

doi:10.3799/dqkx.2016.105

# 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

宋立军<sup>1,2</sup>, 刘池阳<sup>2,3\*</sup>, 赵红格<sup>2,3</sup>, 王建强<sup>2,3</sup>, 张小龙<sup>2,3</sup>

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065

2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

3. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069

**摘要:** 鄂尔多斯盆地西南部及邻区沉积了一套以黄旗口组为代表的巨厚的中元古界碎屑岩系, 该套地层具有重要的油气勘探潜力, 但目前人们对该套地层的勘探认识尚不够深入, 利用碎屑组分、主微量、稀土元素等地球化学手段, 结合区域及深部背景特征, 探讨了该套地层形成时期的沉积环境和构造背景。结果显示, 黄旗口组整体形成于气候干燥的淡水氧化或富氧的过渡环境, 沉积期古海水温度较高(平均为 32 ℃); 黄旗口组碎屑组分及其主微量元素特征与东非裂谷区相似, 加之其沉积于淡水环境, 并具有自下段至上段石英砂岩含量逐渐增加的特征, 表明研究区黄旗口组应处于陆内裂谷构造背景, 自早至晚构造沉积环境日趋稳定, 其中早期应为陆内裂谷环境, 晚期可能变为拗陷环境, 该构造背景的形成可能与华北克拉通逆时针旋转有关。

**关键词:** 黄旗口组; 地球化学; 沉积环境; 构造背景; 鄂尔多斯盆地。

中图分类号: P534

文章编号: 1000-2383(2016)08-1295-14

收稿日期: 2016-02-26

## Geochemical Characteristics, Sedimentary Environment and Tectonic Setting of Huangqikou Formation, Ordos Basin

Song Lijun<sup>1,2</sup>, Liu Chiyang<sup>2,3\*</sup>, Zhao Hongge<sup>2,3</sup>, Wang Jianqiang<sup>2,3</sup>, Zhang Xiaolong<sup>2,3</sup>

1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

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

3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

**Abstract:** A set of ultra-thick Middle Proterozoic clastic sedimentary rocks deposited in and around southwestern Ordos basin, with the Huangqikou Formation(HKF) as the most typical one, has great potential for oil and gas exploration. However, our understanding of HKF needs to be enhanced. Thus, by means of main-trace, rare elements and detrital component method, we probed into the sedimentary environment and tectonic setting of the HKF. The sedimentary environment discrimination diagrams of both main and trace elements show that the HKF was deposited wholly under a dry environment with fresh water oxidized, or an oxygen-enriched environment, with an average paleoseawater temperature of 32 ℃. The tectonic environment discrimination diagrams of clastic composition, and main and trace elements all show similarity to those of the East African rift basin, and gradual increasing of the quartz sandstone content from the lower to the upper parts, suggesting that HKF deposited under an intracontinental rift tectonic-sedimentary setting, which may have been caused by the counterclockwise rotation of

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(No. 90814005); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41102072); 中国地质调查局项目(No. 12120113039900); 陕西省自然科学基金项目(No. Z09045); 陕西省教育厅基金项目(No. 12JK0479); 西北大学大陆动力学国家重点实验室联合重点课题项目(No. BJ081334); 中国地质大学(武汉)构造地质与油气资源教育部重点实验室基金项目(No. TPR-2012-20); 西安石油大学构造地质学精品课程项目。

**作者简介:** 宋立军(1977—), 男, 副教授, 博士后, 从事盆地分析及构造地质方面的综合研究及相关教学工作, 主要从事含油气盆地地质综合研究。E-mail: ljsong@xsyu.edu.cn

\* 通讯作者: 刘池阳, E-mail: lcy@nwu.edu.cn

**引用格式:** 宋立军, 刘池阳, 赵红格, 等, 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, 1321.

North China Craton. It is concluded that the HKF was deposited in an intracontinental rift basin in the fresh water, and the tectonic setting became more stable from early to late stage, which was intra-continental rift in the early stage and post-rift depression in the late one.

**Key words:** Huangqikou Formation (HKF); geochemistry; sedimentary environment; tectonic setting; Ordos basin.

## 0 引言

随着鄂尔多斯盆地天然气勘探开发的深入进行以及勘探开发在后备领域的延伸,寻找新层系、拓展新领域日益成为鄂尔多斯盆地天然气勘探的一项重要任务(付金华等,2006)。伊盟隆起中元古界黄旗口组碎屑岩内天然气的发现(产量为  $23\ 970\ \text{m}^3/\text{d}$ ),表明鄂尔多斯盆地前寒武系碎屑岩作为一个新的勘探层系,有望成为长庆油田天然气勘探不可忽视的新领域(付金华等,2006)。

人们将鄂尔多斯盆地内宁夏炭山、青龙山、贺兰山、内蒙古桌子山等地区的前寒武系碎屑岩称为黄旗口组,将陕甘交界平凉、陇县等地区的前寒武系碎屑岩称为长城系高山河群。宁夏固原炭山闵家沟黄旗口组(锆石谐和年龄最小为  $1\ 500 \pm 46\ \text{Ma}$ , 谐和度为 103; 刘池阳等,2015)和合探 1 井高山河群(H1-12, 锆石谐和年龄最小为  $1\ 570 \pm 21\ \text{Ma}$ ; 公王斌,2014)、庆深 1 井高山河群(QS1-16, 锆石谐和年龄最小为  $1\ 574 \pm 18\ \text{Ma}$ ; 公王斌,2014)中均含有  $1\ 500 \sim 1\ 580\ \text{Ma}$  的碎屑锆石,且其年龄谱基本一致(公王斌,2014; 刘池阳等,2015)。此外,地震剖面也反映鄂尔多斯西南部高山河群和黄旗口组为连续沉积(刘池阳等,2015)。上述证据表明鄂尔多斯盆地陕甘交界地区的原长城系高山河群和宁蒙交界地区的黄旗口组应为同时代沉积,而与鄂尔多斯盆地东南缘洛南、永济等地区的长城系高山河群和汝阳群(顶部洛峪口组含  $1\ 611\ \text{Ma}$  凝灰岩; 苏文博等,2012)不是同时代产物。于是笔者将鄂尔多斯西南部黄旗口组和原长城系高山河群暂统称为黄旗口组,考虑到其形成于  $1\ 500\ \text{Ma}$  之后,结合新的地质年代表(待建纪:  $1\ 400 \sim 1\ 000\ \text{Ma}$ ; 高林志等,2011),推测鄂尔多斯盆地以黄旗口组为代表的碎屑岩系应形成于待建纪。

近年来,诸多学者对鄂尔多斯盆地西南部黄旗口组的厚度与分布(王同和,1995; 李明涛等,2014)及其内部遗迹化石特征(华洪等,1993)、微生物藻席成因(史晓颖等,2008)和震积岩特征(金巍,2012)进行了探讨,取得了一些进展,然而由于该套地层出露不全,加之钻井岩心与分析化验资料的缺乏,致使人

们对其沉积环境缺乏细致分析,对其构造沉积背景的认识也过于笼统,并存在明显分歧,如:对其沉积环境有潮坪相(史晓颖等,2008)、滨海—浅海相(赵文杰和武光孝,1989)、浅海—滨海—斜坡相(俞伯达,1997)、混积台地(郝奕玮等,2014)、近岸浅水沉积体系(乔秀夫等,2007)等多种认识;对其构造沉积背景则有三叉裂谷北支贺兰拗拉槽、夭折谷或由地槽伸向稳定块体内部的裂堑型构造(张抗和邓华盖,1981; 张抗,1983; 林畅松等,1995)、裂谷(小洋盆)构造组合环境(张福礼,1994)、稳定被动大陆边缘陆架或拗陷环境(邸领军和谢成广,2008; 公王斌,2014)等多种认识。

沉积岩中的碎屑组分、微量稀土元素及其比值在一定程度上能反映其形成时期的沉积环境、母岩区物源特征及其构造沉积背景(Lerman and Baccini, 1978; Dickinson and Suczek, 1979; Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986; Herron, 1988; Roser and Korsch *et al.*, 1988; Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994; Huntsman-Mapila *et al.*, 2009)。因而,笔者在野外实地勘查的基础上,从黄旗口组碎屑岩元素地球化学分析入手,对其沉积环境、大地构造背景和物源区特征进行了探讨,以期为进一步深化鄂尔多斯盆地西南部前寒武系天然气勘探提供依据。

## 1 区域地质背景与地层分布

鄂尔多斯盆地西南部地处华北板块西南缘中段,祁连—秦岭造山带、六盘山构造带和鄂尔多斯盆地结合处,其现今构造位置隶属于渭北隆起、天环拗陷、伊陕斜坡西南部和伊盟隆起西部。鄂尔多斯盆地西南部中元古界黄旗口组整体为一套由紫红、灰白色含砾石粗砂岩、石英砂岩,夹杂色泥质板岩组成的浅变质碎屑岩系,呈狭长带状展布于鄂尔多斯西南部边缘裂隙带内,纵贯宁夏南北,自西向东不整合覆盖于太古界—下元古界结晶基底之上,其上被古生界、中生界和新生界覆盖。

黄旗口组露头主要分布内蒙古乌海桌子山、宁夏境内的贺兰山中—北段和固原东部一带,其在鄂尔多

斯盆地西缘千阳和华亭也有小面积出露(陈晋镛等, 1999). 在桌子山和贺兰山地区, 黄旗口组出露较多, 野外可见其不整合覆盖于古元古界斜长花岗岩、贺兰山岩群或赵池沟岩群之上, 其他地区均未见其底.

