

doi:10.3799/dqkx.2017.571

# 手持 X 射线衍射仪(ED-XRF)在旋回地层学中的应用: 以酒泉盆地青西凹陷早白垩世下沟组为例

曹海洋<sup>1,2</sup>, 王华<sup>1,2</sup>, 赵睿<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 在旋回地层学研究中, 高分辨率地球化学数据作为一重要的替代指标, 其一般获取方式(ICP-MS 或 WD-XRF)较耗费时间和经费, 而手持 X 射线衍射仪(ED-XRF)能够高效的解决这一问题, 目前将 ED-XRF 运用在沉积地层研究中, 尤其是旋回地层学研究领域中较少。以酒泉盆地青西凹陷早白垩世下沟组深湖相泥岩、白云质泥岩为研究对象, 将连续采集的岩心样品通过 ED-XRF 测试, 该测试方法能够保证在不破坏样品的前提下, 并在误差允许的范围内的条件下, 短时间内(5 min)完成对单一样品的测试。通过测试精确得出 24 种主量及微量元素的含量, 将得出的地球化学特征作为旋回地层学研究的替代指标, 并针对 K/Al, Ca/Al, Si/Al, Fe/Al, Ti/Al, Mn/Al, Ni/Al, Zn/Al 和 Pb/Al 的比值进行频谱分析。数据表明 W2 井下沟组一段( $SQK_1 g^1$ )地层旋回性表现出与天文旋回明显的对应关系。沉积地层中的旋回厚度比值为  $20.25 : 4.75 : 1.75 : 1.00$ , 与米兰科维奇旋回中长偏心率、短偏心率、斜率和岁差的周期比值:  $400 \text{ ka} : 95 \text{ ka} : 37 \text{ ka} : 20 \text{ ka}$  相对应。该地区的沉积记录受天文轨道周期的影响得到了证明, 与此同时, 为手持 X 射线衍射仪在旋回地层学中的应用开辟了新领域。

**关键词:** 酒泉盆地; 早白垩世; 地层学; 手持 X 射线衍射仪; 地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2017)12-2299-13

收稿日期: 2017-06-09

## The Application of the Handheld Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (ED-XRF) in the Cyclostratigraphy Research—A Case Study from the Xiagou Formation of the Lower Cretaceous in the Qingxi Sag, Jiuquan Basin

Cao Haiyang<sup>1,2</sup>, Wang Hua<sup>2</sup>, Zhao Rui<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The high resolution geochemical data are used as important proxies in cyclostratigraphy, which cost a lot of time and money to obtain the data in the usual way (ICP-MS or WD-XRF). And the handheld energy-dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) can obtain the high resolution geochemical data efficiently. Currently, the handheld energy-dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) was few used in the study of sedimentary strata, especially in cyclostratigraphy research field. Continuous core samples of deep lacustrine mudstone and dolomitic mudstone were selected from the Xiagou Formation of the Lower Cretaceous in the Qingxi Sag, Jiuquan Basin. Content of 24 major elements and trace elements which can be used as important proxies in cyclostratigraphy were accurately measured under the Handheld energy-dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) testing, a non-destructive, direct method with high precision in an efficiency way which can test one single sample in five minutes. Ratios of obtained geochemical data (K/Al, Ca/Al, Si/Al, Fe/Al, Ti/Al, Mn/Al, Ni/Al, Zn/Al and Pb/Al) were analyzed by spectral methods further. Such results presented cycle wavelengths in the stratigraphic units show a value of  $20.25 : 4.75 : 1.75 : 1.00$ ,

**基金项目:** 国家科技重大专项课题(No.2016ZX05006006-002)。

**作者简介:** 曹海洋(1988—), 男, 博士, 主要从事层序地层学、沉积学、旋回地层学研究。ORCID: 0000-0003-4618-4610. E-mail: xingfusihai@hotmail.com

**引用格式:** 曹海洋, 王华, 赵睿, 2017. 手持 X 射线衍射仪(ED-XRF)在旋回地层学中的应用: 以酒泉盆地青西凹陷早白垩世下沟组为例. 地球科学, 42(12): 2299–2311.

corresponding with those of Milankovitch cycle periods (400 ka (long eccentricity) : 95 ka (short eccentricity) : 37 ka (obliquity) : 20 ka (precession), respectively) in Well W2. The correspondences between the sedimentary cycle ratios and the Milankovitch cycle periods indicates controlling effect of astronomical factors on sedimentation. ED-XRF provide the new possibilities in detection and quantification of geological processes, and have great significance in establishing geological time series.

**Key words:** Jiuquan Basin; Lower Cretaceous; stratigraphy; ED-XRF; geochemistry.

## 0 引言

手持 X 射线衍射仪(ED-XRF)在地球化学分析中应用广泛,在快速测定元素含量中起到重要的作用。ED-XRF 仪器体积小,不破坏样品,并且能够获得较高的精度(检测限达到  $10^{-6}$  级别),短时间内完成对一块样品的测试(Fitton, 1997; Vanhoof *et al.*, 2004; Rowe *et al.*, 2012; Hall *et al.*, 2014)。在前人的研究中,ED-XRF 常被用于地球化学分析,包括细粒沉积物中主量及微量元素含量的测定(Potts *et al.*, 1995; Jansen *et al.*, 1998; Binstock *et al.*, 2008)。近些年,化学元素常被当作良好的替代指标用于构建高精度地层格架(Rimmer, 2004; Jones *et al.*, 2005),而 ED-XRF 测试则提供了良好的精度、准确度和完成度(Richter *et al.*, 2006; Kujau *et al.*, 2010)。

酒泉盆地青西凹陷是位于祁连造山带北缘的中一新生代含油气盆地。其中下白垩统下沟组是主要的生油层系,已发现的鸭儿峡、柳沟庄和窟窿山油藏产量达  $10^8$  t。在青西凹陷半深湖—深湖下白垩统下沟组可见大量泥质白云岩、白云质泥岩与灰质粉砂岩的韵律互层现象(罗平等, 2001; 文华国等, 2009),该韵律特征与在中国其他地区大量白垩纪地层表现出高分辨率的旋回特征相似(Chen *et al.*, 2005, 2006; Li *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015),并可与一系列特殊地质事件相关联(史瑞萍和朱日祥, 2002; Wu *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2016)。

本文利用 ED-XRF 对一系列样品进行地球化学测试,通过对相应地球化学元素比值进行频谱分析,分析酒泉盆地青西凹陷白垩纪地层的高精度沉积旋回,发现地层中记录了天文旋回周期,同时也证明了 ED-XRF 的准确性与实用性。

## 1 区域地质概况

酒泉盆地位于祁连山褶皱带北缘西部,属于河西走廊盆地群,面积约为  $20\ 800\ km^2$ 。酒泉盆地中部为嘉峪关隆起,并将盆地划分为酒西盆地和酒东盆

地两个次级盆地(陈建平等, 1996; 陈卫锋等, 2005; Chen *et al.*, 2014)(图 1a)。其中,青西凹陷位于酒西盆地内,是唯一一个富油凹陷,面积约为  $500\ km^2$ (文华国等, 2005; 潘良云等, 2006; 汪晶等, 2012)。青西凹陷又可划分为 3 个二级单元,分别为红南洼陷、青西低隆起和青南洼陷(Chen *et al.*, 2014)(图 1c)。

酒泉盆地以伸展断陷盆地为特征,是中国早白垩世最大的中生代—新生代叠合盆地(Jin *et al.*, 2013)。下白垩统从老到新划分为赤金堡组( $K_{1c}$ )、下沟组( $K_{1g}$ )和中沟组( $K_{1z}$ )。其中,下沟组地层从下至上可被划分为 3 个三级层序,分别为:下沟组零段( $SQK_{1g}^0$ ),下沟组一段( $SQK_{1g}^1$ )和下沟组二加三段( $SQK_{1g}^{2+3}$ )。植物化石指示下沟组沉积时期处于阿普第阶—阿尔必阶(邓胜徽等, 2005; 邓胜徽和卢远征, 2008),介形亚纲动物化石指使下沟组沉积时期处于巴列姆阶(胡艳霞和徐东来, 2005)。红柳峡中沟组底部测得火山岩锆石 U-Pb 年龄大约为 114 Ma,这与李海兵等(2006)在酒西地区火山岩中测得的 K-Ar 年龄(106~118 Ma)基本一致。由于下沟组和中沟组之间没有明显的沉积间断,加之人们对我国北方下白垩统的对比研究表明(旷红伟等, 2013),酒西地区的白垩系绝对年龄应当在 130~110 Ma 之间,大致可推测下沟组的年龄在 120~115 Ma 左右(图 2)。

