

准噶尔盆地玛湖凹陷早二叠世风城组 沉积时期古湖盆卤水演化及碳酸盐矿物形成机理

余宽宏¹, 操应长¹, 邱隆伟¹, 孙沛沛¹, 杨勇强¹, 曲长胜¹, 李玉文², 万敏³, 宿云国⁴

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油勘探开发研究院杭州分院, 浙江 杭州 310023;

3. 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;

4. 中国石油新疆新港作业分公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷风城组沉积时期古湖泊为典型的碳酸盐型湖泊,发育丰富的碳酸盐矿物。碳酸盐矿物是风城组主要的盐类矿物,可以按照金属阳离子划分为 Mg、Ca 碳酸盐(方解石、白云石)、Na 碳酸盐(碳酸钠、碳酸氢钠)、过渡型碳酸盐(碳钠钙石、碳钠镁石、氯碳钠镁石)。3 类碳酸盐矿物平面分布具有“牛眼”特征,表明蒸发浓缩是直接的成盐诱导因素。方解石、白云石主要分布在古湖盆的浅水平台区、湖盆的周缘浅水区。碳钠钙石、碳钠镁石、氯碳钠镁石主要分布在与碱矿互层的暗色沉凝灰岩层段。碳酸钠和碳酸氢钠主要分布在湖盆的凹陷中心。充足的 HCO_3^- 阴离子控制了玛湖凹陷古湖盆盐类矿物的沉淀,碳酸盐析盐序列表现为 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 首先与 HCO_3^- 结合,消耗殆尽后碱金属阳离子 Na^+ 与富余的 HCO_3^- 结合形成碱矿。早二叠世强烈的火山活动以及火山物质的矿物组成对碳酸盐矿物的形成起了决定性的作用。岛弧型火山活动脱气提供大量的 CO_2 ,增加了大气的 CO_2 分压,进一步提高了沉积水体 HCO_3^- 浓度。 HCO_3^- 的含量是控制碳酸盐矿物沉淀的决定性因素。另外,火山喷发的 CO_2 气体增加了降雨的酸度,并加速了对基岩的风化以及对火山碎屑物质的水解。准噶尔盆地西北缘石炭纪—早二叠世形成的火山岩富含 Na 长石分子及 Ca 长石分子,K 长石分子含量低。风城组火山碎屑物质也以富含 Na、Ca 为主。基岩的风化以及凝灰质的水解提供了大量 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 金属阳离子,与 HCO_3^- 结合形成了风城组大量的碳酸盐沉积。

关键词:准噶尔盆地;玛湖凹陷;风城组;卤水演化;碳酸盐矿物

中图分类号:TE121.1 文献标志码:A 文章编号:1672-1926(2016)07-1248-16

引用格式:Yu Kuanhong, Cao Yingchang, Qiu Longwei, *et al.* Brine evolution of ancient lake and mechanism of carbonate minerals during the sedimentation of Early Permian Fengcheng Formation in Mahu Depression, Junggar Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1248-1263. [余宽宏, 操应长, 邱隆伟, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷早二叠世风城组沉积时期古湖盆卤水演化及碳酸盐矿物形成机理[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1248-1263.]

0 引言

碳酸盐矿物的形成以及分布具有广泛性,而且

不论是海洋盆地还是陆地环境的湖泊都广泛发育。碳酸盐矿物是沉积岩重要的组成部分,其形成过程与陆源碎屑物质具有本质的区别,其多是在沉积环

收稿日期:2015-12-07;修回日期:2016-03-06.

基金项目:山东省自然科学基金青年基金(编号:ZR2014DQ016);国家重点基础研究发展计划(“973”)(编号:2014CB239002);中国石油大学(华东)科研启动基金(编号:2013004);中央高校基本科研业务费专项资金(编号:16CX02030A)联合资助。

作者简介:余宽宏(1983-),男,四川广元人,讲师,博士,主要从事沉积学及储层地质学研究.E-mail:yukuanhong@upc.edu.cn.

境中由金属阳离子和碳酸根离子结合形成,即生成的过程不脱离沉积环境^[1]。在现代湖泊沉积物以及古代陆相湖盆沉积地层中,碳酸盐矿物以湖相碳酸盐岩的形式存在或者碳酸盐矿物混在其他陆源碎屑沉积物或者沉积岩中。

湖盆沉积水介质相对于海洋来说要敏感得多。构造活动、气候、物源以及水系发育程度等方面的影响因素稍微变化就会导致湖盆沉积水介质的强烈变化,从而引起碳酸盐矿物的沉淀。不论是现代湖泊还是古代湖盆,均经历了不同程度的咸化。根据湖盆咸化过程中析出的盐类矿物的种类,咸化湖盆可以分为碳酸盐湖(主要为碳酸盐矿物沉积)、硫酸盐湖(主要为膏盐沉积)和氯化物盐湖(主要为石盐等卤化物)^[2]。

碳酸盐矿物是湖盆咸化初级阶段的产物,因此其分布范围更广^[3]。本文所讨论的准噶尔盆地玛湖凹陷风城组沉积时期的古湖盆碳酸盐矿物沉积不仅包括了咸化初级阶段的 Mg、Ca 碳酸盐矿物,而且包括了大量的其他碳酸盐矿物,如碱矿。也就是说,准噶尔盆地玛湖凹陷风城组沉积时期湖盆的咸化程度高,发育至干盐湖的咸化阶段。另外,玛湖凹陷在咸化的过程中, HCO_3^- 阴离子的高含量控制了湖盆卤水演化方向,进一步控制了盐类矿物的类型。 HCO_3^- 阴离子与不同阳离子的结合形成了风城组不同类型的碳酸盐矿物。玛湖凹陷风城组由于埋深较大,目前的研究程度不深入。仅有的文献主要针对风城组的云质岩类(新疆油田将风城组富含白云石的岩石统称为云质岩),因为在云质岩类中有一定的油气产量或者油气显示^[4-20]。但是对风城组大套的含碱层段却缺乏系统的讨论,原因之一就是油气显示尚不明显。近些年,也有学者就玛湖凹陷古代碱湖的卤水演化对优质烃源岩的形成作用进行了探讨,认为风城组古代碱湖非常有利于优质烃源岩的形成,具有重要的油气地质意义^[21,22]。玛湖凹陷风城组沉积时期,火山活动强烈,湖盆的水介质演化比较复杂。目前对于玛湖凹陷风城组沉积时期的古卤水演化特征的讨论基本还是空白。系统地梳理玛湖凹陷风城组沉积时期的卤水演化对于认识风城组的矿物岩石特征以及油气地质特征具有重要的意义。

本文从现代及古代湖盆卤水演化规律的总结探讨出发,结合准噶尔盆地玛湖凹陷风城组沉积时期的地质背景,系统探讨湖盆卤水演化的规律,探讨湖盆咸化过程中碳酸盐矿物的演化规律及其控制因素。为湖盆咸化过程中的碳酸盐矿物沉积提供借鉴

意义。

1 研究区概况

玛湖凹陷位于准噶尔盆地西北缘,紧邻哈拉阿拉特山,受达尔布特逆冲断裂带的控制而形成典型的前陆盆地(图 1)。玛湖凹陷面积近 5 000 km²,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杂叠合盆地^[23,24]。风城组沉积时期,湖盆经历了不同程度的咸化并形成了各种盐类矿物,在平面及纵向上形成了不同盐类矿物的组合。风城组地层厚度巨大,达 800~1 800 m,为多种物质来源的混合,其中碳酸盐类矿物是风城组岩石重要的组成部分。

风城组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;风二段发育碱矿沉积,以大量碱矿的沉积为特征;风三段湖盆盐度降低,沉积 Mg—Ca 碳酸盐矿物为主。不同的岩相在平面上分布也具有规律性,靠近盆地的边缘为粗碎屑岩相带,即受边界断裂控制而形成的扇三角洲相,夏子街地区在风城组沉积时期以火山碎屑岩为主,玛湖凹陷的沉积中心区碱矿发育(图 2)。

风城组矿物及岩石的分布特征受物源及古地貌的控制比较明显。过百泉 1 井、风南 7 井、风南 1 井、风南 4 井、夏 72 井、夏 88 井及夏 76 井的地震剖面沿着风城组的顶界面拉平以后,可以明显看出地层厚度变化[图 2(a)]。研究区西南受到逆冲断裂的控制,形成前陆冲断带,沉积厚度巨大的粗碎屑岩,主要为扇三角洲相,单井沉积特征以百泉 1 井为例。研究区的北东方向为夏子街地区,古地貌为火山发育的高地,整体表现为平台区,单井以夏 72、夏 88、夏 76 井为例。风南 1 井、风南 7 井、风城 1 井等所在的范围代表了平台区向凹陷区过渡的部分,为斜坡区。粗碎屑岩相带及斜坡区之间为凹陷的中心区,沉积厚度大,盐类矿物代表了湖盆咸化的高级阶段[图 2(b)]。

2 风城组碳酸盐矿物类型及特征

2.1 盐类矿物特征

玛湖凹陷风城组沉积时期湖盆经历了不同程度的咸化,湖盆咸化的各个阶段均有代表性的盐类矿物,主要包括硫酸盐矿物、氯化物以及硼硅酸盐矿物(表 1)。其中,碳酸盐矿物的含量及种类占了绝对优势。碳酸盐矿物的类型又可以根据阳离子的类型划分为 Mg—Ca 碳酸盐矿物,主要为方解石(CaCO_3)、

白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、铁白云石 $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$ 。这些矿物为湖盆咸化初期沉淀而出的碳酸盐矿物,其产出的量比较大,而且主要分布在盆地的边缘,及研究区的古平台区,而湖盆的深凹陷区含量比较低^[25]。浅水平台区与湖盆深凹陷区之间的过渡区、以及盆地深凹区凝灰质发育的暗色层段主要发育同时含 Na^+ 及 $\text{Mg}^{2+}-\text{Ca}^{2+}$ 的过渡类型的碳酸盐矿物,主要包括 3 类:碳钠镁石 $[\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2]$ 、氯碳

钠镁石 $(\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{NaCl})$ 和碳钠钙石 $[\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3 \text{ 或 } \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{CaCO}_3]$,这 3 类碳酸盐矿物主要呈斑点状产于暗色的沉凝灰岩层段。另外,还有一类阳离子为 Na^+ 的碳酸盐矿物,包括重碳酸钠石: NaHCO_3 、天然碱 $(\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ 和碳酸钠石 (Na_2CO_3) ,这些钠碳酸盐统称为碱矿。

