

陕北奥陶纪盐盆厚层钾石盐高矿化段的发现 及其找钾启示

张永生, 邢恩袁*, 郑绵平, 苏奎, 樊馥, 龚文强, 袁鹤然, 刘建华

中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘 要: 位于陕北奥陶纪盐盆东二盐凹东部的钾盐科学勘查井——绥钾 1 井, 揭示了奥陶系马家沟组马五 6 亚段厚度为 118.17 m, 其中岩盐厚度累计 100.38 m。本次工作将该井马五 6 亚段划分为 4 个成盐韵律, 并利用示钾微化反应和岩盐样品溴、氯、钾元素分析为主要分析手段对绥钾 1 井岩盐段的含钾性进行评价, 结果表明: 该井马五 6 亚段发育累计厚度达 64.7 m 的厚层钾石盐高矿化段, 发育 4 套成盐韵律, 含钾石盐分布在相对完整的韵律 II 和韵律 III 中大部分的褐红色和褐色石盐中, 以韵律 II 含钾性最好, 石盐顶部的泥质夹层起到了保护作用; 本井整体 K^+ 含量在 0.08%~1.24% 之间, 一般在 0.1% 以上, 平均为 0.23%, 局部井段钾含量接近边界工业品位; Br^- 含量在 90×10^{-6} ~ 400×10^{-6} 之间, 平均为 242×10^{-6} ; $Br^- \times 10^3 / Cl^-$ (溴氯系数) 在 0.17~0.98 之间, 平均为 0.45。溴值和溴氯系数绝大部分达到钾石盐-光卤石沉积阶段。利用绥钾 1 井和盐盆内其他地区 9 口盐探井的平均钾含量数据编制了陕北奥陶纪盐盆马五 6 亚段 K^+ 含量(%)变化趋势图, 该图指示东南部的东二盐凹是研究区较有利的含钾盐凹。绥钾 1 井马五 6 亚段厚层钾石盐高矿化段的发现, 不仅揭示了该盐盆巨大的找钾前景, 也为今后钾盐勘查工作部署指明了方向。

关键词: 钾石盐; 奥陶纪; 马家沟组; 成盐韵律; 陕北盐盆; 东二盐凹

中图分类号: P588.247; P534.42 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.06.04

The Discovery of Thick-bedded Sylvite Highly Mineralized Section from the M_5^6 Sub-member of Ordovician Majiagou Formation in Northern Shaanxi Salt Basin and Its Potash Salt-prospecting Implications

ZHANG Yong-sheng, XING En-yuan*, ZHENG Mian-ping, SU Kui, FAN Fu,
GONG Wen-qiang, YUAN He-ran, LIU Jian-hua

*MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037*

Abstract: Located on the east side of the Suide salt depression in Northern Shaanxi salt basin, the scientific potash prospecting well of SJ1 encountered 118.17 m of the M_5^6 member of the Ordovician Majiagou Formation. The cumulative thickness of the salt series in the member is 100.38 m. In this study, the M_5^6 member of well SJ1 was divided into 4 salt rhythms, and the potassium content in the salinastone section was evaluated by in-situ micro-chemical reaction testing and quantitative analysis in the laboratory. The data obtained indicate that the cumulative thickness of mineralized potash in the M_5^6 member is 64.7 m, comprising 3 salt rhythms. Potash salt monolayer is brownish red or brown in color in the relatively complete rhythm II and rhythm III, and potash salt in rhythm II has the highest content of potassium, with the argillaceous interlayer at the top playing the protective role. The potassium content for part of the section is close to industrial grade, with potassium ion content ranging

本文由中国地质调查局地质调查工作项目“陕北奥陶纪盐盆地钾盐资源调查评价”(编号: 1212011085516)和国家重大基础研究计划“973”

课题“鄂尔多斯奥陶纪古陆表海盆成钾条件、机理和后期演化”(编号: 2011CB403001)联合资助。

收稿日期: 2014-01-26; 改回日期: 2014-06-04。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 张永生, 男, 1963 年生。研究员, 博士生导师。主要从事盐类矿床和石油地质研究。E-mail: zys_601@126.com。

*通讯作者: 邢恩袁, 男, 1982 年生。博士后。主要从事盐类矿床和石油地质研究。E-mail: xing-enyuan@qq.com。

from 0.08% to 1.24%, mostly in excess of 0.1% and averagely 0.23%. The Br^- content is from 90×10^{-6} to 400×10^{-6} , averaging 242×10^{-6} ; the $\text{Br}^- \times 10^3 / \text{Cl}^-$ ratio ranges from 0.17 to 0.98, averaging 0.45. The content of Br^- and the $\text{Br}^- \times 10^3 / \text{Cl}^-$ ratio indicate that most of the samples have reached the precipitation stage for potash and carnallite. Using the average K^+ (%) content values for well SJ1 and the other eight boreholes in the salt depression, the authors drew a trend map for the change in the K^+ (%) content, which shows that the better potash depression is the second east salt depression. The discovery of the thick highly mineralized sylvite layer in the well not only supports the potential for potash prospecting in the area but also provides clear indications for the exploration of potash salt.