在陆相盆地中,尽管沉积在某些尺度上会受到构造作用及湖盆内三角洲的影响,但是大量能反应沉积期沉积环境和气候的信息(尤其是处在高频旋回级别),在沉积时期依旧被完整保存在地层中(Olsen *et al.*, 1996; Burn and Hel, 1997)。本文选取了 5 口目标井,其中 W1, W2, W3 和 W4 井均位于盆地中心深湖沉积区,较好的避开了断层对沉积的控制和影响;W5 为一口科学探井,拥有连续取芯并且取样位置位于下沟组二加三段( $SQK_{1g}^{2+3}$ ),没有沉积间断。取样井的岩性特征为白云质泥岩、钙质泥岩、泥质白云岩、灰质粉砂岩、泥岩和粉砂岩(表 1)。以 W2 井为例(图 3),95% 以上均为白云质泥岩和灰质粉砂岩,以 1 m 为间距等间隔取样,从 4 426 m 到 4 466 m 一共 41 个样品。

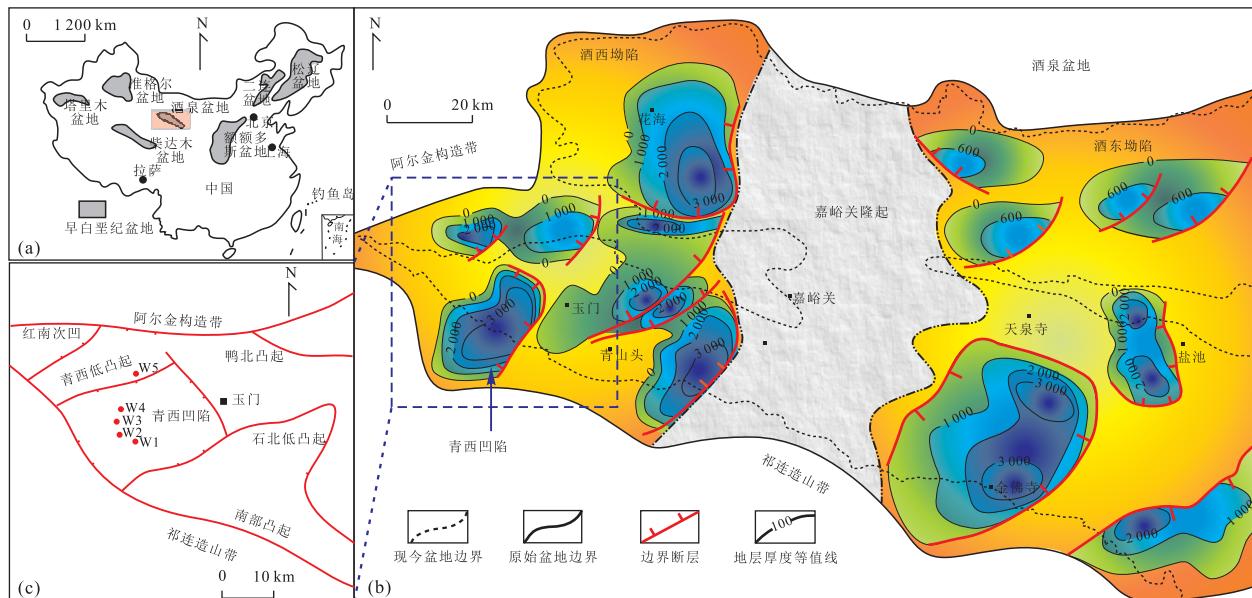


图 1 研究区地质

Fig.1 Geology of research area

a. 主要白垩系盆地分布范围及酒泉盆地位置(旷红伟等, 2013); b. 酒泉盆地构造区划, 主要分为 3 个构造单元: 酒西坳陷、嘉峪关隆起和酒东坳陷;c. 青西凹陷及钻井位置示意图

| 系    | 阶    | 年龄                 | 层位       | 岩性 | 古生物群        | 沉积环境                    | 构造幕    | 构造阶段 | 构造运动 |
|------|------|--------------------|----------|----|-------------|-------------------------|--------|------|------|
| 早白垩世 | 阿尔必阶 | ~113 Ma            | 中沟组(Kz)  |    | 东方叶肢介—叠饰叶肢介 | 曲流河三角洲<br>滨浅湖<br>冲积扇    | 隆起和剥蚀期 | 断陷盆地 | 燕山运动 |
|      |      |                    |          |    |             |                         | 断拗转换期  |      |      |
|      | 阿普第阶 | ~115.6 Ma (SHRIMP) | 下沟组(Kg)  |    | 玉门叶肢介       | 浅湖—半深湖<br>扇三角洲          | 稳定沉降期  |      |      |
|      | 巴列姆阶 | ~126 Ma            | 赤金堡组(Kc) |    | 东方叶肢介—假叶肢介  | 半深湖—深湖<br>曲流河三角洲<br>冲积扇 | 扩张期    |      |      |

图 2 青西凹陷下白垩统综合柱状图

Fig.2 The stratigraphy column of Lower Cretaceous in the Qingxi Sag

包括: 岩性描述、古生物(马其鸿等, 1984; 牛绍武, 1987)、沉积环境、构造演化阶段(Chen et al., 2014)

表 1 青西凹陷采样分布

Table 1 Sections of sample analyzed in the Qingxi Sag

| 井名 | 样品数 | 样品分类                     |
|----|-----|--------------------------|
| W1 | 48  | 白云质泥岩;泥岩;灰质粉砂岩           |
| W2 | 41  | 白云质泥岩;灰质粉砂岩              |
| W3 | 29  | 白云质泥岩;                   |
| W4 | 32  | 白云质泥岩;泥质白云岩;细砂岩          |
| W5 | 21  | 白云质泥岩;泥质白云岩;灰质粉砂岩        |
| 总计 | 171 | 泥岩;白云质泥岩;泥质白云岩;灰质粉砂岩;细砂岩 |

## 2 数据与方法

### 2.1 理论基础

X 射线与原子之间的相互作用,本质上是电子的散射和光电效应.原子发射的 X 射线是由于光电效应引起的.原子的内层电子具有一个固定概率被激发,从而一个外层电子将充填在内层被激发的电子所产生的空位中,从而该原子有一定概率发射出 X 射线.所有元素发射 X 射线具有各自特定的能量(图 4),在一般情况下,X 射线的强度是样品中元素浓度的比例,可应用于定量化学分析.因此,通过分析 X 射线的能量,可以确定存在的元素类型及样品中元素的含量.基质效应显著影响样品 X 荧光能谱法的测定结果(Tung, 2004),为了获得广泛的元素浓度,得到一个准确的校准标准化数据,需要选择

最广泛的样品矩阵.本文通过对所有样品进行  $\text{CaCO}_3$  含量的测试,选取含量位于最低浓度 1.89% (W4-15) 和最高浓度 15.06% (W2-19) 之间的 10 个样品作为标准样品.

### 2.2 样品准备

所有测试样品均来自于 W1, W2, W3, W4 和 W55 口井(表 1),并且所有样品都使用 Bruker AXS TRACER IV-SD 手持 X 射线衍射仪进行分析.171 个样品均经过冷冻后干燥,确保无含水影响,并被制成  $74 \mu\text{m}$  的粉末状.选取的 10 个标准样通过 ICP-MS 测试(实验室 Bureau Veritas Mineral Laboratories Ltd, Canada)得到每个元素的精确值,用作建立一个适用于这 171 个样品的算法以获得更精确的元素浓度.