风城组碳酸盐矿物的类型代表了不同的咸化阶段。方解石及白云石是湖盆咸化的初期阶段形成的

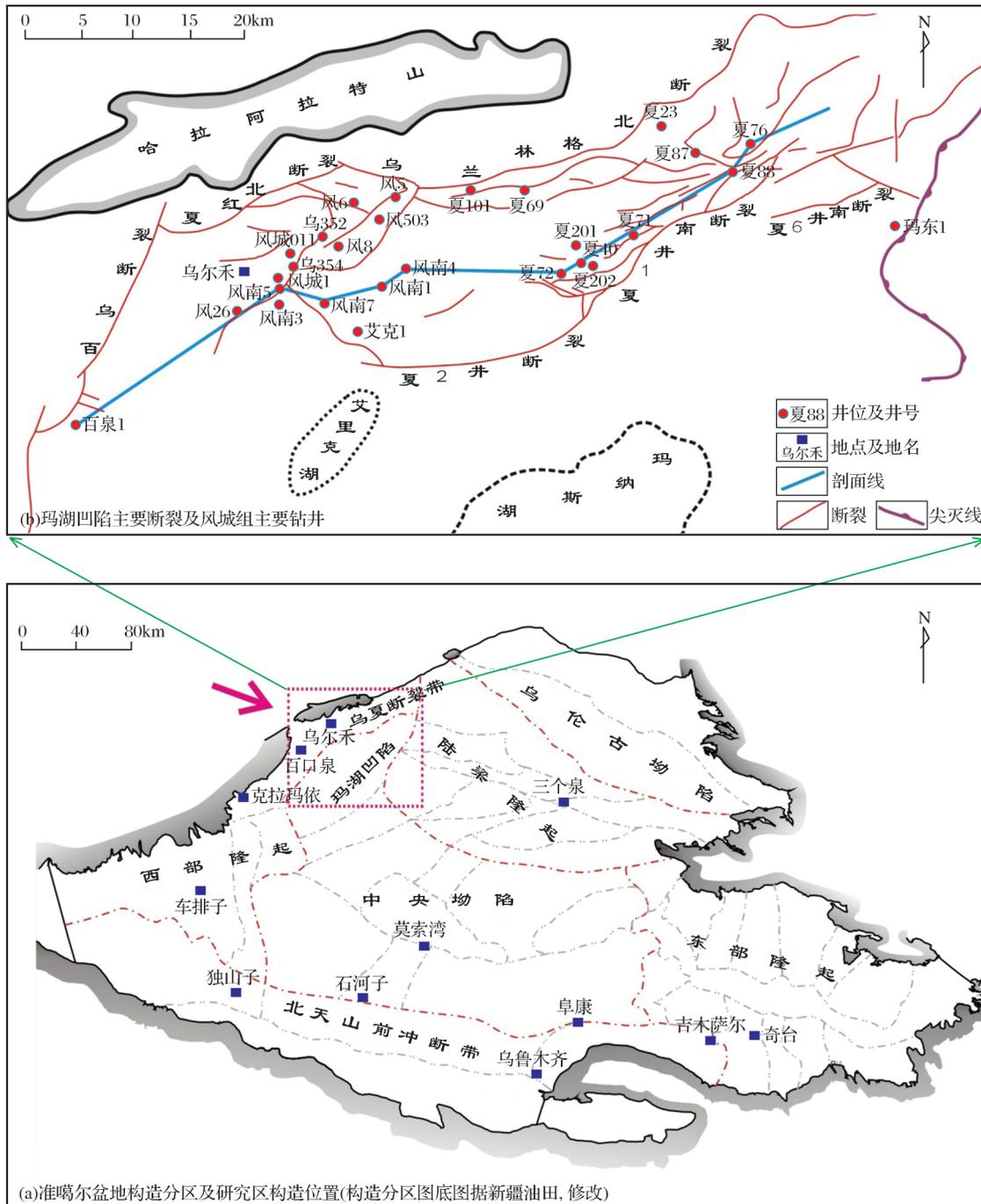


图 1 研究区构造位置及风城组主要钻井分布

Fig.1 Structural setting in study area and locations of main drilling wells

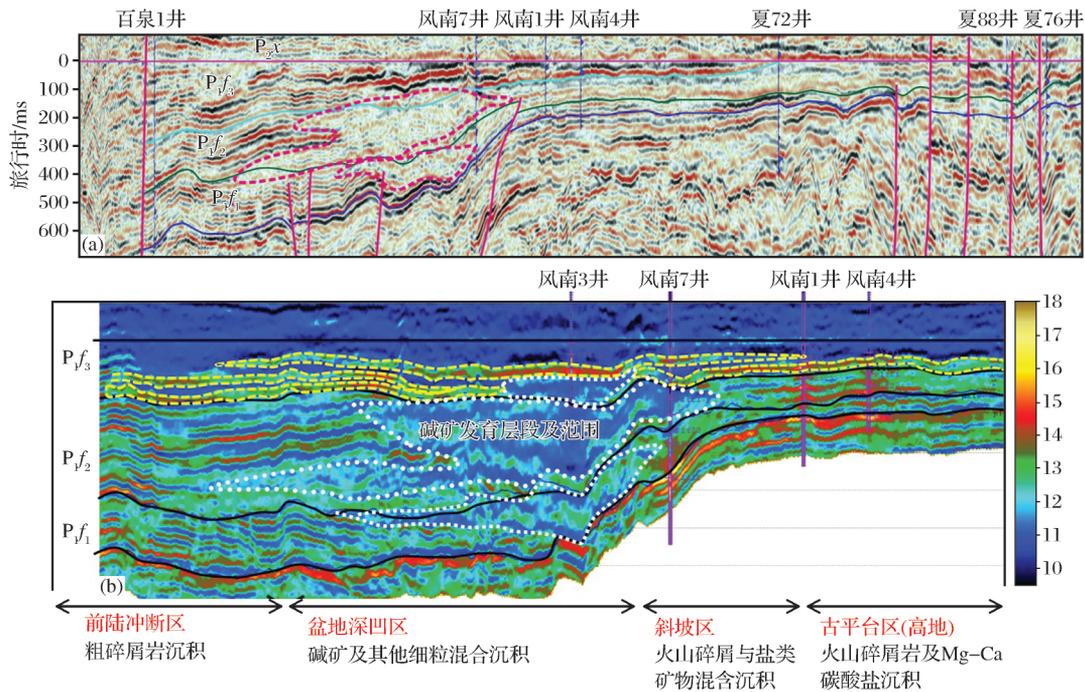


图2 准噶尔盆地玛湖凹陷东西向剖面特征(位置见图1;反演剖面据新疆油田^①,修改)
Fig.2 East-west section in Mahu Dpression, Junggar Basin

表1 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组主要盐类矿物

Table 1 Main salty minerals of Fengcheng Formation in Mahu Depression, Junggar Basin

化合物大类	亚类	主要的盐类矿物	产出位置
碳酸盐	Mg—Ca 碳酸盐	方解石[CaCO ₃] 白云石[CaMg(CO ₃) ₂] 铁白云石[CaFe(CO ₃) ₂]	古平台区及盆地边缘浅水区
	Mg—Ca—Na 碳酸盐	碳钠镁石[Na ₂ Mg(CO ₃) ₂] 氯碳钠镁石[Na ₂ CO ₃ ·MgCO ₃ ·NaCl] 碳钠钙石[Na ₂ Ca ₂ (CO ₃) ₃ 或Na ₂ CO ₃ ·2CaCO ₃]	斜坡区及盆地深凹陷区 含碱层段暗色沉凝灰岩相段
	Na 碳酸盐 (碱矿)	重碳酸钠石[NaHCO ₃] 天然碱[Na ₂ CO ₃ ·NaHCO ₂ ·2H ₂ O] 碳酸钠石[Na ₂ CO ₃]	比较纯净的碱矿层, 主要产出于盆地深凹陷区
硫酸盐		硬石膏[CaSO ₄]	含量少,星散状分布
卤化物		石盐[NaCl]	含量少

矿物,代表湖盆的盐度不是太高,优先沉淀出来; Mg²⁺、Ca²⁺ 和 Na⁺ 混合出现在碳酸盐矿物中代表一种过渡状态;纯粹的 Na⁺ 碳酸盐是 Mg²⁺、Ca²⁺ 均消耗完以后形成的碳酸盐矿物,主要为碱矿,代表了湖盆咸化的高级阶段。

关于方解石及白云石等常见的初级蒸发阶段的碳酸盐矿物现有的文献论述较多,本文不再详细介绍其特征,重点就过渡状态的碳酸盐矿物以及碱矿的特征及形成过程做一些介绍。Mg—Ca—Na 碳酸

盐矿物以及 Na 碳酸盐矿物的镜下特征以及宏观分布特征见图3。从风城组的岩石样品中可以识别出图中常见的碳酸盐矿物,但这些矿物中以碱矿及碳钠钙石的分布最广。

除了以上介绍的这些碳酸盐矿物,风城组还含有其他一些盐类矿物,常见的如硬石膏、石盐,但其含量非常低。硬石膏的含量在取心段含量很低,呈放射状的晶簇分散分布在沉凝灰岩基质中,石盐在光学显微镜下很难看到,在扫描电镜下能见到一些。

① 新疆油田公司勘探开发研究院,北京石大油源科技开发有限公司.玛湖西斜坡风城组致密甜点划分及有利区优选.内部资料,2013.

