7 段 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 值变化趋势一致；反映出在长 7 段沉积演化期，由早期的湖盆发育鼎盛阶段逐渐向后期萎缩阶段演变，古气温呈微弱升高的趋势。

前人研究资料表明，贵州红枫湖于 1960—1990 年在平均气温 15 ℃ 条件下，沉积物的 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 值主要分布在 0.043~0.104，平均值为 0.075^[12]。相比之下，鄂尔多斯湖盆长 7 段 $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 平均值的 0.112 和延长组的 0.117，均较红枫湖地区沉积物之值高。通过比较，可判断延长组沉积期的年平均古气温较红枫湖的 15 ℃ 要高，由此确认长 7 段沉积期年均古气温应大于 15 ℃。

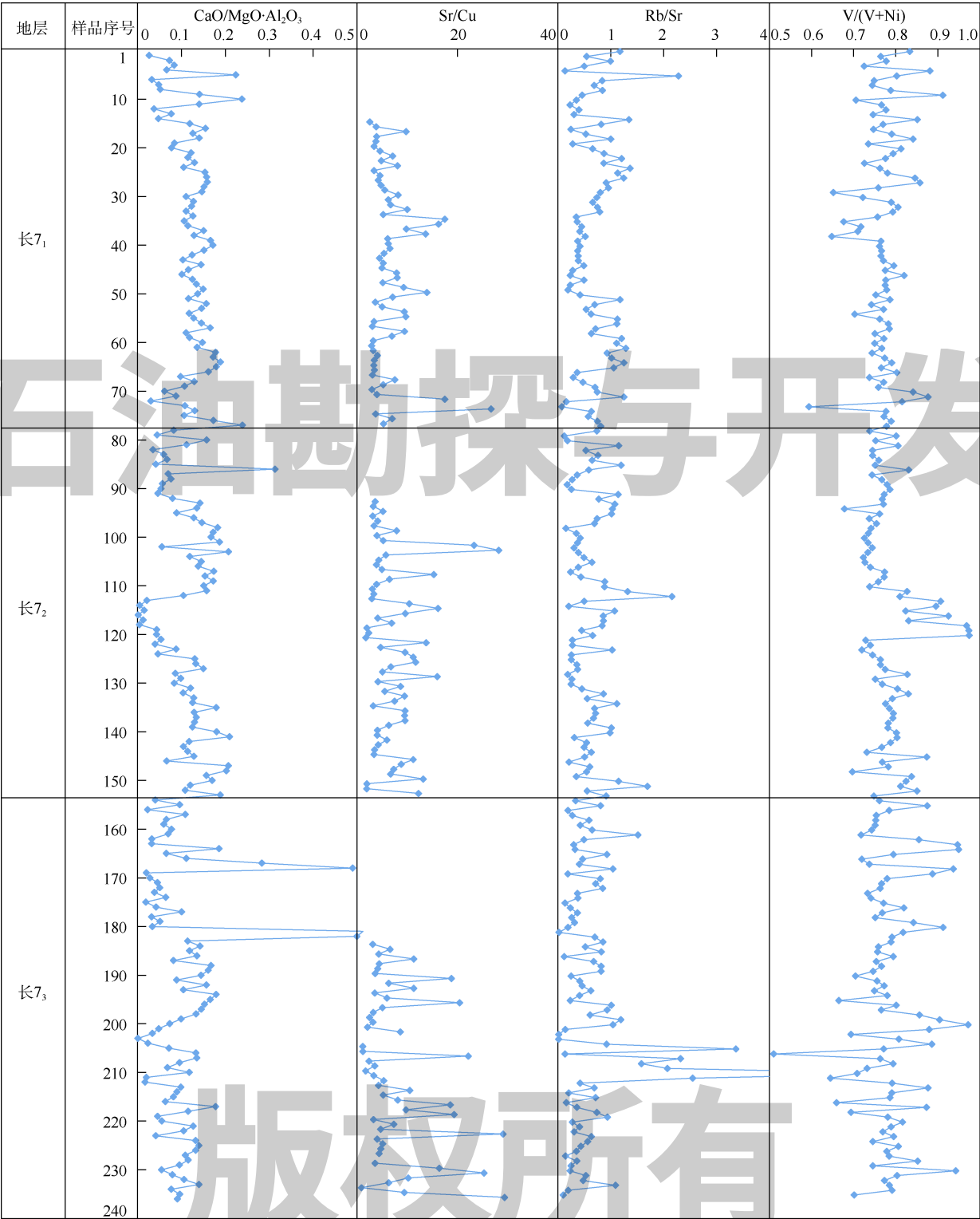


图 2 鄂尔多斯盆地长 7 段古气候与古氧化还原性判别指标变化特征

2.2 Sr/Cu 和 Rb/Sr 比值法对古气候的判识

沉积物中微量元素含量受古气候影响，不同气候条件下微量元素的富集存在明显差异，Rb、Cu 等喜湿型元素与 Sr 等喜干型元素的比值常被用来分析古气候特征^[3,8]，Sr/Cu 和 Rb/Sr 比值被广泛用于恢复古气候。

研究表明，Sr/Cu 小于等于 10 指示温湿气候，大于 10 指示干热气候^[11]。延长组 Sr/Cu 值主要分布在 1~10，平均值为 7.24（见表 1）；长 7 段 Sr/Cu 值主要分布在小于 10 的区间（见图 2），平均值为 7.31。Sr/Cu 箱线图的中位数主要分布在 3~5（见图 3），小于湿润与干

