

文章编号:1000-0550(2017)06-1265-09

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.06.017

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

王峰¹,刘玄春¹,邓秀芹²,李元昊²,田景春¹,李士祥²,尤靖茜³

- 1.成都理工大学沉积地质研究院,成都 610059
- 2.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,西安 710021
- 3.中国石油长庆油田分公司数字化与信息管理部,西安 710021

摘要 沉积岩中的微量元素对沉积环境的水介质变化有着较高的敏感度,是研究沉积物沉积时的古气候、古环境的有效手段。鄂尔多斯盆地纸坊组是三叠系具有油气显示的新层系,其古气候及古水体环境对于恢复该时期盆地沉积格局、重建古地理及成藏研究具有重要意义。采用 ICP-MS 对鄂尔多斯盆地纸坊组剖面及岩芯 21 件泥岩及粉砂岩样品进行了微量元素测试,选择对沉积环境介质较为敏感的锶(Sr)、钡(Ba)、钍(Th)、铀(U)、钒(V)、镍(Ni)、钴(Co)等元素作为判别指标,并结合沉积学标志及孢粉分析,对鄂尔多斯盆地纸坊组沉积环境及古气候特征进行研究。结果表明:通过 Li、Sr、Ni、Ga 含量及 Sr/Ba 值判别研究区为淡水—微咸水沉积环境;U/Th 值分布在 0.09~0.38,δU 值分布在 0.43~1.07,V/(V+Ni) 值分布在 0.69~0.89,V/Cr 值分布在 0.87~5.57、Ni/Co 值分布在 1.21~2.93,指示水体分层不强的氧化—弱还原过渡环境;纸坊组水体深度平均深度小于 30 m,大型“汇水”湖泊尚未形成;Sr/Cu 比值在 0.85~16.7 之间,大部分小于 10,仅个别值大于 10,表明纸坊组古气候已由和尚沟组干热气候趋于温暖气候。

关键词 古盐度;氧化还原条件;古水深;古气候;微量元素;纸坊组;鄂尔多斯盆地

第一作者简介 王峰,男,1977 年出生,博士,副教授,沉积学,E-mail: wangfeng07@cdut.cn

中图分类号 P595 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

鄂尔多斯盆地是华北古生代克拉通台地之上的中、新生代大型陆内叠合盆地^[1-3],盆地内中生代地层记录完整,其中三叠系是重要的油气资源富集层系。前人对于该层系的研究主要集中在上三叠统延长组,而对下伏中三叠统纸坊组以往的研究认为是一套红色沉积,油气成藏条件较差,长期被油气勘探界所忽视,其主要的研究仅仅是围绕盆地周缘地表露头剖面进行了地层研究,涉及到盆地内部探井资料较少,研究程度总体较低。然而,近年来的野外资料显示,在渭北地区存在“黑纸坊”暗色泥岩,地表露头剖面也发现含油显示,勘探前景值得重新审视。同时,三叠纪是世界性的地质事件转换期,该时期扬子板块和华北板块拼接造山^[4],秦岭洋逐渐消亡,沉积环境由海陆过渡相向陆相环境转变。因此,中三叠统纸坊组既是构造演化也是沉积环境变迁的关键层位。

但对于该层系的研究只是根据勘探需要进行了

地层划分,对于其沉积格局及古地理面貌、特别是该时期内部沉积环境介质条件、古气候变化、湖盆水体分布范围以及沉积中心的位置尚缺乏相关研究,这些都是纸坊组沉积环境分析中存在的问题。沉积岩中的微量元素及其含量对沉积环境的水介质变化有着较高的敏感度,可以为古环境、古气候的变迁提供可靠信息^[5]。因此,在野外剖面观测及岩芯观察基础上,通过采集样品的微量元素地球化学指标在平面上的变化,结合沉积学标志及孢粉组合试图恢复盆地纸坊组古盐度、氧化还原条件、古水深及古气候特征,进而通过沉积环境的变迁分析沉积格局的演化。论文的开展对于鄂尔多斯盆地中生界沉积格局的恢复以及盆地油气远景勘探具有重要的理论及现实意义。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,盆地周边活动性较强,盆地内部则相对稳定。研究区位于盆地中部,横跨西缘逆冲带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶

收稿日期:2017-02-15;收修改稿日期:2017-05-07

基金项目:国家科技重大专项专题(2016ZX05046-005-001);四川省教育厅重点项目(16ZA0103)[Foundation: National science and Technology Major Special Project, No. 2016ZX05046-005-001; Key Projects in Sichuan Province Department of Education, No. 16ZA0103]

带及渭北隆起五个构造单元(图1)。区域资料表明,华北板块从晚二叠世开始呈逆时针旋转,与扬子板块发生剪刀状自东向西拼合。勉略洋向北俯冲,鄂尔多斯盆地南缘处于板块汇聚背景下大活动大陆边缘构造环境,中三叠统纸坊组沉积期鄂尔多斯盆地受秦岭造山带演化的控制,盆地南缘的挤压构造活动逐渐增强,直至晚三叠世延长组沉积期,南北秦岭之间残余洋全部闭合,盆地南部进入陆—陆碰撞的全面造山阶段^[6-7]。古地磁的研究表明,二叠系—三叠系末,鄂尔多斯盆地发生过40°左右的逆时针方向旋转,这种旋转与同期华北块体的旋转相协调;从二叠系初到三叠系末,古纬度从N16.3°变为N32.7°,华北块体(鄂尔多斯盆地)的逐渐北向运动的规律^[8]。古构造及古纬度变化规律成为古气候变化的主导因素,随着盆地南部构造活动的增强及华北板块整体的北移,纸坊组的气候逐渐由早期干旱向潮湿转变,盆地沉积面貌表现出古生物的繁茂,岩石颜色的由紫灰色、淡红色向灰绿色过渡等一系列的变化特征。根据野外露头剖面、钻井岩芯资料及其测井相资料分析认为纸坊组沉积期盆地内发育冲积扇、河流、湖泊三角洲、滨浅湖等沉积相类型,湖盆古地形平坦开阔,水体较浅,仅南部铜川、耀县局部地区存在相对洼陷,大型“汇水”湖泊