鄂尔多斯盆地内黄旗口组主要分布于鄂尔多斯西南部边缘裂陷内, 并覆盖于裂陷层及其周缘基底

隆起之上, 其在银川南、鄂托克旗北、定边、镇原、宁县东南、洛川 6 个裂陷内地层厚度较大, 最大厚度可达 3 500 m; 在各裂陷外围, 黄旗口组厚度为 0~500 m(图 1). 鄂尔多斯盆地内有 15 口钻井钻遇黄旗口组, 除杭探 1 井(1 100. 0 m)钻穿, 天深 1 井(钻遇 264. 5 m)、庆深 1 井(钻遇 116. 0 m)和宜探 1 井

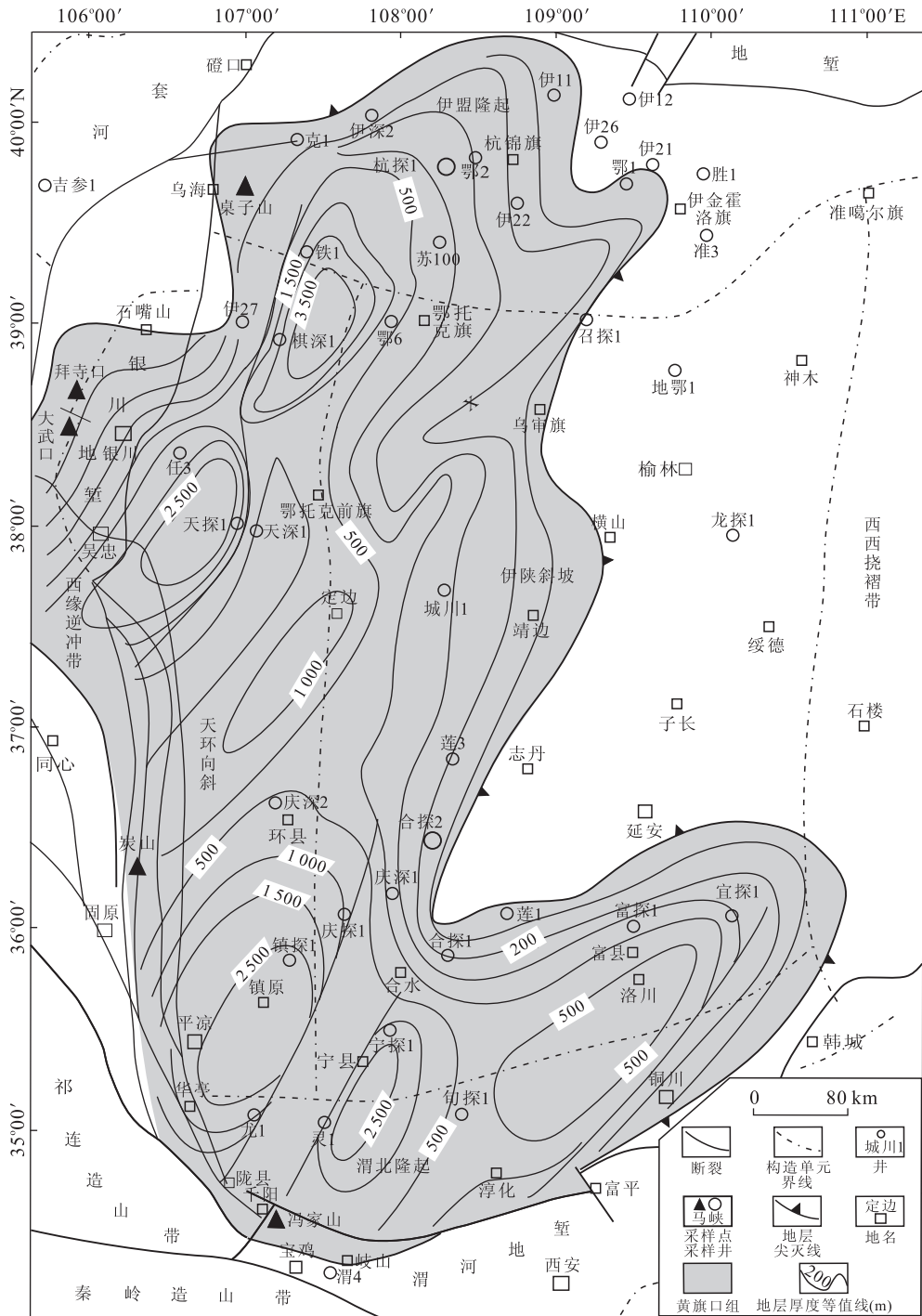


图 1 鄂尔多斯地区黄旗口组地层分布及其厚度等值线

Fig. 1 Distribution and thickness isopach sketch of of Huangqi Kou Formation, Ordos area

(钻遇 224.2 m) 钻遇厚度较大外, 其他 12 口井钻遇厚度为 8.0~60.2 m, 仅钻遇黄旗口组上段表层。

黄旗口组分为上、下两套层序, 下部层序以紫红色粗粒石英岩、石英砂岩为主, 夹杂色粉砂质板岩, 岩层内常具波痕及交错层理, 负荷构造、液化砂岩脉、球枕构造、火焰状透水构造、卷曲变形构造、同沉积微断层等典型地震事件沉积(金巍, 2012); 上部层序以厚层块状紫红色、浅黄色或灰白色中粒石英砂岩为主, 局部发育硅质白云岩, 如贺兰山北段王全口一带发育内含叠层石(*Baicalia* f.) 的硅质白云岩。在贺兰山苏峪口, 黄旗口组下段以薄—中层暗紫红色细粒石英砂岩为主, 夹薄层粉砂质泥岩和泥质粉砂岩, 并发育波痕、泥裂、交错层理等浅水沉积构造; 上段以厚层块状紫红色、浅黄色中粒石英砂岩为特征, 少泥质与粉砂质夹层, 局部石英岩化(史晓颖等, 2008)。在桌子山, 黄旗口组底部发育紫红色砾岩, 下段为紫红色石英砂岩, 夹薄层杂色粉砂质泥岩或泥质粉砂岩, 并发育波痕、交错层理等浅水沉积构造; 上段为浅黄色中粒石英砂岩。

## 2 样品采集与测试及其岩石地球化学特征

### 2.1 样品采集与测试

在鄂尔多斯盆地西南缘露头 and 杭探 1 井、合探 2 井钻井岩心中, 笔者采集新鲜未蚀变的黄旗口组上、下段砂泥岩和白云岩样品共 13 件(图 1), 样品位置由南至北均匀分布。其中, HT1-4-13、HT1-4-5、HL-01、HL-04、ZZ-03 等样品采自黄旗口组下段, 且均位于下伏不整合面附近; HT1-2-19、TS-01、HT1-2-50、HT1-3-40、QY-07、QY-08、SZ-01、ZZ-01 和 TS-03 等样品采自黄旗口组上段, 且均位于黄旗口组上段表层(表 1, 表 2)。总之, 上述样品分布较广, 在黄旗口组上、下段及其分布区各位置基本均有涉及, 因而样品基本能够代表黄旗口组特征。样品的主量、微量元素分析测试在澳实分析检测(广州)有限公司矿物实验室完成。其中, 主量元素由 X 射线荧光光谱分析(ME-XRF26)测试完成, 其准确度与精密度优于 1%; 稀土元素和微量元素分别由电感耦合等离子体质谱仪(ME-MS81 和 ME-MS61)完成, 其分析精度和准确度优于 5%。

### 2.2 岩石地球化学特征

黄旗口组岩性复杂, 所采集的样品以石英岩、石

英砂岩和石英杂砂岩为主(图 2a), 并含有少量白云岩和泥岩(图 2b, 表 1)。如图 3 所示, 黄旗口组样品投影结果极为分散, 投影点在石英砂岩、杂砂岩、岩屑砂岩、页岩、长石砂岩等各种岩性均有分布, 其中黄旗口组上段相比其下段岩性更为复杂, 且石英砂岩样品明显增多。

岩石地球化学测试结果显示, 砂岩  $\text{SiO}_2$  含量为 59.7%~97.3%, 平均为 82.3%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 0.4%~22.2%, 平均为 0.5%, 变化范围较大, 表明各样品所在地区粘土矿物的输入量差距较大;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量为 0.6%~5.0%, 下段均值为 2.3%, 上段均值为 1.6%;  $\text{MgO}$  含量为 0~2.0%, 下段均值为 1.3%, 上段均值为 0.3%;  $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  规律一致, 即下段  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  含量大于上段, 反映黄旗口组下段铁镁矿物含量高于上段;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值为 1.6~91.0, 变化范围极大, 显示砂岩中钾长石和斜长石含量变化极大, 杂砂岩和长石砂岩较发育。杭探 1 井紫红色泥岩样品(HT1-2-19)的  $\text{SiO}_2$  含量为 51.6%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 20.2%、 $\text{K}_2\text{O}$  含量为 8.08%, 与北美页岩平均 NASC 相应值有明显差距; 固原炭山泥质白云岩样品(TS-03)的  $\text{CaO}$  含量为 11.7%,  $\text{MgO}$  含量为 7.9%,  $\text{CaO}/\text{MgO}$  比值为 1.5, 该值与纯白云岩钙镁比值( $\text{CaO}=30.4\%$ ,  $\text{MgO}=21.8\%$ ,  $\text{CaO}/\text{MgO}=1.39$ )接近, 表明泥质白云岩中方解石含量极少, 白云石含量极高。

随着物源区风化程度的增加,  $\text{CIW}$ (化学风化指数)持续增大, 物源区构造活动性逐渐减弱(Harnois, 1988)。黄旗口组砂岩  $\text{CIW}$  为 68.9~96.0, 均值为 88.7, 是全球上地壳砂岩  $\text{CIW}$  的 1.4 倍; 其中, 上段砂岩  $\text{CIW}$  为 71.0~96.5, 均值为 89.4, 下段砂岩  $\text{CIW}$  为 68.9~96.5, 均值为 87.9。下段砂岩与上段砂岩  $\text{CIW}$  接近, 但略小于上段砂岩, 表明自早期至晚期母岩风化指数略有增强、沉积环境逐渐稳定的特点。这与图 3 显示结果一致, 即黄旗口组自下段至上段石英砂岩含量逐渐增加, 构造沉积环境逐渐稳定。