### 2.3 设备调试

Bruker AXS TRACER IV-SD 手持衍射仪直立放置,Rh-X 射线管朝上.测试前将粉末样品放置在一个直径约为 4 cm 的塑料盒中,塑料盒底部被塑料薄膜覆盖.塑料薄膜必须非常紧致的包裹塑料盒用以获得无衰减信号.采用双重测试(dual function)控制实验的精准度,包括低能量测试(主元素,和 Ni, V 和 Cr)和高能量测试(微量元素).其中低能量测试仪器电压为 15 kV,电流 0.55 mA,高能量测试

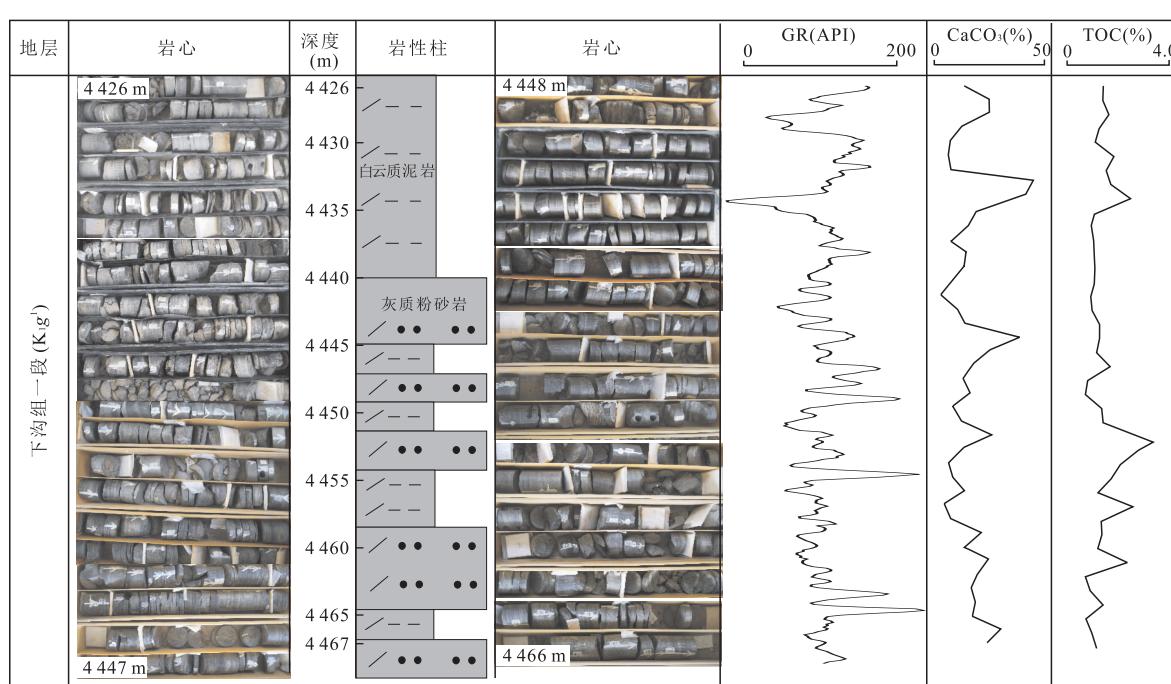


图 3 酒泉盆地青西凹陷 W2 井下沟组典型岩心柱

Fig.3 Typical lithologic cores and sampling section in Member1 of the Xiagou Formation ( $\text{SQK}_1\text{g}^1$ ) of well W2

W2 井采样位置为 4 426~4 466 m,厚度 40 m,均匀采样 41 个,样品间隔 1 m

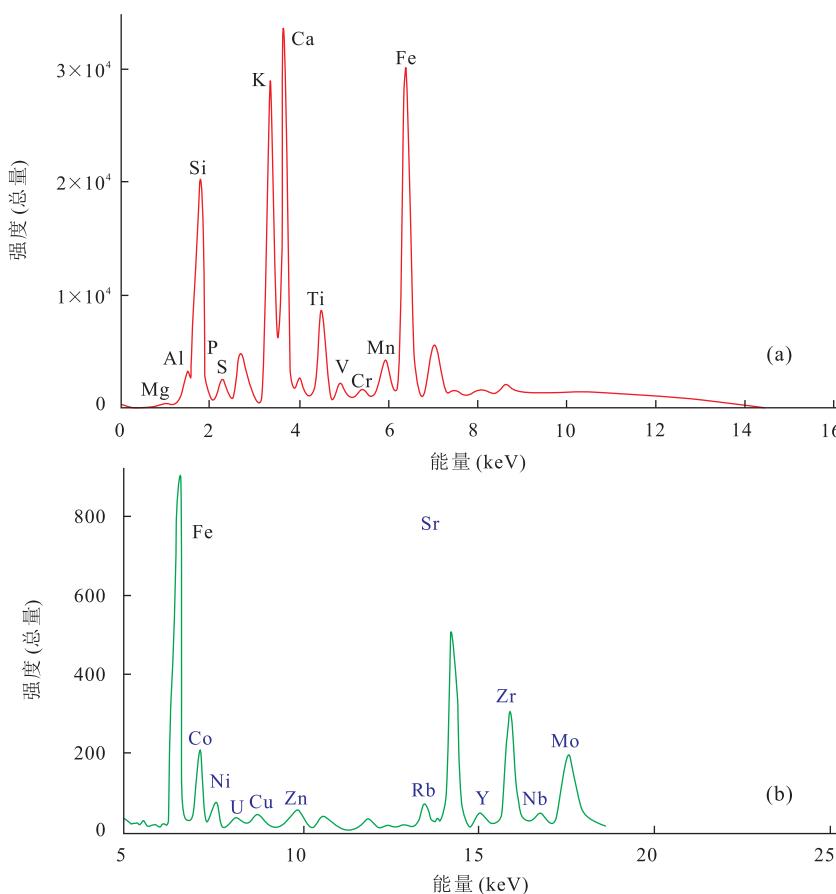


图 4 色散 X 射线分析

Fig.4 Dispersive X-ray spectrum

a.W2 井 12 号样品下沟组低能量色散 X 射线分析(15 kV, 0.055 0 mA); b. W4 井 15 号样品下沟组高能量色散 X 射线分析(40 kV, 0.006 5 mA), Al-Ti 滤波(Ti:25 μm; Al:300 μm)

仪器电压为 40 kV, 电流 0.006 5 mA, 每个测试的持续时间为 210 s。

测试后的光谱数据被加载到与手持 X 射线衍射仪相配套的 Bruker AXS 校正软件(SPECTRAEDX S2 CONFIGURATION)中,通过标准值和测试值之间的对比,实现对每个元素测试精准度的评价。包括  $\alpha$  校正,补偿校正、偏移校正、标准值省略校正等等。表 3 列出了对每个元素采用的不同校正方法。其中,由于某些情况下部分参考值低于检测限,校准过程中需要省略部分标准样。但是在总体标准样不大于 10 个的条件下,最多标准样的省略不超过两个。根据 Rousseau (2001) 的计算,通过校正后计算出的元素浓度的精确度可达到 95.4% 置信水平之上。

### 3 结果

#### 3.1 元素校准

通过校正曲线,即 X-Y 坐标图来完成对在 X 荧

光能谱法测定下的每个元素的评估。参与评估的参数主要有斜率、与  $y$  轴的交点(截距)和拟合  $R^2$ 。如果斜率接近于 1, 截距接近于 0,  $R^2$  接近于 1, 则实验结果被认为具有误差最小值, 即测试值( $V_{\text{measure}}$ )无限接近于标准值( $V_{\text{accepted}}$ )。图 5a~X 绘制了 24 种主量元素与微量元素通过校正后的最佳拟合直线, 以及与之对应的斜率、截距、 $R^2$ 。大部分主量元素呈现出良好的测量精度(图 5a~5h): 斜率接近于 1, 截距接近于 0, 所有的测量值紧密围绕在直线附近。其中对 P 元素(图 5c)的测量出现异常值, 由于 P 元素的能量峰值接近于 Si(图 4), 较小的能量值被 Si 元素的高峰值能量背景影响, 导致仪器对 P 元素能谱测试的灵敏度降低。

微量元素的校正曲线如图 5i~5x 所示, 16 种微量元素中 8 种元素校正曲线的斜率在 0.93 与 1.00 之间(V, Co, Ni, Zn, Rb, Zr, Nb and Pb), 同时这 8 种元素的校正曲线也具有较小的截距和贴近于 1 的  $R^2$  值, 指示了这 8 种元素的测量值贴近于标准值

表 2 标样主量及微量元素浓度的计算标准 (加拿大 Bureau Veritas 矿物检测公司)