尚未形成(图1)。

2 地层和岩石

中三叠统纸坊组,由甘克文、姚长保命名,标准剖面位于铜川纸坊村附近。该组地层与下伏和尚沟组整合接触或平行不整合接触(图2a,b),与上覆与延长组在盆地边缘为角度不整合,在盆地内部渐变为平行不整合或连续沉积(图2c,d)^①。地层分布具有北薄南厚的特征,大致以定边—靖边—子长一线为界,北部地层厚度稳定,一般200~300 m,以紫红色、紫灰色为主,南部地层厚度变化大,厚度一般400~800 m,在正宁—铜川一带地层厚度超过800 m,以灰绿色、暗灰色为主。按照沉积旋回和岩性组合,盆地内部纸坊组在垂向上分上下两个岩性段,下段表现为紫红色、灰紫色、深灰色粉砂质泥岩与紫灰色、淡红色、灰绿色、黄绿色细砂岩不等厚互层;上段表现为灰绿、黄绿色、棕红色中细砂岩与深灰色、灰黑色、紫红色粉砂质泥岩不等厚互层(图2e,f)。纸坊组岩石类型多样,主要为陆源碎屑岩。其中,盆地北缘、西北缘及西缘以含砾粗砂岩及粗砂岩为主,盆地东部以中细砂岩为主,盆地南缘以细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩为主,岩石粒度整体呈现出北粗南细的特点。

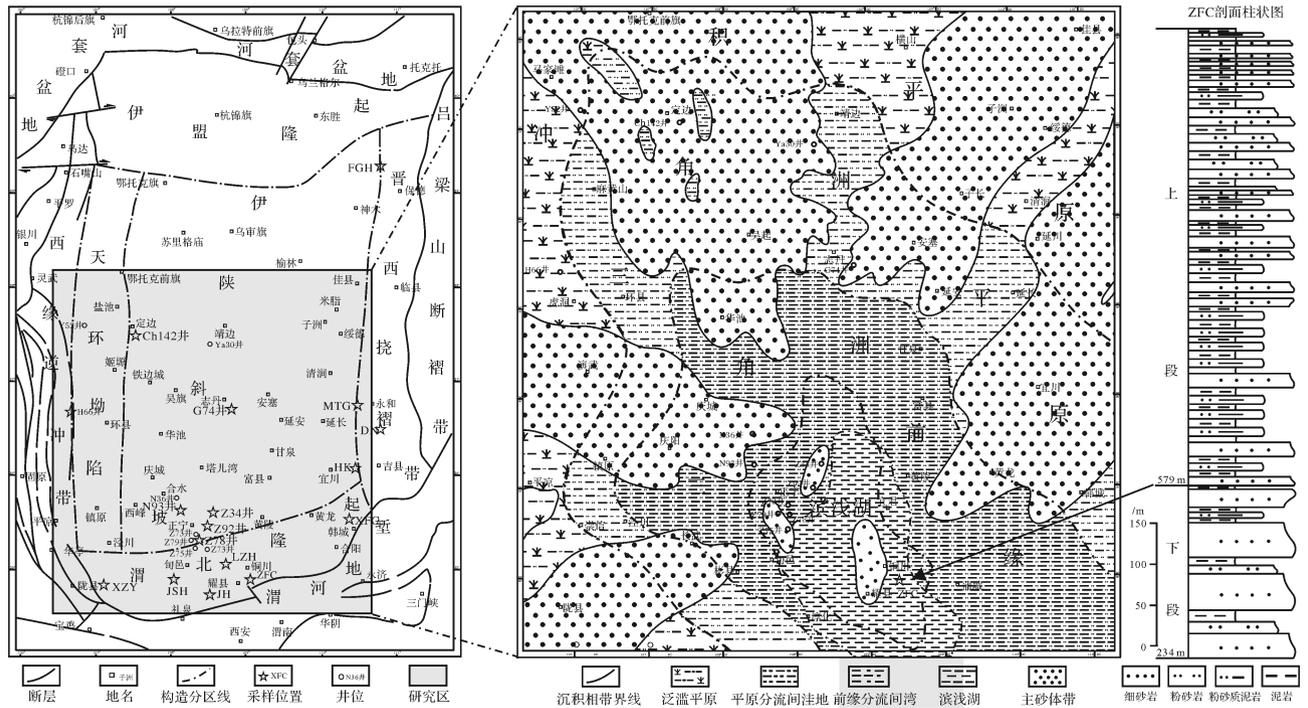


图1 研究区区域构造位置、样品分布及沉积环境图

Fig.1 Regional tectonic location, sample distribution and sedimentary environment map of the study area

①史秉德,陕西的三叠系,陕西生地质矿产局区调队综合分队,1985:15-23.

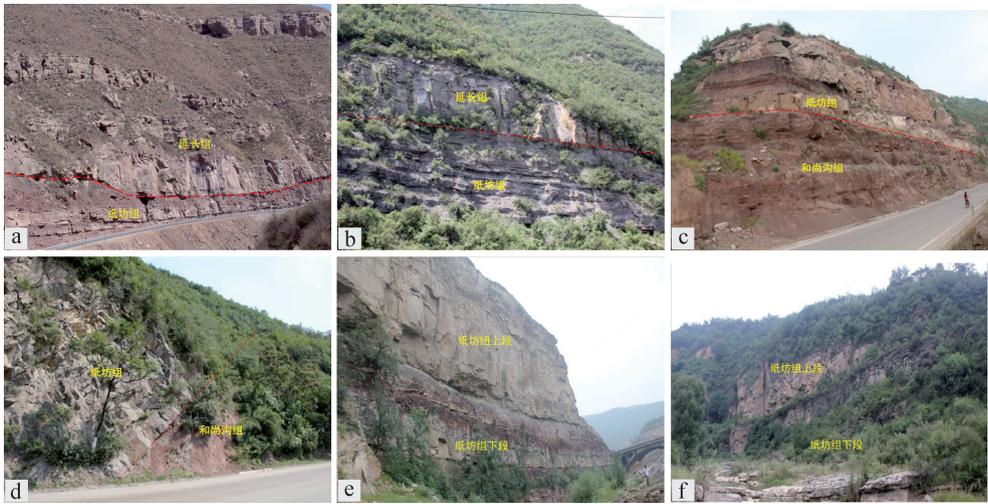


图2 纸坊组地层发育特征

a.纸坊组紫红色泥岩与上覆长10灰绿色厚层砂岩不整合接触,宜川HK剖面;b.纸坊组紫红色泥岩与上覆长10灰绿色厚层砂岩整合接触,铜川ZFC剖面;c.纸坊组底部淡红色砂岩与和尕沟组紫红色泥岩假整合接触,山西DN剖面;d.纸坊组灰色中砂岩与和尕沟组紫红色泥岩假整合接触,铜川纸坊村剖面;e.纸坊组内部上段与下段分界,府谷FGH剖面;f.纸坊组内部上段与下段分界,陇县XZY剖面

