文章编号:1000-0550(2020)05-0913-10

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.021

现代碱湖对玛湖凹陷风城组沉积环境的启示

王力宝1,厚刚福1,卞保力2,李亚哲1,窦洋1,尤新才2,郭华军1,徐洋1,邹志文1

1.中国石油杭州地质研究院,杭州 310023

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 为了进一步了解玛湖凹陷下二叠统风城组沉积环境,通过现代碱湖和主要碱矿进行调研,系统梳理了现代碱湖沉积特征,并与风城组沉积特征进行了对比研究,提出了现代碱湖沉积对玛湖凹陷风城组沉积环境具有可对比性。研究结果表明:玛 湖凹陷风城组沉积期为一大型碱湖盆地,与世界上典型碱湖特征基本相近,自生矿物、沉积组合与演化过程大致相同,为形成于 半干旱气候环境的闭流盆地,含碱层段一般为浅水环境成因,是碳酸盐型湖水蒸发浓缩的产物,与碱层互层的暗色细粒岩石不 全为深水沉积产物。

关键词 准噶尔盆地;玛湖凹陷;二叠系;风城组;碱湖

第一作者简介 王力宝,男,1983年出生,工程师,沉积储层,E-mail: wanglb_hz@petrochina.com.cn 通信作者 厚刚福,男,高级工程师,E-mail: hougf_hz@petrochina.com.cn

中图分类号 P618.13 文献标志码 A

0 引言

玛湖凹陷下二叠统风城组以暗色细粒—极细粒 沉积物为主,为准噶尔盆地最重要的烃源岩层之 一[1-3],也是致密油、页岩油勘探的现实领域之一[4]。 1983年,从风城组岩石地层单位正式命名起,就有文 献讨论风城组的沉积环境与沉积相。由于资料占有 程度、研究侧重点不同,对风城组沉积环境的认识差 异较大,归纳起来主要有4种,分别是湖泊相^[1-2]、海湾 潟湖相13-4、残留海相和海陆过渡相。目前最主流认 识为高盐度湖泊环境[5-6],但对风城组高盐度湖泊的 形成机制仍存在较大争议,主要体现在对盐类矿物 的来源认识不同,即盐类矿物的形成与气候变化相 关的蒸发作用有关,还是由火山活动过程中来自地 球深部的热卤水形成四;其次,对盐类矿物是深水还 是浅水成因,以及如何理解与蒸发盐互层的暗色细 粒岩石的沉积环境,仍存在争议[8-10]。本文在梳理和 总结国内外现代典型碱湖沉积特征的基础上,通过 现代碱湖沉积与玛湖凹陷风城组岩性、沉积组合进 行对比,探讨了玛湖凹陷下二叠统风城组碱湖沉积 环境,以期为准噶尔盆地致密油、页岩油勘探提供地 质依据。

1 地质概况

玛湖凹陷位于新疆维吾尔自治区北部的准噶尔 盆地西北部,西北方向与克百断裂带、乌夏断裂带相 邻,西南接中拐凸起,东南与达巴松一夏盐凸起相 邻,东部连接英西凹陷(图1),基本表现为东南倾的 平缓单斜,面积约5000 km²。风城组为玛湖凹陷最 主要的烃源岩层之一,厚度50~400 m不等,自下而上 可分为3个段,分别为风城组一段、二段和三段(图 1)。风城组一段火山岩及火山碎屑岩沉积较发育; 二段和三段以湖相细粒沉积物为主,总体为咸水、盐 湖环境,古气候呈现干热与湿热交替变化,发育大量 碱类矿物,碱类蒸发盐岩最大厚度超过200 m,分布 面积约300 km²,可能是国内目前已知时代最古老的 碳酸盐型盐湖(碱湖)和大型天然碱矿床。

收稿日期:2019-10-23;收修改稿日期:2020-04-14

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05001-002,2017ZX05001-004);中国石油科技重大专项(2017E-0401,2019B-0309)[Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2017ZX05001-002, 2017ZX05001-004; Science and Technology Major Project, CNPC, No. 2017E-0401, 2019B-0309]





