

引用格式:张力文,吴陈君,黄道军,等.鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组泥页岩地球化学特征及沉积环境[J].天然气地球科学,2022,33(9):1485-1498.

ZHANG Liwen, WU Chenjun, HUANG Daojun, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Carboniferous Benxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(9): 1485-1498.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2022.06.009

## 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组泥页岩 地球化学特征及沉积环境

张力文<sup>1</sup>, 吴陈君<sup>1</sup>, 黄道军<sup>2</sup>, 文志刚<sup>1</sup>, 赵伟波<sup>2</sup>, 席颖洋<sup>1</sup>,  
张 辉<sup>2</sup>, 孙 璐<sup>1</sup>, 宋换新<sup>1</sup>

(1. 油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 长江大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430100;  
2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

**摘要:**鄂尔多斯盆地非常规油气资源丰富,盆地东部石炭系本溪组具有良好的非常规天然气勘探潜力。沉积环境是控制天然气资源分布的重要因素,因此以鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组重点全井段连续岩心为基础,通过对泥页岩地层矿物组成及元素地球化学特征的研究,揭示研究区本溪组泥页岩地层古沉积水体环境特征,探讨沉积相类型对泥页岩发育的控制作用。结果表明:本溪组古沉积水体盐度自下而上先减小后增大,为咸水—半咸水沉积环境;本溪组氧化—还原敏感参数自下而上呈现先增加后降低的趋势,整体反映出本溪组为缺氧—还原环境;古水深(Rb/Zr)研究表明,本溪组古水深自下而上由较小变大再逐渐变小,呈周期性变化;CaO/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO)、CIA等古气候指标反映了本溪组自下而上温度逐渐降低,风化程度逐渐减小,其中湖田段、畔沟段、晋祠段均为炎热潮湿气候。通过对比鄂尔多斯盆地东部本溪组泥页岩矿物组成、岩性组合、地球化学特征,认为本溪组泥页岩主要沉积类型为潮间带—泻湖沉积,且泥坪—泻湖混合沉积为本溪组富有机质泥页岩发育的有利沉积环境,并在此基础上对本溪组全段地层沉积模式进行综合分析,认为湖田段为风化淤化体系下的沼泽沉积,而畔沟段、晋祠段均为障壁海岸沉积体系,沉积环境分别为潮坪—泻湖—障壁岛混合沉积与潮坪—泻湖—障壁岛—沼泽混合沉积。

**关键词:**元素地球化学;泥页岩;本溪组;沉积环境;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:**TE122.1<sup>+</sup>13

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-1926(2022)09-1485-14

### 0 引言

近年来,我国页岩气勘探工作取得了较大进展<sup>[1]</sup>,逐步在四川盆地涪陵、威远、长宁地区建立了国家级页岩气示范区。海陆过渡相页岩气是继海相页岩气之后重要的页岩气勘探目标,其资源量约占全国页岩气资源总量的1/3。鄂尔多斯盆地石炭系本溪组属于海陆过渡相页岩气富集区,作为有利勘探层位,前人针对本溪组煤系地层、砂体与碳酸

盐岩地层沉积环境进行了大量研究:主要集中于成煤环境<sup>[2-3]</sup>、聚煤规律<sup>[3-4]</sup>、砂体形成环境<sup>[5-8]</sup>、砂岩物源分析<sup>[9-10]</sup>、层序地层与充填特征<sup>[11-13]</sup>等方面,对本溪组宏观沉积环境存在一定的认识,普遍认为本溪组属于障壁海岸沉积体系。但由于研究对象不同,针对该宏观沉积体系,不同学者细分出不同的沉积相类型:刘新昕<sup>[14]</sup>、侯云东等<sup>[15]</sup>分别通过大量野外露头观察、沉积相标志识别、结合古潮差约束,对本溪组砂体及其形成环境进行了刻画,提出本溪组属

收稿日期:2022-05-12;修回日期:2022-06-16;网络首发日期:2022-07-06.

基金项目:中国石油长庆油田分公司科研项目“鄂尔多斯盆地中东部本溪组泥页岩地质特征及有利目标评价”(编号:技2020-151)资助.

作者简介:张力文(1996-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事地球化学研究. E-mail: 894155316@qq.com.

通信作者:吴陈君(1988-),男,安徽池州人,讲师,博士,主要从事非常规油气地球化学研究. E-mail: wcj627@163.com.

于潮汐—三角洲复合沉积体系;陈全红等<sup>[16]</sup>通过对石炭系一二叠系含砾砂岩体研究,认为本溪组沉积环境属于三角洲沉积体系;于兴河等<sup>[8]</sup>、林进等<sup>[9]</sup>、郭英海等<sup>[17]</sup>、刘春雷<sup>[18]</sup>、苏东旭等<sup>[19]</sup>、李文厚等<sup>[20]</sup>、冯娟萍等<sup>[21]</sup>分别对本溪组砂体的沉积环境、物源、沉积特征进行了系列研究,认为鄂尔多斯盆地本溪组属于障壁海岸及陆棚沉积体系。前人对于本溪组沉积环境的研究多从砂体形成角度出发,而针对泥页岩地层沉积环境缺乏细致刻画。此外,不同学者对于泥页岩沉积环境的厘定仍存在一定争议:部分学者<sup>[14]</sup>认为本溪组泥页岩形成于潮汐控制下的三角洲前缘沉积,另一部分学者<sup>[17,20-21]</sup>认为其形成于潟湖环境。针对以上问题,选取不同沉积背景下的3口井及1个重点剖面:Q36井、M109井、M115井(位于伊陕斜坡东部)与招贤剖面(位于山西临县,构造上处于盆地东部晋西挠褶带)进行综合对比。通过重点井及剖面野外露头观测、岩性组合特征、全岩矿物组分、测井资料分析、沉积相组合与重点地球化学参数对比,结合沉积背景,综合分析得出研究区本溪组不同类型沉积环境的岩电特征及沉积相特征,分层段揭示本溪组泥页岩沉积环境,同

时开展研究区重点井及剖面综合对比研究,明确鄂尔多斯盆地东部海陆过渡相沉积演化模式,并在此基础上结合泥页岩地层有机质含量,筛选优势沉积相类型,为鄂尔多斯盆地海陆过渡相泥页岩地层勘探开发提供依据。

1 区域地质概况及石炭系沉积背景

鄂尔多斯盆地为我国第二大沉积盆地,盆地内部构造发育平缓,起伏较小,为典型克拉通盆地。鄂尔多斯盆地横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区,北起阴山、狼山、大青山,南以秦岭为界,东、西分别以吕梁山、贺兰山为界。盆地内部包含伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环向斜及西缘逆冲带6个一级构造单元,周部毗邻河套盆地、银川地堑、巴彦浩特盆地、六盘山盆地、定西盆地、渭河盆地等6个盆地,盆地面积与盆地周部面积之和约为 $37\times 10^4\text{ km}^2$ 。<sup>[22]</sup>

鄂尔多斯盆地地处华北板块中部,受华北板块构造运动影响,盆地整体发育于元古界结晶基底之上,基底呈现东高西低,北高南低的构造格局。研究区位于鄂尔多斯盆地东部[图1(a)],自上古生界始,

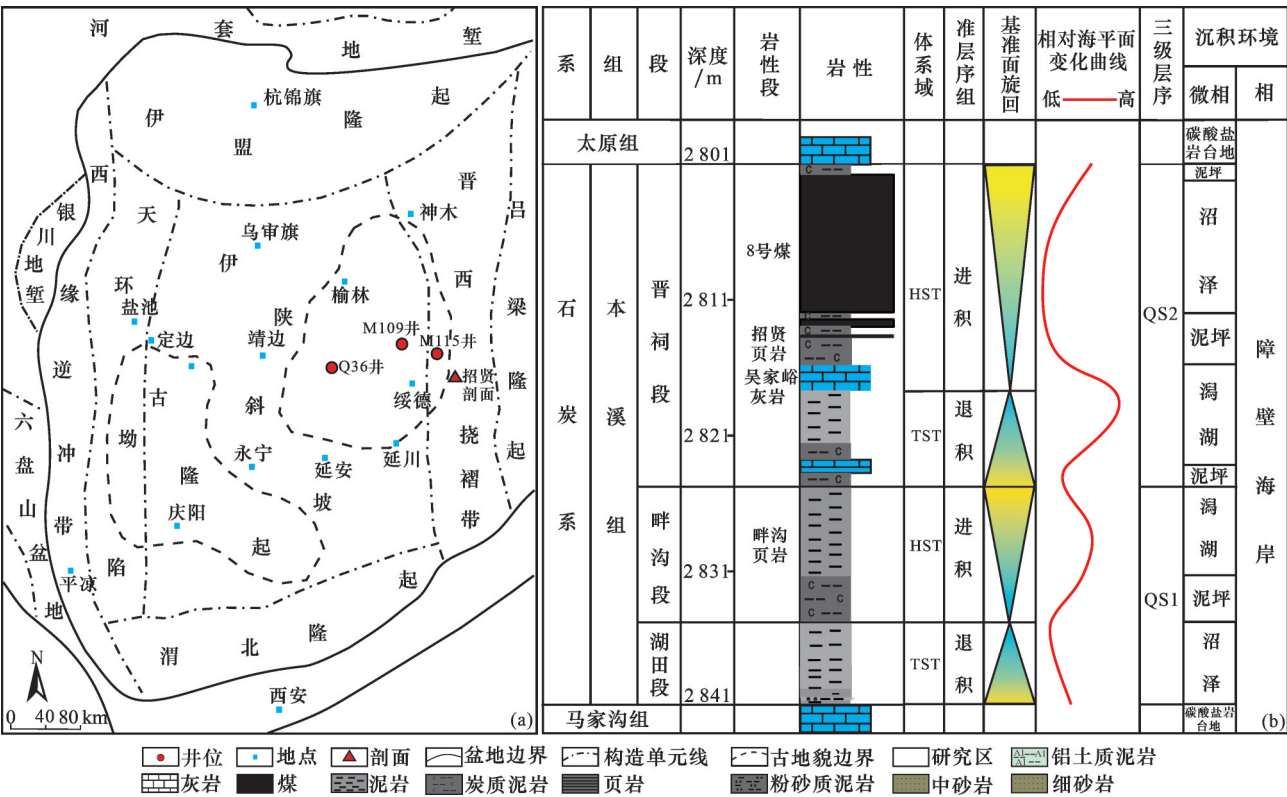


图1 研究区位置(a)与鄂尔多斯盆地本溪组层序地层综合柱状图(b)

