鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩地球化 学特征及古环境意义

汤超^{1,2)},肖鹏^{1,2)},魏佳林^{1,2)},徐增连^{1,2)},刘华健^{1,2)},赵丽君¹⁾

1)中国地质调查局天津地质调查中心,天津,300170;2)中国地质调查局铀矿地质重点实验室,天津,300170

内容提要:通过对鄂尔多斯盆地志丹地区安定组顶部泥灰岩系统的岩石学和地球化学分析,研究了安定组沉 积末期湖盆的古盐度、氧化还原环境、古气候及物源区背景。结果表明:安定组泥灰岩主要由方解石和白云石组 成,其中方解石含量 26.5%~68.5%,平均 42.5%,白云石含量 10.1%~40.5%,平均 25.3%;岩石具有较高的 Sr 丰度、Sr/Ba 比值,指示沉积时水体盐度较高;碳氧同位素变化范围不大,δ¹³ C_{PDB}为一3.5%~2.2%,平均 0.55%, δ¹⁸ O_{PDB}为一6%~一1.2%,平均-3.87%,接近咸水湖碳酸盐沉积物,Z 值范围为 119.53~130.01,平均为 126.51, 显示安定组泥灰岩段形成于湖水咸化期;化学蚀变指数 CIA 及 Sr/Cu、SiO₂/Al₂O₃综合指示泥灰岩的物源区所受 化学风化并不强烈,沉积于半干旱炎热的气候;氧化还原环境指标 V/Cr、V/(V+Ni)比值及敏感金属元素 U、Mo 高度富集等特征指示泥灰岩沉积时的古水体条件整体处于还原环境;La/Yb-ΣREE 和 La/Sc-Co/Th 源岩属性判 别图解显示泥灰岩主要沉积物源以长英质岩石为主,并混合有中-基性岩浆岩,与鄂尔多斯盆地北部阴山地区的古 元古代变质岩系具有一定的亲源性。安定组末期半干旱炎热的气候条件,有利于蚀源区铀元素的活化迁移和含氧 含铀流体形成和湖盆中铀的原始富集沉淀,为鄂尔多斯盆地大规模砂岩型铀成矿作用提供了重要条件。

关键词:安定组;泥灰岩;地球化学;古环境;鄂尔多斯盆地

沉积物地球化学组成特征受物质来源、沉积环 境及后期成岩作用等多种因素控制,不同来源的沉 积岩地球化学组成特征通常不同,因此,利用沉积岩 的地球化学特征可以揭示沉积物形成时的古气候和 古环境(Cholle et al., 1980; McLennan et al., 1991; Jones et al., 1994)。目前,国内学者对碳酸 盐岩地球化学的研究主要是从特征元素含量及其相 关比值、微量元素异常、稀土配分模式、碳氧同位素 特征等几方面来分析古环境、古气候、成岩作用、构 造背景和流体性质等(Yi Haisheng et al., 2008; Chen Song et al., 2011, 2012; Zheng Rongcai et al., 2012; He Yuyang et al., 2014; Chen Yongquan et al., 2015; Sun Wei et al., 2015; Jin Chengguang et al., 2016; Wu Xingyuan et al., 2019)。

鄂尔多斯盆地位于多个构造域的复合叠加部

位,蕴含丰富的煤炭、石油、天然气及铀矿资源(Liu Chiyang et al., 2006; Wang Yi et al., 2014)。多 年来,依托油气、煤炭、铀矿资源勘探开发资料,相关 研究主要集中于石炭系一二叠系等产气层系、上三 叠统延长组产油层系、中侏罗统延安组产煤层系及 直罗组产铀层系,而中侏罗统安定组相关研究成果 鲜有报道(Zhao Junfeng et al., 2006, 2010)。研究 表明,鄂尔多斯盆地东北部东胜铀矿田铀矿化成矿 期次多,成矿具有多阶段性,晚侏罗世一早白垩世期 间的古层间氧化作用是主要成矿作用(Xia Yuliang et al., 2003, 2005; Liu Hanbin et al., 2007; Han Xiaozhong et al., 2008; Li Ziying et al., 2009). 因此,晚侏罗世一早白垩世期间古环境、古气候变化 对铀成矿具有重要意义。受燕山运动影响,鄂尔多 斯盆地中-晚侏罗世进入构造强烈活动阶段,造成盆 地东部抬升剥蚀,缺失晚侏罗统地层,那么中侏罗世

注:本文为中国地质调查局项目(编号 DD20190121)、国家重点研发计划重点专项项目(编号 2018YFC0604200)联合资助的成果。 收稿日期:2020-02-23;改回日期:2020-04-16;网络发表日期:2020-05-06;责任编委:任东;责任编辑:黄敏、潘静。 作者简介:汤超,男,1982年生。高级工程师,主要从事矿床地球化学研究。E-mail: tjtangchao@163.com。 引用本文:汤超,肖鹏,魏佳林,徐增连,刘华健,赵丽君.2021.鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩地球化学特征及古环境意义.地质

引用本文:汤超,肖鹏,魏佳林,徐增连,刘华健,赵丽君. 2021. 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩地球化学特征及古环境意义.地质 学报,95(8):2537~2552,doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021276. Tang Chao, Xiao Peng, Wei Jialin, Xu Zenglian, Liu Huajian, Zhao Lijun. 2021. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of marls from the Anding Formation in the Zhidan area, Ordos basin. Acta Geologica Sinica, 95(8):2537~2552. 末期安定组沉积的古环境、古气候的变化对推断晚 侏罗世一早白垩世期间古环境、古气候具有重要意 义,进而可以推断铀成矿期的古环境。泥灰岩作为 安定组沉积末期的主要沉积物,具有重要的沉积与 成岩环境指示意义。为此,本文以志丹地区安定组 泥灰岩岩石学特征分析为基础,结合地球化学特征, 试图揭示安定组形成的古环境及成岩流体性质等方 面信息,深化对鄂尔多斯盆地中侏罗统安定组组成 成因的认识,同时为盆地大规模铀成矿作用研究提 供古环境方面的资料。

1 地质概况

1.1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是一个位于华北地台西部的大型 叠合盆地,该盆地可划分为结晶基底、地台沉积盖层 及中生代沉积盖层3个构造层:结晶基底为太古界 及下元古界变质岩,埋深变化大;地台沉积盖层为中 元古界和古生界浅海相碳酸岩及陆源碎屑岩,富含 油气;中生代沉积盖层由广泛发育的为中新生代三 叠系、侏罗系、白垩系、古近系系砂岩、泥岩和煤层组 成。鄂尔多斯盆地周边活动性强,盆内则较稳定,以 隆起、坳陷、宽缓褶皱为主,包括伊盟隆起、西缘逆冲 带、天环向斜、伊陕斜坡、晋西挠褶带、渭北隆起6个 次级构造单元(图1)。研究区位于鄂尔多斯盆地中 东部的志丹地区(图1a),出露地层以中、新生代地 层为主,其中,侏罗系延安组、直罗组及安定组地层 主要分布在延安一安塞一带,白垩系多分布在盆地 中部(图1b)。中侏罗统安定组(J₂a)是本次研究的 主要层位。

1.2 安定组地层发育状况

根据鄂尔多斯盆地 330 口控制性钻井和部分露 头数据编绘的等厚图(图 2a)显示(Zhao Junfeng et



Fig. 1 Tectonic location map (a) and geological map (b) of Zhidan area in Ordos basin

(a)

灵武

100

250)

(₁₀₀)^{环县}

泾川

石咀山

0

定边

吴起

华池

庆阳 00

050

正宁

150

延安

厚度等直线

盆地边界 Basin boundary

剥蚀边界

Thickness isometrie

50-

40 km



图 2 鄂尔多斯盆地安定组残留厚度等值线图(a)及安定期沉积相图(b)(据 Zhao Junfeng et al., 2006 修改) Fig. 2 Residual thickness contour map (a) and Andingian sedimentary facies map (b) of the Anding Formation in the Ordos basin (modified from Zhao Junfeng et al., 2006)

al., 2006),安定组等厚线近南北向展布、西厚东 薄,宜君-安塞-榆林-东胜-线以东全部剥蚀殆 尽。在乌海东北部、鄂托克旗、盐池西南部、环县西 北部和镇原等处残留厚度可达 200~250 m,构成近 南北向展布的较厚带。安定组岩性较复杂,各段的 岩性和保存程度因地而异,主要包括河流相和湖湘 沉积,湖相沉积区域较大,在靖边一环县一庆阳一宜 君西一线以东广大地区,形成了一个内流湖泊,中心 部位为较深湖相沉积(图 2b)。结合露头剖面和钻 孔资料,研究区内安定组可分3个岩性段,下部主要 以黑色泥岩及少量粉砂岩为主;中部为灰紫色、灰绿 色粉砂岩夹薄层泥灰岩;上部为杂色泥灰岩与褐黄 色粉砂岩互层(图 3)。其中分布于安定组顶部的泥 灰岩,在区内分布稳定,厚十几至几十米,测井曲线 以高伽马、高阻为特征,与上下相邻地层的低阻呈明 显对比,容易辨认。

2 样品采集与测试

本次研究样品来自楼牌乡西一处采石场剖面及 金鼎地区施工的2个钻孔,采样位置集中在安定组 泥灰岩段(图1b、图3),共采集新鲜岩石样品20块。 在样品的采集过程中,尽量选择未经成岩蚀变的样品。挑选 13 件全岩样品首先用切割机除去表面,仅 采用中间无裂隙且相对坚硬的部分,然后用经清洗 无污染的玛瑙碾钵破碎至 200 目以下,进行元素地 球化学测试。X 射线衍射定量分析、常量、微量元素 和碳氧同位素测试均在由核工业北京地质研究院分 析测试研究中心完成,X 射线衍射定量分析测试仪 器型号为 Panalytical X'Pert PRO MPDX 射线衍射 仪。全岩主量元素分析在 AxiosmAX X 射线荧光 光谱仪上进行,分析精度在 0.5% 以内。全岩微量 元素和稀土元素测试在 NexION300D 等离子体质 谱仪上进行,分析精度在 5% 以内。C、O 同位素测 试所用仪器为 MAT-253 气体同位素质谱仪,测量 结果 以 PDB 为标准,记为 δ^{13} C_{V-PDB} (精度优于 0.1‰), δ^{18} O_{V-PDB} (精度优于 0.2‰)。