2 风城组与现代碱湖沉积特征基本 一致

2.1 风城组与现代碱湖或碱矿具类似的自生矿物

碱湖为碳酸盐型盐湖,现代碱湖中的盐矿物种 类很多,现已发现二十余种,常见的主要碱类矿物组 合为:单斜钠钙石(碳钠钙石、斜钠钙石)[Na₂CO₃· CaCO₃·5H₂O]、斜方钠钙石(钙水碱)[Na₂CO₃·CaCO₃· 2H₂O]、碳酸钠钙石[Na₂CO₃·2CaCO₃]、天然碱 [Na₂CO₃·NaHCO₃]、泡碱[Na₂CO₃·10H₂O]、水碱 [Na₂CO₃·H₂O]、重碳酸钠盐[NaHCO₃]、碳氢钠石 [Na₃H₃(CO₃)₄]、硅硼钠石[NaBSi₃O₈]、氯碳钠镁石 [MgCO₃·Na₂CO₃·NaCl]和碳钠镁石[NaMg(CO₃)₂]等。 碱类矿物夹层中方解石、白云石较发育,菱镁矿和菱 铁矿也较常见,同时常见数量不等的石膏、石盐和芒 硝等。湖水的温度不同,可能出现不同类型的矿物, 如泡碱在寒冷的湖水中结晶,而水碱一般在温暖的 湖水中晶出,含水矿物成岩压实过程中,温度相对较 高,可能发生脱水作用而形成新的矿物;如碳酸钠钙 石,在一定成岩条件下,由单斜钠钙石转化而来。

玛湖凹陷风城组也发育大量碳酸盐类矿物,与 现代碱湖基本一致,主要有碳钠钙石、碳酸钠石、苏 打石和硅硼钠石,偶见石盐和石膏。碳钠钙石和苏 打石(图2a,b)一般为灰白色、浅灰色或灰色,薄层一 厚层,常见少量硅硼钠石、氯碳钠镁石(图2c)与其伴 生,岩层较厚的矿物一般结晶粗大,具有粗晶结构、 块状构造。碳钠钙石岩层通常与云质岩类或火山碎 屑岩呈不等厚互层,大颗粒的苏打石或碳钠钙石矿 物中常包裹方解石、白云石或长石类矿物,为较晚结 晶产物。碳酸钠钙石见于含碱层段的各种岩性中, 分布范围广泛,在整个含碱段剖面中均可见到,成因 比较复杂,在120℃下难以合成。根据其成分、产状





图 2 风城组碱矿物基本特征 (a)风20,P₁f₂,碳钠钙石;(b)风南5,P₁f₂,苏打石(NaHCO₃);(c)艾克1,5664.9 m,灰色碳钠钙石岩夹云质泥岩 Fig.2 Basic characteristics of alkaline minerals in Fengcheng Formation (a)Feng20, P₁f₂, sodalite; (b)Fengnan5, P₁f₂, sodalite (NaHCO₃) (c)Aike1, 5664.9 m, gray sodalite with dolomitic mudstone

分析,该矿物的形成可能与浓度较高的碱卤水有关, 也可能为由早期的单斜钠钙石等矿物在埋藏之后转 变而形成的,后者在现代碱湖中相当普遍^[11];碳酸钠 石主要分布于云质泥岩中,为快速生长、快速堆积的 产物;硅硼钠石在风城组也比较常见,多数条带状或 透镜状夹于灰黑色一灰色云化凝灰岩中,条带宽 1~20 mm^[12],局部呈互层状产出,或呈稀疏的条带夹 于含云泥岩中;盐类矿物主要发育在凹陷中心,在风 城1井一风南5井一艾克1井一线以南,最大厚度超 过 200 m,面积约 300 km²。垂向上,盐类矿物一般成 层分布,与云质泥岩、云质凝灰质泥岩等暗色细粒沉 积物呈不等厚互层,在纵向上主要分布于风一段的 上部和风二段。

