

鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长4+5段 沉积期古环境条件及意义

刘鑫^{1,2,3)}, 尚婷⁴⁾, 田景春¹⁾, 王峰¹⁾, 刘宝珺¹⁾, 张晓磊^{2,3)}, 徐智^{2,3)}

1) 成都理工大学, 四川成都, 610059;

2) 中国石油长庆油田分公司低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安, 710018;

3) 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安, 710018;

4) 东华理工大学, 核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌, 330013

内容提要:以鄂尔多斯盆地镇北地区三叠系延长组长4+5段为研究对象,通过野外露头剖面、钻井岩芯共47块泥岩样品的微量元素、稀土元素地球化学分析,运用Sr/Ba、Th/U、Rb/K、硼(B)法,钴(Co)法、 $\delta U/V/(V+Ni)$ 、 V/Cr 、 Ni/Co 、 Ce/Ce^* 、 Eu/Eu^* 、 Sr/Cu 、 Mg/Ca 等相关元素比值,定性、定量对长4+5段沉积期的古盐度、古温度、古水深、古气候及古氧化-还原条件进行了判识。结果表明,长4+5段沉积期古气温介于14.5~24.6℃之间,为半潮湿—半干燥的温带—亚热带气候;古盐度为陆相微咸水环境,介于0.50‰~3.78‰之间;古水温为8.9~11.9℃;古水深介于10~85 m之间;沉积物形成于弱还原—氧化条件。相对于延长组长7段沉积期来说,长4+5段尽管发育暗色泥岩,但由于环境条件的明显改变,气温升高致使水温增加,水体盐度增大,最终影响有机质发育和保存,不利于该段有效烃源岩的形成。

关键词:古环境;镇北地区;延长组;鄂尔多斯盆地

对鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长4+5油层组的勘探一直以来未被重视,直到近年,随着勘探的不断向西推进,在该区获得了一系列新发现,先后在太白梁、樊家川进行钻探发现工业油流,并提交了探明储量,由于该区处在天环坳陷附近,而长4+5油藏埋藏又相对较浅,在低油价、低渗透背景下,是重要的勘探接替层位。前人对鄂尔多斯盆地长4+5油层组的研究工作相对于其他主力勘探层位较少,多数研究集中于姬塬、华庆及陕北地区(Liu Ling et al., 2010; Ma Xinbo et al., 2011; Dai Zhenlong et al., 2012; Bai Fenfei et al., 2014; Zhou Yao et al., 2014),在该区研究程度相对较低,仅有沉积相、储层特征、演化等方面的研究(Hu Xiaoyu et al., 2014; Zhu Tong et al., 2015; Zheng Qinghua et al., 2015, 2019; Li Cheng et al., 2015; Liu Xin et al.,

2015),远不能满足精细勘探的需求。

古环境条件恢复对于认识沉积体系发育特征具有重要的意义,但针对该地区的古环境条件及古环境意义方面的研究尚未见报道,因此笔者利用元素地球化学方法对长4+5段古气候、古盐度、古水深、古温度、古氧化还原条件进行判识,定性、定量分析了延长组长4+5段的沉积环境介质条件演化特征,为进一步认识研究区长4+5段沉积演化提供科学依据和理论支撑。

1 地质背景

研究区位于鄂尔多斯盆地西南部,北起耿湾,南至镇原,西抵三岔,东达庆城,面积约 1.0×10^4 km²,区域构造上横跨天环坳陷东部、陕北斜坡2个构造单元(图1a、b),构造相对稳定(Yang Junjie et

注:本文为国家科技重大专项(编号2016ZX05050、2017ZX05001002-008)、中国石油天然气股份有限公司科技重大专项(编号2016E-0501)联合资助的成果。

收稿日期:2020-04-08;改回日期:2020-05-11;网络发表日期:2021-01-14;责任编辑:邱楠生;责任编辑:李曼。

作者简介:刘鑫,男,1982年生。博士生,高级工程师,从事石油地质学和沉积学研究。E-mail:19019273@qq.com。通讯作者:田景春,男,1963年生。教授,博士生导师,从事沉积学的教学与科研工作。E-mail:tjc@cdut.edu.cn。

引用本文:刘鑫,尚婷,田景春,王峰,刘宝珺,张晓磊,徐智. 2021. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长4+5段沉积期古环境条件及意义. 地质学报, 95(11): 3501~3518. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021099.
Liu Xin, Shang Ting, Tian Jingchun, Wang Feng, Liu Baojun, Zhang Xiaolei, Xu Zhi. 2021. Paleo-sedimentary environmental conditions and its significance of Chang 4+5 Member of Triassic Yanchang Formation in the Zhenbei area, Ordos basin, NW China. Acta Geologica Sinica, 95(11): 3501~3518.

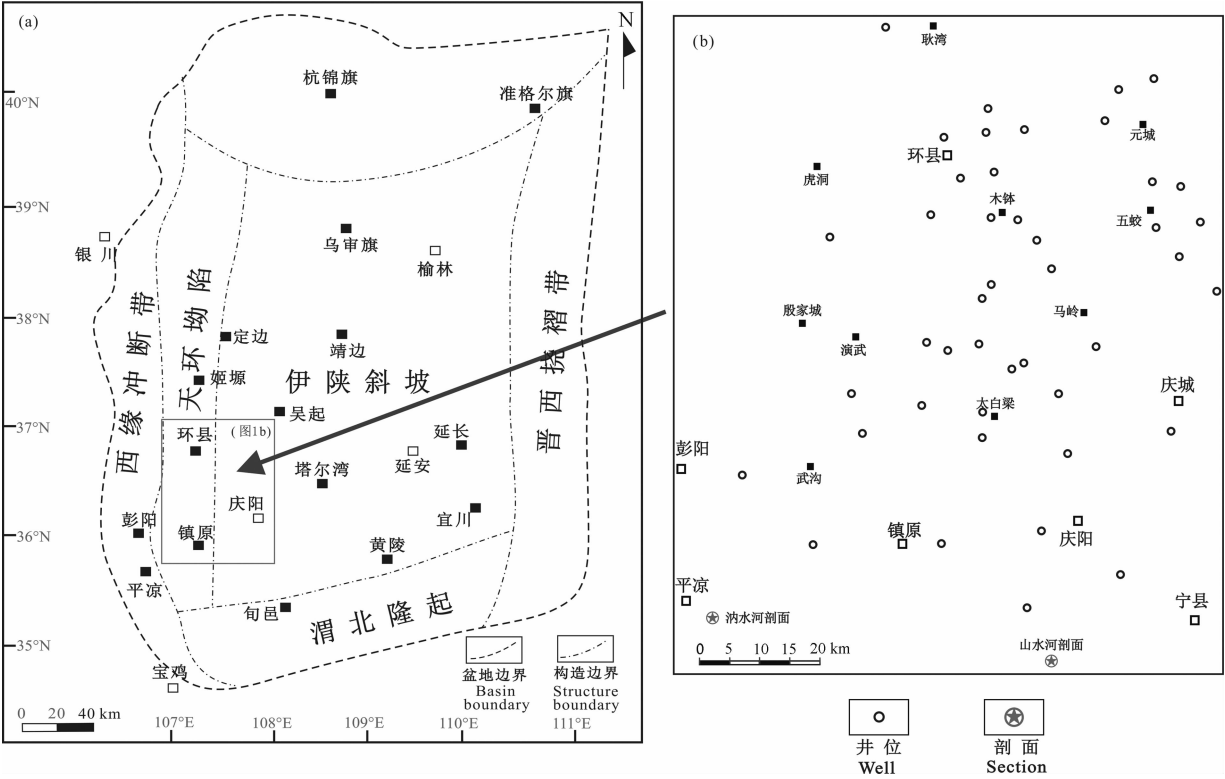


图 1 鄂尔多斯盆地地质构造及研究区位置图

Fig. 1 Structural elements and study area in the Ordos basin, NW China

(a)—区域构造;(b)—样品采集井位

(a)—Tectonic elements of the study area; (b)—locations of sampling wells

al., 2002; He Zixin, 2003)。勘探的主力层位是中生界三叠系延长组、侏罗系延安组,其中延长组自下往上可划分为 10 个油层组,长 4+5 油层组位于延长组中部,又可细分为长 4+5₁和长 4+5₂两个小层(图 2a),岩性主要以深灰色、灰黑色泥岩夹深灰色、灰色薄层粉砂岩、细砂岩为主,厚度 80~90 m (Hu Xiaoyu et al., 2014; Liu Xin et al., 2015; Zheng Qinghua et al., 2015)。受控于西南物源的影响,沉积物供给稳定,发育辫状河三角洲相沉积 (Liu Xin et al., 2015; Zheng Qinghua et al., 2019)。由于湖平面多期短暂频繁变化 (Li Wenhong et al., 2009; Zhu Tong, 2015),砂体厚度相对较薄,单层大多为 5~8 m,河道规模相对较小,宽度约 4~6 km,储集砂体主要为三角洲平原及前缘的水下分流河道砂、河口坝砂和半深湖-深湖的浊积砂 (图 2b~d)。

2 样品采集及分析方法

针对鄂尔多斯盆地西南部晚三叠世延长组长 4+5 段沉积分布特点,重点在盆地西南缘 2 条延长

组露头剖面 and 盆地内探井,共取样 47 块(剖面和井位置见图 1b),对泥岩样品进行地球化学元素测试分析,主量和微量元素在成都理工大学油气藏国家重点实验室用 X 荧光光谱仪和电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测试完成,仪器精密度优于 5%,标样结果与推荐值相对误差小于 10%。硼元素在中国地质科学院成都矿产综合利用研究所分析测试中心用 2000DV 型电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定。

选取主量和微量元素的比值等适用性方法对长 4+5 段沉积期古环境进行恢复,在盆地延长组已恢复古环境背景上 (Zheng Rongcai et al., 1999; Zhang Caili et al., 2011; Fan Yuhai et al., 2012; Xin Bushe et al., 2013; Fu Jinhua et al., 2018),利用常量、微量及稀土元素等指标,对长 4+5 段沉积期古盐度、古水深、古还原氧化性及古气候进行定性、半定量及定量分析,以期更加系统地恢复盆地西南部长 4+5 段古沉积环境,同时,通过分析长 4+5 段各小段的沉积环境变化规律,反演沉积期的地质条件,旨在认识环境演化对长 4+5 段沉积体系的影响。

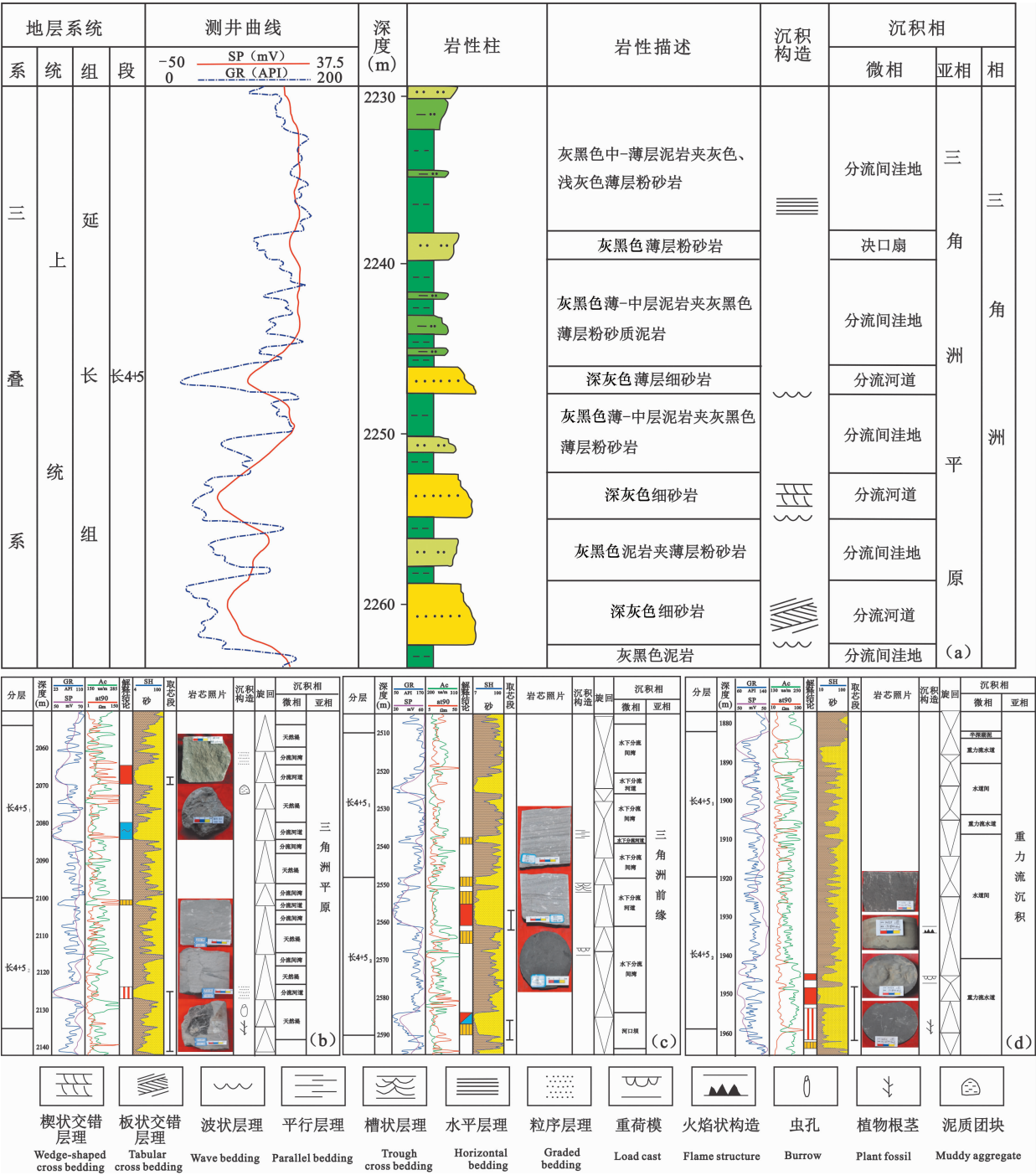


图 2 鄂尔多斯盆地西南部延长组长 4+5 段地层柱状图(a)及单井沉积相图(b~d)
Fig.2 Generalized stratigraphic column (a) and single well sedimentary facies (b~d)
of Chang 4+5 Member of Yanchang Formation in the southwest Ordos basin