安

安

-30-

40 km

砂地比等值线图 Contour ratio

相界线 Phase boundary

河流相 River facies

浅湖亚相 Shallow lake subfac

较深湖亚相 Deeper lake subfaci

3 测试结果

3.1 岩石学特征

泥灰岩是介于泥岩与碳酸盐岩之间的过渡型沉积岩,具有微粒状或泥状结构,粒径一般小于 0.01 mm。前人给予了不同的名称,如微晶石灰岩



图 3 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive histogram of the Anding Formation in Zhidan area, Ordos basin

(Folk, 1959)、泥岩(Dunham, 1962)、泥石灰岩、灰 泥岩(Wright, 1992)、灰泥屑石灰岩(下eng Zengzhao, 1993)等。灰-泥混合岩石中碳酸盐成分 占 30%~70%均可定义为泥灰岩,实际工作中常把 露头特征相近的一系列灰-泥混合岩石统称为泥灰 岩(Liang Hongbin et al., 2007)。本次采集的泥 岩灰岩样品,野外露头呈灰黑色、灰紫色、黄褐色, 钻孔内泥灰岩为深灰色。室内岩石薄片鉴定发 现,岩石主要由碳酸盐、黏土质及粉砂碎屑组成, 另有少量铁质和有机质。X 衍射分析显示,泥灰 岩主要由方解石和白云石组成,方解石含量 26.5% ~ 68.5%, 平均 42.48%, 白云石含量 10.1%~40.5%, 平均 25.32%(表1)。根据其成 分与结构特点,将本次研究的泥灰岩划分为对3种 类型:纹层状泥灰岩、块状泥灰岩及生物碎屑泥灰 岩,各自岩石学特征如下。

(1)纹层状泥灰岩:主要为灰紫色、黄褐色,发育 水平、波状或透镜状纹层,单纹层厚度薄,一般厚小 于1 cm(图 4a)。纹层主要由暗色泥灰岩与亮色泥 晶灰岩组成明暗相间的条带。暗色泥灰岩纹层矿物 成分主要由方解石、铁质组成;亮色泥晶灰岩纹层其 成分主要为泥晶方解石(图 4d、e)。



图 4 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩岩石类型及显微特征

Fig. 4 Marble rock types and microscopic characteristics of the Anding Formation in Zhidan area, Ordos basin (a)—纹层状泥灰岩;(b)—块状泥灰岩;(c)—生物碎屑泥灰岩;(d~e)—纹层状白云质泥灰岩;(f)—块状白云质泥灰岩,含少量石 英、长石等陆源碎屑;(g)—生物碎屑泥灰岩,含藻类、珊瑚、有孔虫等;(h)—生物碎屑泥灰岩,溶蚀作用,厚壳蛤碎片粒内溶孔和粒间 溶孔发育;(i)—硅化脑纹状海绵礁泥灰岩,海绵体腔内溶孔不均匀分布

(a)—Lamellar marl; (b)—massive marl; (c)—bioclastic marl; (d ~ e)—laminar dolomite marl; (f)—massive dolomite marl, containing a small amount of terrestrial debris such as quartz and feldspar; (g)—bioclastic marl, containing algae, coral, foraminifera, etc; (h)—bioclastic marl, dissolution, development of intragranular and intergranular dissolution pores in thick clam fragments; (i)—silicified brain striated sponge reef marl, uneven distributing of dissolution pores in sponge cavity

表 1 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩 X-射线 衍射定量分析结果表(%)

Table 1	Quantitative	analysis results	s of (%) X-	ray diffraction
of marls f	from Anding	Formation in	Zhidan area	a. Ordas basin

拦日护已	乙素	钾长	斜长	方解	白云	黄铁	方沸	粘土
件印细丂	石央	石	石	石	石	矿	石	矿物
H4-YJ114	19.6	_	6.1	26.5	40.5	_	_	7.3
H8-YJ114	11.3	_	6.6	57.4	12.3	1.9	_	10.5
H1-YJ147	20.7	6.4	—	24.8	39.4	_	_	8.7
H2-YJ147	20.1	5.5	6.7	56.4	11.3	_	—	-
H4-YJ147	13	_	9.4	24.1	53.5	_	—	-
H6-YJ147	18.7	_	8.7	39.8	22.5	_	—	10.3
H8-YJ147	13.2	_	7.8	37.3	10.1	_	14.2	17.4
H10-YJ147	20.1	_	9.3	44.1	10.6	4.6	_	11.3
H13-YJ147	12.7	_	7.6	36.6	43.1	_	_	-
H15-YJ147	10.2	_	8.6	68.5	12.8	_	—	-
LP1	13.3	_	7.2	44.3	28.4	_	—	6.8
LP2	17.0	_	7.7	42.1	33.2	—	—	-
LP3	32.4	_	5.7	50.4	11.4	_	_	-

注:"一"表示未检出。

(2)块状泥灰岩:主要为灰黑色,岩石致密,成层 性特征不明显(图 4b)。以泥粒级泥晶方解石为主, 其次为泥晶白云石和黏土矿物。另外,还常含一定 量的石英、长石等陆源碎屑,大多呈棱角状一次棱角 状均匀分布,分选及磨圆都较差(图 4f)。

(3)生物碎屑泥灰岩:主要为浅灰色,块状,成层 性特征不明显(图 4c)。基质为泥晶方解石,生物屑 主要为藻类、珊瑚、介壳和腕足碎片等,含少量头足 类和钙球(图 4g、h)。部分生物屑具硅化现象,此类 型岩石大部分经历了低-中等强度的胶结、压实、溶 蚀、重结晶等成岩作用改造,具有较发育的原生粒间 孔、剩余原生粒间孔及粒间溶孔组合(图 4i)。

3.2 地球化学特征

3.2.1 常量元素

志丹地区安定组泥灰岩样品的常量元素分析结 果见表 2。安定组泥灰岩以 SiO₂(平均值为 29.74%)和 CaO(平均值为 26.54%)为主,含较多 的 Al₂O₃(平均值为 5.37%)和 MgO(平均值为 4.57%),具有高硅铝、富钙低镁的特征,反映陆源物 质较多。有机碳(TOC)的含量较高,平均值为 3.83%,说明安定期生物较繁盛,生物生产力较高。 样品中其他主量元素 TFe₂O₃平均值为 2.14%、Na₂O 平均值为 1.19%和 K₂O 平均值为 1.53%,样品中还 含有少量的 TiO₂(均值为 0.23%)和 P₂O₅(均值为 0.19%)与极少量的 MnO(均值为 0.09%)。

表 2	鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩主量元素分析结果(%)

Table 2 Principal element analysis results (%) of marls of Anding Formation in Zhidan area, Ordas basin

样品编号	SiO ₂	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P_2O_5	TOC	烧蚀量
H4-YJ114	29.19	3.90	1.06	7.67	24.87	0.95	0.93	0.07	0.19	0.18	2.84	30.97
H8-YJ114	27.76	6.33	2.06	2.52	29.37	1.35	1.82	0.08	0.25	0.08	3.68	25.04
H1-YJ147	34.69	7.40	2.95	6.43	20.49	0.63	3.87	0.11	0.29	0.06	0.78	23.07
H2-YJ147	30.60	6.15	3.40	1.53	28.90	0.74	3.04	0.20	0.22	0.47	0.83	24.71
H4-YJ147	19.66	3.54	2.03	9.85	28.62	1.02	0.64	0.09	0.17	0.10	1.35	34.27
H6-YJ147	30.69	5.07	1.92	3.93	23.49	1.30	1.22	0.06	0.24	0.11	10.30	31.96
H8-YJ147	38.07	10.27	3.25	2.18	19.81	2.58	2.33	0.06	0.39	0.09	1.39	17.00
H10-YJ147	37.52	7.07	2.71	1.43	22.52	1.87	1.61	0.08	0.34	0.62	5.02	22.18
H13-YJ147	21.95	3.07	1.42	7.56	27.96	0.91	0.65	0.06	0.15	0.07	9.16	36.02
H15-YJ147	23.62	5.61	1.96	2.06	33.04	1.42	1.34	0.11	0.20	0.09	2.93	30.00
LP1	24.07	3.91	1.82	5.94	31.08	0.91	0.86	0.10	0.18	0.17	_	30.93
LP2	26.31	3.72	1.65	6.07	29.77	1.04	0.69	0.12	0.18	0.21	_	30.22
LP3	42.49	3.73	1.61	2.29	25.07	0.80	0.89	0.07	0.16	0.18	_	22.69
平均值	29.74	5.37	2.14	4.57	26.54	1.19	1.53	0.09	0.23	0.19	3.83	27.62

3.2.2 微量元素

志丹地区安定组泥灰岩样品的微量元素分析结 果见表 3,其微量元素上陆壳标准化蛛网图见图 5。 亲铁元素(Co、Ni、Mo):Co元素丰度值较低,Ni、Mo 元素含量高于上陆壳平均丰度,其中 Mo 元素高度 富集。亲铜元素(Zn、Cu、Ga、Cd、Tl、Pb、Bi):Cd 元 素含量高于上陆壳平均丰度,其他元素丰度值较低, 均低于上陆壳平均丰度。亲石元素(Li、Ba、Sc、V、 Cr、Rb、Y、Cs、W、Th、U):Li、Ba、Sc、V、Rb、Y、Cs、 W、Th元素丰度值较低,Li 是咸化湖盆中的重要保 留元素之一,可在湖盆中滞留较长时间,Li 的低含 量说明湖水盐度较小,Cr、U 元素丰度较高,其中 U



元素上陆壳标准化蛛网图

Fig. 5 Standardized spider web diagram of trace elements in marls of Anding Formation in Zhidan area, Ordas basin 元素明显富集。另外微量元素 Nb、Ta、Zr、Hf 含量 明显低于上陆壳平均丰度,与本次所采样品泥质含 量高有关。微量元素 Sr 含量均高于上陆壳平均值, 最高 860×10⁻⁶,平均值 551.15×10⁻⁶,与样品中 Ca 元素含量较高密切相关。

3.2.3 稀土元素

志丹地区安定组泥灰岩样品的稀土元素分析结 果见表4。样品稀土元素含量较低,稀土元素总量 为 35.06×10⁻⁶~194.06×10⁻⁶,平均值为 72.23× 10⁻⁶,低于大陆上地壳平均值,而且 LREE 较富集, 平均值为 62.28×10⁻⁶,占 86.22%; HREE 丰度较 低,平均值为 9.94×10⁻⁶,占 13.76%。ΣLREE/ **ΣHREE** 比值范围 4.52~8.56,反映了研究区轻稀 土富集的特征,(La/Yb)_N值为2.45~8.38,平均值 为 6.22, $(La/Sm)_N = 2.23 \sim 5.33$, $(Gd/Yb)_N =$ 0.34~1.38, δEu 值在 0.59~0.73, 为中等 Eu 负异 常, & Ce 值介于 0.96~1.03 之间, Ce 异常不明显。 从球粒陨石标准化配分图上看出(图 6a),稀土元素 的配分模式基本相同(样品 H4-YJ147 除外),总体 呈平缓右倾斜模式,无明显斜率,La-Eu 段曲线较 陡, Eu-Lu 段曲线较平缓, 在 Eu 处"谷"状特征(亏 损),显示中等程度的负 Eu 异常。不同样品的稀土 元素总量及分配模式存在一定差异,暗示沉积时样 品受物源或水动力条件等因素影响,成岩作用具有 一定的差异。从北美页岩标准化配分图上看出(图 6b),轻、重稀土元素分馏不明显,曲线比较平坦,斜