风城组的盐类矿物种类丰富,并且局部层段富集程度高。对该组盐类矿物有系统总结的如蒋宜勤

等^[26]的研究。尽管随着研究的深入,风城组的盐类矿物逐渐被认识,但就其组合关系以及其代表的咸

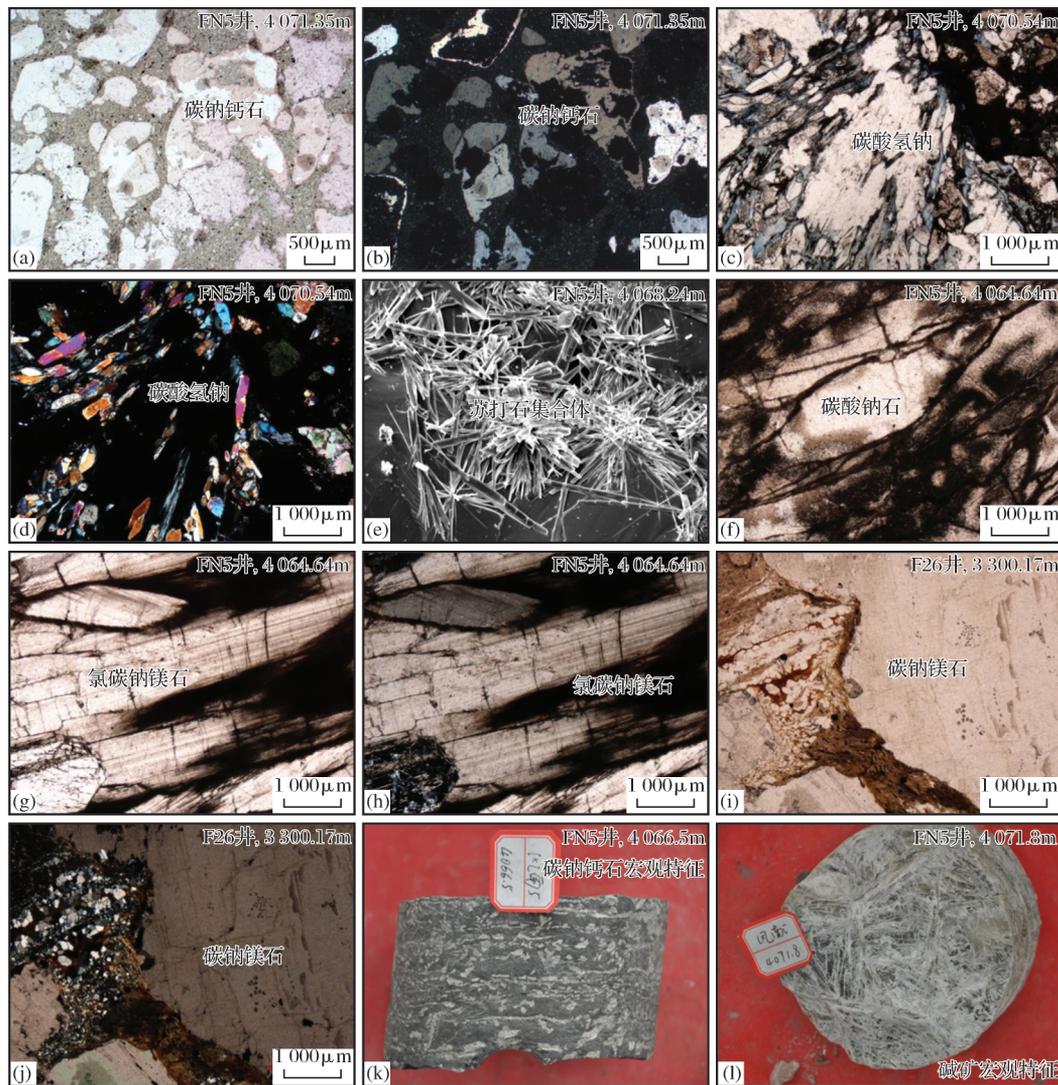


图3 玛湖凹陷风城组碳酸盐矿物特征(方解石白云石除外)

Fig.3 Characteristics of carbonate minerals in Fengcheng Formation, Mahu Depression (calcite and dolomite excepted)

(a) 碳钠钙石晶体,没有一定的晶体形态,分布于长英质为主的沉凝灰岩中并呈包裹长石及石英小颗粒的状态产出,染色后呈淡红色,具有和方解石相似的染色特征,样品位于凹陷中心区风南5井,4 071.35m,单偏光;(b) 碳钠钙石晶体正交光下的特征,凝灰质光性较差,样品同(a),视域相同;(c) 碳酸氢钠晶体,形态较好,干净透明,风南5井,4 070.54m,单偏光(照片来自新疆油田资料);(d) 碳酸氢钠晶体,风南5井,4 070.54m,正交光(照片来自新疆油田资料);(e) 扫描电镜下呈簇状分布的苏打石晶体,风南5井,4 068.24m(新疆油田资料);(f) 碳酸钠石晶体,风南5井,4 064.64m(照片来自新疆油田资料);(g)、(h) 氯碳钠镁石光学显微镜下特征,风南5井,4 064.64m(照片来自新疆油田资料);(i)、(j) 碳钠镁石晶体,风南5井,3 300.17m(照片来自新疆油田资料);(k) 碳钠钙石宏观产出状态,呈蝌蚪状、星点状分布在暗色的凝灰质孔隙中,风南5井含碱层段暗色层;(l) 碱矿宏观特征,干净透明的碱矿晶体,风南5井碱矿层段

化湖盆水体的演变及形成的机理仍然模糊不清。

2.2 碳酸盐矿物分布规律

以上碳酸盐矿物可以按照金属阳离子的类型分为3类:第一类为Mg—Ca碳酸盐,主要为方解石和白云石。这类碳酸盐矿物主要分布在夏子街地区的古浅水平台区或者是呈环带状分布在盆地的边缘。第二类为Mg—Ca—Na碳酸盐,这类碳酸盐矿物中阳

离子可以是Mg—Na组合,也可以是Ca—Na组合形成碳钠镁石、氯碳钠镁石、碳钠钙石矿物。这类碳酸盐矿物代表的是 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子消耗得差不多,浓度不足以形成方解石及白云石 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 碳酸盐矿物,而一部分碱金属 Na^+ 参与形成过渡型碳酸盐矿物。过渡型碳酸盐矿物主要发育在斜坡过渡环境以及深水凹陷区沉积水体相对淡化的阶段。第三类是碳酸

盐矿物中的金属阳离子全部为碱金属 Na^+ , 形成纯净的重碳酸钠石、天然碱、碳酸钠石, 本文将这种纯净的 Na 碳酸盐矿物统称为碱矿。以上 3 类碳酸盐矿物不论是在层位分布上还是古地貌分布上都分带明显, 从浅水区至深水区由 $\text{Mg}-\text{Ca}$ 碳酸盐矿物以及 $\text{Mg}-$

$\text{Ca}-\text{Na}$ 碳酸盐矿物以及 Na 碳酸盐矿物, 具有“牛眼”的分布模式, 代表了沉积水介质蒸发强度以及水体盐度的依次增加。另外, 由于 3 类碳酸盐矿物代表了湖盆咸化不同阶段形成的碳酸盐矿物, 因此, 3 类矿物很难共生, 分异度较高(图 4)。

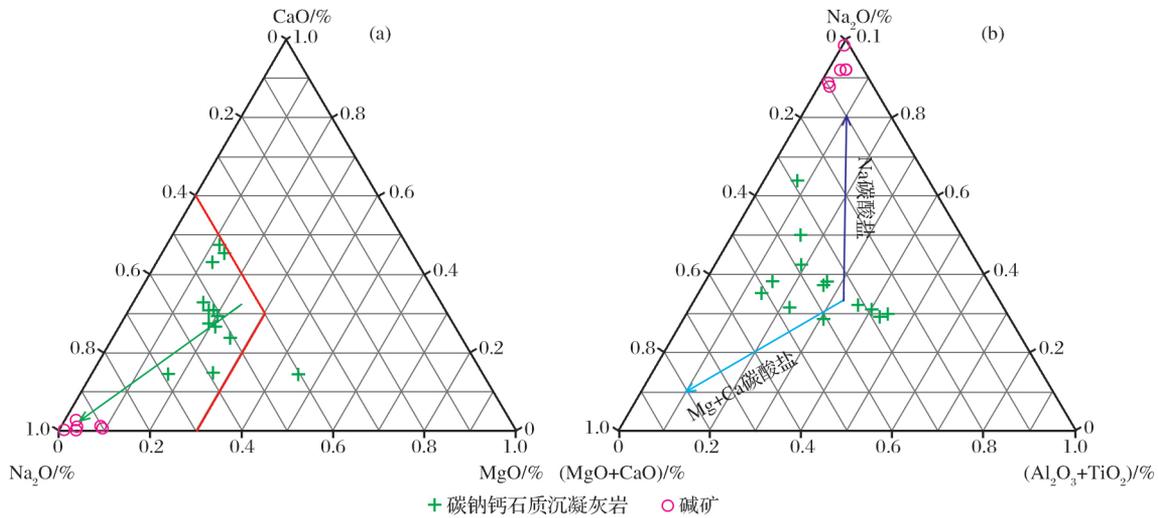


图 4 风南 5 井取心段主要元素三角图

Fig.4 Triangular chart of major elements(CaO, Na₂O, MgO) of core samples in Well Fengnan 5

2.3 风城组古水介质类型

玛湖凹陷风城组沉积时期湖盆强烈咸化, 盐类矿物中碳酸盐矿物占绝对主导, 因此为典型的碳酸盐型湖泊。另外, Na 碳酸盐在湖盆咸化的高级阶段异常发育, 形成厚层的碱矿, 因此也可以说玛湖凹陷风城组沉积时期古湖泊为典型的碱湖。地层水分析也表明风城组地层水为典型的 NaHCO_3 型。要分析玛湖凹陷古湖盆咸化机理, 需要从盐类矿物的离子来源入手探讨碳酸盐矿物沉淀的机理及控制因素。

3 卤水演化及咸化机理

3.1 湖盆卤水演化规律

盐类的沉淀过程以及盐类矿物的类型取决于输入湖盆的原始物质组成, 也即卤水中元素的构成控制了湖盆盐类矿物的沉淀。Eugster 等^[27]建立的湖盆卤水的构成及演化规律(图 5)。盐类矿物的蒸发沉淀要求湖盆相对封闭, 盆地周边的流体携带的矿物质在湖盆中不断富集, 蒸发量大才能形成盐类矿物层。封闭湖盆卤水的演化可以分为 3 条路径: 路径 I: 卤水中的碳酸氢根的含量远大于 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} , 这时 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 表现为相对缺失, 蒸发序列表现为钙质沉淀→天然碱。卤水演化的路径 I 基本上不会有石膏的沉淀, 肯尼亚的马加迪湖就是典型

的代表。路径 II 代表卤水中碳酸氢根缺乏, 在石灰质的矿物沉淀之后则沉淀石膏, 这种类型的卤水再进一步演化又可以分为两种情况。路径 III 的情况是碳酸氢根和 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的含量都不占绝对优势, 这种情况的卤水演化早期可以形成大量的 Mg 、 Ca 碳酸盐, 如高镁方解石和白云石, 其进一步演化取决于蒸发沉淀后剩余的阴离子类型。