Table 2 Major and trace elemental concentrations for the calibration standards

|                                    | W1-3   | W3-14  | W3-9   | W2-13  | W4-15  | W4-13  | W5-16  | W5-19  | W1-23  | W2-19  |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| K <sub>2</sub> O(%)                | 3.07   | 2.71   | 2.88   | 3.36   | 2.44   | 2.44   | 3.34   | 2.95   | 2.96   | 2.61   |
| CaO(%)                             | 3.49   | 6.84   | 9.01   | 10.84  | 1.89   | 15.06  | 4.81   | 6.57   | 8.27   | 11.96  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 17.17  | 14.99  | 12.54  | 11.48  | 16.06  | 8.61   | 17.74  | 14.88  | 13.29  | 12.01  |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 51.62  | 42.87  | 37.93  | 37.04  | 52.05  | 26.06  | 45.83  | 43.22  | 38.01  | 34.10  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0.06   | 0.02   | 0.05   | 0.03   | 0.04   | 0.01   | 0.04   | 0.05   | 0.00   | 0.08   |
| TiO <sub>2</sub> (%)               | 0.73   | 0.53   | 0.51   | 0.48   | 0.66   | 0.32   | 0.61   | 0.51   | 0.49   | 0.40   |
| V(10 <sup>-6</sup> )               | 148.00 | 113.00 | 105.00 | 93.00  | 96.00  | 73.00  | 126.00 | 87.00  | 114.00 | 106.00 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0.020  | 0.017  | 0.017  | 0.015  | 0.016  | 0.008  | 0.019  | 0.016  | 0.015  | 0.014  |
| MnO(%)                             | 0.13   | 0.13   | 0.12   | 0.12   | 0.12   | 0.11   | 0.10   | 0.10   | 0.11   | 0.18   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 6.16   | 4.87   | 4.60   | 3.18   | 4.28   | 2.16   | 5.63   | 7.13   | 5.15   | 5.76   |
| Co(10 <sup>-6</sup> )              | 19.50  | 21.30  | 20.20  | 15.50  | 40.50  | 9.60   | 24.90  | 19.80  | 15.70  | 14.00  |
| Ni(10 <sup>-6</sup> )              | 66.00  | 54.00  | 78.00  | 47.00  | 133.00 | 20.00  | 68.00  | 64.00  | 42.00  | 47.00  |
| Cu(10 <sup>-6</sup> )              | 41.60  | 39.30  | 49.10  | 33.00  | 47.70  | 25.20  | 51.50  | 55.30  | 39.50  | 36.10  |
| Zn(10 <sup>-6</sup> )              | 59.00  | 43.00  | 66.00  | 60.00  | 91.00  | 30.00  | 62.00  | 70.00  | 92.00  | 48.00  |
| Rb(10 <sup>-6</sup> )              | 144.60 | 115.10 | 128.00 | 120.10 | 91.20  | 84.90  | 137.60 | 95.60  | 120.50 | 93.30  |
| Sr(10 <sup>-6</sup> )              | 127.30 | 335.00 | 535.80 | 603.00 | 206.70 | 988.10 | 256.10 | 524.20 | 630.10 | 590.20 |
| Y(10 <sup>-6</sup> )               | 26.20  | 15.80  | 19.60  | 17.90  | 20.80  | 14.70  | 13.40  | 22.90  | 12.70  | 20.40  |
| Zr(10 <sup>-6</sup> )              | 154.00 | 114.80 | 101.10 | 96.60  | 144.30 | 68.00  | 120.70 | 108.30 | 89.90  | 85.90  |
| Nb(10 <sup>-6</sup> )              | 13.40  | 9.20   | 9.80   | 8.70   | 12.20  | 6.00   | 11.20  | 9.80   | 8.20   | 7.40   |
| Mo(10 <sup>-6</sup> )              | 0.20   | 2.90   | 3.30   | 2.10   | 0.90   | 2.70   | 0.70   | 1.30   | 2.70   | 0.90   |
| Pb(10 <sup>-6</sup> )              | 18.40  | 11.60  | 36.60  | 6.10   | 43.50  | 7.50   | 19.40  | 49.60  | 24.00  | 20.90  |
| W(10 <sup>-6</sup> )               | 2.80   | 1.50   | 2.00   | 1.80   | 2.60   | 1.30   | 2.30   | 1.60   | 1.90   | 0.90   |
| Ba(10 <sup>-6</sup> )              | 573.00 | 504.00 | 732.00 | 705.00 | 234.00 | 386.00 | 474.00 | 289.00 | 319.00 | 280.00 |
| Ce(10 <sup>-6</sup> )              | 72.20  | 43.80  | 53.60  | 48.80  | 60.40  | 42.60  | 25.00  | 52.80  | 23.40  | 40.80  |
| Sum(%)                             | 82.60  | 73.12  | 67.85  | 66.73  | 77.68  | 54.95  | 78.26  | 75.57  | 68.45  | 67.25  |

表 3 Corrections used for ED-XRF calibration ED-XRF 标准值校正

Table 3 Corrections used for ED-XRF calibration

| 元素 | 峰能  | 偏移量和二次修正 | α 校正(强度修正) | 标准值省略校正      | 标准偏差                |
|----|-----|----------|------------|--------------|---------------------|
| Al | Ka1 | On; Off  | P, Mn, Rb  | W4-15; W1-23 | 0.076 1%            |
| Si | Ka1 | Off; On  | P, Rb, Pb  | W3-14;       | 0.256 0%            |
| P  | Ka1 | Off; On  | Sr, Ba     | 0            | 0.005 0%            |
| K  | Ka1 | On; Off  | Ca, Ti,    | 0            | 0.027 2%            |
| Ca | Ka1 | On; On   | Al, Si, K  | 0            | 0.117 0%            |
| Ti | Ka1 | On; On   | P, Mn      | W3-9         | 0.003 4%            |
| Mn | Ka1 | Off; Off | Al, Ca, Rh | W1-3         | 28×10 <sup>-6</sup> |
| Fe | Ka1 | On; On   | P, Ca      | 0            | 0.035 4%            |
| Cr | Ka1 | Off; Off | Si, P, Ca  | 0            | 3×10 <sup>-6</sup>  |
| V  | Ka1 | On; On   | Al, P      | W1-3; W2-19  | 10 <sup>-6</sup>    |
| Co | Ka1 | On; Off  | Ti, Mo     | 0            | 10 <sup>-6</sup>    |
| Ni | Ka1 | Off; On  | V, Fe, W   | 0            | 10 <sup>-6</sup>    |
| Cu | Ka1 | Off; Off | Si, Ca, Ba | 0            | 10 <sup>-6</sup>    |
| Zn | Ka1 | On; Off  | P          | W2-13; W4-13 | 10 <sup>-6</sup>    |
| Rb | Ka1 | On; Off  | P, V, Nb   | 0            | 10 <sup>-6</sup>    |
| Sr | Ka1 | On; On   | Al, Si,    | 0            | 16×10 <sup>-6</sup> |
| Y  | Ka1 | On; On   | Al, Ba     | 0            | 0                   |
| Zr | Ka1 | On; Off  | Si, P, Mn  | W3-14; W5-20 | 10 <sup>-6</sup>    |
| Nb | Ka1 | On; Off  | P, Rb      | 0            | 0                   |
| Mo | Ka1 | Off; Off | Al, P, Ca  | W5-12;       | 0                   |
| Ba | Ka1 | On; On   | Al, Cr, Pb | W1-5; W2-17  | 36×10 <sup>-6</sup> |
| Ce | Ka1 | Off; Off | P, Ce,     | 0            | 10 <sup>-6</sup>    |
| W  | Ka1 | On; On   | P, V, Fe   | W3-6; W1-12  | 0                   |
| Pb | Ka1 | On; Off  | P, Cr, Zn  | 0            | 0                   |