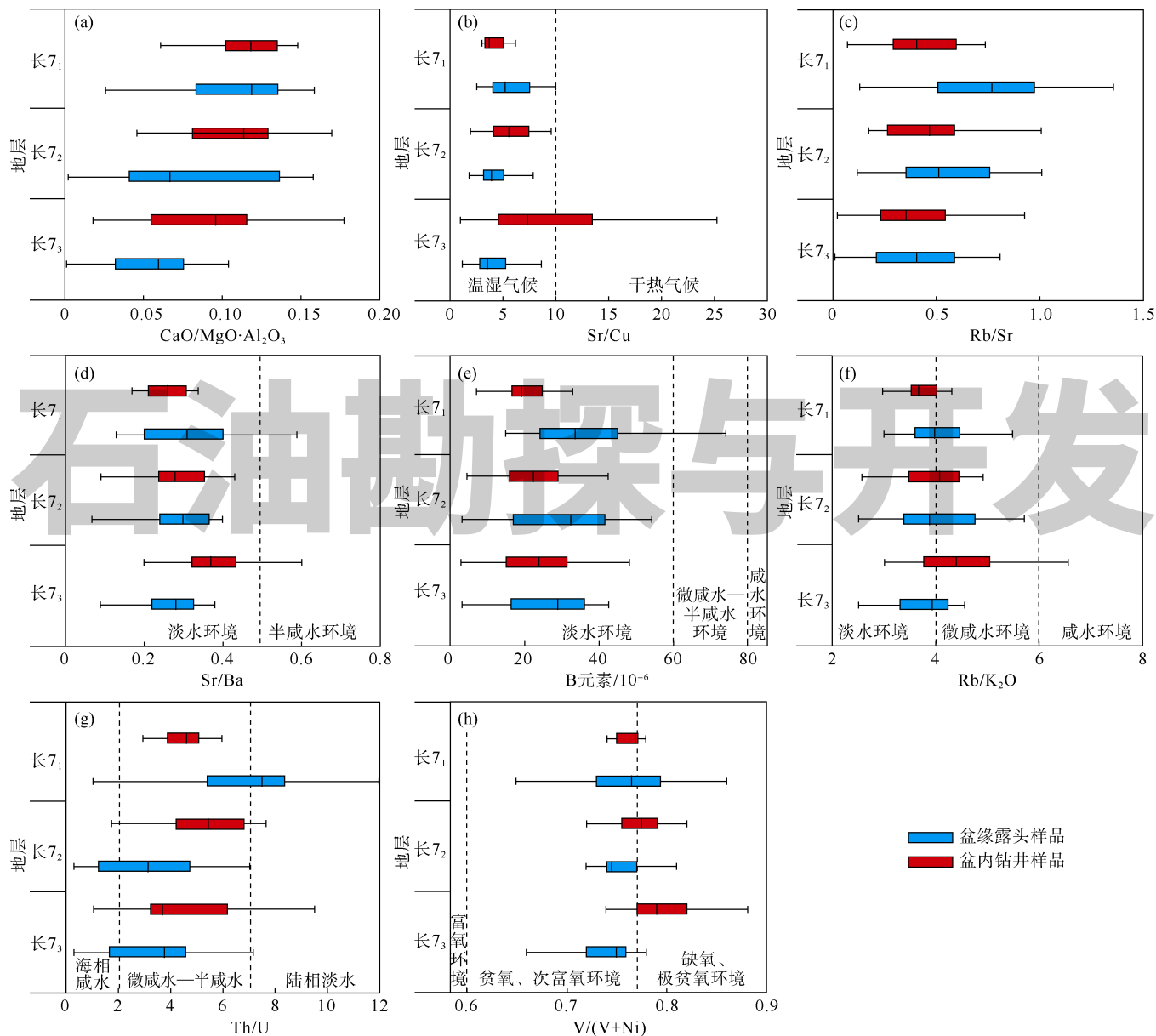


图3 鄂尔多斯盆地长7段地球化学元素及元素比值分布箱线图

热气候分界线，指示了长7段沉积期主要为温暖湿润的气候特征。

Rb在风化作用中相对稳定，而Sr则较易遭受淋滤散失^[35]。气候湿润时降水多、风化较强烈，Sr容易流失，使Rb/Sr值升高；气候干旱时降水较少、风化强度相对降低，母岩中残留更多的Sr，使Rb/Sr值变低^[35]。换言之，Rb/Sr高值指示湿润气候，低值指示干旱气候。延长组Rb/Sr值主要分布在0.4~1.5，平均值为0.66，长7段Rb/Sr值主要分布在0.2~1.2（见图2），平均值为0.67（见表1），中位数主要分布在0.4~0.7（见图3）。总体较鄂尔多斯盆地北部侏罗系由于湿润向干热气候转变导致的Rb/Sr值0.15~0.30^[5]要高，揭示了延长组乃至长7段沉积期主要为温暖湿润的古气候特征。

对比Sr/Cu和Rb/Sr垂向分布曲线，两者大致呈镜像变化趋势，Rb/Sr高值点对应Sr/Cu低值点，两者相互印证，综合反映出长7段沉积期主要为温暖湿润的古气候特征。

众多学者利用孢粉组合特征对长7段沉积期古气候特征进行了研究。吉利明等通过对陇东地区长8和长7段分别以Aratisporites-Punctatisporites和Asseretospora-Walchiites为代表的孢粉组合进行分析，反映了温带—亚热带暖湿或湿热气候特征^[32-33]。周利明等选取位于盆地半深湖—深湖沉积区的东南部耀县瑶曲聂家河—小桥河村剖面（见图1）长7段页岩样品，进行孢粉组合特征分析，孢粉组合以Dictyophyllidites-Punctatisporites-Taeniaesporites为主，推断该区长7段沉积期为温暖潮

