

文章编号: 1671-1505(2016)06-1012-18 DOI: 10.7605/gdtxb.2016.06.077

准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统风城组 含碱层段韵律特征及成因*

余宽宏¹ 操应长¹ 邱隆伟¹ 孙沛沛¹ 杨勇强¹ 曲长胜¹ 万 敏²

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000

摘 要 准噶尔盆地玛湖凹陷早二叠世风城组沉积时期为典型的碳酸盐型咸化湖盆, 湖盆咸化过程中析出大量的碱矿(钠碳酸盐类矿物)。通过含碱层段主量元素、碳氧同位素分析, 结合岩心宏观及微观矿物岩石特征, 探讨了含碱层段韵律特征及形成机理。研究层段碱矿与沉凝灰岩互层, 形成明暗相间的咸化韵律。浅色碱矿层质地较纯, 主要为苏打和小苏打, 主量元素表现为 Na_2O 含量高, CaO 、 MgO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 含量低; 暗色层段主要为含斑点状碳钠钙石的沉凝灰岩, 主量元素表现为 Na_2O 含量低, CaO 、 MgO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 含量高。浅色碱矿层和暗色沉凝灰岩段碳氧同位素值均为正, 表明其沉积水体具高盐度特征。浅色含碱层段具有更高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 反映了碱矿层沉积时期强烈蒸发的的气候条件。根据 $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ 值的波动将研究层段划分为炎热干旱和相对湿润的气候条件, 并据此解释不同韵律层盐类矿物形成机理。暗色的沉凝灰岩沉积代表地表流水注入量大于蒸发量, 沉凝灰岩中盐类矿物含量少或者呈斑点状从颗粒间的卤水中析出; 随着蒸发量的增高以及古气候由温暖潮湿转变为干旱炎热, 地表流水注入量急剧减少, 强烈蒸发控制了碱矿的沉积, 形成浅色质地较纯的碱矿层。气候的频繁交替形成了风二段碱矿与沉凝灰岩频繁互层的特征。

关键词 准噶尔盆地 玛湖凹陷 风城组 咸化 碳酸盐矿物 成碱机理

第一作者简介 余宽宏, 男, 1983 年生, 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院讲师, 主要从事沉积学及储集层地质学方面的研究。E-mail: yukuanhong@upc.edu.cn。

中图分类号: P588.24 文献标志码: A

Characteristics of alkaline layer cycles and origin of the Lower Permian Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin

Yu Kuanhong¹ Cao Yingchang¹ Qiu Longwei¹ Sun Peipei¹

Yang Yongqiang¹ Qu Changsheng¹ Wan Min²

1 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong

2 Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2014CB239002), 中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 16CX02030A), 山东省自然科学基金青年基金项目(编号: ZR2014DQ016) 和中国石油大学(华东)科研启动基金项目(编号: 2013004) 联合资助。[Co-funded by National Program on Key Basic Research Project(No. 2014CB239002), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 16CX02030A), Shandong Natural Science Foundation (No. ZR2014DQ016) and Scientific Research Foundation of China University of Petroleum (East China) (No. 2013004)]

收稿日期: 2016-03-09 改回日期: 2016-05-17

Abstract Ancient Mahu lake was a typical carbonate saline lake in the Early Permian where abundant carbonate minerals (mostly with positive ion of sodium) were deposited. Based on the data of major elements, oxygen and carbon isotope, petrology and mineralogy characters of systematic samples of study core section, rhythm characteristics and their mechanism were discussed. The study core section alternated with soda layers and sedimentary tuff layers. Light soda layers are relatively pure nahcolite and sodium, and have major elements characteristics as follows: High content of Na_2O , low content of CaO , MgO , SiO_2 and Al_2O_3 . Dark sedimentary tuff layers developed white spot shaped minerals of shortite, and have major elements characteristics as follows: Lower content of Na_2O , high content of CaO , MgO , SiO_2 and Al_2O_3 . Both soda layers and sedimentary tuff layers have high values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$, which indicate that sedimentary water has high salinity during the depositional period of whole layers. Light soda layers have higher $\delta^{18}\text{O}$ value, which indicate intense evaporation when soda deposited. The study core section can be explained into multiple stages of hot and dry climate and relative humid climate according to the value of $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$. Origin of different carbonate minerals formed in different layers could achieve. Dark layers formed when palaeoclimate was warm and humid that water input was more than water output, and shortite crystallized inter-particles when palaeoclimate transformed into hot and dry. When palaeoclimate transformed into hot and dry, calcium ion and magnesium ran out, nahcolite and baking soda crystallized with strong evaporation. Frequent changes of palaeoclimate have produced saline cycles of soda layers and sedimentary tuff layers.

Key words Junggar Basin, Mahu sag, Fengcheng Formation, salinization, carbonate mineral, alkaline formation mechanism

About the first author Yu Kuanhong, born in 1983, is a lecturer at School of Geosciences, China University of Petroleum (East China). He is engaged in sedimentology and reservoir geology. E-mail: yukuanhong@upc.edu.cn.

1 概述

湖盆沉积水体由于规模小, 导致气候条件、构造活动、盆地的开放与封闭性、周围基岩类型以及流域内水系特征等对湖盆沉积水体介质以及沉积物原始物质的供给具有强烈的控制作用。湖盆沉积水体介质的敏感性造成了沉积物类型的多样性, 并使得在湖盆环境中形成的岩石结构及韵律特征较为复杂。表征湖盆咸化程度的指标最常见的为湖水含盐量。前人按照湖水的绝对含盐量将咸化湖盆沉积水体分为淡水 ($< 0.5 \text{ g/L}$)、次咸水 ($0.5 \sim 3.0 \text{ g/L}$)、低盐度 ($3 \sim 20 \text{ g/L}$)、中盐度 ($20 \sim 50 \text{ g/L}$) 和超盐度 ($> 50 \text{ g/L}$) (王苏民, 1993)。也有学者根据盐度的千分含量分为淡水 ($< 0.5\%$)、半咸水 ($0.5\% \sim 35\%$)、咸水 ($35\% \sim 50\%$) 和盐湖 ($> 50\%$), 后 3 种统称为咸化湖泊 (张永生等, 2003)。不同咸化程度的湖泊, 其盐类矿物的析出量差异较大。另外, 不同的湖水矿物质组成也会控制湖盆的盐类矿物向不同的方向发展, 即不同的卤

水最终会形成不同的盐类矿物。金强等 (2008) 依据湖底沉淀的盐类化学组成和主要蒸发盐类的溶解度, 定义出碳酸盐湖 (湖底有碳酸盐沉积)、硫酸盐湖 (湖底有石膏沉积) 和氯化盐湖 (湖底有石盐沉积)。于志同等 (2012) 依据湖盆不同咸化阶段析出的盐类矿物不同, 将湖盆咸化阶段划分为淡水—微咸水阶段、咸水 (碳酸盐沉积) 阶段、硫酸盐沉积阶段、氯化物沉积阶段。董继和 (1995) 按照盐湖中主要的沉积矿产资源, 将盐湖细分为碱湖、石盐湖、芒硝湖和石盐芒硝湖。

准噶尔盆地玛湖凹陷风城组埋藏深度大, 研究相对滞后, 油气勘探尚未获得重大突破。随着对深层油气勘探开发的关注以及国家对新油气领域的支持, 玛湖凹陷的深层逐渐成为研究的热点。玛湖凹陷风城组是中国至今发现的最古老的碱湖沉积, 碳酸盐矿物为其主要的盐类矿物, 但由于基础研究不足, 早期曾将该碱矿层误认为膏岩层。国内可以类比并且研究程度较高的目前只有江汉盆地 (王国

力等, 2004; 吴世强等, 2013; 杨江海等, 2014)。玛湖凹陷咸化程度高, 盐类矿物以碳酸盐矿物为主, 说明在湖盆的咸化过程中卤水中的 HCO_3^- 阴离子占主导地位 (Eugster, 1980), 并控制了玛湖凹陷卤水的演化方向。但由于玛湖凹陷风城组沉积时期遭受到火山活动的影响, 导致盐类矿物的种类比较复杂 (蒋宜勤等, 2012)。另外, 玛湖凹陷风城组沉积时期, 不同咸化阶段以不同的碳酸盐矿物种类占主导: 在咸化的初期, 主要形成 Ca-Mg 碳酸盐矿物, 即方解石和白云石; 随着咸化程度的增高, 出现镁、钙、钠离子共同组合的碳酸盐矿物, 如碳钠钙石、氯碳钠镁石; 随着镁、钙离子的消耗殆尽, 出现比较纯净的碱矿层, 即以钠离子为主的碳酸盐矿物。风城组大量的云质岩类即是咸化初期阶段的产物, 前人就云质岩的成因及油气勘探意义进行了一定的研究 (注: 新疆油田将二叠系广泛发育的富含白云石的岩石类型统称为云质岩), 并主要集中在白云石的成因以及云质岩的储集性能等方面 (冯有良等, 2011; 匡立春等, 2012; 鲁新川等, 2012; 张杰等, 2012; 王俊怀等, 2014)。但遗憾的是, 针对玛湖凹陷风城组咸化程度更高的含碱层段研究程度非常低, 仅有蒋宜勤等 (2012) 对盐类矿物类型的探讨以及曹剑等 (2015) 对于碱湖烃源岩意义的探讨。目前, 有关玛湖凹陷风城组的盐韵律以及石油地质意义的研究基本处于空白, 因此, 探讨玛湖凹陷风城组沉积时期古代碱湖环境形

成的岩石特征以及沉积韵律特征具有重要的石油地质意义。

文中以玛湖凹陷风南 5 井风城组二段第 1 次取心的 7.28 m 岩心为例, 通过岩心观察、薄片鉴定、主量元素分析、同位素分析等手段, 展开以下研究: (1) 风城组含碱层段不同岩相的矿物组成、含量、分布规律; (2) 玛湖凹陷在早二叠世咸化过程中形成的蒸发矿物的类型、特征及分布控制因素; (3) 含碱韵律层段不同岩相组合的古气候意义; (4) 含碱层段沉积过程解释及模式探讨。

2 地质背景

玛湖凹陷面积近 5000 km^2 , 位于准噶尔盆地西北缘, 紧邻哈拉阿拉特山 (图 1), 是受达尔布特逆冲断裂带控制而形成的典型的前陆盆地。研究区构造上位于中央凹陷带的西北部, 是在拼合增生的微陆块和古生代岛弧带基底上发展起来的复合叠合盆地 (吴孔友等, 2005; 马宗晋等, 2008)。风城组厚达 800~1800 m, 是该凹陷重要的生烃层系, 也是目前致密储集层研究的热点。玛湖凹陷风城组沉积时期, 沉积物质的来源复杂多样, 火山活动、陆源碎屑物质以及湖盆咸化过程中自生盐类矿物的沉淀共同控制了风城组的岩石结构组分特征, 并形成风城组复杂的混积岩。另外, 风城组岩性在平面上的分布具有规律性: 夏子街地区 (夏字号钻井分布地区) 在古地貌上为平台区, 火成岩及火山碎

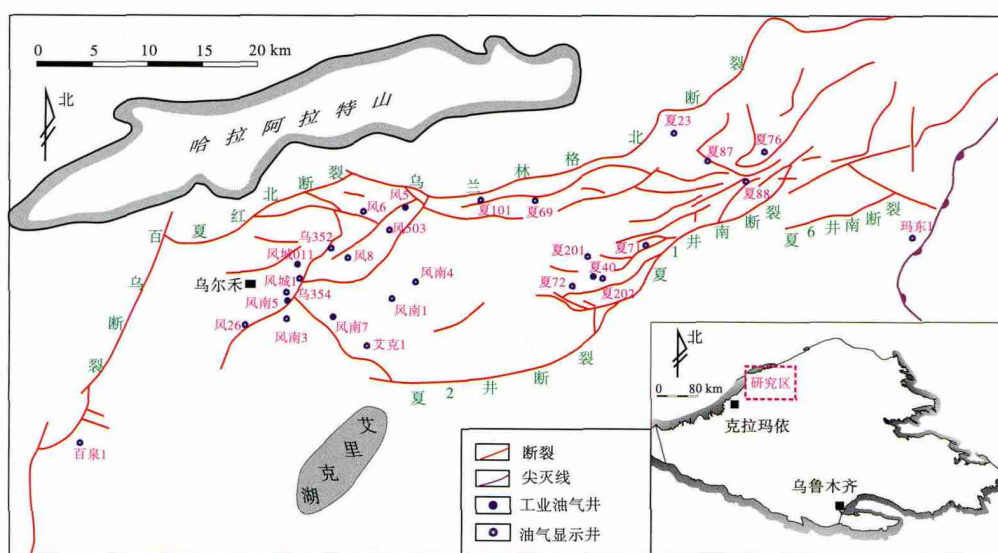


图 1 准噶尔盆地玛湖凹陷构造位置及下二叠统风城组主要钻井分布

Fig. 1 Tectonic location of Mahu sag, Junggur Basin and main wells drilling to the Lower Permian Fengcheng Formation

