



· 鄂尔多斯盆地岩相古地理与沉积演化 ·

鄂尔多斯盆地东南部晚石炭世—中二叠世 沉积环境及演化

王若谷¹,周进松¹,张建锋¹,米伟伟¹,张家骥¹,高泽¹,刘楠¹,李文厚²

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司天然气研究院,陕西 西安 710065;

2. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室,陕西 西安 710069)

摘要 通过对鄂尔多斯盆地东南部上古生界泥岩样品微量元素的分析测试,并结合岩石沉积学特征、地球物理测井等多种方法,定性、半定量及定量地分析整个研究区晚石炭世本溪组至中二叠世下石盒子组盒8段的沉积水体环境和古气候等特征,并在此基础上探讨沉积环境的演化特征。结果表明,砂岩中多以反应牵引流水动力条件的沉积构造为主,沉积期水动力较强;Sr/Ba值指示研究区处于混合水-淡水环境;岩性组合、典型自生矿物、V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)、 δU 及自然伽马能谱测井资料定性及半定量判别表明,研究区主体为富氧浅水环境;结合La-Co法定量判别认为研究区古水体深度多小于25 m,但古水深频繁变化;Sr/Cu值指示研究区属温湿的古气候。由本溪组至下石盒子组盒8段,水体盐度逐步降低,水体深度稳步下降,古气候由湿润趋于干燥,亦揭示出鄂尔多斯盆地东南部上古生界经历了由近海湖盆至内陆湖盆的沉积演化过程。

关键词 古盐度;古水深;古气候;微量元素;晚石炭世—中二叠世;鄂尔多斯盆地东南部

中图分类号:P595 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-06-008

Sedimentary environment and evolution of Late Carboniferan-Middle Permian in southeastern Ordos Basin

WANG Ruogu¹, ZHOU Jinsong¹, ZHANG Jianfeng¹, MI Weiwei¹,
ZHANG Jiafei¹, GAO Ze¹, LIU Nan¹, LI Wenhong²

(1. Natural Gas Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710065, China;

2. Department of Geology/State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract By conducting analysis and testing of trace elements in mudstone samples from the Upper Paleozoic strata in the southeastern Ordos Basin, and integrating various methods such as sedimentary geological characteristics and geophysical logging, this study qualitatively, semi-quantitatively, and quantitatively analyzes the sedimentary water body environment and paleoclimate features of the Late Carboniferous Benxi Formation to the Middle Permian Xiashihezi Formation He 8 Member. Furthermore, it explores the evolutionary characteristics of the sedimentary environment based on these findings. The results indicate that the Upper Paleozoic strata are primarily characterized by sedimentary structures reflecting traction flow conditions. During sandstone deposition periods, water dynamics were notably strong. The Sr/Ba value suggests that the study area is situated

收稿日期:2024-09-27

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42230815,41630312)

第一作者:王若谷,女,博士,高级工程师,从事天然气勘探地质综合研究,wrg_8922@163.com。

within a mixed water-freshwater environment. Qualitative and semi-quantitative assessments based on rock composition, typical self-formed minerals, the values of V/Cr , Ni/Co , $V/(V+Ni)$, δU , as well as natural gamma ray spectral logging data collectively indicate that an oxygen-rich shallow water environment predominates in the study area. Furthermore, quantitative judgment using La-Co law indicates that paleo-water depths in this region generally did not exceed 25 meters but exhibited frequent fluctuations. The Sr/Cu value points to a warm and humid ancient climate prevailing in this area. From Benxi Formation to Xiashihezi Formation He 8 Member, the salinity of water bodies gradually decreased while their depth steadily diminished. Additionally, the paleoclimate transitioned from humid to dry, revealing a sedimentary evolution process from nearshore basin to inland basin for Upper Paleozoic strata in southeastern Ordos Basin.

Keywords paleosalinity; paleo-water depth; paleoclimate; trace element; Late Carboniferan-Middle Permian; southeastern Ordos Basin

沉积水体中的沉积物记录了丰富的古环境和古气候信息。恢复沉积水体可揭示湖盆在不同地质时期的水深、水温、盐度、氧化还原条件等沉积环境特征,进而揭示古气候的演变规律、古环境的变迁过程^[1-3]。沉积古水体环境也影响着岩相组合^[4]和烃源岩生烃潜力^[5],分析探讨沉积古环境及其演化过程,可为油气勘探,特别是非常规油气勘探提供重要的地质依据。

鄂尔多斯盆地是我国最大的能源生产基地,其中上古生界蕴含着丰富的天然气资源。近年来,随着勘探开发程度的提高,勘探开发的视野逐渐汇聚到烃源岩附近及其层系,致密气、页岩气、煤层气等非常规资源已成为勘探开发重点领域。鄂尔多斯盆地东南部沉积环境有别于北部,晚古生代沉积是在陆表海环境向大陆环境演化的大背景下形成的,处于近海湖盆的边缘位置^[6]。前人多侧重于天然气成藏系统中沉积相^[7-9]、烃源岩^[10-11]、储层^[12-13]等方面的研究,部分学者对古沉积环境进行过探讨,多针对的是山西组^[14],鲜有学者开展过本溪组古沉积环境介质条件的研究,且尚未有学者对鄂尔多斯东南部上古生界湖(海)盆水体深度进行系统定量的分析。

鉴于此,本文主要通过对鄂尔多斯盆地东南部上古生界泥岩样品微量元素的分析,并结合岩石沉积学特征、测井资料评价等多种方法,定性、半定量及定量分析整个鄂尔多斯盆地东南部晚石炭世本溪组至中二叠世下石盒子组盒8段的沉积环境介质条件和古气候等特征,并在此基础上探讨沉积环境的演化特征,旨在为盆地东南部上古

生界致密气、页岩气等资源的勘探开发提供理论依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通中西部,是一个古生代地台及台缘坳陷与中生代台内坳陷叠合的大型多旋回克拉通盆地。研究区位于鄂尔多斯盆地东南部,北起子洲,南至黄陵,东达延川,西抵志丹,构造位置隶属伊陕斜坡构造单元(见图1),构造较为简单。受加里东运动的影响,鄂尔多斯盆地东南部上古界地层发育不全,缺失泥盆系和下石炭统地层,之上再无沉积间断,上古生界地层自下而上划分为上石炭统本溪组、下二叠统太原组和山西组、中二叠统下石盒子组和上石盒子组及上二叠统石千峰组。其中,根据岩性组合、电性和沉积旋回等特征可将山西组自下而上划分出山2和山1两段,山2段可再细分出3个亚段(见图1)。区内石炭系—二叠系整体经历了由海及陆的古地理演化过程,主要发育障壁海岸、陆表海碳酸盐台地、辫状河三角洲前缘、曲流河三角洲前缘和湖泊沉积体系^[9]。

本次研究所选取泥页岩微量元素测试样品位于研究区不同位置51口钻井、91块样品,取样层位涉及本溪组、山西组及下石盒子组盒8段。样品测试由西北大学大陆动力学教育部重点实验室完成,各样品分析计算结果见表1,具体计算过程及结果讨论见后文。