风城组的碱类矿物与现代碱湖基本一致,表明 玛湖凹陷在风城组沉积时为一碱湖,可能是国内最 古老的碱湖和大型天然碱矿床。

2.2 玛湖凹陷风城组与现代碱湖具相似的演化 过程

碱湖在不同的发育阶段,与蒸发作用相关的化 学沉积形成的矿物的类型与含量不同,因此,自生化 学沉积矿物的种类与含量可作为沉积组合和演化阶 段划分的良好标志。研究表明,世界上大多数碱湖 和重要碱矿床具相似的特征,其演化阶段大致相同, 通常发育类似的沉积组合,一般可分为如下几个阶 段和相应的沉积组合(图3):

(1) 成碱预备阶段:此时湖水盐度较低,沉积物 中以陆源碎屑为主,内源沉积通常不发育,其沉积组 合称为淡水及较低盐度沉积组合,此阶段一般为湖 盆发育期,大致相当于风一段的下部和风三段的中 上部沉积期,水体较深,为半深湖环境,除发育粉砂 岩、泥质岩类等细粒岩石外,火山岩在该组合中相对 较发育,但基本不含自生化学沉积矿物(图4a)。

第38卷



Fig.3 Comprehensive histogram of sedimentary combination and evolution of well Fengnan 7

(2)初成碱阶段:湖水盐度逐渐增加,内源沉积 产物主要为碳酸盐类,含量逐渐增多,前期以方解石 沉积为主,后期白云石较发育。该阶段大致相当于 玛湖凹陷风城组一段的上部和风城组三段的下部沉 积期,水体逐渐变浅,由半深湖向浅湖环境过渡,主 要发育泥质白云岩、云质泥岩、凝灰质云岩、云质凝 灰岩、云质粉砂岩等,其出现标志为具季节性纹层的 深灰色或黑色泥页岩^[13](图4b),代表深水沉积,表示 湖水已浓缩至方解石饱和阶段,进一步浓缩,白云石 和碱类矿物可能会逐渐碱化。

(3) 强成碱阶段:蒸发盐类矿物大量出现,以碱

类矿物沉积为主,为含碱层段发育期(图4c),一般形成于高位体系域晚期或湖退期,大致相当于风城组二段沉积期,水体较浅,为浅湖沉积环境,岩石类型为含云质硅硼钠石质碳钠钙石岩、灰色碳钠钙石岩、在硼钠石质岩、含硅硼钠石云化粉砂岩及深灰色碳钠钙石质云泥岩,大部分为化学沉积产物,盐度相对最高,其碳同位素δ¹³C‰(VPDB)整体为正值,分布范围2‰~6‰,表明主要为蒸发作用形成,氧同位素δ¹⁸O‰(VPDB)以偏负为主,分布范围为-10.54‰~2.77‰,变化较大,显示其成岩及后期改造较强¹¹⁴,Z值为129.29~140.78,表明为咸水沉积。



图 4 风城组不同类型沉积组合基本特征

(a)盐度相对较低沉积组合,基本不含化学沉积为主的自生矿物;(b)咸化沉积组合,自生矿物以方解石和白云石为主;(c)蒸发盐沉积组合,富含苏 打石、碳酸钠钙石等蒸发盐类矿物;(d)咸化减弱组合,自生矿物以方解石和白云石为主

Fig.4 Basic characteristics of sedimentary assemblages in Fengcheng Formation

(a) relatively low-salinity sedimentary assemblage, basically does not contain authigenic minerals dominated by chemical deposition; (b) salinized sedimentary assemblage, with authigenic minerals dominated by calcite and dolomite; (c) evaporite sedimentary assemblage, rich in evaporite minerals such as soda stone and soda calcium carbonate; (d) weak salinization assemblage, with authigenic minerals dominated by calcite and dolomite

风城组烃源岩中β-胡萝卜烷含量较高,富含伽马蜡 烷^[2]。较高的β-胡萝卜烷存在于还原或高盐度环境。 表明风城组二段沉积期,玛湖凹陷为还原环境,盐度 较高,菌类非常丰富,湖水水体可能有分层现象。

(4)弱成碱阶段或演化终止阶段:再次开始湖 侵,湖水逐渐变深,沉积环境也逐渐由浅湖向半深湖 环境转化,湖水逐渐淡化,湖水盐度逐渐降低,此时 碱类矿物逐步消失,顺序大致与组合2相反,代表再 次湖进的开始,或碱湖演化的结束。该阶段大致相 当于风城组三段的下部和上部沉积期,自生蒸发盐 类矿物逐步消失(图4d),白云石和云质岩较发育。 该阶段矿物形成序列与强成碱阶段相反。