Fig.2 Development features of Zhifang Strata

3 样品采集与分析方法

论文研究所有样品均来自于鄂尔多斯盆地周缘11条野外剖面及7口盆地内部钻井岩芯,共采集样品21件,其中野外剖面样品13件,钻井岩芯样品8件,详细采样位置见图1。取样过程中,尽量选择风化蚀变及成岩作用弱的新鲜样品,样品岩性为泥岩或粉砂质泥岩,在最大程度上减少或消除机械分异对沉积物成分的影响以及取样差异带来的倾向^[9]。地球化学分析样品的预处理是先将岩石样品用清水冲洗、烘干,用陶瓷研钵初步研磨后去除样品中的粗碎屑颗粒,再将其中的泥质岩用玛瑙研钵破碎,用标准分样筛筛过后保留小于200目的样品,送样至中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心采用ICP-MS质谱仪测试完成,测试分析结果见表1。孢粉样品由中国地质科学院水文地质环境地质研究所分析完成,样品在实验室里经过酸、碱等化学处理,换水清洗到中性后,用比重为2.1以上的重液在离心机上离心浮选,再经冰乙酸水稀释、集中,纯净水清洗至中性后制到试管,最后制活动玻片在生物显微镜下进行观察、鉴定、统计。

4 讨论

4.1 古盐度

古盐度是古代沉积物中水体盐度的记录,可作为

分析地质历史中沉积环境特征的一个重要信息。有关古盐度判别的方法众多,如应用古生物、常量同位素和微量元素地球化学方法定量划分水体盐度等^[10-13]。本次研究主要采用微量元素含量及比值对纸坊组沉积期湖盆古盐度进行分析。

4.1.1 微量元素含量

沉积盆地基本的地球化学环境,对元素的分布起主要的控制作用,并且表现出微量元素分布的规律性。其中,Li、Sr、Ni、Ga的元素含量对水体盐度的变化均有较好的指示作用,Li含量大于150 μg/g,Sr含量介于800~1 000 μg/g,Ni含量大于40 μg/g,Ga含量小于8 μg/g,指示盐水(海相)沉积环境,Li含量小于90 μg/g,Sr含量介于100~500 μg/g,Ni含量介于20~25 μg/g,Ga含量大于17 μg/g,指示淡水(陆相)沉积环境^[11]。对研究区21件岩石样品统计(表1),Li含量为7.58~54.87 μg/g,平均31.38 μg/g,所有值小于90 μg/g;Sr含量为72.33~390.34 μg/g,平均为209.79 μg/g,所有值均小于500 μg/g;Ni含量为6.93~60.51 μg/g,平均30.00 μg/g,仅个别值大于40 μg/g;Ga含量为7.46~28.23 μg/g,平均19.85 μg/g,仅个别值小于8 μg/g,通过Li、Sr、Ni、Ga含量判断盆地纸坊组总体属于淡水—微咸水沉积环境。

4.1.2 Sr/Ba 比值法

锶钡比值作为沉积物沉积时水体盐度的一种常用的判定指标^[14-17]。通常锶比钡的溶解度更大,具

表1 鄂尔多斯盆地中三叠统纸坊组微量元素测试分析结果(单位: $\mu\text{g/g}$)

Table 1 Analysis of the test results of trace element of the middle Triassic Zhifang Formation in Ordos Basin

样品号	岩性		Li	Sr	Ni	Ga	Sr/Ba	Sr/Cu	U/Th	δU	V/(V+Ni)	V/Cr	Ni/Co
FGH-01	紫红色泥岩	府谷地区	22.23	159.04	25.08	21.73	0.42	6.34	0.09	0.43	0.69	0.87	2.28
FGH-02	紫红色泥岩		28.18	160.98	13.37	25.27	0.46	4.26	0.21	0.77	0.89	2.25	2.26
MTG-01	紫红色泥岩	延长地区	24.25	156.34	21.25	14.93	0.56	3.08	0.29	0.94	0.77	1.49	2.00
DN-01	紫红色泥岩		7.58	100.05	6.93	22.30	0.92	3.31	0.07	0.36	0.89	3.77	1.21
HK-01	紫红色泥岩	宜川地区	34.26	185.10	24.54	19.55	0.37	5.93	0.13	0.58	0.88	1.15	2.00
HK-02	紫红色泥岩		47.10	240.83	43.38	25.32	0.41	2.64	0.20	0.75	0.76	1.48	2.09
XFC-01	灰黑色泥岩	韩城地区	28.99	331.91	31.97	19.63	0.46	8.40	0.22	0.80	0.71	1.02	2.07
JH-01	灰黑色泥岩	铜川地区	46.61	211.65	39.14	24.41	0.33	1.83	0.28	0.91	0.74	1.18	2.93
LZH-01	灰黑色泥岩		50.00	145.85	40.56	21.38	0.19	2.89	0.26	0.88	0.73	1.35	2.46
LZH-02	灰黑色泥岩		44.22	126.29	37.23	23.55	0.48	2.14	0.22	0.80	0.77	1.49	1.94
ZFC-01	灰黑色泥岩		38.46	196.22	39.89	20.60	0.59	4.99	0.23	0.82	0.73	1.14	2.29
JSH-01	灰黑色泥岩	旬邑地区	19.23	115.71	60.51	14.13	0.27	0.85	1.55	1.65	0.81	5.57	2.75
XZY-01	紫红色粉砂质泥岩	陇县地区	18.09	156.75	9.72	15.27	0.34	15.91	0.17	0.68	0.83	1.45	2.35
Ch142	紫红色粉砂质泥岩	定边地区	47.39	368.14	43.76	21.89	0.51	3.89	0.19	0.73	0.75	1.42	2.39
G74	灰黑色泥岩	志丹地区	32.03	274.92	42.09	28.23	0.44	3.36	0.17	0.69	0.79	1.37	2.46
H66	紫红色粉砂质泥岩	环县地区	15.77	206.28	8.40	11.86	0.30	16.07	0.21	0.78	0.77	0.99	1.90
N93	灰黑色泥岩	西峰地区	54.87	390.34	40.51	26.12	0.14	6.30	0.27	0.90	0.77	1.38	1.55
Z34	灰黑色泥岩	正宁地区	23.18	373.45	34.25	20.55	0.73	9.77	0.22	0.79	0.74	1.13	2.19
Z78	灰黑色泥岩		49.42	359.15	49.47	25.13	0.50	4.24	0.38	1.07	0.72	1.24	2.58
Z92-01	灰黑色泥岩		13.45	74.27	8.82	7.63	0.13	7.95	0.22	0.79	0.81	1.51	1.58
Z92-02	灰黑色泥岩		13.59	72.33	9.04	7.46	0.12	7.71	0.17	0.67	0.80	1.39	1.51