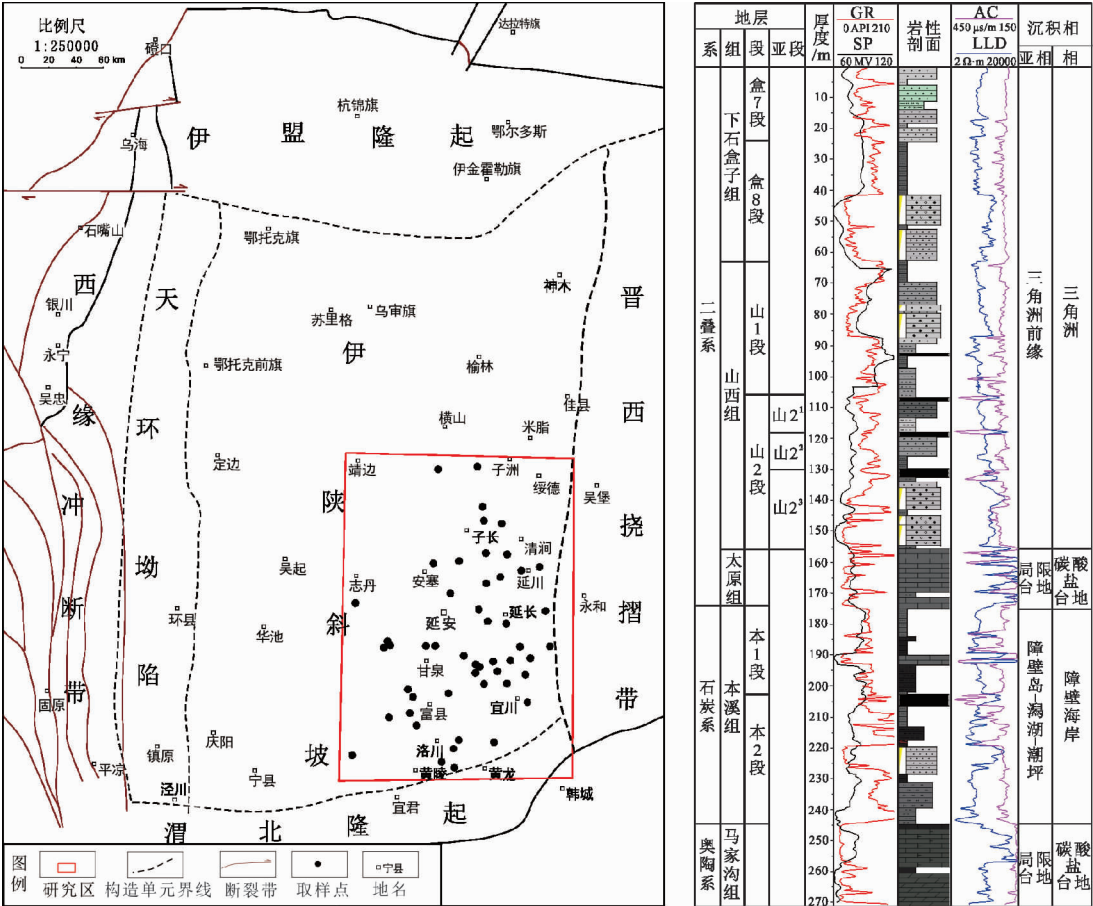


图 1 研究区位置和地层综合柱状图

Fig. 1 Location map of the study area and comprehensive stratigraphic clumn chart

表 1 鄂尔多斯盆地东南部本溪组一下石盒子组盒 8 段泥岩样品微量元素分析计算表

Tab. 1 Calculation table of trace elements of mudstone samples of Benxi Formation-Xiashihezi Formation He 8 Member in south-eastern Ordos Basin

样号	层位	Sr/Ba	V/Cr	Ni/Co	V/(V + Ni)	δU	Sr/Cu	Co/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	La/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	古水深/m
YH8-1	盒 8	0.28	1.61	1.76	0.77	0.77	7.68	20.25	36.30	41.56
YH8-2	盒 8	0.31	1.46	1.13	0.78	0.79	9.39	19.13	65.81	24.71
YH8-3	盒 8	0.32	1.71	1.24	0.75	0.74	8.37	26.52	59.60	55.91
YH8-4	盒 8	0.24	2.07	1.56	0.82	0.70	5.84	17.76	62.34	21.62
YH8-5	盒 8	0.33	1.52	1.06	0.79	0.70	6.63	26.33	56.28	56.86
YH8-6	盒 8	0.28	1.32	2.19	0.77	0.95	4.48	16.89	63.52	18.50
YH8-7	盒 8	0.42	1.85	1.89	0.81	0.74	7.20	13.83	91.26	3.20
YH8-8	盒 8	0.42	1.80	1.87	0.81	0.75	6.96	14.04	97.95	2.27
YH8-9	盒 8	0.28	1.60	0.80	0.82	0.64	8.84	10.50	85.30	0.09
YH8-10	盒 8	0.34	1.45	2.10	0.80	0.74	2.07	10.49	35.84	10.10
YH8-11	盒 8	0.26	1.86	1.81	0.83	0.65	8.49	11.61	40.15	11.62
YH8-12	盒 8	0.29	1.74	1.26	0.77	0.79	4.94	27.06	61.93	57.06
YH8-13	盒 8	0.26	1.53	1.81	0.83	0.80	3.44	18.04	72.31	18.80
YH8-14	盒 8	0.34	1.94	1.46	0.56	0.85	24.46	10.34	58.68	3.93
YH8-15	盒 8	0.28	1.62	0.72	0.80	0.88	4.86	11.71	50.06	8.94