屑岩发育, 该地区的火山喷发是风城组沉积时期整个玛湖凹陷火山碎屑物质的主要来源; 风南 1 井—风南 7 井代表古地貌斜坡区, 火山活动依然强烈, 岩性以沉凝灰岩为主, 地层中开始出现碱矿; 玛湖凹陷的西部和北部靠近断裂, 是前陆盆地的造山带, 受到大量物源的供给, 沉积粗碎屑岩; 风南 5 井—风南 3 井及以南的区域古地貌上为凹陷区, 发育蒸发岩, 碱矿为代表性的蒸发矿物。

风城组特别是湖盆沉积中心区从下至上可以划分为 3 个岩性段: 风一段沉积时期火山活动明显强烈, 火山碎屑岩发育; 风二段发育碱矿, 以大量层状的碱类矿物与暗色的沉凝灰岩层互层为特征; 风三段沉积时期湖盆沉积水体的盐度降低, 沉积物以 Mg-Ca 碳酸盐矿物为主。风南 5 井位于湖盆深凹陷区, 风城组各段的岩性特征差异较大, 而且测井曲线上易于识别, 特别是风二段碱矿发育层段测井曲

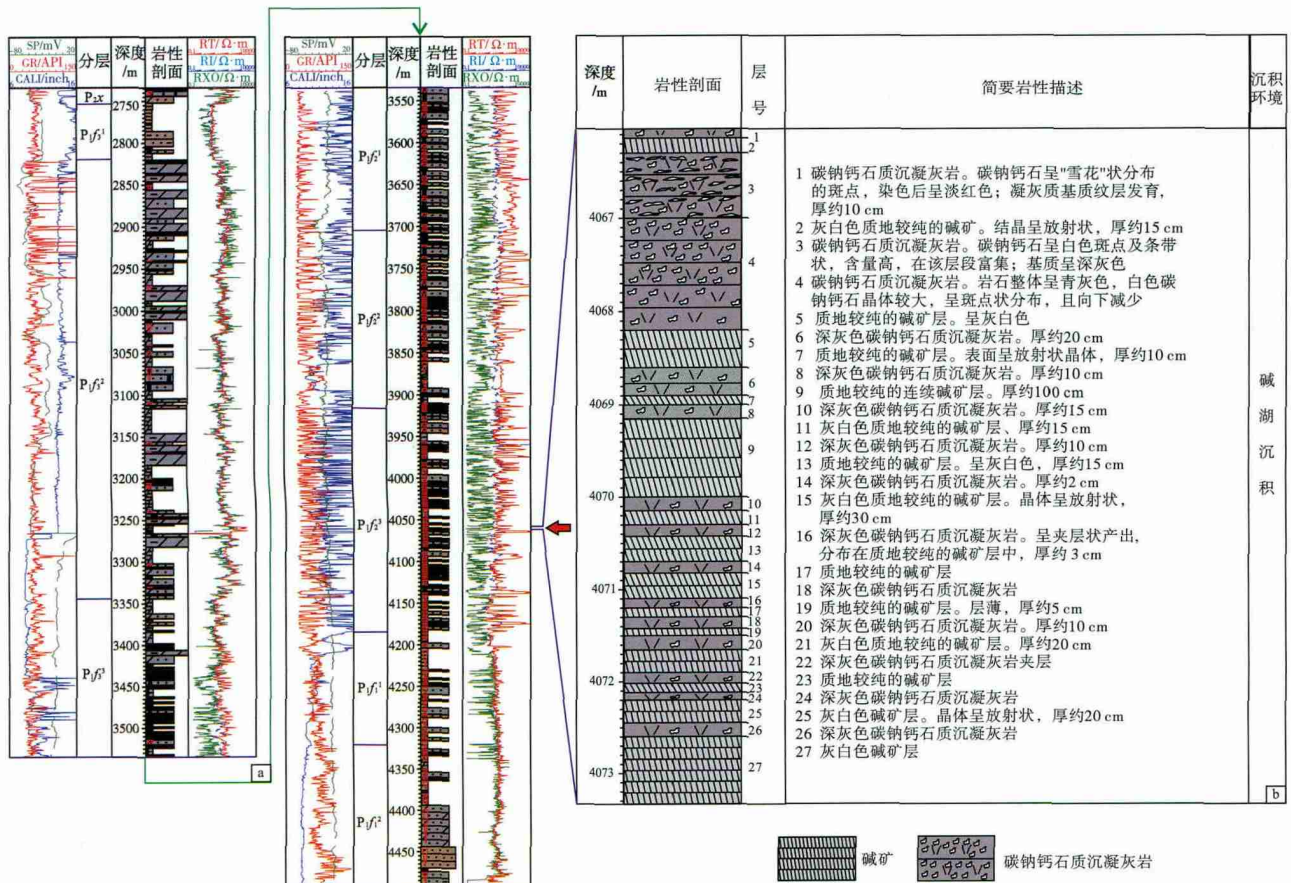
线表现为异常高阻特征(图 2-a)。风南 5 井第 1 次取心段 (4065~4072.28 m, 图 2) 是风城组二段含碱层段典型的代表。风城组的含碱层段并不是大套的纯色碱矿, 而是碱矿与其他岩石类型频繁互层而形成的韵律段, 7.28 m 的岩心垂向上可以划分出 27 个韵律层(图 2-b)。

3 含碱层段岩矿特征

3.1 宏观特征

岩心观察表明, 碱矿层与含碳酸盐矿物的沉凝灰岩层频繁互层, 构成浅色与暗色频繁交互的韵律特征(图 3), 其中浅色碱矿层与暗色沉凝灰岩层在岩心尺度上的宏观特征具有明显的区别。

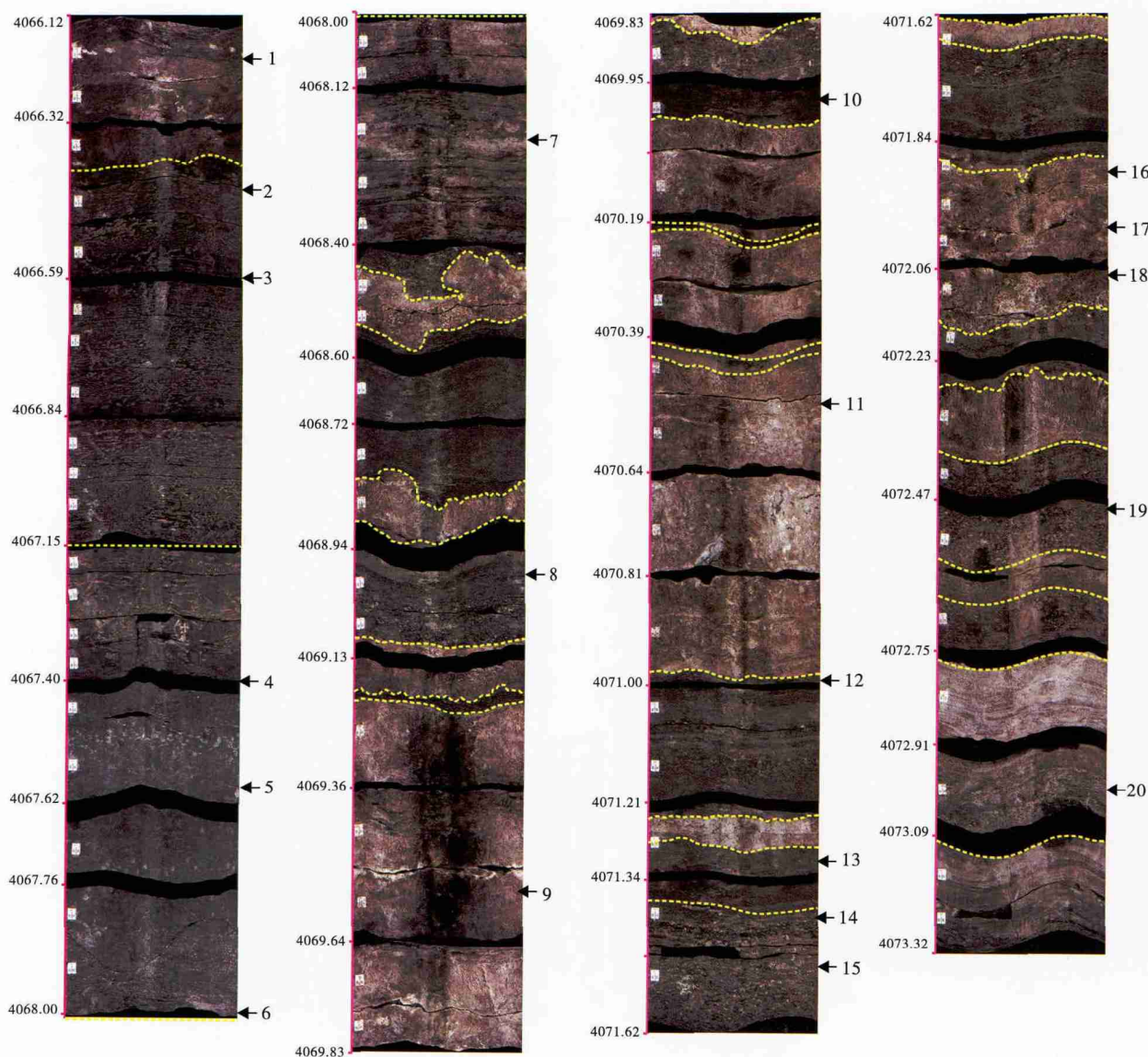
1) 颜色上的差别: 碱矿层颜色比较浅, 多呈肉红色, 内部可有暗色的凝灰质夹层, 但含量很



a—风南 5 井风城组综合柱状图; b—风南 5 井风城组二段典型的含碱层段岩心韵律特征, 表现为浅色碱矿与暗色碳钠钙石质沉凝灰岩频繁互层, 第 1 次取心, 4066.04~4073.32 m

图 2 准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井下二叠统风城组地层划分及取心段韵律特征

Fig. 2 Stratigraphic division of the Lower Permian Fengcheng Formation and rhythm features of core from Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin



注: 黄褐色层为碱层, 暗色层为沉凝灰岩层, 暗色层中的白色斑点主要为碳钠钙石; 序号为样品编号

图3 准噶尔盆地玛湖凹陷风南5井下二叠统风城组取心段岩心扫描图像及岩相组合关系

Fig. 3 Core scanning image and lithofacies association relation of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

低, 呈不连续的线状或者薄透镜状; 含碳酸盐矿物的沉凝灰岩层颜色较暗、为深灰色—灰黑色, 内部碳酸盐矿物呈蝌蚪状、不连续的条带状分布。

2) 矿物纯度方面的差别: 碱矿层比较纯净, 凝灰质含量很低; 而沉凝灰岩层段的盐类矿物呈斑点状分布, 并且白色盐类矿物斑点的产出状态及密度在不同的沉凝灰岩层段也有很大的差异。

3) 碳酸盐矿物的晶体形态差别: 碱矿层中碱矿为钠碳酸盐, 岩心表面可以观察到部分晶体的结晶形态, 如呈放射状或丛状, 表明碱矿的结晶速度

比较缓慢, 且晶体生长具有一定的方向性; 暗色含碳酸盐矿物的沉凝灰岩层段中, 碳酸盐矿物无一定的晶体形态, 表明结晶的速度比较快, 且晶体的析出缺乏方向性, 或者碳酸盐矿物与铝硅酸盐基质的结晶有先后, 前期的矿物颗粒堆积格局限制了后期盐类矿物结晶的空间和形态。