上述分析表明:玛湖凹陷风城组与现代碱湖或 碱矿演化过程相近,发育类似的自生矿物和沉积组 合,为一大型碱湖盆地,在不同的演化阶段,随着湖 平面升降变化,碱类碳酸盐含量也随之改变。

3 玛湖凹陷风城期为一闭流型盆地

碱湖是碳酸盐型盐湖,其演化和发展都详细纪 录了周围环境的变化信息^{15]}。从中国现代盐湖水化 学类型分布来看,柴达木一塔里木盆地为第四纪干 燥中心,向外规律性变化,大致可分为3个带:1)氯化 物一硫酸盐带或含硝酸盐型硫酸镁亚型带,2)含氯 化物硫酸镁亚型带或硫酸钠亚带,3)碳酸盐型和硫 酸钠亚型带或高盐度碳酸盐带、低矿化度碳酸盐带。 碳酸盐型盐湖位于中国盐湖区的最外缘,分布于半 干旱的沙漠--草原地区,是现代碱湖分布区,此规律 与中国盐湖带中不同亚区成盐地质历史和古今气候 差异性相一致110。从干旱向较湿润的转变方向上,生 物量逐渐增加,生物地球化学作用逐渐增强(这影响 到水中HOC;的含量),植物对不同阳离子的吸收强 度发生改变是极其重要的因素四,上述变化是众多表 生地球化学作用综合的结果。图5是风城组自生沉 积物中δ¹³C_{PDB}和δ¹⁸O_{PDB}分布规律^[18],在以δ¹⁸O_{PDB}为横 坐标、δ¹³C_{PDB}为纵坐标、0为原点的坐标系中,δ¹³C_{PDB}基 本为正值,δ¹⁸O_{PDB}正负均有,其投点大多落在第 I、II 象限,与现今最大的碱湖纳特龙一马加迪湖及美国 大盐湖的区域分布一致,表明风城组沉积期,气候环 境与东非的纳特龙一马加迪湖、美国大盐湖相近,为 封闭---半封闭型湖泊。

4 玛湖凹陷风城组碱矿形成于半干旱 环境



从世界最主要的碱湖和碱矿床分布来看,碱湖 和碱矿床主要发育在沙漠和绿洲的过渡带,为半干

图 5 风城组碳氧同位素分布(据文献[18]修改) Fig.5 Distribution of carbon and oxygen isotopes in Fengcheng Formation (modified from reference [18])

旱的气候环境。国内外的碱湖均为闭流型湖泊,最 典型的为东非裂谷中的湖泊群,在埃塞俄比亚、肯尼 亚和坦桑尼亚的东非裂谷内分布着约20个湖盆,有 的为淡水湖,有的为碱湖四。畅流型湖泊一般为淡水 湖,如肯尼亚的奈瓦夏湖(Lake Naivasha),为东非裂 谷中著名的淡水湖之一, 面积约160 km², 湖面依降 雨量的不同而变化,平均水深6m,最深20m,海拔 1900 m,是东非裂谷海拔最高的湖。由季节性河流 或泉水补给的闭流型湖泊为碱湖,最著名的为马加 迪湖(Lake Magadi)和纳特龙湖(Lake Natron)。这些 湖泊的基岩为火山岩,湖水中的阴离子大部分为重 碳酸根和碳酸根,卤水浓缩后有很强的碱性。马加 迪湖(Lake Magadi)位于赤道以南^[19],湖区面积 164 km², 中心部分南北长约26 km, 东西宽约4 km, 海拔605 m,是裂谷中海拔最低的湖泊,平均年降雨 量 500 mm, 有一半的雨量集中在 3—5 月份, 气温范 围为29 ℃~41 ℃,年蒸发量为3 500 mm,蒸发量远大 于降雨量,盆地的周围分布着许多常年流水的碱性 泉,没有常年流水河注入,主要由一个含盐度较高的 地下热水层供水,泉水温度最大可达86℃,泉水中可 溶的固体的浓度为6~35 g/kg,温度和浓度不稳定,而 Na/Cl比值却非常稳定,克分子比是3.21^[19]。类似的 比值还可用于从西部边缘流入裂谷的许多淡水河。 蒸发和沉淀使马加迪湖变成了世界第二大苏打湖, 东非裂谷内只有马加迪湖有层状蒸发盐类沉积,干 旱季节,80%的湖面被半固体状的苏打覆盖,雨季时 由于湖区汇水,卤水会被稀释并上升淹没过碱壳,深 达1m,所以雨季时湖区面积远大于旱季。马加迪湖 与纳特龙湖同在一个宽阔的汇水盆地中,周围有盖 莱(Gelai)火山、伦盖(Lengai)火山和凯里马斯 (Kerimasi)火山,盆地汇水淋沥富含Na₂CO₃的火山熔 岩和火山灰,渗入地下含水层并被地热加热,然后从 湖区地层孔隙以碱性热泉水的形式不断涌入湖中。 据推测,马加迪湖与纳特龙湖原来属于一个湖,后来 由于构造运动,分别形成了纳特龙湖和地势相对要 低30m的马加迪湖^[20]。

