

# 鄂尔多斯盆地东缘马家沟组 元素地球化学特征及古沉积环境

王琳霖<sup>1</sup>, 浮 昀<sup>2</sup>, 方诗杰<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部 盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

2. 长庆油田 第八采油厂采油工艺研究所, 西安 7100183; 3. 新疆油田公司 陆梁油田作业区, 新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:**通过对鄂尔多斯盆地东缘奥陶系马家沟组的岩石类型和原生沉积物的主、微量元素的分布特征进行分析,探讨了马家沟组元素地球化学分布与沉积环境之间的关系。马家沟组主要岩石类型为碳酸盐岩和蒸发岩,主量元素中CaO和MgO含量较高且变化大, SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O和Ti<sub>2</sub>O等主要代表陆源组分氧化物的含量较低,反映马家沟组沉积受陆源物质影响较小,为正常的海相沉积。微量元素中Sr、U的平均含量相对上地壳略富集, Ba、Rb、Zn、Cr等平均含量相对上地壳亏损,指示奥陶纪时期研究区远离陆源碎屑。MgO/CaO、Rb/Sr、Sr/Cu和Sr/Ba等比值综合指示,马家沟组整体沉积时期研究区为咸水介质的沉积环境,主要为干热气候背景下的海相沉积且存在干湿交替的气候演化,在马二段、马四段和马五段沉积的中晚阶段,经历了短暂的干热气候向相对湿润气候转换。

**关键词:**马家沟组; 主量元素; 微量元素; 古气候; 奥陶纪; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.31

文献标识码: A

## Elemental geochemical characteristics and geological significance of Majiagou Formation, eastern Ordos Basin

WANG Linlin<sup>1</sup>, FU Yun<sup>2</sup>, FANG Shijie<sup>3</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences; MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Beijing 100037, China; 2. Oil Production Technology Institute, Eighth Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. Luliang Oilfield Operation District, Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

**Abstract:** Rock type and the distribution of major and trace elements of the Ordovician Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin were used to elucidate the sedimentary environment and the origin of the sediments. The results showed that the main rock types in the Majiagou Formation are carbonate and evaporite rocks. The CaO and MgO contents are high and vary widely. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Ti<sub>2</sub>O and other major representatives of a terrigenous component have low contents, indicating marine facies deposits. The average contents of Sr and U in the trace elements are slightly enriched compared with the upper crust, and the average contents of Ba, Rb, Zn, and Cr are lower than those in the upper crust, indicating a poor terrigenous supply. The distribution curves of MgO/CaO, Rb/Sr, Sr/Cu and Sr/Ba ratios indicated that the Majiagou Formation was deposited in a marine environment under a dry and warm climate accompanying a dry-wet climate evolution. During the O<sub>2</sub>m<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>m<sub>4</sub> and O<sub>2</sub>m<sub>5</sub> stages, there was a brief transition from dry-hot climate to relatively humid climate.

**Key words:** Majiagou Formation; major elements; trace elements; palaeoclimate; Ordovician; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是我国重要的含油气和含盐盆地。近年来,随着油气和钾盐等多矿种综合勘查工作在鄂尔多斯盆地的持续推进,寻找鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储层气藏和海相钾盐已经成为该地区的重要工作。多年来,针对鄂尔多斯盆地奥陶系沉积储层特征及形成机理开展了丰富的工

作<sup>[1-3]</sup>。已有的研究证明,广大古陆内形成的巨量蒸发岩普遍与地质历史中干旱的气候有关,湿热气候及其与干旱气候频繁的转换不利于钾盐的形成<sup>[4]</sup>。因此,在我国小陆块海相盆地成钾的构造背景下,古气候条件是制约钾盐生成和分布的重要因素。准确分析奥陶纪成盐时期的古气候条件和

沉积环境,可以构建奥陶系马家沟组沉积特征与沉积期古气候的时空耦合关系,其古气候演化也可为进一步寻找含钾层段提供新的参考。沉积水体中原生沉积物内保持了古沉积时期原始的元素与同位素地球化学信息,其化学元素分配及比值的变化可以反映古气候以及成岩流体的古盐度、古氧化还原性质<sup>[5-17]</sup>。因此,本文以鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组沉积特征为基础,应用主、微量元素地球化学分析方法,建立马家沟组沉积时期的古气候演化序列,以期为该地区奥陶系油气和钾盐勘探提供参考。

### 1 地质背景

鄂尔多斯盆地是华北地台西部的一个次级构造单元,盆地内部构造稳定,整体东高西低,地层相对平缓。盆地依照现今构造特征主要划分为西缘冲断带、天环坳陷、伊盟隆起、伊陕斜坡、晋西挠褶带及渭北隆起等 6 个构造单元(图 1a)。盆地的结晶基底为太古代和下元古代的变质岩系,上部沉积地层经历中新元古代拗拉谷、早古生代浅海台地、

晚古生代近海平原、中生代内陆盆地和新生代周边断陷共 5 个演化阶段,形成下古生界碳酸盐岩、上古生界海陆过渡相煤系和中新代内陆碎屑沉积的三层结构。

马家沟组沉积时期,受中央古隆起和边侧坳陷影响,盆地处于陆表海沉积背景,形成了以碳酸盐岩和蒸发岩为主的多旋回不等厚沉积。按照沉积特征将马家沟组划分为 3 个完整沉积旋回和 6 个岩性段(图 1b),自下而上分别为马一段—马六段。其中马一段、马三段和马五段以蒸发岩沉积为主,主要岩性为盐岩和硬石膏岩,夹灰岩和泥质云岩以及少量膏岩;马二段、马四段和马六段为正常浅海沉积,岩性主要为灰岩和白云岩,夹膏岩和云质泥岩。