Fig. 1 The location of the study area (a) and the sequence stratigraphic comprehensive column map (b) of the Benxi Formation in the Ordos Basin

由老至新依次发育寒武系、奥陶系、石炭系,石炭系之上叠置二叠系太原组、山西组、石盒子组,三叠系延长组和侏罗系富县组、延安组,由古生界至中生界依次发育海相—海陆过渡相—陆相沉积环境<sup>[8,23]</sup>。

晚石炭世鄂尔多斯盆地整体下沉,在奥陶系顶部不整合面发生填平补齐的沉积作用<sup>[24]</sup>。奥陶系之上覆盖石炭系本溪组,前人根据岩性标志层进一步将本溪组细分为湖田段、畔沟段、晋祠段。本溪组湖田段沉积于奥陶系马家沟组之上,在晚奥陶世至早石炭世经历了一系列风化、溶蚀、夷平作用,由于不同区域淋滤作用发生程度不同,导致湖田段地层脱硅富铝程度不一,形成了一套不等厚的铝土岩地层。前人认为该段地层主要为沼泽泥岩沉积或为华北克拉通基底风化剥蚀的产物,且与下伏奥陶系马家沟组呈不整合接触,具填平补齐特征<sup>[7,14]</sup>;畔沟段主要发育砂岩与黑色泥岩(夹少量薄层砂岩)、局部发育畔沟灰岩;晋祠段主要发育暗色泥岩(含动物化石)、灰岩与晋祠砂岩,顶部伴有稳定煤层或煤线,上部与石炭系太原组呈整合接触[图1(b)]。

2 研究对象及实验分析

本研究以鄂尔多斯盆地东部本溪组典型井(Q36井、M109井、M115井)及重点剖面(招贤剖面)泥页岩作为主要研究对象,共取泥页岩样品73块,样品涵盖盆地东部本溪组整套地层。本溪组地

层发育完整,地层厚度为30~60 m,底部湖田段主要发育铝土岩、铁铝岩、黏土岩夹薄层暗色泥岩,含薄煤层与炭质泥岩,地层厚度较薄。畔沟段具“下砂上泥”结构,底部发育中砂岩、炭质泥岩,顶部主要发育厚层暗色泥岩,夹薄层畔沟灰岩,与晋祠段整合接触。晋祠段底部发育吴家裕灰岩(约2 m)与灰色富有机质泥岩,中部发育薄层招贤页岩,厚度为2.5~10 m不等,顶部发育8<sup>#</sup>煤层(厚度约为10 m)夹薄层炭质页岩,晋祠段地层整体厚度相对较大。

对4个典型剖面自下而上系统、连续取样,其中湖田段、畔沟段、晋祠段各取泥岩样品16件、13件、43件,取晋祠段煤样2件。在岩心观察的基础上开展全岩矿物组成、主量元素、微量元素及TOC含量分析,所有检测均在长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室完成。测定仪器为日本理学D/max-rA12KW旋转阳极X射线衍射仪(依据SY/T 6210—1996标准)、Axios PW4400/40型X射线荧光光谱仪、电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)及CS-230硫碳分析仪,相关元素含量及比值见表1,岩心及薄片镜下特征如图2所示。

3 本溪组泥页岩沉积环境

沉积岩中的元素含量、赋存状态、分布特征及物理、化学性质对于明确沉积岩的形成背景与形成条件有着重要的指示作用。通过元素比值法可以

表1 Q36井本溪组元素含量分析测试结果  
Table 1 Analysis and test results of element content of Benxi Formation in Well Q36

编号	层位	样品	岩性	TOC /%	主量元素含量/%					微量元素含量/10 <sup>-6</sup>						Sr/Ba	Th/U	Rb/Zr	CIA	CaO/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		深度/m			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Sr	Ba	Th	U	Rb	Zr					+MgO)
Q-16	晋祠段	2801.43	泥岩	2.91	56.43	22.39	1.34	0.12	0.34	170.56	139.98	18.5	2.94	52.33	119.47	1.22	6.3	0.438	0.92	0.005
Q-15		2805.68	煤	92.6	1.21	2.89	0.15	1.35	0.04	64.93	19.32	2.75	0.35	0.17	23.93	3.36	7.82	0.007	0.81	0.461
Q-14		2810.09	煤	92.8	3.31	5.03	0.17	0.52	0.05	47.93	12.13	6.47	1.28	0.33	75.14	3.95	5.05	0.004	0.87	0.103
Q-13		2813.37	泥岩	22.7	24.72	22.2	0.44	0.07	0.14	76.27	91.9	21.64	69.28	11.63	338.78	0.83	0.31	0.034	0.96	0.003
Q-12		2815.70	泥岩	7.29	39.78	24.55	0.88	0.78	0.28	229.12	163.71	31.43	71.87	39.09	327.35	1.4	0.44	0.119	0.94	0.031
Q-11		2819.10	泥岩	0.2	56.76	22.71	2.52	0.09	0.51	93.72	183.76	26.85	7.97	140.93	171.53	0.51	3.37	0.822	0.88	0.004
Q-10		2821.81	泥岩	1.93	40.58	24.23	1.57	0.1	0.37	103.14	196.69	19.72	6.67	76.46	85.54	0.52	2.96	0.894	0.92	0.004
Q-9		2824.39	泥岩	8.5	32.16	23.56	0.82	0.35	0.24	145.88	117.98	19.46	25.04	35.14	68.34	1.24	0.78	0.514	0.94	0.015
Q-8	畔沟段	2826.36	泥岩	0.35	59.6	24.72	1.61	0.53	0.48	103.77	182.66	19.74	2.95	71.64	107.27	0.57	6.68	0.668	0.91	0.021
Q-7		2829.24	泥岩	0.34	60.91	24.48	1.55	0.38	0.42	143.36	174.43	19.34	2.75	68.76	126.55	0.82	7.03	0.543	0.91	0.015
Q-6		2831.62	泥岩	1.79	51.1	20.78	1.33	0.5	0.5	91.48	162.72	12.76	2.32	56.25	95.38	0.56	5.49	0.59	0.91	0.023
Q-5		2834.25	泥岩	5.16	44.48	35.55	1.91	0.15	0.6	178.98	238.68	24.28	8.5	85.74	147.58	0.75	2.85	0.581	0.93	0.004
Q-4	湖田段	2835.40	泥岩	0.4	40.79	33.91	0.33	0.16	0.14	402.94	58.36	46.06	12.79	2.39	334.92	6.9	3.6	0.007	0.98	0.005
Q-3		2836.70	泥岩	0.32	44.82	37.29	0.41	0.07	0.2	162.45	41.01	61.57	17.59	6.07	405.59	3.96	3.5	0.015	0.98	0.002
Q-2		2838.16	泥岩	0.57	41.04	34.23	1.25	0.21	0.45	165.78	73.86	61.78	13.59	28.6	324.03	2.24	4.55	0.088	0.95	0.006
Q-1		2840.81	泥岩	0.28	47.98	29.63	4.86	0.58	2.86	283.72	271.96	138.67	52.04	119.58	553.89	1.04	2.66	0.216	0.83	0.018