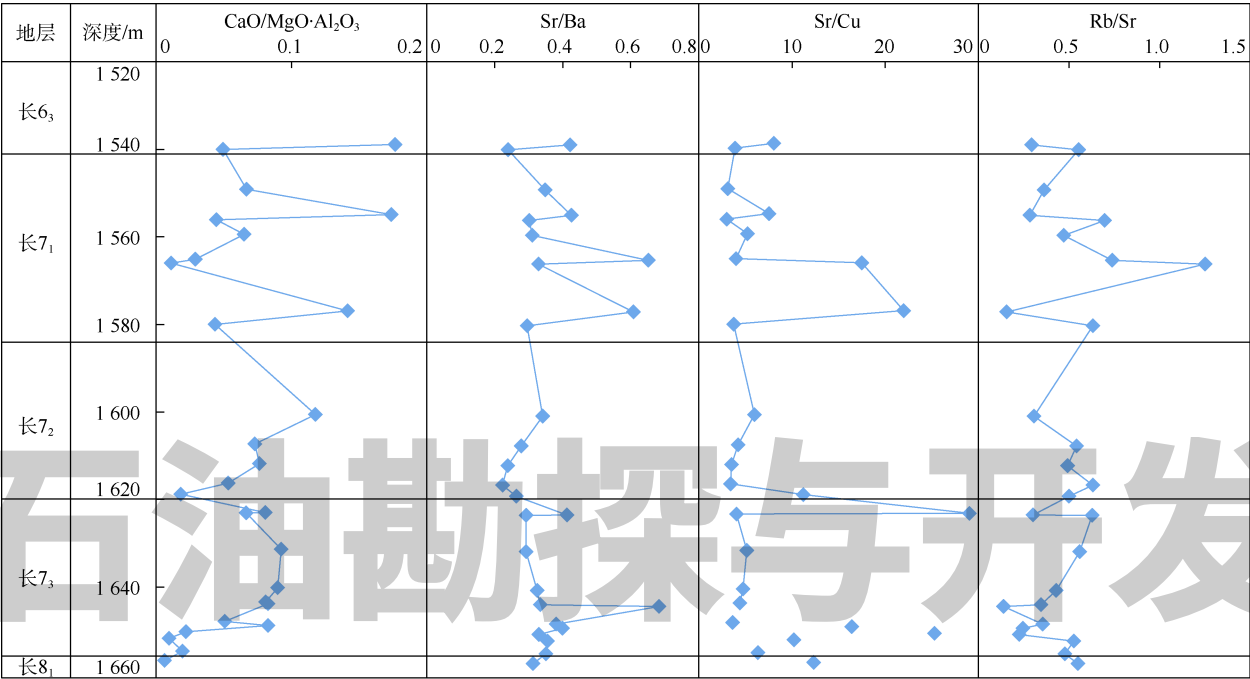


图 4 鄂尔多斯盆地 Z22 井延长组长 7 段古气温指标图

湿的温带—亚热带气候^[36]。

根据以上地球化学元素比值分析，并结合不同学者利用孢粉组合特征对长 7 段古气候的判识，综合确定了鄂尔多斯盆地长 7 段沉积期表现为古气温大于 15 ℃ 的温暖潮湿的温带—亚热带气候特征。

3 古水体性质

晚三叠世鄂尔多斯盆地处于湖水淡化过程。中晚三叠世盆地不仅完全脱离海水的直接影响，而且印支期强烈的差异性构造活动使盆地快速沉降，导致大型湖泊的形成，由于缺乏与海域的连通，属于逐渐被大气降水淡化的湖泊^[33]。研究古水体物理化学性质的方法较多，本次主要运用泥岩中的 Sr、Ba、B、Ga、V、Ni、Rb、Th、U 等微量元素研究延长组沉积期的古湖泊水体性质^[37-39]。

3.1 古盐度

Sr/Ba 值是古湖泊水体盐度判别的有效指标，Sr 比 Ba 在水中溶解度高，因此 Sr 迁移的更远，Sr/Ba 值可间接地反映陆相与海相沉积^[7-8,15-16]。研究认为：Sr/Ba 值小于 0.5 为淡水环境，0.5~1.0 为半咸水环境，大于 1.0 为咸水环境^[17,40]。延长组 Sr/Ba 平均值为 0.36，长 7 段 Sr/Ba 平均值为 0.35，长 9—长 8 段平均值为 0.44，长 6—长 1 段平均值为 0.38（见表 1），上述层段 Sr/Ba 平均值均小于 0.5，为淡水环境。长 7 段 Sr/Ba

值主要分布在 0.2~0.5（见图 5），其中长 7₃亚段、长 7₂亚段和长 7₁亚段平均值分别为 0.38、0.34、0.33，总体较为接近。盆缘与盆内两个种类样品的 Sr/Ba 值箱线图中，主要分布区间与中位数值无明显规律性差异（见图 3），反映了水体性质相似，均为淡水特征。张才利等^[34]通过鄂尔多斯盆地长 7 段 Sr/Ba 值为 0.19~0.69 的特征，判定长 7 段沉积期湖盆整体为陆相淡水环境。