图 5 中所列的情况涵盖了陆地环境卤水盐类矿物沉淀的过程。该流程图表明, 封闭湖盆蒸发过程中析出的盐类矿物的种类取决于输入物质的组成。因此在解释风城组含碱层段盐类矿物成因时, 需要根据其盐类矿物组成特征解释其卤水特征, 进而分析其可能的原始物质的来源问题。对于玛湖凹陷风城组沉积时期的碳酸盐矿物沉淀来说, 需要说明大量 Na 离子的来源问题, 以及大量碳酸氢根的形成原因。

另外, 对于封闭湖盆卤水构成分析表明, 其阴离子和阳离子也具有一定的规律。如果卤水中的阴离子主要为 HCO_3^- 离子, 则阳离子为 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的混合, Mg^{2+} 的含量比较低, 主要为 Na^+ 、 Ca^{2+} [图 6(a)]。如果阳离子主要为 Na^+ , 则阴离子是各种离子的混合 [图 6(b)]^[27]。因此, 玛湖凹陷风城组沉积时期古湖盆卤水浓缩的过程中, 主要形成 Na 碳酸盐和 Ca 碳酸盐, 这也很好地说明风

城组沉积时期,具有大量的 HCO_3^- 离子,控制了碱矿的沉淀。

3.2 湖盆咸化及成碱控制因素

3.2.1 湖盆咸化的控制因素

咸化湖盆的形成需要一定的构造条件、地貌和气候条件、充足的盐类物质来源。这些因素综合控制了湖盆的咸化。

(1) 构造条件: 构造、火山活动及冰川是形成咸

水湖重要的原因。一般认为湖盆咸化阶段对应差异性沉降作用和持续性断裂活动,这样才能形成湖盆咸化的比深值大的湖盆^[28],也即是典型的“高山深盆”地貌景观^[29-31]。湖盆相对封闭,盆地内的盐类物质才能持续聚集,这是形成大规模盐类沉积的重要条件^[30]。玛湖凹陷风城组沉积时期为挤压背景下的前陆盆地,具备发育“高山深盆”封闭型湖盆的构造背景条件。

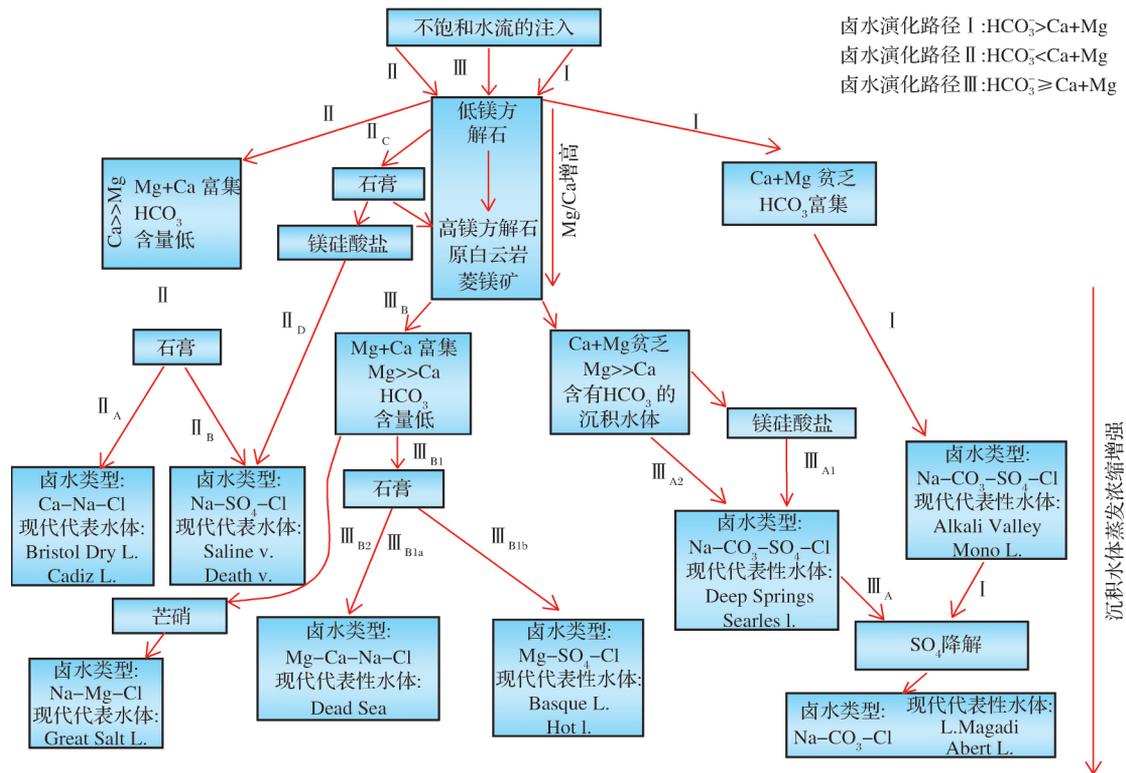


图5 湖盆不同类型卤水演化流程^[27]

Fig.5 Evaporating flows of different kinds of brine in lakes^[27]

(2) 气候条件: 气温和降水是控制盐湖存在的主要气候因素^[32]。盐类矿物是在蒸发量大于补给量(降雨量+径流量)的干旱或半干旱气候条件下的产物^[33]。Zhu等^[34]通过系统的孢粉学研究认为,准噶尔盆地在二叠纪属于半干旱气候,雨量较少。玛湖凹陷在早二叠世具备干旱蒸发的气候条件,表明蒸发量大于补给量的情况出现频繁,因此易于导致封闭湖盆盐类矿物的沉淀析出。盆地周缘的洪积扇也能从一个侧面反映干旱气候,导致洪积物与盐湖沉积伴生。玛湖凹陷风城组沉积时期,盐类矿物主要发育在湖盆的中心区、斜坡区以及浅水平台区,而凹陷的边缘发育厚层的冲积相粗碎屑岩,说明风城组沉积时期的古气候环境为易发生洪水沉积的干旱环境。

(3) 盐类物质来源: 对于湖盆咸化的“盐源”,目

前的观点较多,但归结起来,就是水盐收支失衡: ①含盐母岩的风化: 地表原岩经过风化淋滤,易溶盐类物质被地表水和地下潜流带入湖盆^[28],这其中包括岩石的风化分解和盐层的淋滤溶解。周围隆起的基岩往往含有大量碳酸盐、石膏、石盐等,他们可向凹陷提供丰富的沉积物和盐类物质^[29]。典型的实例如四川盆地晚三叠世咸化环境的形成,得益于嘉陵江组—雷口坡组大量盐岩、膏岩的剥蚀以及盐分的长期输入^[35]。②成土母质中盐分的溶解: 盆地周围成土母质中的易溶矿物质,经过淋滤后,再由地表径流和地下水带入盆地沉积^[36],典型的实例如焉耆盆地现代盐类沉积^[37]。干旱地区土壤中的盐分比湿润地区高,缺乏适当的排水时,在毛细管作用下盐分向上迁移,形成碱土和黑碱土,他们含有碱盐和钠

盐,它们是盐湖的重要盐源。③海侵作用:海侵的海水提供盐分^[13,38]。④火山作用形成的深部热卤水^[39]。⑤深部含盐层系的溶解上移:来源于下部含盐岩系,通过深大断裂的上升泉溶解了地下深部的含岩盐系中盐类物质,如潜江凹陷潜江组盐类物质来源于盆地深层(如白垩系渔洋组—古近系新沟嘴组)中的盐类矿物以热卤水的形式带入湖盆^[29]。⑥海水、风载盐等:对于近岸的封闭或者未封闭的潟湖,海水是最主要的盐分来源^[32]。海洋盐作为微粒或者干粒被风吹到远离海岸的陆地^[32]。玛湖凹陷风城组沉积时期的湖盆咸化盐类以碳酸盐占绝对主导。基岩火成岩的化学组成以及碱性环境凝灰质的水解作用是其主要的原始物质来源。

3.2.2 湖盆咸化析盐的模式

关于湖盆咸化模式,也即是湖盆中盐类组分析出的方式的认识差异也较大,目前有代表性的模式有“深水成盐”、“浅水成盐”、“海侵成盐”等。

(1)深水成盐:该模式认为湖盆卤水分层是盐类沉积的基础。湖盆水体据盐度分层以后,下层卤水盐

度高,盐类物质结晶析出。国内研究实例如东营凹陷沙四段蒸发岩类沉积,物质基础为沿着同沉积深大断裂向上运移的古老地层中的盐类^[40]。金强等^[2,41,42]认为东濮凹陷盐类沉积属于这种模式。

(2)浅水成盐:这种成因模式类似于“萨布哈”。在干旱的气候环境下,强烈的蒸发将湖水中的溶液变得饱和,盐类结晶析出。

(3)海侵成盐:这种成因模式认为盐类的物质来源主要是海侵作用。其成因解释需要提供海侵的证据,如海绿石、海相生物化石以及代表海相环境的地化指标。玛湖凹陷风城组沉积时期的碳酸盐矿物的类型及分布基本上具有“牛眼”的特征,Mg、Ca 碳酸盐矿物(方解石、白云石)以夏子街浅水平台区以及凹陷中心的周缘低水位期的湖盆边缘为主,而 Na 碳酸盐(碱矿)主要分布在凹陷的中心。从盐度的分布来说,也具有从浅水区至凹陷中心区矿化度依次增高的变化趋势(图 7)。因此,总体上来说,强烈的蒸发还是玛湖凹陷风城组碳酸盐矿物沉淀的主要机理。