### 2 岩石类型

鄂尔多斯盆地东缘镇钾 1 井(图 1a)马家沟组自上而下依次发育马五段、马四段、马三段、马二段和马一段。马五段又进一步细分成了 5 个亚段:马五<sup>1-3</sup>亚段岩性为浅灰色粉晶灰岩和角砾灰岩;马五<sup>4</sup>

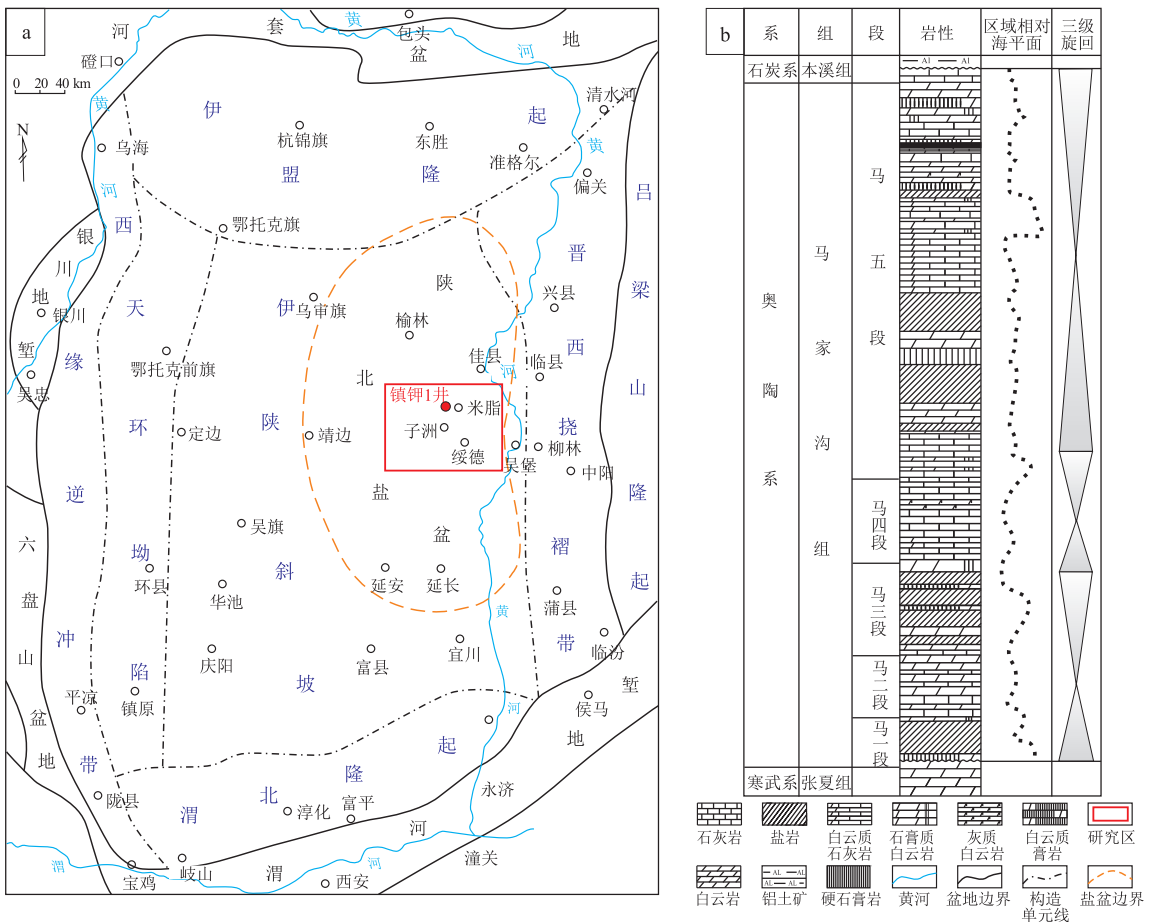


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元及地层分布

Fig.1 Tectonic units and stratigraphic column of the Ordos Basin

亚段,以盐岩、膏岩和膏质云岩为主;马五<sup>5</sup>亚段岩性为灰黑色斑状泥粉晶—粗粉晶灰岩;马五<sup>6</sup>亚段岩性为浅褐色、褐红色、灰色、灰白色盐岩,以及灰白色膏岩、深灰色膏质云岩、钙质泥岩;马五<sup>7-10</sup>亚段岩性为灰黑色灰岩与灰白色膏岩、深灰色泥晶云岩互层。马四段岩性为灰黑色灰岩、云质灰岩和灰质云岩,普遍具斑状和缝合线构造。马三段岩性以红色盐岩、灰白色膏岩、深灰白色云岩不等厚互层为主。马二段岩性主要为深灰色灰岩、灰黑色灰质云岩,夹盐岩、石膏岩和白云岩,其中石盐铸模孔和缝合线构造发育。马一段岩性以灰白色膏岩、深灰—灰黑色泥质云岩、浅褐色—褐红色盐岩为主,底部沉积一层约2 m厚的青灰色石英砂岩,与下伏地层寒武系张夏组呈假整合接触。