Key words: sylvite; Ordovician; Majiagou Formation; salt rhythm; northern Shaanxi salt basin; the second east salt depression

陕北奥陶纪盐盆位于鄂尔多斯盆地东部, 具备有利于氯化物盐类迁移富集的预备盆地发育的区域岩相古地理条件, 是世界上少有的具备钾盐资源潜力的奥陶纪含钾蒸发岩盆地(郑绵平等, 2006, 2010, 2012)。有关鄂尔多斯盆地蒸发岩矿床的岩相古地理研究证明该地区是钾盐资源的有利远景区: 冯增昭等(1999, 1998, 1991)对鄂尔多斯盆地岩相古地理环境做了较完整的分析, Feng 等(1998)指出膏盐湖中白云岩化的灰泥岩与石膏、岩盐共生, 与盐类矿床关系密切。笔者从通过对鄂尔多斯盆地马四段砂糖状白云岩的研究中指出引起埋藏白云化的成岩流体与陕北盐盆早期残余的地层卤水有一定的联系(张永生等, 1999, 1997; 张永生, 2000)。张吉森等(1991)、王泽中等(1993)学者利用局部隆起、坳陷控制的半封闭海域模式以及浅水台地坳陷模式来解释鄂尔多斯地区岩盐的成因。包洪平等(2004, 2000)分析了鄂尔多斯盆地东部奥陶系的沉积微相, 为进一步精细刻画盐盆内部古地理条件奠定了基础。陈文西等(2010)强调除了古气候等条件外, 华北地台西部的陕北奥陶纪盐盆东部分别有 3 个相邻的蒸发预备盆地, 明确了该盐盆是卤水蒸发沉积最后阶段产物——氯化物盐类汇集的有利区。直接针对陕北奥陶纪盐盆岩盐(钾盐)矿床的研究早有报道(郑绵平等, 1974), 实际勘查则始于 20 世纪 80 年代。1986 年至今, 长庆油田公司以及其他盐业公司在陕北榆林等地区完钻的各类探井中, 有 11 口井钻遇马五 4 亚段石盐层、12 口井钻遇马五 6 亚段盐层, 其中多口井见到钾盐矿化显示, 为本次研究提供了大量基础数据。在总结前人研究成果与数据的基础上, 本次研究工作于 2011 年度在东二凹陷的绥东盐洼实施 1 口钾盐科学勘查井——绥钾 1 井, 其钻探目的是对陕北盐盆奥陶系马家沟组重点含钾目的层段——马五 6 亚段进行“穿靴戴帽”式全取心, 建立该目的层段盐韵律组合综合地层柱, 通过对全套岩盐岩心的 $\text{K}^+ - \text{Br}^- - \text{Cl}^-$ 等配套测试分析, 获取完整可靠的含钾第一性资料, 并建立一个可供对比的成盐成钾地质-地球化学主干剖面。该井于 2011 年 12 月 7 日完钻, 钻

穿整个马五段盐系地层, 终孔层位为马四段灰岩, 取心总进尺为 263.33 m, 岩心总长度 262.59 m, 总收获率为 99.72%。该井主力盐层马五 6 亚段井深 2286.11—2404.28 m, 厚度 118.17 m, 其中岩盐厚度累计 100.38 m。所获得的连续完整的岩盐岩心为后续分析测试和综合研究提供了可靠的第一手实物资料。

鄂尔多斯盆地, 北起阴山、大青山, 南抵秦岭, 西至贺兰山、六盘山, 东达吕梁山、太行山, 总面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。陕北奥陶纪盐盆位于鄂尔多斯盆地的中东部, 隶属华北地台; 其分布范围大致在东经 $108^\circ 30' - 111^\circ$, 北纬 $36^\circ 10' - 39^\circ 10'$ 之间, 面积约 $5.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。含奥陶纪的陕北盐盆地位于华北地台西部的鄂尔多斯克拉通内部的坳陷盆地, 盆地沉积主要受北部伊盟古陆、西南部隆起带(定边—庆阳—渭北)和东部的吕梁隆起控制。在早古生代, 位于华北地台西部的鄂尔多斯地块进入克拉通碳酸岩盐台地演化阶段, 地块主体以稳定的浅水碳酸岩盐、蒸发岩夹碎屑岩沉积为主(冯增昭等, 1991)。