注:样品由中科院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心测试完成,测试仪器为 ICP-MS

体表现为锶的迁移能力要强于钡,随着水体盐度的增加,锶和钡逐渐从水体中以硫酸盐的形式析出,其中, BaSO_4 优先析出,当盐度达到一定高值时, SrSO_4 才析出。因此,陆相淡水环境下,锶和钡一般不发生沉淀,沉积物中锶钡比值很低;陆相淡水入海(湖)后,一部分钡优先析出,此时无锶元素析出,锶钡比值也很低;锶钡继续往深海(湖)方向(盐度逐渐增大)迁移时,钡由于持续沉淀,导致其含量逐渐降低,锶此时开始沉淀,沉积物中锶钡比值会发生明显的急剧增大的趋势,故以此来判断沉积环境的盐度是可行的。一般认为, Sr/Ba 比值大于 1.0 为海相咸水,小于 0.6 为陆相淡水,水介于 0.6~1 之间为半咸水相^[18]。论文通过对研究区纸坊组 21 件样品进行微量元素分析表明, Sr/Ba 值介于 0.12~0.92,平均值为 0.41,所测数据平均值小于 0.6,仅个别数据大于 0.6(表 1),由此推断研究区纸坊组沉积期主要为陆相淡水环境,仅局部为半咸水环境。

4.2 氧化—还原条件

微量元素的比值可以有效的指示沉积环境的氧化—还原条件。本文主要通过 U/Th 比值及 δU 法, V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co 法对研究区纸坊组氧化—还原条件进行判断。

4.2.1 U/Th 比值法和 δU 法

铀、钍等放射性元素常常赋存于泥质岩中,近年来,国内外学者先后对自然伽马能谱测井方法恢复古环境进行了研究,并取得了一定的效果。铀元素性质活跃,容易被氧化和淋滤丢失,迁移能力往往较强;钍元素作为惰性元素,迁移能力较弱,通常吸附在细粒沉积物中。因此,可利用 U/Th 比值和 δU 法判断沉积环境的氧化—还原状态。氧化环境中 U/Th 比值较低,一般小于 0.75,还原环境中 U/Th > 1.25; δU 法的关系为: $\delta\text{U} = \text{U}/[0.5 \times (\text{Th}/3 + \text{U})]$,正常水体环境中 $\delta\text{U} < 1$,缺氧还原环境中, $\delta\text{U} > 1$ ^[19-22]。论文结合微量元素分析结果(表 1), U/Th 值介于 0.09~0.38,比值均小于 0.75, δU 值介于 0.43~1.07,平均值 0.79,大部分值小于 1,仅个别值大于 1,根据判别指标,纸坊组沉积环境总体为氧化—弱还原环境。

4.2.2 V/(V+Ni) 比值法、V/Cr 比值法及 Ni/Co 比值法

V、Ni、Cr 等微量元素主要被胶体质点或黏土等吸附沉淀, V 在还原条件下易被吸附, Ni、Cr、Co 在还原环境下易于富集,因此元素 V/(V+Ni)、V/Cr 及 Ni/Co 比值可指示沉积水体的氧化还原环境。前人研究表明:厌氧还原环境中, V/(V+Ni) > 0.84,介于 0.84~0.89, V/Cr 值及 Ni/Co 值分别大于 4.25 及 7;

水体分层不强的厌氧环境及亚还原环境中, $V/(V+Ni)$ 值介于 0.60~0.84, V/Cr 及 Ni/Co 分别在 2.00~4.25 及 5~7 之间; 氧化环境中, $V/(V+Ni) < 0.60$, V/Cr 及 Ni/Co 分别小于 2.00 及 5^[23-27]。论文通过对 21 件样品微量元素结果分析结果(表 1), $V/(V+Ni)$ 值为 0.69~0.89, 平均值 0.78, 比值小于 0.84, V/Cr 值 0.87~5.57, 平均值 1.65, 比值均小于 2, Ni/Co 值 1.21~2.93, 平均值 2.13, 比值均小于 5, 根据判别指标, 指示研究区纸坊组沉积水体为分层不强的氧化—弱还原过渡环境。

4.3 古水深

古水深的恢复可以借助岩性、沉积构造、古生物资料综合判断。同时现代沉积物元素地球化学研究表明, 由于元素在沉积作用中所发生的分异作用, 使元素的聚集和分散与离岸距离有一定的关系^[28], 运用这一性质也可以判断古水深。