## 3 古沉积环境特征

碎屑沉积岩的微量元素含量受其母岩矿物组成、风化与搬运过程、沉积期沉积环境和沉积后成岩作用的综合影响(Garzanti *et al.*, 2015)。相比砂岩而言, 自生碳酸盐岩、泥岩等细粒沉积能更好地反映沉积期的沉积环境, 利用自生碳酸盐岩、硅质岩、泥岩等细粒沉积岩判别沉积环境已有较多成功的范例

表 1 鄂尔多斯地区黄旗口组样品主量元素(%)分析结果  
Table 1 Analytical results of major elements (%) of Huangqikou Formation samples in Ordos area

样号	地点	样品名称	段	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI	K <sub>2</sub> O/(Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O	CaO/MgO	CJW	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
TS-03	固原炭山	泥质白云岩	上段	9.0	11.7	7.4	6.3	7.9	0.10	0.01	0.02	37.0	0.6	18.9	44.9	1.2	1.5		4.1
HTI-2-19	杭探 1 井	紫红色泥岩	上段	20.2	0.3	11.1	8.1	2.5	0.04	0.20	0.20	51.6	1.0	4.1	42.5	1.4	0.1	97.5	2.6
TS-01	固原炭山	褐色泥岩	上段	13.0	0.9	1.4	10.9	0.4	0.01	0.20	0.50	70.0	1.3	0.7	54.3	0.1	2.6	92.0	5.4
HTI-2-50	杭探 1 井	紫红色砂岩	上段	13.0	0.9	1.4	10.9	0.4	<0.01	0.20	0.50	70.0	1.3	2.5	39.6	0.6	0.5	96.5	4.2
HTI-3-40	杭探 1 井	紫红色砂岩	上段	16.0	0.4	5.0	7.9	0.8	<0.01	0.20	0.30	66.4	0.6	0.9	33.3	0.2	1.3	95.8	17.1
QY-07	千阳	灰白色石英岩	上段	5.2	0.1	0.7	3.7	0.1	<0.01	0.11	0.10	89.0	0.1	0.3	15.0	5.6	1.3	71.0	221.1
QY-08	冯家山	紫红色石英岩	上段	0.4	0.2	0.8	0.2	0.1	0.04	<0.01	<0.01	97.3	0.0	0.2	23.0	2.7	0.8	89.9	137.0
SZ-01	贺兰山大武口	紫红色石英砂岩	上段	0.7	0.1	0.6	0.2	0.1	<0.01	<0.01	0.02	97.3	0.1	1.1	72.0	1.4	3.3	91.4	25.5
ZZ-01	乌海桌子山	紫红色砂岩	上段?	1.0	0.6	0.7	0.6	0.2	<0.01	<0.01	0.02	95.7	0.1	0.7	58.0	1.2	3.4	63.6	97.7
HTI-4-13	杭探 1 井	紫红色砂岩	下段	6.5	0.3	1.6	3.9	0.3	0.02	0.10	0.20	85.4	0.4	2.3	25.2	0.5	0.3	95.6	7.4
HTI-4-5	杭探 1 井	紫红色砂岩	下段	10.7	0.3	2.3	4.5	1.1	<0.01	0.20	0.10	78.6	0.5	3.3	26.3	0.3	0.3	96.4	2.7
HL-01	贺兰山	紫红色杂砂岩	下段	22.2	0.5	2.1	8.4	1.8	0.02	0.30	0.30	59.7	0.7	0.3	37.0	1.5	4.0	96.5	24.3
HL-04	百寺口	灰白色杂砂岩	下段	3.8	0.1	1.1	0.7	0.03	0.01	0.02	0.02	92.7	0.1	2.7	1.6	1.6	0.7	82.0	5.3
ZZ-03	乌海桌子山	紫红色石英岩	下段	13.4	1.3	4.0	2.6	2.0	0.02	1.60	0.30	70.7	0.5	1.5	91.0	2.3	0.6	68.9	49.8
		北美页岩平均(NASC)		17.0	3.6	—	4.0	2.9	0.10	1.10	0.10	64.8	0.7	3.5	3.5		1.3	78.0	3.8
		UCC 上地壳组成		15.2	4.2	5.0	3.4	2.2	0.10	3.90	0.20	66.0	0.7	0.9	1.5		1.9	65.2	4.3

注:“北美页岩平均(NASC)”引自 Gromet *et al.* (1984);“UCC 上地壳组成”引自 McLennan(2001);LOI 为烧失量,单位为%;CJW=100×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+Na<sub>2</sub>O,单位为%,引自 Harnois (1988).

表 2 鄂尔多斯地区黄旗口组样品微量元素(10<sup>-6</sup>)分析结果

Table 2 Analytical results of trace elements (10<sup>-6</sup>) of Huangqikou Formation samples in Ordos area

样号	地点	样品名称	段	Ca	Co	Cr	Cu	Ba	Fe	Mg	Mn	Rb	Ni	Sr	Th	U	V	V/Cr	Ni/Co	U/Th	V/(V+Ni)	Mg/Ca	Sr/Ba	Fe/Mn	T	
TS-03	固原炭山	白云岩		8.15	6.2	36	6.6	220	5.1	4.9	452	89	29	92	12	3	67	1.9	4.7	0.2	0.7	0.6	14.0	0.4	0.01	30.8
HTI-2-19	杭探 1 井	紫红色泥岩		0.26	18.0	56	4.7	690	7.2	1.3	305	128	52	337	23	2	70	1.3	3.0	0.1	0.6	5.2	71.7	0.5	0.02	27.7
ZZ-01	乌海桌子山	紫红色砂岩		0.43	1.1	24	2.7	60	0.5	0.1	83	10	3	11	2	1	7	0.3	2.5	0.2	0.7	0.2	4.2	0.2	0.01	31.8
TS-01	固原炭山	褐色泥岩	上	0.65	0.8	26	4.0	410	0.9	0.2	43	52	2	76	15	3	48	1.8	2.5	0.2	1.0	0.3	19.0	0.2	0.02	31.0
HTI-2-50	杭探 1 井	紫红色砂岩		0.29	3.8	22	1.4	1150	3.5	0.5	105	86	12	260	14	1	25	1.1	3.1	0.1	0.7	1.6	186.0	0.2	0.03	28.7
HTI-3-40	杭探 1 井	紫红色砂岩	段	0.12	0.4	9	0.7	330	0.4	0.1	44	67	2	93	7	1	5	0.6	5.8	0.2	0.7	0.4	132.0	0.3	0.01	30.8
QY-07	千阳冯家山	灰白色石英岩		0.18	3.2	32	6.3	60	0.6	0.1	311	6	9	8	0	0	8	0.3	2.7	1.0	0.5	0.6	1.3	0.1	0.00	31.8
QY-08	千阳冯家山	紫红色石英岩		0.06	1.2	21	3.2	90	0.5	0.1	28	8	5	27	1	1	10	0.5	3.9	1.4	0.7	1.0	8.3	0.3	0.02	31.6
SZ-01	贺兰山大武口	紫红色石英砂岩		0.26	2.9	26	2.1	130	0.7	0.1	93	22	7	19	6	1	19	0.7	2.3	0.1	0.7	0.2	8.9	0.1	0.01	31.7
HTI-4-13	杭探 1 井	紫红色砂岩		0.24	3.0	16	0.7	820	1.5	0.6	84	115	8	151	7	1	13	0.8	2.5	0.1	0.6	2.6	215.0	0.2	0.02	30.0
HTI-4-5	杭探 1 井	紫红色砂岩	下	0.32	6.7	97	1.3	930	1.3	0.9	86	135	16	237	13	2	46	0.5	2.4	0.1	0.7	2.8	182.0	0.3	0.01	29.0
HL-01	贺兰山百寺口	紫红色杂砂岩		0.09	0.2	20	0.6	20	0.8	0.0	33	9	2	77	3	0	4	0.2	10.0	0.1	0.7	0.2	129.0	3.9	0.02	31.0
HL-04	贺兰山百寺口	灰白色杂砂岩	段	0.97	4.7	150	13.0	290	2.7	1.2	204	137	17	99	6	2	66	0.4	3.6	0.3	0.8	1.2	7.5	0.3	0.01	30.7
ZZ-03	乌海桌子山	灰白色石英岩		0.63	4.8	34	8.9	90	1.5	0.8	139	8	7	52	4	2	13	0.4	1.4	0.6	0.7	1.2	5.8	0.6	0.01	31.3