续表 1

样号	层位	Sr/Ba	V/Cr	Ni/Co	V/(V + Ni)	δU	Sr/Cu	Co/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	La/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	古水深/m
YH8-16	盒 8	0.28	1.61	0.71	0.79	0.88	4.98	11.99	53.73	8.57
YH8-17	盒 8	0.29	1.52	1.15	0.74	0.86	6.00	10.55	67.22	2.56
YH8-18	盒 8	0.28	1.87	3.13	0.72	0.65	9.76	13.22	30.75	19.31
YH8-19	盒 8	0.39	1.56	1.07	0.79	0.90	5.20	10.72	49.47	6.86
YH8-20	盒 8	0.25	1.75	1.50	0.79	0.94	5.85	19.46	68.00	24.91
YH8-21	盒 8	0.25	1.67	0.32	0.80	0.65	19.81	18.92	33.26	37.85
YS1-1	山 1	0.27	2.44	0.94	0.85	1.26	4.98	29.09	79.02	56.98
YS1-2	山 1	0.30	1.90	3.68	0.78	0.76	3.55	9.37	47.69	4.57
YS1-3	山 1	0.32	1.64	0.82	0.88	0.72	4.73	21.91	44.17	44.43
YS1-4	山 1	0.55	1.58	3.31	0.80	0.79	12.55	6.00	36.34	1.37
YS1-5	山 1	0.34	1.99	1.67	0.86	0.76	4.03	11.71	62.30	5.71
YS1-6	山 1	0.20	1.53	1.21	0.82	0.81	4.28	21.31	57.62	35.85
YS1-7	山 1	0.28	1.74	1.54	0.81	0.92	4.88	16.45	47.93	22.96
YS1-8	山 1	0.26	1.53	2.21	0.69	0.75	3.24	20.87	44.86	40.00
YS1-9	山 1	0.55	1.74	1.54	0.71	0.88	13.48	21.97	93.57	23.11
YS1-10	山 1	0.23	1.70	1.51	0.78	0.96	3.74	20.77	39.31	42.19
YS1-11	山 1	0.25	3.60	4.81	0.88	1.34	1.71	5.30	11.50	5.09
YS1-12	山 1	0.41	3.25	4.73	0.81	1.30	1.48	6.00	38.95	1.00
YS1-13	山 1	0.60	2.52	3.64	0.77	1.31	2.01	3.90	9.60	2.99
YS1-14	山 1	0.31	1.96	1.71	0.75	0.99	4.12	19.90	72.80	24.47
YS1-15	山 1	0.28	2.63	3.23	0.90	1.11	2.11	5.20	15.26	4.06
YS1-16	山 1	0.28	1.94	2.57	0.72	0.71	4.17	16.90	57.00	20.93
YS1-17	山 1	0.22	1.70	1.25	0.82	1.24	3.75	17.50	53.00	24.40
YS1-18	山 1	0.25	2.24	2.67	0.86	0.87	5.12	7.90	27.00	6.60
YS1-19	山 1	0.29	2.08	1.58	0.82	0.83	4.31	16.00	45.70	22.37
YS1-20	山 1	0.28	1.92	1.30	0.82	1.10	5.34	16.10	53.10	19.91
YS2-1	山 2 ¹	0.19	1.61	0.66	0.77	1.03	4.99	29.43	53.91	72.18
YS2-2	山 2 ¹	0.26	1.69	1.45	0.86	0.86	9.62	9.82	53.24	4.17
YS2-3	山 2 ¹	0.20	1.66	0.94	0.69	0.76	5.70	13.14	63.59	8.47
YS2-4	山 2 ¹	0.31	1.39	1.96	0.78	0.92	5.63	13.34	49.53	13.20
YS2-5	山 2 ¹	0.32	1.56	0.75	0.85	0.81	7.93	24.05	64.45	43.23
YS2-6	山 2 ¹	0.35	2.39	3.02	0.85	0.51	9.63	5.43	32.77	1.20
YS2-7	山 2 ¹	0.47	1.78	0.14	0.80	0.81	3.94	20.78	54.66	35.20
YS2-8	山 2 ¹	0.59	1.47	0.14	0.81	0.22	3.79	21.08	56.54	35.47
YS2-9	山 2 ²	0.44	1.60	0.12	0.85	0.82	9.26	17.75	48.67	26.96
YS2-10	山 2 ²	0.57	1.24	0.22	0.60	0.84	3.64	18.38	54.66	26.67
YS2-11	山 2 ²	0.63	1.00	0.18	0.63	0.92	4.15	20.85	60.67	32.78
YS2-12	山 2 ²	0.52	1.93	0.17	0.67	0.91	5.90	20.07	44.80	36.96
YS2-13	山 2 ²	0.53	1.99	0.24	0.82	0.40	5.36	12.85	61.63	8.35
YS2-14	山 2 ²	0.83	2.02	0.23	0.78	0.82	3.61	20.78	39.53	42.15
YS2-15	山 2 ²	0.23	1.87	3.50	0.81	0.98	6.10	5.20	12.57	4.65
YS2-16	山 2 ²	0.23	2.67	2.85	0.89	1.15	7.44	5.50	11.45	5.50

续表 1

样号	层位	Sr/Ba	V/Cr	Ni/Co	V/(V + Ni)	δU	Sr/Cu	Co/(μg · g ⁻¹)	La/(μg · g ⁻¹)	古水深/m
YS2-17	山 2 ³	0.57	2.07	2.63	0.88	1.04	6.12	10.44	80.20	0.48
YS2-18	山 2 ³	0.57	2.07	2.69	0.88	1.03	6.97	10.54	82.49	0.33
YS2-19	山 2 ³	0.49	0.83	1.42	0.25	1.97	3.74	12.29	1.46	27.66
YS2-20	山 2 ³	0.62	1.61	2.50	0.70	0.94	5.83	18.95	68.86	22.93
YS2-21	山 2 ³	0.47	1.65	2.61	0.59	0.82	5.72	17.54	62.13	21.01
YS2-22	山 2 ³	0.62	1.43	1.87	0.85	0.76	5.67	13.25	38.95	16.48
YS2-23	山 2 ³	0.33	1.75	4.09	0.58	1.22	1.64	17.16	41.64	27.85
YS2-24	山 2 ³	0.24	1.99	1.65	0.80	0.86	3.59	15.13	50.80	17.82
YS2-25	山 2 ³	0.57	2.51	6.27	0.19	0.92	1.04	15.25	15.26	32.25
YS2-26	山 2 ³	0.69	0.38	5.29	0.44	0.93	9.07	21.72	66.96	33.20
YS2-27	山 2 ³	0.68	0.91	3.12	0.58	0.93	8.46	20.75	62.95	31.44
YS2-28	山 2 ³	0.72	1.91	0.27	0.60	0.50	5.06	15.45	45.68	20.65
YS2-29	山 2 ³	0.64	1.48	0.14	0.68	0.60	2.32	18.31	45.34	30.30
YS2-30	山 2 ³	0.62	1.48	0.07	0.79	0.54	5.39	21.13	46.36	40.31
YS2-31	山 2 ³	0.27	1.17	0.16	0.75	0.50	8.28	17.45	39.45	29.77
YS2-32	山 2 ³	0.80	1.15	0.21	0.74	0.71	6.10	15.09	40.31	21.53
YS2-33	山 2 ³	0.60	1.18	0.18	0.68	0.96	5.27	21.18	42.13	42.49
YS2-34	山 2 ³	0.43	1.02	0.20	0.66	0.88	3.89	14.75	43.56	19.28
YS2-35	山 2 ³	0.57	1.25	0.14	0.78	1.50	2.26	15.07	41.35	21.09
YS2-36	山 2 ³	0.37	1.42	0.26	0.59	1.12	1.86	19.45	55.26	30.10
YS2-37	山 2 ³	0.30	1.79	0.25	0.66	0.08	1.54	15.07	42.14	20.79
YS2-38	山 2 ³	0.32	1.45	0.24	0.58	0.22	2.72	18.39	52.15	27.73
YS2-39	山 2 ³	0.67	2.13	0.21	0.82	0.61	2.24	19.14	41.23	35.08
YS2-40	山 2 ³	0.60	2.07	0.32	0.82	0.79	4.43	14.05	51.25	14.57
YS2-41	山 2 ³	0.74	1.74	0.21	0.76	1.01	2.90	19.39	39.63	36.74
YB-1	本溪	0.23	1.64	1.67	0.86	0.81	3.59	21.32	54.55	37.26
YB-2	本溪	0.33	1.34	2.19	0.73	0.87	3.16	28.12	54.21	65.96
YB-3	本溪	4.50	1.58	15.65	0.72	1.08	3.76	11.31	52.36	7.40
YB-4	本溪	0.26	1.35	1.99	0.75	0.70	2.70	15.57	66.59	13.68
YB-5	本溪	0.37	1.38	3.26	0.75	0.69	3.82	19.33	72.68	22.67
YB-6	本溪	0.37	1.37	3.32	0.75	0.69	3.82	19.13	71.01	22.67
YB-7	本溪	0.38	1.40	2.44	0.76	0.82	3.48	21.08	64.40	32.02
YB-8	本溪	0.22	1.41	0.18	0.62	0.57	3.23	21.08	18.36	53.83
YB-9	本溪	0.51	1.47	0.20	0.60	0.51	3.02	16.77	31.24	30.84

2 沉积水动力条件分析

碎屑岩沉积物的岩性、粒度特征以及沉积构造均能反应沉积时的水动力条件。研究区本溪组、山西组一下石盒子组盒 8 段岩性以中-细砂岩与泥、粉砂岩互层为主,整体看来,泥岩占比较高,地层多呈现出“泥包砂”的特征。相较而言,本溪