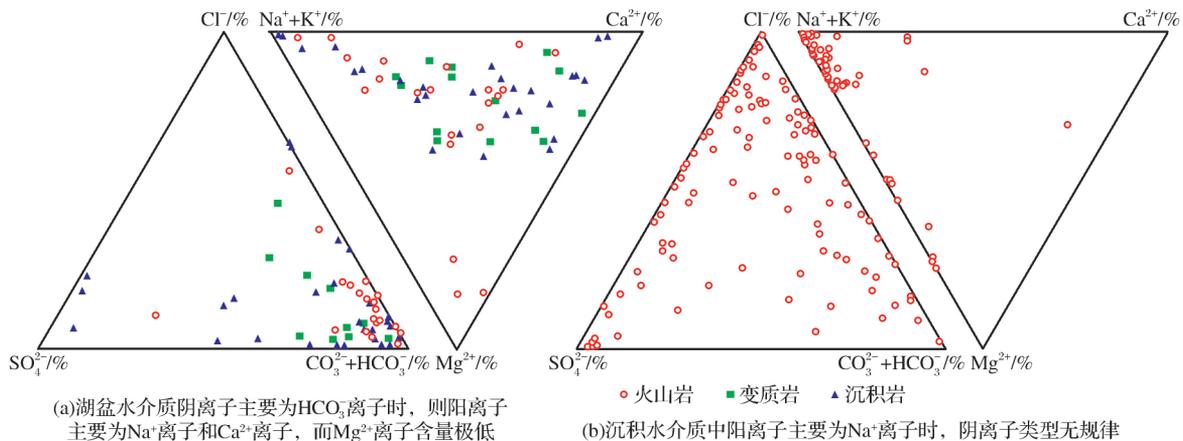


图 6 现代封闭湖盆卤水阴离子和阳离子构成的统计规律^[27]
 Fig.6 Composition of negative ions and positive ions of brine in modern closed lakes^[27]

3.2.3 湖盆成碱控制因素

碳酸盐矿物中的阳离子为碱金属离子 Na 时,称为碱矿。碱矿(也即 Na 碳酸盐)沉积取决于湖盆离子的构成。郑喜玉等^[43,44]通过大苏布碱湖的研究认为,湖水中 Na⁺ 和阴离子 HCO₃⁻, CO₃²⁻ 的含量高,是影响和决定卤水成盐演化方向及形成碳酸盐岩类沉积的主要因素。盐类的水化学类型为碳酸盐型盐湖。大苏布湖良好的 HCO₃⁻, CO₃²⁻ 区域水文地球化学背景是形成碳酸盐型湖盆的基本条件。天然碱的形成途径主要有:①化合成碱;②生物成碱;③置换成碱^[43,44]。区域具有 HCO₃⁻, CO₃²⁻ 水化学背景是化合

成碱的基础,芒硝脱硫的还原产物与碳酸水发生反应可以形成生物成因的碱矿,在自然界碳酸过剩的情况下,硫酸钠或者氯化钠与碳酸钙作用而形成苏打,为置换成因的成碱过程。如果能见到石盐、碳酸钠与碳酸钙共存,这是置换成碱的证据,但这种置换成碱的程度和过程,还有待进一步深入研究^[43,44]。贾国东等^[45]通过内蒙古合同察汗淖碱湖的生物地球化学研究认为,在碳酸盐型湖盆中,钠的富集就是碱矿的富集,富集钠元素的干旱耐盐碱植被对湖水富集碱质具有重要的贡献。气候的骤然变冷也有利于碱矿的沉积^[46]。在碱湖形成的地球化学过程中,沉积水体

中心的湖盆。风城组沉积早期,大部分的火山喷发位于陆地上,主要依靠大气中高的 CO₂ 分压使得 CO₂ 溶解在沉积水体中形成碳酸盐矿物沉积所需要的充足的 HCO₃⁻。

3.4 阳离子组成及来源

碳酸盐矿物的类型主要由阳离子类型控制,要形成玛湖凹陷风城组大规模的 Na 碳酸盐,需要大量 Na⁺。对于火山活动同样强烈的肯尼亚现代碱

湖实例来说,火山作用是其重要的 Na⁺ 来源,而玛湖凹陷风城组大量的 Na⁺ 来源也与火山活动具有密切的关系。

Na⁺ 的来源可能为周围风化物质的带入,也可能是深部物质的供给,但归根结底都与研究区的火山活动或者火山岩有重要的关系。早二叠世频发的火山活动、断裂系统、复杂的构造背景以及亚热带的古气候提供了碳酸盐矿物沉淀的重要的物质来源^[62]。

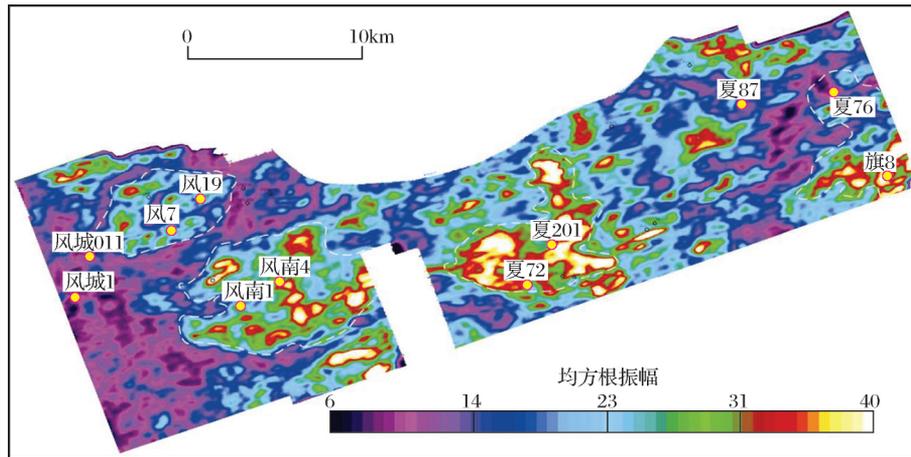
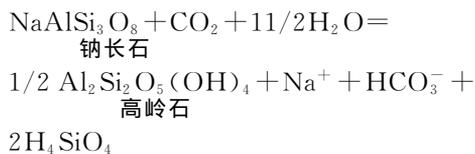


图 8 乌—夏地区风一段顶下 60ms、40Hz 分频均方根振幅图及火山群划分^[66]

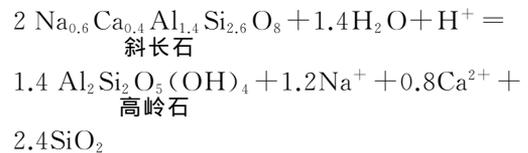
Fig.8 Distribution of neo-volcanic group and frequency division root-mean-square amplitude of 60ms、40Hz under Feng1 segment of Fengcheng Formation in Wuerhe-Xiazijie area^[66]

岩石地化分析表明,准噶尔盆地西北缘、夏子街地区、白碱滩地区、陆梁地区石炭系及下二叠统火山岩主量元素中 CaO 和 Na₂O 的含量远远高于 K₂O 的含量,也就是说基底的火山岩富含钙长石分子以及钠长石分子,而钾长石分子含量很低^[55,56,63]。而准噶尔盆地北部以及东部地区的基底火山岩 Na₂O 相对于 K₂O 不占优势(图 9)。就准噶尔盆地全盆地火山岩化学组成来说,整体表现为低 K 含量的特征^[64,65]。另外,风城组岩石结构组分中 Na 长石的含量非常高,也说明早二叠世火山物质的组成中钠长石占有很高的比重。

火山岩及火山喷发过程中的火山碎屑物质向沉积水体中提供 Na⁺ 的过程包括基岩的风化以及凝灰物质的水解。其原理可以表示为:



斜长石含不同比例的 Na 和 Ca,水解后增加沉积水体的 Na 离子和 Ca 离子的浓度,提供成碱离子。



另外,碱性水介质能够增强钠长石的溶解^[68]。沉积水体中溶解的大量 CO₂ 更加速了 Na 长石以及斜长石(含 Na、Ca)的水解,并提供碳酸盐沉淀所需的大量金属阳离子。

3.5 碳酸盐矿物沉淀序列及模式

Mg、Ca 碳酸盐(方解石、白云石)的沉淀为湖盆咸化早期的阶段,待 Mg²⁺、Ca²⁺ 消耗殆尽,Na⁺ 与多余的 HCO₃⁻ 离子结合形成碱矿。本文根据玛湖凹陷风城组沉积时期的湖盆演化情况,分别建立了低水位期碳酸盐矿物沉淀模式(图 10)和高水位期碳酸盐矿物沉淀模式(图 11)。

当湖盆水位较低的时候,沉积水体的面积有限,古地貌为平台区及斜坡区的夏子街地区位于陆上,火山碎屑物质的沉积位于水面之上,部分火山喷发位于沉积水体之下。火山喷发出大量的 CO₂ 气体,增加了大气中的 CO₂ 分压。另外,火山喷发在地表形成

大量的火山碎屑沉积。大气中的 CO_2 通过降雨将大量的 CO_2 溶解形成 HCO_3^- 而降落至地表。降落至沉积水体则提高了沉积水体 HCO_3^- 的含量,降落至火山凝灰物质沉积区则加速其水解。富含 HCO_3^- 的雨水会加速基岩区富含 Na^+ 、 Ca^{2+} 的基岩风化^[69]。风化产物为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SiO_2 ,并随流水带入沉积水体,

提高了沉积水体 Na^+ 、 Ca^{2+} 的含量。位于沉积水体下的火山喷发携带的大量 CO_2 气体直接溶于沉积水体形成 HCO_3^- 。降落至沉积水体的凝灰质和火成岩的物质组成一样为富含 Na、Ca 的凝灰质,在碱性水介质中加速水解而提供 Na^+ 和 Ca^{2+} 。在湖盆蒸发浓缩的过程中,湖盆的边缘浓缩相对要快, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 优