通过对比古代和现代碱湖可以看出,碱湖形成 于半干旱气候环境,通常为蒸发量大于补给量的沙 漠一草原。风城组二段沉积期,碱矿或盐矿常与暗 色泥岩、云质泥岩组成厚度不等的韵律,与干旱期形 成的含碱层相对应;而暗色泥岩、云质泥岩形成于相 对湿润期。风一段下部和风三段上部也发育气候相 对湿润期的沉积物。上述沉积组合特征表明,风城 组古气候可能以干旱环境为主,期间伴随着的相对 湿润气候出现。郑绵平等¹⁰把对气温敏感的盐类矿 物划分为3种类型:1)冷相盐类矿物;2)暖相盐类矿 物;3)广温相盐类矿物。风城组主要为暖相和广温 相矿物,基本不含冷相盐类矿物,表明风城组沉积 期,水体温度较高,可能相当于暖相一偏暖相环境, 碳氢钠石和碳钠镁石等典型的高温矿物的出现,反 映了当时气温相对较高,为半干旱的气候环境。

5 玛湖凹陷风城组沉积环境以浅水 为主

碱性湖泊若固体碳酸钠类矿物不发育,通常水 深变化较大,最深可达数十米,而具碳酸钠类矿物沉 积的碱湖均形成于浅水环境,水深一般小于2m,随 季节交替,许多湖泊还会经历面积和浓度的变化。 在东非地区所有苏打湖中,纳特龙湖最深,含有的苏 打也最多,湖水深度一般小于10m,内蒙古碱湖区是 国内重要的碱湖分布区,我国现代67%的碱湖集中 于该区^[21-22],区内著名碱湖为合同查汗淖和大布苏 湖,合同查汗淖雨季湖水深度约1m左右,旱季小于 0.1 m^[17];大布苏湖丰水期水深 1.5 m,枯水期水深 0.5 m。表明具碳酸钠类矿物沉积的碱湖均为浅水沉 积环境,水深一般小于2m。另外,典型的天然碱矿 床也均被认为是浅水沉积环境的产物,如著名的美 国绿河盆地,是世界上规模最大的天然碱矿床,也被 认为是浅水沉积^[23-24]。泌阳凹陷的含碱层段被认为 是浅水沉积^[25-27],其中所夹粉砂岩层计算的沉积水深 为1.53m。

上述分析表明:绝大部分现代碱湖为浅湖,即便 在丰水期,水深一般也仅数米。玛湖凹陷风一段上 部和风二段的沉积建造中,可见到大量碱性蒸发岩 矿物沉积,厚度变化较大,通常数十毫米,与富含星 点状黄铁矿的细粒含云质岩呈互层或韵律出现,盐 类矿物结晶粗大,为浅水环境快速结晶产物。综合 利用地震相和沉积相分析表明,碱矿主要分布于风 城1井以南的浅湖环境,受外来物源和火山活动影响 较小,水体相对较安静,为碱类矿物的发育创造了条 件(图6)。湖底沉积的与碱层互层的暗色细粒沉积 一般为丰水期产物,能形成暗色细粒沉积环境不全 为深水环境,相对静止水体和还原环境沉积的也可 形成暗色细粒沉积,不管其水深多大。另外,风城组 在含碱层段及夹层中,频繁出现鸟眼构造,有孤立 型、蠕虫状、条纹状和不规则状等类型,在不同相区 和层位,鸟眼孔的充填物不同,主要有碳钠钙石、硅 硼钠石、白云石或方解石等,蠕虫状鸟眼构造是干燥