3.2 微观特征

通过岩石薄片观察和扫描电镜资料, 对玛湖凹陷风南5井风城组第1次取心含碱韵律层段的矿物

类型、产出状态、组合关系以及矿物蚀变进行表征。

3.2.1 碱矿层段

浅色碱矿层段的矿物种类相对来说比较简单, 主要为钠碳酸盐矿物, 单偏光下干净透明, 杂质含量比较低(图 4-a)。在钠碳酸盐矿物晶体之间的缝隙中含有少量蚀变后的凝灰质。

3.2.2 沉凝灰岩层段

暗色沉凝灰岩层段矿物类型丰富。其特征可以归纳为以下几个方面:

1) 盐类矿物以碳钠钙石为主。碳钠钙石(宏观岩心上表现为斑点状)的化学式可以表示为 $(\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3)$ 或 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{CaCO}_3$, 其在显微镜下呈不规则的斑块状, 而且染色呈红色(图 4-b), 和方解石具有一样的染色特征。碳钠钙石矿物在中国陆相盆地中并不多见, 可参考文献较少; 国外报道的该矿物以美国绿河盆地为代表(Jagniecki *et al.*, 2013; Smith *et al.*, 2015)。另外, 在研究层段的暗色沉凝灰岩层中, 碳钠钙石的分布极不规则, 白色碳钠钙石分布的范围内部还见有其他细粒石英及铝硅酸盐矿物(图 4-c), 说明碳钠钙石是呈包裹的状态分布在其他细粒沉积物之间的空隙中。在正交光下可见碳钠钙石全消光, 内部含有大量长英质颗粒(图 4-d), 表明孔隙充填分布的碳钠钙石为非晶质状态。

2) 基质的主要矿物成分为长英质颗粒, 黏土含量极低。该层段暗色基质具有纹层状分布的特征, 而且颗粒呈定向排列(图 4-e, 4-f, 4-g, 4-h, 4-i), 说明其具有流水搬运的特征。该暗色基质中黏土矿物含量极低, 单偏光下暗色纹层疑似泥质(图 4-e, 4-f, 4-g, 4-h, 4-i), 但正交光下基本上都为细粒长石和石英等矿物, 表明其是细粒火山灰蚀变后的产物。在加入石膏试板后旋转 90° 相位可见纹层整体的干涉色基本上无变化, 亦说明黏土矿物成分很少(图 4-g, 4-h)(张丽霞和李培俊, 2012)。

3) 暗色层段基质中富含酸性喷出岩岩屑(图 4-j, 4-k), 黏土与火山碎屑蚀变有关。

4) 局部层段黏土矿物含量相对较高, 如镜下见到的碳钠钙石化泥岩, 或者以碳钠钙石为主的泥岩(图 5-a, 5-b, 5-c, 5-d)。这类岩石特征在镜下相对少见。该类岩石单偏光下可见呈网状的黏土,

其间充填的碳钠钙石矿物(图 5-a) 正交光下全消光(图 5-b), 加入石膏试板后旋转载物台可见黏土矿物的干涉色由土黄色转变为绿色(图 5-c, 5-d)。

5) 矿物以碳钠钙石占主导, 可见碱矿(钠碳酸盐)、硬石膏及卤化物, 但含量很低。硬石膏是该层段中常见的盐类矿物, 但未能富集, 呈漂浮状态产出在暗色层段的基质中, 或与碳钠钙石等盐类矿物共生(图 4-l)。也可见碱矿, 如放射状的苏打石集合体(图 5-e, 5-f)、黏土矿物(图 5-g) 以及石盐(图 5-h)。

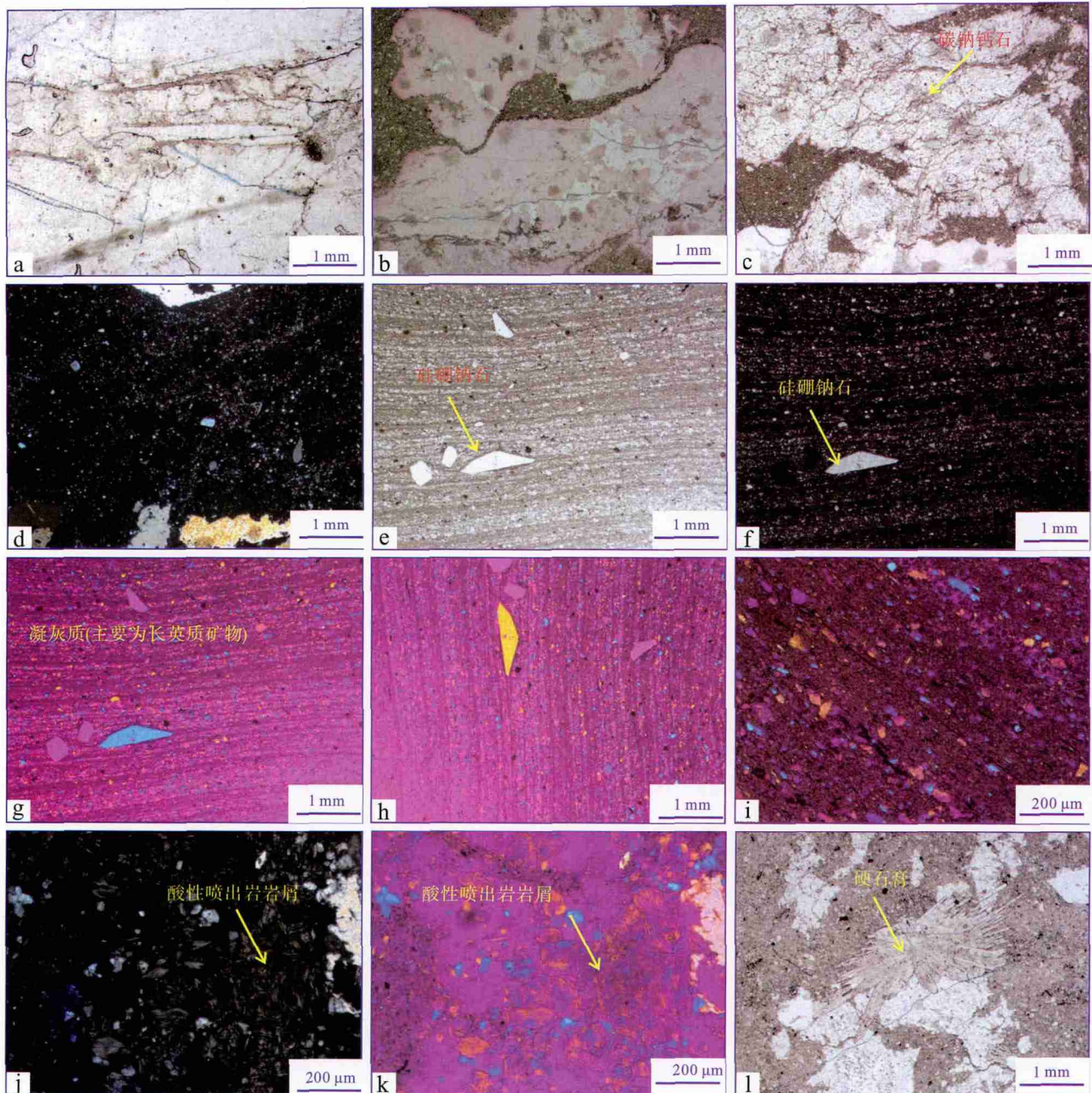
6) 在暗色层段的基质中还能见到呈漂浮状态的硅硼钠石($\text{Na}(\text{BSi}_3\text{O}_8)$) (图 4-e, 4-f, 4-g, 4-h), 其与纹层方向一致, 说明该矿物是从异地搬运而来, 并不代表硅硼钠石形成时期的环境(Mason, 1980)。含碱层段该类矿物的含量较低, 未能富集形成硅硼钠石岩。

总体来说, 风南 5 井含碱层段沉积时期析出的盐类矿物以碳酸盐占绝对主导, 其他盐类矿物含量较低。浅色层段的盐类矿物相对简单, 主要为苏打和小苏打(Na_2CO_3 和 NaHCO_3), 即 Na 碳酸盐矿物; 暗色沉凝灰岩层段以碳钠钙石为主。

4 主量元素的测试与矿物类型

4.1 主要矿物类型

玛湖凹陷风南 5 井风城组含碱韵律层段浅色碱矿层段矿物种类相对简单, 但暗色沉凝灰岩层段详细的矿物种类比较复杂, 为了更准确地识别该暗色层段中的矿物种类及含量, 本次研究选取了 8 块暗色沉凝灰岩层段的样品进行全岩 XRD 分析。检测单位为中核集团核工业北京地质研究院, 仪器为 Panalytical X'Pert PRO MPD。由于矿物种类复杂, 未能对不同矿物的含量进行定量测定, 测定结果仅能反映出主要的矿物种类。检测出来的矿物主要有斜长石、钾长石、碳钠钙石、氯碳钠镁石、钠硼长石(结合其他分析以及研究区的背景判断为硅硼钠石?)、堇青石、黄铁矿、碳氢钠石、黏土矿物以及未检测出来的矿物(表 1)。从矿物在不同样品中的分布来看, 矿物组成中含黏土矿物的样品较少, 基质主要为细粒长石或者石英。盐类矿物有碳钠钙石、氯碳钠镁石、硅硼钠石、苏打石以及少量硬石膏和石盐。在暗色层段, 碳钠钙石为主要的盐类矿物。