通过岩心观察和岩石薄片分析,马家沟组的岩石类型以碳酸盐岩和蒸发岩为主,碎屑岩发育较少。其中,碳酸盐岩包括灰岩和白云岩,灰岩进一步划分为灰泥灰岩(图2a)和生物碎屑灰岩(图2b);白云岩进一步划分为泥晶白云岩(图2c)、粉晶白云岩(图2d, 2e)和细晶白云岩(图2f)。蒸发

岩包括石膏岩和盐岩(图2i),其中膏岩又细分为硬石膏岩(图2g)、含云膏岩(图2h)和含泥硬石膏岩。

### 3 马家沟组元素地球化学特征

#### 3.1 测试方法与成岩作用影响

样品来自镇钾1井奥陶系钻井岩心,共18件,其中马二段3件,马三段2件,马四段2件,马五段11件,样品基本可以代表马家沟组整体沉积时期的特征。分析测试内容主要包括主量元素和微量元素(表1)。主量元素分析仪器为AxiosmAX型X射线荧光光谱仪,微量元素为NexION300D等离子体质谱仪。主量元素和微量元素测试主要依据的检测标准分别为GB/T 14506.28-2010和GB/T 14506.30-2010,由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

较强的成岩蚀变可能会引起岩石中元素组成的改变,进而影响对沉积环境信息的保存。DERRY等<sup>[18]</sup>和JACOBSEN等<sup>[19]</sup>分别对西伯利亚稳定地块内下寒武统碳酸盐岩样品以及西伯利亚地区石灰岩样品的主微量元素进行统计,建立了Mn、Sr

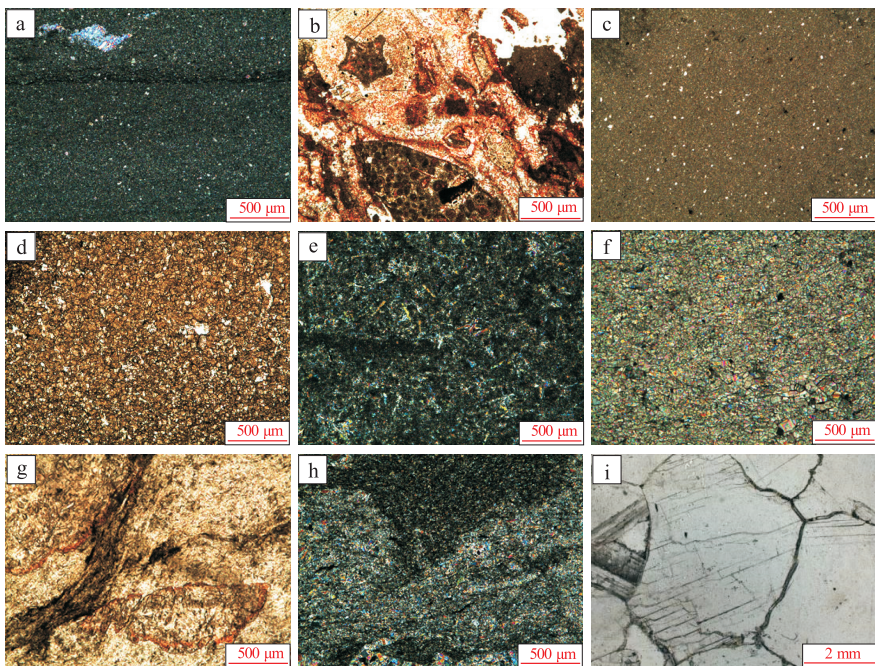


图2 鄂尔多斯盆地东缘奥陶系镇钾1井马家沟组岩石类型与特征

a. 灰泥石灰岩, 2 850.25 m。矿物成分: 方解石 95%, 白云石 3%, 其他 2%; 结构组分: 晶粒 5% (主要为硬石膏、白云石), 基质 95% (主要为泥晶方解石); b. 生物碎屑灰岩, 3 186.58 m。矿物成分: 方解石 85%, 黏土 15%; 结构组分: 颗粒 80% (主要为生物碎屑), 基质 20% (灰泥、泥质); c. 泥晶白云岩, 3 185.99 m。矿物成分: 白云石 97%, 石英 2%, 石膏 1%; 结构组分: 晶粒 3% (石英和硬石膏), 云泥 97% (云泥); d. 粉晶白云岩, 2 860.28 m。矿物成分: 白云石 99%, 有机质 1%; 结构组分: 晶粒 99% (白云石和生物碎屑), 基质 1% (黑色有机质或沥青); e. 膏质泥粉晶白云岩, 2 890.34 m。矿物成分: 白云石 70%, 硬石膏 27%, 泥质 3%; 结构组分: 晶粒 30% (硬石膏), 基质 70% (云泥); f. 细晶白云岩, 3 183.79 m。矿物成分: 白云石 100%; 结构组分: 晶粒 100%; g. 硬石膏岩, 2 873.04 m。矿物成分: 硬石膏 85%, 白云石 15%; 结构组分: 晶粒 85% (硬石膏), 基质 15% (云泥和暗色有机质); h. 含云硬石膏岩, 2 867.5 m。矿物成分: 硬石膏 90%, 白云石 10%; 结构组分: 晶粒 90% (硬石膏), 基质 10% (云泥); i. 石盐, 2 810.255 m