B 元素常被用来指示古盐度^[19]，水体中 B 含量与盐度存在线性正相关关系，水体盐度越高，沉积物吸附的 B 离子就越多^[19]。一般而言，海水环境下的 B 含量在 0.008 0%~0.012 5%，而淡水环境的 B 含量多小于 0.006 0%。延长组 B 元素含量平均值为 0.003 4%（见表 1），长 7 段主要分布在 0.001 0%~0.005 0%（见图 5），平均值为 0.003 3%。B 元素含量箱线图中样品的中位数较为相近，均小于 0.004 0%（见图 3），表明长 7 段沉积期水体为淡水性质。

Rb/K₂O 也常用来判断沉积区古盐度的一个指标。由于 Rb 与 K 元素的值不在一个数量级上，因此计算 Rb/K₂O 值时需将 Rb 元素含量扩大 1 000 倍进行判别：大于 6 为咸水沉积环境，4~6 为微咸水沉积环境，小于 4 为淡水沉积环境^[16]。延长组 Rb/K₂O 平均值为 4.27（见表 1），长 7 段主要分布在 2~6（见图 5），平均值为 4.28。箱线图中样品的分布区间及中位数分布在淡水和微咸水环境（见图 3）。Rb/K₂O 与 Sr/Ba 的判别图

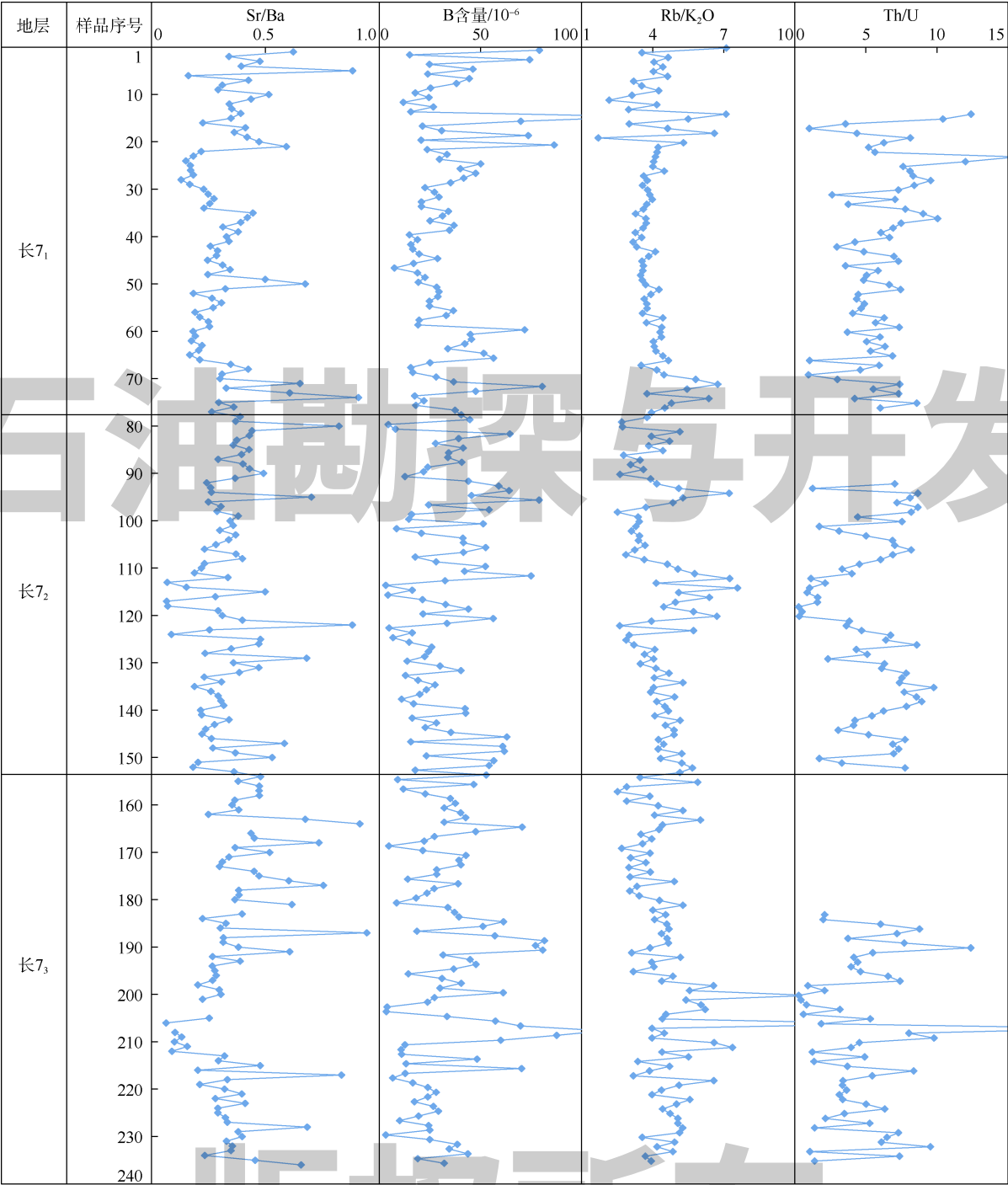


图 5 鄂尔多斯盆地长 7 段古盐度地球化学指标变化特征

中，样品点主要分布在淡水—微咸水区域，微咸水—半咸水区域也有部分样品点（见图 6）。总体反映了长 7 段淡水—微咸水的沉积环境。

Th/U 值可作为判识海陆相沉积的一个指标，一般而言，Th/U 值大于 7 为陆相淡水环境，2~7 为微咸水—半咸水沉积环境，小于 2 为海相咸水环境^[41]。长 7 段 Th/U 值主要分布在 2~8，平均值为 5.33（见表 1），主要分布在大于 2 的区间（见图 5），长 7₃ 亚段、长