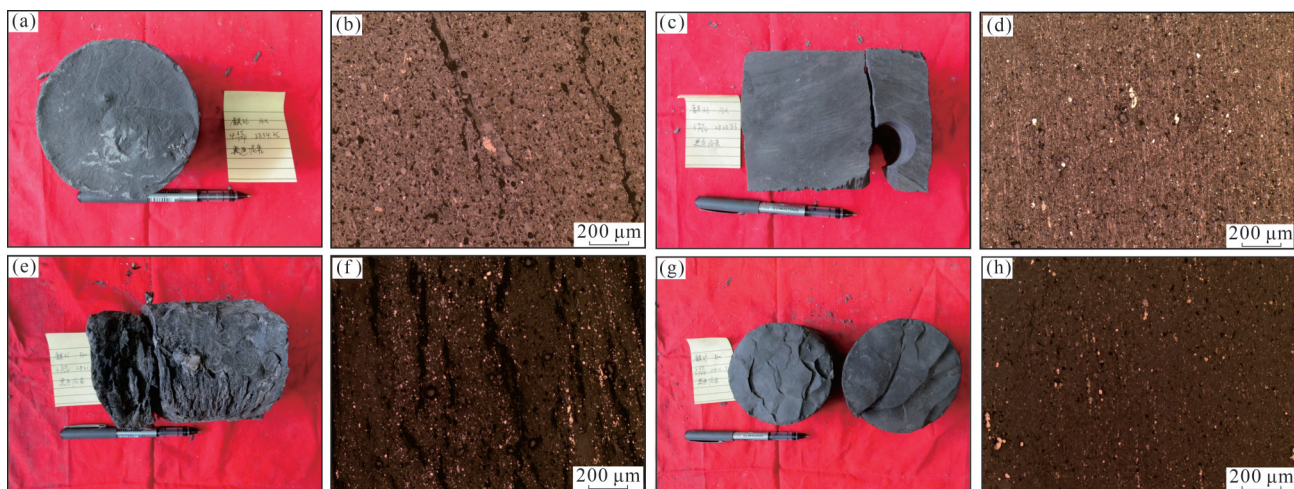


图2 鄂尔多斯盆地东部本溪组典型页岩岩心及薄片照片

Fig.2 The cores and thin sections of typical shale facies in Benxi Formation in eastern Ordos Basin

(a)、(b) Q36井,湖田段,2 834.25 m,灰黑色页岩,偶见条带状有机质,砂质多呈斑块状富集;(c)、(d) Q36井,畔沟段2 824.0 m,黑色页岩,矿物呈纹层状分布,块状黄铁矿发育较好,有机质成斑块状;(e)、(f) Q36井,畔沟段,2 822.02 m,黑色炭质泥岩,条带状有机质较为发育,斑点状黄铁矿发育程度较高;(g)、(h) Q36井,晋祠段,2 815.7 m,黑色页岩,矿物呈纹层状分布,块状黄铁矿发育较好,有机质成斑块状

恢复古沉积环境<sup>[25]</sup>,进而对有机质的生成和保存条件进行研究。本部分以研究区重点全取心井——Q36井作为主要研究对象,利用元素地球化学手段对本溪组泥页岩古环境进行重点解剖,探讨本溪组泥页岩古环境及古水体演化特征,为沉积环境研究提供地球化学依据。

### 3.1 古盐度

古盐度是恢复沉积环境的重要指标,常用的研究手段有:计算法、元素比值法等<sup>[26-27]</sup>,可通过Sr含量、Sr/Ba值等来表征古盐度。Sr、Ba化学性质相似,通常以氯化物、硫酸盐等形式赋存于CaCO<sub>3</sub>含量较高的泥质沉积岩中。当水体盐度较低时,Sr、Ba以重碳酸盐形式存在,随着水体盐度的增加,Ba<sup>2+</sup>与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>结合形成BaSO<sub>4</sub>沉淀,导致Ba含量减少,Sr相对Ba富集,因此可通过二者比值来反映古盐度高低<sup>[28]</sup>。前人研究表明,Sr/Ba>1,Sr含量大于160×10<sup>-6</sup>为咸水沉积环境;Sr/Ba<0.5,Sr含量小于90×10<sup>-6</sup>为淡水沉积环境;数值介于二者之间为半咸水沉积环境<sup>[29-30]</sup>。

Q36井本溪组泥岩地层Sr元素含量值、Sr/Ba值分布跨度较大,分别分布在(76.27~402.94)×10<sup>-6</sup>及0.51~6.90之间(图3)。湖田段Sr含量、Sr/Ba值最高,均值分别为253.7×10<sup>-6</sup>及3.54,指示咸水沉积环境;畔沟段样品Sr含量、Sr/Ba均值分别为129.40×10<sup>-6</sup>及0.68,指示半咸水沉积环境;晋祠段泥岩样品Sr含量、Sr/Ba均值分别为136.45×10<sup>-6</sup>、

0.95,判断为半咸水沉积环境(图3)。师晶等<sup>[28]</sup>同样利用Sr/Ba值法对于盆地东部临兴地区水体古盐度进行研究,并提出该地区本溪组为咸水沉积环境;ZHANG等<sup>[31]</sup>利用Sr/Ba值对鄂尔多斯盆地东部大宁—吉县地区石炭系—二叠系古盐度进行恢复,表明该地区石炭系为半咸水沉积环境。结合前人研究,认为鄂尔多斯盆地本溪组广泛发育海陆过渡相半咸水—咸水沉积环境(图4)。

Q36井本溪组古盐度特征总体上表现为:湖田段为咸水沉积环境,本段地层盐度较大;畔沟段盐度在湖田段的基础上有所减小,为半咸水沉积;晋祠段顶部泥岩盐度稍有增加,为半咸水沉积(图3)。垂向上本溪组泥岩地层水体盐度具有先减小后增大的特征,即由湖田段咸水沉积环境过渡为半咸水沉积环境,其中半咸水沉积环境反映了该时期沉积水体波动蒸发或淡水输入导致的本溪组古盐度纵向的差异性<sup>[32]</sup>。

### 3.2 古氧化—还原性质

Th化学性质稳定,U易在还原性水体中产生富集,因此可用Th/U值表征古氧化—还原性质。前人研究认为,Th/U>8为富氧环境,Th/U<2为缺氧环境,Th/U值介于2~8之间为贫氧环境<sup>[33]</sup>。根据Th/U值参数判定,本溪组全段泥岩样品均为贫氧环境:湖田段、畔沟段样品均介于2~8之间,均值分别为3.58与5.51,反映贫氧的沉积环境;晋祠段泥岩样品Th/U值介于0.31~6.30之间,均值为

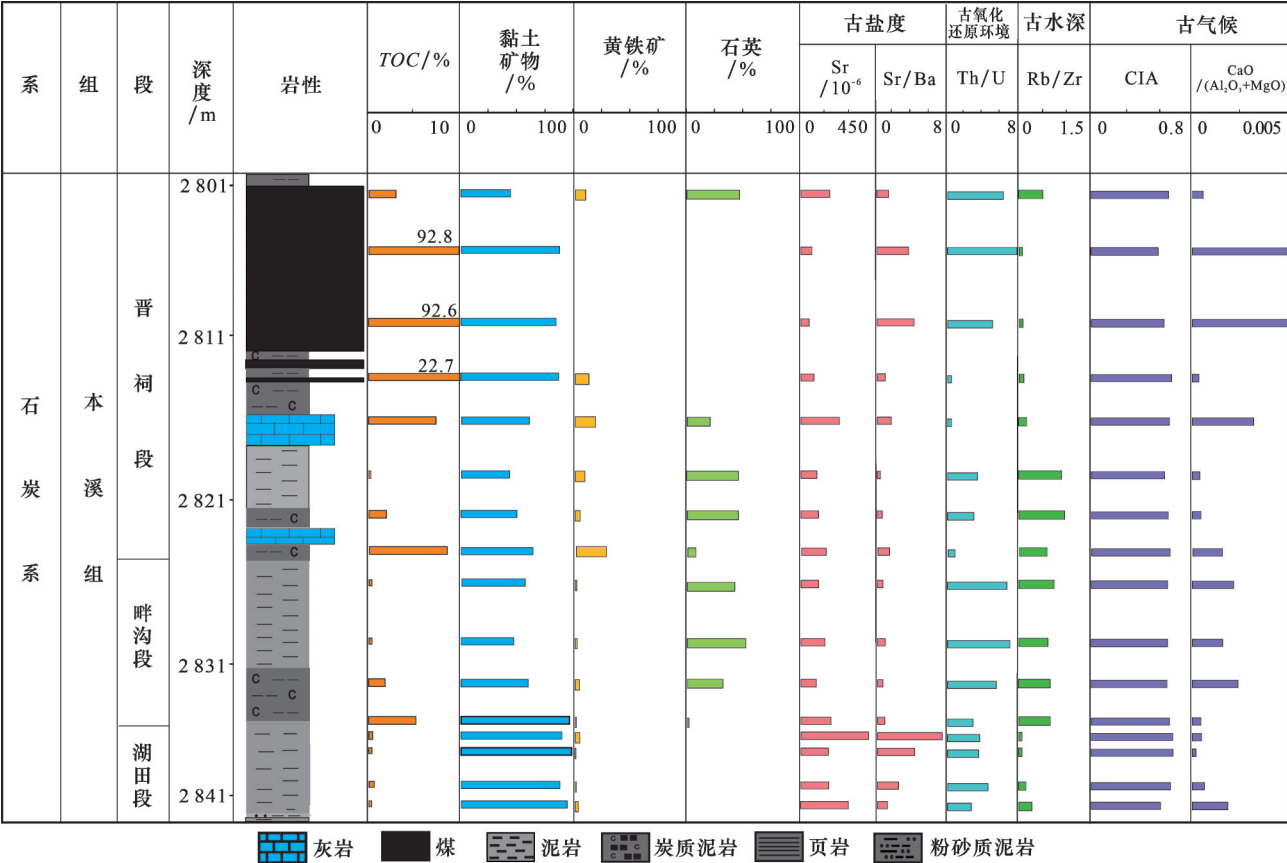


图3 Q36井泥页岩元素地球化学参数垂向分布特征

Fig.3 Vertical distribution characteristics of element geochemical parameters of mud shale in Well Q36