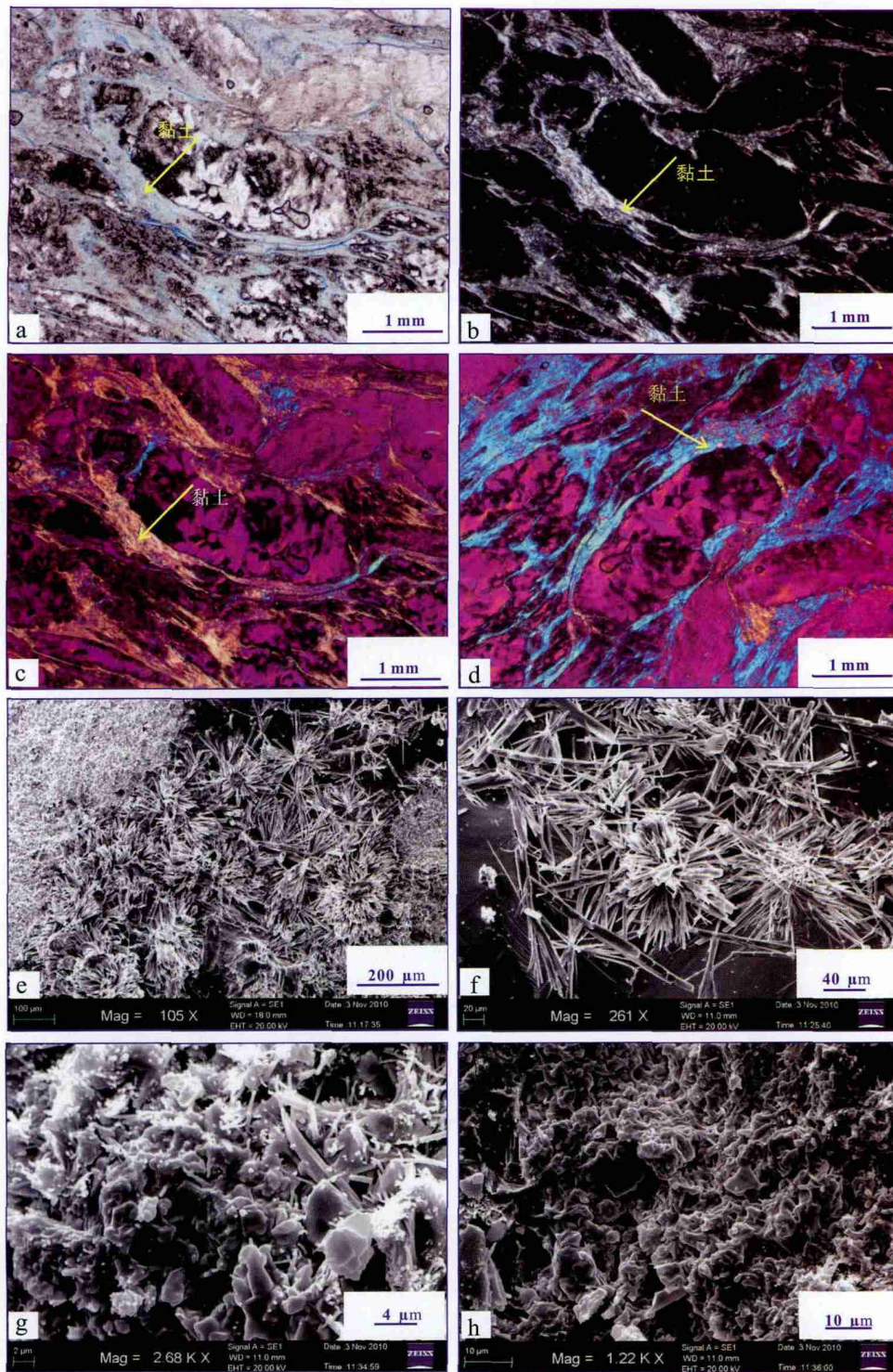


a—碱矿镜下特征，干净透明，晶体的形态较好，单偏光，4069.36 m；b—碳钠钙石质沉凝灰岩，碳钠钙石呈不规则的斑块状分布，染色后呈红色，单偏光，4066.52 m；c—碳钠钙石质沉凝灰岩，碳钠钙石呈不规则分布，内部可见基质（长英质）细粒沉积物，说明碳钠钙石矿物是从细粒沉积物之间的孔隙中蒸发沉淀出来的，单偏光，4066.52 m；d—碳钠钙石质沉凝灰岩，碳钠钙石全消光，为非晶体状态，即该盐类矿物沉淀结晶的过程缺乏足够的自由生长的空间，从而形成具有一定光性特征的盐类晶体，正交光，4066.52 m；e，f—纹层状沉凝灰岩层，硅硼钠石自形晶顺层漂浮状分布在沉凝灰岩层中，e为单偏光，f为正交光，4067.94 m；g—沉凝灰岩层插入石膏试板后的特征，4067.94 m；h—沉凝灰岩层插入石膏试板后旋转90°相位后的特征，可见干涉色的变化，表明基本上无黏土矿物，4067.94 m；i—碳钠钙石质沉凝灰岩，呈层状的长英质细粒沉积物，黏土矿物含量低，加石膏试板后的特征，较粗的颗粒具有定向排列的明显特征，反映流水成因构造，4066.52 m；j，k—沉凝灰岩正交光下特征，可见酸性喷出岩岩屑，插入石膏试板后可见基本上为长英质成分，4072.66 m；

l—碳钠钙石质沉凝灰岩层段发育硬石膏，硬石膏呈分散状分布，含量较低

图4 准噶尔盆地玛湖凹陷风南5井下二叠统风城组含碱层段岩石显微特征

Fig. 4 Microphotos showing lithologic features of alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin



a, b, c, d—碳钠钙石化泥岩, 单偏光下可见“云雾状”部分和包裹部分, 正交光下被包裹的部分不显光性, 但内部隐约可见长英质消光的颗粒, 插入石膏试板后, 旋转90度相位观察表明云雾状部分为黏土矿物, 被包裹的部分为碳钠钙石, 4070.19 m; e, f—苏打石放射状集合体, 岩性为暗色碳钠钙石质沉凝灰岩, 4068.24 m (新疆油田资料); g—盐类矿物和伊利石, 岩性为暗色碳钠钙石质沉凝灰岩, 4068.24 m (新疆油田资料); h—基质中析出的石盐集合体, 岩性为暗色碳钠钙石质沉凝灰岩, 4068.24 m (新疆油田资料)

图 5 准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井下二叠统风城组合碱层段岩石学特征

Fig. 5 Petrologic features of alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

表 1 准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井下二叠统风城组
典型含碱层段暗色岩相层主要物相分析结果

Table 1 Main minerals in typical dark lithofacies beds of
alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of
Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

深度/m	主要物相
4066.6	斜长石, 钾长石, 黄铁矿, 黏土矿物, 堇青石
4067.4	斜长石, 钾长石, 碳钠钙石, 杂质
4068.2	斜长石, 钾长石, 堇青石, 碳钠钙石, 氯碳钠镁石, 杂质
4069.0	斜长石, 钾长石, 黄铁矿, 碳钠钙石, 氯碳钠镁石, 杂质
4070.5	石英, 黄铁矿, 氯碳钠镁石, 钠硼长石, 碳氢钠石, 杂质
4071.4	斜长石, 钾长石, 碳钠钙石, 氯碳钠镁石, 杂质
4072.0	碳钠钙石, 氯碳钠镁石, 钠硼长石, 杂质
4073.0	斜长石, 钾长石, 氯碳钠镁石

注: 检测结果中杂质为未知矿物。

4.2 主量元素的测试

为探讨各类矿物垂向分布规律以及相关性和相关性, 本次共选取 20 块岩石样品进行了主量元素分析, 其中碱矿样品 7 块, 含碱沉凝灰岩层段样品 13 块, 由中核

集团核工业北京地质研究院负责测试分析, 测试仪器为 AB104-L, AL104, PW2404 X 射线荧光光谱仪。测试结果见表 2, 另外其主量元素垂向分布规律见图 6, 后文讨论部分将详细论述其沉积学意义。

5 讨论

5.1 碳酸盐矿物类型划分以及析出序列

5.1.1 盐类矿物主要类型及产出状态

通过以上研究, 可以对风南 5 井风城组含碱层段的矿物进行分类讨论(表 3)。

1) 碳酸盐矿物。碳酸盐矿物是研究层段主要的咸化盐类矿物。又可以根据阳离子的类型划分为 Mg-Ca-Na 碳酸盐矿物(为与 Na 碳酸盐矿物区分, 下文称为 Mg-Ca-Na 碳酸盐矿物)和 Na 碳酸盐矿物。Mg-Ca-Na 碳酸盐矿物主要包括两类: 氯碳钠镁石($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{NaCl}$)和碳钠钙石($\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$ 或 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{CaCO}_3$), 这 2 类碳酸盐矿物主要富集在暗色沉凝灰岩层中, 其产出状态可见前文的岩心扫描图片及光学显微镜下的特征, 主要呈斑点状分

表 2 准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井下二叠统风城组含碱层段主量元素测试结果

Table 2 Test results of major elements in alkaline layers of the Lower Permian
Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

样品 编号	深度 /m	发育层段	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe(全铁) /%	MgO /%	CaO /%	Na ₂ O /%	K ₂ O /%	MnO /%	TiO ₂ /%	P ₂ O ₅ /%	烧失量 /%	FeO /%	TOC /%
1	4066.2	含凝灰质的碱矿层	22.10	0.93	0.68	0.80	1.02	33.80	0.58	0.019	0.085	0.040	39.36	0.21	/
2	4066.5	碳钠钙石质沉凝灰岩层	44.32	9.84	4.41	3.09	10.43	9.41	5.44	0.048	0.343	0.019	12.05	1.28	/
3	4066.6	碳钠钙石质沉凝灰岩层	45.92	11.89	3.31	4.19	6.14	10.60	6.10	0.045	0.229	0.018	10.97	0.73	0.58
4	4067.4	碳钠钙石质沉凝灰岩层	54.13	12.90	4.05	3.34	5.51	9.13	4.36	0.040	0.513	0.034	5.43	0.94	0.44
5	4067.6	碳钠钙石质沉凝灰岩层	54.66	13.15	3.85	3.30	4.70	9.19	4.40	0.036	0.486	0.014	5.67	0.83	0.29
6	4068.0	碳钠钙石质沉凝灰岩层	52.38	12.45	3.89	3.38	5.89	9.99	4.26	0.082	0.449	0.363	6.52	1.03	0.30
7	4068.2	碳钠钙石质沉凝灰岩层	44.47	8.97	2.93	3.84	8.26	13.13	4.15	0.064	0.229	0.034	13.35	0.60	1.06
8	4069.0	碳钠钙石质沉凝灰岩层	30.65	6.93	3.07	6.51	8.30	16.38	3.84	0.071	0.343	0.052	21.44	0.76	0.67
9	4069.5	碱矿层	4.65	0.14	0.13	0.41	0.11	41.35	0.07	0.008	0.018	0.006	52.53	0.10	/
10	4070.0	碱矿层	1.40	0.20	0.14	0.38	0.14	42.28	0.06	0.006	0.020	0.007	54.87	0.10	/
11	4070.5	碱矿层	22.94	0.57	0.44	3.05	0.47	32.40	0.32	0.055	0.047	0.039	39.14	0.27	0.33
12	4071.0	碱矿层	19.72	0.74	0.54	3.36	0.33	33.36	0.40	0.056	0.092	0.017	40.82	0.39	/
13	4071.3	碳钠钙石质沉凝灰岩层	24.83	5.91	2.23	4.27	15.05	15.70	3.40	0.043	0.153	0.019	26.07	0.45	0.50
14	4071.4	碳钠钙石质沉凝灰岩层	26.36	5.99	2.41	9.26	5.23	20.68	3.18	0.127	0.303	0.013	25.04	0.64	0.55
15	4071.5	碱矿层	15.93	1.33	0.88	1.21	0.31	35.74	0.70	0.024	0.157	0.172	42.95	0.30	/
16	4071.9	碱矿层	13.09	1.36	0.94	1.29	0.40	36.19	0.91	0.024	0.154	0.194	44.92	0.45	/
17	4072.0	碳钠钙石质沉凝灰岩层	63.05	1.67	1.03	3.74	3.23	15.37	1.01	0.058	0.122	0.315	9.80	0.39	0.28
18	4072.1	碳钠钙石质沉凝灰岩层	26.77	5.62	2.16	4.21	17.29	14.92	3.32	0.033	0.319	0.014	24.77	0.52	0.34
19	4072.5	碳钠钙石质沉凝灰岩层	50.79	5.71	6.09	11.02	3.52	9.82	4.50	0.046	1.120	0.009	6.84	1.23	/
20	4073.0	碳钠钙石质沉凝灰岩层	40.49	8.84	3.60	6.61	6.09	13.03	5.42	0.061	0.415	0.016	14.85	0.96	0.79

注 “/”表示样品中未检测出来。

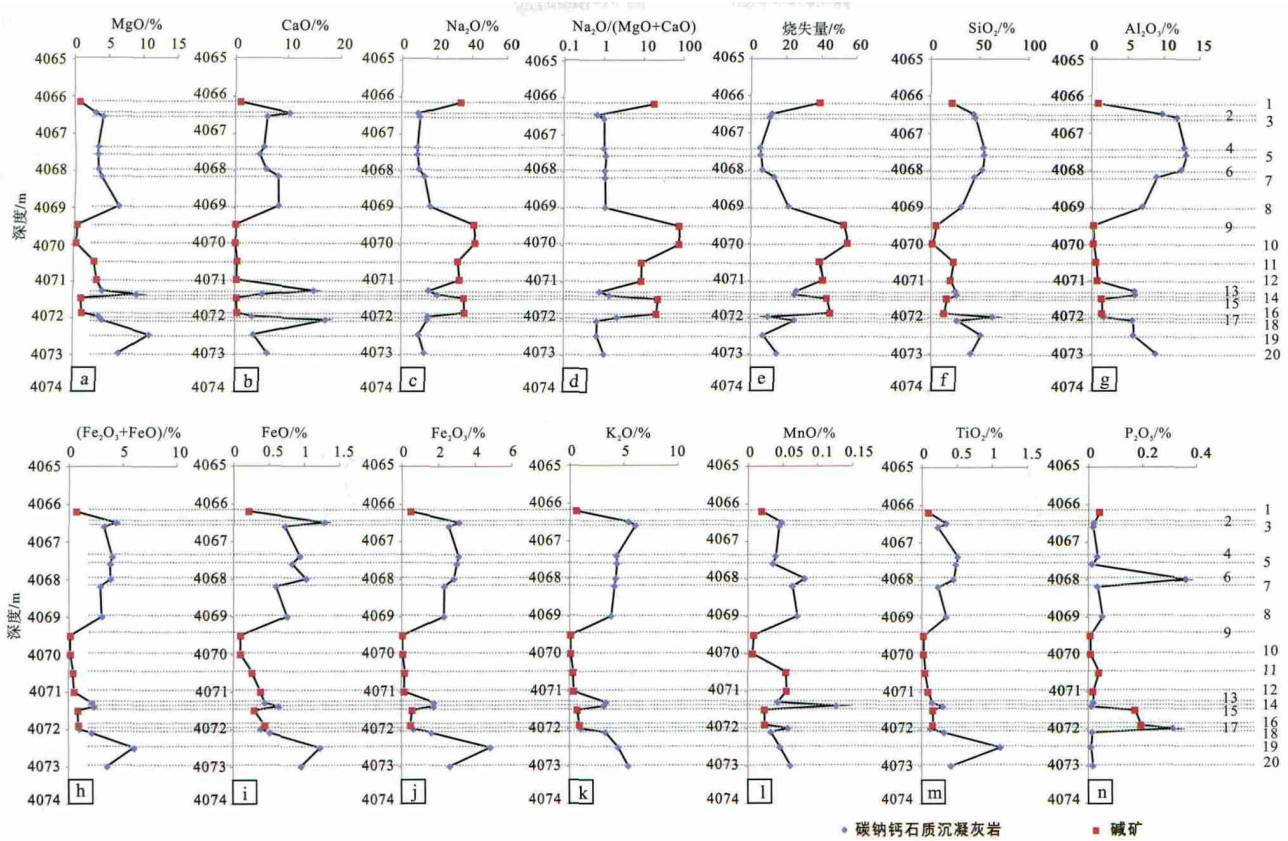


图6 准噶尔盆地玛湖凹陷风南5井下二叠统风城组合碱层段主要元素垂向分布规律

Fig. 6 Vertical distribution feature of major elements in alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