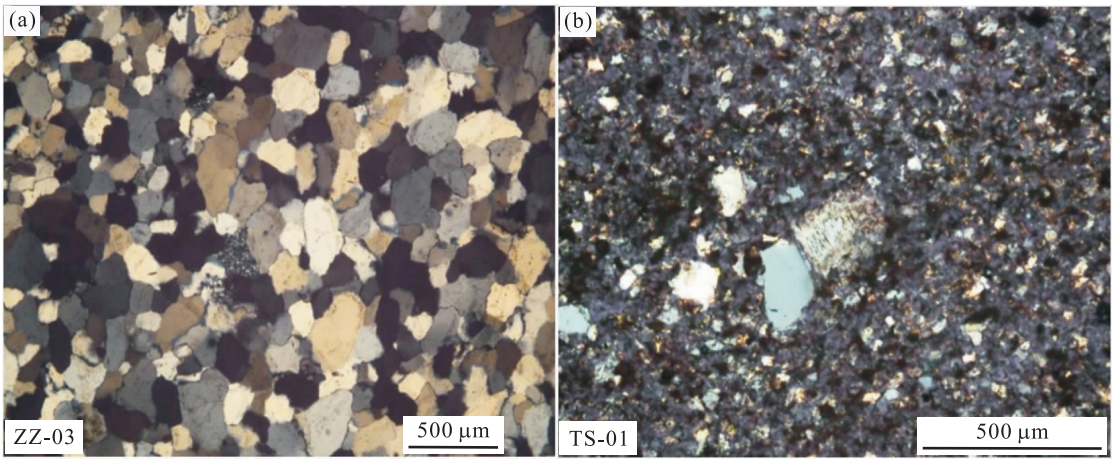


图 2 鄂尔多斯地区黄旗口组岩石薄片

Fig. 2 Rock slice of Huangqikou Formation samples in Ordos area

a. 乌海桌子山黄旗口组石英砂岩薄片(ZZ-03); b. 固原因家沟黄旗口组灰褐色泥岩(TS-01)薄片

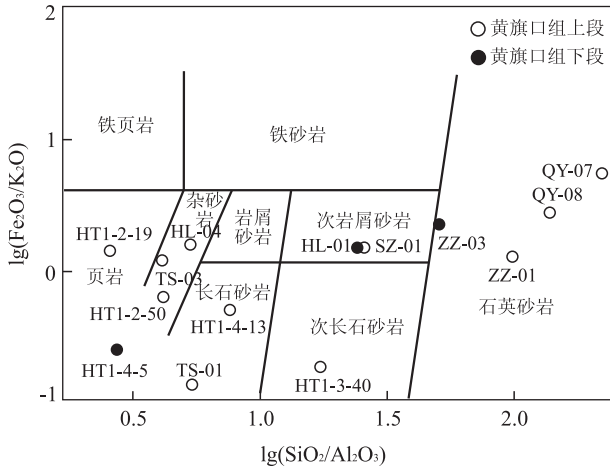


图 3  $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})-\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  陆源砂岩-页岩分类  
Fig. 3 Terrigenous sand-shale classification of  $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})-\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$

据 Herron(1988)

(Lerman and Baccini, 1978; Dickinson and Suczek, 1979; Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1988; Herron, 1988; Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994; Huntsman-Mapila *et al.*, 2009; 黄志强等, 2013), 利用砂岩(Boboye and Nwosu, 2014)、砂岩内胶结物(El-Askary and El-Mahdy, 2001; Parcerisa *et al.*, 2005)或砂岩结合泥岩一起(孙建伟等, 2014)判别其沉积期的沉积环境国内外也有少量成功的应用. 然而, 砂岩内胶结物是沉积期成岩和后期流体成岩作用综合作用的产物, 且越古老的砂岩沉积后受漫长的后期流体成岩作用的影响越大, 其胶结物的化学组分越难以代表沉积期的沉积环境. 因黄旗口组泥

岩和白云岩极不发育, 故在古沉积环境分析研究中, 笔者将以泥质白云岩、泥岩样品为基础, 配合砂岩样品, 并结合沉积岩的颜色等环境判别标志, 来综合探讨黄旗口组沉积期的沉积环境特征.

### 3.1 氧化还原环境判别

前人研究结果表明  $V/\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}/\text{Co}$ 、 $\text{U}/\text{Th}$  和  $V/(V+\text{Ni})$  比值用来判别沉积岩沉积期的氧化还原环境(Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994; Rimmer *et al.*, 2004), 相对而言  $V/\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}/\text{Co}$  比值对缺氧或还原环境判别准确,  $V/(V+\text{Ni})$ 、 $\text{U}/\text{Th}$  比值次之(Jones and Manning, 1994).

黄旗口组样品仅 TS-01(图 4b)、HL-01(图 4c)和 QY-08(图 4d)显示缺氧还原环境特征, 其他绝大多数样品均处于富氧或氧化-还原过渡环境下(图 4). 颜色是反映岩石沉积期氧化还原环境的定性指标. 黄旗口组岩石整体呈紫红色, 反映鄂尔多斯地区黄旗口组上、下段均处于富氧的沉积环境下.

### 3.2 气候(干旱)环境判别

在干燥气候条件下, 由于水分的蒸发、水介质碱性增强的缘故, 沉积水体中 Na、Ca、Mg、Sr、Mn 等元素大量析出而沉积在水底, 因而其在沉积岩中的含量相对较高; Mg 相比 Ca, 在较高温度下更利于沉积, 以致  $\text{Mg}/\text{Ca}$  比值随干旱程度增加而增大.

Sr 含量、 $\text{Sr}/\text{Cu}$  比值和  $\text{Mg}/\text{Ca}$  比值均是判别气候环境的常用指标. 通常,  $\text{Sr}/\text{Cu}$  比值为 1.3~5.0 指示温湿气候, 而大于 5.0 则指示干热气候(Lerman and Baccini, 1978). 利用微量元素 Sr 含量(Y, 单位  $10^{-6}$ )和古水温度(T, 单位  $^{\circ}\text{C}$ )的关系可

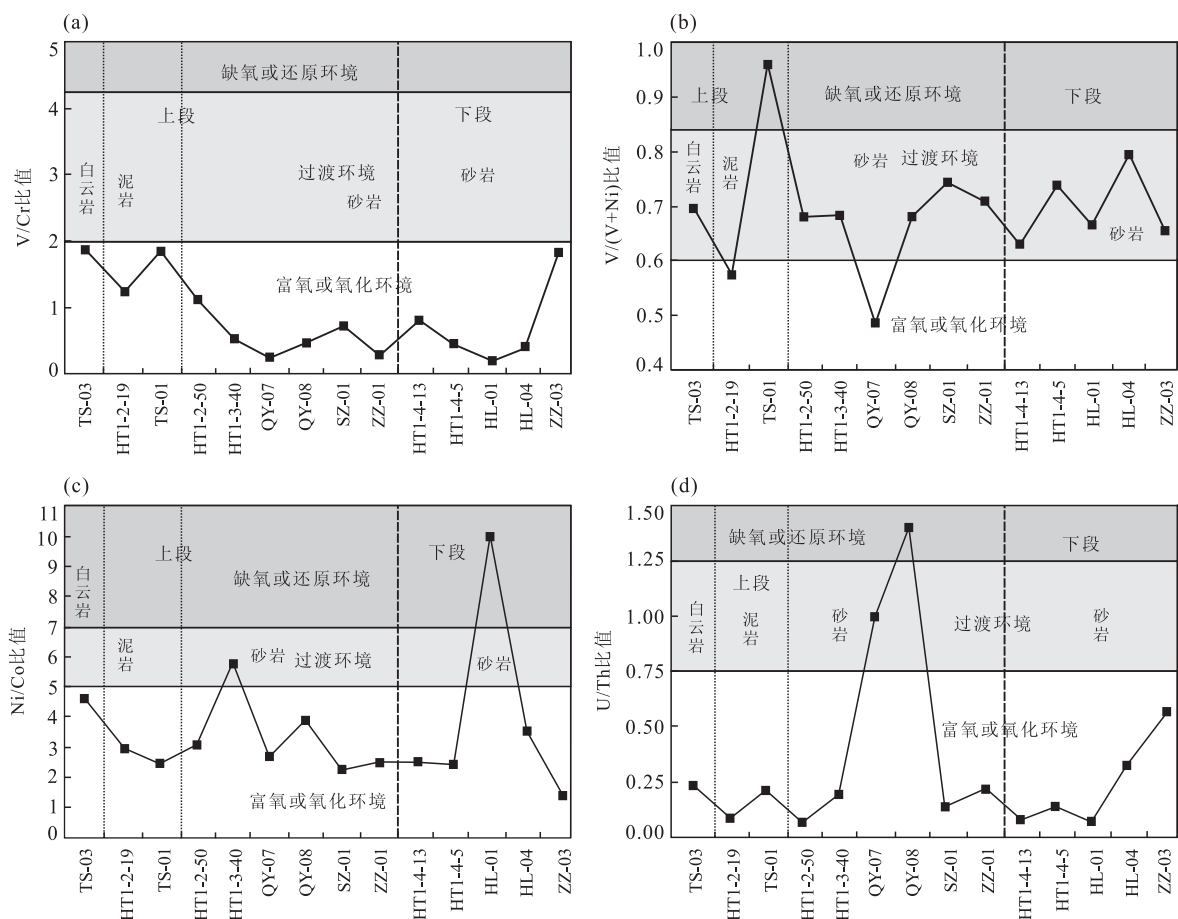


图 4 黄旗口组 V/Cr(a)、V/(V+Ni)(b)、Ni/Co(c)和 U/Th(d)氧化还原环境判别

Fig. 4 Redox environment discriminations of V/Cr (a), V/(V+Ni) (b), Ni/Co (c) and U/Th (d) for Huangqikou Formation 据 Hatch and Leventhal(1992), Jones and Manning(1994)和 Rimmer *et al.* (2004)

以计算古水温(即  $Y = 2578 - 80.8 T$ ) (袁海军和赵兵, 2012), 郑荣才和柳梅青(1999)将计算结果与其他测温方法结果进行对比, 验证了该经验公式是较为可信的. Fe、Mn 对氧化—还原条件的敏感性不同, 且不同价态的 Mn 离子与 Fe 离子使沉积物呈现出不同的颜色. 在炎热或水浅干旱气候下, Fe 易被氧化而沉淀, 而在暖湿气候的影响下其难以沉淀; 而化学性质比较稳定的 Mn 元素, 含量较稳定, 只有在强烈蒸发且浓度饱和时才会大量沉淀. 因而, Fe/Mn 比值也可判别古气候条件, 一般 Fe/Mn 比值高指示干热气候或水浅环境, 低值则指示温湿气候.

图 5 显示除千阳 QY-07 灰白色砂岩样品外, 黄旗口组其他样品均形成于干热气候, Fe/Mn、Mg/Ca 和 Sr/Cu 均呈中度正相关关系, 相关系数分别为 0.56 和 0.65, 反映 Sr/Cu 的判别结果是可信的. 黄旗口组样品古海水温度范围为 28~32 °C (表 2), 平均 31 °C (图 5d). 上述温度数据表明黄旗口组沉积时期研究区古气温及古水温均较高.