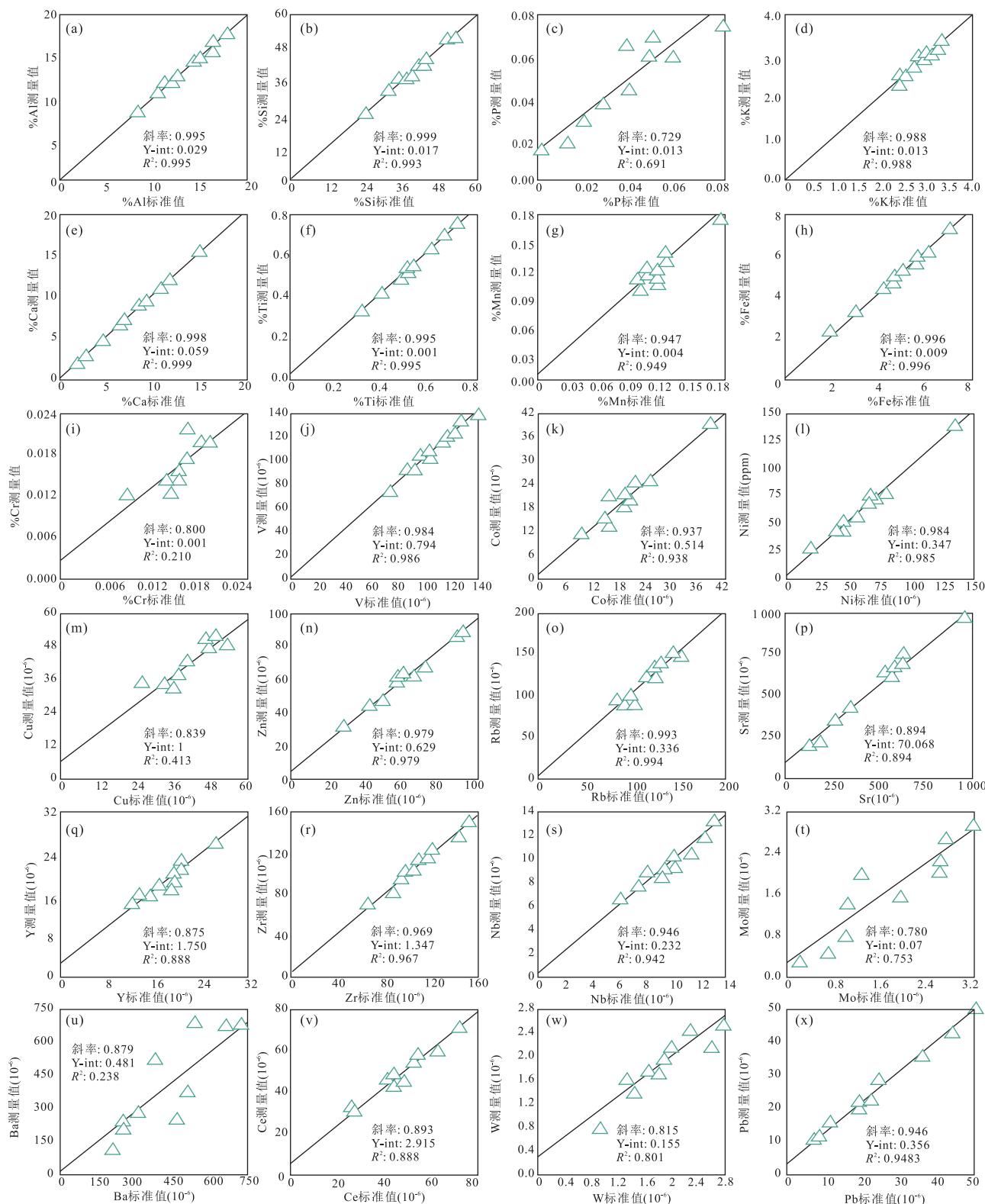


图 5 手持 X 射线衍射仪测量各种元素的标准值与测量值

Fig.5 Accepted (acc) versus measured (meas) values for elements analyzed by ED-XRF  
基于 Bruker AXS 的校准软件(SPECTRAEDX S2 CONFIGURATION),校准值见表 3

(图 5j,5k,5i,5n,5o,5r,5s,5x).5 种微量元素的斜率在 0.83 与 0.93 之间(Cu,Sr,Y,Ba 和 Ce),这些

元素的校正曲线  $R^2$  值较低,数据点围绕校正曲线不够紧密,说明针对这些元素还需要更多的标准样

表 4 元素比值与天文周期的比例关系  
Table 4 The proportion of element ratios and astronomical cycle

| K/Al    | Ca/Al   | Si/Al   | Fe/Al   | Ti/Al   | Mn/Al   | Ni/Al   | Zn/Al   | Pb/Al   |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 19.21 m | 19.30 m | 19.30 m | 81.30 m | 19.21 m | 81.23 m | 81.30 m | 81.30 m | 81.30 m |
| 10.22 m | 6.47 m  | 7.35 m  | 9.17 m  | 12.01 m | 10.87 m | 19.21 m | 19.29 m | 19.30 m |
| 7.14 m  | 4.30 m  | 6.29 m  | 7.36 m  | 7.35 m  | 7.35 m  | 8.33 m  | 8.33 m  | 7.35 m  |
| 6.35 m  |         | 4.43 m  | 4.72 m  | 5.70 m  | 5.13 m  | 4.21 m  | 7.35 m  |         |
| 4.28 m  |         |         | 3.67 m  | 3.87 m  | 4.05 m  |         |         |         |

去支撑对能量与元素浓度之间对应关系的计算(图 5i,5m,5p,5q,5u,5v).元素 Mo 的校正曲线斜率只有 0.78,以及 Cr 和 W 的校正曲线斜率都在 0.83 以下,这些元素通过手持 X 射线衍射仪的测定,并不能准确反应其元素浓度,推测原因来自仪器本身的常规偏差以及其他技术问题.不同微量元素在 ED-XRF 的测试结果差异明显.一般情况下,针对质量小于 Na、Mg 的元素来说,ED-XRF 的测试性能表现良好.V,Co,Ni,Zn,Rb,Zr,Nb,Pb 元素表现非常好( $R^2 > 0.9$ , $0.93 <$ 斜率 $< 1.00$ );Sr,Y,W,Ce,Mo 元素表现良好( $0.7 < R^2 < 0.9$ , $0.83 <$ 斜率 $< 0.93$ ),这些元素测试值耦合度较好,可信度较高,所以可以被运用至地质应用;Cr,Cu,Ba 元素表现一般( $R^2 < 0.5$ , $0.7 <$ 斜率 $< 0.9$ ),将不考虑本次地质应用.

### 3.2 在旋回地层学中的应用

基于对高频旋回地层的定量描述理论基础,在沉积地层中记录的重复信号是由已知天文周期所控制的(Strasser *et al.*, 2006).在旋回地层学研究中,地球化学特征为一项重要替代指标,能够间接反映地球轨道参数(偏心率、斜率、岁差)对沉积序列的响应.在该项研究中,通过频谱分析,实现对地球化学元素浓度的快速傅立叶变换(FFT).即将一系列看似杂乱无章的波动信号(地球化学曲线),考虑成一个由一系列具有固定周期、频率的简谐波信号组合、叠加而成.并将这些固有周期的简谐波逐一分离出来,并找出其中振幅较大(能量较高)的简谐信号周期.本文选定与气候变化关联紧密的元素参与旋回地层研究(Arthur and Dean, 1991),并且这些元素在 3.1 的分析中被验证均具有较好的测试精度.

以酒泉盆地青西凹陷下沟组 W2 井的 41 个样品为例,W2 井位于青西盆地湖盆中央区域,从岩心沉积相上分析可知南部祁连山物源的补给能力有限,W2 地区主要处于受气候影响为主的安静稳定沉积环境中(周勇, 2011; 彭楠, 2013; 李婷婷等, 2015; 金思丁, 2016).对于 W2 井 41 个样品,先采用插值法将样品间隔调整为 0.25 m(用于提高 FFT 结

果的精准度),继而通过 Past 3 软件的频谱分析模块实现对地球化学数据的快速傅立叶变换.在使用 ED-XRF 对岩石样品进行分析中,将元素强度的比值而非元素强度作为古气候与古环境变化研究所运用的替代指标,由于直接用元素强度的比值变化作为指示因子,减少了由于其他元素的稀释所造成元素含量误差的影响,提高了数据结果的准确性(Sorrel *et al.*, 2007).Al 等元素的变化可以反应物源区化学风化作用的强弱,Al 对化学风化中的淋滤有抵制作用,所以其会富集于侵蚀产物中.因此物源区化学风化作用的增强会导致输入到海洋系统中的 Al 增加,陆地系统的化学风化作用强弱在很大程度上受控于湿度和温度,潮湿且炎热的气候会导致化学风化作用的增强.Al 大都存在于由风或河流搬运的粘土矿物之中,在海洋系统中含量很低.Al 对化学风化中的淋滤有抵制作用,所以其会富集于侵蚀产物中(吕凤琳, 2014; 房强, 2015),故选择 Al 为稳定元素,计算各元素浓度与 Al 的比值.元素浓度通过每个元素与 Al 的比值归一化,最后用于频谱分析的数据分别为 K/Al, Ca/Al, Si/Al, Fe/Al, Ti/Al, Mn/Al, Ni/Al, Zn/Al 和 Pb/Al 的比值(图 6).识别出大量具强振幅的频率(频率的倒数代表地层厚度),其中振幅越强,周期性越明显.