4.3.1 沉积学标志判断古水深

利用岩性、沉积构造、生物遗迹均可对古水深进行判断。沉积物的分布及岩性与古水深有一定的关系^[29]。一般而言, 沉积水体由浅变深, 沉积物中砂质含量会逐渐减少而黏土质含量会随之增加。沉积构造是反映水体深度及动力学的良好标志^[30], 浅水地区层理类型多样, 大型交错层理、波痕及冲刷侵蚀现象常见, 若沉积物暴露地表, 干裂、雨痕、细流痕等是常见的层面构造; 深水—较深水区主要形成微细水平层理, 连续韵律发育; 在缺少遗体化石的沉积环境中,

可采用遗迹化石, 如潜穴、足迹、爬痕和其他生物扰动构造确定相对古水深, 在湖滨近陆一侧的外滨湖区, 潜水面变动较大, 生物潜穴也随之发生变化; 当潜水面下降时, 生物潜穴形态由近水平状。研究区纸坊组岩性以淡红色—灰绿色砂岩砂岩、紫红色—深灰色粉砂岩为主, 大型交错层理及波痕发育, 常见芦木化石、植物化石茎秆及垂直生物虫孔(图 3), 这些沉积学特征反映出纸坊组以氧化—弱还原的浅水环境为主, 大部分地区水深应小于 25 m。

4.3.2 钴元素含量分析古水深

利用钴元素含量可以定量计算出纸坊组沉积期古水深, 此方法主要通过测定沉积岩样品中钴(Co)元素的含量来推算当时岩石的沉积速率, 进而计算样品沉积时的古水体深度^[31-32], 具体计算公式如下:

$$V_s = V_0 \times N_{Co} / (S_{Co} - t \times T_{Co}) \quad (1)$$

$$t = S_{La} / N_{La} \quad (2)$$

$$h = 3.05 \times 10^5 / (V_{s1.5}) \quad (3)$$

式中, V_s 为某样品沉积时的沉积速率; V_0 为当时正常湖泊沉积速率(0.2~0.4 mm/a)^[33]; N_{Co} 为正常湖泊沉积物中的钴的丰度(20 $\mu\text{g/g}$); S_{Co} 为样品中钴的丰度($\mu\text{g/g}$); t 为物源钴(Co)对样品的贡献值; S_{La} 为样品中镧的丰度($\mu\text{g/g}$); N_{La} 为陆源碎屑岩中镧的平均丰度(38.99 $\mu\text{g/g}$); T_{Co} 为陆源碎屑岩中钴的丰度(4.68 $\mu\text{g/g}$); h 为古水深(m)。

泥岩的沉积能较好反映沉积环境的古水体深度, 相带不同沉积物的沉积速率不同^[33]。本文以滨浅湖

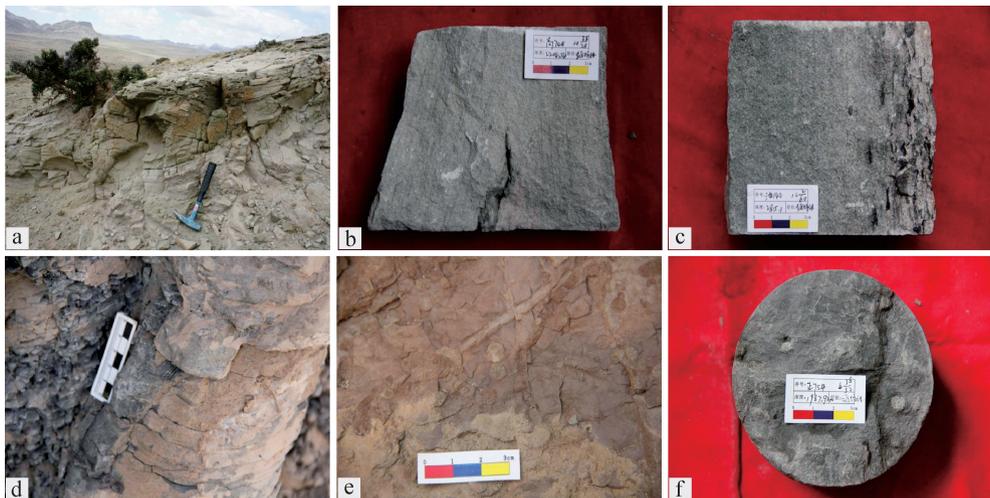


图3 纸坊组沉积构造及古生物标志

a. 肉红色砂岩, 发育契状交错层理, 山西 DN 剖面, 纸坊组; b. 灰色砂岩发育契状交错层理, H66 井, 2 204.54 m, 纸坊组; c. 冲刷面及正粒序层理, CH142 井, 2 815.1 m, 纸坊组; d. 芦木化石, 旬邑 JSH 剖面, 纸坊组; e. 植物化石茎秆及垂直生物虫孔, 宜川 HK 剖面, 纸坊组; f. 粉砂岩中垂直虫孔, 275 井, 1 987.92 m, 纸坊组

Fig.3 Sedimentary structure and palaeontology of the Zhifang Formation

沉积速率 0.2 mm/a, 三角洲前缘 0.3 mm/a, 河流沉积速率 0.4 mm/a 来计算纸坊组沉积古水深。通过对研究区 21 个泥岩及粉砂质泥岩样品进行微量元素含量测定, 并将测得的钴 (Co) 元素和镧 (La) 元素含量带入上述公式进行纸坊组古水深定量计算 (表 2)。计算结果表明, 研究区纸坊组古水深在 5.19 ~ 105.28 m, 平均水深为 29.64 m, 研究区北部水体深度较浅, 一般小于 25 m; 南部水体较深, 通常大于 40 m。Z78-Z34 井附近沉积粒度最细, 水体较深, 平均深度大于 60 m, 研究区纸坊组古地形平坦开阔, 湖盆总体分布局限, 水体较浅, 仅南部正宁、铜川局部地区存在相对洼陷, 深度可大于 60 m, 且主要分布在盆地南部, 大型汇水湖泊尚未形成。

4.4 古气候

古气候研究可以依据沉积岩中所存在的某些具有特征的岩石和标志, 及其所含古生物化石来进行, 也可采用古地磁学和碳氧同位素等地质学方法^[11-12]。本次研究主要采用微量元素比值法、孢粉分析、钙质结合成因分析等方法综合判断纸坊组沉积期古气候特征。