Fig.2 Rock types and characteristics of the Ordovician Majiagou Formation in well Zhenjia 1, eastern Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地东缘奥陶系马家沟组主量、微量元素含量

Table 1 Major and trace element concentration values in the Ordovician Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin

编号	深度/ m	主量元素含量/%									微量元素含量/ $10^{-6}$											
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	Ti <sub>2</sub> O	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Ba	Th	U
ZJ1	2 475.7	3.63	0.802	0.844	20.71	28.83	0.083	0.200	0.010	0.045	6.67	2.92	1.24	8.27	3.85	3.77	5.73	124	2.93	75.00	0.958	2.110
ZJ2	2 482.4	5.11	0.913	0.567	17.77	29.01	0.064	0.187	0.009	0.062	8.49	3.45	1.12	6.69	3.75	4.32	5.44	391	3.49	9.05	1.140	1.300
ZJ3	2 514.7	1.28	0.382	0.172	4.07	49.31	0.033	0.106	<0.004	0.019	6.29	1.94	1.11	10.70	2.45	2.40	2.48	104	1.38	6.21	0.435	0.838
ZJ4	2 542.6	2.16	0.343	0.252	17.36	33.76	0.028	0.151	0.005	0.029	6.63	2.26	0.84	8.03	3.23	3.56	3.17	101	0.90	8.67	0.491	0.320
ZJ5	2 545.4	1.94	0.450	0.242	17.66	33.60	0.039	0.191	0.004	0.030	7.94	2.77	0.97	8.09	4.83	5.14	4.03	102	1.14	10.90	0.614	0.605
ZJ7	2 614.5	3.15	0.867	0.390	3.26	48.15	0.039	0.402	0.006	0.062	20.10	6.63	3.37	18.00	8.76	10.70	16.90	398	4.48	23.10	2.160	3.450
ZJ8	2 711.6	2.17	0.198	0.095	2.24	52.79	0.035	0.105	0.005	0.024	5.69	1.42	1.05	11.50	3.85	2.28	1.16	173	0.62	5.45	0.240	0.332
ZJ9	2 766.6	1.16	0.160	0.072	1.59	51.44	0.033	0.088	<0.004	0.017	3.98	1.92	1.01	10.60	2.13	2.04	1.57	135	2.44	7.43	0.251	0.253
ZJ11	2 913.5	2.31	0.361	0.181	15.21	31.72	0.041	0.187	0.006	0.023	3.85	1.72	0.95	7.56	3.21	2.89	3.65	419	1.52	9.32	0.488	1.250
ZJ12	2 916.6	1.27	0.216	0.123	11.45	41.30	0.028	0.091	0.004	0.019	7.07	1.70	1.11	10.70	1.91	1.73	2.11	185	1.07	5.92	0.411	0.439
ZJ13	2 932.6	1.92	0.354	0.120	4.31	49.33	0.047	0.178	0.004	0.024	4.64	1.34	1.05	10.50	2.66	2.50	4.36	110	1.13	7.08	0.421	0.504
ZJ14	3 021.6	1.82	0.353	0.173	6.83	46.09	0.028	0.211	0.005	0.027	5.84	1.97	1.03	10.40	2.44	1.42	2.77	147	0.61	9.70	0.504	0.596
ZJ15	3 033.8	1.56	0.251	0.140	3.64	50.16	0.029	0.156	0.004	0.023	5.67	2.11	1.13	12.30	2.22	2.41	2.45	225	0.69	8.39	0.418	0.423
ZJ16	3 044.6	3.07	0.718	0.248	7.42	34.87	0.016	0.483	0.006	0.045	17.20	4.59	1.48	9.72	5.01	4.72	8.04	995	1.62	17.00	1.140	3.170
ZJ18	3 140.6	8.80	2.040	0.858	3.33	31.55	1.280	0.838	0.004	0.111	15.80	11.30	2.72	9.89	8.56	9.99	18.80	1244	3.85	38.10	2.550	0.898
ZJ19	3 184.7	1.35	0.410	0.339	20.00	28.82	1.300	0.243	0.007	0.030	6.79	2.44	1.00	7.58	3.59	3.63	4.80	118	1.10	12.20	0.634	0.448
ZJ20	3 216.7	2.41	0.664	0.412	6.57	44.18	0.830	0.393	0.005	0.043	8.00	4.27	1.78	11.90	4.19	4.00	6.23	114	2.10	14.50	0.875	0.746
ZJ21	3 227.3	3.29	1.060	0.487	10.23	40.61	0.066	0.553	0.006	0.054	8.63	5.89	1.58	10.80	4.37	5.63	9.61	117	2.07	17.00	1.000	0.650

等元素在指示碳酸盐岩及蒸发岩蚀变程度上的经验参考值,他们均指出当  $w(\text{Mn})/w(\text{Sr}) \leq 0.6$  的情况下,岩石样品没有遭受蚀变或者遭受了非常小的后期蚀变,可以作为指示古沉积环境的元素地球化学指标。本次分析采用的马家沟组岩石样品的  $w(\text{Mn})/w(\text{Sr})$  值基本小于 0.6 (图 3a),表明样品没有遭受或遭受了较小的蚀变作用,其元素分析结果可以有效地反映研究区马家沟组的原始地球化学特征。