马家沟组岩石地层可以概括为一套碳酸岩盐—蒸发岩沉积序列: 自下而上为马一段至马六段, 马一、马三和马五段为含盐段, 马二、马四和马六段主要为碳酸岩盐的淡化段, 构成了三个完整海退-海进的沉积旋回。其中, 重点岩盐段马五段又自上而下进一步分为 10 个亚段, 即马五 1—马五 10 亚段。

1 绥钾 1 井马五 6 亚段岩相与钾盐矿化特征

1.1 马五 6 亚段岩性特征

如图 2 所示: 绥钾 1 井马五 6 亚段为含钾盐系地层, 现场微化反应和后期室内实验分析证实含钾岩盐总厚度为 64.7 m, 主要分布在本段的中下部, 少量在上部。含钾石盐整体多为褐色、褐红色, 少量为烟灰色, 以细-中晶结构为主; 不含钾石盐多为烟灰色, 中粗-巨晶结构, 多呈半自形-它形晶, 空气中易潮解。盐系的顶底分别为马五 5 亚段和马五 7 亚段的深灰色灰岩; 盐系中的夹层多为泥质云岩和

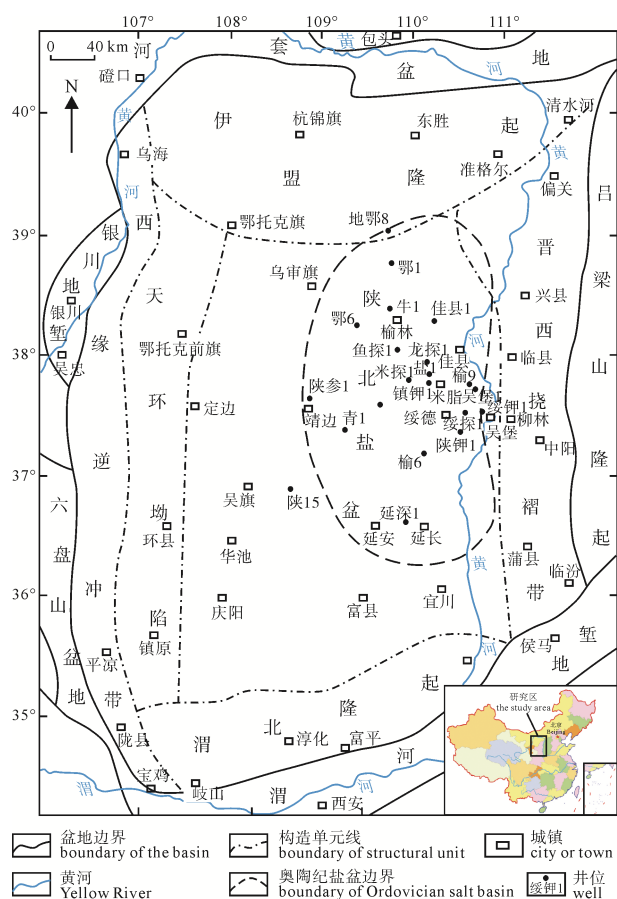


图1 陕北奥陶纪盐盆现今位置与区域构造图
Fig. 1 Present location and regional structure map of Northern Shaanxi Ordovician salt basin

含膏泥岩, 少量为白云岩。若以每套显著的厚层(泥质)白云岩(淡化标志)为下一次成盐韵律的开始和上一次成盐韵律的结束, 则自下而上可以将绥钾1井马五6亚段分为4个成盐韵律, 其中韵律II和韵律III为主要的成钾韵律, 具体岩性特征如下:

韵律I: 厚 20.87 m, 岩盐 16.95 m。以烟灰色、褐红色和红褐色岩盐为主, 不含钾。韵律底部为马五7盐段深灰色灰岩, 顶部为褐红色岩盐, 中部及上部多夹薄层灰绿色硬石膏、泥岩和少量深灰色泥质云岩。韵律I岩盐以烟灰色和褐红色/红褐色石盐层间互出现为特征, 细-中晶结构, 厚层状构造, 半透明、质较纯。岩盐中部主要夹膏质岩盐和2套薄层硬石膏, 其中硬石膏薄层状构造, 条带清晰, 致密坚硬。上部夹2套灰绿色泥岩和深灰色薄层白云岩, 泥岩为泥质结构、胶结差、易碎, 薄层状构造, 性软、塑性较强; 白云岩隐晶结构, 厚层状构造, 致密坚硬, 性脆, 局部发育的裂隙均被盐岩充填。

韵律II: 厚 25 m, 岩盐 19.52 m, 是主要含钾韵律之一。以褐色、褐红色和烟灰色石盐为主, 其中褐色和少量褐红色岩盐含钾, 厚层状, 显示了成钾的氧化环境特征。韵律底部为深灰色白云岩, 顶部