4.4.1 Sr/Cu 比值法

沉积物中微量元素受古沉积气候影响, 不同的元

素在特定的环境下可以保存下来, 其中: 喜湿型元素为: Cr、Ni、Mn、Cu、Fe、Ba、Br、Co、Cs、Hf、Rb、Sc、Th; 喜干型元素为: Sr、Pb、Au、As、Ca、Na、Ta、U、Zn、Mg、Mo、B。喜干型元素 (Sr) 与喜湿型元素 (Cu) 的比值可以反映古气候, Sr/Cu < 10 指示温湿气候, Sr/Cu > 10 指示干热气候^[34]。研究区 21 个泥岩及粉砂质泥岩样品 Sr/Cu 比值为 0.85 ~ 16.7 之间, 平均值 5.8, 结果显示大部分小于 10, 仅个别值大于 10 (表 1), 反映出纸坊组沉积期, 古气候已由和尚沟期干热气候趋于温暖气候。

4.4.2 孢粉分析反映出的古气候特征

孢粉分析是古气候与古环境恢复方法之一。孢粉组合反映了植物群落的面貌, 而植物的生长、发育、繁盛、衰落都和一定的气候环境有着密切的关系, 因此对化石孢粉可能母体植物及其生长环境的分析研究可推测当时的古植被和古气候^[35-36]。本次研究主要是选取鄂尔多斯盆地纸坊组 2 条剖面共 7 件泥岩样品在中国地质科学院水文地质环境地质研究所进行孢粉分析。共统计陆生植物花粉 1 865 粒, 孢粉总浓度平均为 111 粒/克, 共发现并鉴定了 40 个科属的植物花粉。其中包括 15 个科属的乔木植物花粉, 3 个科属的灌木植物花粉, 18 个科属的草本植物花粉,

表 2 研究区纸坊组泥岩样品古水深参数表

Table 2 The ancient water depth data tables of mudstone samples of the Zhifang Formation in the study area

样品号	岩性		V_0	S_{Co}	S_{La}	V_s	h
FGH-01	紫红色泥岩	府谷地区	0.4	11.0	47.7	1.51	5.19
FGH-02	紫红色泥岩		0.4	5.91	13.5	1.86	3.79
MTG-01	紫红色泥岩	延长地区	0.4	10.6	26.9	1.08	8.61
DN-01	紫红色泥岩		0.4	5.74	20.5	2.44	2.53
HK-01	紫红色泥岩	宜川地区	0.4	12.3	78.9	2.84	2.02
HK-02	紫红色泥岩		0.4	20.8	41.7	0.51	26.65
XFC-01	灰黑色泥岩	韩城地区	0.4	15.5	38.6	0.74	15.21
JH-01	灰黑色泥岩	铜川地区	0.2	13.4	42.9	0.49	28.37
LZH-01	灰黑色泥岩		0.2	16.5	42.0	0.35	46.69
LZH-02	灰黑色泥岩		0.2	19.2	43.4	0.29	63.09
ZFC-01	灰黑色泥岩		0.4	17.4	40.1	0.63	19.14
JSH-01	灰黑色泥岩	旬邑地区	0.4	22.0	23.1	0.42	35.88
XZY-01	紫红色粉砂质泥岩	陇县地区	0.4	14.14	39.0	0.85	12.41
Ch142	紫红色粉砂质泥岩	定边地区	0.4	18.3	41.1	0.60	20.90
G74	灰黑色泥岩	志丹地区	0.4	17.1	51.7	0.73	15.33
H66	紫红色粉砂质泥岩	环县地区	0.4	14.41	31.4	0.75	14.79
N93	灰黑色泥岩	西峰地区	0.3	15.7	44.7	0.58	21.69
Z34	灰黑色泥岩	正宁地区	0.2	26.1	53.2	0.20	105.58
Z78	灰黑色泥岩		0.2	19.2	48.1	0.30	59.17
Z92-01	灰黑色泥岩		0.2	15.57	19.0	0.30	58.36
Z92-02	灰黑色泥岩		0.2	16.00	24.3	0.31	57.01

注: 样品由中科院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心测试完成, 测试仪器为 ICP-MS

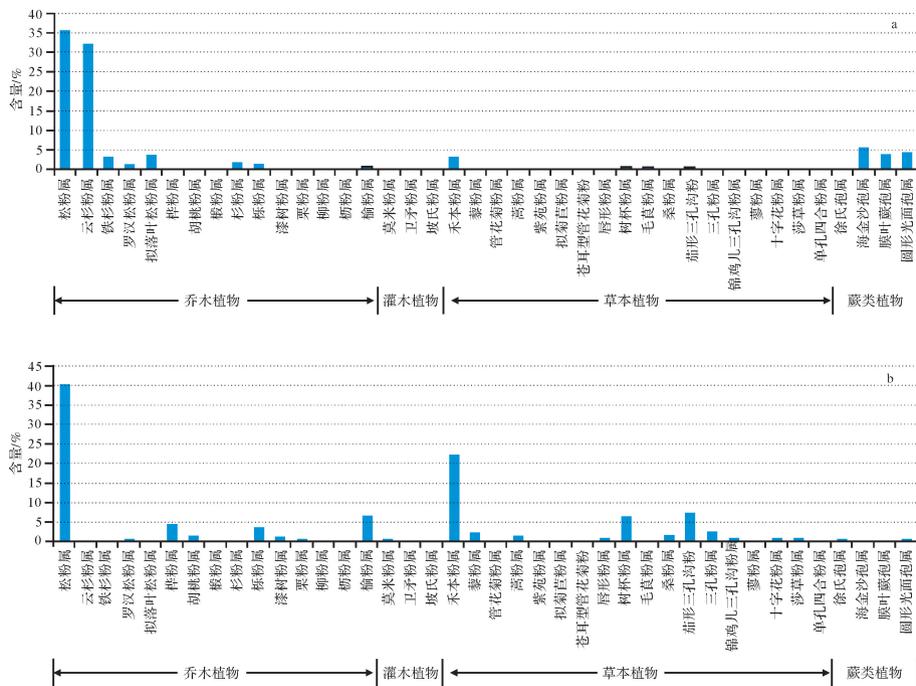


图4 鄂尔多斯盆地纸坊组孢粉含量

a.旬邑 JSH 剖面; b.山西 DN 剖面

Fig.4 Variation of the sporopollen content of the Zhifang Formation in Ordos Basin