沉积岩中硅铝率( $SiO_2/Al_2O_3$ , 简称 sa)可以用来区分砂岩的富硅或富铝特征, 其比值变化也反映了其母岩化学淋溶搬运的程度. 当 sa 的比值大于 4 时, 指示气候干燥, 岩石以物理风化为主, 化学作用极其微弱,  $SiO_2$  运移很少; 反之, 在潮湿气候下, 化学风化快速, sa 的比值越小 (一般小于 4), 表示  $Al_2O_3$  的大量富集、含量较高,  $SiO_2$  遭搬运迁移、含量相对低 (张威等, 2007). 除杭探 1 井样品 HT1-2-19 (sa = 2.6) 和 HT1-4-5 (sa = 2.7) 硅铝率小于 4 外, 黄旗口组其他样品的硅铝率为 4.2~221.1, 均大于 4 (表 1), 表明黄旗口组沉积期气候干燥, 黄旗口组母岩整体以物理风化为主.

### 3.3 海陆环境判别

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. Sr 含量、Sr/Ba、Rb/K 和 Ni 含量均是进行古盐度恢复的常见微量元素地球化学方法之一.

Sr 迁移能力比 Ba 强, 在海水中 Ba 以  $BaSO_4$  的

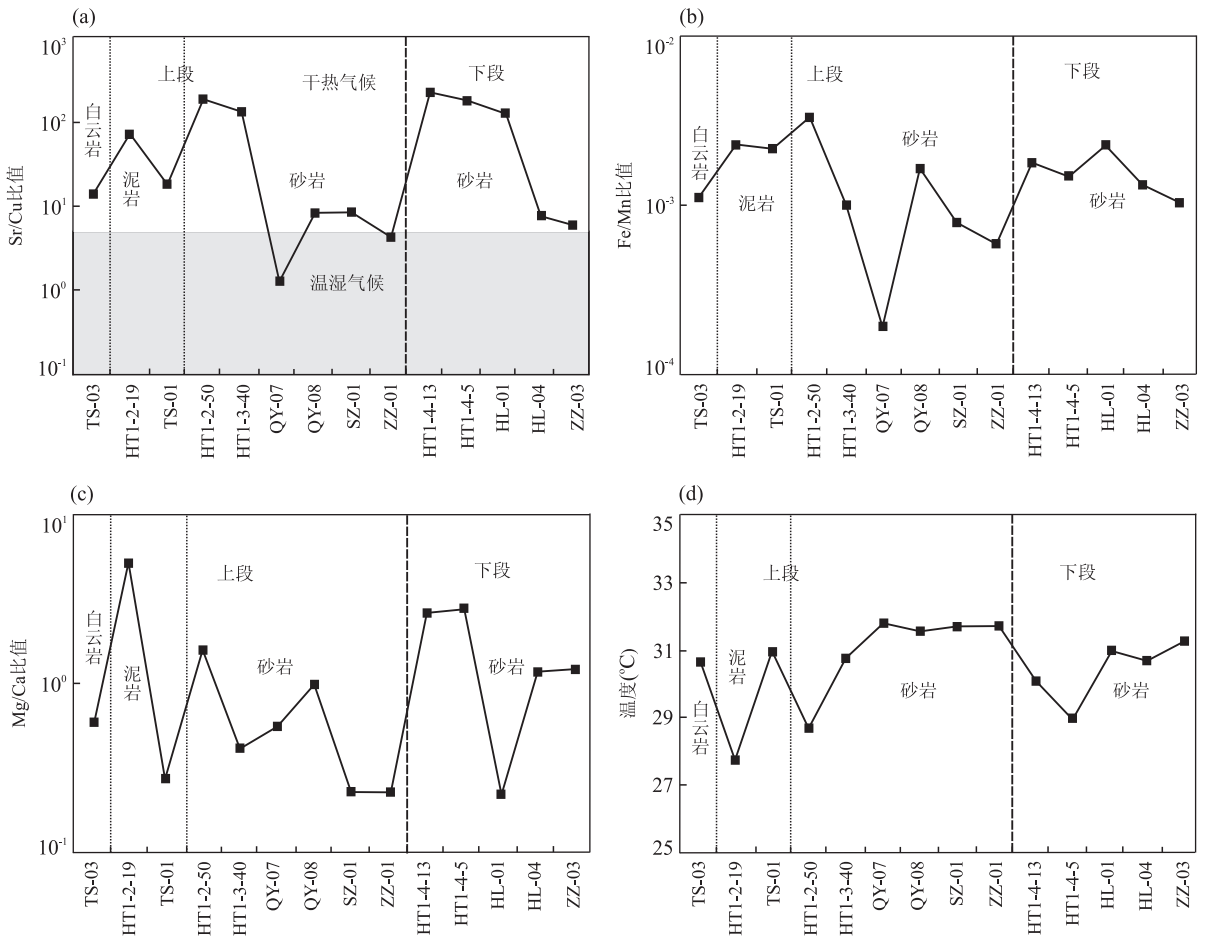


图 5 黄旗口组 Sr/Cu(a)、Fe/Mn(b)、Mg/Ca(c) 比值和古气候环境判别与古水体温度曲线(d)

Fig. 5 Paleoclimate environment discrimination of Sr/Cu (a), Fe/Mn (b), Mg/Ca (c) and ancient water temperature curve (d) for Huangqi Kou Formation in Ordos region

据 Lerman and Baccini(1978)和袁海军和赵兵(2012)

形式首先沉淀,导致 Sr 相对 Ba 趋于富集(罗顺社和汪凯明,2010),并造成沉积物中的 Sr/Ba 比值较高,且与古盐度呈明显正相关。一般, Sr/Ba > 1 时沉积环境为海相或咸水介质, Sr/Ba < 0.6 时为陆相或淡水介质,其间为过渡介质(王益友等,1979;郑才和柳梅青,1999),且 Sr 元素在咸水中含量一般为  $800 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$ ,在淡水中的含量一般为  $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ (刘刚和周东升,2007)。Rb/K 比值可以反映介质盐度的变化,一般正常的海相沉积岩中该比值大于 0.006,微咸水沉积岩的该比值为 0.004~0.006,河流等淡水沉积物的该比值小于 0.004(王益友等,1979)。此外,国内外资料显示,海水中 Ni 的含量大于  $40 \times 10^{-6}$ ,而淡水中一般不高于  $30 \times 10^{-6}$ (彭雪峰等,2012)。

图 6a 显示除 HL-01 紫红色砂岩样品外,其他样品该比值均小于 0.6,说明其处于陆相淡水沉积环境;图 6c 显示除 HT1-2-19 紫红色砂岩样品外,

其他样品也均处于陆相淡水沉积环境图 6b 显示所有黄旗口组样品均形成于淡水沉积环境;图 6d 显示除 HT1-2-19 紫红色砂岩样品外,其他样品也均处于陆相淡水沉积环境。综上所述,黄旗口组整体为淡水沉积,局部可能因气候干燥、蒸发量大、盐度高,而显示咸水沉积特征。

#### 4 古构造沉积背景环境特征

构造环境通过对古地理环境的控制而控制着沉积区岩石的化学组成,因而碎屑岩石的组分可以反映其沉积期的构造沉积背景。据此, Bhatia(1983)和 Bhatia and Crook(1986)在统计大洋岛弧(OIA)、大陆岛弧(CIA)、活动大陆边缘(ACM)和被动大陆边缘(PCM)的构造背景砂岩岩石地球化学资料基础上,对上述 4 种典型构造背景下砂岩的平均化学成分和判别标志进行了总结,设计了  $K_2O/Na_2O-SiO_2$ 、