图 6 玛湖凹陷风城组组沉积模式 Fig.6 Sedimentary model diagram of Fengcheng Formation in the Mahu Depression

成因的一种水平收缩孔,一般发生在横向上结合力 强、垂向上结合力弱的沉积物中,尽管鸟眼构造具多 种成因,但一般都不指示深水沉积环境^[28]。岩层中见 有与鸟眼构造伴生的微生物诱发沉积构造,此类构 造出现的层段,尽管粒度较细,富含有机质和星点状 黄铁矿,但一般形成于海相环境中的潮间带和潮上 带,或者湖泊环境中的浅水地带。微生物成因构造 在风城组普遍发育,常与鸟眼构造伴生,反映浅水沉 积环境。风一段和风三段暗色细粒沉积物厚度较 大,碱性矿物夹层较少,为强还原环境下半深湖相静 水沉积的产物,为风城组最主要的烃源岩层。

综合上述分析表明,玛湖凹陷风城期为一大型 闭流型碱湖盆地,形成于半干旱环境,碱性蒸发盐类 矿物以及与碱层互层的暗色细粒沉积物可能为浅水 环境的沉积产物。该认识将为玛湖凹陷风城组致密 油、页岩油勘探提供地质依据。

6 结论

(1)玛湖凹陷风城组沉积期为一大型碱湖盆地, 其自生矿物、沉积组合与演化阶段与世界大多数现 代碱湖和大型碱矿特征可类比。

(2) 玛湖凹陷风城期为一闭流型盆地,与现代东 非裂谷的碱湖盆地可对比,形成于半干旱环境。

(3) 玛湖凹陷风城组发育的碱性蒸发盐类矿物 一般指示浅水沉积环境,与碱层互层的暗色细粒沉 积物不全形成于深水环境。

致谢 对审稿专家与编辑老师提出的宝贵建议 表示最诚挚的谢意!

参考文献(References)

- [1] 陈建平,王绪龙,邓春萍,等.准噶尔盆地烃源岩与原油 地球化学特征[J].地质学报,2016,90(1):37-67.[Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, et al. Geochemical features of source rocks and crude oil in the Junggar Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(1): 37-67.]
- [2] 王小军,王婷婷,曹剑. 玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩基本特征及其高效生烃[J]. 新疆石油地质,2018,39(1):9-15. [Wang Xiaojun, Wang Tingting, Cao Jian. Basic characteristics and highly efficient hydrocarbon generation of alkaline-lacustrine source rocks in Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1):9-15.]
- [3] 曹剑,雷德文,李玉文,等.古老碱湖优质烃源岩:准噶尔 盆地下二叠统风城组[J].石油学报,2015,36(7):781-

790. [Cao Jian, Lei Dewen, Li Yuwen, et al. Ancient highquality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 781-790.]