4个科属的蕨类孢子。孢粉组合中乔木植物花粉占据优势,草本植物花粉次之,灌木花粉和蕨类孢子零星出现(图4)。从数据分析推测中三叠统纸坊组沉积期,研究区高山区分布着松属、云杉属为主的针叶林,林下生长着海金沙等蕨类植物;低山区附近分布着栎属、榆属、桦属等阔叶林;平原区草本植物覆盖率较低,以禾本科、茄科、蒿属等草本植物为主,表现出温暖湿润特征。纸坊组古气候特征与三叠系构造环境演化具有很好的一致性,表明该时期古气候已由和尚沟组干热气候转为暖湿气候。

5 结论

通过纸坊组泥岩和粉砂质泥岩样品的微量元素测定,结合沉积学标志及孢粉分析,讨论了古盐度、氧化还原条件、古水深、古气候条件的发育特征,并得出以下结论:

(1) 利用微量元素含量及比值对纸坊组沉积期湖盆古盐度、氧化—还原条件进行分析,结果显示纸坊组水体总体为淡水—微咸水,属于水体分层不强的氧化—弱还原过渡环境。

(2) 通过沉积学标志及 Co 元素定量计算,显示纸坊组古水体深度介于 5.19~105.28 m,平均水深为 29.64 m,研究区湖盆总体分布局限,且主要分布在盆

地南部,大型汇水湖泊尚未形成。

(3) 利用微量元素比值 Sr/Cu 值结合孢粉分析,综合判断纸坊组沉积期古气候已由和尚沟组干热气候转为温湿气候。

参考文献 (References)

[1] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社, 2002: 130-181. [Yang Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 130-181.]

[2] 吴智平,侯旭波,李伟. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(4): 385-399. [Wu Zhiping, Hou Xubo, Li Wei. Discussion on Mesozoic basin patterns and evolution in the eastern North China Block[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(4): 385-399.]

[3] 王峰,田景春,范立勇,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积充填演化及其对印支构造运动的响应[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 882-889. [Wang Feng, Tian Jingchun, Fan Liyong, et al. Evolution of sedimentary fillings in Triassic Yanchang Formation and its response to Indosinian movement in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 882-889.]

[4] 杨友运. 印支期秦岭造山活动对鄂尔多斯盆地延长组沉积特征的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 7-9. [Yang Youyun. Influence of Qinling Orogenic movements in indo-Chinese epoch to sedimentary characteristics of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(5): 7-9.]

- [5] Rimmer S M, Thompson J A, Goodnight S A, et al. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 215(1/2): 125-154.
- [6] 余和中, 吕福亮, 郭庆新, 等. 华北板块南缘原型沉积盆地类型与构造演化 [J]. *石油实验地质*, 2005, 27(2): 111-117. [Yu Hezhong, Lv Fuliang, Guo Qingxin, et al. Proto-sediment basin types and tectonic evolution in the southern edge of North China Plate [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(2): 111-117.]
- [7] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征 [J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(3): 193-200. [Zhang Guowei, Meng Qingren Yu Zaiping, et al. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen [J]. *Science in China (D Series: Earth Science)*, 1996, 39(3): 225-234.]
- [8] 吴汉宁, 朱日祥, 刘椿, 等. 华北地块晚古生代至三叠纪古地磁研究新结果及其构造意义 [J]. *地球物理学报*, 1990, 33(6): 694-700. [Wu Hanning, Zhu Rixiang, Liu Chun, et al. Paleomagnetic observations in North China Block: from late Paleozoic to Triassic [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1990, 33(6): 694-700.]
- [9] McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics [C]//Johnson M J, Basu A. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Boulder, CO: Geological Society of America, 1993, 284: 21-40.
- [10] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述 [J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10(5): 1-3. [Li Jinlong, Chen Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(5): 1-3.]
- [11] 田景春, 张翔. 沉积地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2016: 63-77. [Tian Jingchun, Zhang Xiang. *Sedimentary geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 66-77.]
- [12] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 95-104. [Deng Hongwen, Qian Kai. *Sedimentary geochemistry and environment analysis* [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 95-104.]
- [13] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究 [J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(1): 20-25. [Zheng Rongcai, Liu Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 20-25.]
- [14] 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析 [J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1): 114-120. [Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Tang Fei, et al. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 Member in the Gengwan region, Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008, 28(1): 114-120.]
- [15] 王敏芳, 焦养泉, 王正海, 等. 沉积环境中古盐度的恢复: 以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例 [J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(6): 419-422. [Wang Minfang, Jiao Yangquan, Wang Zhenghai, et al. Recovery paleosalinity in sedimentary environment: An example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan-Hami Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(6): 419-422.]
- [16] 许璟, 蒲仁海, 杨林, 等. 塔里木盆地石炭系泥岩沉积时的古盐度分析 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(3): 509-517. [Xu Jing, Pu Renhai, Yang Lin, et al. The palaeosalinity analysis of carboniferous mudstone, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3): 509-517.]
- [17] 钱利军, 陈洪德, 林良彪, 等. 四川盆地西缘地区中侏罗统沙溪庙组地球化学特征及其环境意义 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 1061-1071. [Qian Lijun, Chen Hongde, Lin Liangbiao, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of middle Jurassic Shaximiao Formation, western margin of Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(6): 1061-1071.]
- [18] 王益友, 吴萍. 江浙海岸带沉积物的地球化学标志 [J]. *同济大学学报*, 1983(4): 79-87. [Wang Yiyu, Wu Ping. Geochemical criteria of sediments in the coastal area of Jiangsu and Zhejiang provinces [J]. *Journal of Tongji University*, 1983(4): 79-87.]
- [19] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [20] Kimura H, Watanabe Y. Ocean anoxia at the Precambrian—Cambrian boundary [J]. *Geology*, 2001, 29(11): 995-998.
- [21] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstone [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111-129.
- [22] 刘安, 李旭兵, 王传尚, 等. 湘鄂西寒武系烃源岩地球化学特征与沉积环境分析 [J]. *沉积学报*, 2013, 31(6): 1122-1132. [Liu An, Li Xubing, Wang Chuanshang, et al. Analysis of geochemical feature and sediment environment for hydrocarbon source rocks of Cambrian in west Hunan-Hubei area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 1122-1132.]
- [23] 李广之, 胡斌, 邓天龙, 等. 微量元素 V 和 Ni 的油气地质意义 [J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(1): 13-17. [Li Guangzhi, Hu Bin, Deng Tianlong, et al. Petroleum geological significance of microelements V and Ni [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(1): 13-17.]
- [24] Dill H. Metallogenesis of early Paleozoic graptolite shales from the Graefenthal Horst (northern Bavaria-Federal Republic of Germany) [J]. *Economic Geology*, 1986, 81(4): 889-903.
- [25] Dill H, Teschner M, Wehner H. 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 [J]. *Chemical Geology*, 1988, 67(3/4): 307-325.
- [26] Patterson J H, Ramsden A R, Dale L S, et al. Geochemistry and mineralogical residences of trace elements in oil shales from Julia Creek, Queensland, Australia [J]. *Chemical Geology*, 1986, 55(1/2): 1-16.
- [27] 金明, 李婉妮. 乌兰花地区下白垩统、上新统岩石地球化学特征及其古气候演变 [J]. *铀矿地质*, 2003, 19(6): 349-354. [Jin Ming, Li Wuwei. Petrogeochemical characteristics of lower Cretaceous and Pliocene rocks and paleoclimate evolution in Wulanhua