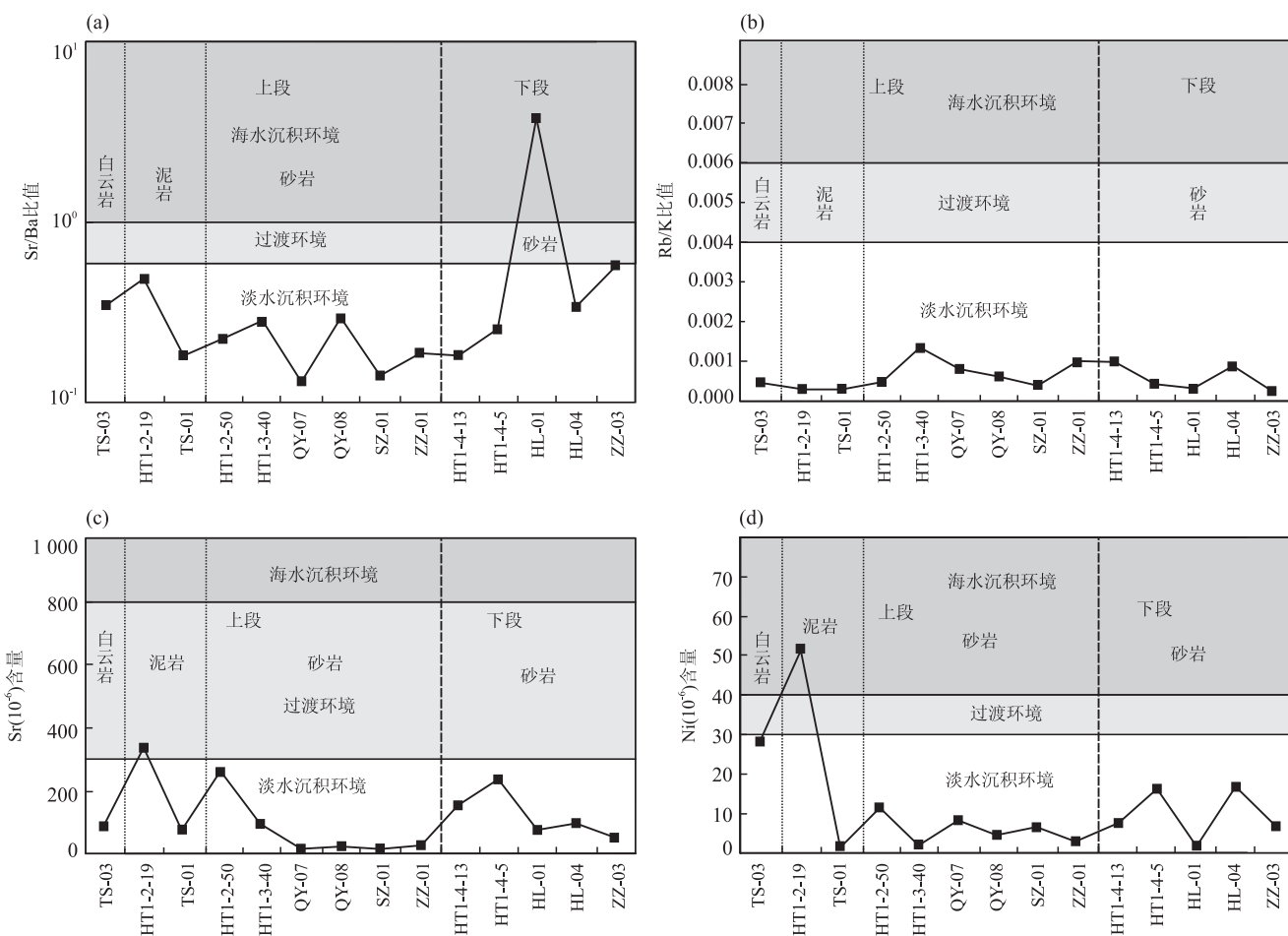


图 6 黄旗口组 Sr/Ba(a)、Rb/K(b)、Sr 含量(c)和 Ni 含量(d)海陆环境判别图

Fig. 6 Marine environment discrimination diagrams of Sr/Ba (a), Rb/K (b), Sr (c), and Ni (d) for Huangqikou Formation in Ordos region

据王益友等(1979)和郑荣才和柳梅青(1999)

( $Al_2O_3 + SiO_2$ )-(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO)、TiO<sub>2</sub>-(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO)、 $Al_2O_3/SiO_2$ -(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO)、 $K_2O/Na_2O$ -(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO)和  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ -(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO)等碎屑岩构造环境判别图解; Roser and Korsch(1988)设计了物源判别图解  $F_1-F_2$ 。由于 Bhatia (1983)、Bhatia and Crook(1986)和 Roser and Korsch(1988)的地球化学构造沉积背景判别图解缺乏对陆内裂谷构造沉积环境的描述, 针对此, Huntsman-Mapila *et al.* (2009)以东非裂谷 Okavango 和 Southern Tanganyika 次盆内裂谷早期碎屑岩地球化学沉积数据为基础, 对其补充了大陆裂谷冲积扇沉积区和大陆裂谷湖相沉积区(图 7)。微量元素 La、Ce、Th、Zr、Sc 在风化、搬运和沉积过程中化学性质稳定, 从大洋岛弧到大陆岛弧、活动大陆边缘、被动大陆边缘, 元素 La、Th 含量逐渐增高, 而过渡性元素 Sc、Co、Zr 含量则逐渐减少。因而, 利用 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10 等判别图也可以判

别源区的构造环境 (Bhatia and Crook, 1986; Heron, 1988)。

为更加准确地判别研究区的构造沉积背景, 本次研究在利用 Bhatia (1983)、Bhatia and Crook (1986)、Roser and Korsch (1988) 和 Huntsman-Mapila *et al.* (2009)的主量元素构造沉积背景判别图解的基础上, 结合 Dickinson *et al.* (1983)的砂岩碎屑含量 QFL 三角图解, 共同探讨了研究区黄旗口组的构造沉积背景。

在图 7a 中, 黄旗口组碎屑岩样品全部投影至被动大陆边缘区, 其中黄旗口组下段样品多落入东非裂谷区, 上段样品及部分下段样品则位于东非裂谷区外; 在图 7b 中, 除了杭探 1 井 HT1-4-5、HT1-2-50 和 HT1-2-19 这 3 件样品落入酸性火山岩区外, 其他样品均落入成熟大陆石英质物源区, 且黄旗口组下段样品中 3 件落入东非裂谷区, 1 件紧邻东非裂谷区; 图 7c 和图 7d 投影结果相似, 黄旗口组样品均落入

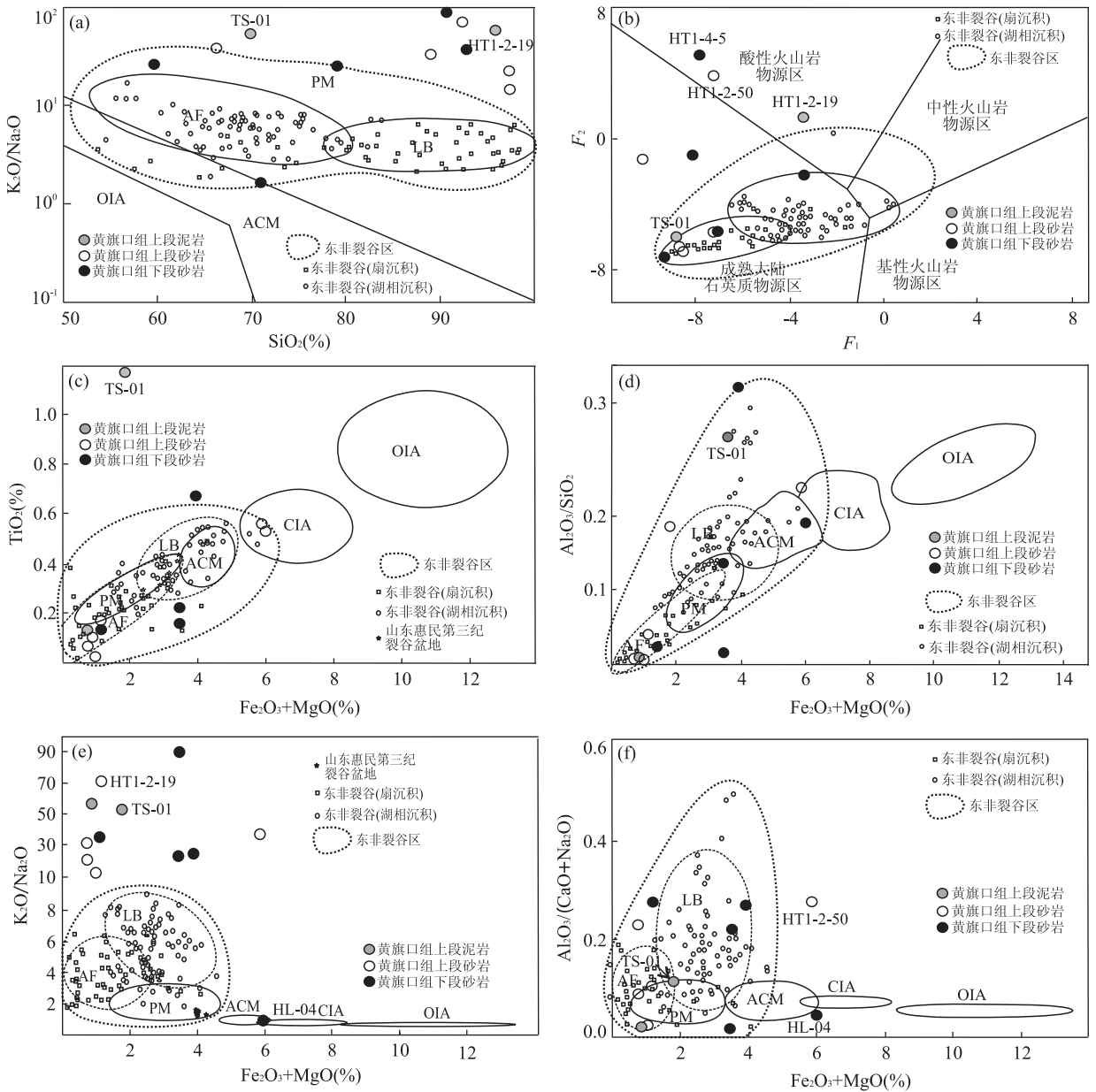


图 7 黄旗口组主要元素构造沉积背景判别

Fig. 7 Discriminate diagrams of tectonic-sedimentary background of major element for Huangqikou Formation in Ordos region a.  $K_2O/Na_2O-SiO_2$  判别图解; b.  $F_1-F_2$  判别图解; c.  $TiO_2-(Fe_2O_3+MgO)$  判别图解; d.  $Al_2O_3/SiO_2-(Fe_2O_3+MgO)$  判别图解; e.  $K_2O/Na_2O-(Fe_2O_3+MgO)$  判别图解; f.  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)-(Fe_2O_3+MgO)$  判别图解. AF. 陆内裂谷扇沉积; LB. 陆内裂谷湖相沉积; 据 Huntsman-Mapila *et al.* (2009). OIA. 大洋岛弧; CIA. 大陆岛弧; ACM. 活动大陆边缘; PM. 被动大陆边缘; 据 Bhatia(1983)

大洋岛弧区外,且均集中分布于东非裂谷区;在图 7e 和图 7f 中,除贺兰山拜寺口 HL-04 样品落入活动陆缘和大陆岛弧重叠区外,其他样品均邻近被动陆缘区或位于东非裂谷区. 综上可知,黄旗口组同东非裂谷沉积具有相似的特征,应该也具有相同的构造沉积背景.