### 3.2 主、微量元素分布

#### 3.2.1 主量元素

研究区马家沟组岩石样品的主量元素分布如表 1 所示,样品具有较高的 CaO 含量(平均 40.31%)和 MgO 含量(平均 9.65%), Na<sub>2</sub>O (平均 0.33%) 和 SiO<sub>2</sub>(平均 2.57%) 含量相对较低, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、

K<sub>2</sub>O 和 Ti<sub>2</sub>O 等主要代表陆源组分氧化物的平均含量非常低,反映马家沟组沉积受陆源物质影响较小,为正常的海相沉积。

#### 3.2.2 微量元素

对马家沟组岩石样品进行了微量元素分析(表 1),结果显示样品中微量元素的含量与分布具有一致性(图 3b),指示为相近且相对稳定的沉积环境内形成。样品中除 Sr(平均  $289 \times 10^{-6}$ ) 和 U(平均  $1.02 \times 10^{-6}$ ) 的含量相对上地壳略微富集以外,其他绝大部分微量元素的平均含量相对于上地壳均呈亏损,其中 Cr、Zn、Rb、Ba 亏损较大(图 3b)。虽然 Sr 和 Ba 的化学性质十分相似,但因为两种微量元素的离子半径不同, Ba<sup>2+</sup> 与 K<sup>+</sup> 进行类质同像比较合适,而不能替代矿物中的 Mg<sup>2+</sup> 和

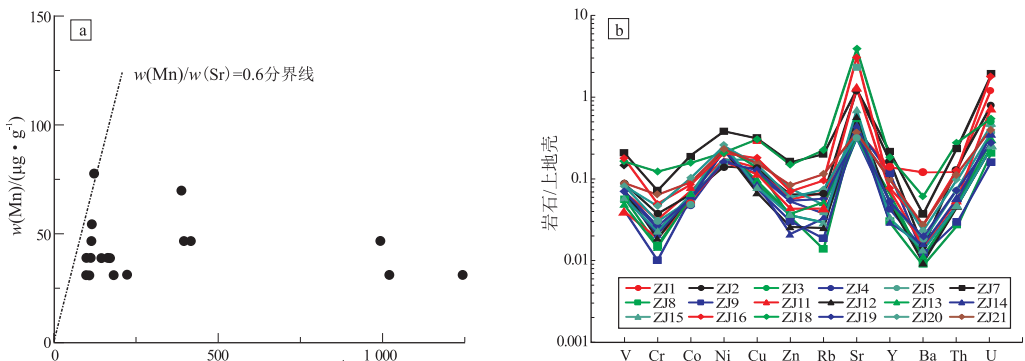


图 3 鄂尔多斯东缘马家沟组样品中 Mn-Sr 分布(a)及微量元素 UCC 标准化蛛网图(b)

Fig.3 Distribution of Mn/Sr (a) and spider diagram of UCC-normalized trace elements (b) in rock samples from the Majiagou Formation, eastern Ordos Basin

Fe<sup>2+</sup>。与既能替代 Ca<sup>2+</sup> 又能替代 K<sup>+</sup> 的 Sr<sup>2+</sup> 相比, Ba<sup>2+</sup> 的分布受限制<sup>[6]</sup>。此外, Sr 在海水中已成为主要组分之一, 其在海水中的富集作用甚至高于 Ca, 而海水中 Ba 含量比较低且 Ba 容易被黏土吸附。因此, 在泥质含量较低且 Mg<sup>2+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 富集的海相碳酸盐岩和蒸发岩中, 相对上地壳元素平均含量 Sr 富集与 Ba 亏损一定程度上反映了沉积水体的高咸化特征。同时, 以 Ni 和 V 为代表的其他微量元素的亏损也指示岩石样品吸附作用较低, 指示奥陶纪时期研究区远离陆源碎屑, 且为低泥质含量的海相成岩流体沉积。

### 4 主微量元素分布对沉积环境的指示

与陆源碎屑沉积岩相比, 内源沉积岩中的碳酸盐岩和石膏类蒸发岩可以更好地反映古沉积时期的成岩流体信息。通过岩石样品的元素分析, 可以在垂向和横向范围内获取岩石内蕴含的丰富的元素地球化学信息, 结合区域沉积的岩石学特征, 可以有效地还原古地质时期沉积环境的演化过程。

#### 4.1 古气候

(1) MgO/CaO。碳酸盐沉积物中 Mg 和 Ca 的沉淀具有地球化学的意义。溶解在海水中的 Mg

的数量实际上远大于 Ca 的数量, 但海水中仅有非常小的一部分 Mg 产生碳酸盐沉淀, 因而海水中 Mg 的丰度相对比较稳定, 相反海水中绝大部分 Ca 被析出, 形成广泛的碳酸盐沉积物。由于在海水中碳酸钙的溶解度一般随着温度和 pH 值的增加而下降, 随着 CO<sub>2</sub> 分压的增加而上升, 因此, 应用 MgO/CaO 比值可以反映原生沉积时期的古气候<sup>[20-21]</sup>, 即 MgO/CaO 低比值指示干热气候, 高比值指示相对潮湿气候。研究区马家沟组 MgO/CaO 值分布在 0.031 ~ 0.718 之间, 平均为 0.282, 其中 67% 的样品 MgO/CaO 值小于 0.30, 指示干热气候。在马二段开始沉积后期、马五段沉积早期(马五<sup>7-10</sup> 沉积晚期)以及马五<sup>4</sup> 沉积中晚期和马五段沉积末期出现 MgO/CaO 高值, 指示该阶段相对潮湿的气候环境(图 4)。