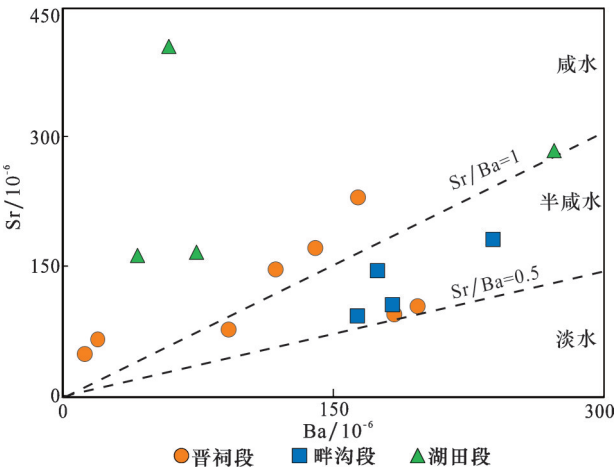


图4 本溪组泥页岩古水体盐度判别

Fig.4 Discrimination of salinity in Benxi Formation mud shale

2.36,为贫氧—缺氧环境;晋祠段煤层样品均值为6.43,为贫氧环境。陈晶等<sup>[34]</sup>通过 $V/(V+Ni)$ 、 $Th/U$ 值分析认为鄂尔多斯盆地东南部本溪组沉积环境复杂多变,但整体处于贫氧的弱还原环境,本次研究认识与前人研究相符。

据 $Th/U$ 值判别参数表明,湖田段、畔沟段、晋

祠段均为贫氧—缺氧环境(图5)。不同层段薄片镜下特征均显示黄铁矿发育较好(图2),这也指示了该段地层具有相对偏还原的水体环境。其中湖田段还原性相对较强,畔沟段、晋祠段泥岩地层自下至上还原性有所增强,至晋祠段顶部煤层还原性稍有减弱(图3)。

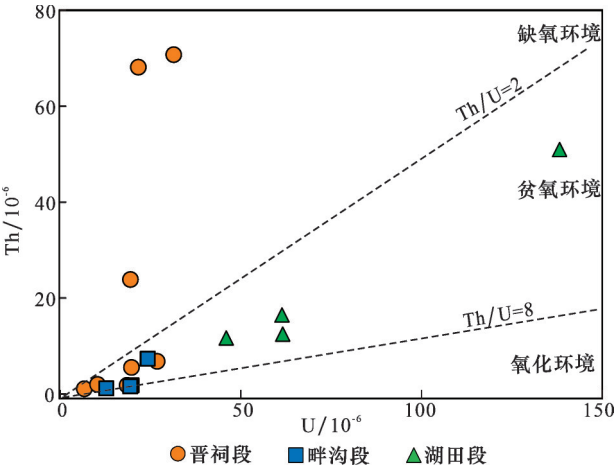


图5 本溪组泥页岩古氧化还原性判别

Fig.5 Discrimination of redox in Benxi Formation mud shale

### 3.3 古水深

古水深能够准确反映沉积发生时的离岸距离及海平面变化,通过沉积岩中的微量元素含量可区分海相、海陆过渡相、陆相、深海、浅海等不同沉积环境。本文利用元素比值法,通过计算Rb/Zr值对古沉积水体深度进行判别。

Rb化学性质活泼,容易被黏土矿物吸附而产生富集;Zr性质稳定,主要存在于碎屑矿物中,并且随着水体加深其含量呈递减趋势<sup>[32]</sup>,因此可以利用二者比值反映沉积时期的古水体深度,Rb/Zr值越大反映古水深越大。湖田段Rb/Zr值为0.08;畔沟段为0.60;晋祠段底部均值为0.74,此阶段数值到达顶峰,随后迅速变小,顶部煤层附近Rb/Zr值为0.12。

纵向对比分析可知,分别在湖田段顶底部、畔沟段顶部与晋祠段顶部煤层Rb/Zr值偏低。结合该时期地质背景可知,湖田期开始发生小范围海侵,这一阶段水体相对较浅,为海侵体系域(TST),如图1(b)所示。进入畔沟段,本溪组第二次海侵发生,导致海平面继续上升,本次海侵发生时期较长,规模较大,为高位体系域(HST)。畔沟晚期至晋祠早期开始发生海退,相对海平面发生下降,之后晋祠中期至晚期水体又出现小范围波动,对应海侵体系域(TST)及高位体系域(HST)<sup>[25]</sup>,晋祠末期海侵停止,逐渐演变为海退,当海水完全退出后研究区于晋祠段顶部形成沼泽环境,为后续成煤作用提供基础。由此可知,Rb/Zr值与地质历史时期的海水进退有着良好的对应(相关元素比值见图3),可有效反映水体深度。

### 3.4 古气候

古气候不仅会影响有机质的转化,还会影响水体的变化进而导致沉积环境的改变,因此古气候与有机质形成环境相关性较强。古气候能够很好地控制元素的聚集、迁移、分配等过程,进而对元素的丰度及存在形式产生极大的影响,所以能够根据相关元素指标对古气候进行研究划分<sup>[35-36]</sup>。

$\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 值可指示风化淋滤作用,比值越小表明表面风化淋滤程度越强,气候越潮湿<sup>[34]</sup>。通过研究可知,湖田段、畔沟段、晋祠段的均值分别为0.007 6、0.015 9、0.078 4,显示本溪组自下而上风化程度逐渐减小。

CIA值可用来表征化学风化强度,计算方法为 $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ,其中 $\text{CaO}^*$ 为硅酸盐矿物中的CaO含量。相关研究结果

表明, $\text{CIA} = 0.6 \sim 0.8$ 为温暖湿润气候下的中等风化, $\text{CIA} = 0.8 \sim 1$ 为炎热潮湿气候下的强烈风化, $\text{CIA} < 0.6$ 反映寒冷干燥气候下的未风化<sup>[35-36]</sup>。本溪组全段CIA指数差异较小;湖田段、畔沟段、晋祠段的均值分别为0.93、0.92、0.90。CIA指数表明湖田段、畔沟段及晋祠段均处于炎热潮湿环境,受到强烈风化。崔晨光等<sup>[36]</sup>同样认为,本溪组沉积期具有炎热潮湿的古气候特征,且晋祠段沉积后期古气候条件较初期更加炎热潮湿。综合 $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 值与CIA值判断指标可知,本溪组3段地层均为炎热潮湿气候,风化指数湖田段>畔沟段>晋祠段,本溪组自下而上显示风化程度逐渐减小的规律(相关元素比值见图3)。总之,通过对本溪组泥页岩地球化学特征进行研究,认为本溪组泥页岩地层总体为古水深较深的缺氧环境,水体以半咸水—咸水为主,其特点与潟湖沉积表现出的古环境特征具有高度的一致性,除地球化学手段之外还需结合其他方法对该地层沉积环境进行判别。

## 4 鄂尔多斯盆地东部本溪组沉积特征

鄂尔多斯盆地海陆过渡相地层具有“相变快,岩性、岩相复杂交互”的特性,不同区域、不同层位、不同沉积背景导致沉积类型及沉积环境特征有所差别,通过Q36井单井所反映的地球化学特征仅能够从纵向体现地层环境变化情况,因此这部分研究将利用3口重点井及1个重点剖面,进一步分层位从平面上对本溪组泥页岩沉积环境特征进行研究。

### 4.1 本溪组沉积背景

受到加里东运动的影响,鄂尔多斯盆地在奥陶系长期处于隆起状态,由于上部地层受到约1 500 Ma的早生表熔岩作用与裸露风化剥蚀,形成了奥陶系古风化壳岩溶古地貌。盆地在早石炭世近准平原化,晚石炭世末期,盆地西缘贺兰坳拉槽发生横向拉张复活,使盆地整体处于拉张背景下稳定的缓慢沉降阶段,并以中央古隆起为界形成北隆南倾的古构造格局<sup>[9]</sup>。在此时期,盆地可划分为东、西2类沉积构造:中央古隆起西部为裂陷海湾,东部为陆表海沉积。本次对比研究的4个剖面位于中央古隆起的东部,受华北海海水自东向西侵入的影响,盆地形成东厚西薄的沉积格局。本溪期,随着华北地台的沉降,华北海发生大规模海侵,此时期陆源碎屑物质补充较少,盆地东部为陆表海盆地典型障壁海岸沉积模式,水体普遍较浅,海水频繁进退。基于



此特点前人提出,海平面频繁升降会控制碳酸盐岩的生产率、影响陆源碎屑物质的搬运范围,使陆源碎屑物质与碳酸盐岩相邻区发生交流,导致陆表海水与浑水发生混合沉积,形成混合沉积岩地层及混合沉积相<sup>[25]</sup>。