- [4] 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.[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.]
- [5] 汪梦诗,张志杰,周川闽,等.准噶尔盆地玛湖凹陷下二 叠统风城组碱湖岩石特征与成因[J].古地理学报, 2018,20(1):147-162.[Wang Mengshi, Zhang Zhijie, Zhou Chuanmin, et al. Lithological characteristics and origin of alkaline lacustrine of the Lower Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(1): 147-162.]
- [6] 张志杰,袁选俊,汪梦诗,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠 系风城组碱湖沉积特征与古环境演化[J].石油勘探与 开发,2018,45(6):972-984.[Zhang Zhijie, Yuan Xuanjun, Wang Mengshi, et al. Alkaline-lacustrine deposition and paleoenvironmental evolution in Permian Fengcheng Formation at the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 972-984.]
- [7] 董广华,于恒.应用萨胡判别对风成城地区石炭系沉积相的研究[J].新疆石油地质,1984(1):61-68.[Dong Guanghua, Yu Heng. Study on carboniferous sedimentary facies in Fengcheng area by Sahu Discrimination [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1984(1):61-68.]
- [8] 鲜继渝.风成城地区风城组岩矿及储层特征探讨[J].新 疆石油地质,1985(3):28-34,111-114. [Xian Jiyu. Discussion on rock, mineral and reservoir characteristics of Fengcheng Formation in Fengcheng area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1985(3):28-34, 111-114.]
- [9] 尤兴弟. 准噶尔盆地西北缘风城组沉积相探讨[J]. 新疆 石油地质, 1986, 7(1): 47-52. [You Xingdi. Discuss on the Lower Permian Fengcheng Formation in the northwest margin of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1986, 7 (1): 47-52.]
- [10] 支东明,曹剑,向宝力,等.玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩 生烃机理及资源量新认识[J].新疆石油地质,2016,37
 (5):499-506. [Zhi Dongming, Cao Jian, Xiang Baoli, et al. Fengcheng alkaline lacustrine source rocks of Lower Permian in Mahu Sag in Junggar Basin: Hydrocarbon generation mechanism and petroleum resources reestimation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(5): 499-506.]
- [11] 周建民. 古碱矿中几种岩石矿物的地质意义[J]. 化工 地质,1987(2):62-67,102. [Zhou Jianmin. Geological significance of several rocks and minerals in ancient alkali ore

[J]. Geology of Chemical Minerals, 1987 (2) : 62-67, 102.]

- [12] 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. [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.]
- [13] 郭华军,李玉文,郭旭光,等.准噶尔盆地西北缘二叠系 风城组沉积组合类型与特征[C]//第十五届全国古地理 学及沉积学学术会议摘要集.成都:中国矿物岩石地球 化学学会岩相古地理专业委员会,2018:1. [Guo Huajun, Li Yuwen, Guo Xuguang, et al. Sedimentary assemblage types and characteristics of Fengcheng Formation of Permian in the northwest margin of Junggar Basin [C]//Proceedings of the 15th National Academic Conference on Palaeogeography and Sedimentology. Chengdu: Professional Committee of Lithofacies and Paleogeography, Chinese Society of Mineral and Petrochemistry, 2018:1.]
- [14] 余朝丰,李玉文,徐洋,等. 准噶尔盆地西北缘二叠系风城组沉积背景分析[C]//2015年全国沉积学大会沉积学与非常规资源论文摘要集. 武汉:中国地质学会沉积地质专业委员会,2015:1. [Yu Chaofeng, Li Yuwen, Xu Yang, et al. Analysis of sedimentary background of Fengcheng Formation of Permian in the northwest margin of Junggar Basin [C]//Summary of Papers on Sedimentology and Unconventional Resources of National Conference on Sedimentology in 2015. Wuhan: Professional Committee of Sedimentary Geology, Chinese Geological Society, 2015:1.]
- [15] 郑绵平,赵元艺,刘俊英.第四纪盐湖沉积与古气候
 [J].第四纪研究,1989,11(4):297-307.[Zheng Mianping, Zhao Yuanyi, Liu Junying. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate [J]. Quaternary Sciences, 1998, 14(4):297-307.]
- [16] 郑绵平.论中国盐湖[J].矿床地质,2001,20(2):181-189,128.
 [Zheng Mianping. On saline lakes of China [J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2): 181-189, 128.
- [17] 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,1997,43(4):388-393.[Jia Guodong, Cai Keqin. Biogeochemical process during soda mineralization in the Hetong Qahan Nur soda lake, Inner Mongolia [J]. Geological Review, 1997, 43(4): 388-393.]
- [18] 秦志军,陈丽华,李玉文,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下二 叠统风城组碱湖古沉积背景[J]. 新疆石油地质,2016, 37(1):1-6. [Qin Zhijun, Chen Lihua, Li Yuwen, et al. Paleo-sedimentary setting of the Lower Permian Fengcheng alkali lake in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petro-

leum Geology, 2016, 37(1): 1-6.]