表3 准噶尔盆地玛湖凹陷风南5井下二叠统风城组合碱层段主要的盐类矿物

Table 3 Main saline minerals in alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

化合物大类	化合物亚类	主要盐类矿物	产出状态	发育层段
碳酸盐	Mg-Ca-Na 碳酸盐	氯碳钠镁石 ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{NaCl}$) 碳钠钙石 $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$ 或 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{CaCO}_3$	斑点状、与碱矿混合 斑点状非晶体状态	暗色沉凝灰岩段
	Na 碳酸盐	重碳酸钠石: NaHCO_3 天然碱 ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 碳酸钠石 (Na_2CO_3)	富集成层	浅色碱矿层段
硫酸盐		硬石膏 (CaSO_4)	点状分散	暗色沉凝灰岩段
卤化物		石盐 (NaCl)	微小晶体产出于颗粒间	暗色沉凝灰岩段
硼硅酸盐矿物		硅硼钠石 ($\text{Na}(\text{BSi}_3\text{O}_8)$)	漂浮在凝灰质中	暗色沉凝灰岩段 浅色碱矿层段

布, 穿插在细粒长英质矿物中。

Na 碳酸盐矿物主要包括重碳酸钠石 (NaHCO_3)、天然碱 ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和碳酸钠石 (Na_2CO_3), 这些钠碳酸盐统称为碱矿。

含碱层段的碳酸盐矿物阳离子为 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 与

Na^+ 的过渡类型以及 Na^+ , 缺乏纯粹由 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 为阳离子构成的碳酸盐矿物 (也即方解石和白云石), 表明湖盆的咸化处于相对高级的阶段。

2) 硅硼酸盐矿物。硅硼钠石是碳酸盐型盐湖常见的矿物, 国内报道比较早的如泌阳凹陷古近系

含碱岩系油页岩中的含水硅硼钠石 ($\text{NaBSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$), 填补了国内该矿物的空白 (李玉堂等, 1990)。这种矿物的形成要求湖盆咸化且具有高 pH 值, 这使得迁入湖盆的陆源碎屑物中的氧化硅遭受溶解而活化, 成岩阶段当 pH 值降低时, 水硅硼钠石从孔隙卤水中沉淀下来, 因此具有指相意义。当然, 这种矿物的形成首先是要求湖盆中存在大量的硼。随后, 硅硼钠石 ($\text{Na}(\text{BSi}_3\text{O}_8)$) 在准噶尔盆地被发现 (孙玉善, 1994), 主要分布于风城组黑色的泥质白云岩中。通过本次的研究发现, 该类矿物主要和白云石或者铁白云石伴生在一起, 在碱矿层中也有分布, 但很难如风南 3 井一样形成高度富集的硅硼钠石岩。硼的来源与火山活动相关 (单福龙等, 2015; 王丛山等, 2015), 碱矿发育层段硅硼钠石含量很低, 而且为异地搬运的特征, 也反映了玛湖凹陷成碱阶段火山活动处于相对静止的阶段。

3) 其他盐类矿物。该类矿物包括硬石膏和石盐。硬石膏的含量在取心段含量很低, 呈放射状的晶簇分散在沉凝灰岩基质中; 石盐在光学显微镜下很难看到, 在扫描电镜下能见到, 但含量很低, 均呈漂浮状分布在其他矿物之间。

5.1.2 不同类型碳酸盐矿物含量

依据准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井风城组含碱

层段不同岩石样品中 Na_2O 、 CaO 、 MgO 含量所做的三角图 (图 7-a) 表明, 以阳离子为 Na^+ 的碳酸盐矿物为主。碱矿样品的阳离子基本上都为 Na^+ , Na_2O 在 3 类氧化物中所占的比例大于 90%。碳钠钙石质沉凝灰岩样品中 Na_2O 所占的比例均大于 40%。 MgO 所占的比例很低。

5.1.3 不同类型碳酸盐矿物析出序列及控制因素

在玛湖凹陷整个风城组的碳酸盐矿物中, 根据阳离子的类型可以划分为 Mg-Ca 碳酸盐、Mg-Ca-Na 碳酸盐、Na 碳酸盐, 以此代表了玛湖凹陷古代湖盆卤水的咸化程度依次增高。不同碳酸盐矿物也可以反过来表征湖盆卤水的咸化程度。

风南 5 井含碱层段沉积时期阴离子中 HCO_3^- 占绝对比例, 因此盐类矿物主要为碳酸盐。形成哪一类的碳酸盐矿物主要由阳离子的类型及数量控制。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 按照顺序与 HCO_3^- 结合形成不同的碳酸盐矿物, 后一种离子的结合取决于沉积水体中前一种离子的含量。当 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 减少到一定程度时, 一定量的 Na^+ 参与到碳酸盐矿物的结晶中形成 Mg-Ca-Na 过渡型碳酸盐矿物; 当 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 完全消耗掉时, 结晶出纯净的 Na 碳酸盐矿物 (即碱矿) (图 7-b)。另外值得注意的是, Ca^{2+} 相对于 Mg^{2+} 来说先与 HCO_3^- 结合, 也就是湖盆的咸化过程中先形成方解石, 然后形成原白云石; 在 Ca^{2+} 、

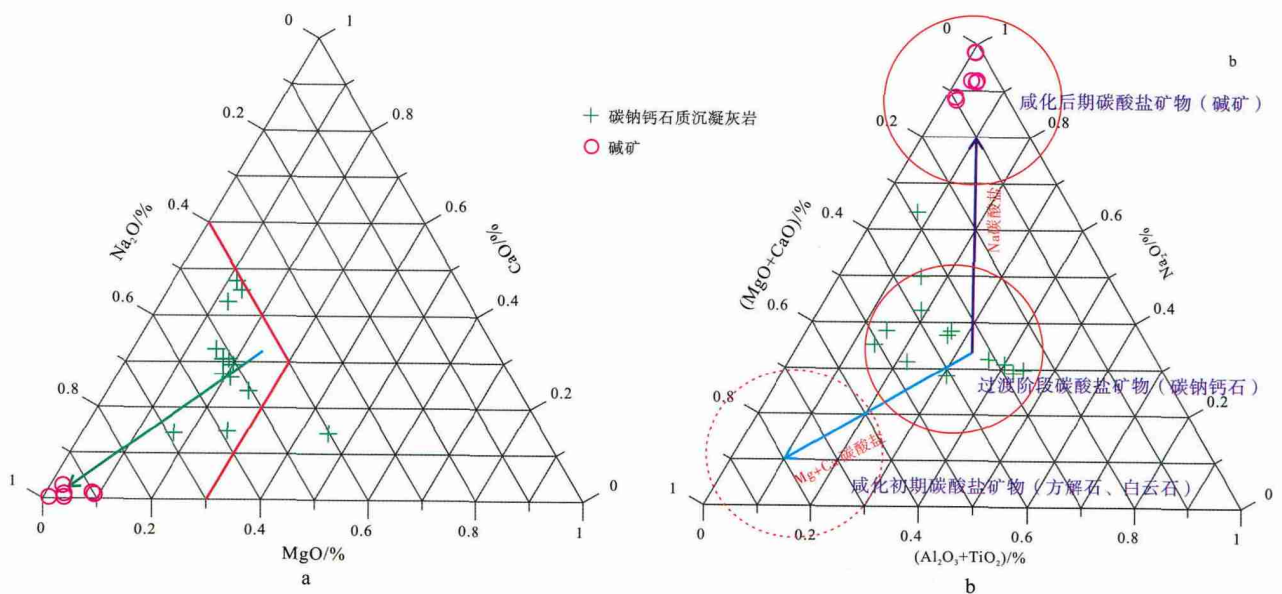


图 7 准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井下二叠统风城组含碱层段主量元素三角图

Fig. 7 Triangular chart of major elements in alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

Mg²⁺ 都减少到一定程度时形成 Mg-Ca-Na 过渡型碳酸盐矿物, 这一阶段依然是 Ca²⁺ 在和 Na⁺ 组合形成碳钠钙石方面相对于氯碳钠镁石具有优势。这也能合理地解释在碱矿层段含有一定量的氯碳钠镁石, 而基本上没有碳钠钙石。

风南 5 井风城组含碱层段不同的碳酸盐矿物的晶体形态指示了结晶的速度。暗色沉凝灰岩层中碳钠钙石不具有晶体形态, 都是呈斑块状、火焰状、蝌蚪状、不连续的条带状分布在凝灰质基质中, 而浅色碱矿层段中的 Na 碳酸盐矿物的晶体形态比较好, 显微镜下可以看到平直的 Na 碳酸盐矿物晶体的边界。矿物的晶体形态取决于结晶速度。玛湖凹陷风南 5 井风城组含碱层段不同产出状态的碳酸盐矿物表明, 碳钠钙石是在凝灰质基质颗粒之间快速结晶形成, 而碱矿则是在比较稳定的蒸发水体中相对缓慢地结晶形成。这种快速结晶形成的碳钠钙石形态及形成机理仅限于解释风城组含碱层段的碳钠钙石。

5.2 碳酸盐矿物对古气候条件及变化的记录

5.2.1 湖盆古卤水盐度及蒸发量变化

碳氧同位素常被用于古气候环境的研究, 特别是针对湖相自生碳酸盐矿物碳氧同位素的研究能较好地反映古气候的变化 (黄耀生等, 1985; 刘春莲等, 2004)。本次研究测定的碳氧同位素值主要来自于不同层段不同类型的碳酸盐矿物。浅色的碱矿层段主要为碱矿 (钠碳酸盐); 暗色沉凝灰岩层段主要为碳钠钙石。这些碳酸盐矿物都是在湖盆古卤水浓缩咸化的过程中蒸发沉淀形成, 因此很好地记录了古气候的演变。

古湖泊中碳同位素组成受到多种因素的影响, 包括: 生物化学循环, 周缘沉积物、植被、注入水的同位素组成, 盆地内水体和大气中 CO₂ 的交换, 天然气的溢漏等 (尹成明等, 2007)。另外, 同位素具有温度效应, 温度升高有利于重碳同位素的富集。风南 5 井含碱层段 TOC 含量极低, 说明成碱阶段湖泊的古生产力比较低, 湖盆的盐度及温度是碳同位素最主要的贡献。另外, 常利用 δ¹³C 和 δ¹⁸O 值来反映古流体的盐度。Keith 和 Weber (1964) 提出了用石灰岩的 δ¹⁸O 值和 δ¹³C 值区分侏罗纪及时代更新的海相石灰岩和淡水石灰岩的经验公式: $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$, 此式中表示盐度的定量参数适用于陆相湖盆沉积。