为烟灰色岩盐。含钾的褐色、褐红色石盐以细-中晶结构为主, 厚层状构造, 半透明, 质较纯; 不含钾的烟灰色石盐以中-粗晶结构为主, 厚层状构造, 半透明, 质较纯, 层面间多夹厚度小于1 cm的泥质物。岩盐中夹3套薄层泥质岩盐和一套灰白色白云岩, 其中泥质岩盐为灰绿色, 石盐主要为褐色, 泥岩与石盐混合共生, 胶结差, 易松散破碎, 性软; 白云岩隐晶结构, 中层状构造, 致密坚硬。

韵律III: 厚 64.39 m, 岩盐 55.30 m, 是主要含钾韵律之一。以烟灰色、褐红色石盐为主, 含少量褐色、茶褐色及深灰色岩盐, 其中褐红色和少量褐色、烟灰色石盐含钾, 中-厚层状。韵律底部为多套深灰色泥质白云岩, 与烟灰色石盐间互出现, 隐晶结构, 厚层状构造, 致密坚硬, 性脆, 局部发育裂隙均被岩盐充填, 反映了韵律早期海水侵入的波动性特征; 顶部为深灰色含膏泥岩与褐红色岩盐薄互层。本韵律岩盐自下而上的特征依次为: 下部石盐不含钾, 为烟灰-灰色、褐色、褐红色, 中-粗晶结构, 局部为粗-巨晶结构, 厚层状构造, 半透明-透明, 质较纯; 中部石盐大部分含钾, 石盐以烟灰色-褐红色含钾石盐层反复出现为特征, 细-中晶结构, 中-厚层状构造, 半透明, 质较纯; 中部少量不含钾石盐为褐色、茶褐色石, 中-粗晶结构, 厚层状构造, 半透明, 质较纯; 上部以褐红色厚层状石盐为主, 只有韵律顶部石盐含钾, 细-中晶结构, 其他不含钾石盐以粗-巨晶结构为主。岩盐中多夹灰绿色含膏泥岩或泥岩, 泥质结构, 薄层状构造, 性软, 具塑性, 呈波浪状或条带状分布。仅在韵律中部夹有灰绿色薄层状硬石膏, 性软, 遇水易膨胀, 结构极松散, 薄层状构造, 极具塑性, 性软。

韵律IV: 厚 10.41 m, 岩盐 8.61 m, 以灰色石盐为主, 中部夹深灰色含膏云岩。韵律底部为深灰色泥质白云岩, 薄层状, 隐晶结构, 泥质胶结; 顶部为浅褐色石盐。本韵律未发育完整即被马五5盐段深灰色灰岩覆盖, 因此本韵律岩盐不含钾。灰色岩盐为细晶结构, 厚层状构造, 半透明, 质较纯; 浅褐色岩盐为细-中晶结构, 局部为粗晶结构, 厚层状构造, 半透明, 质较纯。

1.2 马五6亚段钾盐矿化特征

本次对绥钾1井岩盐段含钾性的初判是先通过对钻探现场收获的岩心进行实时编录的同时, 每隔5~10 cm取一个粉末样, 再对马五6亚段的岩盐进行钾盐微化扫描分析。该方法适用于现场快速定性判断钾石盐含量大小(曲懿华, 1975), 可排查钾盐矿化程度。微化反应试剂为亚硝酸铜铅钠, 该试剂遇到钾离子发生反应生成亚硝酸铜铅钾(黑色方块颗粒)。

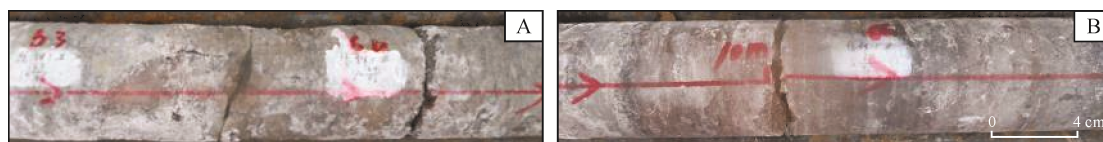


图4 绥钾1井第10回次第63(A)和64(B)块含钾石盐高矿化段岩心照片

Fig. 4 Photograph of the sylvite mineralized core from samples 63 (A) and 64 (B) from the tenth salt core in well SJ1

现场微化测试 651 件样品, 定性分为好、中、差三个级别, 评价中级以上则接近或超过边界品位的钾盐矿石或者矿脉。划分标准为: 试剂滴上后样品瞬间出现大量连片黑色亚硝酸铜铅钾, 宏观上呈深绿色、镜下呈暗色雾状的矿片为强级别(图 3A); 试剂滴定后, 反应时间稍长, 宏观上呈绿色为主带有离散状黑色斑点、镜下目测仍有 1% 以上的黑色亚硝酸铜铅钾的矿片为中级样品(图 3B); 差级别的样品矿片微化反应不明显或无反应。