- [19] Eugster H P. 肯尼亚马加迪湖及其前身[J]. 吕其祥,钱自强,译. 化工矿产地质,1985(2):53-78. [Eugster H P. Lake Magadi in Kenya and its predecessors [J]. Lü Qixiang, Qian Ziqiang, trans. Geology of Chemical Minerals, 1999(2): 53-78.]
- [20] 张晨鼎,马春花.肯尼亚马加迪碱湖的开发现状[J].纯 碱工业,2005(2):8-11.[Zhang Chending, Ma Chunhua. Exploitation status of Magadi lake in Kenya[J]. Soda Industry, 2005(2):8-11.]
- [21] 魏东岩.略论中国碳酸钠矿床[J].化工矿产地质, 1999,21(2):69-75. [Wei Dongyan. On Chinese sodium carbonate deposits [J]. Geology of Chemical Minerals, 1999,21(2):69-75.]
- [22] 孙大鹏.内蒙高原的天然碱湖[J].海洋与湖沼,1990, 21(1):44-54. [Sun Dapeng. The soda lakes on Inner Monggolia Plateau, China [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1990, 21(1): 44-54.]
- [23] Desborough G A. A biogenic-chemical stratified lake model for the origin of oil shale of the Green River Formation: An alternative to the playa-lake model [J]. GSA Bulletin, 1978, 89(7): 961-971.
- [24] Horsfield B, Curry D J, Bohacs K, et al. Organic geochemistry of freshwater and alkaline lacustrine sediments in the Green River Formation of the Washakie Basin, Wyoming, U. S. A. [J]. Organic Geochemistry, 1994, 22 (3/4/5) : 415-440.
- [25] 邱隆伟,姜在兴,操应长,等.泌阳凹陷碱性成岩作用及 其对储层的影响[J].中国科学(D辑):地球科学, 2001,31(9):752-759. [Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Cao Yingchang, et al. Alkaline diagenesis and its influence on a reservoir in the Biyang Depression [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2001, 31(9):752-759.]
- [26] 李苗苗,马素萍,夏燕青,等.泌阳凹陷核桃园组湖相烃 源岩微观形态特征与形成机制[J]. 岩性油气藏,2014, 26(3):45-50. [Li Miaomiao, Ma Suping, Xia Yanqing, et al. Microscopic morphology and formation mechanism of lacustrine source rocks of Hetaoyuan Formation in Biyang Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(3): 45-50.]
- [27] 周建民,王吉平.河南泌阳凹陷含碱段的浅水蒸发环境
 [J].沉积学报,1989,7(4):149-156. [Zhou Jianmin, Wang Jiping. Shallow evaporative environment for the formation of nahcalite-bearing series in the Biyang Basin, Henan
 [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989,7(4): 149-156.]
- [28] 薛耀松,唐天福,俞从流. 鸟眼构造的成因及其环境意义[J]. 沉积学报,1984,2(1):85-95. [Xue Yaosong, Tang Tianfu, Yu Congliu. The origin and environmental significance of birdseye structures [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984,2(1):85-95.]

The Role of Modern Alkaline Lakes in Explaining the Sedimentary Environment of the Fengcheng Formation, Mahu Depression

WANG LiBao¹, HOU GangFu¹, BIAN BaoLi², LI YaZhe¹, DOU Yang¹, YOU XinCai², GUO HuaJun¹, XU Yang¹, ZOU ZhiWen¹

1. PetroChina Hangzhou Research institute of Geology, Hangzhou 310023, China

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

Abstract: The sedimentary characteristics of modern alkaline lakes and major alkaline deposits were systematically examined as a means of investigating the sedimentary environment of the lower Permian Fengcheng Formation in the Mahu Depression, then compared with the sedimentary characteristics of the formation. The results showed that the formation had its origins in a large alkaline lake basin with properties similar to those of typical modern alkaline lakes in various parts of the world, that is, having similar authigenic minerals, sedimentary assemblages and evolutionary processes. The Fengcheng Formation was a closed basin structure formed in a semi-arid climatic environment. The alkali-bearing strata, which were generally formed in shallow water, are the products of evaporation and concentration of carbonated lake water, with dark, fine-grained interbeds in the alkaline layer.

Key words: Junggar Basin; Mahu Depression; Permian; Fengcheng Formation; alkaline lake