黄旗口组绝大多数样品投影点均落入典型大洋岛弧区外(图 8). 在图 8a 中,黄旗口组所有样品投影点均落入典型大洋岛弧区外,除千阳 QY-07 样品

外,其他样品均邻近典型活动大陆边缘、被动大陆边缘和大陆岛弧区;在图 8b 中,样品投影点极为分散,但除千阳 QY-07 和 QY-08 样品邻近大洋岛弧区外,其他样品投影点也均邻近或位于典型活动大陆边缘、被动大陆边缘和大陆岛弧区;在图 8c 中,除千阳 QY-07、QY-08、炭山 TS-01、炭山 TS-03 和贺兰 HL-04 样品外,其他样品投影点均落入或邻近典型活动与被动大陆边缘区. 此外,黄旗口组砂岩薄片中的碎屑颗粒组分统计数据则投影至大陆块或再旋回

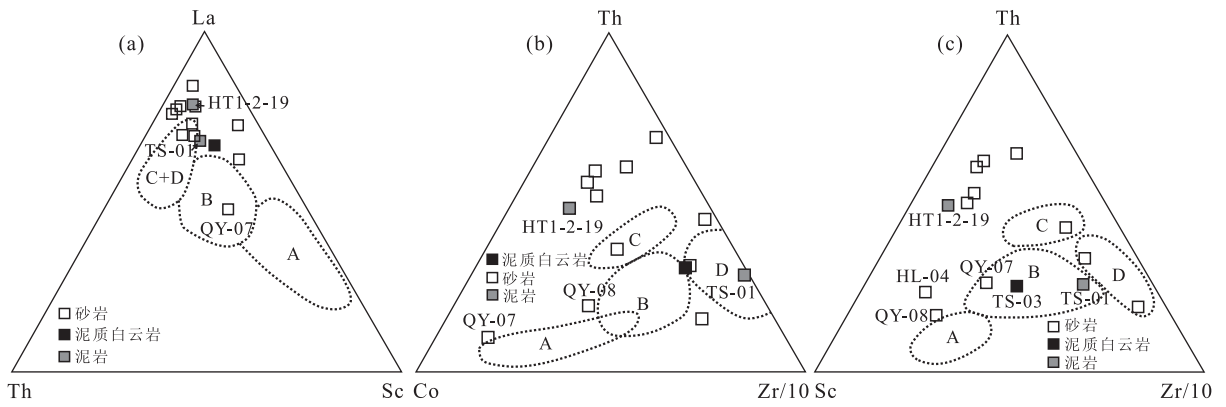


图 8 黄旗口组微量元素 La-Th-Sc (a)、Th-Co-Zr/10 (b)、Th-Sc-Zr/10 (c)构造沉积背景判别三角图

Fig. 8 Discriminant triangle diagrams of tectonic-sedimentary background of trace element (La-Th-Sc (a)、Th-Co-Zr/10 (b)、Th-Sc-Zr/10 (c) for Huangqikou Formation in Ordos region

A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘; 据 Bhatia and Crook(1986)

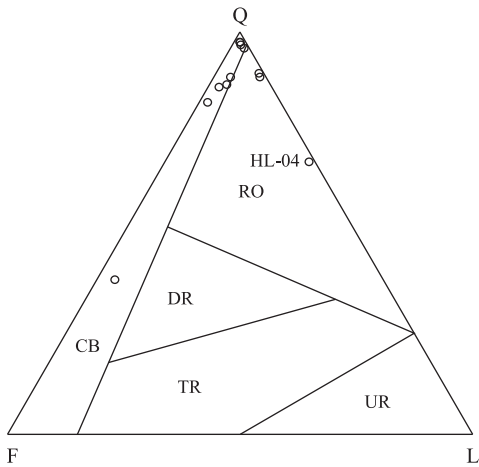


图 9 黄旗口组砂岩碎屑含量 QFL 三角图解

Fig. 9 QFL ternary plot of sandstones petrofacies for Huangqikou Formation

Q. 石英; F. 长石; L. 岩屑; CB. 大陆块; RO. 再旋回造山带; DR. 切割弧; TR. 过渡弧; UR. 末切割弧; 据 Dickinson *et al.*, (1983)

造山带区(图 9; Dickinson *et al.*, 1983). QFL 三角图解和主微量元素构造沉积环境判别结果一致, 均显示黄旗口组物源应来自古老的大陆或再旋回造山带区.

### 5 讨论

黄旗口组砂岩的碎屑组分和主微量元素构造环境判别图所反映的构造环境基本一致, 均显示其来自于非大洋岛弧区, 其碎屑岩地球化学特征同来自典型被动大陆边缘、活动大陆边缘和大陆岛弧及其之间过渡区的碎屑岩相似, 其母岩应来自于成熟大陆石英质物源区、古老的造山带或大陆块地区, 并具

有与东非裂谷区物源极为相似的特征(图 7), 因此笔者推测其应与东非裂谷具有相似的构造沉积背景. 根据千阳 QY-07、QY-08 等样品投影点接近或处于大陆岛弧区(图 8), 且千阳位于鄂尔多斯西南缘, 笔者推测研究区外侧可能存在早期俯冲而形成的古老大陆岛弧. 考虑到黄旗口组样品与东非裂谷样品的碎屑组分和主微量元素相似的特征(图 7), 加之黄旗口组整体形成于淡水、氧化、干燥的沉积环境特征(图 4~图 6), 可知研究区应处于陆内裂谷构造沉积背景之下. 黄旗口组下段比上段岩石内石英砂岩含量低、Fe 和 Mg 含量高的原因, 应与该区黄旗口组沉积早期为裂谷环境, 母岩区铁镁质岩石含量高、源区近和风化程度弱有关; 黄旗口组沉积晚期, 随着区域进入裂谷后拗陷环境, 构造沉积背景日趋稳定, 加之碎屑物搬运距离远、风化程度强烈, 从而造成上段岩石内石英含量增加、Fe 和 Mg 含量减少.

黄旗口组沉积期华北克拉通东缘和东南缘缺失待建系沉积, 同期华北克拉通处于逆时针旋转背景(侯贵廷等, 2000), 由此笔者认为鄂尔多斯西南部地区的中元古代待建纪陆内裂谷事件, 可能与华北克拉通东缘和东南缘碰撞引起的华北克拉通处于逆时针旋转背景有关. 在此背景下, 鄂尔多斯盆地西南缘地区遭受俯冲挤压, 导致区域内古老的北东向断裂走滑伸展, 陆内裂谷发育, 在干热气候条件下, 区域发育了以黄旗口组为代表的一套陆相碎屑岩沉积.

### 6 结论

本文利用碎屑组分、主量和微量元素等地球化

学特征,结合区域及深部背景特征,探讨了鄂尔多斯盆地西南部以黄旗口组为代表的碎屑岩层系的沉积环境及其构造背景,结果表明:(1)鄂尔多斯地区黄旗口组处于富氧的沉积环境下;(2)黄旗口组整体为淡水沉积,局部可能因气候干燥、蒸发量大、盐度高,而显示咸水沉积特征;(3)黄旗口组沉积期气候干燥,古海水温度较高(平均为 31.81 °C),其母岩化学淋溶作用较弱,以物理风化为主;(4)黄旗口组应形成于陆内裂谷的构造沉积背景之下,其早期应为陆内裂谷环境,晚期应为裂谷后拗陷环境,自早至晚构造沉积环境日趋稳定、石英砂岩含量逐渐增加;(5)黄旗口组沉积期鄂尔多斯西南部的陆内裂谷事件,可能与华北克拉通东缘和东南缘的碰撞引起的华北克拉通处于逆时针旋转背景有关.在此背景下,其内发育了以黄旗口组为代表的一套陆相碎屑岩沉积.

致谢:感谢审稿专家、北京大学王增振博士、中国地质大学(武汉)王军鹏博士、中国地质科学院陈兴强博士给予的帮助和支持!

## References

- Bhatia, M. R., 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *Journal of Geology*, 91(6): 611–627. doi:10.1086/628815
- Bhatia, M. R., Crook, K. A. W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181–193. doi:10.1007/bf00375292
- Boboye, O. A., Nwosu, O. R., 2014. Petrography and Geochemical Indices of the Lagos Lagoon Coastal Sediments, Dahomey Basin (Southwestern Nigeria): Sea Level Change Implications. *Quaternary International*, 338:14–27. doi:10.1016/j.quaint.2013.07.006
- Chen, J. B., Zhang, P. Y., Gao, Z. J., et al., 1999. Stratigraphical Lexicon of China: Mesoproterozoic Era. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Di, L. J., Xie, G. C., 2008. Queries about Helan Aulacogen. *Lithologic Reservoirs*, 20(2): 16–21, 36 (in Chinese with English abstract).
- Dickinson, W. R., Suczek, C. A., 1979. Plate Tectonics and Sandstone Compositions. *AAPG Bulletin*, 63(12): 2164–2182. doi:10.1306/2f9188fb-16ce-11d7-8645000102c1865d
- Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., et al., 1983. Provenance of North American Phanerozoic Sandstones in Relation to Tectonic Setting. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2): 222–235. doi:10.1130/0016-7606(1983)94<222:PONAPS>2.0.CO;2
- El-Askary, M. A., El-Mahdy, O. R., 2001. The Nubia Sandstone at Kharga Oasis—A Fresh-Water Deposit: Geochemical Evidence. *Chemical Geology*, 17(1976): 1–11. doi:10.1016/0009-2541(76)90017-6
- Fu, J. H., Wei, X. S., Ren, J. F., et al., 2006. Gas Exploration and Developing Prospect in Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1–4, 13 (in Chinese with English abstract).
- Garzanti, E., Andò, S., Padoan, M., et al., 2015. The Modern Nile Sediment System: Processes and Products. *Quaternary Science Reviews*, 130: 9–56. doi:10.1016/j.quascirev.2015.07.011
- Gao, L. Z., Ding, X. Z., Pang, W. H., et al., 2011. New Geologic Time Scale of Meso- and Neoproterozoic of China and Geochronologic Constraint by Shrimp Zircon U-Pb Dating. *Journal of Stratigraphy*, 35(1): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Gong, W. B., 2014. Characteristics and Significances of Structural Deformation of Western Part of the North China Craton in the Late Paleoproterozoic (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Gromet, L. P., Dymek, R. F., Haskin, L. A., et al., 1984. The “North American Shale Composite”: Its Compilation, Major and Trace Element Characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 2469–2482.
- Hao, Y. W., Luo, M. S., Xu, Z. L., et al., 2014. Division of Sedimentary Basins and Its Tectonic Evolution in North China from Neoproterozoic to Mesozoic. *Earth Science*, 39(8): 1230–1242 (in Chinese with English abstract).
- Harnois, L., 1988. The CIW Index: A New Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology*, 55(3–4): 319–322. doi:10.1016/0037-0738(88)90137-6
- 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. doi:10.1016/0009-2541(92)90031-y
- Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5): 820–829. doi:10.1306/212f8e77-2b24-11d7-8648000102c1865d
- Hou, G. T., Li, J. H., Qian, X. L., et al., 2000. Paleomagnetism Research and Its Geological Significance of Me-