重氧同位素的富集取决于湖盆沉积水体的蒸发量与注入量之间的收支情况 (毛玲玲等, 2014)。因此, δ¹⁸O 值是反映古湖泊蒸发量/降雨量的重要参数 (刘传联等, 2001a, 2001b)。另外, δ¹⁸O 值也能对盐度进行定量表征: $S = (\delta^{18}\text{O} + 21.2) / 0.61$ (鲁新川等, 2012)。

碳氧同位素值具有年代效应 (邵龙义等, 1996), 通过系统校正后的碳氧同位素分析表明, 风南 5 井含碱层段沉积时期湖盆为强烈蒸发的封闭湖盆, 碳同位素值都为正值 (图 8-b)。氧同位素值反映湖盆的蒸发强度变化, 研究层段碱矿沉积阶段为强烈蒸发阶段, 氧同位素值高, 也均为正值 (图 8-a)。计算后的 Z 值反映含碱层段沉积时期的古水介质盐度始终较高 (图 8-c, 8-d)。

除了碳氧同位素绝对值高可以反映研究层段的绝对盐度很高以外, 同位素值的变化规律更是环境解释的重点。以 9 号样品为界可以将研究层段划分为上、下两部分 (图 8-a)。总体趋势为下部层段的氧同位素值要明显高于上部层段。碱矿样品的氧同位素值明显高于暗色的沉凝灰岩层段。氧同位素更能反映沉积水体的蒸发量, 即干旱炎热的气候状况。从下至上总体蒸发情况为增强、减弱、再增强的过程。碳同位素值、Z 值以及由氧同位素计算的盐度值也反映了这样的规律: 盐度增大、降低至 6 号样品的位置又继续升高。

5.2.2 古气候演化阶段划分

氧碳同位素比值可以反映古气候的变化 (刘春莲等, 2004)。目的层段可以分为炎热干旱气候演化阶段和温暖湿润气候演化阶段, 这种“干旱炎热”气候与“温暖湿润”气候只是相对而言的。干旱炎热气候条件下趋向于形成碳钠钙石以及碱矿等盐类矿物, 温暖潮湿气候条件下盐类矿物沉淀减少 (图 9)。δ¹⁸O/δ¹³C 值的演化规律和碳氧同位素值的演化规律一致, 以 9 号样品为界, 总体趋势表现为 2 个大的气候段, 碱矿形成于比值较高的阶段, 而沉凝灰岩形成于气候温暖湿润的阶段。每一个气候阶段又可以划分为次一级气候波动旋回。

5.3 主量元素特征对沉积过程的指示意义

5.3.1 碳酸盐矿物含量变化的沉积过程解释

能够反映玛湖凹陷风南 5 井含碱层段碳酸盐矿物的主量元素指标包括: MgO、CaO、Na₂O、

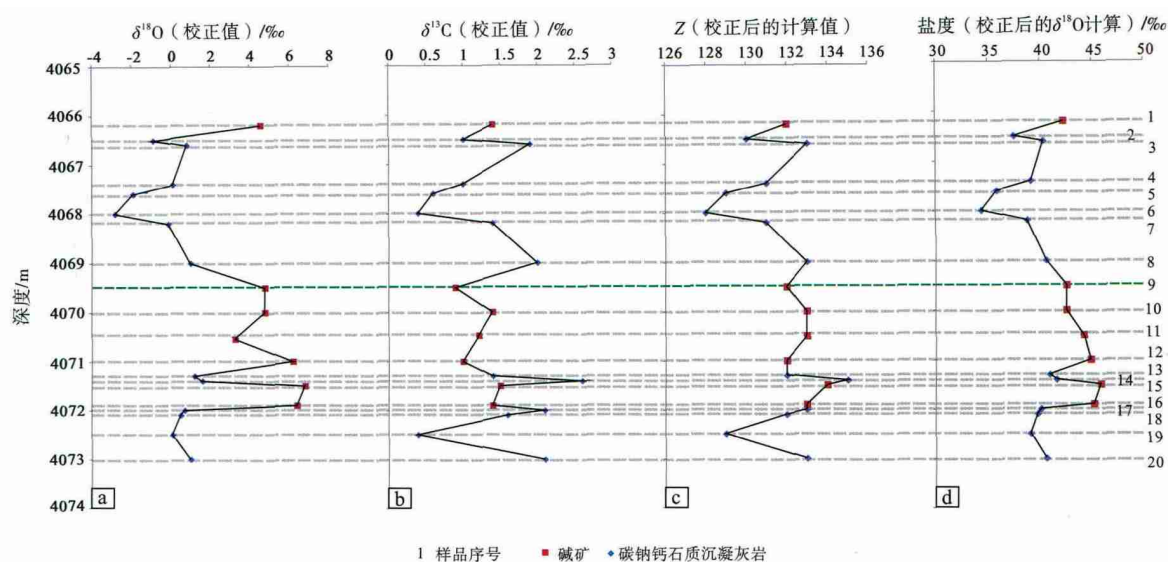


图 8 准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井下二叠统风城组含碱层段碳氧同位素特征

Fig. 8 Characteristics of carbon and oxygen isotopes in alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

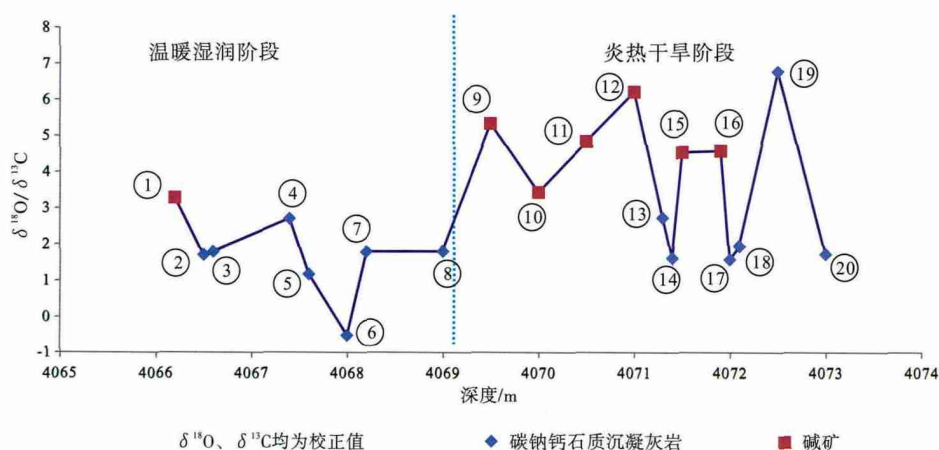


图 9 准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井下二叠统风城组含碱层段氧碳同位素比值及古气候特征

Fig. 9 Ratio of carbon with oxygen isotopes and its significance for palaeoclimate evolution in alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

$\text{Na}_2\text{O}/(\text{MgO}+\text{CaO})$ 和烧失量。

MgO 反映了氯碳钠镁石的含量。氯碳钠镁石是介于 Na 碳酸盐和 Ca-Na 碳酸盐之间的矿物,析出难易程度介于碳钠钙石和碱矿之间,因此不纯的碱矿中含有氯碳钠镁石,而很少有碳钠钙石(图 6-a)。部分碱矿样品中无 MgO 说明纯度较高,基本上为钠碳酸盐。部分碱矿样品中含有少量的 MgO ,说明碱矿纯度稍低,具有部分的过渡盐类矿物氯碳钠镁石。按照气候阶段划分,在 9 号样品附近 MgO 的含量具有阶段性特征,同样为沉凝灰岩层段的下部层段 MgO 的含量比上部层段高,表明 9

号样品之下的整体气候条件都比 9 号样品之上的层段干旱炎热。

CaO 含量主要反映了碳钠钙石的含量。 CaO 含量和 MgO 含量的分布规律基本一致,说明碳钠钙石和氯碳钠镁石两种成化盐类矿物的含量具有正相关关系。但两者的区别表现在碱矿样品中基本不含 CaO 。 CaO 含量的低值表明沉积水体的盐度最低(图 6-b)。在岩心宏观特征上表现为白色斑点减少或增多的规律性变化。

Na_2O 的来源包括碱矿 (Na_2CO_3 和 NaHCO_3)、碳钠钙石、氯碳钠镁石等碳酸盐矿物,主要反映了

Na 碳酸盐岩的绝对含量。碱矿样品中 Na_2O 含量明显高出沉凝灰岩样品, 其含量越高反映了碱矿的纯度越高。所测试的样品中 9、10 号样品的碱矿纯度最高, Na_2O 的含量可以达到 40%。暗色的沉凝灰岩层段中也含有一定 Na_2O 含量, 主要代表了碳钠钙石和氯碳钠镁石的含量, 特别是在 4、5 号样品所对应的沉积水体盐度最低的阶段为 Na_2O 含量的最低值。根据 Na_2O 的含量也可以明显将研究层段划分为上下 2 个气候演化阶段(图 6-c)。

$\text{Na}_2\text{O}/(\text{MgO}+\text{CaO})$ 反映了 Na 碳酸盐相对于 Mg、Ca 碳酸盐岩的含量。该比值越高, 说明碱矿层相对较纯(图 6-d)。

5.3.2 烧失量可以用于表征碳酸盐矿物的总含量

烧失量反映了岩石中分解产生二氧化碳的能力(孔为伦等, 2011), 即反映了该取心段中所有碳酸盐矿物含量的总和。碱矿样品的烧失量明显高于暗色的沉凝灰岩样品(图 6-e)。比较纯净的碱矿样品的烧失量甚至可以达到 50%, 而上部层段的代表盐度最低的样品其烧失量仅 2%~3%, 说明碳酸盐矿物的绝对含量很低。下部层段 9、10 号样品代表了纯度最高的碱矿样品, 11、12、15、16 号样品的烧失量较 9、10 号样品的烧失量明显减少, 说明碱矿的纯度较差, 含有一定的流水输入的火山碎屑物质。

5.3.3 外源沉积物输入量变化的沉积过程解释

SiO_2 、 Al_2O_3 的含量从某种程度上能反映石英及铝硅酸盐的含量, 即表明流水输入的火山碎屑物质的量。在碱矿沉积层段 SiO_2 、 Al_2O_3 的含量非常低, 甚至近于零(图 6-f, 6-g), 表明在比较纯净的碱矿层沉积时期, 地表流水系统不发育, 缺乏陆源碎屑物质的注入。外源输入沉积物多与流域内的火山灰相关。暗色的沉凝灰岩层段 SiO_2 、 Al_2O_3 的含量明显增高, 反映了随注入的流水带入的火山碎屑物质增多, 水体发生了相对的淡化。在不同的暗色层段, 岩石中 SiO_2 、 Al_2O_3 的含量也有较大的差别。取心段明显可以分为两部分(分割界限在 8 号样品和 9 号样品之间), 下部碱矿厚度较大, 暗色的沉凝灰岩层主要呈薄的夹层产出, 因此流水输入的沉积物较上段少。碱矿样品 SiO_2 、 Al_2O_3 的含量相差不大, 且样品比较纯, 说明纯净的碱矿形成于条件相似的干净的、高度咸化的水体中。该碱矿集中发育层段的暗色沉凝灰岩夹层中 SiO_2 、 Al_2O_3

的含量增高, 反映了气候的频繁波动, 形成明暗交互的韵律特征。但总体来说, 9 号样品之下的部分以利于碱矿沉积的干旱蒸发气候为主。9 号样品之上的层段纯净的碱矿层厚度减小, 主要以富含长英质的蚀变后的凝灰岩为主, 表明整体上为气候相对潮湿的环境, 有流水的注入并带入大量的火山碎屑物质。 SiO_2 、 Al_2O_3 的含量在该段呈正相关关系, 且其含量在 4、5 号样品的位置达到峰值, 宏观岩心上表现为颜色暗、白色盐类矿物斑点少的特征, 说明 4、5 号样品处为该研究层段湖盆最淡化的阶段。以此位置为分界点, 上段从下至上可以划分为气候逐渐变潮湿(沉积水体盐度变低)和气候逐渐变得炎热干旱(沉积水体盐度再次变高)的 2 个气候演化阶段。