$\times 10^{-6}$)
↑析结果(
量元素分
泥灰岩微
安定组岩
志中地区
多斯盆地
長3 鄂尔
της

				Та	ıble 3	Trac	e eleme	ent ana	lysis ru	esults ($\times 10^{-1}$, of i	marls	from A	nding l	Format	tion in	Zhidaı	ı area,	Ordas	basin					
样品编号	Li	Sc	Λ	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	\mathbf{Rb}	Sr	Υ	Mo	Cd	Sb	Cs	Ba	M	TI I	b E	i Th	n	$^{\rm Nb}$	Ta	Zr 1	H
H4-YJ114	17.00	4.12	67.5	23.3	6.32	22.2	22.1	102	5.02	29.7	860	9.11	100 (0.615 1	1.04 3	. 12	412 0	. 79 0.	423]	12 0.2	216 4.9	5 14.20	2.97	0.363 50	5.50 1.	.10
H8-YJ114	41.10	6.30	73.3	33.4	6.77	22.9	22.5	28.2	8.12	47.3	572	9.91	142 (). 286 G). 92 4	. 72	268 1	.12 2.	470]	14 0.2	234 3.6	1 19.70	4.68	0.605 61	7.00 1.	.57
H1-YJ147	34.40	6.89	68.6	40.4	12.20	36.1	17.4	36.5	9.86	67.9	430	19.40	23.9 (0.208 1	1.00 4	. 10	318 0	. 88 0.	298 25	5.5 0.2	247 9.9	6 5.67	6.44	0.570 58	3.80 1.	52
H2-YJ147	25.90	5.87	94.2	34.4	13.90	32.2	76.9	54.5	9.51	54.6	505 (36.90	65.8 (0.317 2	2.51 3	. 14	168 0	. 80 0.	186 13	3.5 0.3	349 132	2 41.90	5.24	0.405 6	t. 00 1.	. 56
H4-YJ147	10.50	4.17	70.6	20.4	2.33	11.8	20.3	25.4	4.77	22.2	791 j	10.90	3.16 (0.117 0). 26 1	. 59	117 0	. 64 0.	191 8.	32 0.1	.07 16.	2 7.53	2.70	0.354 42	2.70 0.	79
H6-YJ147	29.60	4.54	60.3	27.1	7.01	22	19.2	38.2	6.84	37.8	603	8.60	327 (. 612 1	1.21 3	. 19	273 1	.41 2.	030 11	1.9 0.1	66 5.1	1 47.80	3.87	0.317 5	7.40 1.	23
H8-YJ147	58.90	7.70	111	54.8	9.94	28.7	38	46.2	13.80	76.5	419 j	12.40	40.1 (). 166 1	1.45 10	 50 	294 1	.04 0.	663 21	1.5 0.3	351 5.3	9 38.20	7.74	0.58910	6.00 2.	52
H10-YJ147	7 36.90	7.39	77.8	39	9.51	28.8	23.7	49.3	9.80	54.9	488 2	29.80	109 (0.296 0	. 80 4	. 49	291 0	. 86 1.	140 19	9.7 0.2	212 14	167	5.22	0.433 99	5.80 2.	.04
H13-YJ147	7 11.40	3.96	50.2	19	5.01	16.7	12.7	27.2	4.36	20.1	774	5.90	9.22 (0.083 0	. 62 1	. 27	248 0	. 71 0.	268 7.	33 0. 1	01 2.1	5 10.40	2.32	0.220 4	l. 00 0.	83
H15-YJ147	22.70	5.84	52.9	25.4	6.24	21.8	18.7	23.7	7.35	38.8	576 1	10.40	6.12 (0.042 0	0.61 2	69	369 0	. 71 1.	510 9.	76 0.1	73 3.7	5 8.09	3.08	0.271 4	5.90 1.	.04
LP1	55.00	3.49	60.1	16.5	5.50	19	11.6	32.5	5.22	30.4	292 1	10.40	6.42 (). 111 0	0.49 2.	.42	188 0	. 50 0.	171 6.	76 0.1	12 3.9	3.25	2.40	0.217 29	0. 20 0.	82
LP2	25.90	4.45	57.5	25.8	6.28	18.7	7.5	22.7	4.87	24.5	378	9.47	2). 161 0). 44 2.	.03	192 0	. 45 0.	151 9.	78 0.1	25 3.3	9 3.82	2.37	0.162 2	7.600.	69
LP3	33.10	4.25	70	34.1	6.56	19.6	7.51	25.7	5.48	31.4	477	8.09	8.59 (). 152 0	. 47 2.	. 69	322 0	. 70 0.	181 10	0.1	88 3.2	3.26	3.03	0.250 28	3. 00 0.	74
平均值	30.95	5.31	70.31	30.28	7.51	23.12	22.93	39.39	7.31	41.245	51.15	16. 25 6	35.10	0.24 0	0.91 3.	. 53 33	5.38 0	. 82 0.	745 13	. 09 0. 1	99 15. 9	97 28.52	4.00	0.366 59	5.38 1.	27
上陆売	62	83	63	25	24	13	32	51	18	210	470	37	1.60 (. 049 0	. 19 1	7.0 (360		88	.0	27 25.	0 8.1	49.0	3.1	190 4	с.
注:上地壳)	数据引旧	∃ Li To	ng(199	4)。																						
							表	4 鄂久	K 多斯	餡港売	5. 中地 [×安定	组岩氿	3灰岩科	₩ 十 元	素分析	:结果($\times 10^{-6}$	(
				Table	e 4 R	tare ea	urth ele	ment a	malysis	s result	s (×1	0_6) (of mar	ls from	Andin	ıg Forn	nation	in Zhi	dan are	ea, Ord	las basi	ц				
" 다 카 다 카	, 	Ċ	Ē	FIN	0	Ē	Ċ	Į,	Ż	11	Ľ	E	VL	;		D E E	I DEE	TELET	LR	EE/	(La/	(La/	(Gd/	1	2	
作品補ら	Гa	Ce	1	ING	ШÇ	Eu	29	0 1	ĥ	0	1	E 1	0 1	Γſ	, H	NEE	LNEE	UNEI	H	REE	$\mathrm{Yb})_{\mathrm{N}}$	$\mathrm{Sm})_{\mathrm{N}}$	Yb_N	010	~	e
$H_{4}-Y_{J}11_{4}$	10.40	20.50	2.34	8.79	1.63	0.36	1.55	0.28	1.51	0.32	0.99	0.23	1.97	0.31 5	9.11 5	1.17	44.024	7.148	.9	16	3.79	4.12	0.65	0.7(1.	02
H8-YJ114	14.20	26.10	2.78	10.30	1.79	0.36	1.69	0.28	1.54	0.32	0.94	0.18	1.33	0.21 5	9.91 6	32.02	55.525	6.49	×.	56	7.66	5.12	1.05	0.62		02
H1-YJ147	16.90	30.10	3.36	12.90	2.29	0.47	2.22	0.44	2.83	0.64	1.79	0.32	1.90	0.27 1.	9.40 7	6.43	66.021	10.40	.9 6.	34	6.38	4.76	0.97	0.6	· ·	98
H2-YJ147	30.60	66.80	9.60	42.10	8.85	1.63	8.15	1.69	10.50	2.17	5.62	0.86	4.87	0.62 6.	6.90 19	94.06	159.58	34.47	6 4.	63	4.51	2.23	1.38	0.59		96
H4-YJ147	10.40	19.00	2.00	7.25	1.26	0.29	1.24	0.22	1.37	0.36	1.80	0.48	3.05	0.38 1.	0.90 4	9.10	40.202	8.896	4.	52	2.45	5.33	0.34	0.7		02
H6-YJ147	11.60	21.70	2.41	8.96	1.63	0.33	1.47	0.26	1.38	0.29	0.89	0.19	1.42	0.22 8	3. 60 5	2.73	46.625	6.104	.7.	64	5.86	4.59	0.86	0.6		01
H8-YJ147	16.70	29.80	3.43	12.50	2.26	0.47	2.05	0.36	1.99	0.42	1.19	0.23	1.74	0.26 1.	2.40 7	3.40	65.156	8. 235	2.	91	6.88	4.77	0.97	0.6(°	57
H10-YJ147	7 22.20	43.80	5.41	22.10	4.41	0.87	4.22	0.82	4.81	1.02	2.82	0.54	3.72	0.61 2	9.80 11	17.34	98.792	18.54	7 5.	33	4.28	3.25	0.94	0.62	°	98
H13-YJ147	7.91	14.70	1.59	5.80	1.03	0.22	0.98	0.16	0.90	0.19	0.56	0.10	0.79	0.13 5	5.90 3	5.06	31.251	3.812	~ ~	20	7.20	4.96	1.02	0.63		02
H15-YJ147	7 14.70	28.20	3.34	12.60	2.17	0.46	2.00	0.34	1.77	0.36	1.05	0.19	1.30	0.19 1,	0.40 6	8.65	61.465	7.189	~ ~	55	8. 11	4.37	1.27	0.63	0.	66
LP1	11.50	21.80	2.52	9.39	1.76	0.33	1.63	0.31	1.67	0.34	0.99	0.17	1.16	0.16 1.	0.40 5	3.73	47.301	6.432	.7.	35	7.11	4.22	1.16	0.6(0	66
LP2	11.90	22.90	2.49	9.62	1.75	0.34	1.59	0.28	1.59	0.31	0.90	0.16	1.03	0.14 5	9.47 5	5.00	49.001	5.995	<i>∞</i>	17	8.29	4.39	1.28	0.62		03
LP3	10.90	20.50	2.36	8.91	1.68	0.38	1.52	0.27	1.44	0.29	0.81	0.14	0.93	0.13 8	3.09 5	0.27	44.731	5.536	×.	08	8.38	4.19	1.35	0.73	°	66
平均值	14.61	28.15	3.36	13.17	2.50	0.50	2.33	0.44	2.56	0.54	1.57	0.29	1.94	0.28 1	6.25 7	2.23	62.28	9.94	7.	03	6.22	4.33	1.02	0.65		00
上陆壳	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.6	0.64	3.5	0.8	2.3	0.33	2.2	0.32	22 14	46.17	132.48	13.65		68	9.78	4.3	1.35	0.65		04