其中,例如 19.21 m 与 19.30 m, 7.14 m 与 7.36 m, 4.05 m 与 4.21 m 可以被解释为具有同一周期的地层厚度.通过计算可知,不同元素在频谱分析后可以得到类似的振幅能量及旋回周期,因此,地球化学数据良好的记录了沉积时期地层中保存的周期信息.

通过对地层厚度之间的比值,与天文轨道要素的周期比值的对比,可以判断该沉积地层是否受到天文轨道旋回的影响(Mayer and Appel, 1999; Weedon, 2003).由于地月系统围绕太阳公转及地月相互作用的影响,地球轨道要素在对地球造成影响的同时,自身也时刻发生着变化.本文采用 Laskar *et al.*(2004)提出的 La(2004)解决方案,综合考虑

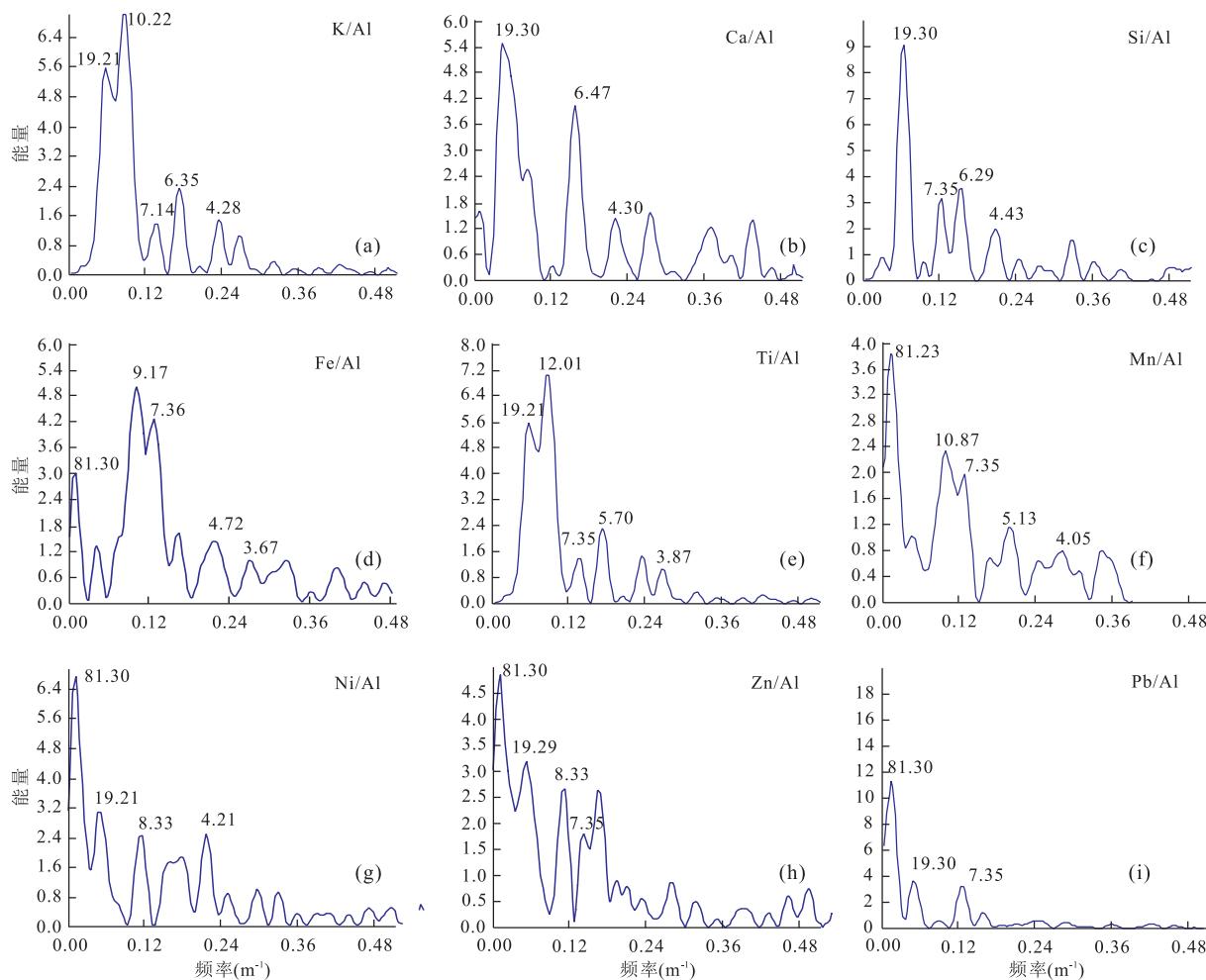


图 6 W2 井下沟组一段地化数据快速傅里叶变换

Fig.6 Fast Fourier Transformation (FFT) spectrum for the geochemical data in Member 1 of the Xiagou Formation in Well W2, the Qingxi Sag, Jiuquan Basin

了各种影响因素,用于计算北纬 40°(酒泉盆地)(金思丁,2016)115~120 Ma(下沟组沉积年龄)期间的偏心率、斜率与岁差变化的理论值,采样间隔为 1 ka. 得到的参数的周期分别为:长偏心率 400 ka, 短偏心率 124 ka 与 95 ka, 斜率 47 ka、37 ka、29 ka 及岁差 22 ka、20Vka、18 ka. 为了确定所观察到的沉积旋回厚度是否受天文周期的影响,我们将相关比例关系与旋回厚度之间的比例关系做对比后,发现:地球化学数据经过频谱分析得到的 4 个稳定的峰值分别为 81 : 9 : 7 : 4, 比值为 20.25 : 4.75 : 1.75 : 1.00, 与 400 ka : 95 ka : 37 ka : 20 ka (20.00 : 4.74 : 1.85 : 1.00) 十分接近. 因此,我们判断酒泉盆地青西凹陷下沟组 W2 井沉积地层受控于米兰科维奇旋回, 主要受长偏心率 400 ka, 短偏心率 95 ka, 斜率 37 ka 及岁差 20 ka 周期的影响.

针对以 W2 井主量元素、微量元素为替代指标的

旋回地层分析,可以看出天文周期强烈地影响着青西盆地早白垩世时期的气候和环境. 下沟组地层中主要的主量元素是  $\text{SiO}_2$ , 其含量也处在很高的水平上, 但是下沟组地层中  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  含量较低, 这些元素的含量均受沉积环境、陆源碎屑和成岩作用的影响, 微量元素可以用于分析氧化还原反应从而分析重建古环境(Lerman, 1989).

## 4 结论

(1) ED-XRF 在旋回地层学研究中的应用, 提供了定量分析沉积物地球化学特征的有效手段. 而地球化学数据作为旋回地层学研究中的重要替代指标, 对气候变化有良好的响应.