(2) Rb/Sr。海水中 Rb 含量较低, 通常在蒸发作用强烈的水体中 Rb 含量较高, 对 KCl-RbCl-H<sub>2</sub>O 系统的实验研究表明, 随着流体温度增加 Rb 被钾盐吸收量会减少。Sr 具有易与 O(或 OH、H<sub>2</sub>O) 形成化合物的特点。此外, Sr 在岩石中的含量主要受造岩元素 Ca<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup> 的制约, 其分配既取决于它在钙矿物中置换钙离子的程度, 又取决于钾长石

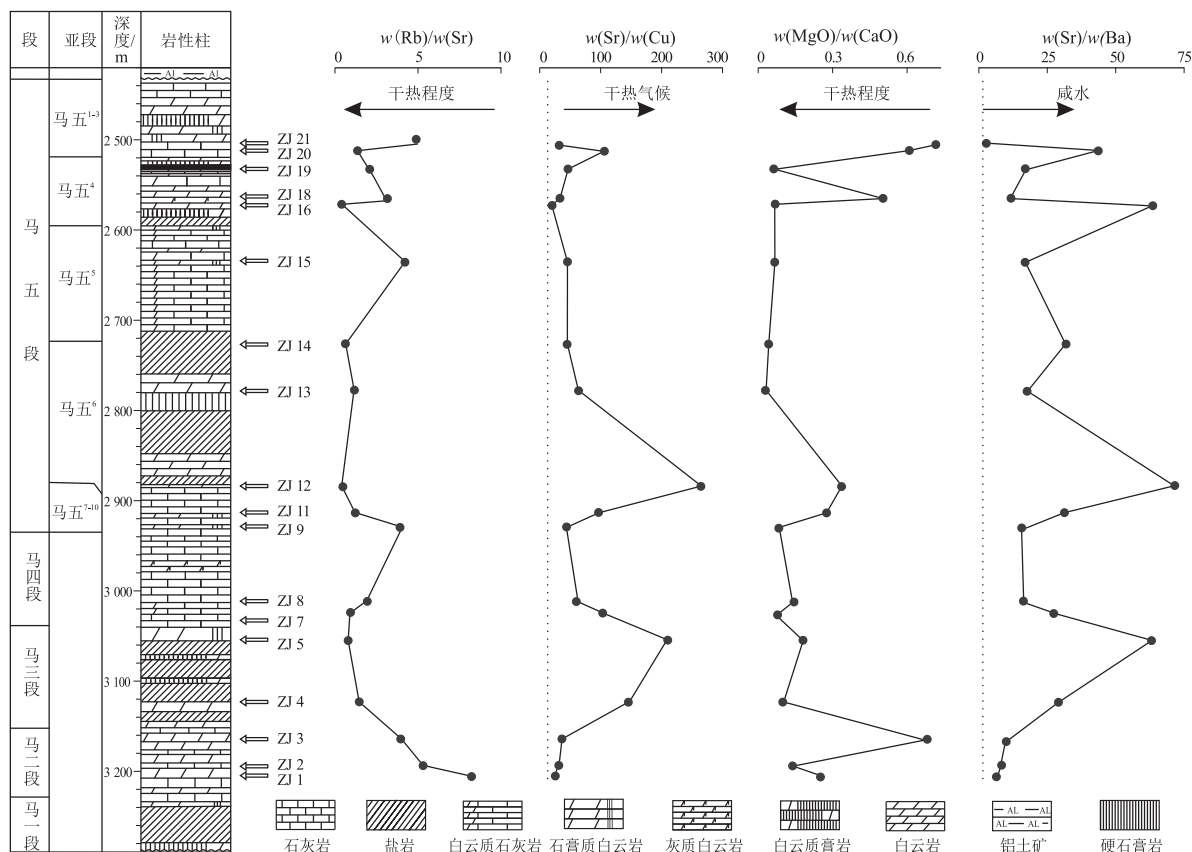


图4 鄂尔多斯盆地东缘马家沟组沉积期古气候判识指标分布特征

Fig.4 Distribution of identifying index in palaeoclimate of Majiagou Formation, eastern Ordos Basin

中  $K^+$  捕获  $Sr^{2+}$  的程度<sup>[6]</sup>。干旱气候背景下  $CaO$  含量增加,海水中  $Sr$  浓度也增大,相应的两种离子之间置换总量也增加,该背景下形成的岩石中  $Sr$  含量也增加。因此,在原生沉积岩中  $Rb/Sr$  升高可以指示古气候由相对干旱向相对湿润的气候演化,而  $Rb/Sr$  降低则相反。研究区马家沟组沉积时期  $Rb/Sr$  以低值分布为主,介于 0.007~0.082 之间,平均为 0.028(表 1,图 4),反映了马家沟组沉积时期以干旱为主要背景的古气候。马二段沉积早期和马四段沉积中后期的  $Rb/Sr$  值较高,为相对湿润气候;马二段沉积早期到马三段沉积末期  $Rb/Sr$  值逐渐降低,指示该阶段古气候由相对湿润向干旱气候演化;马五段整体以低  $Rb/Sr$  值分布为主,表现为干旱气候为主的沉积背景。其中,马五<sup>5</sup> 沉积时期、马五<sup>4</sup> 沉积中后期以及马五<sup>1-3</sup> 沉积早期表现出相对较高的  $Rb/Sr$  值,指示了其阶段性向湿润气候演化的特征。