汤超等:鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩地球化学特征及古环境意义

注:上陆壳数据引自 Li Tong(1994)



图 6 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩稀土元素球粒陨石标准化(a)和北美页岩标准化(b)配分曲线图 (a,球粒陨石数据引自 Sun et al., 1989; b,北美页岩数据引自 Haskin et al., 1968)

Fig. 6 Standardization diagram of rare earth element chondrite meteorite (a) and North American shale standardized (b) of marls from Anding Formation in Zhidan area, Ordas basin (a, Chondrite, data are taken from Sun et al., 1989;b, North American shale, data are taken from Haskin et al., 1968)

率较小。除 H2-YJ147 样品外,稀土元素含量普遍 低于北美页岩。

3.2.4 碳氧同位素

志丹地区安定组泥灰岩样品的碳氧同位素分析 结果见表 5。碳同位素 δ^{13} C_{PDB} 为 $-3.5\% \sim 2.2\%$, 平均 0.55%, 极差 -5.7%,数据变化范围较窄, δ^{18} O_{PDB} 为 $-6\% \sim -1.2\%$,均为负值,平均 -3.87%,极差 -7.2%,数据相对离散, δ^{18} O_{SMOW} 为 24.7% $\sim 29.7\%$,平均 26.91%。样品 δ^{13} C 与 δ^{18} O 线性关系不明显(图 7),指示碳酸盐岩的碳氧同位 素受成岩作用影响较少。





Fig. 7 Linear relationship diagram of carbon and oxygen isotopes of marls from Anding Formation in Zhidan area, Ordas basin

4 讨论

4.1 古盐度

古盐度是指示地质历史时期海陆环境变化的一

个重要标志,内陆湖泊古盐度的恢复方法主要以碎 屑岩元素比值、碳、氧、锶等同位素为主(Li Zhichao et al., 2015)。本文选用元素比值法,结合碳、氧同 位素来反映志丹地区安定组古盐度变化。

表 5 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩碳、 氧同位素分析结果

Table 5	Carbon	and oxyge	en isotope	analysis	results	of
marls from	Anding	Formation	n in Zhida	an area.	Ordas b	asin

+Y4 D	+¥ 🗆	\$13 C	N18 O	180		
性前	件前	O ^{TO} CV-PDB	0 ²⁰ Ov-pdb	OV-SMOW	7	$T(^{\circ}C)$
编号	名称	(‰)	(‰)	(‰)	L	1(0)
H4-YJ114	泥灰岩	1.2	-1.9	28.9	128.81	-1.6
H8-YJ114	泥灰岩	0.8	-4.6	26.2	126.65	8.0
H1-YJ147	泥灰岩	-3.5	-1.2	29.7	119.53	-3.8
H2-YJ147	泥灰岩	-1.5	-3.4	27.4	122.53	3.6
H4-YJ147	泥灰岩	0.4	-2.8	28.0	126.72	1.5
H6-YJ147	泥灰岩	1.2	-3.8	26.9	127.87	5.0
H8-YJ147	泥灰岩	0.8	-4.2	26.6	126.85	6.5
H10-YJ147	泥灰岩	0.6	-6.0	24.7	125.54	13.5
H13-YJ147	泥灰岩	0.9	-3.9	26.9	127.20	5.4
H15-YJ147	泥灰岩	1.5	-5.8	24.9	127.48	12.7
LP1	泥灰岩	2.2	-3.6	27.2	130.01	4.3
LP2	泥灰岩	1.9	-3.5	27.3	129.45	3.9
LP3	泥灰岩	0.7	-5.6	25.1	125.94	11.9
平均值		0.55	-3.87	26.91	126.51	5.5

元素比值法一般用 Sr、Ba 含量及 Sr/Ba 值反映 当时沉积介质古盐度的指标(Zheng Rongcai et al., 1999; Xue Chuandong et al., 2007; Li Zhichao et al., 2015)。溶液中 Sr 的迁移能力及其硫酸盐化合 物的溶度积远大于 Ba 的地球化学性质,随着盐度 的不断升高,Ba 元素首先以 BaSO4 盐类的形式析 出,其次 Sr 才以 SrSO4 形式沉淀,Sr 含量及 Sr/Ba 比值与古盐度显示良好的相关性。因此,Sr/Ba 比 值通常被用来恢复水体古盐度。当沉积物中 Sr/Ba 值大于1时指示海相沉积,Sr/Ba值小于1时指示 淡水沉积,如果介于20~50间变为盐湖沉积 (Zheng Rongcai et al., 1999; Liu Gang et al., 2007; Liu Zhaojun et al., 2009),且 Sr 元素在淡水 中的含量多为100×10⁻⁶~300×10⁻⁶,在咸水中的 含量一般为 800×10⁻⁶~1 000×10⁻⁶ (Liu Gang et al., 2007)。本次采集的 13 个样品, Sr 含量为 292 ×10⁻⁶~860×10⁻⁶,平均 551.15×10⁻⁶,仅1个样 品 Sr 含量小于 300×10⁻⁶,总体显示咸湖环境,结 合地质背景,鄂尔多斯盆地安定组并未有海浸的证 据,Sr的高含量主要是干热气候条件下的湖水浓缩 沉淀所致(Ma Baolin et al., 1991)。样品 Sr/Ba 介 于 0.77~3.12 之间,平均值为 1.76,且泥灰岩中普 遍发育碳酸盐矿物,说明此时沉积为咸湖沉积。样 品 LP3 的 Sr/Ba 比值小于 1,可能是因为气候变化 引起的突发性洪水使得湖水淡化。通过本文所测样 品,Sr 丰度和 Sr/Ba 值都显示了安定组泥灰岩沉积 期古盐度较大,处于湖盆咸化期。咸湖沉积有利于 有机质的堆积与保存(Jin Qiang et al., 2006),而有 机质对铀具有吸附和还原作用,从而有利于铀富集。

陆相湖泊原生碳酸盐岩的碳氧同位素也是研究 古盐度的重要指标。据 Stuiver(1970)和 McKenzie (1985)的资料,现代湖泊水体的 δ^{13} C 值范围与注入 其中的河水和地下水相似, δ^{13} C 一般在一10% 左 右,淡水湖碳酸盐沉积物的 δ^{13} C 值在一6% ~ -12%之间,咸水湖碳酸盐沉积物的 δ^{13} C 值则达到 湖水与大气 CO₂ 平衡时的最大值,为+5%,在超盐 水湖中沉淀的方解石记录的异常 δ^{13} C 值更高达 +13%。Keith et al. (1964) 曾把碳、氧同位素结 合起来,提出了一个区分海相和淡水灰岩的经验公 式,即经验公式的量 Z=2. 048×(¹³C+50)+0.498 ×(¹⁸O+50),式中¹³C 值和¹⁸O 值均为 PDB 标准。 当 Z 大于 120 时,水介质的性质为海水来源;当 Z 小于 120 时,则为陆相淡水来源。本次 13 个样品的 碳同位素 δ¹³ C_{PDB}介于-3.5%~2.2%,更接近咸水 湖碳酸盐沉积物。在δ¹³C-δ¹⁸Ο图解上,大部分样品 都落在正常海水范围(图 8a),显示出咸水环境特 征,并且多数样品落在开放性湖泊和封闭型湖泊之 间(图 8b),说明安定组泥灰岩沉积时期的湖盆水体 具有一定的半封闭性。根据 13 块样品碳氧同位素 Z值计算结果,样品的Z值为119.53~130.01,平 均为126.51,均大于120,说明安定组泥灰岩沉积时 的古流体为盐度较高的咸水。上述分析表明,鄂尔 多斯盆地志丹地区安定组泥灰岩整体上为一半封闭 半开放的咸湖沉积环境,部分地区可能因突发性洪 水而处于半咸水环境。

4.2 古温度

 $δ^{18}O$ 与古海水温度关系密切,在盐度不变的情况下 $δ^{18}O$ 随温度升高而降低,而 $δ^{13}C$ 值随温度变 化甚少。因此,在盐度不变的情况下, $δ^{18}O$ 值可用 来做为测定古温度的可靠标志(Zhang Xiulian, 1985)。Shackleton(1974)提出了利用 $δ^{18}O$ 计算古 海水温度的相关经验公式:t=16.9-4.38 ($δ_C-δ_W$) +0.10($δ_C-\delta_W$)²。式中 t 代表碳酸岩形成的古海水 温度(C), $δ_C-\delta_W$ 系指 CaCO₃(PDF)与 H₃PO₄ 作用 (25[°]C)生成的 CO₂ 及与 H₂O 平衡的 CO₂ 之间的氧





Fig. 8 Maps showing carbon and oxygen isotope composition and sedimentary environment analysis of marl from Anding Formation in Zhidan area, Ordas basin (a, basemap according to Jin Chengguang et al., 2016;
b, basemap according to Xu Chongkai et al., 2018)

同位素的差值(‰), δ_c 为碳酸岩样品 δ^{18} O 值(‰), δ_w 为以 SMOW 为标准的样品形成时水的 δ^{18} O 值 (‰)。该公式对中生代以后的样品具有较强的适用 性(Shao Longyi, 1994)。

保罗纪古湖水的δ¹⁸O值为未知数,因此需要估 算当时湖水的δ¹⁸O值,具体方法是设定与现代大气 降水的δ¹⁸O值相同。目前鄂尔多斯盆地的实测大 气降水加权平均值为-7.43‰(Yang Yuncheng et al.,2005),考虑到现代月气温变化条件,这个估计 可能偏低。从将今论古的角度分析,其δ¹⁸O值不应 该低于-7.43‰。所以取δ¹⁸O值为-7.43‰,采用 上述公式来估算最低古水温,结果见表4。计算表 明,安定组泥灰岩沉积期最低水体温度分布范围在 -3.8~13.5℃,平均值为5.5℃,代表了相对温暖 的气候环境。