7₂ 亚段和长 7₁ 亚段平均值分别为 4.48、5.26、6.10，由此判断长 7 段为陆相淡水—微咸水—半咸水的沉积环境。箱线图中，Th/U 值主要分布在微咸水—半咸水区域（见图 3），其中长 7₃ 亚段和长 7₂ 亚段盆内样品的分布区间和中位数值均较盆缘的大，反映了盆缘水体盐度稍高的特点。Th/U 与 Sr/Ba 的判别图中，样品点主要分布在微咸水—半咸水区域，其次分布在淡水—微咸水区域（见图 6）。判识长 7 段沉积期沉积水体整体

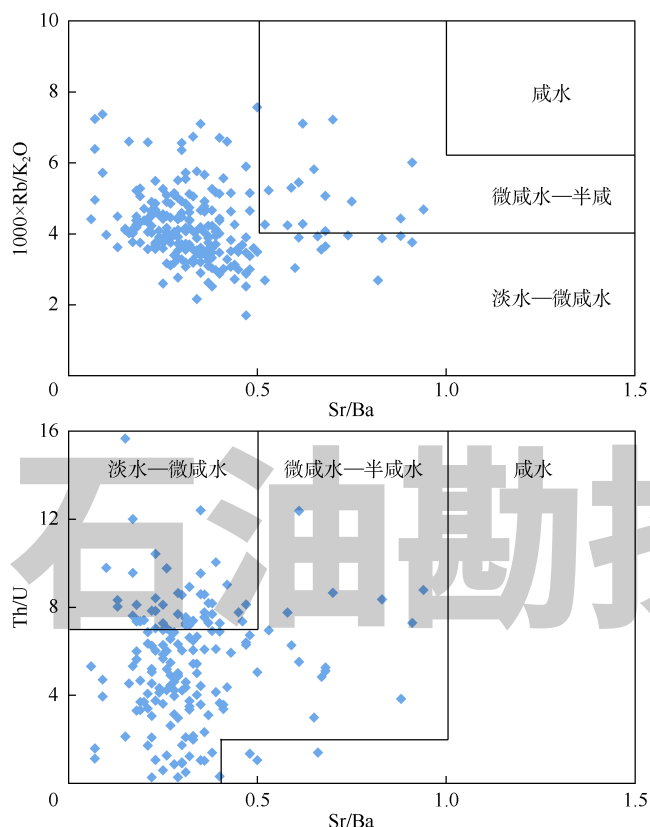


图 6 鄂尔多斯盆地长 7 段古盐度分析判别图

为陆相微咸水—半咸水的沉积环境。

综合 Sr/Ba、B 元素、Rb/K₂O、Th/U 等方法的分析, 结合张文正等^[41-42]恢复的古湖泊沉积环境为淡水环境, 综合判识长 7 段沉积期为陆相微咸水—淡水的水体性质。

3.2 古氧化还原环境

沉积环境氧化还原性判断要选取对氧化还原性敏感的元素进行分析, 一般认为 V、Cd、Cr、Co、Cu、U 等主量元素和 Zn、Fe、Cu 等微量元素对环境氧化还原性较为敏感^[21]。样品在还原条件下, 水体中的 V 比 Ni 能以更有效的有机络合物形式沉淀下来^[24], V/(V+Ni) 值被广泛应用于沉积环境氧化还原性的判识^[23]。

Jones 等通过对西北欧地区上侏罗统暗色泥岩的古沉积环境研究认为, V/(V+Ni) 大于 0.77 为缺氧、极贫氧环境, 0.60~0.77 为贫氧、次富氧环境, 小于 0.6 为富氧环境^[21]。Hatch 等认为 V/(V+Ni) 小于 0.46 为氧化环境, 0.46~0.57 为弱氧化环境, 0.57~0.83 为缺氧环境, 0.83~1.00 为缺氧、极贫氧环境^[24]。李广之等认为 V/(V+Ni) 小于 0.5 指示氧化环境, 大于等于 0.5 指示还原环境^[43]。

虽然不同学者划分标准有所差异, 但都认为随着

水体还原程度的逐渐增加, V/(V+Ni) 逐渐增大。延长组长 7 段 V/(V+Ni) 最小值均大于 0.5, 主要分布在 0.70~0.85 (见图 2), 平均值为 0.78 (见表 1), 反映了主要为贫氧、缺氧的还原环境。箱线图中, 盆缘样品的 V/(V+Ni) 分布区间及中位数均较盆内样品低 (见图 3), 总体反映了盆内的还原性比盆缘更强些。长 7₃ 亚段有较多的值分布在 0.8~1.0 (见图 2), 长 7₃ 亚段、长 7₂ 亚段和长 7₁ 亚段 V/(V+Ni) 均值分别为 0.79、0.78、0.77, 均表明为缺氧的还原环境。

综合对比分析长 7 段各小段元素地球化学特征的差异性, 在沉积水体为陆相淡水、还原性的沉积环境下, 存在自长 7₃ 亚段到长 7₁ 亚段沉积期古气温呈微弱升高、还原性降低的特征。在古沉积环境恢复的基础上, 选取了位于半深湖—深湖沉积区域的长 7 段全取心井 CH96 井, 系统分析了古沉积环境演化特征 (见图 7), 总体反映出该区长 7 段沉积期为温度较高的温带—亚热带气候, 自长 7₃ 亚段到长 7₁ 亚段温度存在变高的趋势, 为缺氧的还原性淡水沉积环境。