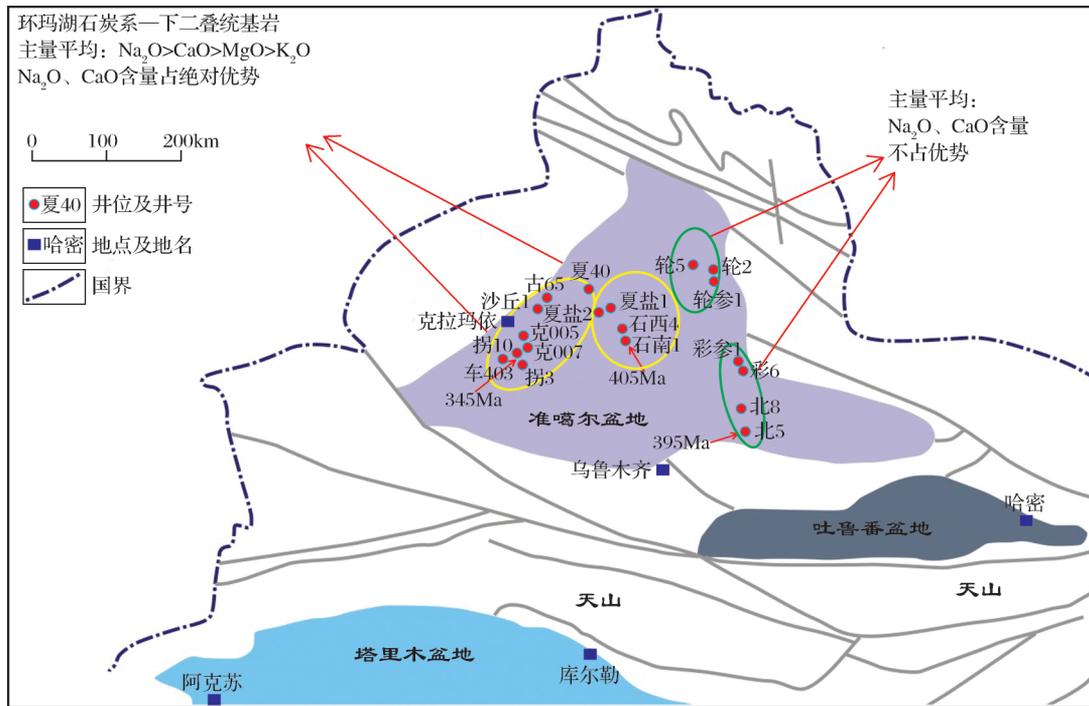


图9 准噶尔盆地石炭系一下二叠统火山岩基岩主量元素含量特征(底图及数据据文献[67])

Fig.9 Characteristics of major elements of Carboniferous-Lower Permian volcanic rocks in Junggar Basin(base map and primary data from Ref.[67])

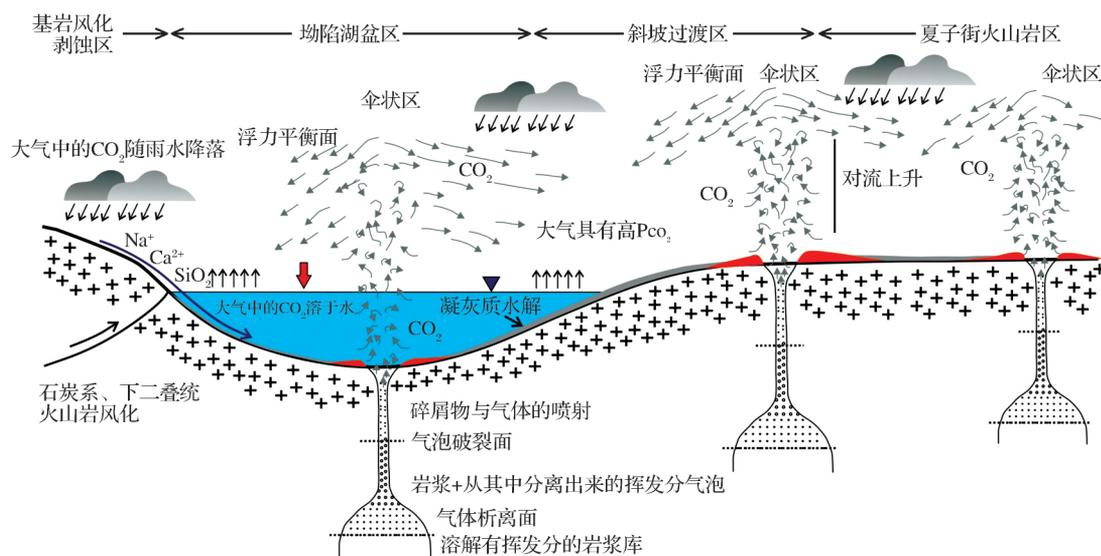


图10 玛湖凹陷低水位其湖盆咸化机理及碳酸盐矿物沉淀模式(沿火山通道岩浆喷发过程的内容据文献[70])

Fig.10 Mode chart of brine evolution and carbonate minerals evaporation in ancient Mahu Depression at low water level (volcanic eruption mode modified from Ref.[70])

先与 HCO_3^- 结合形成方解石及白云石。待 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 大量消耗后, HCO_3^- 依然有大量的富余, 并与 Na^+ 结合形成 Na 碳酸盐(碱矿)。

当湖盆水位较高的时候, 沉积水体的离子来源

与湖盆低水位期一样, 只是在碳酸盐矿物沉积分区上有差异。Mg、Ca 碳酸盐矿物一般来说易于发育在湖盆相对浅水的位置, 其重要的原因就是湖盆蒸发浓缩的过程中, 浅水区沉积水体的盐度要比深

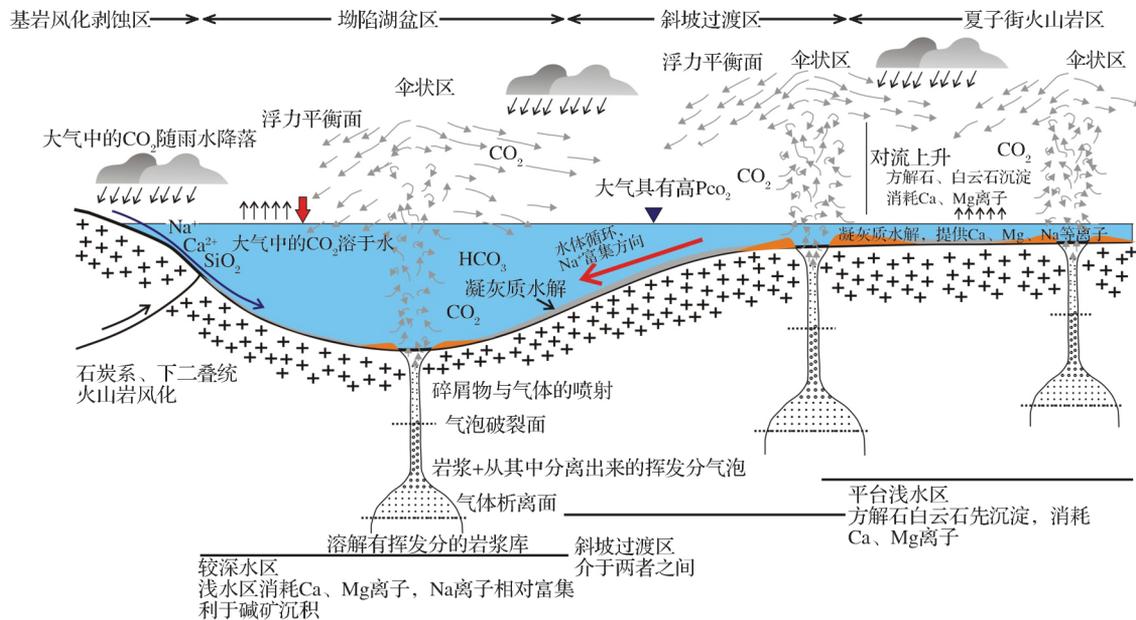


图 11 玛湖凹陷高水位其湖盆咸化机理及碳酸盐矿物沉淀模式(沿火山通道岩浆喷发过程的内容据文献[70])

Fig.11 Mode chart of brine evolution and carbonate minerals evaporation in ancient Mahu Depression at high water level(volcanic eruption mode modified from Ref.[70])

水区高,碳酸盐矿物在浅水平台区优先沉淀后。随着湖盆的进一步蒸发浓缩,沉积水体的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 大量减少,并在靠近湖盆的斜坡区以及沉积中心区形成 Mg、Ca 与 Na 过渡型的碳酸盐矿物以及 Na 碳酸盐矿物。

4 结论

通过玛湖凹陷风城组盐类矿物特征研究以及岩石地化特征的归纳分析,共得出以下几点认识:

(1)玛湖凹陷风城组沉积时期为典型的碳酸盐型盐湖,碳酸盐矿物在盐类矿物中占了绝对高的比例。碳酸盐矿物可以根据阳离子的类型划分为 3 类:Mg、Ca 型碳酸盐矿物(方解石、白云石);Mg、Ca 与 Na 过渡型碳酸盐矿物(碳钠钙石、碳钠镁石、氯碳钠镁石);Na 碳酸盐矿物(碳酸氢钠、碳酸钠)。

(2)3 类碳酸盐矿物代表了湖盆咸化程度的依次增高, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 首先与 HCO_3^- 离子结合、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 与 HCO_3^- 结合形成过渡型碳酸盐矿物、 Na^+ 与 HCO_3^- 结合形成 Na 碳酸盐矿物。

(3)玛湖凹陷风城组沉积时期湖盆盐类矿物的

沉积取决于湖盆卤水性质,充足的 HCO_3^- 离子是湖盆向碳酸盐型咸化湖盆演化的重要基础,决定了湖盆卤水演化的方向。

(4)火山活动对于风城组沉积时期的碳酸盐矿物沉淀起了决定性的作用。火山喷发提供了大量的 CO_2 气体,溶解于沉积水介质中形成充足的 HCO_3^- 阴离子。而火山喷发形成的凝灰质以及研究区石炭纪一早二叠世火山岩富 Na、Ca 的特征也决定了咸化湖盆中金属阳离子的类型,从而决定了碳酸盐矿物的沉淀。 Na^+ 、 Ca^{2+} 主要来源于富含钠长石分子及钙长石分子的基岩风化以及火山喷发富钠的凝灰质水解。大气中高 CO_2 分压形成的酸雨加速了基岩的风化,碱性水介质能加速凝灰物质的水解。火山活动为玛湖凹陷风城组沉积时期的碳酸盐矿物沉淀提供了丰富的基础物质。

参考文献(References)

[1] James N P, Jones B. Origin of Carbonate Sedimentary Rocks [M]. Hoboken: Wiley, 2015: 1-66.
 [2] Jin Qiang, Zhu Guangyou, Wang Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine en-