4.3 古水深

除古盐度外,一些微量元素常用于古水深的判 别。Liu Baojun et al. (1985)认为,当 U<1×10⁻⁶, Ba>1000 \times 10⁻⁶ , Cu>90 \times 10⁻⁶ , Ni>150 \times 10⁻⁶ 等,常指示古水深大于 250 m。本次采集的 13 件泥 灰岩样品,U含量平均28.52×10⁻⁶,普遍大于1× 10⁻⁶,Ba含量多数小于 600×10⁻⁶,Cu含量普遍小 于 40×10⁻⁶,Ni 含量普遍小于 40×10⁻⁶,表明安定 组泥灰岩沉积时水体总体较浅(不超过 250 m)。另 外,根据 Saller(1984)的研究成果,海水温度受海水 深度的控制呈现纵向分异的特点;夏季海水表层温 度较高,在赤道地区可达 30℃左右,在 100 m 以深 水体温度快速下降至 10℃以下;大约 70~80 m 是 海水温度纵向变化的拐点。根据该海水温度的分层 变化结论和安定组泥灰岩沉积期水体温度分布范 围,进一步认为泥灰岩形成水深在 70 m 以浅的滨 浅湖环境。这个结论也得到岩石学证据的支持,根 据岩石薄片观察,泥灰岩中常发育亮晶方解石和生 物碎屑,发育水平层理,这是湖泊浪基面之上高能动 荡环境的标志。

4.4 古氧相

氧化一还原环境的判别主要是根据沉积物中明 显受氧化还原状态控制的元素及其比值来推断沉积 期的氧化还原条件。目前常用的古氧相地球化学指 标主要包括微量元素 V/Cr、V/(V+Ni)、Ni/Co 比 值和稀土元素 Ce/La 比值等,具体判别指标见表 6。 前人研究认为,Ni/Co<5指示氧化环境,Ni/Co> 7,指示还原环境,介于 5~7 之间指示过渡环境 (Jones et al., 1994);当 V/Cr<2 时,指示氧化环 境,V/Cr>4.25时,指示还原环境,介于2~4.25 之间指示过渡环境(Tribovillard et al., 2004);当 V/(V+Ni)<0.6 时,指示水体分层弱的贫氧环境, 当 V/(V+Ni)值在 0.6~0.84 范围内代表水体分 层不强的缺氧环境,当 V/(V+Ni)>0.84 时反映 水体分层及底层水体中出现 H₂S 的厌氧环境 (Hatch et al., 1992);运用 δU 与 Th 的关系式,δU = U/[0.5×(Th/3+U)]进行计算,若 &U>1,表 明为缺氧环境;若 δU<1,则为正常的水体环境 (Tenger et al., 2005)。

本次研究样品的 Ni/Co 比值为 2.32~5.06,平 均 3.27,基本都小于 5,反映沉积环境整体上为氧化 环境;V/Cr 比值为 1.70~3.64,平均 2.45,总体显 示氧化—还原过渡环境;V/(V+Ni)比值为 0.66~ 0.86,平均值为 0.75,均在 0.6~0.84 范围内,且比 值较为稳定,表现为中等分层的氧化—还原过渡环 境;13 件样品 V 含量介于 50.2×10⁻⁶~111×10⁻⁶ 之间,平均 70.31×10⁻⁶,高 V 含量也指示还原环 境;利用 δ U 值法对样品进行进一步分析,结果显 示, δ U 值为 0.98~1.95,平均 1.61,指示还原环境。 微量元素比值法判定安定组泥灰岩沉积期总体为氧 化—还原过渡环境,且偏还原环境。

表 6 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组岩泥灰岩元素比值特征 Table 6 Element ratio characteristics of marls from Anding Formation in Zhidan area, Ordas basin

	木立民自約招	亚坎仿	缺	氧环境	每化环培	次料立酒
刊刊参数	平文件 印 奴 16	十均值	厌氧	贫氧	利化小堤	贝杆木砺
Ni/Co	2.32~5.06	3.27	>7	$5 \sim 7$	<5	Jones et al. , 1994
V/Cr	1.70~3.64	2.45	>4.25	2~4.25	<2	Tribovillard et al., 2004
V/(V+Ni)	0.66~0.86	0.75	>0.84	0.6~0.84	<0.6	Hatch et al. , 1992
δU	0.98~1.95	1.61		>1	<1	Tenger et al. ,2005

因此,通过对 V、Ni/Co、V/Cr、V/(V+Ni)以 及 dU 值的综合研究,认为安定组泥灰岩沉积时的 古水体条件整体处于还原条件,但是存在一定的波 动。施工钻孔所见的泥灰岩多以深灰色为主,局部 富集黄铁矿,且样品中一些氧化还原条件敏感金属 (U、Mo)高度富集等特征,都表明了鄂尔多斯盆地 安定组沉积后期盆地整体范围内处于还原环境。

4.5 古气候

岩石在风化过程中,稳定的阳离子被保存在风 化产物中(如 Al³⁺, Ti⁴⁺等), 而不稳定的阳离子往 往流失(如 Na⁺, Ca²⁺, K⁺等)(Fedo, 1995), 元素富 集与亏损的程度能够提供风化作用信息,进而可以 推断古气候信息(Xu Chongkai et al., 2018)。 Nesbitt et al. (1982)提出化学蚀变指数 CIA=100 × $[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$ (摩尔 量),其中 CaO* 仅指硅酸盐矿物中的 CaO 摩尔百 分含量。对于 CaO* 的计算 和校正, McLennan (1993)提出利用 P_2O_5 含量除去磷灰石中的 CaO, 本文计算方法采用: $CaO^{**} = CaO-10/3 \times P_2O_5$ (摩 尔量), 再计算 CaO** /Na2O 的摩尔比值, 若 CaO** /Na₂O≥1,则以 Na₂O 的摩尔含量来代替 CaO*;若 Ca O** /Na2O<1,则以 CaO** 摩尔含量 来代替 CaO*。志丹地区安定组泥灰岩的化学风化 指数 CIA 为 45~54,平均 49,与平均上陆壳的值相 近,处于中等风化程度,说明安定组泥灰岩沉积时化 学风化并不强烈,气候处于半干旱阶段。

元素地球化学也可作为古气候判别的方法,如 Sr、Cu、Cs含量以及Sr/Cu、SiO₂/Al₂O₃的比值均是 判别古气候环境的常用指标(Hu Xiaofeng et al., 2012; Song Lijun et al., 2016; Zhang Tianfu et al., 2016)。当气候干旱炎热时,由于 Cu、Cs 等元 素难以迁移到湖中,因而在湖泊沉积物中会显示低 值,而 Sr 是典型的喜干型元素,低含量指示潮湿气 候,高含量代表干旱气候。Sr/Cu 比值处于 1.3~5 指示温湿气候,而大于5指示干热气候(Lerman et al., 1978);沉积岩中 SiO₂/Al₂O₃的比值也可以反 映沉积时的气候特点,当 SiO_2/Al_2O_3 的值大于 4 时,指示气候干燥,反之,在潮湿气候下(Zhang Wei et al., 2007)。志丹地区安定组泥灰岩的 Cu 含量 为 7.5×10⁻⁶~76.9×10⁻⁶,平均 22.93×10⁻⁶,Cs 含量为 1.27×10⁻⁶~10.5×10⁻⁶,平均 3.53× 10⁻⁶,含量均较低,而 Sr 含量较高(平均 551.15× 10⁻⁶),可能指示该期安定组泥灰岩沉积时处于半干 旱炎热气候条件;样品 Sr/Cu 比值为 6.57~63.62, 平均 32.96,指示干热气候,SiO₂/Al₂O₃比值 3.71~ 11.39,平均 6.01,反映相对干热的气候。

综上分析,志丹地区安定组泥灰岩化学风化并 不强烈,为半干旱炎热的气候,这也说明沉积物沉积 于湖盆咸化期。上述讨论表明,鄂尔多斯盆地安定 组泥灰岩段形成于气候相对干热的湖水咸化期,湖 盆水体缺氧、还原,具较高盐度。

4.6 物源区特征

研究表明,由于 Ti 是比较稳定的元素,一般不 形成可溶性化合物,海水中 Ti 的含量很低,海洋沉 积物中 Ti 主要源于陆源碎屑物质。Al₂O₃主要来自 陆源物,在碳酸盐岩一陆源碎屑一黏土过渡沉积系列 中,Al₂O₃主要代表黏土的含量,也可作为陆源组分的 代表。因此,Ti 与 Al 元素是良好的陆源物质供应指 示剂(Xie Jiancheng et al., 2006)。13 件泥灰岩样品 Ti 的含量为 862.86×10⁻⁶ ~ 2200×10⁻⁶,平均 1298.02×10⁻⁶,远高于碳酸盐岩中 Ti 的平均含量 400×10⁻⁶,Al₂O₃的含量为 3.07%~10.27%,平均 5.37%,总体高于碳酸盐岩中 Al₂O₃的平均含量为 0.4%(Robison et al., 1980)。由此可见,安定组泥灰 岩沉积时陆源碎屑物质供应较充足。

La、Sc、Zr 和 REE 等元素在风化、搬运、沉积以 及固结成岩等过程中具有极好的稳定性,一般能代 表物源区的元素特征,因此,大量学者常用这些稳定 元素的含量及比值来判别物源区的特征(L Zhiming et al., 2003; Li Shuangying et al., 2005; Song Jian et al., 2012; Hu Junjie et al., 2014; Peng Zhichao et al., 2018)。下面利用 La/Yb- Σ REE和 La/Sc-Co/Th 源岩属性判别图解对研究 样品源岩属性进行分析(图 9)。由图 9a 可见,大部 分样品都落入沉积岩区,少量样品落在沉积岩和大 陆拉斑玄武岩的重叠区域,反映物源主要以沉积岩 为主,混有少量基性岩。在 La/Sc-Co/Th 图解中 (图 9b), Co/Th 比值平均 1.37, 而 La/Sc 比值高于 长英质火山岩,样品点主体落在长英质火山岩与安 山岩之间,说明其原始物质应来自上地壳,以长英质 岩石为主,并混合有含长石较高的中-基性岩浆岩如 安山质、拉斑玄武岩等。

前人研究表明 Gd 在古老地层中含量较高,在 新地层中随着元素分馏作用,Gd 的含量越来越少, $(Gd/Yb)_{N}$ 值也就随着地层时代的变新而逐渐变 小,太古界 $(Gd/Yb)_{N} > 2$,后太古界 $(Gd/Yb)_{N} < 2$ (Taylor et al., 1985; Shao Lei et al., 2000; McLennan, 2001)。本次研究泥灰岩样品(Gd/ Yb)_N 值为 0.34~1.38,平均 1.02,说明物源主要来 自于后太古界。

前面分析表明,样品轻稀土元素(ΣLREE)富 集,重稀土元素亏损(ΣHREE),轻重稀土比值 ΣLREE/ΣHREE为4.52~8.56。鄂尔多斯盆地北 部阴山地区的古元古代变质岩(花岗片麻岩、闪长片