- soproterozoic Dike Swarm in the Middle Segment of North China Craton. *Science in China (Series D)*, 30 (6):602—608 (in Chinese with English abstract).
- Hua, H., Qiu, S. Y., Xiao, L. J., 1993. The Discovery of Trace Fossils from the Middle Proterozoic Changcheng System in Helan Mountain, Ningxia. *Journal of Northwest University*, 23 (5): 459—462 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z. Q., Huang, H., Du, Y. S., 2013. Depositional Chemistry of Cherts of the Late Paleozoic in Napo Rift Basin, Guangxi and Its Implication for the Tectonic Evolution. *Earth Science*, 38(2): 253—265 (in Chinese with English abstract).
- Huntsman-Mapila, P., Tiercelin, J. J., Benoit, M., et al., 2009. Sediment Geochemistry and Tectonic Setting: Application of Discrimination Diagrams to Early Stages of Intracontinental Rift Evolution, with Examples from the Okavango and Southern Tanganyika Rift Basins. *Journal of African Earth Sciences*, 53(1—2): 33—44. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2008.07.005
- Jin, W., 2012. Research on Seismite in Huangqikou Formation of Changcheng System, Middle Helan Mountain (Dissertation). Chinese University of Geosciences, Wuhan (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 Mudstones. *Chemical Geology*, 111(1—4): 111—129. doi: 10.1016/0009—2541(94)90085—x
- Lerman, A., Baccini, P., 1978. Lakes: Chemistry, Geology, Physics. Springer-Verlag, Berlin.
- Li, M. T., Wang, C., Ma, X. D., et al., 2014. Characteristics of the Huangqikou Formation in the Middle Segment of Helan Mountain and Stratigraphic Correlation with North China. *Ningxia Engineering Technology*, 13 (3):201—203 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Yang, Q., Li, S. T., 1995. The Analysis on Filling Evolution of Helan Aulacogen Basin. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, C. Y., Zhao, H. G., Song, L. J., et al., 2015. Basin Types and Sedimentary Evolution in the Middle-Upper Proterozoic, Ordos Area. Scientific Research Report of Changqing Oilfield Branch Company, Petro China, Xi'an (in Chinese).
- Liu, G., Zhou, D. S., 2007. Application of Microelements Analysis in Identifying Sedimentary Environment-Taking Qianjiang Formation in the Jiang Han Basin as an Example. *Petroleum Geology & Experiment*, 29 (3): 307—310, 314 (in Chinese with English abstract).
- Luo, S. S., Wang, K. M., 2010. The Application of Element Geochemical Characteristics to Recognition of Carbonate Sedimentary Sequence Boundary: A Case Study of the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in Northern Hebei Depression. *Geology in China*, 37 (2): 430—437 (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S. M., 2001. Relationships between the Trace Element Composition of Sedimentary Rocks and Upper Continental Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4). doi:10.1029/2000gc000109
- Parcerisa, D., Gómez-Gras, D., Travé, A., 2005. A Model of Early Calcite Cementation in Alluvial Fans: Evidence from the Burdigalian Sandstones and Limestones of the Vallès-Penedès Half-Graben (NE Spain). *Sedimentary Geology*, 178(3—4): 197—217. doi:10.1016/j.sedgeo.2005.04.004
- Peng, X. F., Wang, L. J., Jiang, L. P., 2012. Geochemical Characteristics of the Lucaogou Formation Oil Shale in the Southeastern Margin of the Junggar Basin and Its Environmental Implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(2): 121—127, 151 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, X. F., Gao, L. Z., Zhang, C. H., 2007. New Idea of the Meso- and Neoproterozoic Chronostratigraphic Chart and Tectonic Environment in Sino-Korean Plate. *Geological Bulletin of China*, 26(5): 503—509 (in Chinese with English abstract).
- Rimmer, S. M., Thompson, J. A., Goodnight, S. A., et al., 2004. Multiple Controls on the Preservation of Organic Matter in Devonian-Mississippi Marine Black Shales: Geochemical and Petrographical Evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 215(1—2): 125—154. doi:10.1016/s0031—0182(04)00466—3
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67(1—2): 119—139. doi:10.1016/0009—2541(88)90010—1
- Shi, X. Y., Wang, X. Q., Jiang, G. Q. et al., 2008. Pervasive Microbial Mat Colonization on Mesoproterozoic Peritidal Siliciclastic Substrates: An Example from the Huangqikou Formation (ca 1.6 Ga) in Helan Mountains, NW China. *Geological Review*, 54(5): 577—586 (in Chinese with English abstract).
- Su, W. B., Li, H. K., Xu, L., et al., 2012. Luoyu and Ruyang Group at the South Margin of the North China Craton (NCC) Should Belong in the Mesoproterozoic

- Changchengian System; Direct Constraints from the LA-MC-ICP-MS U-Pb Age of the Tuffite in the Luoyukou Formation, Ruzhou, Henan, China. *Geological Survey and Research*, 35(2): 96–108.
- Sun, J. W., Fu, Y. T., Lan, C. L., 2014. Trace Element Geochemical Characteristics of the Marine Clastic Rocks in Qingdao and Their Sedimentary Environments Implications. *Marine Sciences*, 38(8): 75–81 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. H., 1995. Evolutionary Characteristics of Geological Structure and Oil-Gas Accumulation in Shanxi-Shaanxi Area. *Journal of Geology and Mineral Resources of North China*, 10(3): 283–398 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Y., Guo, W. Y., Zhang, G. D., 1979. Application of Some Geochemical Indicators in Determining of Sedimentary Environment of the Funing Group (Paleogene), Jin-Hu Depression, Kiangsu Province. *Journal of Tongji University*, 7(2): 51–60 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B. D., 1997. A New Cognition on the Stratigraphic Division of Changcheng Period in Gansu Province. *Acta Geologica Gansu*, 6(1): 2–16 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. J., Zhao, B., 2012. Geochemical and Palaeoclimatic Approaches to the Cretaceous Mudstones in the Ya'an-Mingshan Zone, Western Sichuan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(1): 78–83 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. L., 1994. *Natural Gas Geology in Ordos Basin*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., 1983. Discussion on Helan Mountain Rifting Grabens. *The Papers of Petroleum Geology on West Margin of Ordos Basin*. Inner Mongolia People's Publishing House, Hohhot (in Chinese).
- Zhang, K., Deng, H. G., 1981. Early Late-Proterozoic Developmental Characteristics and Oil and Gas Prospects of Ordos Fault-Block. *Petroleum Exploration and Development*, 8(5): 18–26 (in Chinese).
- Zhang, W., Mu, K., Cui, Z. J., et al., 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).
- Zhao, W. J., Wu, G. X., 1989. Stromatolites from Upper-Middle Proterozoic Erathem of Ningxia. *Acta Paleontologica Sinica*, 28(3): 391–401 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Liu, M. Q., 1999. Study on Paleosalinity of Chang6 Oil Reservoir Set in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 20–25 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 陈晋镛, 张鹏远, 高振家, 等, 1999. 中国地层典: 中元古界. 北京: 地质出版社.
- 邸领军, 谢成广, 2008. 对贺兰拗拉槽的质疑. 岩性油气藏, 20(2): 16–21, 36.
- 付金华, 魏新善, 任军峰, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地天然气勘探形势与发展前景. 石油学报, 27(6): 1–4, 13.
- 高林志, 丁孝忠, 庞维华, 等, 2011. 中国中—新元古代地层年表的修正——锆石 U-Pb 年龄对年代地层的制约. 地层学杂志, 35(1): 1–7.
- 公王斌, 2014. 华北克拉通西部古元古代末构造变形特征及意义(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 郝玮琦, 骆满生, 徐增连, 等, 2014. 华北陆块新元古代—中生代沉积盆地划分及其构造演化. 地球科学, 39(8): 1230–1242.
- 侯贵廷, 李江海, 钱祥麟, 等, 2000. 华北克拉通中部中元古代岩墙群的古地磁学研究及其地质意义. 中国科学(D辑), 30(6): 602–608.
- 华洪, 邱树玉, 肖丽君, 1993. 中元古代长城纪遗迹化石在宁夏贺兰山的发现. 西北大学学报, 23(5): 459–462.
- 黄志强, 黄虎, 杜远生, 等, 2013. 广西那坡裂陷盆地晚古生代硅质岩地球化学特征及其地质意义. 地球科学, 38(2): 253–265.
- 金巍, 2012. 贺兰山中段长城系黄旗口组震积岩研究(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 李明涛, 王成, 马学东, 等, 2014. 贺兰山中段黄旗口组特征及与华北地区地层对比. 宁夏工程技术, 13(3): 201–203.
- 林杨松, 杨起, 李思田, 1995. 贺兰山拗拉槽盆地充填演化分析. 北京: 地质出版社.
- 刘池阳, 赵红格, 宋立军, 等, 2015. 鄂尔多斯地区中新元古界盆地类型及其沉积演化. 西安: 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司科研报告.
- 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): 307–310, 314.
- 罗顺社, 汪凯明, 2010. 元素地球化学特征在识别碳酸盐岩层序界面中的应用——以冀北拗陷中元古界高于庄组为例. 中国地质, 37(2): 430–437.
- 彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍, 2012. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义. 矿物岩石地球化学通报, 31(2): 121–127, 151.