4 古沉积环境恢复的地质意义

由上述分析可知, 长 7 段沉积期在温暖潮湿的温带—亚热带气候条件下, 水系发育、光照充足、物源区风化程度高, 更多的营养物质被水流带入湖盆中, 为浮游生物勃发创造了有利条件, 具有极高的生物生产力。由于降雨量丰富, 水域面积大, 水体较深, 为缺氧的强还原环境, 有机质得以大量保存。温暖潮湿气候可形成稳定繁盛的植被, 陆地上土壤受到固结, 通过河流及风等搬运到湖泊中的无机碎屑较少, 从而降低了无机组分对有机质的稀释作用。长 7 段沉积期有利的气候条件为高有机碳含量、大面积厚层烃源岩的形成奠定了极好的基础。降雨量充沛、温度稍低、还原性最强的长 7₃ 亚段, 最有利于有机质发育和保存, 有机质丰度高, 有机碳含量最高可达 20% 左右, 形成了中生界最为主要的一套烃源岩。

同时, 长 7₃ 亚段适宜的温度、充沛的降水量、大面积淡水湖盆、还原性最强的古沉积环境特点, 有利于有机质大量发育和富集保存, 为大规模页岩油的富集创造了有利条件。长 7₂ 亚段和长 7₁ 亚段沉积期, 气温有所升高, 蒸发量较之前变大, 水体有所变浅, 古沉积环境的变化导致细砂及粉砂质的沉积岩在湖盆中部开始发育, 致密砂岩与烃源岩紧邻接触, 为致密油发育创造了良好条件。

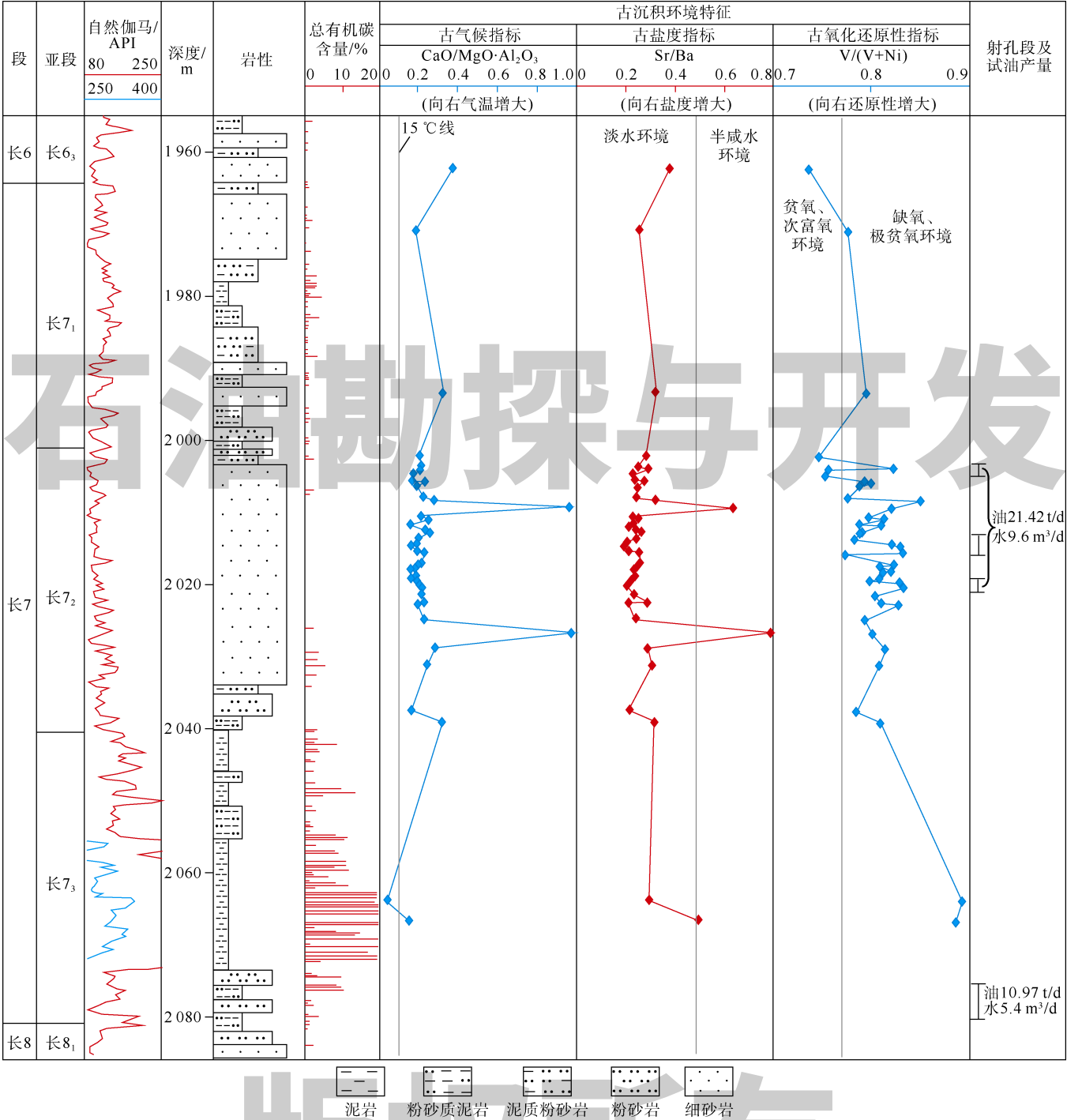


图7 鄂尔多斯盆地CH96井长7段古沉积环境特征综合柱状图

5 结论

鄂尔多斯盆地长7段沉积期为古气温大于15℃的温暖潮湿的温带—亚热带气候,沉积期水体为陆相微咸水—淡水水体,沉积物是在强还原条件下形成的。适宜的温度、大面积深水湖盆、强还原性的古沉积环境,导致长7₃亚段有机质大量发育和富集保存,既形成了一套优质烃源岩,同时也为大规模页岩油的富集创造了有利条件。