组和下石盒子组盒 8 段粒度稍大,可见一定数量的细砾岩和粗砂岩。砂岩中常见槽状交错层理、板状交错层理、平行层理、流水沙纹层理、浪成沙纹层理、块状层理等原生沉积构造(见图 2),未见反映重力流作用的构造类型。纵向上看:本溪组砂岩及细砾岩中多见块状层理、槽状交错层理,偶见冲洗交错层理及浪成沙纹层理,反应了强水动力背景下,局部双向水流的特征;山西组砂岩可见

块状、板状及平行层理,亦见少量的变形层理,反应了水动力条件以牵引流为主,但局部存在不稳定的水动力环境,粉-细砂岩中可见浪成交错层理,为波浪作用的产物,多形成于滨浅湖等较强水

动力的浅水环境中;下石盒子组盒 8 段砂岩中多见板状、槽状及平行层理等反应牵引流水动力条件的沉积构造,水动力条件进一步加强,反映出近岸的浅水沉积环境。



(a)灰色细砂岩中发育浪成交错层理,延 416 井,2 308.65 m,盒 8 段;(b)深灰色中砂岩中发育槽状交错层理,延 330 井,2 534.89 m,山 1 段;(c)灰色粗砂岩中发育板状交错层理,延 267 井,3 087.46 m,本溪组

图 2 鄂尔多斯盆地东南部本溪组-盒 8 段典型沉积构造

Fig. 2 Typical sedimentary structures of Benxi formation-He 8 Member in the southeastern Ordos Basin

3 水体古盐度分析

地层中微量元素的分布、分配和迁移往往受控于沉积岩的形成环境,可以利用性质稳定的、受后续成岩作用影响较小的元素含量及相关比值来判断和恢复沉积环境^[15-19]。本次采用 Sr/Ba 值对本溪组、山西组及下石盒子组盒 8 段水体古盐度进行分析。

Sr/Ba 值可作为古盐度判别的灵敏标志,但关于淡水及混合水的分界线一直存在争议^[20-22]。基于盆地东南部上古生界沉积背景,本文采用王香增等人推荐的 Sr/Ba = 0.4 作为淡水和混合水的界限^[22]。根据泥岩样品分析结果可知(见表 2),研究区本溪组一下石盒子组盒 8 段泥岩样品的 Sr/Ba

值介于 0.19 ~ 4.49,共有 31 个样品 Sr/Ba 值大于 0.4,占总样品数的 34%,说明研究区本溪组、山西组至下石盒子组盒 8 段沉积期整体处于淡水-混合水沉积环境中。垂向上,由本溪组至盒 8 段 Sr/Ba 值呈现逐步降低的趋势,本溪组 Sr/Ba 最高值可达 4.5,指示了海相咸水环境;山 2³、山 2² 亚段均有约 75% (19 个、9 个)的样品 Sr/Ba 值高于 0.4,山 2¹ 亚段有 25% (2 个)样品 Sr/Ba 值高于 0.4。区域上,大致呈现出由东南向西北, Sr/Ba 值逐步降低的趋势,说明山 2 沉积期仍处于混合水环境中,间歇性的海侵作用仍影响着研究区的东南部;山 1 段和盒 8 段各有约 10% (2 个)的样品 Sr/Ba 值略高于 0.4,说明海水基本已完全退出研究区,仅在东南部宜川区域有着极小的影响。

表 2 鄂尔多斯盆地东南部本溪组—盒 8 段 Sr/Ba 值统计表

Tab. 2 Statistical table of Sr/Ba value of Benxi Formation-He 8 Member in southeastern Ordos Basin

层位	样品数	Sr/Ba		
		最小值	最大值	平均值
盒 8	21	0.24	0.42	0.30
山 1	20	0.19	0.55	0.32
山 2 ¹	8	0.19	0.59	0.34
山 2 ²	8	0.23	0.83	0.49
山 2 ³	25	0.24	0.80	0.54
本溪	9	0.22	4.50	0.80

4 古水深判别

4.1 沉积学标志

自生矿物、特定岩石类型均可作为古水深的推测依据^[23-24]。煤层形成于泥炭沼泽发育的地貌单元,其形成与植物密切相关。鄂尔多斯盆地

东南部本溪组、山西组地层中多套煤层发育,尤其在本溪组顶部和山西组中下部,煤层分布广泛且较稳定,单层厚度最大可达7 m,平均厚度2 m左右,其中,本溪组煤层总厚度介于0.50~13.9 m,山西组煤层总厚度介于0.50~19.5 m(见图3)。煤层的广泛发育指示出研究区在本溪组、山西组沉积期水体应处于浅水环境。

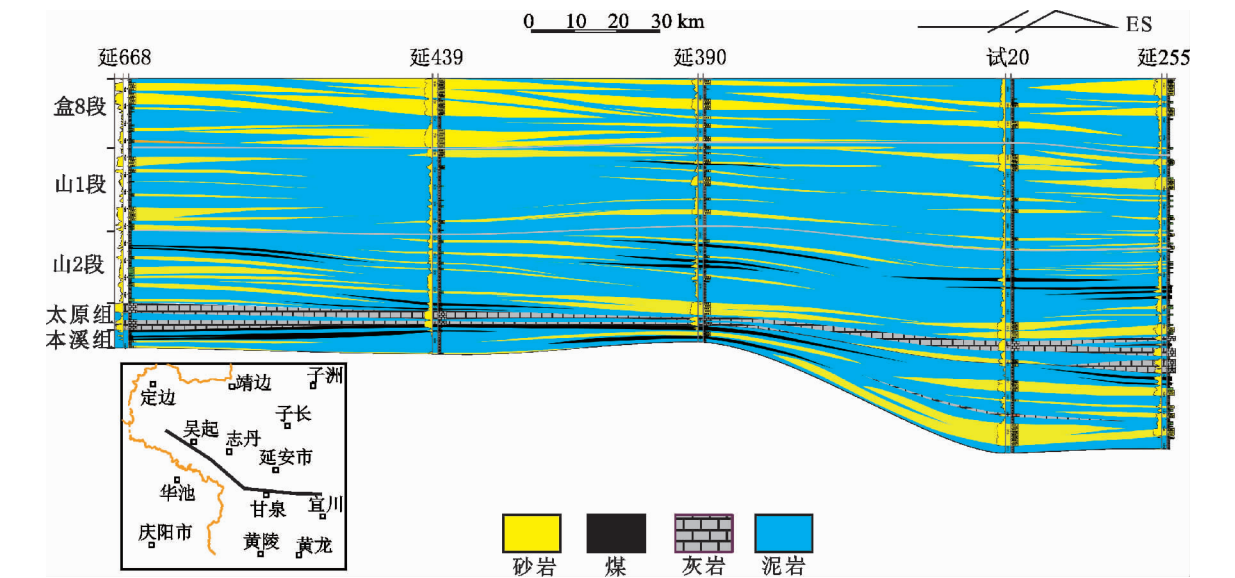


图3 鄂尔多斯盆地东南部延668井-延255井连井岩性剖面图

Fig. 3 Lithology cross-section of well Yan668 to well Yan255 in southeastern Ordos Basin

自生矿物记录了其形成时的自然条件,可间接反映古水深。含铁自生矿物在水深控制的氧化还原条件下呈现出有规律的分布特征:赤铁矿形成于水深0~1 m、褐铁矿水深1~3 m、菱铁矿水深3~15 m,深度大于15 m时则以黄铁矿为主^[24-25]。通过对探井薄片观察统计得出(见表3),鄂尔多斯盆地上古生界含铁自生矿物多以菱铁矿和黄铁矿为主,其中,本溪组砂岩样品中常见黄铁矿,平均含量1.58%,偶见菱铁矿,平均含量0.42%;山西组山2段砂岩样品中黄铁矿含量明