(3)  $Sr/Cu$ 。海水中  $Cu$  含量很低,一般海相沉积物中  $Cu$  的含量也相对较低,其与  $Sr$  相对含量的变化一定程度上可以指示古气候条件。LERMANM(1978)建立了岩石中微量元素  $Sr/Cu$  与沉积时期古气候的对应关系,并认为当  $Sr/Cu$  比值介于 1~10 之间时,指示成岩条件为湿润气候;而当  $Sr/Cu$  比值大于 10 的情况下,指示成岩条件为相对干旱的气候背景<sup>[5]</sup>。研究区马家沟组岩样内  $Sr/Cu$  值介于 21.1~198.6 之间,平均为 69.2(表 1,图 4),指示该时期地区气候以干旱为主的地质背景,其中马三段沉积中晚期和马五<sup>6</sup> 亚段沉积早期  $Sr/Cu$  为高值,反映该段沉积时期的古气候干旱程度较高。

综合  $MgO/CaO$ 、 $Rb/Sr$  以及  $Sr/Cu$  值的分布趋势,3 种指标对研究区马家沟组的古气候的反映基本一致,即整个马家沟组沉积时期以干热气候为主要背景,在马二段、马四段和马五段沉积的中晚阶段经历了短暂的干热气候向相对湿润气候转换。元素化学分析反映出的马家沟组沉积时期干热的气候背景,与 TROTTER 等<sup>[14]</sup> 据世界各地典型剖面的牙形石、腕足、泥晶灰岩等氧同位素研究反映出的奥陶纪在早—中期处于一个长期的温室背景下的结论一致。基于上述 3 种指标分析的古气候与马家沟组沉积旋回的分布具有较好的耦合性,指示干热气候的元素化学指标与蒸发环境中形成的盐岩段能形成较好的对比。

## 4.2 古盐度

由于  $Sr^{2+}$  的离子半径位于  $K^+$  与  $Ca^{2+}$  之间,因

此  $Sr^{2+}$  既可以替代  $K^+$  也可以替代  $Ca^{2+}$ ,而  $Ba^{2+}$  仅与  $K^+$  进行类质同象替代最为合适,这一特征使  $Sr$  在海水中的迁移能力比  $Ba$  强<sup>[11,17]</sup>。当海水蒸发时,高含钙的矿物大量产生,有利于  $Sr^{2+}$  与  $Ca^{2+}$  进行替代,同时海水因蒸发或受石灰岩的中和作用引起硫酸盐离子浓度增加,促使海水中  $Ba$  以  $BaSO_4$  的形式产生沉淀。上述两因素导致海水中和沉积物中的  $Sr$  相对于  $Ba$  更容易趋于富集,造成沉积物中的  $Sr/Ba$  比值较高。前人通过研究发现, $Sr/Ba$  与古盐度具有较明显的正相关性,通常  $w(Sr)/w(Ba) > 1$  时成岩流体为咸水介质; $w(Sr)/w(Ba) < 0.6$  时成岩流体一般为淡水介质; $w(Sr)/w(Ba)$  介于 0.6~1 之间时为过渡介质<sup>[22-23]</sup>。研究区马家沟组  $w(Sr)/w(Ba)$  介于 1.65~58.53 之间,平均值为 22.17(图 4),反映马家沟组沉积期为咸水介质的沉积环境。

## 5 结论

(1) 碳酸盐岩和蒸发岩样品的主量、微量元素研究结果表明,鄂尔多斯盆地东缘马家沟组主要形成于未受陆源碎屑影响的海相沉积环境。

(2) 岩石特征和古盐度分析表明,研究区马家沟组主要由咸水沉积背景下形成的碳酸盐岩和蒸发岩组成,岩石类型包括灰泥灰岩、生物碎屑灰岩、泥晶白云岩、粉晶白云岩、细晶白云岩、石膏岩和盐岩等。

(3)  $Rb/Sr$ 、 $Sr/Cu$ 、 $MgO/CaO$  和  $Sr/Ba$  值分布曲线指示,研究区整个马家沟组沉积时期主要为干热气候背景,古气候与马家沟组沉积旋回的分布具有较好的耦合性。马二段、马四段沉积时期和马五段沉积中后期经历了阶段性的干热气候向相对湿润气候的转换,其余沉积阶段为较长周期的干热气候条件。

## 参考文献:

- [1] 侯方浩,方少仙,赵敬松,等.鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境模式[J].海相油气地质,2002,7(1):38-46.  
HOU Fanghao, FANG Shaoxian, ZHAO Jingsong, et al. Depositional environment model of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2002, 7(1): 38-46.
- [2] 付金华,白海峰,孙六一,等.鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储集体类型及特征[J].石油学报,2012,33(S2):110-117.  
FU Jinhua, BAI Haifeng, SUN Liuyi, et al. Types and characteristics of the Ordovician carbonate reservoirs in Ordos Basin, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 110-117.
- [3] 张永生,郑绵平,包洪平,等.陕北盐盆马家沟组五段六亚段