3 长 4+5 段沉积期古环境条件研究

3.1 环境古盐度条件

关于古盐度的判别方法较多,从最早的古生物、岩矿和古地理资料定性描述(Deng Hongwen et al., 1993),发展到主、微量元素地球化学方法半定量划分(Wang Minfang et al., 2005, 2006; Xu Jing

et al., 2010; Tian Jingchun, 2016; Feng Qiao et al., 2018; Bai Wenhua et al., 2019),直至应用孔隙流体或液相包裹体直接测量以及应用沉积磷酸盐或硼元素和黏土矿物资料定量计算古盐度等方法(Zheng Rongcai et al., 1999; You Haitao et al., 2002; Li Jinlong, 2003; Wen Huaguo et al., 2008; Liang Xiaowei et al., 2012),其中硼(B)法及微量

元素比值法是目前最常应用的方法,本文采用泥岩样品微量元素比值、沃克法和亚当斯法进行古盐度定性、定量综合判别。

3.1.1 微量元素比值

(1)Sr/Ba 比值是古盐度定性判识的常用手段,根据前人的研究(Li Chengfeng et al. , 1988; Wang Feng et al. , 2017),当水体盐度增加, Ba 优先以 BaSO₄ 沉淀,造成了 Sr/Ba 值与盐度的正相关, Sr/Ba 比值大于 1 时,为咸水(海相)环境,比值介于 0.6 ~ 1 之间,为半咸水(海陆过渡相)环境,小于 0.6 时,为淡水(陆相)环境。研究区延长组长 4+5 段泥岩样品 Sr/Ba 值为 0.19 ~ 0.62 (表 1),平均值为 0.35,小于 0.6,为陆相淡水环境。

(2)Th、U 为放射性变价元素,Th 一般不受水体氧化-还原状态影响,而 U 在氧化条件下以 U⁶⁺ 高价态易迁移,在强还原条件下则以低价态沉淀造成沉积物中 U 富集,因此利用 Th/U 值不但可以区分氧化还原环境,还可用来判识海陆相沉积(Zhang Wenzheng et al. , 2008; Fu Jinhua et al. , 2018), Th/U 值大于 7 为陆相淡水环境,2~7 为陆相微咸水-半咸水沉积环境,小于 2 为海相咸水环境。长 4+5 段 Th/U 值主要分布在 3.38~8.35 之间,平均值为 5.02(表 1),主要分布的区间 4~6,可以看出沉积水体大背景为陆相微咸水环境。

(3)Rb/K 也是古盐度定性的一个常用指标(Feng Qiao et al. , 2018; Fu Jinhua et al. , 2018; Ye Liming et al. , 2008)。K 主要与泥岩中黏土矿物含量相关,而 Rb 更易被黏土和有机质吸附,随着盐度增加,吸附程度越强,造成 Rb 含量的增加,而相应的 Rb/K 亦增大(Wen Huaguo et al. , 2008),因 Rb 与 K 元素测试结果单位不同,常用 1000×Rb/K 替代:大于 6 为海相咸水沉积环境,4~6 为微咸水沉积环境,小于 4 为陆相淡水沉积环境(Feng Qiao et al. , 2018; Fu Jinhua et al. , 2018)。长 4+5 段 1000×Rb/K 值为 1.71~6.54,平均值 3.37(表 1),与之前元素组合指示为陆相微咸水—淡水环境。

3.1.2 硼法(沃克、亚当斯法和科奇法)

硼(B)元素常被用来指示古盐度,主要被沉积物中黏土矿物吸收固定,其对盐度的反应比较敏感,即水体盐度越高,沉积物吸附的 B 离子就越多(Couch, 1971)。一般来说,B 元素主要存在于海水环境,含量为 0.0080%~0.0125%,而淡水不含或含极少量的 B,一般小于 0.0060%(Fu Jinhua et

al. , 2018)。延长组长 4+5 段 B 元素含量主要分布于 0.0068%~0.0089% 之间(表 2),平均值为 0.0078%,表明长 4+5 段水体为微咸水—淡水性质。Walker(1963,1968)提出了应用硼元素的校正法即“相当硼”法,其原理是利用硼和钾含量作出一系列换算曲线,再由计算出泥岩 K₂O 的含量和校正硼含量,即可在换算曲线上找到对应的“相当硼”含量。该方法通过对“相当硼”的计算来进行古水体盐度的半定量判识,即“相当硼”小于 200×10⁻⁶ 为淡水、200×10⁻⁶~300×10⁻⁶ 为半咸水、300×10⁻⁶~400×10⁻⁶ 为正常海水、大于 400×10⁻⁶ 为咸水或超咸水。1965 年,亚当斯又根据现代英国多维河口沉积,提出古盐度计算公式: $S_p = 0.0977x - 7.043$, x 为“相当硼”含量(Adams et al. , 1965)。根据样品数据得出“相当硼”含量为 0.0148%~0.0198%(表 2),均小于 200×10⁻⁶,定性判识为淡水,但通过亚当斯公式计算出古盐度值相当大(7.42‰~12.3‰),为淡水—微咸水性质。因该算法要求黏土矿物单一,而 K₂O 仅赋存于伊利石,一般计算结果偏高,若样品含有一定量的高岭石或蒙脱石时,则古盐度存在偏差。

根据研究区延长组长 4+5 段储层特征分析(Liu Xin et al. , 2015; Zheng Qinghua et al. , 2015),研究区黏土矿物中除伊利石外还有高岭石和伊蒙混层,利用科奇(Couch)公式计算应更接近实际,科奇公式适用的盐度范围更大(1‰~35‰)且更适合陆相地层(Li Chengfeng et al. , 1988; Zheng Rongcai et al. , 1999),其表达式为: $\log B_k = 1.28\log S_p + 0.11$,式中 B_k 为高岭石校正硼含量,由 $B/(4X_i + 2X_m + X_k)$ 计算得出,其中 B 为实测硼含量, X_i 为实测伊利石含量, X_m 为实测蒙脱石含量, X_k 为实测高岭石含量(Li Jinlong et al. , 2003; Tian Jingchun, 2016),由于存在伊蒙混层黏土,计算时必须进行校正,求出独立的蒙脱石组分。计算结果表明,样品古盐度变化范围较小,为 1.83‰~3.43‰,平均值为 2.60‰(表 2),较亚当斯公式计算结果数值显著减少,水体性质为微咸水。

同时分析黏土矿物中注意到研究区含有相当比例的绿泥石矿物,又选用了 Li Baoli(1995)提出的修正公式,其在计算沉积物伊利石硼含量中引入了绿泥石的含量,公式为 $\log S_p = (\log B_i - 2.0272)/0.242$,式中 B_i 为伊利石校正硼含量,由 $B/(i + 0.5m + 0.5Ch + 0.25k)$ 计算得出,其中 B 为实测硼含量, i 为实测伊利石含量, m 为实测蒙脱石含量,

表 1 鄂尔多斯盆地西南部延长组长 4+5 段元素地球化学分析及比值

Table 1 Element geochemical analysis and calculation ratio table of Chang 4+5 Member of Yanchang Formation in the southwest Ordos basin

样品	层位	岩性	10 ⁻⁶														K ₂ O (%)	Sr/Ba	Th/U	Rb/K	δU	U/Th	V/ (V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	Ce/Ce*	Eu/Eu*
			Rb	Sr	Zr	Cu	Ba	Th	U	V	Ni	Cr	Co	Ce	Eu												
B102	长 4+5 ₁	泥岩	78.3	415	196	25.3	946	9.07	2.09	79.6	42.6	334	15.5	77.6	1.56	0.037	0.44	4.34	2.12	0.82	0.23	0.65	0.24	2.75	1.04	1.39	
B412		泥岩	89.1	353	244	22.3	1155	7.50	2.22	70	29	117	14.3	69.1	1.40	0.033	0.31	3.38	2.70	0.94	0.30	0.71	0.60	2.04	1.04	1.44	
B498		泥岩	183	211	206	62.7	599	17.6	3.86	101	48	218	22.6	131	1.46	0.040	0.35	4.57	4.58	0.79	0.22	0.68	0.46	2.12	1.40	1.11	
B516		泥岩	213	76.0	191	39.9	374	17.0	2.73	117	37	114	20.9	146	1.55	0.036	0.20	6.22	6.01	0.65	0.16	0.76	1.03	1.77	1.39	1.01	
C107		泥岩	87.6	120	573	19.9	418	14.3	2.74	61.7	34.3	349	11.5	68.4	1.06	0.030	0.29	5.23	2.94	0.73	0.19	0.64	0.18	2.99	1.04	1.05	
CH67		泥岩	55.3	287	242	11.1	461	10.1	2.03	65.9	24.1	83.4	11.0	77.0	1.36	0.020	0.62	4.96	2.77	0.75	0.20	0.73	0.79	2.20	1.06	1.24	
HU10		泥岩	46.6	103	92.5	13.1	247	5.30	1.02	31.5	21.2	824	6.09	32.6	0.59	0.024	0.42	5.20	1.94	0.73	0.19	0.60	0.04	3.47	1.04	1.21	
H189		泥岩	143	310	388	31.7	663	15.4	3.02	98.9	39.4	172	17.6	126	1.44	0.033	0.47	5.10	4.41	0.74	0.20	0.72	0.58	2.23	1.44	1.06	
H23		泥岩	62.6	129	258	12.5	331	9.09	1.71	9.09	1.71	75.9	8.58	50.1	0.81	0.021	0.39	5.32	2.98	0.72	0.19	0.74	0.63	1.98	1.02	1.08	
H315		泥岩	72.6	228	203	21.6	472	11.3	2.25	11.3	2.25	309	12.1	66.5	1.12	0.024	0.48	5.03	3.09	0.75	0.20	0.60	0.16	2.81	1.03	1.13	
L42		泥岩	92.2	254	840	59.1	644	18.6	3.97	18.6	3.97	127	20.8	135	1.23	0.027	0.39	4.68	3.42	0.78	0.21	0.67	0.63	1.95	1.37	0.93	
M31		泥岩	82.5	125	177	15.8	515	9.51	1.95	9.51	1.95	338	8.59	48.6	0.70	0.026	0.24	4.88	3.17	0.76	0.21	0.65	0.17	3.72	1.03	1.17	
M48		泥岩	57.0	143	147	13.0	536	7.76	1.41	7.76	1.41	217	7.04	44.4	0.73	0.025	0.27	5.50	2.28	0.71	0.18	0.61	0.20	3.86	1.05	1.19	
R2		泥岩	97.3	241	196	8.83	794	6.42	1.16	6.42	1.16	117	19.5	80.6	1.39	0.034	0.30	5.53	2.86	0.70	0.18	0.59	0.49	2.03	1.03	1.26	
S134		泥岩	75.5	332	198	27.3	915	8.61	2.27	8.61	2.27	311	11.4	59.2	1.13	0.030	0.36	3.79	2.56	0.88	0.26	0.69	0.23	2.80	1.04	1.30	
S152		泥岩	87.3	649	197	21.9	1106	10.9	2.23	10.9	2.23	110	15.7	119	1.49	0.032	0.59	4.89	2.73	0.76	0.20	0.72	0.71	1.97	1.42	1.32	
H13	长 4+5 ₂	泥岩	43.9	67.9	161	15.3	303	8.98	1.52	8.98	1.52	380	7.01	45.8	0.69	0.026	0.22	5.91	1.71	0.67	0.17	0.57	0.12	4.81	1.07	1.12	
L91		泥岩	217	104	191	40.2	505	17.4	3.65	17.4	3.65	151	21.6	122	1.36	0.027	0.21	4.76	5.16	0.77	0.21	0.76	0.91	2.01	1.42	1.04	
L95		泥岩	64.7	177	235	19.4	383	9.58	1.96	9.6	1.96	346	11.5	57.4	0.90	0.042	0.46	4.89	3.40	0.76	0.20	0.62	0.14	2.65	1.05	1.14	
LU89		泥岩	90.6	78.7	256	15.3	364	12.7	2.42	12.7	2.42	293	10.8	67.3	0.92	0.019	0.22	5.24	4.77	0.73	0.19	0.65	0.21	3.10	1.03	1.03	
N62		泥岩	196	135	122	59.5	717	14.0	4.15	14.0	4.15	499	17.2	67.2	1.06	0.030	0.19	3.38	6.54	0.94	0.30	0.87	0.23	0.97	1.05	1.08	
N78		泥岩	95.3	275	191	19.8	465	11.2	2.42	11.2	2.42	182	12.2	62.7	1.13	0.027	0.59	4.63	3.53	0.79	0.22	0.70	0.36	2.35	1.05	1.07	
N85		泥岩	93.2	129	181	23.9	589	11.3	2.42	11.3	2.42	278	10.6	62.1	1.02	0.035	0.22	4.65	2.70	0.78	0.22	0.68	0.23	2.86	1.05	1.12	
R3		泥岩	74.6	199	465	10.8	906	20.6	2.46	20.6	2.46	109	13.5	59.6	1.21	0.029	0.22	8.35	2.57	0.53	0.12	0.82	0.99	1.72	1.01	1.47	