从微化反应结果看, 该井马五 6 亚段岩盐普遍具有明显的钾盐矿化现象。宏观上, 钾盐矿化度较高的岩段呈褐红色, 向顶底端颜色逐渐变浅(图 4), 微化反应强烈, 镜下呈现大面积连片分布的黑色亚硝酸铜铅钾, 单偏光下可见钾石盐单矿物(图 5)。最终定性划分出约 70 m 钾盐矿化段。

在初步确定了含钾岩盐段分布范围的基础上, 对绥钾 1 井马五 6 亚段第 5 至 12 回次的 103 件岩盐样品进行 K^+ 、 Br^- 、 Cl^- 等 3 项测试, 其中 K^+ 的含量由 GGX-600 原子吸收分光光度计法测定, Br^- 的含量采用酚红比色法测定, Cl^- 的含量采用硝酸银容量法测定, 所有样品由中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心化验室完成测试。为确保测试结果的可信度, 从中抽取 30 件样品送往中国地质科学院国家地质测试中心进行平行测试, 结果与前者一致, 表明测试结果可靠, 数据与统计结果见图 2 和图 6。

图 6 显示: 绥钾 1 井马五 6 亚段 K^+ 的含量在 0.08%~1.24% 之间, 平均为 0.23%, 其中 $K^+ < 0.1\%$ 的样品数为 19 件, 占总量的 18.5%, K^+ 含量在 0.1%~1.0% 的样品数为 83 件, 占 80.6%, $K^+ > 1.0\%$ 的样品数 1 件, 占总量的 1.0%。刘群等(1997)指出陕北盐盆 $K^+ > 0.99\%$ 即可在石盐中出现钾石盐晶粒, 若以 K^+ 含量 0.1% 作为界定岩盐钾矿化的下限, 则所测岩盐样品的 81.6% 达钾石盐矿化, 累计厚度达 64.7 m, 局部井段钾含量达边界工业品位 ($KCl=2\%$)。本井 Br^- 含量在 90×10^{-6} ~ 400×10^{-6} 之间, 平均为 242×10^{-6} ; $Br^- \times 10^3 / Cl^-$ (溴氯系数) 在 0.17~0.98 之间, 平均为 0.45。本井溴值与溴氯系数整体较高, 指示当时成盐演化进入了钾石盐沉积阶段(陈郁华, 1983), 钾石盐可以正常沉淀析出。

1.3 马五 6 亚段成盐韵律与含钾性

纵观绥钾 1 井马五 6 亚段盐系地层综合柱状图

(图 2), 本井盐系顶、底岩相均为开阔台地环境下的灰岩, 是一种相对开放的淡化环境, 代表了马五 6

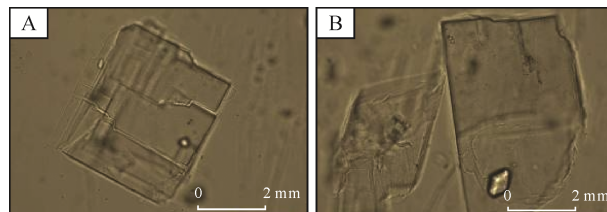


图5 绥钾1井第10回次第63块(A)和64(B)块岩盐岩心钾石盐矿物镜下照片

Fig. 5 Photomicrographs of the sylvite in samples 63 (A) and 64 (B) from the tenth salt core of well SJ1

照片中的矿物为钾石盐, 单偏光, 浸油折光率=1.5022, 提升镜筒状态

The mineral in the photograph is sylvite, plainlight, under the condition that the lens cones are elevated; the refractive index of the immersion oil is 1.5022