#### 4.2 本溪组岩性组合及电性特征

本溪组整体属于海陆过渡环境中的障壁海岸沉积体系,但不同沉积阶段的沉积模式有所区别,因此湖田段、畔沟段、晋祠段具有不同的岩性组合与电性特征(图6)。本溪组湖田段发生小规模海侵事件,在海侵初期,海水仅浸没奥陶系风化壳,未形成稳定海域。在此期间,水体深度较浅,海水在奥陶系凹凸不平的碳酸盐岩基底之上形成一片沼泽沉积,并先后发育一套铁铝岩。随着畔沟段、晋祠段发生多期海侵,海平面逐渐将盆地东部覆盖且造成碳酸盐岩与碎屑岩混和沉积,前人对于古生物研究发现,该段地层常发育生物扰动构造,并且于碳酸盐岩中发现浮游生物<sup>[14]</sup>,此外还在部分泥岩地层中发现植物茎秆化石存在<sup>[24]</sup>。因此可将本溪组按岩性分为2个部分:下部湖田段为铁铝质沉积,上部畔沟段与晋祠段为碳酸盐岩与碎屑岩形成的混合沉积。

湖田段岩性主要为泥岩、黏土岩或铁铝岩,地层厚度自西向东逐渐增加,部分区域湖田段缺失。黏土岩主要为暗色泥岩、炭质泥岩及页岩,水平层理发育,为沼泽沉积。铁铝岩电性特征为:AC值高(大于200  $\mu\text{s}/\text{m}$ ),GR值偏高(大于145 API),且当地层中铁铝成分含量越高,GR值越大,重点剖面岩性组合与测井曲线如图6所示。

畔沟段主要发育泥岩,中间夹杂1~3层厚度不等的灰岩、薄层砂岩及煤线,沉积构造以高能的交错层理及平行层理为主。通过地球化学特征、岩性组合及沉积构造分析认为,该段地层沉积环境复杂,发育潟湖、潮坪(潮间带发育)、障壁岛等多种沉积类型(图6)。其中砂岩层厚较小,电性特征为GR值较小,AC值偏高;灰岩主要为泥质灰岩,电性特征为GR值较低,AC值较高(图6)。

晋祠段与畔沟段以灰岩作为分界,晋祠段由下而上发育砂岩、泥岩、页岩及砂泥岩互层,岩性组合复杂多变,这与晋祠期海平面频繁升降和南北缘造山作用有关,这一时期物源供给开始增强,障壁岛沿海岸广泛发育且分期特征明显<sup>[8]</sup>。障壁岛的发育导致碎屑物质输入受到阻挡,使盆内与近海地带在晋祠期呈现明显的岩性组合差异:如招贤剖面、

M109井在晋祠段早期发育厚层砂岩地层,并在此之上沉积泥页岩地层,为障壁岛—潮坪—潟湖沉积;M115井发育厚层泥岩夹薄层砂岩及煤线,为潮坪沉积中的泥坪—潟湖混合坪沉积;Q36井岩性较为连续(厚层泥岩中夹一层薄层灰岩),几乎无陆源碎屑输入,同样为泥坪—潟湖混合沉积。晋祠段顶部发育2~10 m的不等厚煤层,呈区域性广泛存在,这是由于晋祠晚期海平面迅速下降,靠近滨岸地带的植物大量繁殖使泥炭沼泽大面积发育,造成全盆地煤系地层“北厚南薄”的分布特征。该段地层泥岩自然伽马(GR)值较高,声波时差(AC)值高(大于215  $\mu\text{s}/\text{m}$ )。页岩电性特征为GR值中等(80~150 API),AC值高(250  $\mu\text{s}/\text{m}$ )。煤层具有GR值低、AC值高的特征(图6)。

#### 4.3 本溪组矿物组成特征

地层中沉积岩的矿物含量,特别是石英与黏土矿物含量的多少可有效反映物源受到风化、搬运作用的程度与沉积环境。本溪组3段泥页岩地层黏土矿物含量自下而上整体呈现递减趋势,但至晋祠段顶部炭质泥岩时黏土矿物含量又有所增加,而石英含量呈现与黏土矿物含量相反的规律。平面上,由区域分布可知,湖田段黏土含量为3段地层中最高,且重点剖面黏土含量差别明显:Q36井黏土矿物含量大于M115井与招贤剖面;畔沟段、晋祠段具有类似规律,即:Q36井、M115井在畔沟段与晋祠段黏土矿物含量相当,但与招贤剖面相比含量较高,重点剖面矿物含量如图7所示。综合分析本溪组泥岩地层石英含量及黏土矿物含量,结合前文本溪组岩性组合特征,认为出现上述现象的原因与地层形成环境及物源搬运有关:底部湖田段水体深度较浅,沉积物以细粒沉积为主,大部分为原地残留堆积,几乎没有物源输入,因此湖田段具有黏土矿物含量高而石英含量低的特征;畔沟段与晋祠段母岩主要经历了搬运作用与沉积作用,为潟湖相沉积环境下高能态悬浮细粒沉积,畔沟段水体频繁进退,岩性发育与沉积相组合关系较为复杂,容易发生混合沉积;晋祠段潟湖相泥页岩发育厚度较大,沉积水体稳定性较好,相对湖田段沼泽相的低能水体环境,潟湖环境中悬浮碎屑矿物的输入增加,总体表现为畔沟段与晋祠段石英矿物含量较高、黏土矿物含量较低的特征。

#### 4.4 本溪组泥页岩地层地球化学特征平面对比

地球化学参数能够为沉积环境分析提供岩矿

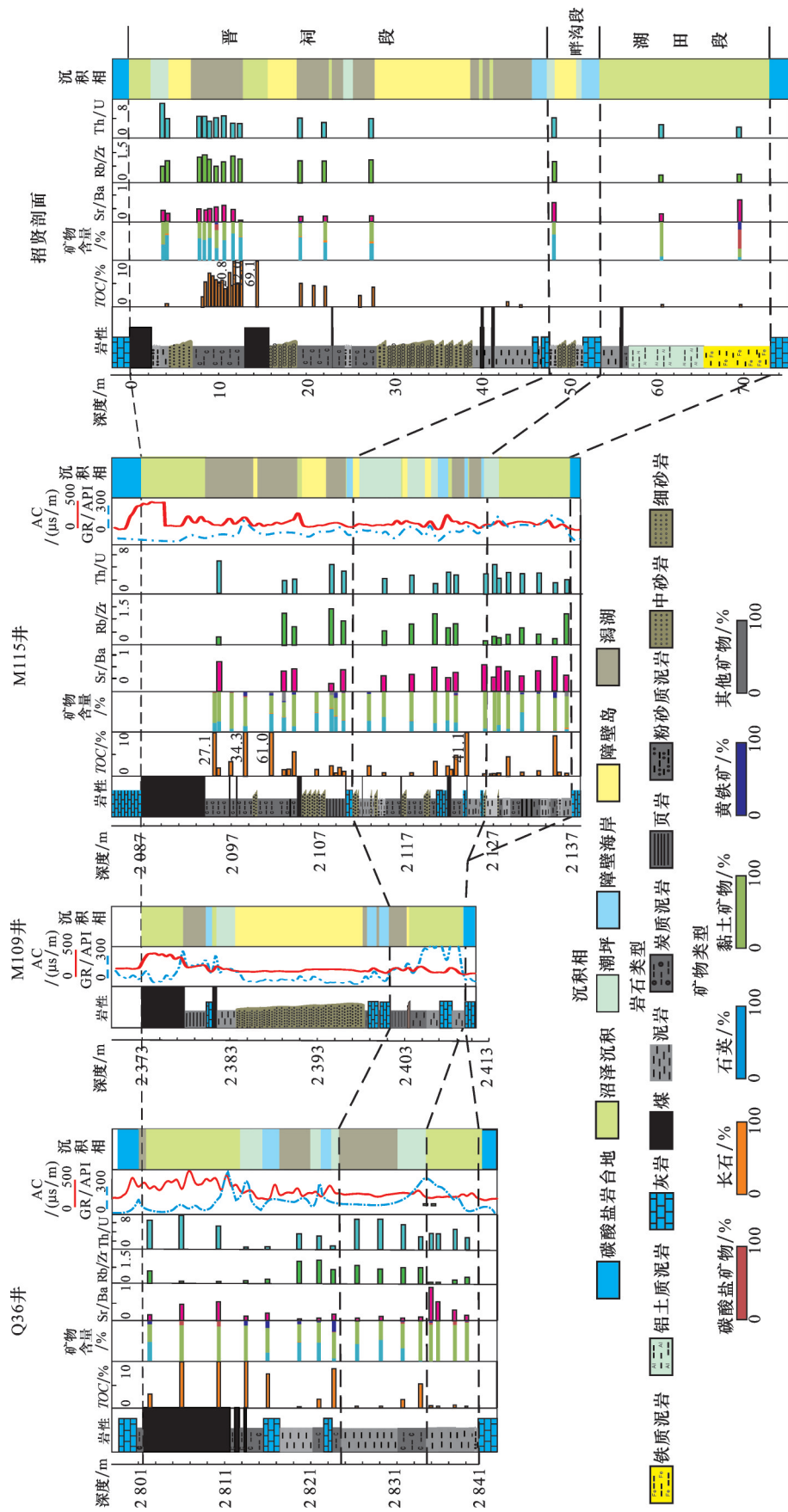


图 6 岩性组合、矿物含量及沉积相连井图

Fig. 6 Lithologic assemblage, mineral content and connected wells sedimentary facies