- vironments[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(4): 19-23. [金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 19-23.]
- [3] Yu Zhitong, Liu Xinqi, Wang Yong, *et al.* Evolution of Jilantai Salt Lake, Inner Mongolia in the last 13.8 ka[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(4): 629-636. [于志同, 刘兴起, 王永, 等. 13.8ka 以来内蒙古乌兰泰盐湖的演化过程[J]. 湖泊科学, 2012, 24(4): 629-636.]
- [4] Feng Youliang, Zhang Yijie, Wang Ruiju, *et al.* Dolomites genesis and hydrocarbon enrichment of the Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 685-692. [冯有良, 张义杰, 王瑞菊, 等. 准噶尔盆地西北缘风城组白云岩成因及油气富集因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 685-692.]
- [5] Chen Lei, Ding Jing, Pan Weiqing, *et al.* Characteristics of high-quality reservoir and its controlling factors of dolomitic rock in Fengcheng Formation of west slope in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(3): 8-11. [陈磊, 丁靖, 潘伟卿, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡二叠系风城组云质岩优质储层特征及控制因素[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(3): 8-11.]
- [6] Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, *et al.* Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 657-667. [匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 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[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 657-667.]
- [7] Lu Xinchuan, Zhang Shuncun, Shi Ji'an. Dolomite genesis and geochemical characteristics of permian Fengcheng Formation in Wuerhe—Fengcheng area, northwestern Junggar Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2012, 48(6): 8-14. [鲁新川, 张顺存, 史基安. 准噶尔盆地西北缘乌鲁木齐—风城地区二叠系风城组白云岩地球化学特征及成因分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(6): 8-14.]
- [8] Xue Jingjing, Sun Jing, Zhu Xiaomin, *et al.* Characteristics and formation mechanism for dolomite reservoir of permian Fengcheng Formation in Junggar Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(4): 755-761. [薛晶晶, 孙靖, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地二叠系风城组白云岩储层特征及成因机理分析[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 755-761.]
- [9] Ying Jianguo, Ding Chao, Gu Qing, *et al.* Reservoir characteristics and controlling factors of dolomitic rocks of Fengcheng Formation in Wufeng area, northwestern margin of Juggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(5): 83-88, 106. [殷建国, 丁超, 辜清, 等. 准噶尔盆地西北缘乌风地区风城组白云岩类储层特征及控制因素分析[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(5): 83-88, 106.]
- [10] Zhang Jie, Shou Jianfeng, Wen Yingchu, *et al.* Mechanism of dedolomitization and its rebuilding to reservoir[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 69-84. [张杰, 寿建峰, 文应初, 等. 去白云石化作用机理及其对储集层的改造[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 69-84.]
- [11] Pan Xiaotian. Forming Mechanism of Fengcheng Formation of Lacustrine Hydrothermal Dolomite in the Junggar Basin in Northwestern Margin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(CDUT), 2013: 1-62. [潘晓添. 准噶尔盆地西北缘风城组湖相热液白云岩形成机理[D]. 成都: 成都理工大学, 2013: 1-62.]
- [12] Pan Xiaotian, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, *et al.* Tight oil reservoir of Permian Fengcheng Formation in Urho area, Junggar Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 40(3): 315-325. [潘晓添, 郑荣才, 文华国, 等. 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组云质致密油储层特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 315-325.]
- [13] Yin Lu, Qu Jianhua, Qi Liqi, *et al.* Lacustrine dolomitic pattern of permian in Fengcheng area in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5): 542-544. [尹路, 瞿建华, 祁利祺, 等. 准噶尔盆地风城地区二叠系白云岩化模式[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 542-544.]
- [14] Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Tao Wenfang, *et al.* Origin of dolomitic reservoir rock in the Permian Fengcheng Formation in Wuxia area of the Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 38-45. [朱世发, 朱筱敏, 陶文芳, 等. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系风城组云质岩类成因研究[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 38-45.]
- [15] Gong Boshi, Wen Huaguo, Li Conglin, *et al.* Sedimentary environment of Fengcheng Formation in Urho area, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(2): 59-66. [宫博识, 文华国, 李丛林, 等. 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组沉积环境分析[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(2): 59-66.]
- [16] Liu Yinghui, Zhu Xiaomin, Zhu Mao, *et al.* Characteristics of tight oil reservoirs of the Permian Fengcheng Formation in Wuxia area, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(4): 66-72. [刘英辉, 朱筱敏, 朱茂, 等. 准噶尔盆地乌—夏地区二叠系风城组致密油储层特征[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(4): 66-72.]
- [17] Wang Junhuai, Liu Yinghui, Wan Ce, *et al.* Characteristics and origin of dolomitic tuff in the Permian Fengcheng Formation in Wuxia area of Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(2): 157-168. [王俊怀, 刘英辉, 万策, 等. 准噶尔盆地乌—夏地区二叠系风城组云质岩特征及成因[J]. 古地理学报, 2014, 16(2): 157-168.]
- [18] Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Yinghui, *et al.* Petrological and geochemical features of dolomitic rocks in the Lower Permian Fengcheng Formation in Wuerhe—Xiazijie area, Junggar Basin[J]. Geological Review, 2014, 60(5): 1113-1122. [朱世发, 朱筱敏, 刘英辉, 等. 准噶尔盆地西北缘北东段下二叠统风城组白云岩类岩石学和岩石地球化学特征[J]. 地质论评, 2014, 60(5): 1113-1122.]
- [19] Fu Rao, Zheng Rongcai, Chang Hailiang, *et al.* Lacustrine “white smoke type” exhalative rock: A new type of tight oil

- reservoir: A case study from Lower Permian Fengcheng Formation in Urho area, western margin of Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(3): 32-42. [傅饶, 郑荣才, 常海亮, 等. 湖相“白烟型”喷流岩——新型的致密油储层类型——以准噶尔盆地西缘乌尔禾地区风城组为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 32-42.]
- [20] Jia Bin, Wen Huaguo, Li Yingbo, *et al.* Fluid inclusions in the salt minerals from the Permian Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2015, 35(1): 33-42. [贾斌, 文华国, 李颖博, 等. 准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组盐类矿物流体包裹体特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(1): 33-42.]
- [21] Cao Jian, Lei Dewen, Li Yuwen, *et al.* Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 781-790. [曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地二叠系风城组[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 781-790.]
- [22] Abulimiti, Cao Jian, Chen Jing, *et al.* Origin and Occurrence of highly matured oil and gas in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(4): 379-384. [阿布力米提, 曹剑, 陈静, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷高成熟油气成因与分布[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 379-384.]
- [23] Wu Kongyou, Zha Min, Wang Xulong, *et al.* Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(3): 217-222. [吴孔友, 查明, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识[J]. 地球学报, 2005, 26(3): 217-222.]
- [24] Ma Zongjin, Qu Guosheng, Li Tao, *et al.* Tectonic coupling and segmentation of marginal structural belt in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(3): 271-277. [马宗晋, 曲国胜, 李涛, 等. 准噶尔盆地盆地构造耦合与分段性[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(3): 271-277.]
- [25] Zou Niuniu, Zhang Daquan, Wu Tao, *et al.* Reservoir characteristics and controlling factors in the dolomitic elastic rocks of Fengcheng Formation in northwestern Juggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 861-870. [邹妞妞, 张大权, 吴涛, 等. 准噶尔西北缘风城组云质碎屑岩类储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 861-870.]
- [26] Jiang Yiqin, Wen Huaguo, Qi Liqi, *et al.* Salt minerals and their genesis of the permian fengcheng formation in urho area, Junggar Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2012, 32(2): 105-114. [蒋宜勤, 文华国, 祁利祺, 等. 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[J]. 矿物岩石, 2012, 32(2): 105-114.]
- [27] Eugster H P. Geochemistry of evaporitic lacustrine deposits[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1980(8): 35-63.
- [28] Huang Chunju, Chen Kaiyuan, Yang Xianghua. Characteristics of sequence stratigraphy in the saline lake basin[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(2): 134-138. [黄春菊, 陈开远, 杨香华. 盐湖盆地层序地层特征[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(2): 134-138.]
- [29] Wang Guoli, Yang Yuqing, Zhang Yongsheng, *et al.* Sedimentary microfacies and evolution of the Qianjiang Formation of Paleogene at Wangchang area in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(2): 140-150. [王国力, 杨玉卿, 张永生, 等. 江汉盆地潜江凹陷王场地区古近系潜江组沉积微相及其演变[J]. 古地理学报, 2004, 6(2): 140-150.]
- [30] Yuan Jianqi, Huo Chungyu, Cai Keqin. The high mountain-deep basin saline environment: A new genetic model of salt deposits[J]. Geological Review, 2012, 29(2): 159-165. [袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析[J]. 地质论评, 2012, 29(2): 159-165.]
- [31] Shi Hui, Liu Zhen, Lian Liangda, *et al.* Enrichment regularity of lithologic reservoirs in plateau saline lacustrine basin: Taking the southwestern Qaidam Basin for example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 701-711. [施辉, 刘震, 连良达, 等. 高原咸化湖盆岩性油气藏富集规律——以柴达木盆地西南区为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 701-711.]
- [32] Wang Sumin. Physics and chemistry of saline lakes[J]. Journal of Lake Sciences, 1993, 5(3): 278-286. [王苏民. 世界咸水湖的物理与化学特性[J]. 湖泊科学, 1993, 5(3): 278-286.]
- [33] Türkmen İ, Özkul M. Sedimentology and evaporite genesis of neogene continental sabkha playa complex, Karakecili Basin, Central Anatolia, Turkey[J]. Carbonates & Evaporites, 1999, 14(1): 21-31.
- [34] Zhu Huaicheng, Ouyang Shu, Zhan Jiazhen, *et al.* Comparison of Permian palynological assemblages from the Junggar and Tarim Basins and their phytoprovincial significance[J]. Review of Palaeobotany & Palynology, 2005, 136(3): 181-207.
- [35] Li Wei. Formation of a saline environment and evolution of a sedimentary system in the Late Triassic reservoir of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(9): 31-38. [李伟. 四川盆地晚三叠世咸化环境的形成与沉积体系的演化特征[J]. 天然气工业, 2011, 31(9): 31-38.]
- [36] Neev D, Emery K D. The Dead Sea Depositional processes and environments of evaporates[J]. Israel Geol. Surv Bull., 1967, 41: 147.
- [37] Zhao Jingfeng, Qin Dahe, Lei Jiaqiang, *et al.* Inter-annual Variability of salt budget of the Yanqi Basin and Lake Bosten, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(3): 275-281. [赵景峰, 秦大河, 雷加强, 等. 新疆焉耆盆地和博斯腾湖盐量收支平衡的年变化[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 275-281.]
- [38] Chen Shiyue, Wang Ling, Li Cong, *et al.* The saline genesis of lacustrine basin in the lower section of the first member of Shahejie Formation in Qikou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 40-47. [陈世悦, 王玲, 李聪, 等. 歧口凹陷古近系沙河街组一段下亚段湖盆咸化成因[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 40-47.]
- [39] Xue Guogang, Gao Jianzhen. Volcanism and halite genesis in Shahejie Formation of paleogene in Dongpu Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(1): 53-56, 75.