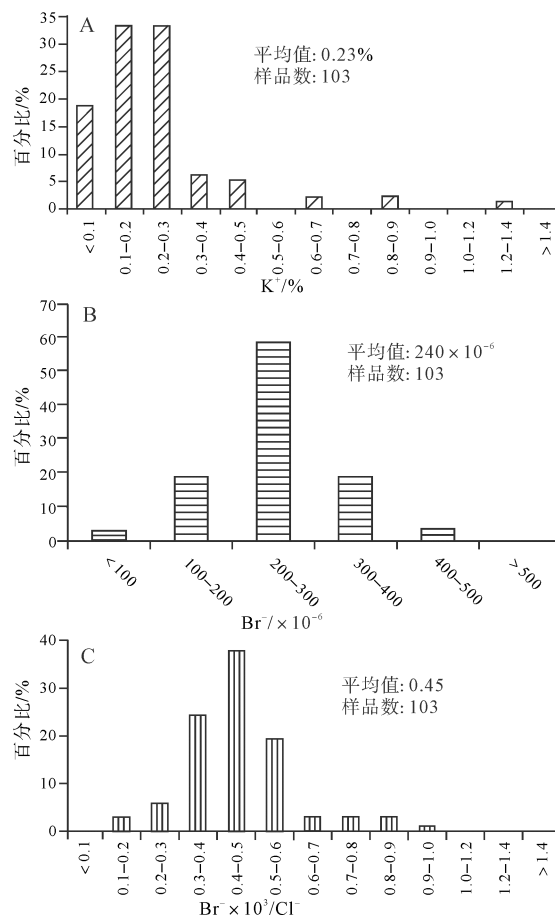


图6 绥钾1井奥陶系马五6亚段 K^+ (A)、 Br^- (B)、 $Br^- \times 10^3 / Cl^-$ (C)频率分布直方图

Fig. 6 K^+ (A), Br^- (B), $Br^- \times 10^3 / Cl^-$ (C) distribution stratigraphic column for the Ordovician M_5^6 -stage strata of well SJ1

成盐亚期的开始和结束。马五 6 亚段盐系沉积由 4 个成盐韵律组成, 每个韵律均以淡化泻湖环境下的泥质云岩(白云岩)为韵律的开始, 逐渐咸化为膏盐湖、盐湖、含钾盐湖沉积环境, 直至下一次大规模海水补给形成淡化泻湖环境, 开始新的成盐韵律。其中见钾成盐韵律 II 和韵律 III 均具有成钾性, 并以韵律 II 的成钾性最好。韵律 I 石盐发育较好, 但未见成钾显示; 韵律 IV 则由于很快就被马五 5 沉积亚期的大量海水淡化, 因此未形成完整韵律。成盐韵律的含钾段均以褐色、褐红色等较深颜色的含钾石盐为主, 仅少量分布在烟灰色含钾石盐段且钾含量低, 钾含量随着石盐颜色变为褐红色石盐或褐色才逐渐升高, 这反应了咸化成钾过程中的浅水氧化环境才是有利的。进一步观察每个成钾高峰的岩盐顶部都沉积有泥质层或泥岩层, 这表明该泥岩层对含钾石盐起到了一定的保护作用, 是有利的成钾条件。值得注意的是韵律 III 含钾石盐颜色不一, 有深有浅, 甚至在韵律顶部厚层状褐红色石盐段仅少量细晶石盐含钾, 而巨、粗晶结构的褐红色石盐则不含钾, 这是韵律 III 晚期石盐的重结晶作用, 表明该韵律晚期成钾条件变差, 韵律 IV 的快速结束也从一定程度上反映了本井马五 6 亚段晚期整体成钾条件变差。因此, 本井含钾石盐具有如下特征: 细-中晶结构为主, 颜色以褐红色、褐色为主, 顶部有泥质层隔挡保护, 质较纯、透明度好。最后, 本井沉积韵律中石膏含量较低, 这可能与早期预备盆地中大量石膏的析出有关(陈文西等, 2010)。

2 马五 6 亚段岩盐钾盐矿化对比分析

绥钾 1 井马五 6 亚段纵向钾盐矿化累计厚度是目前陕北盐盆钻井中最大的, 在该井中下部(韵律 II)和中上部(韵律 III)各存在一组钾盐矿化峰值段(图 2), 且横向上可以与其西部的绥探 1 井和其北部的榆 9 井对比(图 7, 8, 9)。对比显示: 它们均具备钾盐矿化随井深呈明显的双峰式变化的特征, 即绥钾 1 井在马五 6 亚段岩盐层的中下部 2371 m($K^+=1.24\%$)附近和中上部 2332 m($K^+=0.67\%$)附近各存在一组钾盐矿化峰值段; 绥探 1 井在马五 6 亚段岩盐层的中下部 2503 m($K^+=4.92\%$)附近和中上部 2406 m($K^+=0.16\%$)附近各存在一组钾盐矿化峰值段, 其中该井中下部峰值附近发育了一层厚度约 1 m 达边界工业品位和一层厚度 0.1 m 达工业品位的钾石盐(袁鹤然等, 2010); 榆 9 井在马五 6 亚段岩盐层的中下部 2579 m ($K^+=2.50\%$)附近和中上部 2540 m($K^+=0.23\%$)附近各存在一组钾盐矿化峰值段, 其中该井中下部峰值接近边界工业品位。三口井中接近边界工业品位