注：Rb/K 为换算后 1000×Rb/K，K 由 K₂O 按摩尔质量换算为 ×10⁻⁶，稀土元素标准化利用中国东部泥质岩稀土平均含量(Yan et al., 1997)，Ce* 由 10^{1/2(La+16Pr)} 求出，Eu* 由 10^{1/2(Gd+16Sm)} 求出。

表 2 鄂尔多斯盆地西南部长 4+5 段硼和黏土矿物分析数据及“相当硼”含量和古盐度计算数据

Table 2 The analysed data of B and clay minerals and the calculated data of “equivalent boron” content and paleosalinity in Chang 4+5 Member in the southwest Ordos basin

样品	层位	岩性	元素含量		黏土矿物质量分数				沃克、亚当斯法		科奇法				李宝利修正公式	
			B	K ₂ O	I	K	Ch	I/S	相当硼	古盐度	黏土质量分数校正				B _k	古盐度
			(×10 ⁻⁶)	(%)	(%)	(%)	(%)		(×10 ⁻⁶)	(‰)	I(%)	K(%)	M(%)	Ch(%)	(×10 ⁻⁶)	(‰)
Y281		泥岩	89	4.30	22.3	18.8	49.9	8.0	169	9.47	30.5	18.8	0.72	49.9	6.25	3.43
B451		泥岩	78	3.62					161	8.69						
B412		泥岩	76	3.35					172	9.76						
B498	4+5 ₁	泥岩	82	4.00	24.7	10.3	55.2	15	153	7.91	33.1	10.3	1.49	55.2	5.63	3.17
M48		泥岩	72	2.50	22.7	57.4	12.3	10	195	12.0	29.5	57.4	0.76	12.3	4.07	2.45
H315		泥岩	75	2.35	48.9		30.9	20	198	12.3	65.1		4.05	30.9	2.79	1.83
HU10		泥岩	70	2.40	46.4		42.6	15	182	10.7	55.8		1.65	42.6	3.09	1.98
M31		泥岩	68	2.60	33.1	6.70	53.3	12	179	10.4	39.2	6.65	0.83	53.3	4.12	2.48
L91	4+5 ₂	泥岩	89	4.20	44.7		54.9	15	148	7.42	45.0		0.06	54.9	4.94	2.86
B516		泥岩	87	4.35					173	9.86						1.80

注：黏土矿物数据源自长庆油田勘探开发研究院；I 为伊利石，I/S 为伊/蒙混层比，K 为高岭石，Ch 为绿泥石，M 为蒙脱石，数据在长庆油田低渗透油气田勘探开发国家工程实验室由 X 射线衍射仪分析获得。

Ch 为实测绿泥石，*k* 为实测高岭石含量。由此得出的古盐度为 0.50‰~3.78‰，平均值为 1.83‰(表 2)，水体性质整体表现为淡水。尽管这两种方法计算古盐度时不考虑成岩过程中黏土矿物成分的变化，但是研究区黏土组成相对简单，且主要组成以伊利石为主，因此计算结果应具有一定的正确性。

根据 Sr/Ba、Rb/K、Th/U 等微量元素比值和硼法对研究区古盐度进行定性、定量综合分析，综合判识长 4+5 段沉积期为陆相微咸水—淡水的水体性质，盐度在 0.50‰~3.78‰之间，在湖盆中心盐度略高，为微咸水。

3.2 环境古气候条件

目前国内对古气候研究常用方法包括元素地球化学、反映古气候特征的岩石和矿物组合、古生物化石、孢粉、古地磁学和碳氧同位素方法等(Li Minglong et al., 2019)。本研究在利用主、微量元素比值法的基础上，利用类比法定量恢复了研究区古水温以及古气温，再结合前人对鄂尔多斯盆地延长组的化石及孢粉对古气候恢复的研究(Zhang Caili et al., 2011; Wang Feng et al., 2017; Fu Jinhua et al., 2018; Fan Mengmeng et al., 2019)，综合推断研究区长 4+5 段沉积期的古气候特征。

3.2.1 Sr / Cu、Rb / Sr 比值法

Rb、Cu 为喜湿型元素，Sr 为喜干型元素，其比值可以有效、灵敏地反映古气候的变化(Zhang Tianfu et al., 2016; Fu Jinhua et al., 2018; Wang Feng et al., 2017)，Sr/Cu 小于 10 指示温湿气候，大于 10 表示干燥炎热气候，介于 5.0~10 之间，为半潮湿-半干燥的气候，小于 5 为温暖潮湿气候

(Lerman et al., 1989; Wignall, 1996; Ma Huanhuan et al., 2019)。研究区样品 Sr/Cu 比值为 1.83~12.42 之间，平均值 6.63，大部分样品小于 10，仅个别值大于 10(表 3)。Rb/Sr 值在干旱环境下比值较低，高值则指示湿润气候(Chen Jun et al., 2001)。样品的 Rb/Sr 值介于 0.13~2.81 之间，平均值为 0.66，整体比值相对较低。将 Sr/Cu 和 Rb/Sr 投图分析(图 5c)，部分样品位于 Sr/Cu 值大于 10 的区间，同时 Rb/Sr 值位于低值区域，整体判识长 4+5 段沉积期应为半潮湿—半干燥环境古气候。

3.2.2 Mg/Ca 法

从定性角度来说，通常利用岩石中 Mg/Ca 值进行古气候研究，其比值受温度和降水共同影响，且与温度成正相关，与降水成负相关(Li Qing et al., 2008)，高值代表气温升高，干旱、炎热、少雨气候，低值代表气温降低、温暖、湿润、多雨气候(Liang Wenjun et al., 2015; Feng Qiao et al., 2018; Fan Mengmeng et al., 2019)。数据分析表明(表 3)，该区 Mg/Ca 值分布区间 0.26~5.50，平均 1.20，高于盆地长 7 段最大湖盆沉积期的比值(0.06~1.66)(Ma et al., 2019)，从该结果来看相对于长 7 期，长 4+5 段沉积时气温应略有上升，应属于半潮湿—半干燥气候。

3.3 环境古温度条件

3.3.1 古水温推算

近年来，越来越多的研究证明了有孔虫中 Mg/Ca 值可以定量地计算海水温度的变化，被称为 Mg/Ca 温度计，是恢复古温度的重要手段之一(Lea et al., 2000, 2003; Visser et al., 2003; Stott et al.,

2007;Wang Wenjie et al. , 2014),通常盐度在 35‰ 以下的水体,用 Anand 转换方程来计算恢复古海水温度(Wang Wenjie et al. , 2014)。该方程式: $Mg/Ca=0.395\times\exp(0.09\times T)$ 。但实验测得结果为沉积物中的 Mg/Ca 值,如果用该数据代入转换方程来进行古水温恢复显然是有偏差的,因此本次研究利用现今太平洋沉积物中有孔虫 Mg/Ca 值和沉积物中的 Mg/Ca 值之间求取相关系数,然后用该相关系数来反推研究区实测的 Mg、Ca 数据,获得相当或接近湖盆沉积时有孔虫的 Mg/Ca 值,以恢复研究区长 4+5 段沉积时的古水温,这样恢复的结果具有一定

的准确性。资料显示(Stott et al. , 2007;Xu Jian et al. , 2008,2010;Bolliet et al. , 2011;Dang Haowen et al. , 2012;Sagawa et al. , 2012;Wang Wenjie et al. , 2014)西太平洋地区有孔虫 Mg/Ca 值介于 3.45~6.14 mmol/mol 之间,且多数分布于 4~6 mmol/mol 区间,再利用 Wang Chenghou(1987)对太平洋沉积物科考时所获得的 Ca、Mg 数据,求出太平洋沉积物和有孔虫之间 Mg/Ca 系数为 10.698,以此获得研究区近似的有孔虫 Mg/Ca 值。通过 Anand 转换方程计算出长 4+5 段沉积时古水温为 8.9℃~11.9℃(表 3)。

表 3 鄂尔多斯盆地西南部长 4+5 段元素比值和古水温恢复数据

Table 3 The element geochemical analysis and the calculated data of paleo water temperature of Chang 4+5										
Member in the southwest Ordos basin										
样品	岩性	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaO/	Sr/Cu	Rb/Sr	Mg/Ca	Mg/Ca *	古水温(℃)
		(%)			(MgO×Al ₂ O ₃)					
B102	泥岩	0.014	0.031	0.18	0.079	12.42	0.19	2.28	2589	11.2
B412	泥岩	0.027	0.021	0.18	0.226	9.85	0.25	0.77	828	10.0
B498	泥岩	0.032	0.054	0.20	0.119	3.37	0.87	1.69	1805	10.8
B516	泥岩	0.039	0.050	0.18	0.137	1.90	2.81	1.28	1372	10.5
C107	泥岩	0.030	0.040	0.15	0.112	6.06	0.73	1.31	1399	10.6
CH67	泥岩	0.056	0.035	0.17	0.272	2.58	0.19	0.63	669	9.8
HU10	泥岩	0.032	0.026	0.13	0.161	7.81	0.45	0.81	866	10.1
H189	泥岩	0.049	0.036	0.17	0.235	9.78	0.46	0.72	775	9.9
H13	泥岩	0.028	0.032	0.15	0.131	4.43	0.65	1.15	1225	10.5
H23	泥岩	0.070	0.023	0.11	0.335	10.36	0.48	0.33	352	9.1
H315	泥岩	0.063	0.053	0.11	0.131	10.54	0.32	0.84	900	10.1
L42	泥岩	0.057	0.017	0.15	0.503	4.29	0.36	0.30	319	9.0
L91	泥岩	0.022	0.021	0.21	0.220	2.59	2.08	0.95	1021	10.2
L95	泥岩	0.033	0.029	0.12	0.139	9.10	0.37	0.86	924	10.2
LU89	泥岩	0.010	0.024	0.12	0.051	5.14	1.15	2.28	2441	11.1
M31	泥岩	0.021	0.016	0.12	0.158	7.94	0.66	0.76	815	10.0
M48	泥岩	0.036	0.026	0.13	0.178	10.98	0.40	0.73	784	10.0
N62	泥岩	0.024	0.029	0.15	0.126	2.27	1.45	1.19	1277	10.8
N78	泥岩	0.019	0.040	0.21	0.100	10.38	0.35	2.11	2252	9.7
N85	泥岩	0.050	0.029	0.13	0.224	5.39	0.72	0.58	620	10.5
R2	泥岩	0.099	0.026	0.14	0.533	5.04	0.36	0.26	262	8.9
R3	泥岩	0.022	0.037	0.16	0.095	1.83	0.38	1.68	1819	10.8
S134	泥岩	0.020	0.032	0.16	0.098	12.18	0.23	1.58	1573	10.7
S152	泥岩	0.050	0.029	0.16	0.275	2.96	0.13	0.58	724	9.9
Z128	泥岩	0.027	0.041	0.10	0.065			1.52	1516	10.7
Z131	泥岩	0.062	0.026	0.15	0.358			0.42	419	9.4
Z136	泥岩	0.027	0.020	0.10	0.134			0.74	740	9.9
Z141	泥岩	0.025	0.039	0.12	0.076			1.56	1006	10.3
Z149	泥岩	0.020	0.110	0.22	0.040			5.50	5491	11.9
Z155	泥岩	0.018	0.016	0.18	0.208			0.87	454	9.5
Z161	泥岩	0.027	0.043	0.19	0.121			1.57	1603	10.7
Z222	泥岩	0.029	0.030	0.15	0.143			1.07	1091	10.3
Z288	泥岩	0.031	0.035	0.15	0.135			1.11	1209	10.4
Z298	泥岩	0.030	0.028	0.16	0.175			0.93	945	10.2
Z69	泥岩	0.030	0.031	0.14	0.136			1.03	1066	10.3