显降低,平均含量0.86%,但菱铁矿含量显著升高,薄片最高含量可达8%,平均含量1.06%;山1段薄片仍以菱铁矿为主,平均含量0.55%,黄铁矿含量极低,平均含量不足0.07%;下石盒子组黄铁矿和菱铁矿含量均较低,菱铁矿(0.35%)含量略高于黄铁矿(0.06%)。从含铁自生矿物的变化规律不难看出,本溪组至下石盒子组处于动荡的水体变化环境中,但黄铁矿逐步减少,菱铁矿相应增加,水体深度逐步变小。

表3 鄂尔多斯盆地东南部本溪组—盒8段含铁矿物组分统计表

Tab. 3 Statistical table of iron-bearing minerals of Benxi Formation-He 8 Member in southeastern Ordos Basin

层位	样品数	菱铁矿		黄铁矿	
		最大值/%	平均值/%	最大值/%	平均值/%
盒8	61	7	0.35	2	0.06
山1	44	11	0.56	1	0.07
山2	23	8	1.06	3	0.86
本溪	12	4	0.42	10	1.58

4.2 微量元素地化特征分析

微量元素 V、Ni、Co、Cr、U 和 Th 等是氧化还原敏感性元素,其富集程度明显受控于沉积环境的氧化还原条件^[26]。而湖底的氧化还原环境主要受水深和水动力条件控制:河流入湖口及滨、浅湖区水体动荡,水深普遍不超过 15 m,湖底处于氧化环境;水深介于 15~25 m 的开放湖域湖底区或水深小于 15 m 的局限湖湾区,其湖底环境则通常表现为弱氧化与弱还原状态的交替或共存;水深大于 25 m 的湖底多位于远离河口的低能带,处于还原-强还原环境^[2,27]。

微量元素的富集程度往往会受到陆源组分、碳酸盐岩含量等影响,因此,仅凭微量元素绝对含量来判断水体的氧化还原条件尚不够精确。相比之下,采用元素的比值作为指标,会相对消除部分影响作用,从而能更好地反映水体的氧化还原条件参数^[15,18],进而推测古水深值。

表 4 微量元素氧化还原环境判断指标^[28-31]

微量元素数据	缺氧环境		富氧环境
	厌氧	贫氧	
V/Cr	>4.25	2.00~4.25	<2
Ni/Co	>5.0	2.5~5.0	<2.5
V/(V+Ni)	0.54~0.72	0.46~0.60	
δU	>1		<1

研究区本溪组一下石盒子组盒 8 段泥岩的微量元素比值统计结果特征如表 5 所示。整体看来,V/Cr 介于 0.38~3.60 之间,Ni/Co 分布在 0.07~15.65 之间,V/(V+Ni) 介于 0.19~0.90 之间,δU 分布于 0.08~1.97 之间。根据上述氧化还原条件判断指标及分析测试结果,V/Cr 值、Ni/Co 值和 δU 值具有较好的相关性,均反应出研究区本溪组一下石盒子组盒 8 段沉积时水体多处于富氧环境,古水深一般小于 15 m,推测沉积环境应位于河流入湖(海)口及水体动荡的滨、浅湖区。但不同层段均有样品处于贫氧环境中,本溪组约 22% (2 个) 的样品特征元素比值指示了贫氧-厌氧环境;山西组山 2 段约有 18% (7 个) 的样品特征元素比值指示了贫氧环境,山 1 段约有 40% (8 个) 的样品指示了贫氧环境;而盒 8 段仅有 1 个样品处于贫氧环境中,也证实了研究区本溪组、山西组及下石盒子组盒 8 段沉积期,水体整体经历了由深变浅的过程。

Krejci-Graf、Jones 和 Manning、Hatch 和 Leventhal 等人的研究认为,V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni) 对氧化还原环境有较好的指示作用,均能够反应古环境的氧化-还原条件^[28-30]。通常,V/Cr < 2 为氧化环境,V/Cr 在 2~4.25 之间为贫氧环境,大于 4.25 为厌氧环境;Ni/Co < 2.5 为氧化环境,Ni/Co 在 2.5~5.0 之间为贫氧环境,大于 5.0 为厌氧环境;V/(V+Ni) ≥ 0.84 时反映硫化静海的环境,V/(V+Ni) 处于 0.54~0.72 时反映非硫化缺氧的环境,处于 0.46~0.60 时反映贫氧的水体环境,但需要指出的是,V/(V+Ni) 比值估算的氧化还原条件往往会偏向还原^[31]。吴朝东等人通过研究 U 和 Th 的相互关系,提出可利用 δU 作为判识缺氧环境的另一指标,其中,δU = U/[0.5 × (Th/3 + U)],δU > 1 为缺氧环境,δU < 1 为正常水体环境^[32]。综上,本次研究采用的氧化还原状态常用的指示标记判断指标见表 4。

延 X 井在山西组山 1 段泥页岩中连续取样 7 点,本井 V/Cr 介于 1.70~2.63 之间,Ni/Co 分布在 1.25~3.23 之间,δU 分布于 0.71~1.24 之间(见图 4),说明了山西组沉积期贫氧-含氧环境频繁变化,古水深多处于小于 25 m 的弱氧化-弱还原环境中,且水进水退频繁,沉积环境快速变迁。

4.3 地球物理学方法

利用泥岩样品测试数据进行古水深分析,只能集中于采样目的层段,不能垂向连续性地分析整套地层的水深变化情况。而自然伽马能谱测井可以获取地层中垂向连续的 U、Th、K 含量。Jones 等人在对北欧地区晚侏罗世的暗色泥质岩研究后发现,Th/U 在 0~2 之间,指示了厌氧的环境,水体相对较深;2~8 之间指示了贫氧环境;大于 8 时指示了富氧的环境,水体相对较浅^[29]。因此,可利用测井中的 Th/U 值间接但连续性地恢复沉积期古水深^[33-34]。

表5 鄂尔多斯盆地东南部本溪组一盒8段微量元素特征比值统计汇总表

Tab.5 Statistical summary of characteristic ratios of trace elements of Benxi Formation-He 8 Member in southeastern Ordos Basin

层位	样品数	统计类型	V/Cr	Ni/Co	V/(V + Ni)	δU	Sr/Cu
盒 8	21	最小值	1.32	0.32	0.55	0.64	2.07
		最大值	2.07	3.13	0.83	0.95	24.46
		平均值	1.67	1.45	0.78	0.78	7.68
山 1	20	最小值	1.53	0.82	0.69	0.71	1.45
		最大值	3.60	4.31	0.90	1.34	13.48
		平均值	2.08	2.30	0.80	0.97	4.68
山 2	41	最小值	0.38	0.07	0.19	0.08	1.04
		最大值	2.67	6.27	0.88	1.97	9.63
		平均值	1.62	1.21	0.71	0.83	5.09
本溪组	9	最小值	1.34	0.18	0.60	0.51	2.70
		最大值	1.64	15.65	0.86	1.08	3.82
		平均值	1.44	3.43	0.73	0.75	3.40