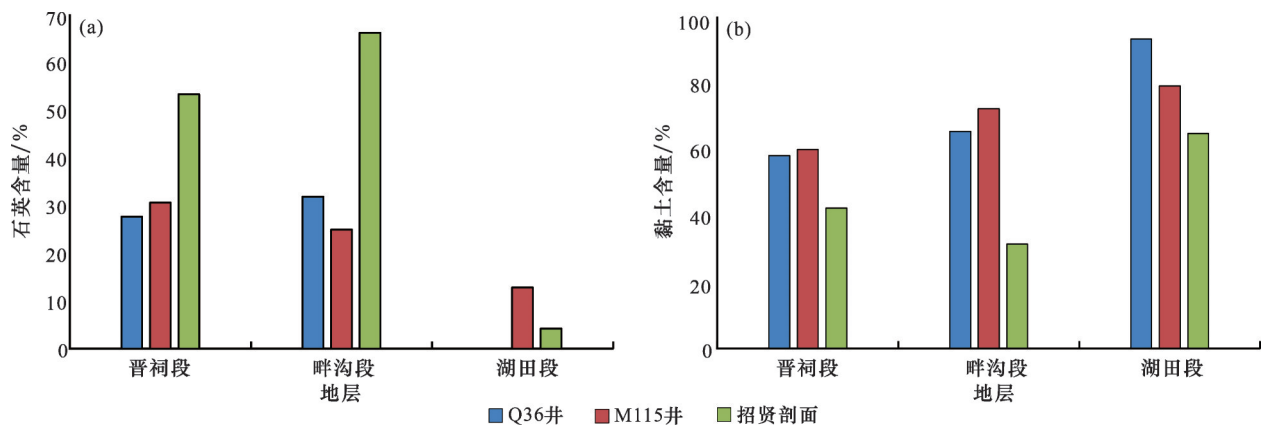


图7 重点剖面石英含量(a)及黏土含量(b)对比  
Fig. 7 Comparison of quartz content (a) and clay content (b) in key profiles

成分所不能反映的重要地球化学信息,对于沉积环境的指示有着重要意义<sup>[34-35,37]</sup>。因此在岩性发育特征认识的基础上,通过对2口井及1个重点剖面地球化学特征对比,从平面出发探讨本溪组不同层段沉积环境变化规律。

不同层段沉积水体盐度存在差异(表2):招贤剖面 Sr/Ba 值自下而上为 3.66(湖田段)、0.75(畔沟段)、0.97(晋祠段);M115 井 Sr/Ba 值为 1.71、1.39、1.68;Q36 井 Sr/Ba 值分别为 3.54、0.68、0.95,2 口井及 1 个重点剖面 Sr/Ba 值均反映了湖田段为咸水沉积,畔沟段、晋祠段为半咸水—咸水沉积,且 Sr/Ba 值自下而上具有先减小、后增加趋势,规律性较

强(图6)。

通过古氧化还原参数(Th/U)计算,发现研究区本溪组全段地层计算结果分布在 1.15~5.51 之间,均小于 8(Th/U<8 指示贫氧环境),指示本溪组整体处于缺氧—贫氧环境(表2)。

在不同沉积背景条件下,3 段地层古水深存在明显波动(图6):Q36 井、M115 井与招贤剖面本溪组古水深从下至上呈现先增后减的趋势(Rb/Zr 与古水深具有正相关性),说明 2 个重点井及 1 个剖面均经历了相同的海进海退过程,且 Rb/Zr 变化规律与 2 个重点井及 1 个剖面的岩性组合特征有良好的对应关系(图6)。

表2 重点井及剖面地球化学参数与矿物含量  
Table 2 Geochemical indicators and mineral content of key wells and profile

剖面/井	地层	石英含量/%	黏土总量/%	Sr/Ba	Th/U	Rb/Zr
Q36 井	晋祠段	6.9~47	43.1~87.5	0.51~1.24	0.31~6.3	0.03~0.89
		27.6(8)	58.1(8)	0.95(6)	2.36(6)	0.47(6)
	畔沟段	1.2~52	47~97.3	0.56~0.82	2.85~7.03	0.54~0.67
		31.8(4)	65.4(4)	0.68(4)	5.51(4)	0.6(4)
	湖田段	0	87.9~99.2	1.04~6.9	2.66~3.6	0.01~0.22
		0(4)	93.2(4)	3.54(4)	3.58(4)	0.08(4)
M115 井	晋祠段	8~57	32.3~88.5	0.64~2.5	1.98~4.97	0.16~0.96
		30.6(11)	59.9(11)	1.68(5)	3.43(5)	0.59(5)
	畔沟段	8.6~37.1	61.8~90.7	1.13~2.21	1.55~3.31	0.34~0.82
		24.9(7)	72.2(7)	1.59(6)	2.57(6)	0.46(6)
	湖田段	2.3~48.6	44.1~96	1.17~2.87	1.69~4.43	0.1~0.82
		12.8(7)	79.1(7)	1.71(7)	2.86(7)	0.3(7)
招贤剖面	晋祠段	32~69.5	29~56.9	0.09~1.61	3.21~6.78	0.37~1.01
		54.3(12)	41.5(12)	0.97(12)	4.54(12)	0.58(12)
	畔沟段	66.1	31.4	0.75	1.15	0.07
		66.1(1)	31.4(1)	0.75(1)	1.15(1)	0.07(1)
	湖田段	1.4~6.9	31.6~97.8	2.18~5.15	2.47~3.02	0.06~0.16
		4.2(2)	15.3(2)	3.66(2)	2.75(2)	0.11(2)

注:  $\frac{6.9\sim47}{27.6(8)}$  最小值—最大值  
平均值(样品个数)

#### 4.5 沉积相对泥页岩有机质的控制作用

在本文研究过程中,根据重点井及剖面不同层段电性特征、岩性组合关系、矿物含量、地球化学特征并结合前人对层序地层学研究成果,综合研究认为本溪组湖田段铝土质泥岩地层为风化淤化体系下的沼泽沉积<sup>[2,14]</sup>,畔沟段与晋祠段灰、黑色厚层泥页岩地层主要形成于障壁海岸沉积体系下的潟湖沉积,而粉砂质泥岩地层与炭质泥岩地层分别形成于潮间带中的混合坪、泥坪微相,并发现以上3种沉积相具有组合叠置关系:分别为潟湖、潮坪(混合坪)及泥坪—潟湖混合沉积。通过对这3类沉积类型进行泥页岩 TOC 含量分类统计,发现泥坪—潟湖 TOC 含量最高,均值为 16.46%,潟湖、潮坪沉积 TOC 含量远远小于泥坪—潟湖混合沉积,二者 TOC 含量分别为 2.12% 及 1.05%,如图 8。因此认为泥坪—潟湖混合沉积与潟湖沉积利于有机质的富集,泥坪—潟湖沉积为最有利的沉积相组合。

#### 4.6 鄂尔多斯盆地本溪组沉积模式

受构造沉降、海平面变化、气候及物源供给影响,盆地东部本溪组海陆交错格局具有“岩相组合多样、多种沉积体系共存”的特征。本溪早期(湖田期)突发小规模海侵事件形成了以铁铝岩、黏土岩为主的淤化洼地型沼泽沉积<sup>[2,14]</sup>,此阶段地层全岩矿物组分主要表现为高黏土矿物含量,低石英含量特征[图 9(a)]。畔沟早期,海平面继续升高,盆地东部进一步被华北海超覆,在此阶段碎屑岩与碳酸

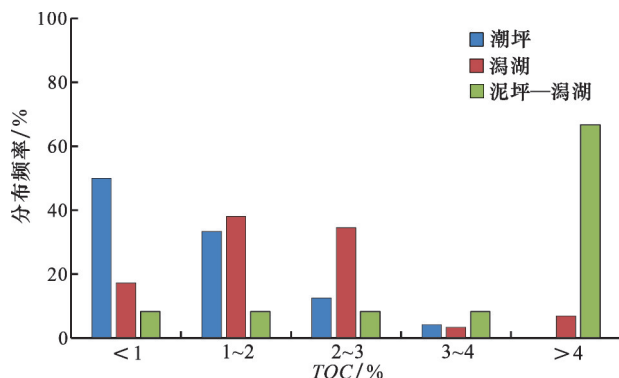


图 8 本溪组泥页岩沉积相与 TOC 分布直方图

Fig. 8 Histogram of the distribution of sedimentary facies and TOC of Benxi Formation mud shale

盐岩发生混合;畔沟末期,海退发生使海岸线进一步向东迁移,并且在沿岸地区形成多期平行于海岸线的障壁岛,使潟湖、潮坪与广海相隔绝,此时期沉积环境为潮坪(混合坪、泥坪、灰坪)—潟湖—障壁岛混合沉积体系,此阶段石英含量与水动力强度具有较好的对应关系[图 9(b)]。晋祠早期,再次发生海侵且水动力较强,此时期南北物源供给充足,海水携带物源形成了一套中—粗砂岩(俗称晋祠砂岩);随着海平面继续上升,随之进入稳定的高位阶段,此时稳定的沉积环境为有机质沉积埋存提供有利条件,在此阶段形成了一套富有机质的厚层泥页岩地层,并在之上覆盖厚层煤,该段地层整体属潮坪—潟湖—障壁岛—沼泽混合沉积。晋祠段泥页岩