注:CaO/(MgO×Al₂O₃)和 Mg/Ca 比值为质量百分比,Mg/Ca* 为有孔虫倍数换算后摩尔质量比值数据。

3.3.2 古气温推算

Zhu Bofang(1999)提出的湖泊型水库水温计算方法适用于亚热带(23°~44°N)各种大、中型湖泊任意深度水温的估算,尤其对估算年平均水温分布效果较好(Jiang Hong, 1999)。湖底温度的计算公式为 $T_b = T_b' - K'N$, 其中 T_b' 和 K' 为常数,不同水深数值不同, N 为湖泊所在的纬度。鄂尔多斯晚三叠世湖盆根据古地磁恢复,古纬度为北纬 31.03°(Fu Qiang et al., 2009)。根据之前恢复的古水深数据,湖底水深 40 m 和 60 m 的年平均古水温分别为 9.8℃和 13.3℃,这与前述 Mg/Ca 法恢复的古水温区间非常接近。而古水温又与年平均气温存在 $T_s(\text{湖表面年平均气温}) = T_{am}(\text{年平均气温}) + \Delta b_{(\text{温度增量})}$ 线性关系(Shen Jianian et al., 2008),从现今实测资料可知,亚热带地区 Δb 的波动在 2~4℃之间,因此取平均值 3℃,再根据湖底古水温和湖面古水温的差值(设为 Δc),根据对松辽盆地湖泊水的古水温恢复研究可知(Shen Jianian et al., 2008),水深不同该值介于 7~14.3℃之间(水深值 20~60 m),因此恢复公式应为 $T_{am}(\text{年平均气温}) = T_s(\text{湖表面年平均气温}) - \Delta c(\text{顶底水温差值}) - \Delta b_{(\text{温度增量})}$,由此恢复研究区长 4+5 段的古气温为 14.5~24.6℃。

贵州红枫湖在过去 30 年、年平均气温 15℃条件下,沉积物中 $\text{CaO}/(\text{MgO} \times \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值主要分布在 0.043 ~ 0.104 之间,平均值为 0.075 (Wu Fengchang et al., 1996),而长 4+5 段沉积物的 $\text{CaO}/(\text{MgO} \times \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值介于 0.040~0.533 之间,平均值为 0.178(表 3),整体略高于红枫湖底沉积物,反映了古气温条件应高于 15℃,间接证明了之前恢复古气温的合理性。

综合分析鄂尔多斯盆地长 4+5 段沉积期湖盆古水温约 8.9℃~11.9℃,古气温为 14.5℃~24.6℃,略高于湖盆最大沉积期长 7 段的气温,整体表现为温暖-半潮湿的气候特征。

3.4 环境古水深条件

古水深恢复是古环境研究和盆地分析的重要指标,对于研究水平面变化幅度、盆地沉降史以及沉积体系具有重要的意义(Li Xuejie et al., 2004; Pang Jungang et al., 2012)。前人为此作出大量研究工作,常用方法包括沉积学(岩性、沉积构造和古生物资料法、盆地沉降史回剥分析)、微量元素比值法和微体古生物(有孔虫组合,硅藻,珊瑚)等来定性分析(Wilder et al., 1996),以及通过钴(Co)元素(Zhang Caili et al., 2011; Wang Feng et al., 2017;

Fan Mengmeng et al., 2019; Jiang Yiming et al., 2020)、水生植物的孢粉分布特征以及通过有孔虫分布建立的转换函数法(Xue Liyuan et al., 2018)分析来实现半定量、定量恢复。本文选用了微量元素比值法、沉积学以及钴元素进行定性、半定量探讨研究区古水深。

3.4.1 沉积学方法

利用沉积岩的岩性、沉积构造、沉积相、古生物化石等传统的古水深分析方法可以快速精准地判别某地大致所处的水深范围。对于碎屑岩来说,随着沉积水体加深,沉积物中砂泥比值减小、岩石颜色由浅变深,而沉积构造也由水动力较强的层理、波痕及冲刷侵蚀演变为深水的水平、韵律层理构造,同时可以见到沟、槽模、火焰构造等深水浊积岩建造,生物活动遗迹随着水体的加深也不断地从垂向虫孔变成水平虫孔,鱼类化石则仅见于深水环境,区别于滨浅湖地区的常见的鱼鳞、瓣腮类和介形虫化石(Zhang Caili et al., 2011; Wang Feng et al., 2017; Fan Mengmeng et al., 2019; Pan Wenjing et al., 2020)。根据对长 4+5 段岩芯及野外剖面观察(图 3),综合分析岩性、沉积构造以及化石资料,其沉积学特征反映出研究区长 4+5 段东北部为弱还原—还原的较深水环境,其余地区为弱还原—氧化环境,可定性推断出该区古水深一般应大于 20 m,最大古水深应大于 50 m。

3.4.2 微量元素比值

Th/U 比值不但能够反应氧化还原环境,还可以间接获得古水深的范围(Wang Xuejun et al., 2008),根据其与古水深的关系(表 4),实测样品 Th/U 值介于 3.38~8.35 之间,平均值 5.02,属还原条件,古水深范围大于 25 m,而部分湖湾区小于 15 m。根据 Nicholls(1967)提出的海洋古水深大于 250 m(半深海相)时,Mo、Cu、Co 和 Ba 等微量元素平均含量的下限指标判识标准,研究区长 4+5 段微量元素远小于标准值(表 5),平均低 2~3 倍,按等比例推算,研究区长 4+5 段古水深上限介于 58~109 m 之间。

3.4.3 钴元素法

关于利用钴(Co)元素计算沉积时的沉积速率来反推古水深的计算方法在多篇文献中均有详述(Zhang Caili et al., 2011; Liang Wenjun et al., 2015; Wang Feng et al., 2017; Fan Mengmeng et al., 2019),其计算公式本文就不再详述。根据样品实测的钴(Co)和镧(La)值,计算出研究区延长组



图 3 鄂尔多斯盆地西南部延长组长 4+5 段岩性、沉积构造及古生物标志

Fig. 3 The lithology, sedimentary structure and palaeontology in the Chang 4+5 Member of Yanchang Formation in the southwest Ordos basin

(a)—冲刷面, Z84 井, 长 4+5₂ 段; (b)—灰白色中细砂岩发育平行层理, H84 井, 长 4+5₁ 段; (c)—灰色中细砂岩发育变形构造, H82 井, 长 4+5₁ 段; (d)—灰黑色泥岩, H72, 长 4+5₁ 段; (e)—韵律层理, M23 井, 长 4+5₁ 段; (f)—砂球、砂枕构造, B106 井, 长 4+5₁ 段; (g)—大型垂直虫孔, Y78 井, 长 4+5₂ 段; (h)—三角洲前缘植物化石碎片, Z104 井, 长 4+5₁ 段; (i)—大型植物杆茎, Y78 井, 长 4+5₂ 段; (j)—完整的植物叶, M31 井, 长 4+5₁ 段; (k)—双壳类生物化石, G189 井, 长 4+5₁ 段; (l)—鱼鳞化石残片, W103 井, 长 4+5₁ 段

(a)—Bed scour, Z84 well, Chang 4+5₂ Member; (b)—parallel bedding occurs in grayish white medium fine sandstone, H84 well, Chang 4+5₁ Member; (c)—grey medium fine sandstone developed deformation structure, H82 well, Chang 4+5₁ Member; (d)—grayish black mudstone, H72 well, Chang 4+5₁ Member; (e)—rhythmic layering, M23 well, Chang 4+5₁ Member; (f)—sand ball and sand pillow structure, B106 well, Chang 4+5₁ Member; (g)—large vertical worm boring, Y78 well, Chang 4+5₂ Member; (h)—plant fossil fragments of delta front, Z104 well, Chang 4+5₁ Member; (i)—large plant stem, Y78 well, Chang 4+5₂ Member; (j)—intact plant leaves, M31 well, Chang 4+5₁ Member; (k)—bivalve fossils, G189 well, Chang 4+5₁ Member; (l)—fossil fragments of fish scales, W103 well, Chang 4+5₁ Member

长 4+5 段当时古水深范围为 10.03~81.42 m, 平均 34.5 m(表 5), 其在平面分布与已知沉积相较吻合, 长 4+5 段整体古地形平坦开阔, 水体较浅, 一般小于 20 m; 水体较深部位在研究区东北部, 大于 40 m, 上里塬-五蛟处为长 4+5 段湖盆中心位置, 最大深度 80 m(图 4)。

不同水深具有不同的元素组成和同位素含量分布特征, Rb、K 在水中的迁移和富集均与黏土矿物相关, 而 Rb 比 K 更易被黏土吸附而迁移(Sun Mingyi et al., 1984; Fang Zhixiong et al., 2003; Zhu Xiaping et al., 2009; Meng Xiao et al., 2014)。Rb/K 的值越大、Zr/Al 的值越小表明水体越深(Xi Shengli et al., 2007), 因此利用其比值可以很好地验证 Co 元素计算出的古水深的正确性,

通过计算, Rb/K 高值点和 Zr/Al 低值点与钴(Co)元素计算出的古水深数据基本吻合(表 5), 间接证明了测试结果的合理性。

表 4 Th/U 比值与古水深关系(据 Pang Jungang et al., 2012)

Table 4 The relationship between Th /U ratio and paleo water depth(after Pang Jungang et al., 2012)

Th/U	氧化-还原条件	古水深
>30	氧化	小于 15 m, 受河口影响可达 20 m
30~10	弱氧化-还原	15~25 m, 湖湾区可小于 15 m
10~4	还原	大于 25 m, 湖湾区可小于 15 m
<4	强还原	

综合上述研究方法, 得出镇北地区延长组长 4+5 段沉积时古水深为 10~85 m。

3.5 环境古氧化—还原条件

微量元素可以有效地指示沉积环境的氧化—还

原条件,研究表明 V、Cr、Co、Ni、Cu、Th、U 等元素对环境的氧化还原性敏感(Jomes,1994),同时稀土元素中 Ce 异常和 Eu 异常也可以指示环境改变(Taylor et al. , 1986; Li Jun et al. , 2007; Feng

Qiao et al. , 2018)。本文主要选用 U/Th 及 δU 法,V/(V + Ni)、V/Cr、Ni/Co、Ce/Ce* 及 Eu/Eu* 等元素比值法对研究区纸坊组氧化—还原条件进行判别。

表 5 鄂尔多斯盆地西南部长 4+5 段元素地球化学分析数据、比值和古水深恢复数据
Table 5 The element geochemical analysis and the calculated data of paleobathymetric of Chang 4+5 Member in the southwest Ordos basin

样品	岩性	沉积相	Mo	Co	Cu	Ba	Ce	Pr	Nd	Ni	Pb	La	Th/U	Zr/Al	Rb/K	Rb/K 与 Zr/Al 倍数	Co 法恢复 古水深(m)
			(×10 ⁻⁶)														
B498	泥岩	半深湖	4.87	22.6	62.7	599	131	10.9	28.4	47.9	32.9	50.7	4.57	0.84	95.4	114	81.4
L91	泥岩		3.34	21.6	40.2	505	122	10.3	28.3	43.3	23.8	45.2	4.76	0.74	155	209	78.5
B516	泥岩		2.29	20.9	39.9	374	146	12.3	34.5	36.9	28.2	56.9	6.22	1.06	125	118	63.7
L42	泥岩		4.81	20.8	59.1	644	135	11.5	28.5	405	16.6	54.3	4.68	4.72	104	22	65.1
N62	泥岩		2.70	17.2	59.5	717	67	7.46	27.6	167	27.9	34.5	3.38	0.67	198	298	57.2
H189	泥岩		2.12	17.6	31.7	663	126	10.4	26.5	39.4	31.8	46.7	5.10	1.85	133	72	50.5
B102	泥岩		1.01	15.5	25.3	946	77.6	8.91	33.1	42.6	18.1	39.7	4.34	0.89	43.7	49	42.6
S152	泥岩		0.72	15.7	21.9	1107	119	9.84	25.4	31.0	16.4	45.1	4.89	1.00	82.2	82	40.1
B412	泥岩		1.71	14.3	22.3	1155	69.1	7.79	29.1	29.1	21.6	35.6	3.38	1.13	55.3	49	38.2
平均			2.62	18.4	40.3	746	110	9.91	29.0	93.6	24.1	45.4	4.59	1.43	110	113	57.5
N78	泥岩	三角洲 前缘	3.04	12.2	19.8	465	62.7	7.05	25.2	28.6	22.1	32.0	4.63	1.19	107	90	29.3
S134	泥岩		5.29	11.4	27.3	915	59.2	6.84	24.4	31.8	15.3	29.8	3.79	1.00	78.4	78	26.4
H315	泥岩		1.12	12.1	21.6	472	66.5	7.34	26.3	34.0	22.2	35.9	5.03	1.44	93.0	65	26.4
L95	泥岩		1.15	11.5	19.4	383	57.4	6.3	22.8	30.4	17.9	29.9	4.89	1.60	103	64	26.9
C107	泥岩		1.23	11.5	19.9	418	68.4	7.81	28.9	34.3	18.7	35.2	5.23	3.07	89.4	29	23.7
N85	泥岩		2.81	10.6	23.9	589	62.1	6.89	24.3	30.4	14.1	31.8	4.65	0.87	81.8	94	21.6
LU89	泥岩		2.90	10.8	15.3	364	67.3	7.57	26.4	33.3	13.4	35.7	5.24	1.78	144	81	20.0
LU89	泥岩		2.90	10.8	15.3	364	67.3	7.57	26.4	33.3	13.4	35.7	5.24	1.78	144	81	20.0
CH67	泥岩		1.60	11.0	11.1	461	77.0	8.63	32.2	24.1	22.3	38.5	4.96	1.16	83.8	72	19.3
H23	泥岩		0.51	8.58	12.5	331	50.1	5.80	21.2	17.0	12.9	26.4	5.32	1.90	90.7	48	15.3
M31	泥岩		1.41	8.59	15.8	515	48.6	5.07	18.2	31.9	12.3	27.6	4.88	1.20	95.9	80	14.7
M48	泥岩		1.29	7.04	13.0	536	44.4	4.92	18.0	27.2	11.3	23.2	5.50	0.91	68.7	76	10.6
H13	泥岩	7.17	7.01	15.3	303	45.8	4.99	18.1	33.7	9.89	23.2	5.91	0.94	51.6	55	10.5	
HU10	泥岩	4.16	6.09	13.1	247	32.6	3.72	13.0	21.2	12.1	16.6	5.20	0.58	59.0	102	10.0	
平均			2.61	9.93	17.4	454.5	57.8	6.46	23.3	29.4	15.6	30.1	5.03	1.39	92.1	72.5	19.6
R2	泥岩	河流	4.65	19.5	47.9	794	80.56	9.33	34.0	395	17.6	41.2	5.53	1.13	79.0	70	36.6
R3	泥岩		0.44	13.5	10.8	906	59.6	6.64	24.8	23.2	19.1	33.1	8.35	2.36	77.5	33	19.3
平均			2.61	13.6	26.8	592	78.2	7.85	25.9	66.5	18.9	36.3	5.01	1.43	97.7		34.3
水深>250 m			>5.0	>40	>90	>1000	>100	>10	>50	>150	>40						