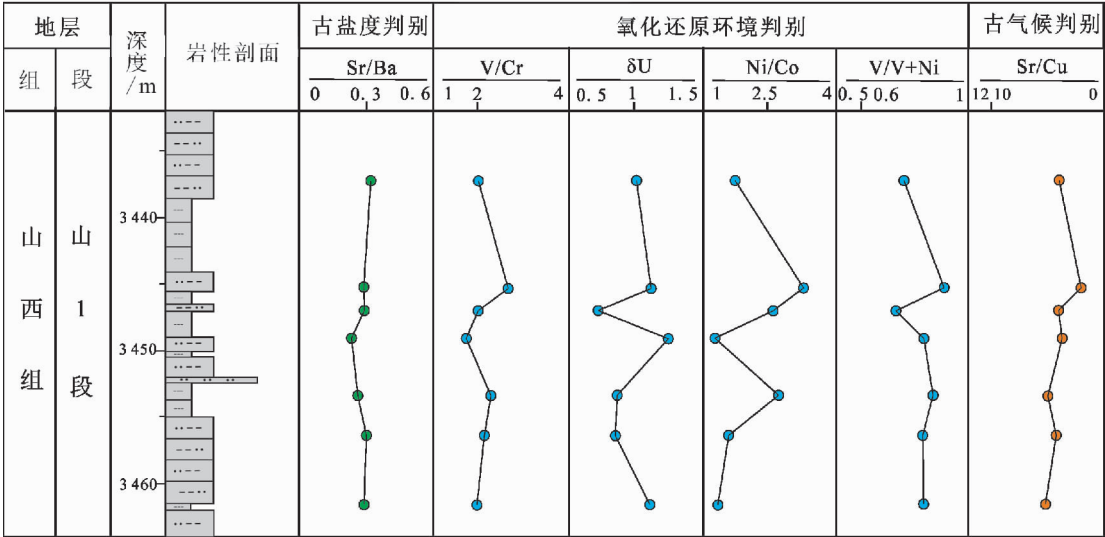


图4 延X井山1段微量元素特征比值变化图

Fig.4 Change map of trace elements characteristic ratios of well Yan X Shan 1 Member

延Y井位于鄂尔多斯盆地东南部延安市境内,本井进行了常规电缆测井,获得了伽马能谱曲线,测井品质较高。通过对本井的Th/U值分析得出,连续测井剖面上Th/U值变化剧烈,分布在0.44~9.1区间内,反应出古水深变化剧烈(见图5)。整体看来,砂岩层段的Th/U值明显高于泥岩层段,反应出砂岩沉积主要发生在浅水环境期间。本溪组Th/U值介于1.24~5.20,大多数测点处于贫氧环境,偶见厌氧环境,推测本溪组沉积物主要形成于15~25 m的开放海(湖)域中;太原组Th/U值最小,介于0.44~4.54,大多数处于厌氧环境,偶见贫氧环境,指示出太原组整体古水深较大,可能往往大于25 m,属具有一定深度的海相环境中;山西组Th/U值介于2.5~9.1,大多数测点处于贫氧环境,并见富氧环境,推测山西组沉积物主要形成于15~25 m的开放海(湖)域中,但砂岩沉积处于水深小于15 m的高能区;盒8段Th/U值介于2.13~8.48,较山西组来看,形成于富氧环境的测点更多,推测盒8段沉积期水深进一步减小。综上所述,Th/U值定量恢复得出

鄂尔多斯盆地上古生界古水深变化剧烈,整体处于低能区-高能区过渡带,由本溪组一下石盒子组盒 8 段水体经历了由浅到深继而又变浅的过程。

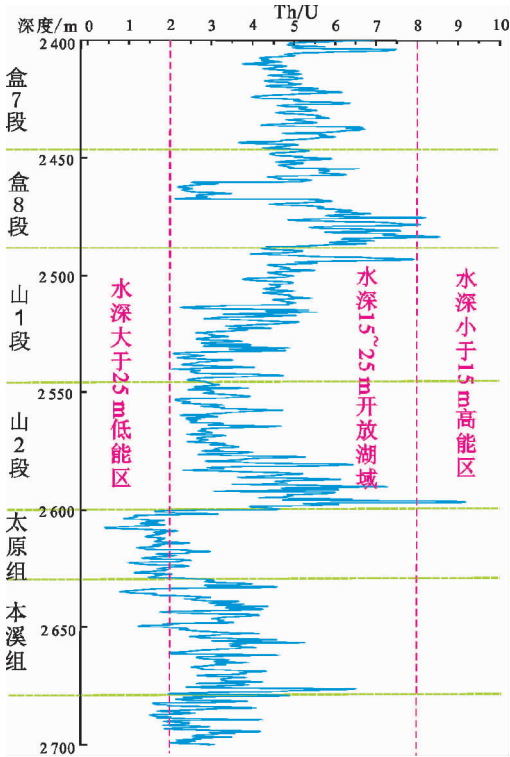


图 5 延 Y 井 Th/U 比值与深度关系图
Fig. 5 Relation between Th/U ratio and depth of well Yan Y

4.4 La-Co 法计算

吴智平等人提出,可以利用湖相泥岩中 La 和 Co 的含量定量计算古水深^[35]。多位学者利用该方法对鄂尔多斯盆地中生界延长组湖盆^[17,36-37]、四川盆地早侏罗世湖盆^[2]的古水深进行了恢复。计算公式如式(1)~(3)。

$$V_s = V_o \frac{N_{Co}}{S_{Co} - tT_{Co}} \tag{1}$$

$$t = S_{La}/N_{La} \tag{2}$$

$$h = C/V_s^{3/2} \tag{3}$$

式(1)中: V_s 为样品沉积时的沉积速率(单位 m/Ma); V_o 为正常环境的沉积速率(m/Ma),湖相泥岩沉积速率一般介于 $0.2 \times 10^3 \sim 0.3 \times 10^3$ m/Ma (本次取值 0.3×10^3 m/Ma); N_{Co} 为正常湖泊沉积物中 Co 的平均值($20 \mu\text{g/g}$); S_{Co} 为实测样品 Co 丰度($\mu\text{g/g}$); T_{Co} 为陆源碎屑岩中 Co 的平均值($4.68 \mu\text{g/g}$); t 表示陆源 Co 对样品的影响,可由式(2)计算出。式(2)中: S_{La} ($\mu\text{g/g}$)表示实测样品中 La 的丰度; N_{La} 为陆源碎屑岩中 La 的平均值($38.99 \mu\text{g/g}$)。式(3)中: h 为古水深(单位 m);

C 为常数(3.05×10^5)。

计算结果显示,研究区古水深变化范围较大,分布范围 0.1~72.2 m,平均 23.6 m,表明研究区晚石炭世至中二叠世水深变化频繁,但绝大多数泥岩形成于小于 25 m 的水深环境中。垂向上由本溪组、山西组至下石盒子组盒 8 段计算得出的古水深平均值逐步变低(见表 6),且形成于大于 25 m 古水深泥岩样品数量占比逐步减少,而小于 15 m 泥岩样品数量稳步提升(见图 6),指示出水体逐步由深变浅的过程,对应了上古生界海水逐步退出鄂尔多斯地区,研究区经历了由海至陆的沉积演化。

表 6 鄂尔多斯盆地东南部本溪组一盒 8 段 La-Co 法古水深计算结果统计表

Tab. 6 Statistical table of poleo-water depth calculation results calculated by La-Co method of Benxi Formation-He 8 Member in southeastern Ordos Basin

古水深计算	盒 8 段	山 1 段	山 2 段	本溪组
最小值/m	0.1	1.0	0.3	7.4
最大值/m	57.1	57.0	72.2	66.0
平均值/m	20.7	20.4	24.9	31.8