(a,底图据 Allègre et al., 1978)和 La/Sc-Co/Th 源岩判别图(b,底图据 Gu et al., 2002)

Fig. 9 La/Yb-SREE (a, Base map according to Allègre et al., 1978) and La/Sc-Co/Th(b, Base map according to Gu et al., 2002) source rock discrimination maps of marls from Anding Formation in Zhidan area, Ordas basin

麻岩、角闪斜长片麻岩等)稀土元素表现出轻稀土元 素(LREE)富集,重稀土元素(HREE)严重亏损,铕 中等亏损(δEu平均 0.68)(Chen Quanhong et al., 2012),与本次研究样品的稀土元素特征较一致,表 明阴山地区元古宙的花岗片麻岩、闪长片麻岩等变 质岩系可能是主要物源之一。

4.7 安定组沉积环境与铀成矿作用

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿主要产于中侏罗统直 罗组和下白垩统地层。前人研究认为盆地自早一中 侏罗世延安组到中侏罗世直罗组沉积气候经历了温 暖潮交替到干旱一半干旱的转变过程,形成了侏罗 纪重要的含煤岩系和含铀岩系,为铀储层形成及铀 成矿提供了重要的氧化还原地球化学条件(Zhang Tianfu et al., 2016, 2018)。前文分析表明,鄂尔 多斯盆地安定组泥灰岩段形成于气候相对干热的湖 水咸化期,湖盆水体缺氧、还原,具较高盐度,代表了 安定组沉积末期半干旱炎热的气候,说明中侏罗世 直罗组一安定组区域气候条件进一步转变为半干旱 炎热。长期的干旱炎热沉积环境有利于富含氧离子 的渗入水形成和蚀源区铀的淋滤活化,而湖盆中心 蒸发作用有利于水体中铀的富集。安定组泥灰岩物 源主要来自盆地北部阴山造山带的中酸性岩浆岩及 变质岩系,为铀源供给和含氧含铀水迁移提供了基 础。安定组沉积期,含氧含铀流体进入湖盆还原环 境,与富含有机质的沉积物发生原始富集沉淀,这是 本次研究的安定组泥灰岩中铀元素高度富集的原 因。安定组泥灰岩铀的富集,代表了沉积期水体中 铀含量较高,也反映了安定组沉积末期有大量铀源 进入湖盆中。

安定组沉积后,受燕山中、晚期和喜马拉雅期不 同性质构造运动的改造作用,使盆地周缘挤压抬升 和掀斜,使盆地北部蚀源区及直罗组长期暴露地表 并遭受风化剥蚀,古气候条件进一步转变为干旱炎 热。受干旱炎热环境影响,在氧化环境下蚀源区大 量铀被地表水带入盆地,进入盆地的含铀地表水和 基岩裂隙水形成地下水,进一步活化基岩以及富铀 砂岩中的铀而形成含氧含铀水,当含氧含铀流体进 入直罗组下段富含还原性物质的河道砂体中,水中 铀被大量还原沉淀、成矿。由此可见,安定组沉积期 末半干旱炎热的气候条件,有利于蚀源区铀元素的 活化迁移和含氧含铀流体形成,为湖盆中铀的原始 富集沉淀以及鄂尔多斯盆地大规模砂岩型铀成矿作 用提供了重要气候条件。

5 结论

(1)通过 Sr、U、Cu、Ba 丰度、Sr/Ba、Ni/Co、V/Cr、 V/(V+Ni)、Ce/La 比值及碳氧同位素分析,认为 鄂尔多斯盆地志丹地区中侏罗统安定组泥灰岩沉积 时为一较高盐度的半封闭半开放的咸水湖环境,水 体中氧含量低,处于还原环境。

(2)主量元素化学蚀变指数 CIA、Sr/Cu、SiO₂/ Al₂O₃综合指示志丹地区安定组泥灰岩的物源区所 受化学风化并不强烈,泥灰岩沉积于半干旱炎热的 气候环境。

(3) La/Yb-∑REE 和 La/Sc-Co/Th 源岩属性 判别图解显示安定组泥灰岩主要沉积物源来自上地 壳,以长英质岩石为主,并混合有含长石较高的中-基性岩浆岩如安山质、拉斑玄武岩等;鄂尔多斯盆地 北部阴山地区的古元古代花岗片麻岩、闪长片麻岩 等变质岩系可能是其主要物源。

(4)安定组沉积期末半干旱炎热的气候条件,有 利于蚀源区铀元素的活化迁移和含氧含铀流体形成 和湖盆中铀的原始富集沉淀,为鄂尔多斯盆地大规 模砂岩型铀成矿作用提供了重要条件。

References

- Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. Earth and Planetary Science Letters, 38(1): 1~25.
- Chen Quanhong, Li Wenhou, Hu Xiaolin, Li Keyong, Pang Jungang, Guo Yanqin. 2012. Tectonic setting and provenance analysis of Late Paleozoic sedimentary rocks in the Ordos basin. Acta Geologica Sinica, 86(7): 1150~1162(in Chinese with English abstract).
- Chen Song, Gui Herong, Sun Linhua, Liu Xianghong, Ma Yanping. 2011. Geochemical characteristics of REE in limestone of Jiudingshan Formation, northern Anhui Province and their constraint on the seawater. Chinese Geology, 38(3): 664~672(in Chinese with English abstract).
- Chen Song, Fu Xuehai, Gui Herong, Sun Linhua. 2012. Geochemical characteristics of trace elements in limestone of the Neoproterozoic Wangshan Formation in northern Anhui Province. Journal of Palaeogeography, 14(6): 813 ~ 820(in Chinese with English abstract).
- Chen Yongquan, Xu Yanlong, Zhang Yanqiu, Wang Xuan. 2015. Geochemistry and genesis research on lower ordovician limestones-dolostones transitional rocks in Tazhong-Bachu uplift, Tarim basin. Natural Gas Geoscience, 26(7): 1344~ 1353(in Chinese with English abstract).
- Cholle P A, Arthur M A. 1980. Carbon isotopic fluctuation in cretaceous pelatic limestone: potential stratigraphic and petroleum Exploration. AAPG Bulletin, $64: 67 \sim 87$.
- Dunham R J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional textures. AAPG Special Volumes, 46 (1): 108 \sim 121.
- Feng Zengzhao. 1993. Sedimentary Petrography: First Volume. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993:308~319(in Chinese).
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology, 23(10): 921~924.
- Folk R L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. AAPG Bulletin, $43(1):1\sim 38$.
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H, Tang J X, Qi L. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence. Journal of Sedimentary Research, 72(3):393~407.
- Han Xiaozhong, Zhang Zilong, Yao Chunling, Li Ride, Li Shengxiang, Miao Aisheng, Yang Jianxin. 2008. Discussion on metallogenic model for sandstone-hosted uranium deposits in northeastern Ordos basin. Mineral Deposits, 27(3):415~421 (in Chinese with English abstract).
- Haskin L A, Haskin M A, Frey F A. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earth elements. In: Ahrens L H, ed. Origin and Distribution of Elements. Oxford: Pergamon, 889~910.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. 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. Chemical Geology, 99(1-3): 65~82.

- He Yuyang, Zhao Guangtao, Zhao Li, Long Xiaojun, Qi Qi, Xu Cuiling. 2014. Geochemistry characteristics and palaeoenvironment significance of Qixia formation in Chaobei area. Periodical of Ocean University of China, 44(5): 79~88(in Chinese with English abstract).
- Hu Junjie, Li Qi, Li Juan, Zhang Li, Kong Xiu, Liu Yong. 2014. Geochemical characteristics and its application to depositional environment analysis of Permian Carbonates in Jiaomuri area, Qiangtang basin. Geological Journal of China Universities, 20 (4): 520~527(in Chinese with English abstract).
- Hu Xiaofeng, Liu Zhaojun, Liu Rong, Sun Pingchang, Xu Shengchuan, Meng Qingtao, Liu Shiyou. 2012. Clay mineral and inorganic geochemical characteristics of Eocene Huadian formation in Huadian basin and their paleoenvironment implications. Journal of China Coal Society, 37(3): $416 \sim 423$ (in Chinese with English abstract).
- Jin Qiang, Zhu Guangyou. 2006. Progress in research of deposition of oil source rocks in saline lakes and their hydrocarbon generation. Geological Journal of China Universities, 12(4): 483~492(in Chinese with English abstract).
- Jin Chengguang, Wang Qicong, Liu Jiawei, Shi Kun, Wei Wei, Wang Yan, Li Baiqiang, Ning Bo, Yan Zuo. 2016. Lithofacies and geochemical characteristics of Ordovician limestone in Ordos basin. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 36(1): 47~54(in Chinese with English abstract).
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditionsin ancient mudstones. Chemical Geology, 111(1-4): 111~129.
- Keith M L, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition and environmental classification of selected limestones and fossils. Geochimica Cosmochimi Acta, 28:1786 ~1816.
- Lerman A, Baccini P. 1978. Lakes: Chemistry, Geology, Physics. New York: Springer-Verlag, 1~363.
- Li Shuangying, Li RenWei, Meng QingRen, Wang DaoXuan, Liu Yin. 2005. Geochemistry of the Mesozoic and Cenozoic detrital rocks and its constraints on provenance in the southeast foot of Dabie Mountains. Acta Petrologica Sinica, 21(4): 1157~1166 (in Chinese with English abstract).
- Li Tong. 1994. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust. Geochimica, 23(2): 140~145(in Chinese with English abstract).
- Li Zhichao, Li Wenhou, Lai Shaocong, Li Yongxiang, Li Yuhong, Shang Ting. 2015. The Palaeosalinity Analysis of Paleogene Lutite in Weihe basin. Acta Sedimentologica Sinica, 33(3): 480 ~485(in Chinese with English abstract).
- Li Zhiming, Liu Jiajun, Hu Ruizhong, Liu Yuping, Li Chaoyang, He Mingqin. 2003. Tectonic setting and provenance of source rock for sedimentary rocks in lanping Mesozoic-Cenozoic basin: evidences from geochemistry of sandstones. Acta Sedimentologica Sinica, 21(4): 547 ~ 552 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziying, Fang Xiheng, Chen Anping, Ou Guangxi, Sun Ye, Zhang Ke, Xia Yuliang, Zhou Wenbin, Chen Fazheng, Li Mangen, Liu Zhonghou, Jiao Yangquan. 2009. Superposition metallogenic model of sandstone-type uranium deposit in the Northeastern Ordos basin. Uranium Geology, 25(2):65~70 (in Chinese with English abstract).
- Liang Hongbin, Kuang Hongwei, Liu Junqi, Guo Yongjun, Su Jing. 2007. Discussion on orig in formarls of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Shulu Sag of Central Hebei Depression. Journal of Palaeogeography, 9(2): $167 \sim 174$ (in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun, Zeng Yunfu. 1985. The Basis and Working Method of Lithofacies Paleogeography. Beijing: Geological Publishing House, 210~225(in Chinese).
- Liu Gang, Zhou Dongsheng. 2007. Application of microelements

analysis in indentifying sedimentary environment: taking Qianjiang Formation in the Jianghan basin as an example. Petroleum Geology and Experiment, 29(3): $307 \sim 311$ (in Chinese with English abstract).

- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, Yue Leping, Zhao Junfeng, Wang Jianqiang. 2006. Space-Time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin. Acta Geologica Sinica, 80(5): 617~638(in Chinese with English abstract).
- Liu Hanbin, Xia Yuliang, Tian Shifeng. 2007. Study on geochronology and uranium source of sandstone-type uranium deposit in Dongsheng area. Uranium Geology, 23 (1): 23~29 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhaojun, Meng Qingtao, Liu Rong, Dong Qinghhui. 2009. Geochemical characteristics of oil shale of Eocene Jijintun Formation and its geological significance, Fushun basin. Acta Petrologica Sinica, 25 (10): 2340 ~ 2350 (in Chinese with English abstract).
- Ma Baolin, Wen Changqing. 1991. Formation, Evolution and Hydrocarbon of Sedimentary Rocks in the Tarim basin. Beijing: Ccience Press, 36~38(in Chinese).
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. The Journal of Geology, 101(2): 295~303.
- McLennan S M. 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2(4): 203~236.
- McLennan S M, Taylor S R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. Journal of Geology, 99(1):1~21.
- McKenzie J A. 1985. Carbon isotopes and productivity in the lacustrine and marineenvironment. In: Strunn W (ed). Chemical Processes in Lakes. J. Wiley, Toronto, 99 ~118.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proteorzoi climates and Plate motion inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 299(21):715~717.
- Peng Zhichao, Zhao Hongge, Li Yanan, Lei Linlin, Fu Xinghui, Li Meng. 2018. Geochemical characteristics of the Late Triassic Yanchang Formation in the Helan Mountain area and their geological significance. Chinese Journal of Geology, 53(3): 908 ~921(in Chinese with English abstract).
- Robison R A, Rowell A J A. 1980. Potential series boundary within the Cambrian. International Geological Congress (Abstracts). 26:279.
- Saller A H. 1984. Petrologic and geochemical constraints on the origin of subsurface dolomite, Enewetak Atoll: an example of dolomitization by normal seawater. Geology, 12 (4): 217 ~220.
- Shackleton N J. 1974. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus Uvigerina: isotopic changes in the ocean during the last glacial. Cent. Nat. Rech. Sci. Colloq. Int. 219, 203~209.
- Shao Lei, Liu Zhiwei, Zhu Weilin. 2000. Application of sedimentary geochemistry of terrigenous clastic rock to basin analysis. Earth Science Frontiers, 7(3): 297 \sim 304 (in Chinese with English abstract).
- Shao Longyi. 1994. The Radition of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc. Journal of China University of Mining & Technology, 23(1): 39~45(in Chinese with English abstract).
- Song Jian, Zhao Xingmin, Chen Dengchao, Deng Jian, Miao Zhongying, Ming Chengdong, Lu Cheng. 2012. Rare earth and trace elements geochemical characteristics of the dark Permian mudstones in Ejinaqi and its surrounding areas, Western Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica, 86 (11): 1773 ~ 1780 (in Chinese with English abstract).
- Song Lijun, Liu Chiyang, Zhao Hongge, Wang Jianqiang, Zhang Xiaolong. 2016. Geochemical characteristics, sedimentary environment and tectonic setting of Huangqikou Formation, Ordos basin. Earth Science, 41(8): 1295 ~ 1308 (in Chinese

with English abstract).

- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Sun Wei, Chen Ming, He Jianglin, Cao Junfeng, Zeng Shengqiang. 2015. Geochemical characteristics and diagenetic fluid from reef facies carbonate rocks of upper Jurassic-Lower Cretaceous in Bandaohu area, Qiangtang basin, Tibet. Journal of Mineralogy and Petrology, 35(2): $32 \sim 39$ (in Chinese with English abstract).
- Stuiver M. 1970. Oxygen and carbon isotope ratios of fresh-water carbonates as climate indicators. Journal of Geophysical Research, 75: 5247~5257.
- Taylor S, McLennan B. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publication.
- Tenger, Liu Wenhui, Xu Yongchang, Chen Jianfa. 2005. Correlative study on parameters of inorganic geochemistry and hydrocarbon source rocks foamative environment. Advances in Earth Sciences, 20 (2): 193 ~ 200 (in Chinese with English abstract).
- Tribovillard N, Averbuch O, Devleeschouwer X, Racki G, Riboulleau A. 2004. Deep-water anoxia over the Frasnian – Famennian boundary (La Serre, France): a tectonically-induced oceanic anoxic event? Terra Nova, 16: 288~295.
- Wang Yi, Yang Weili, Deng Jun, Wu Bolin, Li Ziying, Wang Mingzhen. 2014. Accumulation system of cohabitating multienergy minerals and their comprehensive exploration Insedimentary basin—a case study of Ordos basin, NW China. Acta Geologica Sinica, 88(5): 815 ~ 824 (in Chinese with English abstract).
- Wright V P. 1992. A revised classification of limestones. Sedimentary Geology, 76(3/4):177~185.
- Wu Xingyuan, Liu Xiaoyang, Ren Junping, He Shengfei, Sun Kai, Sun Hongwei. 2019. Recent progress of the geochemical and petrogenesis research of the Panda Hill Carbonatite, Tanzania. Geological Survey and Research, 42(2): 86~95(in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang, Lin Jingrong, Liu Hanbin, Fan Guang, Hou Yanxian. 2003. Research on geochronology of sandstone-hosted uranium ore-formation in major uranium-productive basins, northern China. Uranium Geology, 19(3): 129~136(in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang, Liu Hanbin. 2005. Pre-enrichment and metallogeny of uranium in Zhiluo Formation sand bodies of Dongsheng area, Ordos basin. World Nuclear Geoscience, 22(4): 187~191 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jiancheng, Du Jianguo, Xu Wei, Yang Xiaoyong. 2006. The geological and geochemical characteristics of manganese-bearing sequences of Guichi, Anhui Province, East China. Geological Review, 52(3):396~408(in Chinese with English abstract).
- Xu Chongkai, Liu Chiyang, Guo Pei, Li Maowen, Huang Lei, Zhao Yan, Pan Yinhua, Zhang Yiyin. 2018. Geochemical characteristics and their geological significance of intrasalt mudstones from the Paleogene Qianjiang Formation in the Qianjiang Graben, Jianghan basin, China and its significance. Acta Sedimentologica Sinica, 36(3): 617~629(in Chinese with English abstract).
- Xue Chuandong, Liu Xing, Qi Chunying, Wei Haixia, Song Xueli, Liu Yongqiang, Hao Baiwu. 2007. Geochemical characteristics of modern sediments in the Dianchi Lake, Kunming, and their environmental significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 26(6): 582~590(in Chinese with English abstract).
- Yang Yuncheng, Hou Guangcai, Wen Dongguang, Pang Zhonghe, Wang Dong. 2005. Hydrogen-oxygen isotope composition of precipitation and seasonal effects on δ^{18} O of precipitation on Ordos basin. Acta Geoscientica Sinica, 26(Sup.)289~292(in Chinese with English abstract).

- Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhao Xixi, Zhou Kenken, Li Junpeng, Huang Huagu. 2008. Geochemistry of rare earth elements and origin of positive europium anomaly in Miocene-Oligocene Lacustrine Carbonates from Tuotuohe basin of Tibetan Plateau. Acta Sedimentologica Sinica, $26(1): 1 \sim 10$ (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun, Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Ma Hailin, Lu Chao, Yang Cai, Guo Genwan. 2016. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos basin and their paleoenvironmental implications. Acta Geologica Sinica, 90 (12): 3454~3472(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Zhang Yun, Miao Peisen, Yu Renan, Li Jianguo, Jin Ruoshi, Sun Lixin. 2018. Study on the chemical index of alteration of the Middle and Late Jurassic Strata in the western margin of Ordos basin and its implications. Geological Survey and Research, 41 (4): 258 ~ 262 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Mu Kehua, Cui Zhijiu, Feng Jinliang, Yang Jianqiang. 2007. Record of the environmental change since Holocene in the region of Gongwang Mountain, Yunnan Province. Earth and Environment, 35 (4): 343 ~ 350 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiulian. 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isoyope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater. Acta Sedimentologica Sinica, 3 (4): 17~30(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Liang Jiwei, Wang Xiaomei, Yu Lin, Huang Lei, Liu Yongtao. 2010. Restoration of the original sedimentary boundary of the Middle Jurassic Zhiluo Formation-Anding formation in the Ordos basin. Acta Geologica Sinica, 84 (4): 553~569(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Yu Lin, Liang Jiwei, Huang Lei. 2006. Sedimentary tectonic features of Ordos basin in Middle Jurassic Zhiluo-Anding stages. Oil & Gas Geology, 27(2): 159 ~166(in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Liu Henian, Wu Lei, Chen Renjin, Shi Jiannan, Li Fengjie. 2012. Geochemical characteristics and diagenetic fluid of the Callovian-Oxfordian carbonate reservoirs in Amu Darya basin. Acta Sedimentologica Sinica, 28 (3): 961 ~ 970 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Liu Meiqing. 1999. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos basin. Oil & Gas Geology, 20 (1): 20~35(in Chinese with English abstract).