3.5.1 δU 和 U/Th 值法

U 元素地球化学性质活跃,易氧化,迁移能力强,而 Th 为惰性元素,迁移能力较弱,通常吸附在细粒沉积物中,利用 δU 和 U/Th 值可以有效判定氧化还原状态(Wang Feng et al. , 2017; Fan Mengmeng et al. , 2019),其中, δU 值由 $2U/(Th/3 + U)$ 计算求出(Jones et al. , 1994; Wignall,1996; Kimur et al. , 2001; Liu An et al. , 2013),正常水体环境中 $\delta U < 1$,还原环境中 $\delta U > 1$ 。而 $U/Th > 1.25$ 为还原环境,0.75 ~ 1.25 为弱氧化环境, < 0.75 为氧化环境(Wignall,1996)。研究区长 4+5 段泥岩样品分析结果(表 1), δU 均小于 1(0.53 ~ 0.94),而 U/Th 亦均小于 0.75(0.12 ~ 0.30),表现

为氧化环境。

3.5.2 V/(V+Ni)、V/Cr 及 Ni/Co 比值法

V 在还原条件下易被有机质或黏土等吸附,Cr 通常出现在沉积物碎屑中,在氧化环境中 Ni 和 Co 以离子形式存在,但 Ni、Cr、Co 在还原环境下易于富集,而 V 的沉淀速率更有效,故 $V/(V + Ni)$ 、 V/Cr 及 Ni/Co 比值可有效指示沉积水体的氧化还原环境(Dill et al. , 1988; Jomes, 1994; Tribovillard et al. , 2006; Wang Feng et al. , 2017; Feng Qiao et al. , 2018)。其中 $V/(V + Ni) > 0.84$ 、 $V/Cr > 4.25$ 、 $Ni/Co > 7$ 为还原环境; $V/(V + Ni)$ 介于 0.60 ~ 0.84 之间、 V/Cr 介于 2 ~ 4.25 之间、 Ni/Co 介于 5 ~ 7 之间为弱氧化环境; $V/(V + Ni) < 0.60$ 、 V/Cr

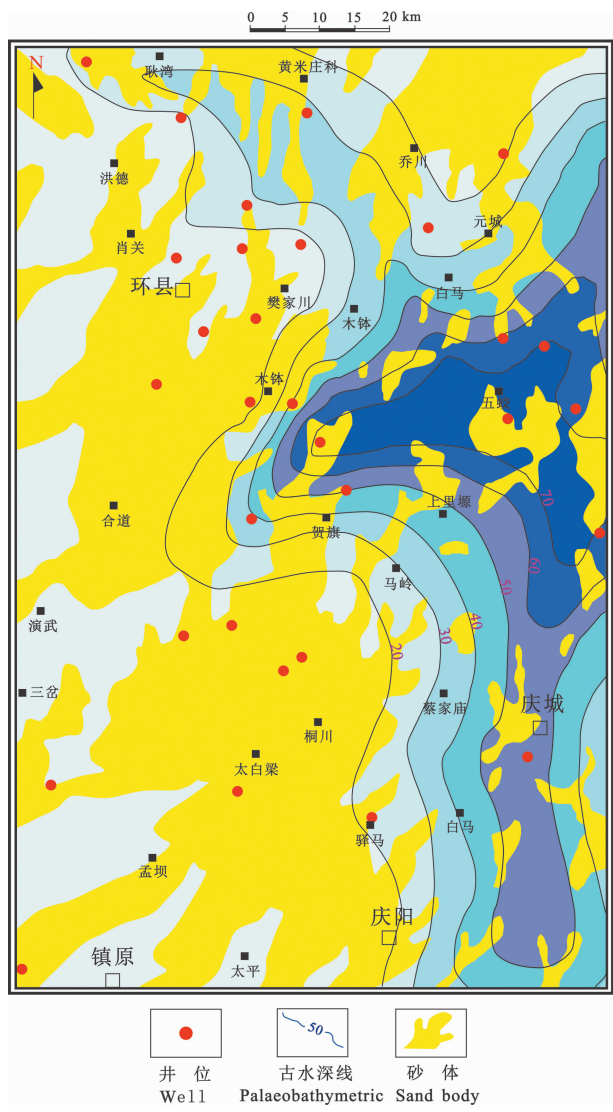


图 4 鄂尔多斯盆地西南部延长组长 4+5 段沉积期古水深等值线图

Fig. 4 Paleobathymetric contour map of Chang 4+5 sedimentary period in the southwest Ordos basin

<2 、 $Ni/Co < 5$ 为氧化环境。样品分析结果(表 1), $V/(V+Ni)$ 值为 $0.57 \sim 0.87$, 平均值 0.68 ; V/Cr 值为 $0.04 \sim 1.03$, 平均值 0.43 ; Ni/Co 值在 $0.97 \sim 4.81$ 之间, 平均值 2.52 , 指示研究区长 4+5 段沉积水体总体为弱还原—氧化环境。

3.5.3 Ce/Ce^* 和 Eu/Eu^* 比值法

稀土元素是最稳定的微量元素, 其中 Ce/Ce^* 和 Eu/Eu^* 即 Ce 异常(δCe)和 Eu 异常(δEu), 常应用于沉积环境分析。稀土元素一般为正三价, 但 Ce 和 Eu 为变价元素, 可以随沉积环境而改变。在强酸、还原条件下 Eu^{3+} 可被还原为 Eu^{2+} , 替换 Sr^{2+} 进入离子晶格沉淀, 造成沉积物中 Eu 富集; 而在碱性、氧化环境中 Eu^{2+} 易氧化为 Eu^{3+} , 使沉积物中

Eu 亏损 (Wilder et al., 1996; Liu An et al., 2013)。与 Eu 类似, Ce 也能高效地指示氧化—还原环境, 在还原条件下沉积物中的 Ce^{4+} 易还原为 Ce^{3+} 释放到水体中, 使水体中 Ce 相对富集, 但沉积物表现为 Ce 亏损; 在氧化环境中 Ce^{4+} 易发生水解被铁锰氧化吸附沉淀, 造成水体中 Ce 的亏损, 而沉积物呈正异常或无明显的负异常 (Zhao Zhenhua, 1997; Yang Xinglian et al., 2008)。同时 Ce 异常还受水深和酸碱环境(pH)的影响, δCe 值越小, 说明水体越深、 pH 低、环境越缺氧, 反之水体越浅、越富氧、 pH 越高 (Zhao Zhenhua, 1997; Chen Binghui et al., 2007)。若 $\delta Ce < 1$ 、 $\delta Eu < 1$ 为氧化环境, 反之分别大于 1 则为还原环境 (Chen Deqian et al., 1992)。从分析结果来看, 研究区长 4+5 段 δCe 和 δEu 值均大于 1 (表 1), δCe 介于 $1.01 \sim 1.44$ 之间, 平均 1.13 , δEu 介于 $0.93 \sim 1.47$ 之间, 平均 1.16 , 均为还原环境, 但是整体数值接近于 1, 因此利用 V/Cr 联合图解能更好地反映实际的沉积环境, 从图 5a、b 中可以看出, 长 4+5 段样品点均位于弱还原—氧化环境范围。

4 古环境条件下的地质意义

鄂尔多斯盆地长 7 段发育中生界最为主要的一套优质烃源岩, 是盆地中生界石油的主要来源 (Hui Xiao et al., 2012; Zhao Yande et al., 2012; Yang Hua et al., 2016; Fu Jinhua et al., 2018), 长 4+5 段发育的暗色泥岩具有一定的生烃能力 (Liang Xiaowei et al., 2011; Zhang Hailin et al., 2015)。

从演化程度来看, 长 4+5 段泥岩进入了生油阶段, 应可以生成石油 (Gang Wenzhe et al., 2015)。但实际长 4+5 段暗色泥岩的生烃潜力相对较差, 有机质类型和丰度远低于长 7 段烃源岩, 仅存在少部分的自生自储型原油 (Liang Xiaowei et al., 2011; Gao Gang et al., 2012; Gang Wenzhe et al., 2015)。综上可知, 相对于鄂尔多斯盆地长 7 段湖盆发育鼎盛时期, 长 4+5 段沉积期古环境明显有所变化, 长 7 段沉积期为温暖潮湿的古气候、大面积深水湖盆、水体为陆相淡水环境下的强还原性沉积 (Fu Jinhua et al., 2018; Ma Huanhuan et al., 2019), 而长 4+5 段虽经历了短暂湖侵, 根据前述计算水体深度在 85 m 以下, 低于长 7 期的湖泊水体深度 (长 7 段最大达 120 m), 且湖盆面积小于长 7 最大湖泛期, 因此形成的暗色细粒沉积物规模和面积要远远小于长 7 期沉积; 同时气温显著增加, 由温暖潮湿的

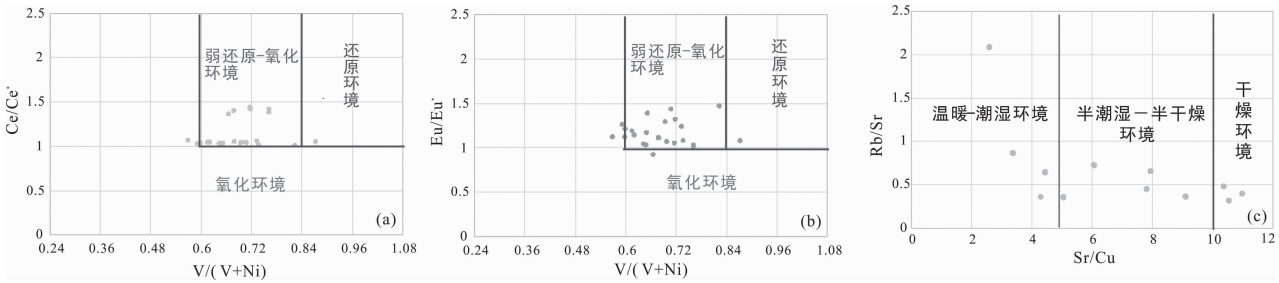


图 5 鄂尔多斯盆地西南部长 4+5 段沉积环境分析判别图

Fig. 5 Diagram of sedimentary environment analysis of Chang 4+5 Member in the southwest Ordos basin

温带—亚热带气候演化为半潮湿—半干燥气候，水深的减小也使得湖盆底部环境发生改变，由长 7 期缺氧的强还原环境转化为弱还原—氧化沉积。这些古环境的改变，使有机质难以像长 7 期时继续大量保存，尽管在长 4+5 段湖泊经历了短暂的湖侵，也发育泥质沉积，但其指标如 TOC、生烃潜量及氯仿沥青“*A*”等均远远小于长 7 段有效烃源岩，干酪根类型也以Ⅲ型为主，尽管具有一定的生烃潜力，但整体不高。

新近研究表明葡萄藻(又称油藻)是鄂尔多斯盆地延长组长 7 段优质烃源岩的重要母质来源，在长 T_{2-3} 段发现了高丰度的葡萄藻化石(Ji Liming et al., 2009)，根据对现代葡萄藻研究(He Chengquan, 1981; Xu Changhong et al., 1988)，其分布于淡水水体的种类，个别分子可以在现代的微咸水体(含盐度低于 0.5‰)中生活。由于从长 7 段沉积期到长 4+5 段沉积期，古气候的改变造成气温的升高，势必引起水体盐度增大，根据古盐度恢复结果长 4+5 段多数样品大于 0.5‰，造成长 4+5 段沉积期湖盆水体中的葡萄藻长时间处于耐盐的生活状态，因此多发育不良，最终影响有机质发育和保存，造成了有机质丰度偏低，不利于该段有效烃源岩的形成。

5 结论

通过延长组长 4+5 段泥岩和粉砂质泥岩样品的元素地球化学测定，结合沉积学分析，讨论了古盐度、古温度、古水深等发育特征，得出以下结论：

(1)利用微量元素比值和硼法定性、定量对长 4+5 段沉积期湖盆古盐度和古氧化还原条件进行了分析，结果显示水体较长 7 段最大湖泛期盐度高，在 0.50‰~3.78‰之间，整体为微咸水—淡水性质，属于水体分层不强的弱还原—氧化环境。

(2)通过微量元素比值、有孔虫 Mg/Ca 比值和湖泊型水库水温计算方法，恢复出沉积时古水温为

8.9~11.9℃，古气温为 14.5~24.6℃，略高于湖盆最大沉积期长 7 段的气温，整体表现为半潮湿—半干燥环境古气候特征。

(3)通过沉积学标志、微量元素比值及 Co 元素定量计算，显示长 4+5 段沉积期古水体深度为 10~85 m，平均水深 34.5 m，研究区湖盆总体分布局限，整体古地形平坦开阔，水体较浅，研究区东北部上里塬—五蛟处为长 4+5 段湖盆中心位置，最大深度达 80 m。

(4)综合分析表明，长 4+5 段沉积期湖盆尽管存在一个湖泛期，由于古环境条件的改变，形成的暗色泥岩虽具有一定的生烃潜力，但不易形成优质有效烃源岩。

References

Adams T D, Haynes J R, Walker C T. 1965. Boron in Holocene illites of the dovey estuary, Wales, and its relationship to paleosainity in cyclothem. *Sedimentology*, 4: 189~195.