参考文献:
[1] 张天福,孙立新,张云,等.鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J].地质学报,2016,90(12):3454-3472.
ZHANG Tianfu, SUN Lixin, ZHANG Yun, et al. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(12): 3454-3472.
[2] 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 Feng, LIU Xuanchun, DENG Xiuqin, 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.
- [3] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3): 307-314.
- LIU Gang, ZHOU Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qianjiang Formation in the Jianghan Basin as an example[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2007, 29(3): 307-314.
- [4] 梁文君, 肖传桃, 肖凯, 等. 藏北安多晚侏罗世古环境、古气候与地球化学元素关系研究[J]. *中国地质*, 2015, 42(4): 1079-1091.
- LIANG Wenjun, XIAO Chuantao, XIAO Kai, et al. The relationship of Late Jurassic paleoenvironment and paleoclimate with geochemical elements in Amdo Country of northern Tibet[J]. *Geology in China*, 2015, 42(4): 1079-1091.
- [5] 雷开宇, 刘池洋, 张龙, 等. 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*, 2017, 35(3): 621-636.
- LEI Kaiyu, LIU Chiyang, ZHANG Long, et al. Element geochemical characteristics of the Jurassic mudstones in the northern Ordos Basin: Implications for tracing sediment sources and paleoenvironment restoration[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 621-636.
- [6] 戴金星, 倪云燕, 张文正, 等. 中国煤成气湿度和成熟度关系[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 675-677.
- DAI Jinxing, NI Yunyan, ZHANG Wenzheng, et al. Relationships between wetness and maturity of coal-derived gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 675-677.
- [7] 付金华, 邓秀芹, 王琪, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长8储集层致密与成藏耦合关系: 来自地球化学和流体包裹体的证据[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 48-57.
- FU Jinhua, DENG Xiuqin, WANG Qi, et al. Compaction and hydrocarbon accumulation of Triassic Yanchang Formation Chang 8 Member, Ordos Basin, NW China: Evidences from geochemistry and fluid inclusions[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 48-57.
- [8] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 405-414.
- XIONG Xiaohui, XIAO Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments: A summary[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 405-414.
- [9] WILDER P, QUIMBY M S, ERDTMANN B D. The whole-rock cerium anomaly: A potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of anoxic facies[J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 101(1/2): 43-53.
- [10] 冯乔, 张耀, 徐子苏, 等. 胶莱盆地早白垩世瓦屋组、水南组元素地球化学特征与古环境分析[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(1): 20-34.
- FENG Qiao, ZHANG Yao, XU Zisu, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental analysis of dark fine grained rocks of Wawukuang and Shuinan formations in Jiaolai Basin[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 37(1): 20-34.
- [11] LERMAN A. *Lakes: Chemistry, geology, physics*[M]. Berlin: Springer, 1978.
- [12] 吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 贵州红枫湖纹理沉积物中近代气温记录[J]. *地理科学*, 1996, 16(4): 345-350.
- WU Fengchang, WAN Guojiang, HUANG Ronggui. Recent temperature records of annually laminated sediments in Hongfeng lake, Guizhou[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(4): 345-350.
- [13] 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. *地球化学*, 1999, 28(6): 562-570.
- CHEN Jing'an, WAN Guojiang, CHEN Zhenlou, et al. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and palaeoclimate evolution[J]. *Geochimica*, 1999, 28(6): 562-570.
- [14] 陈敬安, 万国江. 云南洱海沉积物粒度组成及其环境意义辨析[J]. *矿物学报*, 1999, 19(2): 175-182.
- CHEN Jing'an, WAN Guojiang. Sediment particle size distribution and its environmental significance in Lake Erhai, Yunnan province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1999, 19(2): 175-182.
- [15] 王鹏万, 陈子焯, 李娴静, 等. 黔南坳陷上震旦统灯影组地球化学特征及沉积环境意义[J]. *现代地质*, 2011, 25(6): 1059-1065.
- WANG Pengwan, CHEN Ziliao, LI Xianjing, et al. Geochemical characteristics and environmental significance of Dengying formation of Upper Sinian in Qiannan Depression[J]. *Geoscience*, 2011, 25(6): 1059-1065.
- [16] 叶黎明, 齐天俊, 彭海燕. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 202-210.
- YE Liming, QI Tianjun, PENG Haiyan. Depositional environment analysis of Shanxi formation in Eastern Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 202-210.
- [17] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. *同济大学学报*, 1979, 7(2): 21-60.
- WANG Yiyu, GUO Wenying, ZHANG Guodong. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing group (Paleogene), Jintu depression, Jiangsu province[J]. *Journal of Tongji University*, 1979, 7(2): 21-60.
- [18] WALKER C T, PRICE N B. Departure curves for computing paleosalinity from boron in illites and shales[J]. *AAPG Bulletin*, 1963, 47(5): 833-841.
- [19] COUCH E L. Calculation of Paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. *AAPG*, 1971, 55(10): 1829-1837.
- [20] 邓宏文, 钱凯. *沉积地球化学与环境分析*[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993.
- DENG Hongwen, QIAN Kai. *Sedimentary geochemistry and environmental analysis*[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993.
- [21] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1): 111-129.
- [22] 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(1): 184-203.
- [23] ARTHUR M A, SAGEMAN B B. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1994, 22(1): 499-551.
- [24] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the dennis

- limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA[J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/2/3): 65-82.
- [25] 熊国庆, 王剑, 胡仁发. 贵州梵净山地区震旦系微量元素特征及沉积环境[J]. 地球学报, 2008, 29(1): 51-60.
- XIONG Guoqing, WANG Jian, HU Renfa. Trace element characteristics and sedimentary environment of the Sinian system of the Fanjingshan area in Guizhou province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(1): 51-60.
- [26] 李军, 桑树勋, 林会喜, 等. 渤海湾盆地石炭-二叠系稀土元素特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 589-596.
- LI Jun, SANG Shuxun, LIN Huixi, et al. REE characteristics and its geological significance of the Pemo-Carboniferous in Bohaiwan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 589-596.
- [27] ELDERFIELD H, GREAVES M J. The rare earth elements distribution in seawater[J]. Nature, 1982, 296: 214-219.
- [28] HALLBERG R O A. Geochemical method for investigation of paleoredox conditions in sediments[J]. Ambio Special Report, 1976(4): 139-147.
- [29] DYPVIK H. Geochemical compositions and depositional conditions of Upper Jurassic and Lower Cretaceous Yorkshire clays, England[J]. Geological Magazine, 1984, 121(5): 489-504.
- [30] 邓秀芹, 蔺昉晓, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯三叠系延长组沉积演化及其与早印支运动关系的探讨[J]. 古地理学报, 2008, 10(2): 159-166.
- DENG Xiuqin, LIN Fangxiao, LIU Xianyang, et al. Discussion on relationship between sedimentary evolution of the Triassic Yanchang Formation and the Early Indosinian Movement in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(2): 159-166.
- [31] 阎存凤, 袁剑英, 赵应成, 等. 蒙、甘、青地区侏罗纪孢粉组合序列及古气候[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5): 634-639.
- YAN Cunfeng, YUAN Jianying, ZHAO Yingcheng, et al. Jurassic spora-pollen assemblages and paleoclimate in Innermongolia, Gansu, Qinghai, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(5): 634-639.
- [32] 吉利明, 吴涛, 李林涛. 陇东三叠系延长组主要油源岩发育时期的古气候特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 426-431.
- JI Liming, WU Tao, LI Lintao. Paleoclimatic characteristics during sedimentary period of main source rocks of Yanchang Formation (Triassic) in eastern Gansu[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(3): 426-431.
- [33] 吉利明, 王少飞, 徐金鲤. 陇东地区延长组凝源类组合特征及其古环境意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(6): 798-806.
- JI Liming, WANG Shaofei, XU Jinli. Acritarch assemblage in Yanchang Formation in eastern Gansu province and its environmental implications[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(6): 798-806.
- [34] 张才利, 高阿龙, 刘哲, 等. 鄂尔多斯盆地长7油层组沉积水体及古气候特征研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 582-587.
- ZHANG Caili, GAO Along, LIU Zhe, et al. Study of character on sedimentary water and palaeoclimate for Chang7 oil layer in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 582-587.
- [35] 陈骏, 汪永进, 陈阳, 等. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 259-266.
- CHEN Jun, WANG Yongjin, CHEN Yang, et al. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for palaeomonsoon climate[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 259-266.
- [36] 周利明. 鄂尔多斯盆地西南部长7沉积环境对细粒沉积物的影响[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- ZHOU Liming. Effect of sedimentary environment on fine grained sediments in Chang 7 Fm, southwestern Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
- [37] 郑荣才, 柳梅青. 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, 1999, 20(1): 20-25.
- ZHENG Rongcai, LIU Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25.
- [38] 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 114-120.
- WEN Huaguo, ZHENG Rongcai, TANG Fei, et al. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang6 Member in the Gengwan region, Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 114-120.
- [39] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 1-3.
- LI Jinlong, CHEN Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2003, 10(5): 1-3.
- [40] 王敏芳, 焦养泉, 王正海, 等. 沉积环境中古盐度的恢复: 以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(6): 419-422.
- WANG Minfang, JIAO Yangquan, WANG Zhenghai, et al. Recovery paleosalinity in sedimentary environment: An example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan Hami Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(6): 419-422.
- [41] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59-64.
- ZHANG Wenzheng, YANG Hua, YANG Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. Geochemica, 2008, 37(1): 59-64.
- [42] 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293.
- ZHANG Wenzheng, YANG Hua, LI Jianfeng, et al. Leading effect of high class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation: Hydrocarbon generation and expulsion mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [43] 李广之, 胡斌, 邓天龙, 等. 微量元素 V 和 Ni 的油气地质意义[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 13-17.
- LI Guangzhi, HU Bin, DENG Tianlong, et al. Petroleum geological significance of microelements V and Ni[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 13-17.

第一作者简介: 付金华 (1963-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 中国石油长庆油田公司教授级高级工程师, 主要从事石油天然气地质综合研究及油气勘探管理工作。地址: 西安市未央区凤城四路长庆油田公司, 邮政编码: 710018. E-mail: fjh_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018-01-02 修回日期: 2018-08-17

(编辑 黄昌武)