参考文献

- 陈全红,李文厚,胡孝林,李克永,庞军刚,郭艳琴. 2012. 鄂尔多 斯盆地晚古生代沉积岩源区构造背景及物源分析.地质学报, 86(7):1150~1162.
- 陈松,桂和荣,孙林华,刘向红,马艳平.2011. 皖北九顶山组灰岩 稀土元素地球化学特征及对古海水的制约.中国地质,38(3): 664~672.
- 陈松,傅雪海,桂和荣,孙林华.2012.皖北新元古界望山组灰岩微 量元素地球化学特征.古地理学报,14(6):813~820.
- 陈永权,徐彦龙,张艳秋,王轩. 2015.塔中一巴楚地区下奥陶统云 灰岩地球化学与成因探讨. 天然气地球科学,26(7):1344 ~1353.
- 冯增昭. 1993. 沉积岩石学:上册. 第二版. 北京:石油工业出版社, 308~319.
- 韩效忠,张字龙,姚春玲,李西得,李胜祥,苗爱生,杨建新. 2008. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀成矿模式研究.矿床地质,27 (3):415~421.
- 何雨旸,赵广涛,赵利,龙晓军,祁奇,徐翠玲.2014. 巢北地区二 叠系栖霞组碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义.中国海洋 大学学报,44(5):79~88.
- 胡俊杰,李琦,李娟,张立,孔秀,刘勇. 2014. 羌塘盆地角木日地 区二叠系碳酸盐岩元素地球化学特征及其对古沉积环境的指

示. 高校地质学报, 20(4): 520~527.

- 胡晓峰,刘招君,柳蓉,孙平昌,许圣传,孟庆涛,柳世友. 2012. 桦甸盆地始新统桦甸组黏土矿物和无机地球化学特征及其古 环境意义.煤炭学报,37(3):416~423.
- 金强,朱光有.2006.中国中新生代咸化湖盆烃源岩沉积的问题及 相关进展.高校地质学报,12(4):483~492.
- 靳程光,王起琮,刘佳玮,石堃,魏巍,王妍,李百强,宁博,闫佐. 2016. 鄂尔多斯盆地奥陶系石灰岩岩相及地球化学特征.西安 科技大学学报,36(1):47~54.
- 李双应,李任伟,孟庆任,王道轩,刘因.2005.大别山东南麓中新 生代碎屑岩地球化学特征及其对物源的制约. 岩石学报,21 (4):1157~1166.
- 黎彤. 1994. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度. 地球 化学, 23(2): 140~145.
- 李智超,李文厚,赖绍聪,李永项,李玉宏,尚婷. 2015. 渭河盆地 古近系细屑岩的古盐度分析. 沉积学报,33(3):480~485.
- 李志明,刘家军,胡瑞忠,刘玉平,李朝阳,何明勤. 2003. 兰坪中 新生代盆地沉积岩源区构造背景和物源属性研究——砂岩地 球化学证据. 沉积学报,21(4):547~552.
- 李子颖,方锡珩,陈安平,欧光习,孙晔,张珂,夏毓亮,周文斌, 陈法正,李满根,刘忠厚,焦养泉.2009.鄂尔多斯盆地东北部 砂岩型铀矿叠合成矿模式.铀矿地质,25(2):65~70.
- 梁宏斌, 旷红伟, 刘俊奇, 郭永军, 苏静. 2007. 冀中坳陷束鹿凹陷 古近系沙河街组三段泥灰岩成因探讨. 古地理学报, 9(2): 167 ~174.
- 刘宝珺,曾允孚. 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社, 210~225.
- 刘池洋,赵红格,桂小军,岳乐平,赵俊峰,王建强.2006.鄂尔多 斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应.地质学报,80 (5):617~638.
- 刘刚,周东升. 2007. 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. 石油实验地质, 29(3): 307~311.
- 刘汉彬,夏毓亮,田时丰.2007.东胜地区砂岩型铀矿成矿年代学 和成矿铀源研究.铀矿地质,23(1):23~29.
- 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉, 董清水. 2009. 抚顺盆地始新统计军屯组油 页岩地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 25(10): 2340 ~2350.
- 马宝林,温常庆.1991. 塔里木沉积岩形成演化与油气.北京:科学 出版社,36~68.
- 彭智超,赵红格,李亚男,雷琳琳,付星辉,李蒙.2018.贺兰山地 区晚三叠世延长组地球化学特征及其地质意义.地质科学,53 (3):908~921.
- 邵磊,刘志伟,朱伟林. 2000. 陆源碎屑岩地球化学在盆地分析中的应用. 地学前缘,7(3):297~304.
- 邵龙义.1994.碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系.中国矿业 大学学报,23(1):39~45.
- 宋健,赵省民,陈登超,邓坚,苗忠英,明承栋,陆程. 2012. 内蒙 古西部额济纳旗及邻区二叠纪暗色泥岩微量元素和稀土元素 地球化学特征.地质学报,86(11):1773~1780.
- 宋立军,刘池阳,赵红格,王建强,张小龙.2016.鄂尔多斯地区黄 旗口组地球化学特征及其沉积环境与构造背景.地球科学,41 (8):1295~1308.
- 孙伟,陈明,何江林,曹竣锋,曾胜强. 2015. 羌塘盆地半岛湖地区 上侏罗-下白垩统礁灰岩地球化学特征和成岩流体性质. 矿物 岩石,35(2):32~39.
- 腾格尔,刘文汇,徐永昌,陈践发. 2005. 无机地球化学参数与有效 经源岩发育环境的相关研究.地球科学进展,20(2): 193 ~200.
- 王毅,杨伟利,邓军,吴柏林,李子颖,王明镇.2014.多种能源矿 产同盆共存富集成矿(藏)体系与协同勘探——以鄂尔多斯盆 地为例.地质学报,88(5):815~824.
- 吴兴源,刘晓阳,任军平,何胜飞,孙凯,孙宏伟. 2019. 坦桑尼亚 Panda 山碳酸岩地球化学特征及岩石成因研究进展. 地质调查 与研究,42(2):86~95.
- 夏毓亮,林锦荣,刘汉彬,范光,侯艳先. 2003. 中国北方主要产铀

盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究.铀矿地质,19(3):129 ~136.

- 夏毓亮,刘汉彬. 2005. 鄂尔多斯盆地东胜地区直罗组砂体的预富 集与铀成矿. 世界核地质科学,22(4):187~191.
- 谢建成,杜建国,许卫,杨晓勇.2006.安徽贵池地区含锰岩系地质 地球化学特征.地质论评,52(3):396~408.
- 徐崇凯,刘池洋,郭佩,黎茂稳,黄雷,赵岩,潘银华,张益银. 2018. 潜江凹陷古近系潜江组盐间泥岩地球化学特征及地质意 义. 沉积学报,36(3):617~629.
- 薛传东,刘星, 元春英,魏海霞,宋雪丽,刘勇强, 郝百武. 2007. 滇池近代沉积物的元素地球化学特征及其环境意义. 岩石矿物 学杂志,26(6):582~590.
- 杨勋城, 侯光才, 文东光, 庞忠和, 王东. 2005. 鄂尔多斯盆地大气 降雨氢氧同位素的组成和季节效应. 地球学报, 26(Sup.)289 ~292.
- 伊海生,林金辉,赵西西,周恳恳,李军鹏,黄华谷.2008.西藏高 原沱沱河盆地渐新世一中新世湖相碳酸盐岩稀土元素地球化 学特征与正铕异常成因初探.沉积学报,26(1):1~10.
- 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.

- 张天福,张云,苗培森,俞礽安,李建国,金若时,孙立新. 2018. 鄂尔多斯盆地西缘中晚侏罗世地层化学蚀变指数(CIA)研究及 其意义.地质调查与研究,41(4):258~262.
- 张威,穆克华,崔之久,冯金良,杨建强.2007.云南拱王山地区全 新世以来的环境变化记录.地球与环境,35(4):343~350.
- 张秀莲. 1985. 碳酸盐岩中氧、稳定同位素与古盐度、古水温的关系. 沉积学报,3(4):17~30.
- 赵俊峰,刘池洋,梁积伟,王晓梅,喻林,黄雷,刘永涛. 2010. 鄂 尔多斯盆地直罗组一安定组沉积期原始边界恢复.地质学报, 84(4):553~569.
- 赵俊峰,刘池洋,喻林,梁积伟,黄雷.2006.鄂尔多斯盆地中侏罗 世直罗一安定期沉积构造特征.石油与天然气地质,27(2): 159~166.
- 郑荣才,刘合年,吴蕾,陈仁金,史建南,李凤杰. 2012. 阿姆河盆 地卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩储层地球化学特征和成岩流体分析. 岩石学报,28(3):961~970.
- 郑荣才,柳梅青. 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):20~35.

Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of marls from the Anding Formation in the Zhidan area, Ordos basin

TANG Chao^{*1,2)}, XIAO Peng^{1,2)}, WEI Jialin^{1,2)}, XU Zenglian^{1,2)}, LIU Huajian^{1,2)}, ZHAO Lijun¹⁾

1) Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2) Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

* Coressponding author: tjtangchao@163.com

Abstract

Based on the systematic petrological and geochemical analysis of the marls at the top of the Anding Formation in the Zhidan area of Ordos basin, the paleo-salinity, redox environment, paleoclimate and provenance background at the end of the deposition period of the Anding Formation were studied. The results show that the marls of the Anding Formation are mainly composed of calcite and dolomite, of which calcite content is 26.5% \sim 68.5%, with an average of 42.5%, and dolomite content is 10.1% \sim 40.5%, with an average of 25.3%. The rock has a high Sr abundance and Sr / Ba ratio, indicating that the water salinity is high during sedimentation. The range of carbon and oxygen isotopes is not large, δ^{13} C_{PDB} is $-3.5\%_0 \sim 2.2\%_0$, with an average of $0.55\%_0$, $\delta^{18}O_{PDB}$ is $-6\%_0 \sim -1.2\%_0$, with an average of $-3.87\%_0$, which is close to the saltwater carbonate deposits, and the Z value range is $119.53 \sim 130.01$, with an average of 126.51, indicating that the marl section of the Anding Formation was formed during the lake salinization period. The chemical alteration index CIA and Sr/Cu, SiO₂/Al₂O₃ comprehensively indicate that the chemical weathering of the source area of marl is not strong, and it was deposited in a semi-arid and hot climate. The redox environmental indicators V/Cr, V/(V+Ni) ratio, and the high enrichment of sensitive metal elements U and Mo indicate that the paleowater conditions during the deposition of marl were generally in a reducing environment. La/Yb-2 REE and La/Sc-Co/Th source rock attribute discrimination diagrams show that the main source of marl sedimentary rocks is dominated by felsic rocks, mixed with medium-basic magmatic rocks, which have a certain affinity with Paleoproterozoic metamorphic rock series in the Yinshan area of northern Ordos. The semi-arid and hot climatic conditions at the end of the Anding Formation are conducive to the activation and migration of uranium elements, the formation of oxygen-containing uranium-containing fluids in the source area and the original enrichment and precipitation of uranium in the lake basin, which provides important conditions for large-scale sandstonetype uranium mineralization in the Ordos basin.

Key words: Anding Formation; marls; geochemistry; paleoenvironment; Ordos basin