Bai Fenfei, Zhou Kai, Yu Bo, Zhao Qian, Jia Pengtao. 2014. The Study on Reservoir characteristics of Chang 4+5 and Chang 6 oil in Laoshan Oil field Ordos basin. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 18: 104~108 (in Chinese with English abstract).

Bai Wenhua, Wang Qiang, Su Shasha, Liang Feng, Zhang Qin, Chang Yan. 2019. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Wufeng Longmaxi shales technology: A case study from southwestern margin on the Sichuan basin. *Journal of China University of Mining & Technology*. 48(6): 1276~1289 (in Chinese with English abstract).

Bolliet T, Holbourn A, Kuhnt W, et al. 2011. Mindanao dome variability over the last 160 kyr: Episodic glacial cooling of the West Pacific warm pool. *Paleoceanography*, 26: 1208.

Chen Binghui, Wei Huixiao, Huang Zhiguo, Zhou Yongzhang. 2007. Cerium Anomalies in Supergene Geological Bodies and Its Effecting Factors. *Chinese Rare Earths*, 28(4): 80~84.

Chen Deqian, Chen Gang. 1992. *Practical Rare Earth Geochemistry*. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese with English abstract).

Chen Jun, Wang Yongjin, Chen Yang, Liu Lianwen, Ji Junfeng, Lu Huayu. 2001. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for paleomonsoon climate. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 259~266 (in Chinese with English abstract).

Couch E L. 1971. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data. *AAPG*, 55(10): 1829~1837.

- Dai Zhenlong, Ma Erping, Li Dan, Ge Zhiyuan, Zhao Jinyi. 2012. Delta deposition of Chang 4+5 of Danba area in Ordos basin. *Journal of Yangtze University*. 9(7): 31~35 (in Chinese with English abstract).
- Dang Haowen, Jian Zhimin, Bassinot Franck. 2012. Decoupled Holocene variability in surface and thermocline water temperatures of the Indo-Pacific Warm Pool. *Geophys Res Lett*, 39: L01701.
- Deng Hongwen, Qian Kai. 1993. *Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis*. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 95~104.
- Dill H, Teschner M, Wehner H. 1988. Petrography, inorganic and organic geochemistry of lower Permian Carbonaceous fan sequences ("Brandschiefer Series")-Federal Republic of Germany: constraints to their paleogeography and assessment of their source rock potential. *Chemical Geology*, 67(3/4): 307~325.
- Fan Mengmeng, Bo Jun, Zhao Xiaoyan, Kang Bo, Li Wenhui, Zhang Weiguo. 2019. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 49(4): 633~642 (in Chinese with English abstract).
- Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, Yang Xianchao, Feng Yangwei. 2012. 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. *Geology in China*, 39(2): 382~389 (in Chinese with English abstract).
- Fang Zhixiong, Chen Kaiyuan, Liu Baojun. 2003. Geochemical characteristics in Qiapiang salt lake and its sedimentary parent source. *Journal of Oil and Gas Technology*, 6(4): 461~470 (in Chinese with English abstract).
- Feng Qiao, Zhang Yao, Xu Zisu, Tian Fangzheng, Yang Bo, Zhang Yi. 2018. Geochemical characteristics and paleoenvironmental analysis of dark fine grained rocks of Wawukuang and Shuinan formations in Jialai basin. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*. 37(1): 20~34 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jinhua, Li Shixiang, Xu Liming, Niu Xiaobing. 2018. Paleosedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(6): 936~946 (in Chinese with English abstract).
- Fu Qiang, Sun Xitian, Liu Yongdou. 2009. Geologic significance and Re-establishment of basin character in Late Triassic of Ordos basin. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 37(11): 1537~1540 (in Chinese with English abstract).
- Gang Wenzhe, Gao Gang, Han Yonglin, Fan Zhangche, Zhao Shuangfeng, Liang Weiwei. 2015. Analysis of source rock of Yanchang formation in Huijianshan area, Ordos basin. *Journal of China University of Petroleum (Nature Science)*, 51(1): 31~37 (in Chinese with English abstract).
- Gao Gang, Liu Guangdi, Fu Jinhua, Yao Jingli. 2012. A new method for determining the lower limits of the organic matter abundance parameters of effective source rock: taking the Triassic dark mudstones of Yanchang Formation in Longdong region, Ordos basin as an example. *Journal of Xi'an Shiyou University (Science & Technology Edition)*. 38(4): 402~407 (in Chinese with English abstract).
- He Chengquan. 1981. Tertriary pediastrum (chlorophyta) and Botryococcus (xanthophyta) from the coastal region of Beibu gulf. *Acta Paleontologica*, 12(1): 90~93 (in Chinese with English abstract).
- He Zixin. 2003. *Evolution of Ordos Basin and hydrocarbon*. Beijing: The Petroleum Industry Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiaoyu, Tian Jingchun, Zhang Huiruo, Wang Feng. 2014. Research on sedimentary facies of tight sandstone of Chang 4+5 oil reservoirs of Triassic Yanchang Formation in Zhenbei-Huanxian area, Ordos basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*. 41(1): 55~60 (in Chinese with English abstract).
- Hui Xiao, Zhao Yande, Shao Xiaozhou, Zhang Wenxuan, Cheng Dangxing, Luo Anxiang. 2012. The geological conditions, resource potential, and exploration direction of oil in Ordos basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 24(2): 14~22 (in Chinese with English abstract).
- Ji Liming, Li Jianfeng, Song Zhiguang. 2009. Petroleum geological significance of Botryococcus in Triassic Yanchang Formation, Ordos basin. *Petroleum Exploration and Development*. 36(2): 156~165 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Hong. 1999. Discussion on calculation method of reservoir water temperature. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 18(2): 60~69 (in Chinese).
- Jiang Yiming, Shao Longyi, Li Shuai, Zhao Hong, Kang Shilong, Shen Wenchao, Yi Qi. 2020. Deposition system and stratigraphy of pinghu Formation in Pinghu tectonic belt, Xihu sag. *Geoscience*, 34(1): 141~152 (in Chinese with English abstract).
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstone. *Chemical Geology*, 111(1/2 /3/4): 111~129.
- Kimur A H, Watanabe Y. 2001. Ocean anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary. *Geology*, 29: 995~998.
- Lea D W. 2003. Elemental and isotopic proxies of past ocean temperatures. Holland H D, Turekian K K. *The Oceans and Marine Geochemistry Vol. 6: Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier-Pergamon: 365~390.
- Lea D W, Pak D K, Spero H J. 2000. Climate impact of late Quaternary Equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 289: 1719~1724.
- Lerman. 1989. *A Lakes: Chemistry, geology, physics*. Wang Sumin, trans. Beijing: Geological Publishing House.
- Li Baoli. 1995. An improved method for calculating the paleosalinity of boron element. *Multiple Oil-Gas Field*, (1): 55~58 (in Chinese).
- Li Cheng, Zheng Qinghua, Zhang San, Liu Yiqun, Wand Lingli, Liang Xiaowei. 2015. Microscopic pore structure of the fourth and fifth members of the Yanchang Formation in Zhenbei area of the Ordos basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(6): 729~736 (in Chinese with English abstract).
- Li Chengfeng, Xiao Jifeng. 1988. The application of trace element to the study on paleosalinity in Shahejie formation of Dongying basin Shengli oilfield. *Acta Sedimentologica Sinica*. 10(5): 1~3 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinlong, Chen Dongjing. 2003. Summary of quantified research method on paleosalinity. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 10(5): 1~3 (in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Seng Shuxun, Lin Huixi, Chen Shiyue, Miao Yao, Yang Yong. 2007. REE characteristics and its geological significance of the Permo-Carboniferous in Bohaiwan basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(4): 589~596 (in Chinese with English abstract).
- Li Minglong, Chen Lin, Tian Jingchun, Zheng Deshun, Xu Keyuan, Fang Xilin, Cao Wensheng, Zhao Jun, Ran Zhongxia. 2019. Paleoclimate and paleo-oxygen evolution during the Uucheng Period-early Nantuo Period of Nanhua System in the Zouma area, West Huhei: evidence from elemental geochemistry of fine elastic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 93(9): 2158~2170 (in Chinese with English abstract).
- Li Panpan, Zhu Xiaomin, Zhu Shifa, Liang Xiaowei, Niu Xiaobing, Zheng Qinghua. 2014. Characteristics and main controlling factors of Chang 4+5 oil reservoir set in Longdong area, Ordos basin. *Lithologic Reservoirs*, 26(4): 51~57 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenhui, Pang Jungang, Cao Hongxia, Xiao Li, Wang Ruogu. 2009. Depositional system and paleogeographic evolution of the