(2) 以酒泉盆地青西凹陷早白垩世下沟组 W2 井的地球化学元素为替代指标, 计算出酒泉盆地中

发育不同旋回厚度及其与米兰科维奇旋回中偏心率、斜率、岁差周期的对应关系,证明酒泉盆地中存在的米氏旋回沉积记录,以及地层的旋回特征主要受气候因素的控制。

**致谢:**感谢中石油玉门油田分公司提供的相关资料,奥地利维也纳大学沉积与动力学系 Michael Wagreich 教授对 ED-XRF 仪器使用的指导。感谢成都理工大学能源学院金思丁老师在实验上的帮助。感谢匿名审稿老师对文章的审阅。

## References

- Arthur, M.A., Dean, W.E., 1991. A Holistic Geochemical Approach to Cyclomania: Examples from Cretaceous Pelagic Limestone Sequences. *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer, Berlin, 126–166.
- Binstock, D. A., Gutknecht, W. F., McWilliams, A. C., 2008. Lead in Soil by Field-Portable X-ray Fluorescence Spectrometry—An Examination of Paired in Situ and Laboratory ICP-AES Results. *Remediation Journal*, 18(3): 55–61. doi:10.1002/rem.20171
- Burn, B.A.B., Hel, P.L., 1997. Fluvial Response in a Sequence Stratigraphic Framework: Example from the Montserrat Fan Delta, Spain. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 67 (2): 311 – 320. doi: 10.1306/d426855e-2b26-11d7-8648000102c1865d
- Chen, J. H., Komatsu, T., Meizhen Cao, et al., 2006. Kumamotoa, an Early Late Cretaceous Non-Marine Bivalve, from Fujian, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(6): 943–951. doi:10.1016/j.jseae.2005.10.002
- Chen, S., Wang, H., Wei, J., et al., 2014. Sedimentation of the Lower Cretaceous Xiagou Formation and its Response to Regional Tectonics in the Qingxi Sag, Jiuquan Basin, NW China. *Cretaceous Research*, 47: 72 – 86. doi: 10.1016/j.cretres.2013.11.006
- Chen, W.F., Chen, P.R., Xu, X.S., et al., 2005. Geochemical Characteristics of Cretaceous Basaltic Rocks in South China and Constraints on Pacific Plate Subduction. *Science in China : Series D*, 35(11): 1007 – 1018 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.P., Huang, D.F., 1996. Formation and Mechanism of the Abnormal Pressure Zone and Its Relation to Oil and Gas Accumulations in the Eastern Jiuquan Basin, Northwest China. *Science in China Series D*, 39 (2): 194 – 204 (in Chinese with English abstract).
- Deng, S.H., Lu, Y.Z., 2008. Fossil Plants from Lower Cretaceous of the Jiuquan Basin, Gansu, Northwest China and their Palaeoclimatic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 82(1):104 – 114 (in Chinese with English abstract).
- Deng, S.H., Yang, X.J., Lu, Y.Z., 2005. Pseudofrenelopsis (Cheirolepidiaceae) from the Lower Cretaceous of Jiuquan, Gansu, Northwestern China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 44 (4):505 – 516 (in Chinese with English abstract).
- Fang, Q., 2015. Milankovitch Cycles from South China and the Environmental Responds at the End of the Late Paleozoic Ice Age (Dissertation). China University of Geosciences (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Fitton, G., 1997. X-ray Fluorescence Spectrometry. In: Gill, R., ed., *Modern Analytical Geochemistry*. Addison Wesley Longman, 329.
- Hall, G.E.M., Bonham-Carter, G.F., Buchar, A., 2014. Evaluation of Portable X-Ray Fluorescence (pXRF) in Exploration and Mining: Phase 1, Control Reference Materials. *Geochemistry : Exploration , Environment , Analysis*, 14(2):99 – 123. doi:10.1144/geochem2013-241
- Harvey, P. K., 1983. Principles of Quantitative X-Ray Fluorescence Analysis. *Mineralogical Magazine*, 47 (345): 571 – 571. doi:10.1180/minmag.1983.047.345.25
- Hu, Y.X., Xu, D.L., 2005. Early Cretaceous Ostracods from the Xiagou Formation in Xiagou, Gansu Province. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 22(2):173 – 184 (in Chinese with English abstract).
- Jansen, J.H.F., van der Gaast, S.J.V.D., Koster, B., et al., 1998. CORTEX, a Shipboard XRF-Scanner for Element Analyses in Split Sediment Cores. *Marine Geology*, 151 (1 – 4): 143 – 153. doi:10.1016/s0025-3227(98)00074-7
- Jin, S.D., Wang, H., Chen, S., et al., 2013. Control of Anticline Crest Zone on Depositional System and its Geological Significance for Petroleum in Changshaling, Yinger Sag, Eastern Jiuquan Basin. *Journal of Earth Science*, 24(6):947 – 961. doi:10.1007/s12583-013-0388-0
- Jin, S.D., 2016. Recognition of Cyclostratigraphy and Discussion of the Genetic Mechanism of Xiagou Formation in Early Cretaceous, Jiuquan Basin, West of China (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Jones, M. C., Williams-Thorpe, O., Potts, P. J., et al., 2005. Using Field-Portable XRF to Assess Geochemical Variations within and between Dolerite Outcrops of Preseli, South Wales. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(3):251 – 269. doi:10.1111/j.1751-908x.2005.tb00899.x
- Kuang, H.W., Liu, Y.Q., Liu, Y.X., et al., 2013. Stratigraphy and Depositional Palaeogeography of the Early Cretaceous Basins in Da Hinggan Mountains-Mongolia Oro-

- genic Belt and Its Neighboring Areas. *Geological Bulletin of China*, 32(7):1063—1084 (in Chinese with English abstract).
- Kujau, A., Nürnberg, D., Zielhofer, C., et al., 2010. Mississippi River Discharge over the last ~560 000 years—Indications from X-Ray Fluorescence Core-Scanning. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 298 (3—4):311—318.doi:10.1016/j.palaeo.2010.10.005
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A Long-Term Numerical Solution for the Insolation Quantities Of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1):261—285. doi:10.1051/0004-6361:20041335
- Lerman, A., 1989. Lakes: Chemistry, Geology, Physics. Geological Press, Beijing, 10—100.
- Li, H.B., Yang, J.S., Xu, Z.Q., et al., 2006. The Constraint of the Altyn Tagh Fault System to the Growth and Rise of the Northern Tibetan Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13(4):59—79 (in Chinese with English abstract).
- Li, T.T., Zhu, R.K., Bai, B., et al., 2015. Characteristics and Research Significance of Fine Lacustrine Sedimentary Rock Laminations of Xiagou Formation in Qingxi Depression of Jiuquan Basin. *China Petroleum Exploration*, 20(1):38—47 (in Chinese with English abstract).
- Li, T.T., Zhu, R.K., Bai, B., et al., 2015. Characteristics and Research Significance of Fine Lacustrine Sedimentary Rock Laminations of Xiagou Formation in Qingxi Depression of Jiuquan Basin. *China Petroleum Exploration*, 20(1):38—47.
- Li, X.H., Xu, W.L., Liu, W.H., et al., 2013. Climatic and Environmental Indications of Carbon and Oxygen Isotopes from the Lower Cretaceous Calcrete and Lacustrine Carbonates in Southeast and Northwest China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 171—189.doi:10.1016/j.palaeo.2013.03.011
- Luo, P., Yang, S.S., Ma, L., et al., 2001. Origin, Feature and its Significance to the Petroleum Exploration of the Clay-Size Plagioclase in Lacustrine Laminated Argillaceous Dolomite, Qingxi Depression in Jiuxi Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 28(6):32—33 (in Chinese with English abstract).
- Lü, F.L., 2014. Evolution of Depositional Environment Since Early Pleistocene in Lop Nor, Xinjiang, China and Its Geological Significance (Dissertation). China University of Geosciences (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q.H., Lin, Q.B., Ye, C.H., et al., 1982. Division and Correlation of the Xinminpu Formation in the Jiuxi Basin, Gansu. *Journal of Stratigraphy*, 2:255—270 (in Chinese with English abstract).
- Mayer, H., Appel, E., 1999. Milankovitch Cyclicity and Rock-Magnetic Signatures of Palaeoclimatic Change in the Early Cretaceous Biancone Formation of the Southern Alps, Italy. *Cretaceous Research*, 20(2):189—214. doi:10.1006/cres.1999.0145
- Niu, S.W., 1987. Late Mesozoic Stratigraphy in the Jiuquan Basin, Gansu. *Journal of Stratigraphy*, 11:1—22 (in Chinese with English abstract).
- Olsen, P. E., Kent, D. V., Cornet, B., et al., 1996. High-Resolution Stratigraphy of the Newark Rift Basin (Early Mesozoic, Eastern North America). *Geological Society of America Bulletin*, 108(1):40—77. doi:10.1130/0016-7606(1996)108<0040:hrsotn>2.3.co;2
- Pan, L.Y., Xie, J.L., Li, M.J., et al., 2006. Cretaceous-Cenozoic Regional Tectonic Evolution in Jiuquan Basin and Petroleum Exploration. *Oil & Gas Geology*, 27(1): 62—69 (in Chinese with English abstract).
- Peng, N., 2013. Basin Analysis and Paleogeography in North Qilian Mountain to Beishan Area, Early Cretaceous (Dissertation). China University of Geosciences (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Potts, P.J., Webb, P.C., Williams-Thorpe, O., et al., 1995. Analysis of Silicate Rocks Using Field-Portable X-Ray Fluorescence Instrumentation Incorporating a Mercury (II) Iodide Detector: A Preliminary Assessment of Analytical Performance. *The Analyst*, 120(5):1273.doi:10.1039/an9952001273
- Richter, T.O., van der Gaast, S.V.D., Koster, B., et al., 2006. The Avaatech XRF Core Scanner: Technical Description and Applications to NE Atlantic Sediments. *Geological Society, London, Special Publications*, 267(1):39—50. doi:10.1144/gsl.sp.2006.267.01.03
- Rimmer, S. M., 2004. Geochemical Paleoredox Indicators in Devonian-Mississippian Black Shales, Central Appalachian Basin (USA). *Chemical Geology*, 206 (3—4): 373—391.doi:10.1016/j.chemgeo.2003.12.029
- Rousseau, R.M., 2001. Detection Limit and Estimate of Uncertainty of Analytical XRF Results. *The Rigaku Journal*, 18(18):33—47.
- Rowe, H., Hughes, N., Robinson, K., 2012. The Quantification and Application of Handheld Energy-Dispersive X-