全铁($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$) 主要分布在暗色的沉凝灰岩层段。碱矿样品中基本上不含铁, 而主要集中在沉凝灰岩样品中, 说明铁的含量和凝灰质的来源有关。铁含量的规律与 SiO_2 、 Al_2O_3 含量的规律具有一致性(图 6-h)。 FeO 和 Fe_2O_3 含量的变化规律一致, 和总铁的含量符合, 均代表火山来源的流水输入物质。铁的含量也是在碱矿层中含量很低, 而在沉凝灰岩层中含量较高(图 6-i, 6-j)。

K_2O 反映了钾长石的含量, 也能从一定程度上反映流水输入的火山碎屑物质的含量。碱矿样品中 K_2O 含量很低, 接近于零(图 6-k), 说明了碱矿沉积时期流水带入的长英质沉积物很少, 仅在和暗色沉凝灰岩夹层接近的样品中有少量的 K_2O 含量。 K_2O 含量与 SiO_2 、 Al_2O_3 的含量呈正相关关系, 表明暗色层段的矿物主要为石英以及铝硅酸盐矿物(钾长石)。

MnO 和 TiO_2 亦能在一定程度上反映流水输入的火山碎屑物质含量。 MnO 和 TiO_2 主要来自于火山喷发, 其含量也可反映沉积位置距离物源的远近。 MnO 的含量在 9 号样品以下的下部层段靠近沉凝灰岩夹层的碱矿中也有较高的分布, 反映了沉凝灰岩层沉积对于碱矿沉积的影响。总体上来说碱矿(苏打和小苏打)沉积时期, 流水输入的沉积物量少(图 6-l, 6-m)。

P_2O_5 反映了火山喷发供给的营养物质。碱矿样品中 P_2O_5 的含量很低, 几乎接近于零, 说明碱矿沉积时期是火山活动比较微弱的阶段。在暗色的沉凝灰岩层段中 P_2O_5 含量的高值对应了流水输入

的火山碎屑物质的量。基本上和低盐度段对应(图 6-n)。

5.4 含碱韵律层段沉积模式

综合以上特征,建立了含碱层段的沉积过程以及含碱韵律层形成过程示意图(图 10)。整体来说,含碱层段的韵律性反映了沉积环境变化的周期性。下面以气候变化的一个周期并分为 3 个阶段进行讨论。

阶段一:气候温暖潮湿,雨水比较多,注入湖盆的水流量较大,导致了流水的注入量大于蒸发量。此时湖盆沉积水体介质还未达到盐类矿物沉淀的饱和阶段或者处于饱和的初级阶段,此时湖盆底部沉积的是流水带入以及空降的火山碎屑。在风南 5 井含碱层段以 4067.6 m、4072.1 m 处的岩石样品为代表。岩石以暗色的沉凝灰岩为代表,表面基

本见不到盐类矿物斑点。此时湖盆的沉积水体比较深,湖平面较高,气候温暖潮湿,蒸发量小。

阶段二:气候开始由温暖潮湿向炎热干燥转变,由于雨水减少,注入湖盆的流水逐渐小于蒸发量。强烈的蒸发作用导致湖平面降低,沉积水体介质的盐度增高, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 优先和沉积水体中的 HCO_3^- 结合,并在其他颗粒之间的孔隙中沉淀结晶出来形成碳钠钙石和氯碳钠镁石。早期形成的盐类矿物充填陆源注入的碎屑颗粒以及火山碎屑颗粒之间的孔隙,呈包裹颗粒的状态产出。该研究层段碳钠钙石结晶过程非常快,因此其自形程度差,在岩石宏观上表现为白色的碳钠钙石斑点或呈火焰状等形态。此阶段形成的岩石典型代表如取心段 4066.5 m、4073 m 的样品。此阶段湖盆的沉积水体还相对比较深,但随着蒸发量的加大,水介质的

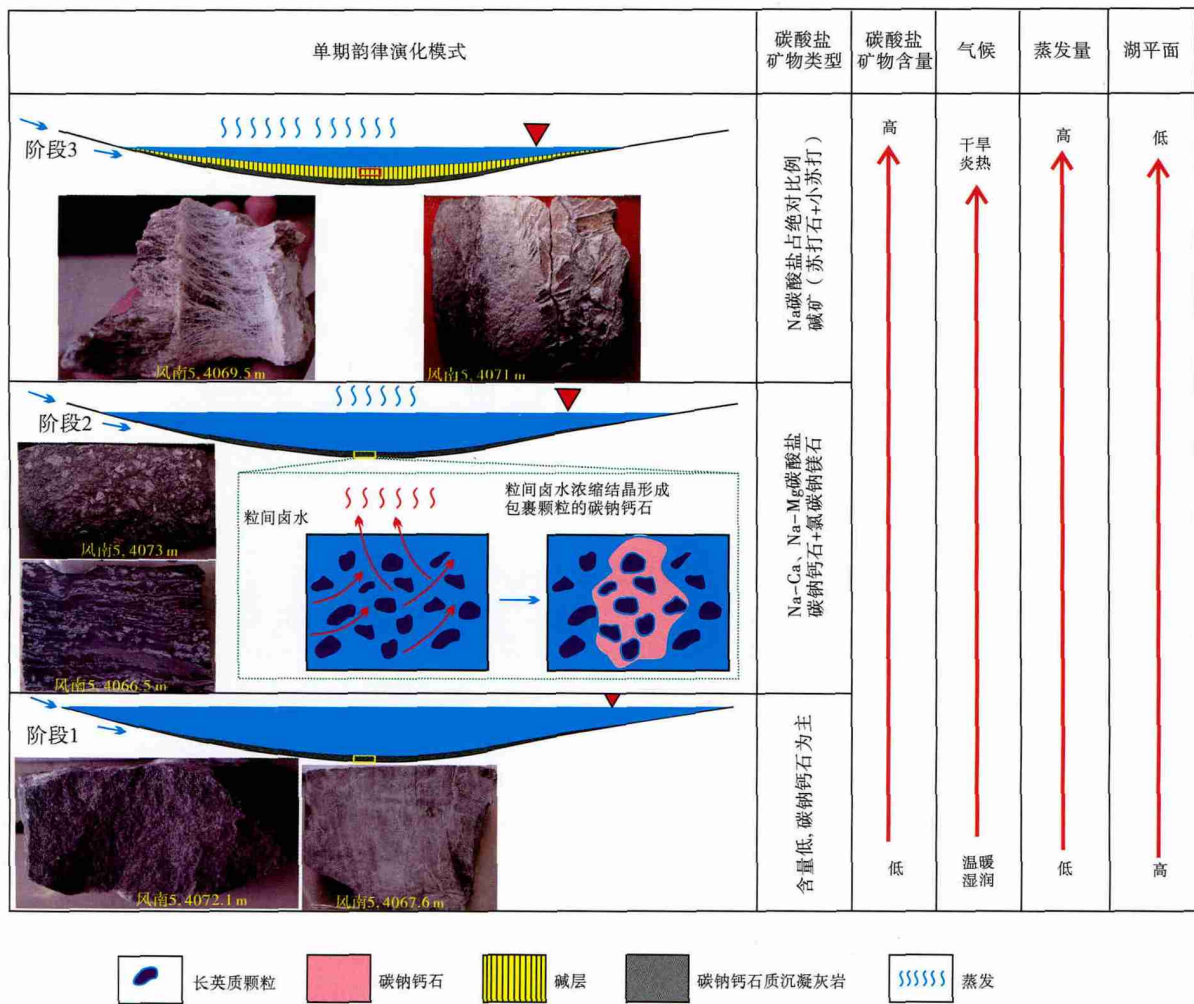


图 10 准噶尔盆地玛湖凹陷风南 5 井下二叠统风城组含碱层段沉积模式

Fig. 10 Sedimentary model for alkaline layers of the Lower Permian Fengcheng Formation of Well Fengnan 5 in Mahu sag, Junggar Basin

浓度已经达到盐类矿物析出的矿化度, 碳钠钙石和氯碳钠镁石优先选择在颗粒孔隙之间析出。

阶段三: 气候炎热干旱。随着蒸发量的继续加大, 沉积水体介质中的 Na^+ 开始与剩下的 HCO_3^- 结合形成纯净的苏打石类矿物。由于气候炎热干旱, 此阶段基本上没有流水的注入, 即没有外源沉积物质的输入, 因此碱矿层很干净。其沉积过程可以描述为: 沉积水体表层由于蒸发量大于底部沉积水体的蒸发量, 表层碳酸盐矿物先饱和并降落至湖盆底部沉积。另外, 当湖底卤水浓度达到碱矿析出的浓度时, 就在凝灰质底质上结晶析出碱矿。由于无其他沉积物质的输入, 该时期的沉积为干净的碱矿沉积。此阶段形成的岩石典型的代表为风南 5 井取心段 4069.5 m、4071 m 纯净的碱矿层。

整体来说, 一个完整的沉积周期内, 随着气候由温暖潮湿转变为干旱炎热, 湖平面开始下降并且蒸发量增大, 碳酸盐矿物依次结晶析出, 并且气候越干旱炎热, 盐类矿物的含量就越高。

另外, 由于风城组沉积时期沉积水体以 HCO_3^- 占主导, 而阳离子主要为 Na^+ , 因此湖盆在咸化蒸发浓缩的过程中主要形成 Na 碳酸盐矿物, 即碱矿。

6 结论

1) 准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统风城组含碱层段为封闭咸化湖盆蒸发沉积作用的产物。卤水蒸发浓缩过程中形成的咸化盐类矿物主要为各种类型的碳酸盐矿物, 包括碳钠钙石、氯碳钠镁石和碱矿。另外还含有石膏、石盐以及硅硼钠石。玛湖凹陷古湖盆卤水阴离子以 HCO_3^- 为主, 其控制了湖盆蒸发浓缩析出的盐类主要为碳酸盐, 而石膏、石盐等盐类矿物含量低。含碱层段的碳酸盐类型根据阳离子可以分为 Mg-Ca-Na 过渡类型和 Na 碳酸盐类型。

2) 不同阳离子与 HCO_3^- 结合的顺序为: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 。碳钠钙石、氯碳钠镁石、碱矿依次析出代表了沉积水体蒸发强度的依次增强。

3) 碳酸盐矿物记录了湖盆咸化过程中的古气候信息。研究层段从下至上可以分为 2 个大的气候阶段。下部为旱炎热, 上部温暖湿润。每一个气候阶段又可以识别出多个气候波动变化旋回。由于气候

的干旱和湿润呈周期性变化, 故形成了含碱层段浅色碱矿层与暗色含盐类矿物的沉凝灰岩层的频繁互层。

4) 含碱层段的韵律层段形成过程可以解释为 3 个阶段: 当气候潮湿时, 地表流水注入量比较大, 就近输入大量地表火山碎屑物质, 此时盐度最低, 基本不发育蒸发盐类矿物; 随着气候逐渐干旱炎热, 沉积水体蒸发浓缩, 碳钠钙石在颗粒间快速晶出, 形成晶体形态很差的碳钠钙石斑点; 随着气候的进一步干旱炎热, 沉积水体的蒸发量远大于流水输入, 此阶段基本上没有地表流水注入的沉积物, 湖盆古卤水高度浓缩, 形成比较纯净的碱矿。此 3 个阶段在地质历史时期随着气候的波动不断循环, 从而形成了含碱层段的韵律层。

参考文献(References)