- late Triassic Yanchang Stage in Ordos basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 502~507 (in Chinese with English abstract).
- Li Qing, Wang Jianli, Li Hongchun, Ye Mingyang, Wang Yong, Li Tingyong, He Xiao. 2008. Climatic significance of the Mg/Ca ratio from speleothems in Chongqing. *Carsologica Sinica*, 27(2): 145~150 (in Chinese with English abstract).
- Li Xuejie, Chen Fang, Chen Chaoyun, Guo Hua. 2004. Quantitative research on relationship between planktonic foraminifera content and water depth in western South China Sea. *Journal of Paleogeography*, 64(4): 442~447 (in Chinese with English abstract).
- Liang Wenjun, Xiao Chuantao, Xiao Sheng. 2015. Study on relationships between Paleoenvironment, Paleoclimate of Middle Permian-middle Triassic and Constant, Trace Elements in western Sichuan. *Science Technology and Engineering*, 15(11): 14~25 (in Chinese with English abstract).
- Liang Wenjun, Xiao Chuantao, Xiao Kai, Lin Wan. 2015. The relationship of Late Jurassic paleoenvironment and paleoclimate with geochemical elements in Amdo Country of northern Tibet. *Geology in China*, 42(4): 1079~1091 (in Chinese with English abstract).
- Liang Xiaowei, Wan Haihong, Niu Xiaobing, Wang Chengyu, Feng Shengbin. 2011. Source rock evaluation and oil-source rock correlation in Triassic Yanchang Formation of the middle-western Ordos basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(4): 402~407 (in Chinese with English abstract).
- Liang Xiaowei, Niu Xiaobing, Li Weicheng, Zhang San, Ye Bo, You Yuan. 2012. Chemical character of oilfield water in Ordos basin and geological significance. *Journal of Chengdu university of technology (Science & Technology Edition)*, 39(5): 51~57 (in Chinese with English abstract).
- Liu An, Li Xubing, Wang Chuanshang, Wei Kai, Wang Baozhong. 2013. Analysis of Geochemical Feature and Sediment Environment for Hydrocarbon Source Rocks of Cambrian in West Hunan-Hubei area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 1122~1132 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ling, Chen Kaiyuan, Yi Liping, Li Yaling, Xue Mingxi. 2010. Study on sedimentary facies of Chang 4 + 5 reservoir group in Majiashan area. *Journal of Oil and Gas Technology*, 32(3): 185~189 (in Chinese).
- Liu Xin, Zhang Xiaolei, Zhao Yingquan, Zhang Huirui, Zhang Zhongyi, Deng Xiuqin, Shi Ziwei. 2015. The influential factors and characteristics of Yangchang Chang 4 + 5 Formation reservoir In Zhenbei-huanxian Area of Ordos Basin. *Geological Science and Technology Information*, 34(4): 150~158 (in Chinese with English abstract).
- Ma Huanhuan, Liu Chiyang, Zhang Long, Zhang Dongdong, Wang Wenqing, Zhao Yan, Gao Ming, Quan Xiaoyuan. 2019. Geochemical characteristics and depositional environment implications of sedimentary rocks in the Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Ordos basin. *Geoscience*, 33(4): 872~882.
- Ma Xinbo, Lin Li. 2011. Changqing oilfield Jiyuan Chang 4 + 5 group plateau region low permeability reservoir diagenesis and porosity evolution. *Science Technology and Engineering*, 11(32): 7912~7918 (in Chinese with English abstract).
- Meng Xiao, Li Chunxia, Gui Rong. 2014. Ancient sedimentary environment significance revealed by the trace elements of Shan 2 to He 8 member of Upper Paleozoic in Yanan. *Unconventional Oil & Gas*, 1(2): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Water Resource, Ministry of Power Industry. 2002. Specification for Hydrologic Computation of Hydropower and Water Resource SL278-2002. Beijing: China Water Power Press (in Chinese).
- Nicholls. 1967. Trace elements in sediments; an assessment of their possible utility as depth indicators. *Marine Geology*, 5(516): 439~555.
- Pan Wenjing, Liu Shilei, Tian Derui, Guo Longlong, Wang Xiaoling, Wang Lihong. 2020. Reconstruction of paleo water depth of neocene shrinking lake: an example from the south of Bodong low uplift, Bohai sea. *Marine Geology Frontiers*, 35(4): 18~25 (in Chinese with English abstract).
- Pang Jungang, Yang Youyun, Hao Le. 2012. A review of the research status of the restoration of ancient water depth in basin. *Journal of Yangtze University(Nat SCI Edit)Sci & Eng*, 9(9): 42~45(in Chinese).
- Sagawa T, Yokoyawa Y, Ikehara M. 2012. Shoaling of the western equatorial Pacific thermocline during the last glacial maximum inferred from multispecies temperature reconstruction of planktonic foraminifera. *Palaeogeography Palaeoclimatol Palaeoecol*: 346~347, 120~129.
- Shen Jianian, Wang Qinghong, He Jianglin, Lu Shuangfang. 2008. Estimation of the ancient lake temperature and paleoclimate of the cretaceous period in the Songliao basin. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 38(6): 946~953 (in Chinese with English abstract).
- Stott L, Timmerman A, Thunell R. 2007. Southern Hemisphere and deep-sea warming led deglacial atmospheric CO₂ rise and tropical warming. *Science*, 318: 435~438.
- Sun Mingyi, Zhang Zhengbin, Liu Liansheng. 1984. A new chemical model for the distribution of trace elements in seawater on clay minerals. *Acta Oceanologica Sinica*, 6(4): 461~470(in Chinese).
- Taylor S R, McLennan S M. 1986. The continental crust: its composition and evolution. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 42(3): 196~197.
- Tian Jingchun, Zhang Xiang. 2016. *Sedimentary Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T. 2006. The trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies. *Chemical Geology*, 232(1/2): 12~32.
- Visser K, Thunell R, Stott L. 2003. Magnitude and timing of temperature change in the Indo-Pacific warm pool during deglaciation. *Nature*, 421: 152~155.
- Walker C T. 1968. Evaluation of boron as a paleosalinity indicator and its application offshore prospects. *AAPG*, 52: 751~766.
- Walker C T, Price N B. 1963. Departure curves for computing paleosalinity from boron in limestones and shales. *AAPG*, 47(5): 833~841.
- Wang Chenghou. 1987. Sedimentation and control factors of Ca and Mg elements in central Pacific basin. *Acta Oceanologica Sinica*, 9(2): 174~182 (in Chinese).
- Wang Feng, Liu Xuanchun, Deng Xiuqin, Li Yuanhao, Tian Jingchun, Li Shixiang, You Jingxi. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1265~1273 (in Chinese with English abstract).
- Wang Minfang, Jiao Yangquan, Wang Zhenghai. 2005. Recovery paleosalinity in sedimentary environment—an example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan-Hami basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 26(6): 419~422 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenjie, Xu Jian. 2014. Salinity effect on Holocene Mg/Ca-temperature estimation from the Indo-Pacific warm-pool sediment samples. *Journal of Tropical Oceanography*, 33(2): 94~100 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuejun, Wang Zhixin, Liu Xianyang, Zeng Jianhui. 2008. Recovery of ancient water depth in Ordos basin by using uranium logging data. *Natural Gas Industry*, 28(7): 46~48(in Chinese).
- Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Zheng Aiping, Sang Tingyuan, Chen Shouchun, Li Guili, Li Lianxin. 2008. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan region, Ordos basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1): 114~120 (in Chinese with English abstract).

- Wignall P B, Twitchett R J. 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction. *Science*, 1996, 272 (5265): 1155 ~1158.
- Wilder P, Quimby M S, Erdtmann B D. 1996. The wholerock cerium anomaly: a potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of anoxic facies. *Sedimentary Geology*, 101 (1/2): 43~53.
- Wu Fengchang, Wan Guojiang, Huang Ronggui. 1996. Recent temperature record of annually laminated sediments in Hongfeng lake, Guizhou. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 16(4): 345~350 (in Chinese with English abstract).
- Xi Shengli, Zheng Congbin, Li Zhenhong. 2007. Geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the Ordovician in the western margin of Ordos basin. *Journal of Paleogeography*, 6(2): 196~205 (in Chinese with English abstract).
- Xin Bushe, Yang Hua, Fu Jinhua, Wang Duoyun, Zhang Yu, Zuo Bo, Wang Keke. 2013. Geochemical characteristics of trace elements in Triassic mudstone in the upper Ordos basin. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 49(1): 57~60 (in Chinese with English abstract).
- Xu Changhong, Yu Minjuan. 1988. Preliminary studies on the oil-forming algae-*Botryococcus braunzii*. *Acta Hydrobiologica Sinica*. 12(1): 90~93 (in Chinese).
- Xu Jian, Holbourn A, Kuhnt W. 2008. Centennial Changes in the Thermocline Structure of the Indonesian Outflow during Terminations I and II. *Earth Planet Sci Lett*, 273: 152~162.
- Xu Jian, Kuhnt W, Holbourn A. 2010. Indo-Pacific warm pool variability during the Holocene and last glacial maximum. *Paleoceanography*, 25: 4230.
- Xu Jing, Pu Renhai, Yang Lin, Li Aihong. 2010. Review on paleosalinity recovery in sedimentary enviroment. *Acta Sedimentologica Sinica*. 33(5): 1001~1012 (in Chinese with English abstract).
- Xue Liyuan, Ding Xuan, Pei Renjie, Wan Xiaoqiao. 2018. Miocene evolution of paleo-water depth and subsidence revealed in Well LF14 from Lufeng Sag, northern South China sea. *Journal of Tropic Oceanography*, 37(2): 72~83 (in Chinese with English abstract).
- Yan Mingcai, Chi Qinghua, Gu Tiexin, Wang Chunshu. 1997. Chemical composition of the upper crust in eastern China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 27(3): 193~199 (in Chinese).
- Yang Hua, Zhang Wenzheng, Peng Pingan, Liu Fei, Luo Lirong. 2016. Oil detailed classification and oil-source correlation of Mesozoic Lacustrine Oil in Ordos basin, China. *Journal of Earth Science and Enviroment*. 38(2): 191~200 (in Chinese with English abstract).
- Yang Junjie. 2002. *Tectonic Evolution and Oil and Gas Distribution in Ordos Basin*. Beijing: The Petroleum Industry Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Yang Xinglian, Zhu Maoyan, Zhao Yuanlong, et al. 2008. REE geochemical characteristics of the Ediacaran-Lower Cambrian black rock series in eastern Guizhou. *Geological Review*, 54 (1): 3~15.
- Ye Liming, Yang Hua, Peng Haiyan. 2008. Depositional environment analysis of Sanxi Formation in estern Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(2): 202~210 (in Chinese with English abstract).
- You Haitao, Chen Rihui, Liu Changling. 2002. Review of paleosalinity recovering methods. *World Geology*. 21(2): 111~116 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Cai, Gao Along, Liu Zhe, Huang Jing, Zhang Yan. 2011. Study of character on sedimentary water and palaeoclimate for Chang 7 oil layer in Ordos basin. *Natural Gas Geoscience*, 22 (4): 582~587 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hailin, Deng Nantao, Li Qiang, Liu Yiqun, Zhao Shuangfeng, Liang Weiwei. 2015. Distribution and geochemistry characteristic of the source rocks from Yanchang Formation in the Southern part of Ordos basin. *Journal of Lanzhou University (Nature Science)*, 51(1): 31~37 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun, Chen Yinhang, Li Yanfeng, Ma Hailin, Lu Chao, Yang Cai, Guo Genwan. 2016. Geochemical northern characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the margin of Ordos basin and their paleoenvironmental implications. *Acta Geologica Sinica*, 90 (12): 3454~3472 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, Kong Qingfen, Wu Kai. 2008. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos basin. *Geochemica*, 37(1): 59~64 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yande, Luo Anxiang, Sun Bainian, Hui Xiao, Zhang Zhongyi, Cheng Dangxing. 2012. Hydrocarbon source evaluation and oil source contrast of the triassic system in southwest margin, Ordos basin. *Journal of Lanzhou University(Nature Science)*, 48(3): 2~13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1997. *Principle of Trace Element Ggeochemistry*. Beijing: Science Press.
- Zheng Qinghua, Liu Yiqun. 2015. Diagenesis and diagenetic lithofacies of tight reservoir of Chang4+5 member of Yanchang formation in Zhenbei, Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*. 33(5): 1001~1012 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Qinghua, Liu Qiao, Liang Xiuling, et al. 2019. Sedimentary facies distribution characteristics of Chang 4 + 5 reservoir in Longdong area, Ordos basin. *Lithologic Reservoirs*, 31(6): 26~35 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Liu Meiqing. 1999. Studay on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 20~25 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yao, Luo Naifei, Li Yanfei, Zhu Tong, Zhang Zhongyi, Liu Xin. 2014. *Sedimentary Microfacies Characteristics of Chang 4 + 5 Member in Baibao area*. Natural Gas Technology and Economy. 8(5): 5~9 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Bofang. 1999. *Thermal Stress and Temperature Control of Mass Concrete*. Beijing: China Electric Power Press (in Chinese with English abstract).
- Zhu Tong. 2015. *The Distribution, Origin, and favorable area Prediction of Chang 4 + 5 Formation in the region of Zhenbei-Huanjiang*. A Dissertation Submitted to Chengdu University of Technology for Doctor Degree, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zhu Tong, Shen Zhongmin, Liu Xin, Zhao Yingquan, Zhang Zhongyi. 2015. Characteristics and influential factors of Chang 4+5 reservoir of Zhenbei area in Ordos basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*. 42(3): 331~340 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaping, Bai Dekui, Li Xikun, Zeng Jiangping, Cao Sanyong. 2009. The adsorption behaviors of montmorill onite and some other clay minerals for cadmium. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(6): 643~648 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 白奋飞, 周凯, 于波, 赵倩, 贾朋涛. 2014. 鄂尔多斯盆地劳山油田长 4+5、长 6 油层组储层特征研究. *内蒙古石油化工*, 18: 104~108.
- 拜文华, 王强, 孙莎莎, 梁峰, 张琴, 昌燕. 2019. 五峰组—龙马溪组页岩地化特征及沉积环境——以四川盆地西南缘为例. *中国矿业大学学报*, 48(6): 1276~1289.
- 陈炳辉, 韦慧晓, 黄志国, 周永章. 2007. 表生地质体的 Ce 异常及其影响因素综述. *稀土*, 28(4): 80~84.
- 陈德潜, 陈刚. 1992. *实用稀土元素地球化学*. 北京: 冶金工业出版社.
- 陈骏, 汪永进, 陈旸, 刘连文, 季峻峰, 鹿化煜. 2001. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义. *地质学报*, 75