- Ray Fluorescence (ED-XRF) in Mudrock Chemos-tratigraphy and Geochemistry. *Chemical Geology*, 324—325:122—131.doi:10.1016/j.chemgeo.2011.12.023
- Shi, R.P., Zhu, R.X., 2002. Possible Links Between Abnormal Geological Events and Geodynamics During Cretaceous. *Progress in Geophysics*, 17(2):295—300 (in Chinese with English abstract).
- Sorrel, P., Oberhänsli, H., Boroffka, N., et al., 2007. Control of Wind Strength and Frequency in the Aral Sea Basin during the Late Holocene. *Quaternary Research*, 67(3): 371—382.doi:10.1016/j.yqres.2006.12.003
- Strasser, A., Hilgen, F.J., Heckel, P.H., 2006. Cyclostratigraphy-Concepts, Definitions, and Applications. *Newsletters on Stratigraphy*, 42(2): 75—114.doi: 10.1127/0078-0421/2006/0042-0075
- Tung, J.W.T., 2004. Determination of Metal Components in Marine Sediments Using Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (ED-XRF) Spectrometry. *Annali Di Chimica*, 94(11):837—846.doi:10.1002/adic.200490104
- Vanhooft, C., Corthouts, V., Tirez, K., 2004. Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Systems as Analytical Tool for Assessment of Contaminated Soils. *Journal of Environmental Monitoring*, 6(4):344.doi:10.1039/b312781h
- Wang, G.D., Cheng, R.H., Wang, P.J., et al., 2015. High Resolution Continuous Sedimentary Records of Upper Cretaceous Obtained from the Continental Drilling (SK-1) Borehole in Songliao Basin; Sifangtai and Mingshui Formations. *Geoscience Frontiers*, 6(6):895—912.doi: 10.1016/j.gsf.2015.02.003
- Wang, T. T., Ramezani, J., Wang, C. S., et al., 2016. High-Precision U-Pb Geochronologic Constraints on the Late Cretaceous Terrestrial Cyclostratigraphy and Geomagnetic Polarity from the Songliao Basin, Northeast China. *Earth and Planetary Science Letters*, 446:37—44.doi: 10.1016/j.epsl.2016.04.007
- Wang, J., Wang, H., Chen, S., et al., 2012. Control of Palaeogeomorphology on Sedimentary System Distribution: An Example from Qingxi Depression, Jiuquan Basin. *Marine Geology Frontiers*, 28:25—33 (in Chinese with English abstract).
- Weedon, G., 2003. Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy: Examining Stratigraphic Records of Environmental Cycles. *Choice Reviews Online*, 41(2):41—0952—41—0952.doi:10.5860/choice.41-0952
- Wen, H.G., Zheng, R.C., Wu, G.X., et al., 2009. Characteristics of Strontium Isotopic Geochemistry of Sub-lacustrine Hydrothermal Sedimentary Rock of Xiagou Formation in Qingxi Sag, Jiuquan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(4):642—649 (in Chinese with English abstract).
- Wen, H.G., Zheng, R.C., Ye, T.R., et al., 2005. Sedimentary Characteristics of the Lower Cretaceous Strata and Prediction of the Favourable Exploration Areas in the Qingxi Depression, Jiuxi Basin, Gansu. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(4):71—77 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H.C., Zhang, S.H., Hinnov, L.A., et al., 2014. Cyclostratigraphy and Orbital Tuning of the Terrestrial Upper Santonian-Lower Danian in Songliao Basin, Northeastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 407: 82—95.doi:10.1016/j.epsl.2014.09.038
- Wu, H.C., Zhang, S.H., Jiang, G.Q., et al., 2013. Astrochronology of the Early Turonian—Early Campanian Terrestrial Succession in the Songliao Basin, Northeastern China and its Implication for Long-Period Behavior of the Solar System. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 55—70.doi: 10.1016/j.palaeo.2012.09.004
- Zeng, X.B., Zhang, J.H., Jin, H., et al., 2001. New Opinions on Oil and Gas Generation and Exploration in Jiuxi Basin (I)—Basic Petroleum and Geological Condition and Oil-Generating Potential. *Petroleum Exploration and Development*, 28(1):19—22 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., 2011. Early Cretaceous Paleoclimate in Jiuquan Basin and Liupanshan Basin, Northwestern China (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈建平,黄第藩,霍永录,等,1996.酒东盆地异常流体压力带及与油气分布的关系.中国科学:D辑:地球科学,(1):9—15.
- 陈卫锋,陈培荣,徐夕生,等,2005.华南白垩纪玄武质岩石的地球化学特征及其对太平洋板块俯冲作用的制约.中国科学 D 辑,35(11):1007—1018.
- 邓胜徽,卢远征,2008.甘肃酒泉盆地早白垩世植物化石及其古气候意义.地质学报,82(1):104—114.
- 邓胜徽,杨小菊,卢远征,2005.甘肃酒泉盆地下白垩统 Pseudofrenelopsis(掌鳞杉科)的发现及其意义.古生物学报,44(4):505—516.
- 房强,2015.晚古生代冰期末期米兰科维奇旋回在华南的记录及环境响应(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 胡艳霞,徐东来,2005.甘肃玉门下沟地区早白垩世下沟组介形类.微体古生物学报,22(2):173—184.
- 金思丁,2016.酒泉盆地白垩系下沟组旋回地层识别及成因

- 机制探讨(博士学位论文).武汉:中国地质大学(武汉).  
旷红伟,柳永清,刘燕学,等,2013.兴蒙造山区及邻区早白垩世盆地岩石地层格架与沉积古地理演化.地质通报,32(7):1063—1084.
- 李海兵,杨经绥,许志琴,等,2006.阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约.地学前缘,13(4):59—79.
- 李婷婷,朱如凯,白斌,等,2015.酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相细粒沉积岩纹层特征及研究意义.中国石油勘探,20(1):38—47.
- 罗平,杨式升,马龙,等,2001.酒西盆地青西坳陷湖相纹层状泥质白云岩中泥级斜长石成因、特征与油气勘探意义.石油勘探与开发,28(6):32—33.
- 吕凤琳,2014.罗布泊早更新世以来沉积环境演变及其地质意义(硕士学位论文).北京:中国地质大学(北京).
- 马其鸿,林启彬,叶春辉,等,1984.甘肃酒泉盆地西部新民堡群的划分和对比.地层学杂志,8(4):255—270.
- 牛绍武,1987.甘肃酒泉盆地晚期中生代地层.地层学杂志,11(1):1—22.
- 潘良云,谢结来,李明杰,等,2006.酒泉盆地白垩纪—新生代区域构造演化与油气勘探.石油与天然气地质,27(1):62—69.
- 彭楠,2013.祁连—北山地区早白垩世沉积盆地分析及古地理特征(硕士学位论文).北京:中国地质大学(北京).  
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.
- 史瑞萍,朱日祥,2002.白垩纪地球物理场异常与地球深部动力学.中国科学院地质与地球物理研究所.中国科学院地质与地球物理研究所 2002 学术论文摘要汇编.中国科学院地质与地球物理研究所,北京.
- 汪晶,王华,陈思,等,2012.酒泉盆地青西凹陷鸭西地区古地貌对沉积体系空间展布的控制作用.海洋地质前沿,03:25—33.
- 文华国,郑荣才,叶泰然,等,2005.酒西盆地青西凹陷下白垩统沉积特征与有利勘探区预测.沉积与特提斯地质,25(4):71—77.
- 文华国,郑荣才,吴国瑄,等,2009.酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相热水沉积岩锶同位素地球化学特征.沉积学报,27(4):642—649.
- 曾宪斌,张静华,金惠,等,2001.酒西盆地油气形成与勘探方向新认识(一)——基本石油地质条件及生油潜力.石油勘探与开发,28(1):19—22.
- 周勇,2011.西北酒泉和六盘山盆地早白垩世古气候(硕士学位论文).成都:成都理工大学.