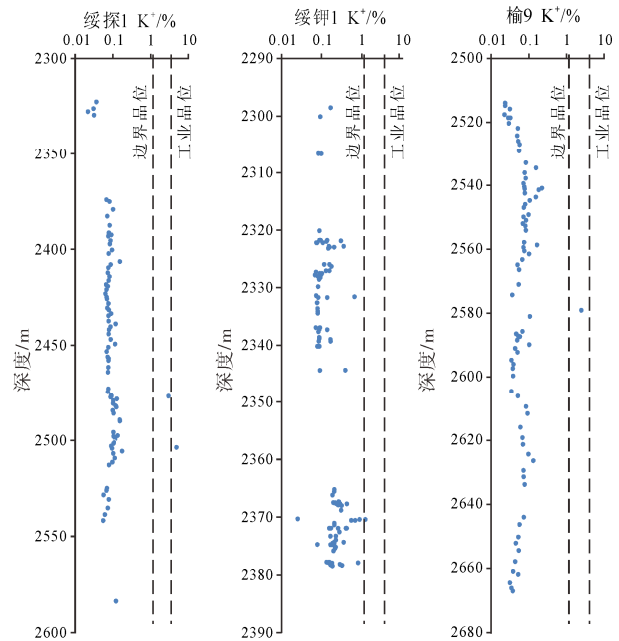


图 7 绥探 1 井、榆 9 井和绥钾 1 井 K^+ -井深相关性
Fig. 7 The relationship between K^+ and the depth of well SJ1, ST1 and Y9

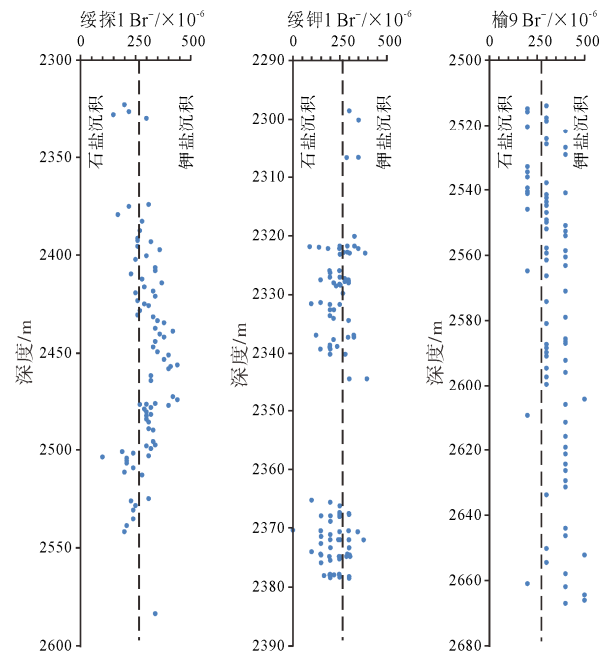


图 8 绥探 1 井、榆 9 井和绥钾 1 井 Br^- -井深相关性
Fig. 8 The relationship between Br^- and the depth of well SJ1, ST1 and Y9

的钾盐矿化层位均发育在全段岩盐层的中部或下部(图 7), 三口井各自的 Br^- 含量和 $Br^- \times 10^3 / Cl^-$ (溴氯系数)随井深变化并非显示出与 K^+ 十分吻合的变化特征, 其中绥钾 1 井吻合度较好, 虽然在 K^+ 峰值深度范围内也出现相应的峰值, 但还显示出上下波动的特征(图 8, 9)。

绥钾 1 井的这种地球化学的波动特征与岩相上的波动特征一致, 这一方面反应了绥钾 1 井所处位置虽然还不是钾盐最终汇聚的中心, 但绥钾 1 井

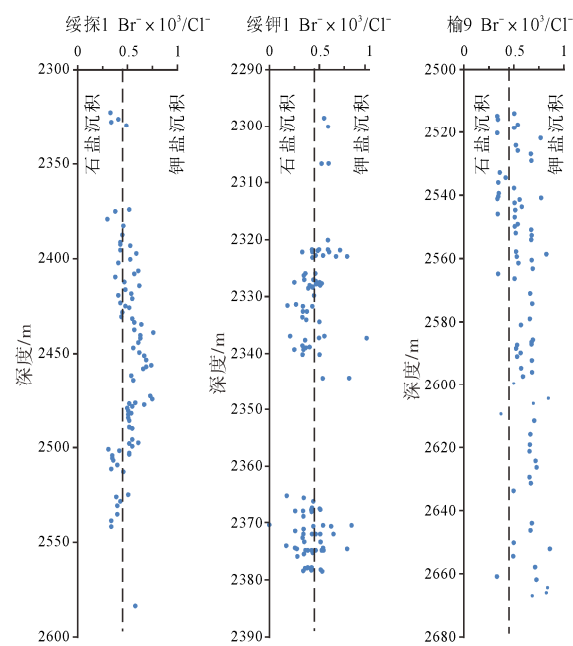


图9 绥探1井、榆9井和绥钾1井
 $\text{Br}^- \times 10^3/\text{Cl}^-$ -井深相关性

Fig. 9 The relationship between $\text{Br}^- \times 10^3/\text{Cl}^-$ and the depth of well SJ1, ST1 and Y9