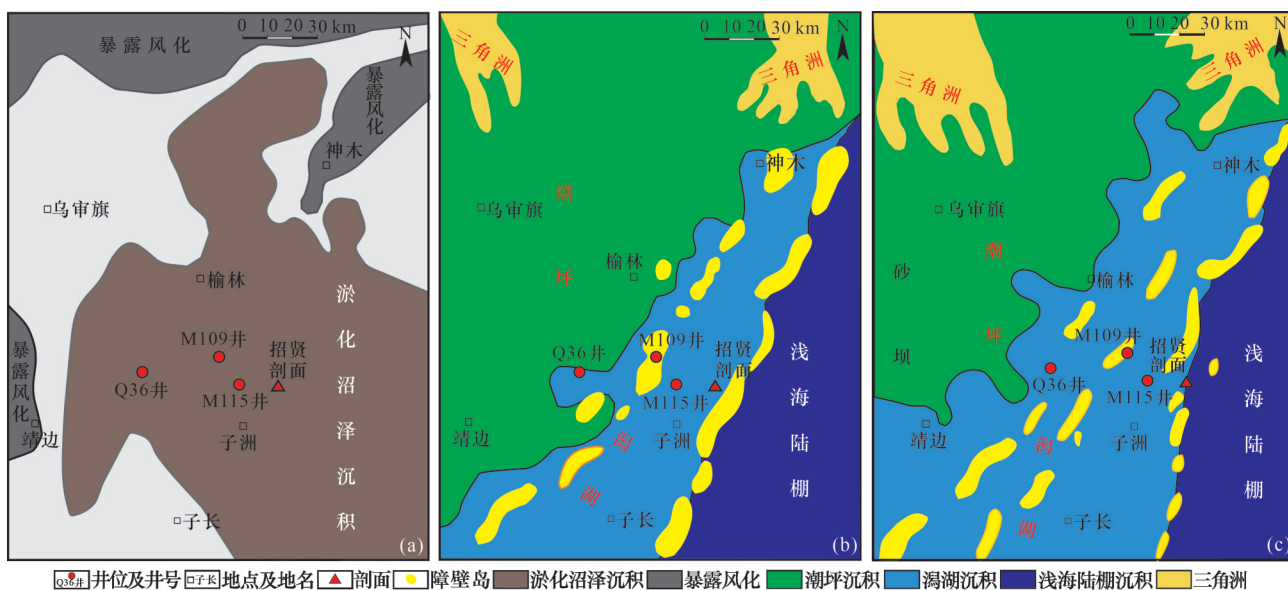


图 9 鄂尔多斯盆地本溪组沉积模式

Fig.9 The depositional models of Benxi Formation in Ordos Basin

(a)湖田段沉积期;(b)畔沟段沉积期;(c)晋祠段沉积期(据刘灿<sup>[2]</sup>、于兴河等<sup>[8]</sup>修改)

岩地层黏土矿物含量沿海侵方向增加,造成此现象的原因是:长而狭窄的一系列障壁岛将潟湖—潮坪沉积环境与广海相隔绝,发生小规模的海水动荡对盆地内部潟湖—潮坪沉积环境影响较小,因此石英含量较少而黏土矿物含量较多。晋祠晚期发生海退,海平面迅速下降至低位,此阶段温暖潮湿的沉积环境为植物繁殖提供了有利条件,使泥炭沼泽大面积发育,形成本溪组顶部全区发育的煤层,此阶段属滨岸平原环境[图9(c)]。

## 5 结论

(1)通过对典型井元素地球化学特征综合分析,查明鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组古环境及古沉积水体特征:利用Sr/Ba值反映本溪组为半咸水—咸水沉积,由下至上古水体盐度呈先减小后增加的变化特征;氧化—还原敏感参数(Th/U)反映本溪组整体具有相对还原的水体环境,其中,湖田段、晋祠段泥岩地层还原性较强,畔沟段还原性相对较弱;利用Rb/Zr值指示本溪组古水体深度自下至上逐渐变深,至晋祠段顶部时水深变浅,呈周期性变化。利用CIA指数与Ca、Al等主量元素共同指示,表明本溪组沉积时期气候条件垂向上具有温度及风化程度逐渐减小的特征。

(2)根据鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组3口重点井及1个重点剖面的岩性组合、全岩矿物组分、重点地球化学参数对比,结合区域沉积背景,分段对本溪组泥页岩地层沉积环境进行识别,认为湖田段主要为沼泽沉积,畔沟段与晋祠段厚层灰、黑色泥页岩形成于潟湖沉积,而粉砂质泥岩地层与炭质泥岩地层分别形成于潮坪沉积中的混合坪、泥坪微相。且泥坪—潟湖混合沉积为烃源岩发育的优势沉积相。

(3)综合本溪组泥页岩沉积环境与砂体沉积环境,认为鄂尔多斯盆地东部整体发育障壁海岸沉积体系:本溪组湖田段为风化作用阶段,以沼泽沉积为主;畔沟段、晋祠段为物源搬运与沉积阶段,2段地层分别发育潮坪—潟湖—障壁岛混合沉积体系与潮坪—潟湖—障壁岛—沼泽混合沉积体系。

## 参考文献(References)

- [1] 邹才能,赵群,董大忠,等.页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J].天然气地球科学,2017,28(12):1781-1796.
- ZOU C N, ZHAO Q, DONG D Z, et al. Geological charac-

- teristics, main challenges and future prospect of shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1781-1796.
- [2] 刘灿.山西兴县石炭系本溪组煤岩特征及成煤环境[D].成都:成都理工大学,2020:64-66.
- LIU C. Study on the Coals Characteristics and Coal-forming Environment of Benxi Formation Coals in Carboniferous from Xingxian in Shanxi Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020: 64-66.
- [3] 郭小军.鄂尔多斯盆地石炭—二叠纪聚煤规律与煤层气勘探有利区优选[D].北京:中国石油大学(北京),2010:71-93.
- GUO X J. Coal Accumulation and Target Optimization for Exploration of CBM in Permo-Carboniferous, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing),2010:71-93.
- [4] 周伟.鄂尔多斯盆地东缘北部含煤岩系沉积相与聚煤规律[D].北京:中国地质大学(北京),2012:37-40.
- ZHOU W. Sedimentary Facies of the Coal Measures in North-eastern Margin of Ordos Basin and Coal Accumulation Mechanism[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing),2012: 37-40.
- [5] 郭德运.鄂尔多斯盆地东部上古生界沉积体系研究[D].西安:西北大学,2009:37-79.
- GUO D Y. The Study of Sedimentary System of Upper Paleozoic in East Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2009: 37-79.
- [6] 周进松,赵谦平,银晓,等.鄂尔多斯盆地东南部石炭系本溪组储层沉积特征及天然气勘探方向[J].天然气勘探与开发,2012,35(2):13-16.
- ZHOU J S, ZHAO Q P, YIN X, et al. Sedimentary characteristics of Carboniferous Benxi Formation southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2012, 35(2): 13-16.
- [7] 李云,张建伍,李晶,等.鄂尔多斯盆地东南部石炭系本溪组沉积微相特征及其对天然气富集控制作用[J].西北地质,2014,47(2):216-222.
- LI Y, ZHANG J W, LI J, et al. A study on sedimentary microfacies of Benxi Formation and its controlling effect on gas enrichment in Yangchang district of Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(2): 216-222.
- [8] 于兴河,王香增,王念喜,等.鄂尔多斯盆地东南部上古生界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征[J].古地学报,2017,19(6):935-954.
- YU X H, WANG X Z, WANG N X, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution characteristics of gas-bearing sandbody in the Upper Paleozoic in southeastern



- Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2017, 19(6): 935-945.
- [9] 林进, 李云, 何剑. 鄂尔多斯延长探区本溪组物源及沉积体系分析[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1542-1551.
- LIN J, LI Y, HE J. An analysis of the source and the sedimentary system of the Carboniferous Benxi Formation in Yanchang area of Ordos Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1542-1551.
- [10] 贾浪波, 钟大康, 孙海涛, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组沉积物物源探讨及其构造意义[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 1087-1103.
- JIA L B, ZHONG D K, SUN H T, et al. Sedimentary provenance analysis and tectonic implication of the Benxi Formation, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 1087-1103.
- [11] 郑葆英, 杨铁汾, 刘联群, 等. 鄂尔多斯盆地中部石炭系层序地层分析[J]. 地球科学与环境学报, 2000, 22(1): 35-37.
- ZHENG B Y, YANG T F, LIU L Q, et al. Sequence stratigraphy of Carboniferous in the central area of Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2000, 22(1): 35-37.
- [12] 吴鹏. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤系地层层序地层学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 37-50.
- WU P. Study on Sequence Stratigraphy of Upper Paleozoic Coal-bearing Formation in the Southeastern Part of Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013: 37-50.
- [13] 董江浪. 鄂尔多斯盆地东缘佳县—吴堡深部煤系层序地层分析及聚煤规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020: 29-36.
- DONG J L. Sequence Stratigraphic Analysis of Jiaxian-Wubu Deep Coal-Bearing Strata and Coal Accumulation Law in the Eastern Margin of Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020: 29-36.
- [14] 刘新昕. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组沉积环境研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 8-37.
- LIU X X. Study on the Sedimentary Environment of Upper Carboniferous Benxi Formation of Eastern Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 8-37.
- [15] 侯云东, 陈安清, 赵伟波, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组潮汐—三角洲复合砂体沉积环境[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 393-401.
- HOU Y D, CHEN A Q, ZHAO W B, et al. Analysis on the depositional environment of Carboniferous Benxi Formation tidal-delta sand body complex, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(4): 393-401.
- [16] 陈全红, 李克永, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组—太原组扇三角洲沉积与油气聚集的关系[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 421-429.
- CHEN Q H, LI K Y, ZHANG D F, et al. The relationship between fan delta and hydrocarbon accumulation in Benxi-Taiyuan Formation, Ordos Basin[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 421-429.
- [17] 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 44-51.
- GUO Y H, LIU H J, QUAN B, et al. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos Area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 44-51.
- [18] 刘春雷. 鄂尔多斯盆地东部本溪组沉积体系研究[D]. 西安: 西北大学, 2012: 58-68.
- LIU C L. Sedimentary System Research of Benxi Formation in East Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2012: 58-68.
- [19] 苏东旭, 于兴河, 李胜利, 等. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组障壁海岸沉积特征与展布规律[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 48-56.
- SU D X, YU X H, LI S L, et al. Sedimentary characteristics and distribution laws of Benxi Fm barrier coast in SE Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 48-56.
- [20] 李文厚, 张倩, 李克永, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化[J]. 古地理论, 2021, 23(1): 39-52.
- LI W H, ZHANG Q, LI K Y, et al. Sedimentary evolution of the Late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent area[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(1): 39-52.
- [21] 冯娟萍, 欧阳征健, 陈全红, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区上石炭统沉积特征[J]. 古地理论, 2021, 23(1): 53-64.
- FENG J P, OUYANG Z J, CHEN Q H, et al. Sedimentary characteristics of the Upper Carboniferous in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(1): 53-64.
- [22] 冯子齐. 鄂尔多斯盆地东南部山西组海陆过渡相页岩储层特征与评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 10-18.
- FENG Z Q. Characteristics and Evaluation of the Organic-rich Shale of Shanxi Formation, Southeast in Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014: 10-18.
- [23] 郭艳琴, 李文厚, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化[J]. 古地理论, 2019, 21(2): 293-320.
- GUO Y Q, LI W H, GUO B C, et al. Sedimentary system

- and palaeogeography evolution of Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 293-320.
- [24] 苏东旭. 鄂尔多斯盆地东南部石炭系本溪组沉积体系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015: 21-34.
- SU D X. Study on Sedimentary System of the Benxi Formation in the Southeastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015: 21-34.
- [25] 刘桂珍, 高伟, 尉加盛, 等. 混积层系沉积、层序特征——以鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(3): 382-392.
- LIU G Z, GAO W, WEI J S, et al. Sedimentary characteristics and sequence stratigraphy in amixed siliclastic-carbonate depositional system: Case study of Benxi Formation in Gaoqiao area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(3): 382-392.
- [26] 田景春, 张翔. 沉积地球化学: 卷一[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 56-83.
- TIAN J C, ZHANG X. *Sedimentary Geochemistry: Volume 1* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 56-83.
- [27] COUCH E L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. *AAPG Bulletin*, 1971, 55(10): 1829-1837.
- [28] 师晶, 黄文辉, 吕晨航, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界泥页岩地球化学特征及地质意义[J]. *石油学报*, 2018, 39(8): 876-889.
- SHI J, HUANG W H, LÜ C H, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Upper Paleozoic mudstones from Linxing area in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(8): 876-889.
- [29] 邓宏文, 钱凯. 试论湖相泥质岩的地球化学二分性[J]. *石油与天然气地质*, 1993, 14(2): 85-97.
- DENG H W, QIAN K. Geochemical binary division character of lacustrine argillite[J]. *Oil & Gas Geology*, 1993, 14(2): 85-97.
- [30] 孙彩蓉. 鄂尔多斯盆地东缘石炭—二叠系页岩沉积相及微量元素地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017: 33-35.
- SUN C R. Study on Sedimentary Facies and Geochemistry of Trace Elements of Carboniferous-Permian Shale in the Eastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017: 33-35.
- [31] ZHANG L F, DONG D Z, QIU Z, et al. Sedimentology and geochemistry of Carboniferous-Permian marine-continental transitional shales in the eastern Ordos Basin, North China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 571: 110389.
- [32] 腾格尔. 海相地层元素、碳氧同位素分布与沉积环境和烃源岩发育关系——以鄂尔多斯盆地为例[D]. 兰州: 中国科学院研究生院/中国科学院兰州地质研究所, 2004: 42-98.
- TENGER. The Distribution of Elements, Carbon and Oxygen Isotopes on Marine Strata and Environmental Correlation between them and Hydrocarbon Source Rocks Formation: An Example from Ordovician Basin, China[D]. Lanzhou: Graduate University of Chinese Academy of Sciences/Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 2004: 42-98.
- [33] GUO Q, SHIELD G A, LIU C, et al. Trace element chemostratigraphy of two Ediacaran-Cambrian successions in South China: Implications for organosedimentary metal enrichment and silicification in the Early Cambrian[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(12): 194-216.
- [34] 陈晶, 黄文辉, 何明倩. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组一下石盒子组泥岩元素地球化学特征[J]. *现代地质*, 2018, 32(2): 240-250.
- CHEN J, HUANG W H, HE M Q. Elemental geochemistry characteristics of mudstones from Benxi Formation to Lower Shihezi Formation in southeastern Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2018, 32(2): 240-250.
- [35] 王艳鹏. 华北南缘宜阳地区中二叠统一下三叠统沉积和物源特征及其对盆山系统演化的指示[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019: 91-93.
- WANG Y P. Sedimentary and Provenance Characteristics of the Middle Permian-Lower Triassic in the Yiyang Area, Southern Margin of the North China and Its Implications for the Evolution of the Basin-mountain System [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019: 91-93.
- [36] 崔晨光, 张辉, 刘文香, 等. 鄂尔多斯盆地东部本溪组一段泥页岩元素地球化学特征——以山西临县招贤剖面和M115井为例[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(6): 1001-1012.
- CUI C G, ZHANG H, LIU W X, et al. Element geochemical characteristics of shale in the first member of Benxi Formation in eastern Ordos Basin: Take Zhaoxian section and M115 Well in Linxian County, Shanxi as examples[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(6): 1001-1012.
- [37] 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1395-1404.
- ZHENG Y D, LEI Y H, ZHANG L Q, et al. Characteristics

of element geochemistry and paleo-sedimentary environment  
evolution of Zhangjiatan shale in the southeast of Ordos Basin

and its geological significance for oil and gas[J]. Natural Gas  
Geoscience, 2015, 26(7): 1395-1404.

## Geochemical characteristics and sedimentary environment of Carboniferous Benxi Formation in eastern Ordos Basin

ZHANG Liwen<sup>1</sup>, WU Chenjun<sup>1</sup>, HUANG Daojun<sup>2</sup>, WEN Zhigang<sup>1</sup>, ZHAO Weibo<sup>2</sup>, XI Yingyang<sup>1</sup>,  
ZHANG Hui<sup>2</sup>, SUN Lu<sup>1</sup>, SONG Huanxin<sup>1</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment (Yangtze University), Wuhan 430100, China;

2. China Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** Benxi Formation of Carboniferous in the Ordos Basin has unconventional energy sources, and its sedimentary environment is complex and interactive. Therefore, through the analysis and testing of core samples of typical wells in eastern Ordos Basin, based on the observation of core samples, this study reveals the paleoclimate and the palaeobathymetry environment of shale in Benxi Formation, and discusses the control of sedimentary facies characteristics on the shale development. The results show that the salinity of the palaeobathymetry of Benxi Formation gradually decreases from smaller to bigger, and the salinity of the coal seam water at the top of Hutian Member to Jinci Member gradually changes from saline water to saline water reclamation; redox sensitive parameters (Th/U) of Benxi Formation decrease first and then increase from lower to upper. Hutian Member, Pangou Member and Jinci Member are anoxic environment, oxygen poor anoxic environment and weak redox environment, respectively. The study of ancient water depth (Rb/Zr) shows that the ancient water depth of Benxi Formation changes periodically from lower to upper, and then gradually back to lower again; CaO/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO), CIA and other paleoclimate indicators reflect that Benxi Formation has a hot and humid climate. We compared the mineral composition and lithologic combination characteristics of the mud shale under different sedimentary backgrounds of Benxi Formation in eastern Ordos Basin, and further divided the facies into swamp deposit, lagoon-tidal-flat-barrier island mixed sediments, and lagoon-tidal-flat-barrier island-swamp mixed sediments were developed in Hutian Member, Pangou Member and Jinci Member respectively.

**Key words:** Element geochemical; Shale; Benxi Formation; Sedimentary environment; Ordos Basin

**Foundation item:** The Scientific Research Project of Changqing Oilfield Company, PetroChina (Grant No. Technology 2020-151).