- 沉积期构造分异对成钾凹陷的控制[J].地质学报,2013,87(1):101-109.
- ZHANG Yongsheng, ZHENG Mianping, BAO Hongping, et al. Tectonic differentiation of  $O_2m_5^6$  deposition stage in Salt Basin, northern Shaanxi, and its control over the formation of potassium sags[J].Acta Geologica Sinica,2013,87(1):101-109.
- [4] 刘成林,吴驰华,王立成,等.中国陆块海相盆地成钾条件与预测研究进展综述[J].地球学报,2016,37(5):581-606.
- LIU Chenglin, WU Chihua, WANG Licheng, et al. Advance in the study of forming condition and prediction of potash deposits of marine basins in China's small blocks; review[J].Acta Geoscientica Sinica,2016,37(5):581-606.
- [5] PARRISH J T. Lakes: chemistry, geology, physics[J].Journal of Geology, 1980,88(2):249-250.
- [6] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984.
- LIU Yingjun, CAO Liming, LI Zhaolin, et al. Elemental geochemistry[M].Beijing:Science and Technology Publishers,1984.
- [7] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the Dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A [J]. Chemical Geology, 1992,99(1/3):65-82.
- [8] JONES B, MANNING D A. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J].Chemical Geology, 1994,111(1/4):111-129.
- [9] TWITCHETT R J, WIGNALL P B. Trace fossils and the aftermath of the Permo-Triassic mass extinction: evidence from northern Italy [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996,124(1/2):137-151.
- [10] KIMURA H, WATANABE Y. Oceanic anoxia at the PreCambrian-Cambrian boundary[J].Geology, 2001,29(11):995-998.
- [11] 黄思静,石和,毛晓冬,等.早古生代海相碳酸盐的成岩蚀变性及其对海水信息的保存性[J].成都理工大学学报(自然科学版),2003,30(1):9-18.
- HUANG Sijing, SHI He, MAO Xiaodong, et al. Diagenetic alteration of earlier Palaeozoic marine carbonate and preservation for the information of sea water[J].Journal of Chengdu University of Technology(Science Technology Edition),2003,30(1):9-18.
- [12] RIMMER S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. Chemical Geology, 2004,206(3/4):373-391.
- [13] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update [J]. Chemical Geology, 2006,232(1/2):12-32.
- [14] TROTTER J A, WILLIAMS I S, BARNES C R, et al. Did cooling oceans trigger Ordovician biodiversification? Evidence from conodont thermometry[J].Science, 2008,321(5888):550-554.
- [15] 倪春华,周小进,王果寿,等.鄂尔多斯盆地南缘平凉组烃源岩沉积环境与地球化学特征[J].石油与天然气地质,2011,32(1):38-46.
- NI Chunhua, ZHOU Xiaojin, WANG Guoshou, et al. Sedimentary environment and geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Pingliang Formation, southern margin of the Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology, 2011,32(1):38-46.
- [16] 汤冬杰,史晓颖,裴云鹏,等.鄂华北中元古代陆表海氧化还原条件[J].古地理学报,2011,13(5):563-580.
- TANG Dongjie, SHI Xiaoying, PEI Yungpeng, et al. Redox status of the Mesoproterozoic epeiric sea in North China[J].Journal of Palaeogeography, 2011,13(5):563-580.
- [17] ADACHI N, EZAKI Y, LIU J B. The Late Early Cambrian microbial reefs immediately after the demise of Archaeocyathan reefs, Hunan province, South China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014,407:45-55.
- [18] DERRY L A, KAUFMAN A J, JACOBSEN S B. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: evidence from stable and radiogenic isotopes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992,56(3):1317-1329.
- [19] JACOBSEN S B, KAUFMAN A J. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater [J]. Chemical Geology, 1999,161(1/3):37-57.
- [20] 杨振宇,沈渭洲,郑连弟.广西来宾蓬莱滩二叠纪瓜德鲁普统一乐平统界线剖面元素和同位素地球化学研究及地质意义[J].地质学报,2009,83(1):1-15.
- YANG Zhenyu, SHEN Weizhou, ZHENG Liandi. Elements and isotopic geochemistry of Guadalupian-Lopingian boundary profile at the Penglaitan section of Laibin, Guangxi province, and its geological implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2009,83(1):1-15.
- [21] 孟昊,任影,钟大康,等.四川盆地东部寒武系龙王庙组地球化学特征及其古环境意义[J].天然气地球科学,2016,27(7):1299-1311.
- MENG Hao, REN Ying, ZHONG Dakang, et al. Geochemical characteristic and its paleoenvironmental implication of Cambrian Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin, China[J].Natural Gas Geoscience, 2016,27(7):1299-1311.
- [22] 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.
- [23] 宋立军,刘池阳,赵红格,等.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[J].地球科学,2016,41(8):1295-1308.
- SONG Lijun, LIU Chiyang, ZHAO Hongge, et al. Geochemical characteristics, sedimentary environment and tectonic setting of Huangqikou Formation, Ordos Basin [J]. Earth Science, 2016,41(8):1295-1308.