- 曹剑, 雷德文, 李玉文, 唐勇, 阿布力米提, 常秋生, 王婷婷. 2015. 古老湖盆优质烃源岩: 准噶尔盆地二叠统风城组. 石油学报, 36(7): 781-790. [Cao J, Lei D W, Li Y W, Tang Y, Abulimit, Chang Q S, Wang T T. 2015. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin. Acta Petrolei Sinica, 36(7): 781-790]
- 董继和. 1995. 海拉尔盆地盐湖中盐矿物初步研究. 盐湖研究, 3(4): 18-22. [Dong J H. 1995. A preliminary investigation on salt minerals of salt lakes in Halar Basin, China. Journal of Salt Lake Science, 3(4): 18-22]
- 冯有良, 张义杰, 王瑞菊, 张光亚, 吴卫安. 2011. 准噶尔盆地西北缘风城组白云岩成因及油气富集因素. 石油勘探与开发, 38(6): 685-692. [Feng Y L, Zhang Y J, Wang R J, Zhang G Y, Wu W A. 2011. Dolomites genesis and hydrocarbon enrichment of the Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin. Petroleum Exploration and Development, 38(6): 685-692]
- 黄耀生, 黄志诚, 沈渭洲, 周建平, 刘燕. 1985. 碳酸盐的碳、氧同位素分析及其在地质上的应用. 南京大学学报(自然科学版), 21(2): 361-370. [Huang Y S, Huang Z C, Shen W Z, Zhou J P, Liu Y. 1985. Carbon and oxygen isotope analysis in carbonates and its applications to geology. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 21(2): 361-370]
- 蒋宜勤, 文华国, 祁利祺, 张锡新, 李云. 2012. 准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组盐类矿物和成因分析. 矿物岩石, 32(2): 105-114. [Jiang Y Q, Wen H G, Qi L Q, Zhang X X, Li Y. 2012. Salt minerals and their genesis of the Permian Fengcheng Formation in Urho area, Junggar Basin. Journal of Mineralogy and Petrology, 32(2): 105-114]
- 金强, 朱光有, 王娟. 2008. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布. 中国石油大学学报(自然科学版), 32(4): 19-23. [Jin Q, Zhu G Y, Wang J. 2008. Deposition and distribution of high-potential source

- rocks in saline lacustrine environments. *Journal of China University of Petroleum(Natural Sciences Edition)* ,32(4) : 19-23]
- 孔为伦,李双应,万秋,杜叶龙,王松. 2011. 镇安西口地区二叠纪碳氧同位素特征及意义. *合肥工业大学学报(自然科学版)* ,34(7) : 1058-1065. [Kong W L, Li S Y, Wan Q, Du Y L, Wang S. 2011. C, O isotope composition from Permian in Xikou region, Zhen'an County and its implications. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Sciences Edition)* ,34(7) : 1058-1065]
- 匡立春,唐勇,雷德文,常秋生,欧阳敏,侯连华,刘得光. 2012. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力. *石油勘探与开发* ,39(6) : 657-667. [Kuang L C, Tang Y, Lei D W, Chang Q S, Ouyang M, Hou L H, Liu D G. 2012. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development* ,39(6) : 657-667]
- 李玉堂,袁标,刘成林,袁鹤然. 1990. 国内水硅硼钠石的首次发现. *岩石矿物学杂志* ,9(2) : 170-174. [Li Y T, Yuan B, Liu C L, Yuan H R. 1990. Searlesite discovered for the first time in China. *Acta Petrological et Mineralogica* ,9(2) : 170-174]
- 刘传联,赵泉鸿,汪品先. 2001a. 湖相碳酸盐氧碳同位素的相关性与生油古湖泊类型. *地球化学* ,30(4) : 363-367. [Liu C L, Zhao Q H, Wang P X. 2001a. Correlation between carbon and oxygen isotopic ratios of lacustrine carbonates and types of oil-producing paleolakes. *Geochimica* ,30(4) : 363-367]
- 刘传联,赵泉鸿,汪品先. 2001b. 东营凹陷生油岩中介形虫氧、碳同位素的古湖泊学意义. *地球科学* ,11(5) : 441-445. [Liu C L, Zhao Q H, Wang P X. 2001b. Paleolimnological significance of carbon and oxygen isotopic ratios of Ostracoda from oil source rocks in Dongying Depression. *Earth Science* ,11(5) : 441-445]
- 刘春莲, Franz T F, 白雁, 杨小强, 李国强. 2004. 三水盆地古近系湖相沉积岩的氧、碳同位素地球化学记录及其环境意义. *沉积学报* ,22(1) : 36-40. [Liu C L, Franz T F, Bai Y, Yang X Q, Li G Q. 2004. Paleogene environmental changes deduced from stable isotopic data from bulk carbonates in the Sanshui Basin, South China. *Acta Sedimentology Sinica* ,22(1) : 36-40]
- 鲁新川,张顺存,史基安. 2012. 准噶尔盆地西北缘乌尔禾—风城地区二叠系风城组白云岩地球化学特征及成因分析. *兰州大学学报(自然科学版)* ,48(6) : 8-14. [Lu X C, Zhang S C, Shi J A. 2012. Dolomite genesis and geochemical characteristics of Permian Fengcheng Formation in Wuerhe-Fengcheng area, northwestern Junggar basin. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)* ,48(6) : 8-14]
- 马宗晋,曲国胜,李涛,赵瑞斌,许建东. 2008. 准噶尔盆地盆山构造耦合与分段性. *新疆石油地质* ,29(3) : 271-277. [Ma Z J, Qu G S, Li T, Zhao R B, Xu J D. 2008. Tectonic coupling and segmentation of marginal structural belt in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology* ,29(3) : 271-277]
- 毛玲玲,伊海生,季长军,夏国清. 2014. 柴达木盆地新生代湖相碳酸盐岩岩石学及碳氧同位素特征. *地质科技情报* ,33(1) : 41-48. [Mao L L, Yin H S, Ji C J, Xia G Q. 2014. Petrography and carbon-oxygen isotope characteristics of the Cenozoic lacustrine carbonate rocks in Qaidam Basin. *Geological Science and Technology Information* ,33(1) : 41-48]
- 邵龙义,袁建伟,张鹏飞. 1996. 西南地区晚二叠世氧、碳稳定同位素的古地理意义. *地球化学* ,25(6) : 575-581. [Shao L Y, Dou J W, Zhang P F. 1996. Paleogeographic significances of carbon and oxygen isotopes in Late Permian rocks of southwest China. *Geochimica* ,25(6) : 575-581]
- 单福龙,陈文西,王丛山. 2015. 第三纪火山沉积硼矿与火山岩关系研究. *科技资讯* ,13(7) : 71-73. [Shan F L, Chen W X, Wang C S. 2015. Relationship between Tertiary volcano sedimentary boron deposit and volcanic rocks in the study. *Science & Technology Information* ,13(7) : 71-73]
- 孙玉善. 1994. 中国西部地区首次发现硅硼钠石. *石油与天然气地质* ,15(3) : 264-265. [Sun Y S. 1994. Reedmergerite first found in west China. *Oil & Gas Geology* ,15(3) : 264-265]
- 王丛山,陈文西,张旭,单福龙. 2015. 火山—沉积型硼矿成矿条件及找矿依据的研究. *科技资讯* ,13(4) : 54-55. [Wang C S, Chen W X, Zhang X, Shan F L. 2015. Study on volcano sedimentary boron deposit and direct geological exploration guide. *Science & Technology Information* ,13(4) : 54-55]
- 王国力,张永生,杨玉卿,漆智先. 2004. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组盐间非砂岩储集层评价. *石油实验地质* ,26(5) : 462-468. [Wang G L, Zhang Y S, Yang Y Q, Qi Z X. 2004. Evaluation of nonsandstone reservoirs between salt beds of the Paleogene Qianjiang Formation in the Qianjiang Depression of the Jiangnan Basin. *Petroleum Geology & Experiment* ,26(5) : 462-468]
- 王俊怀,刘英辉,万策,朱筱敏,王小军,葛家旺,张昕. 2014. 准噶尔盆地乌—夏地区二叠系风城组云质岩特征及成因. *古地理学报* ,16(2) : 157-168. [Wang J H, Liu Y H, Wan C, Zhu X M, Wang X J, Ge J W, Zhang X. 2014. Characteristics and origin of dolomitic tuff in the Permian Fengcheng Formation in Wu-Xia area of Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)* ,16(2) : 157-168]
- 王苏民. 1993. 世界咸水湖的物理与化学特性. *湖泊科学* ,5(3) : 278-286. [Wang S M. 1993. Physics and chemistry of saline lakes. *Journal of Lake Sciences* ,5(3) : 278-286]
- 吴孔友,查明,王绪龙,曲江秀,陈新. 2005. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识. *地球学报* ,26(3) : 217-222. [Wu K Y, Zha M, Wang X L, Qu J X, Chen X. 2005. Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin. *Acta Geoscientica Sinica* ,26(3) : 217-222]
- 吴世强,唐小山,杜小娟,梁文华,贺钦. 2013. 江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征. *东华理工大学学报(自然科学版)* ,36(3) : 282-286. [Wu S Q, Tang X S, Du X J, Liang W H, He Q. 2013. Geologic characteristics of continental shale oil in the Qianjiang Depression, Jiangnan Salt Lake Basin. *Journal of East China Institute of Technology(Natural Science Edition)* ,36(3) : 282-286]
- 杨江海,易承龙,杜远生,张宗恒,颜佳新. 2014. 泌阳凹陷古近纪含碱岩系地球化学特征对成碱作用的指示意义. *中国科学: 地球*

- 科学 44(10): 2172-2184. [Yang J H, Yi C L, Du Y S, Zhang Z H, Yan J X. 2014. Geochemical significance of the aleogene soda-deposits bearing strata in Biyang Depression, Henan Province. *Scientia Sinica Terrae* 44(10): 2172-2184]
- 尹成明, 李伟民, Andrea R, 刘永江, 陈元忠, 巩庆林. 2007. 柴达木盆地新生代以来的气候变化研究: 来自碳氧同位素的证据. *吉林大学学报(地球科学版)* 37(5): 901-907. [Ying C M, Li W M, Andrea R, Liu Y J, Chen Y Z, Gong Q L. 2007. Cenozoic climate changes in the Qaidam Basin, western China: Evidenced from carbon and oxygen stable isotope. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)* 37(5): 901-907]
- 于志同, 刘兴起, 王永, 葛兆帅, 潘存峰, 杨波. 2012. 13.8 ka 以来内蒙古吉兰泰盐湖的演化过程. *湖泊科学* 24(4): 629-636. [Yu Z T, Liu X Q, Wang Y, Ge Z S, Pan C F, Yang B. 2012. Evolution of Jilantai Salt Lake, Inner Mongolia in the last 13.8 ka. *Journal of Lake Sciences* 24(4): 629-636]
- 张杰, 何周, 徐怀宝, 季换成, 袁青, 史基安, 鲁新川. 2012. 乌尔禾—风城地区二叠系白云质岩类岩石学特征及成因分析. *沉积学报* 30(5): 859-867. [Zhang J, He Z, Xu H B, Ji H C, Yuan Q, Shi J A, Lu X C. 2012. Petrological characteristics and origin of Permian Fengcheng Formation dolomitic rocks in Wuerhe-Fengcheng area, Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* 30(5): 859-867]
- 张丽霞, 李培俊. 2012. 微细沉积物中黏土矿物鉴定新方法. *新疆石油地质* 33(4): 491-492. [Zhang L X, Li P J. 2012. A new method for clay mineral identification of fine sediments. *Xinjiang Petroleum Geology* 33(4): 491-492]
- 张秀莲. 1985. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系. *沉积学报* 3(4): 17-30. [Zhang X L. 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater. *Acta Sedimentologica Sinica* 3(4): 17-30]
- 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 乔悦东, 袁鹤然. 2003. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境. *古地理学报* 5(1): 29-35. [Zhang Y S, Yang Y Q, Qi Z X, Qiao Y D, Yuan H R. 2003. Sedimentary characteristics and environments of the salt-bearing series of Qianjiang Formation of the Paleogene in Qianjiang sag of Jianghan Basin. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)* 5(1): 29-35].
- Eugster H P. 1980. Geochemistry of evaporitic lacustrine deposits. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* (8): 35-63.
- Jagniecki E A, Jenkins D M, Lowenstein T K, Carroll A R. 2013. Experimental study of shortite($\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$) formation and application to the burial history of the Wilkins Peak Member, Green River Basin, Wyoming, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 115: 31-45.
- Keith M L, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10-11): 1787-1816.
- Mason R A. 1980. The ordering behaviour of reedmergnerite, NaBSi_3O_8 . *Contributions to Mineralogy and Petrology* 72: 329-333.
- Smith M E, Carroll A R, Boak J, Poole S. 2015. Mineralogy of the Green River Formation in the Piceance Creek Basin, Colorado. *Netherlands: Springer*, 183-209.

(责任编辑 张西娟)