- region[J]. *Uranium Geology*, 2003, 19(6): 349-354.]
- [28] 陈建强,周洪瑞,王训练. 沉积学及古地理学教程[M]. 北京:地质出版社,2004. [Cheng Jianqiang, Zhou Hongrui, Wang Xunlian. *Sedimentology & palaeogeography tutorial*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.]
- [29] 赵澄林,朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社,2001. [Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. *Sedimentary petrology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.]
- [30] 张才利,高阿龙,刘哲,等. 鄂尔多斯盆地长7油层组沉积水体及古气候特征研究[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(4): 582-587. [Zhang Caili, Gao Along, Liu Zhe, et al. Study of character on sedimentary water and palaeoclimate for Chang7 oil layer in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(4): 582-587.]
- [31] 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 Zhiping, Zhou Yaoqi. Using the characteristic elements from meteoritic dust in strata to calculate sedimentation rate [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 395-399.]
- [32] 周洪瑞. 华北地台南部中新元古界层序地层研究[M]. 北京:地质出版社,1999. [Zhou Hongrui. *Study of the Neoproterozoic Strata on the southern of the North China Platform*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.]
- [33] 周瑶琪,吴智平. 地层间断面的时间结构研究[M]. 北京:地质出版社,2000. [Zhou Yaoqi, Wu Zhiping. *Study on the Time Compositional Units of Hiatus Surface*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.]
- [34] 莱尔曼. 湖泊的化学地质学和物理学[M]. 王苏民译. 北京:地质出版社,1989. [Lerman A. *The Lacustrine Chemistry' Geology and Physics*[M]. Wang Sumin, Trans. Beijing: Geological Publishing House, 1989.]
- [35] 阎存凤,袁剑英,赵应成,等. 蒙、甘、青地区侏罗纪孢粉组合序列及古气候[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(5): 634-639. [Yan Cunfeng, Yuan Jianying, Zhao Yingcheng, et al. Jurassic spore-pollen assemblages and paleoclimate in Innermongolia, Gansu, Qinghai, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(5): 634-639.]
- [36] 徐兆辉,胡素云,汪泽成,等. 古气候恢复及其对沉积的控制作用:以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 235-244. [Xu Zhaohui, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Restoration of paleoclimate and its geological significance: As an example from upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 235-244.]

Geochemical Characteristics and Environmental Implications of Trace Elements of Zhifang Formation in Ordos Basin

WANG Feng¹, LIU XuanChun¹, DENG XiuQin², LI YuanHao², TIAN JingChun¹, LI ShiXiang², YOU JingQian³

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company of CNPC, Xi'an 710021, China

3. Digital & Information Management Department, Changqing Oilfield Company of CNPC, Xi'an 710021, China

Abstract: The trace elements of sedimentary rocks have a high sensitivity on hydrological changes of sedimentary environment, so the trace elements can be used as an effective method on the study of paleoclimate and paleoenvironment during deposition period. The Zhifang Formation in Ordos Basin is a new series of strata of Triassic with oil & gas seeps, the ancient climate and ancient water environment have great significance in restoring the ancient sedimentary framework and geography of that period and hydrocarbon accumulation. In this paper, the trace element of the profile and 21 shale and siltstone core sample of the middle Triassic Zhifang Formation in Ordos Basin have been determined by means of ICP-MS, and trace elements of strontium (Sr), barium (Ba), thorium (Th), uranium (U), vanadium (V), nickel (Ni), cobalt (Co) were selected as the discriminant mark, and combining sedimentology and sporopollen analysis, the sedimentary environment and ancient climate characteristics of Ordos Basin were discussed. The results show that by Li, Sr, Ni, Ga content and the ratio of Sr/Ba indicating the sedimentary environment was continental fresh - brackish water. The ratio of U/Th is from 0.09 to 0.38, δU is from 0.43 to 1.07, the ratio of V/(V+Ni) is from 0.69 to 0.89, the ratio of V/Cr is from 0.87 to 5.57, the ratio of Ni/Co is from 1.21 to 2.93, which indicate the oxidation-weak reduction environment. Combining sedimentology mark and quantitative calculation of Co elements, the average water depth of Zhifang Formation is less than 30 m, and the large catchment lake has not yet formed. The ratio of Sr/Cu is from 0.85 to 16.7, most Sr/Cu ratio is less than 10, and combining with the sporopollen analysis, which show that the dry climate of Heshanggou Formation was translated into warm climate of Zhifang Formation.

Key words: paleosalinity; redox conditions; palaeo-depth; paleoclimate; trace element; Zhifang Formation; Ordos Basin