- (2): 259~266.
- 代振龙, 马二平, 李旦, 葛芷渊, 赵进义. 2012. 鄂尔多斯盆地旦八地区长4+5油层组三角洲沉积研究. 长江大学学报(自然科学版), 9(7): 31~35.
- 邓宏文, 钱凯. 1993. 沉积地球化学与环境分析. 兰州: 甘肃科学技术出版社.
- 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 康博, 李文厚, 张卫国. 2019. 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. 西北大学学报(自然科学版), 49(4): 633~642.
- 范玉海, 屈红军, 王辉, 杨县超, 冯杨伟. 2012. 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. 中国地质, 39(2): 382~389.
- 方志雄, 陈开远, 柳保军. 2003. 潜江盐湖地球化学特征及其沉积母源探讨. 江汉石油学报, 253(3): 20~23.
- 冯乔, 张耀, 徐子苏, 田方正, 杨勃, 张懿. 2018. 胶莱盆地早白垩世瓦屋寺组、水南组元素地球化学特征与古环境分析. 山东科技大学学报(自然科学版), 37(1): 20~34.
- 付金华, 李士祥, 徐黎明, 牛小兵. 2018. 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. 石油勘探与开发, 45(6): 936~946.
- 傅强, 孙喜天, 刘永斗. 2009. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆特征恢复及地质意义. 同济大学学报(自然科学版), 37(11): 1537~1540.
- 刚文哲, 高岗, 韩永林, 沈霞, 范涨激. 2010. 鄂尔多斯盆地胡尖山地区延长组烃源岩分析. 中国石油大学学报(自然科学版), 34(6): 50~55.
- 高岗, 柳广弟, 付金华, 姚泾利. 2012. 确定有效烃源岩有机质丰度下限的一种新方法——以鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统延长组相泥质烃源岩为例. 西安石油大学学报(自然科学版), 38(4): 402~407.
- 何承全. 1981. 北部湾沿岸地区第三纪盘星藻属和葡萄藻属. 古生物学报, 20(2): 116~131.
- 何自新. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油工业出版社.
- 胡泉羽, 田景春, 章辉若, 王峰. 2014. 镇北一环县地区长4+5油层组致密砂岩沉积相. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(1): 55~60.
- 惠潇, 赵彦德, 邵晓州, 张文选, 程党性, 罗安湘. 2012. 鄂尔多斯盆地中生界石油地质条件、资源潜力及勘探方向. 海相油气地质, 24(2): 14~22.
- 吉利明, 李剑峰, 宋之光. 2009. 鄂尔多斯盆地延长组葡萄藻的石油地质意义. 石油勘探与开发, 36(2): 156~165.
- 蒋红. 1999. 水库水温计算方法探讨. 水力发电学报, 18(2): 60~69.
- 蒋一鸣, 邵龙义, 李帅, 赵洪, 康世龙, 沈文超, 易琦. 2020. 西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积体系及层序地层研究. 现代地质, 34(1): 141~152.
- 莱尔曼. 1989. 湖泊的化学地质学和物理学. 王苏民译. 北京: 地质出版社.
- 李宝利. 1995. 硼元素古盐度计算方法的改进, 复式油气田, (1): 55~58.
- 李成, 郑庆华, 张三, 柳益群, 汪伶俐, 梁晓伟. 2015. 鄂尔多斯盆地镇北地区长4+5储层微观孔隙结构研究. 石油实验地质, 37(6): 729~736.
- 李成凤, 肖继凤. 1988. 用微量元素研究胜利油田东营盆地沙河街组的古盐度. 沉积学报, 6(4): 100~107.
- 李军, 桑树勋, 林会喜, 陈世悦, 苗耀, 杨勇. 2007. 渤海湾盆地石炭—二叠系稀土元素特征及其地质意义. 沉积学报, 25(4): 589~596.
- 李进龙, 陈东敬. 2003. 古盐度定量研究方法综述. 油气地质与采收率, 10(5): 1~3.
- 李明龙, 陈林, 田景春, 郑德顺, 许克元, 方喜林, 曹文胜, 赵军, 冉中夏. 2019. 鄂西走马地区南华纪古城期—南沱早期古气候和古氧相演化: 来自细碎屑岩元素地球化学的证据. 地质学报, 93(9): 2158~2170.
- 李盼盼, 朱筱敏, 朱世发, 梁晓伟, 牛小兵, 郑庆华. 2014. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长4+5油层组储层特征及主控因素分析. 岩性油气藏, 26(4): 51~57.
- 李清, 王建力, 李红春, 叶明阳, 王勇, 李廷勇, 何潇. 2008. 重庆地区石笋记录中Mg/Ca比值及古气候意义. 中国岩溶, 27(2): 145~150.
- 李文厚, 庞军刚, 曹红霞, 肖丽, 王若谷. 2009. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组沉积体系及岩相古地理演化. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 502~507.
- 李学杰, 陈芳, 陈超云, 郭华. 2004. 南海西部浮游有孔虫含量与水深关系定量研究. 古地理学报, 64(4): 442~447.
- 刘安, 李旭兵, 王传尚, 危凯, 王保忠. 2013. 湘鄂西寒武系烃源岩地球化学特征与沉积环境分析. 沉积学报, 31(6): 1122~1132.
- 刘玲, 陈开远, 衣丽萍, 李亚玲, 薛明喜. 2010. 马家山地区长4+5油层组储层沉积相研究. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 32(3): 185~189.
- 刘鑫, 张晓磊, 赵应权, 章辉若, 张忠义, 邓秀芹, 时改伟. 2015. 镇北一环县地区长4+5油层组储层特征及控制因素. 地质科技情报, 34(4): 150~158.
- 梁文君, 肖传桃, 肖胜. 2015. 川西地区中二叠世—中三叠世微量、常量元素与古环境、古气候关系研究. 科学技术与工程, 15(11): 14~25.
- 梁文君, 肖传桃, 肖凯, 林婉. 2015. 藏北安多晚侏罗古环境、古气候与地球化学元素关系研究. 中国地质, 42(4): 1079~1091.
- 梁晓伟, 王海红, 牛小兵, 王成玉, 冯胜斌. 2011. 鄂尔多斯盆地中西部延长组烃源岩评价及油源对比. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(4): 402~407.
- 梁晓伟, 牛小兵, 李卫成, 张三, 叶博, 尤源. 2012. 鄂尔多斯盆地油田水化学特征及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 39(5): 51~57.
- 马奂英, 刘池洋, 张龙, 张东东, 王文青, 赵岩, 高明, 全晓园. 2019. 鄂尔多斯盆地延长组长7段沉积岩元素地球化学特征及沉积环境分析. 现代地质, 33(4): 872~882.
- 马新博, 林丽. 2011. 长庆油田姬塬地区长4+5组超低压储层成岩作用与孔隙演化特征. 科学技术与工程, 11(32): 7912~7918.
- 孟潇, 李春霞, 归榕. 2014. 延安地区上古生界山2段一盒8段微量元素揭示的古沉积环境意义. 非常规油气, 1(2): 26~30.
- 潘文静, 刘士磊, 田德瑞, 郭龙恢, 王晓玲, 王立红. 2020. 渤海海域新近纪湖盆萎缩期古水深恢复——以渤东低凸起南端为例. 海洋地质前沿, 35(4): 18~25.
- 庞军刚, 杨友运, 郝磊. 2012. 湖盆古水深恢复研究现状综述. 长江大学学报(自然科学版), 9(9): 42~45.
- 孙铭一, 张正斌, 刘莲生. 1984. 海水中微量元素分配在黏土矿物上的一种新的化学模型. 海洋学报, 6(4): 461~470.
- 水利部, 电力工业部. 2002. 水利水电工程水文计算规范 SL278-2002. 北京: 中国水利水电出版社.
- 申家年, 王庆红, 何江林, 卢双舫. 2008. 松辽盆地白垩纪湖泊水体温度与古气候温度估算. 吉林大学学报(地球科学版), 38(6): 946~953.
- 田景春, 张翔. 2016. 沉积地球化学. 北京: 地质出版社.
- 王成厚. 1987. 中太平洋海盆Ca、Mg的沉积聚集及其控制因子. 海洋学报, 9(2): 174~182.
- 王敏芳, 焦养泉, 王正海. 2005. 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. 新疆石油地质, 26(6): 419~422.
- 王敏芳, 黄传炎, 徐志诚, 程锦翔, 杨赏. 2006. 综述沉积环境中古盐度的恢复. 新疆石油天然气, 2(1): 9~12.
- 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 李元昊, 田景春, 李士祥, 尤靖茜. 2017. 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. 沉积学报, 35(6): 1265~1273.
- 王学军, 王志欣, 刘显阳, 曾溅辉. 2008. 利用铀的测井响应恢复鄂尔多斯盆地古水深. 天然气工业, 28(7): 46~48.
- 王文洁, 徐建. 2014. 印-太暖水区全新世Mg/Ca温度转换中的盐度因素. 热带海洋学报, 33(2): 94~100.
- 文华国, 郑荣才, 唐飞, 郑爱萍, 桑廷元, 陈守春, 李瑰丽, 李联新. 2008. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分

析. 矿物岩石, 28(1): 114~120.

吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 1996. 贵州红枫湖纹理沉积物中近代气温记录. 地理科学, 16(4): 345~350.

辛补社, 杨华, 付金华, 王多云, 张瑜, 左博, 王科科. 2013. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世泥岩微量元素地球化学特征. 北京师范大学学报(自然科学版), 49(1): 57~60.

许常虹, 俞敏娟. 1988. 成油藻——布朗葡萄藻的研究. 水生生物学报, 12(1): 90~93.

许璟, 蒲仁海, 杨林, 李艾红. 2010. 塔里木盆地石炭系泥岩沉积时的古盐度分析. 沉积学报, 28(3): 509~517.

薛力园, 丁旋, 裴人保, 万晓樵. 2009. 南海北部陆丰凹陷 LF14 井中新世古水深变化及沉降特征. 热带海洋学报, 37(2): 72~83.

席胜利, 郑聪斌, 李振宏. 2007. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系地球化学特征及其沉积环境意义. 古地质量, 6(2): 196~205.

鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 王春书. 1997. 中国东部上地壳化学组成. 中国科学(D 辑: 地球科学), 27(3): 193~199.

游海涛, 程日辉, 刘昌岭. 2002. 古盐度复原法综述. 世界地质, 21(2): 111~116.

杨华, 张文正, 彭平安, 刘飞, 罗丽荣. 2016. 鄂尔多斯盆地中生界湖相原油油的精细划分与油源对比. 地球科学与环境学报, 38(2): 191~200.

杨俊杰. 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社.

杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙, 等. 2008. 黔东震旦系一下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征. 地质论评, 54(1): 3~15.

叶黎明, 齐天俊, 彭海燕. 2008. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析. 沉积学报, 26(2): 202~210.

张才利, 高阿龙, 刘哲, 黄静, 杨亚娟, 张艳. 2011. 鄂尔多斯盆地长 7 油层组沉积水体及古气候特征研究. 天然气地球科学, 22(4): 582~587.

张海林, 邓南涛, 李强, 张枝焕, 柳益群, 赵双丰, 梁卫卫. 2015. 鄂尔多斯盆地南部延长组烃源岩分布及其地球化学特征. 兰州大学学报(自然科学版), 51(1): 31~37.

张天福, 孙立新, 张云, 程银行, 李艳锋, 马海林, 鲁超, 杨才, 郭根万. 2016. 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. 地质学报, 90(12): 3454~3472.

张文正, 杨华, 杨奕华, 孔庆芬, 吴凯. 2008. 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. 地球化学, 37(1): 59~64.

赵彦德, 罗安湘, 孙柏年, 惠潇, 张忠义, 程党性. 2012. 鄂尔多斯盆地西南缘三叠系烃源岩评价及油源对比. 兰州大学学报(自然科学版), 48(3): 2~13.

赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社.

郑庆华, 柳益群. 2015. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长 4+5 致密油层成岩作用及成岩相. 沉积学报, 33(5): 1001~1012.

郑庆华, 刘乔, 梁秀玲, 张建魁, 张建娜, 刘涛. 2019. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 4+5 油层组沉积相展布特征. 岩性油气藏, 31(6): 26~35.

郑荣才, 柳梅清. 1999. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究. 石油与天然气地质, 20(1): 20~25.

周瑶, 罗乃菲, 李延飞, 朱童, 张忠义, 刘鑫. 2014. 白豹地区长 4+5 段沉积微相特征. 天然气技术与经济, 8(5): 5~9.

朱伯芳. 1999. 大体积混凝土温度应力与温度控制. 北京: 中国电力出版社, 27~43.

朱童. 2015. 镇北一环江地区长 4+5 油层组砂体分布、成因及有利区预测. 成都理工大学博士学位论文.

朱童, 沈忠民, 刘鑫, 赵应权, 张忠义. 2015. 鄂尔多斯盆地镇北地区长 4+5 段储层特征及影响因素. 成都理工大学学报(自然科学版), 42(3): 331~340.

朱霞萍, 白德奎, 李锡坤, 曾江萍, 曹三勇. 2009. 镉在蒙脱石等黏土矿物上的吸附行为研究. 岩石矿物学杂志, 28(6): 643~648.

Paleo-sedimentary environmental conditions and its significance of Chang 4+5 Member of Triassic Yanchang Formation in the Zhenbei area, Ordos basin, NW China

LIU Xin^{1,2,3)}, SHANG Ting⁴⁾, TIAN Jingchun^{* 1)}, WANG Feng¹⁾, LIU Baojun¹⁾,
ZHANG Xiaolei^{2,3)}, XU Zhi^{2,3)}

1) *Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;*

2) *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China;*

3) *Exploration & Development Research Institute of Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;*

4) *Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment (Ministry of Education), East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China*

** Corresponding author: tjc@cdut.edu.cn*

Abstract

Paleo-sedimentary environment of Chang 4 + 5 Member of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos basin, including the paleosalinity, paleotemperature, Paleobathymetric, paleoclimate and paleoredox conditions were restored through geochemical element analysis of 47 mudstone samples collected from the outcrop sections around and wells drilled in the basin and using a series of identification indexes of paleo-climate, paleo-salinity and paleo-redox conditions, such as Sr/Ba, Th/U, Rb/K, boron (B) method, cobalt (Co) method, δU , $V/(V+Ni)$, V/Cr , Ni/Co , Ce/Ce^* , Eu/Eu^* , Sr/Cu , Mg/Ca and other element ratios. Comprehensive analysis shows that in sedimentary period of the Chang 4 + 5 Member, the paleo-temperature ranged from 14.5°C to 24.6°C, with a semi-humid-semi-dry temperate subtropical climate. the paleosalinity was continental brackish water environment, between 0.49‰ ~ 3.7‰. the paleo water-temperature was about 8.9~11.9°C, the palaeo water-depth ranged from 10 m to 85 m, and the sediments were formed under weak reduction-oxidation conditions. Compared with the sedimentary period of Chang 7 Member, although dark mudstone is developed in Chang 4+5 Member, due to the obvious change of environmental conditions, the increase of air temperature leads to the increase of water temperature and salinity, which ultimately affects the development and preservation of organic matter and is not conducive to the formation of effective source rocks in this period.

Key words: Paleo-sedimentary environmental conditions; Zhenbei area; Triassic Yanchang Formation; Ordos basin