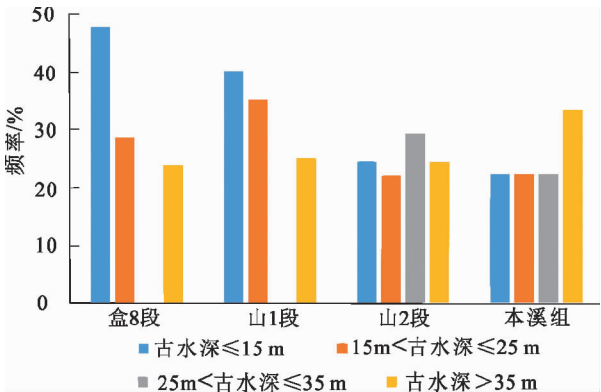


图 6 本溪组-盒 8 段 La-Co 法计算古水深样品结果分布直方图

Fig. 6 Histogram of distribution of paleo-water depth samples calculated by La-Co method of Benxi Formation-He 8 Member

朱筱敏等人以湖浪波长的 1/2 作为浅水区的下限深度,认为陆相湖盆浅水三角洲沉积水深不超过 15 m^[38];杨华等人通过对湖相生物相带的恢复,认为浅湖古水深应在 15~35 m^[39]。结合薛叔浩等人对湖底氧化-还原环境的分析^[27],本研究认为有河流注入的陆相浅水三角洲古水深应在 25 m 以内。而本次利用 La-Co 法计算得出约有 41% (37 个)样品古水深大于 25 m,25% (23

个)的样品古水深大于 35 m(见图 6)。古水深大于 25 m 样品多集中于山 2 段与本溪组。前已述及,根据沉积构造、自生铁矿物组合及微量元素分析均认为研究区在本溪组、山西组沉积期水体应处于不大于 25 m 的浅水环境中,而 La-Co 法计算古水深结果与已得出结论存在一定矛盾,可能与微量元素的丰度同时受到母岩类型和沉积-成岩环境双重控制作用相关,同时,La-Co 法对古水深的恢复结果还受到沉积速率赋值的影响^[2],但其计算得出的各层位古水深变化趋势仍具有较高的可参考性。

5 古气候分析

多位学者研究表明,沉积物中微量元素受古气候影响,不同的元素在特定的环境中可以保存下来^[40-42]。可利用喜干型元素 Sr 和喜湿型元素 Cu 的比值作为对古气候变化研究的参数,通常 Sr/Cu 比值小于 10 指示温湿气候,大于 10 指示干热气候^[41-43]。

通过对本次研究的样品分析表明(表 1、5),鄂尔多斯盆地东南部上古生界 Sr/Cu 值均介于 1.04 ~ 24.46 之间,自本溪组—山西组—下石盒子组盒 8 段,Sr/Cu 值总体上为逐渐增大的变化趋势。本溪组和山西组山 2 段所有样品 Sr/Cu 均小于 10,山 1 段有 2 个样品值大于 10,盒 8 段亦有 2 个样品值大于 10,且最高值显著高于其余层位。Sr/Cu 值指示出本溪组—石盒子组盒 8 沉积时期,研究区总体处于温湿的气候环境下,但有逐渐由湿润趋于干燥的演化趋势。

Sr/Cu 值指示的古气候环境与岩石学特征也具有较好的对应性。本溪组沉积是一套陆表海沉积^[6,9],泥岩颜色多为灰黑-深灰色,黄铁矿发育,云母含量低,指示出还原性沉积环境;研究区东部地区灰岩发育,说明该沉积时期气候温暖潮湿。山西组发育一套海陆交互相的含煤岩系地层,煤层广布,泥岩颜色为深灰色-灰黑色,富含植物茎秆化石,部分已碳化,黄铁矿发育,指示出还原性沉积环境,古气候温暖湿润,沼泽相发育。山 1 段泥岩颜色仍以深色为主,但不再发育区域性的厚煤层,仅见较薄的煤线,黄铁矿含量显著降低,指示古气候开始由温暖湿润向季节性干旱过渡。进入下石盒子组盒 8 段,泥炭沼泽不再持久发育,仅在局部地区见零星煤线;泥岩颜色逐渐转变为深

灰绿色为主,但亦可见浅灰、浅灰绿色泥岩;植物化石发育,但多为碎片状,指示古气候有逐步趋于干燥的演化趋势。

6 结论

1)综合水体动力、古盐度、古水深及古气候分析认为,鄂尔多斯盆地东南部晚石炭世—早、中二叠世沉积期处于混合水-淡水环境,以淡水环境为主;岩性组合、典型自生矿物、V/Cr、Ni/Co、V/(V + Ni)、 δU 及自然伽马能谱测井资料定性及半定量判别表明,研究区主体为富氧浅水环境;结合 La-Co 法定量判别认为古水深频繁变化,整体处于浅水环境中,虽然部分 La-Co 法定量计算得出的古水深与沉积亚相存在一定矛盾,但计算得出的古水深变化趋势仍具有较高的可参考性;Sr/Cu 值和岩石学特征均指示出研究区属温湿的古气候。

2)由晚石炭世本溪组到中二叠世下石盒子组盒 8 段,鄂尔多斯盆地东南部水体盐度逐步降低,水体深度稳步下降,古气候由湿润趋于干燥。泥岩多形成于浅海-浅湖转变过程中,指示出鄂尔多斯盆地东南部经历了由近海湖盆至内陆湖盆的沉积演化过程。

3)通过定性、半定量及定量地分析鄂尔多斯盆地东南部晚石炭世本溪组至中二叠世下石盒子组盒 8 段的沉积水动力特征、水体盐度和古水深特征,明确了本溪期至盒 8 期沉积水介质条件和古气候特征,有助于准确地恢复沉积期岩相古地理,进而为致密气、页岩气等非常规气藏勘探开发过程中的烃源岩及储集层基本参数的获取提供可靠的基础地质依据,具有重要的理论和实际意义。

参考文献

[1] 王岚,周海燕,毕赫,等. 松辽盆地北部青山口组黑色页岩的地质特征与海水侵入的成因模式 [J]. 西北大学学报(自然科学版),2022,52(4): 725-736.
WANG L, ZHOU H Y, BI H, et al. Geological characteristics of black shale of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin and genetic model of marion transgression [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(4): 725-736.
[2] 王昌勇,常玖,李楠,等. 四川盆地东部地区早侏罗世湖泊古水深恢复[J]. 沉积学报,2024,42(1):