- [薛国刚,高渐珍.东濮凹陷古近系沙河街组火山作用与盐岩成因[J].石油天然气学报,2011,33(1):53-56,75.]
- [40] Yuan Jing, Zhao Chenglin, Zhang Shanwen. Genetic model of the deep water salt lake of the Paleogene Sha-4 member in Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 114-118.[袁静,赵澄林,张善文.东营凹陷沙四段盐湖的深水成因模式[J].沉积学报,2000,18(1):114-118.]
- [41] Jin Qiang. Geochemistry characteristics of trace elements in evaporates of the Tertiary[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 2003, 27(2): 1-5. [金强.柴达木盆地西部第三系蒸发岩微量元素组成及其地球化学特征[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(2):1-5.]
- [42] Jin Qiang, Zhu Guangyou. Progress in research of deposition of oil source rocks in saline lakes and their hydrocarbon generation[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(4): 483-492. [金强,朱光有.中国中新世成化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展[J].高校地质学报,2006,12(4):483-492.]
- [43] Zheng Xiyu, Lv Yaping. Salt lakes and carbonate origin in Hailar Basin[J]. Journal of Salt Lake Science, 1995, 3(3): 1-10. [郑喜玉,吕亚平.海拉尔盆地盐湖及碳酸盐成因[J].盐湖研究,1995,3(3):1-10.]
- [44] Zheng Xiyu, Lv Yaping. Formation and evolution environment of dabusu alkaline lake[J]. Journal of Salt Lake Science, 1995, 3(4): 10-17. [郑喜玉,吕亚平.大布苏碱湖的形成演化环境[J].盐湖研究,1995,3(4):10-17.]
- [45] Jia Guodong, Cai Keqin. Biogeochemical process during soda mineralization in the hetong qahan nur soda lake, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2012, 43(4): 388-393. [贾国东,蔡克勤.内蒙古合同察汗淖碱湖成碱过程中的生物地球化学作用[J].地质论评,2012,43(4):388-393.]
- [46] Yang Qingtang. Modern salt lakes in yikezhao league, inner mongolia; Geological characteristics and trona-forming conditions[J]. Geology of Chemical Minerals, 1996, 18(1): 31-38. [杨清堂.内蒙古伊盟地区现代碱湖地质特征和形成条件分析[J].化工矿产地质,1996,18(1):31-38.]
- [47] Sun Dapeng. The soda lakes on inner mongolia plateau, China[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1990, 21(1): 44-54. [孙大鹏.内蒙高原的天然碱湖[J].海洋与湖沼,1990,21(1):44-54.]
- [48] Zheng Dazhong, Zheng Ruofeng. Preliminary investigation of natural alkaline deposits and the formation mechanism of their salt lakes[J]. Journal of Salt Lake Research, 2002, 10(2): 1-9. [郑大中,郑若锋.天然碱矿床及其盐湖形成机理初探[J].盐湖研究,2002,10(2):1-9.]
- [49] Huang Xinzhen, Yan Cunfeng, Wang Suiji, et al. The feature and deposit model of lacustrine carbonate rocks formed in the course of soda lake evolution[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(supplement 1): 728-733. [黄杏珍,闫存凤,王随继,等.苏打湖型的湖相碳酸盐岩特征及沉积模式[J].沉积学报,1999,17(增刊1):728-733.]
- [50] Coffey M T, Mankin W G. Volcanoes: Composition of Emissions[M]. Encyclopedia of Atmospheric Sciences (volume 1). 2nd Edition. 2015: 446-449.
- [51] Williams S N, Schaefer S J, Lopez M L, et al. Global carbon dioxide emission to the atmosphere by volcanoes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56: 1765-1770.
- [52] Hernández P A, Melián G, Giammanco S, et al. Contribution of CO₂ and H₂S emitted to the atmosphere by plume and diffuse degassing from volcanoes: The Etna volcano case study [J]. Surveys in Geophysics, 2015, 36(3): 327-349.
- [53] Xu Qinqin, Ji Jianqing, Zhao Lei, et al. Tectonic evolution and continental crust growth of northern Xinjiang in northwestern China: Remnant ocean model [J]. Earth - Science Reviews, 2013, 126: 178-205.
- [54] Choulet F, Michel F, Dominique C, et al. Toward a unified model of Altaids geodynamics: Insight from the Palaeozoic polycyclic evolution of west Junggar (NW China) [J]. Science China Earth Sciences, 2015, 59(1): 25-57.
- [55] Li Di, He D F, Santosh M, et al. Tectonic framework of the northern Junggar Basin part I: The eastern Luliang Uplift and its link with the east Junggar terrane [J]. Gondwana Research, 2015, 27(3): 1089-1109.
- [56] Li D, He D F, Santosh M, et al. Tectonic framework of the northern Junggar Basin Part II: The island arc basin system of the western Luliang Uplift and its link with the West Junggar terrane [J]. Gondwana Research, 2015, 27(3): 1110-1130.
- [57] Yin J Y, Long X P, Yuan C, et al. A Late Carboniferous - Early Permian slab window in the west Junggar of NW China: Geochronological and geochemical evidence from mafic to intermediate dikes [J]. Lithos, 2013, (175/176): 146-162.
- [58] Pirajno F, Seltmann R, Yang Y Q. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China [J]. Geoscience Frontiers, 2011, 2(2): 157-185.
- [59] Zhan Y, Hou G T, Hari K R, et al. Geochemical and isotopic constraints on the evolution of Late Paleozoic dyke swarms in West Junggar, Xinjiang, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 113: 126-136.
- [60] Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(2-4): 102-117.
- [61] Bian W H, Hornung J, Liu Z H, et al. Sedimentary and palaeoenvironmental evolution of the Junggar Basin, Xinjiang, northwest China [J]. Palaeobiodiversity & Palaeoenvironments, 2010, 90(3): 175-186.
- [62] Lu X C, Shi J A, Zhang Shuncun, et al. The origin and formation model of Permian dolostones on the northwestern margin of Junggar Basin, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 105: 456-467.
- [63] Zhang J E, Xiao W J, Han C M, et al. A Devonian to Carboniferous intra-oceanic subduction system in western Junggar, NW China [J]. Lithos, 2011, 125(1/2): 592-606.
- [64] Gao R, Xiao L, Pirajno F, et al. Carboniferous - Permian ex-

- tensive magmatism in the West Junggar, Xinjiang, northwest-ern China: Its geochemistry, geochronology, and petrogenesis [J]. *Lithos*, 2014, 204: 125-143.
- [65] Yang G X, Li Y J, Gu P Y, *et al.* Geochronological and geochemical study of the Darbut Ophiolitic Complex in the West Junggar (NW China): Implications for petrogenesis and tectonic evolution [J]. *Gondwana Research*, 2012, 21(4): 1037-1049.
- [66] Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Jishan, *et al.* Genesis and hydrocarbon significance of vesicular ignimbrite: A case study from Fengcheng Formation, Wu-Xia area, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 162-171. [朱世发, 朱筱敏, 刘继山, 等. 富孔熔结凝灰岩成因及油气意义——以准噶尔盆地乌—夏地区风城组为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 162-171.]
- [67] Zheng J P, Sun M, Zhao G C, *et al.* Elemental and Sr—Nd-Pb isotopic geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks beneath the Junggar basin, NW China: Implications for the formation and evolution of the basin basement [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(5/6): 778-794.
- [68] Mason R.A. The Ordering Behaviour of Reedmergerite, NaB-Si₃O₈ [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980 (72): 329-333.
- [69] Chen J, Wang H N. *Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 396-400. [陈俊, 王鹤年. *地球化学* [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 396-400.]
- [70] Xu X S, Qiu J S. *Igneous Petrology* [M]. Beijing: Science Press, 2010: 270. [徐夕生, 邱检生. *火成岩岩石学* [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 270.]

Brine evolution of ancient lake and mechanism of carbonate minerals during the sedimentation of Early Permian Fengcheng Formation in Mahu Depression, Junggar Basin, China

Yu Kuan-hong¹, Cao Ying-chang¹, Qiu Long-wei¹, Sun Pei-pei¹, Yang Yong-qiang¹,
Qu Chang-sheng¹, Li Yu-wen², Wan Min³, Su Yun-guo⁴

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Hangzhou Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Hangzhou 310023, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China;

4. Xinjiang Xin'gang Operation Sub-Company, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China)

Abstract: Saline minerals in Early Permian ancient Mahu lake, Junggar Basin were mainly carbonate minerals. Carbonate minerals in Fengcheng Formation covered 3 types according to positive metal ions, Mg-Ca carbonate minerals, calcite and dolomite, Na carbonate minerals, sodium carbonate, sodium bicarbonate, transitional carbonate minerals, shortite, eitelite, and northupite. The different kinds of carbonate minerals had regular horizontal distribution as bull's-eye, which demonstrated that evaporation and concentration induced the deposition of carbonate minerals. Calcite and dolomite developed in shallow platform zone of Xi-azijie area mainly and shallow lakemargin. Shortite, eitelite, and northupite developed in dark tuff layers which interbedded with alkali layers. Sodium carbonate and sodium bicarbonate developed in the center area of basin. Sufficient HCO₃⁻ negative ion controlled the evolution of brine of ancient Mahu lake. The Mg and Ca ions synthesized with HCO₃⁻ firstly and Na ions synthesized with residual HCO₃⁻ after calcite and dolomite precipitated. Intense volcanic activities and chemical compositions of Carboniferous—Early Permian igneous rocks and volcanic eruption materials played a decisive role for carbonate minerals precipitation. Island—arc volcanic eruptions delivered massive CO₂, and increased P_{CO2} in atmosphere which improved HCO₃⁻ content in sedimentary water. In addition, CO₂ in the atmosphere could promote bedrock weathering through rainfall and promote hydrolysis of tuff in sedimentary water with high HCO₃⁻ content. Igneous rocks around and basement of ancient Carboniferous—Early Permian Mahu lake, Northwest Junggar Basin were composed by albite molecules and Calcium feldspar molecules mainly, with low potassium feldspar molecules content. Volcanic clastic materials also had high Na and Ca content. Weathering of around Carboniferous—Early Permian igneous rocks and tuff hydrolysis offered plenty of Na, Ca, Mg ions, which synthesis with HCO₃⁻ and form various carbonate minerals.

Key words: Junggar Basin; Mahu Depression; Fengcheng Formation; Brine evolution; Carbonate minerals