- 158-170.
- WANG C Y, CHANG J, LI N, et al. Paleo-water-depth reconstruction of Early Jurassic Lakes in the eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(1): 158-170.
- [3] 高宏霞, 刘晓东, 刘平辉, 等. 巴音戈壁盆地巴音戈壁组上段古盐度恢复及意义[J]. *高校地质学报*, 2022, 28(4): 539-553.
- GAO H X, LIU X D, LIU P H, et al. Paleosalinity characteristics and geological significance of the Upper Bayingobi Formation in Yingjing Depression, Bayingobi Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(4): 539-553.
- [4] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 1-25.
- LI M W, MA X X, JIN Z J, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 1-25.
- [5] 王晓梅, 张水昌, 何坤, 等. 最小含氧带和硫化环境控制 14 亿年前有机质生烃能力[J]. *科学通报*, 2021, 66(23): 3005-3017.
- WANG X M, ZHANG S C, HE K, et al. OMZ and euxinic sulfidic environments dominating hydrocarbon generation poential of organic matter 1.4 billion years ago[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(23): 3005-3017.
- [6] 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]. *古地理学报*, 2021, 23(1): 39-52.
- LI W H, ZHANG Q, LI K Y, et al. Deposition evolution of the late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. *Jounal of Palaeogeography*, 2021, 23(1): 39-52.
- [7] 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]. *古地理学报*, 2017, 19(6): 935-954.
- YU X H, WANG X Z, WANG N X, et al. Sequence stratigraphie framework and sedimentary evolution characteristics of gas-bearing sand bodies of Upper Paleozoic in southeastern Ordos Basin [J]. *Jounal of Palaeogeography*, 2017, 19(6): 935-954.
- [8] 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 charae-teristics and distribution of barrier coast of Benxi Formation in southeastem Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(9): 48-56.
- [9] 王若谷, 周进松, 杜永慧, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延安气田石炭系—二叠系沉积演化模式[J]. *地质科学*, 2021, 56(4): 1088-1105.
- WANG R G, ZHOU J S, DU Y H, et al. Sedimentary evolution model of Carboniferous-Permian in Yan'an gas field in southeastern Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(4): 1088-1105.
- [10] 师展, 赵靖舟, 孙雄伟, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤系烃源岩特征及生烃潜力评价[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(9): 1612-1626.
- SHI Z, ZHAO J Z, SUN X W, et al. Characteristics and hydrocarbon generation potential of Upper Paleozoic coal measure source rocks in the southeastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(9): 1612-1626.
- [11] 聂万才, 白玉奇, 冯敏, 等. 鄂尔多斯盆地东南部气田上古生界致密砂岩气藏气源对比[J]. *沉积与特提斯地质*, 2021, 41(1): 82-87.
- NIE W C, BAI Y Q, FENG M, et al. Sources of tight sandstone gas and its migration in the Upper Paleozoic, Yan'an Gasfield [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021, 41(1): 82-87.
- [12] 秦晓艳, 林进, 武富礼. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组致密石英砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(4): 579-584.
- QIN X Y, LIN J, WU F L. Diagenesis and porosity evolution of tight quartz sandstones in Benxi Formation, Southeast Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(4): 579-584.
- [13] 孟祥振, 宋明, 蒲仁海, 等. 甘泉—富县地区本溪组气藏控制因素和有利成藏区预测[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(3): 466-479.
- MENG X Z, SONG M, PU R H, et al. Control factors and prediction of favorable accumulation areas for Benxi Formation gas reservoirs in Fuxian to Ganquan County [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(3): 466-479.
- [14] 张雷, 赵靖华, 侯伟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘山西组山₂³亚段泥页岩地球化学特征与沉积环境[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(2): 181-193.
- ZHANG L, ZHAO P H, HOU W, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of mud-shale in Shan₂³ sub-member of Shanxi Formation, eastern margin of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geosci-*

- ence, 2023, 34(2): 181-193.
- [15] 田景春,陈高武,张翔,等. 沉积地球化学在层序地层分析中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 30-35.
- TIAN J C, CHEN G W, ZHANG X, et al. Application of sedimentary geochemistry in the analysis of sequence stratigraphy[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2006, 33(1): 30-35.
- [16] 田景春,张翔. 沉积地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2016:63-77.
- [17] 范萌萌,卜军,赵筱艳,等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 633-642.
- FAN M M, BU J, ZHAO X Y, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 633-642.
- [18] 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): 307-310.
- LIU G, ZHOU D S. Application of microelements analysis in identify sedimentary environment: Taking Qianjiang Formation in the Jiangnan Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 307-310.
- [19] 孙娇鹏,陈世悦,彭渊,等. 青海德令哈盆地石炭纪古环境研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 26(2): 30-37.
- SUN J P, CHEN S Y, PENG Y, et al. Palaeoenvironments of the Delingha Basin in Qinghai during the Carboniferous[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2016, 36(2): 30-37.
- [20] 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): 22-25.
- ZHENG R C, LIU M Q. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 22-25.
- [21] 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 L M, QI T J, PENG H Y. Depositional environment analysis of Shanxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 202-210.
- [22] 王香增,周进松. 鄂尔多斯盆地东南部下二叠统山西组二段物源体系及沉积演化模式[J]. 天然气工业, 2017, 37(11): 9-17.
- WANG X Z, ZHOU J S. Provenance system and sedimentary evolution model of the second member of Lower Permian Shanxi Fm in the southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(11): 9-17.
- [23] 刘宝珺,曾允孚. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京:地质出版社, 1985:222-224.
- [24] 庞军刚,杨友运,郝磊. 湖盆古水深恢复研究现状综述[J]. 长江大学学报(自然版)理工卷, 2012, 9(9): 42-45.
- PANG J G, YANG Y Y, HAO L. Summary of research status of ancient water depth restoration in lake Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) Science & Engineering, 2012, 9(9): 42-45.
- [25] 王成善,李祥辉. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2003: 136-145.
- [26] RUSSELL A D, MORFORD J L. The behavior of redox-sensitive metals across a laminated-massive-laminated transition in Saanich Inlet, British Columbia[J]. Marine Geology, 2001, 174(1/2/3/4): 341-354.
- [27] 薛叔浩,刘雯林,薛良清,等. 湖盆沉积地质与油气勘探[M]. 北京:石油工业出版社, 2002:62-65.
- [28] KREJCI-GRAF K. Geochemical facies of sediments[J]. Soil Science, 1975, 119(1): 20-23.
- [29] 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(1/2/3/4): 111-129.
- [30] 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, U. S. A. [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/2/3): 65-82.
- [31] ALGEO T J, MAYNARD J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. Chemical Geology, 2004, 206(3/4): 289-318.
- [32] 吴朝东,杨承运,陈其英. 湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(1): 26-39.
- WU C D, YANG C Y, CHEN Q Y. The origin and geochemical characteristics of upper sinian lower cambrian black shales in western Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(1): 26-39.
- [33] 陈中红,查明. 铀曲线在沉积盆地古环境反演中的

- 应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 11-15.
- CHEN Z H, ZHA M. Application of uranium curve to paleoenvironment inversion in sedimentary Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(6): 11-15.
- [34] 贺轲. 利用 Th/U 比值曲线研究沉积环境古水深变化[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(S1): 230.
- HE K. Th/U ratios curve was used to study sedimentary environment of water depth change[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 33(S1): 230.
- [35] 吴智平, 周瑶琪. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 395-399.
- WU Z P, ZHOU Y Q. Using the characteristic elements from meteoritic must in strata to calculate sedimentation rate [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 395-399.
- [36] 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 C L, GAO A L, LIU Z, 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.
- [37] 傅强, 徐铮, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地延长组遗迹化石组合与古环境[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 695-700.
- FU Q, XU Z, YAO J L, et al. Geological of trace fossil environment assemblage in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of Tongji university (Natural Science), 2018, 46(5): 695-700.
- [38] 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 7-14.
- ZHU X M, PAN R, ZHAO D N, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine Basin and typical case analyses[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 7-14.
- [39] 杨华, 傅强, 齐亚林, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期古湖盆生物相带划分及地质意义[J]. 沉积学报, 2016, 34(4): 688-693.
- YANG H, FU Q, QI Y L, et al. The paleontology phase zones and its geological significance on the Late Triassic Yanchang Stage Palaeo-lacustrine Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(4): 688-693.
- [40] 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.
- [41] 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 T F, SUN L X, ZHANG Y, 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 Geological Sinica, 2016, 90(12): 3454-3472.
- [42] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用: 以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 382-389.
- FAN Y H, QU H J, WANG H, et al. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: A case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 382-389.
- [43] 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 W J, XIAO C T, XIAO K, 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.

(编辑 李 静)