64.7 m 的钾盐高矿化段和接近边界品位的钾含量 ($\text{K}^+=1.24\%$)表明该井更加接近钾盐汇聚的中心;另一方面,绥钾1井化学元素纵向变化(成盐韵律II、III)的峰值在横向上可作为与绥探1井和榆9井对比的标志,表明马五6亚期内,在这三口井限定的范围内存在两次有利的咸化成钾过程。

3 陕北奥陶纪盐盆马五6亚段岩盐钾盐矿化平面分布特征

研究区地球物理资料最新解释成果表明:陕北盐盆关键盐层段马五6亚段沉积期总体表现为“两拗夹一隆”的古构造格局,次级成盐凹陷有5个,确

定了陕北盐盆不是“平底锅”,而是由多个次级凹陷组成的“复底锅”(张永生等, 2013),奠定了今后在5个次级盐凹中寻找有利区聚钾带的勘查新格局。由于本次工作通过地质、地球化学综合对比分析揭示了东二盐凹是有利的成钾凹陷,具备潜在的钾盐资源。为进一步明确东二盐凹及周边含钾性平面分布特征,本文收集了1986年至今长庆油田公司及其他盐业公司在陕北地区钻穿马五6亚段盐系且见钾的9口主要盐井的地球化学数据,它们分别是东南部的绥探1井、东北部的榆9井、吴堡1井和西部的佳县1井、盐1井、米探1井、龙探1井、鱼探1井、镇钾1井。现将这10口井的 K^+ 含量(%)、 Br^- 含量($\times 10^{-6}$)、 $\text{Br}^- \times 10^3/\text{Cl}^-$ (溴氯系数)及其与正常海水各沉积阶段的地球化学特征参数(陈郁华, 1983; 陈郁华等, 1998; 谭红兵等, 2007)列于表1中。

上述所列的主要岩盐探井中,以绥探1井的含钾显示最好: K^+ 含量为1.05%~3.02%(达边界工业品位)的层段厚度1.0 m, K^+ 含量为4.94%(达工业品位)的层段厚度0.10 m。 K^+ 含量平均值以绥钾1井最高,为0.23%;绥探1井次之,为0.18%;吴堡1井、榆9井、佳县1井再次,为0.10%~0.11%;镇钾1井最低,为0.05%。这指示了绥探1—绥钾1井一带的东南部东二盐凹成钾显示最好,榆9井—吴堡1井所在的东北部地区成钾显示次之,西部整体成钾显示差。溴与溴氯系数也显示了同样的特征:现代海洋环境中盐类沉积的化学元素行为特征参数对研究古代盐类矿床有较好的对比和借鉴作用(Braitsch, 1971),通过与正常海水的不同沉积阶段作比照(陈郁华, 1983),陕北盐盆绥钾1井、绥探1井、榆9井、佳县1井、米探1井的 Br^- 含量($\times 10^{-6}$)和 $\text{Br}^- \times 10^3/\text{Cl}^-$ (溴氯系数)数据显示:这些井马五6亚段

表1 陕北盐盆主要盐井马五6亚段岩盐和正常海水 K^+ , Br^- , $\text{Br}^- \times 10^3/\text{Cl}^-$ 分析数据对比表

Table 1 The K^+ , Br^- , $\text{Br}^- \times 10^3/\text{Cl}^-$ content correlation between the salt from the M_5^6 -stage strata in the main drill holes of the Northern Shaanxi salt basin and the normal marine environment

样品来源	样品数/件	K^+ 含量/%			Br^- 含量/ $\times 10^{-6}$			$\text{Br}^- \times 10^3/\text{Cl}^-$		
		最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
绥钾1井	103	1.24	0.08	0.23	400	90	242	0.98	0.17	0.45
绥探1井	84	4.92	0.02	0.18	440	100	298	0.76	0.30	0.51
榆9井	79	2.50	0.02	0.10	500	200	333	0.84	0.33	0.58
吴堡1井	66	0.34	0.05	0.11	417	50	228	0.86	0.10	0.41
佳县1井	87	0.57	0.02	0.10	399	233	306	0.90	0.41	0.54
盐1井	8	0.08	0.05	0.07	230	20	20	0.50	0.30	0.42
米探1井	91	0.24	0.02	0.08	700	180	370	1.28	0.30	0.65
龙探1井	11	0.13	0.07	0.09	400	200	227	0.70	0.33	0.39
鱼探1井	34	0.14	0.04	0.09	500	200	251	0.89	0.34	0.44
镇钾1井	32	0.06	0.02	0.05	392	20	194	0.54	0.23	0.37
正常海水 1(沉积石盐)					189	68		0.37	0.11	
正常海水 2(沉积钾石盐)					370	270		0.61	0.45	
正常海水 3(沉积光卤石)					630	370		10.39	0.61	

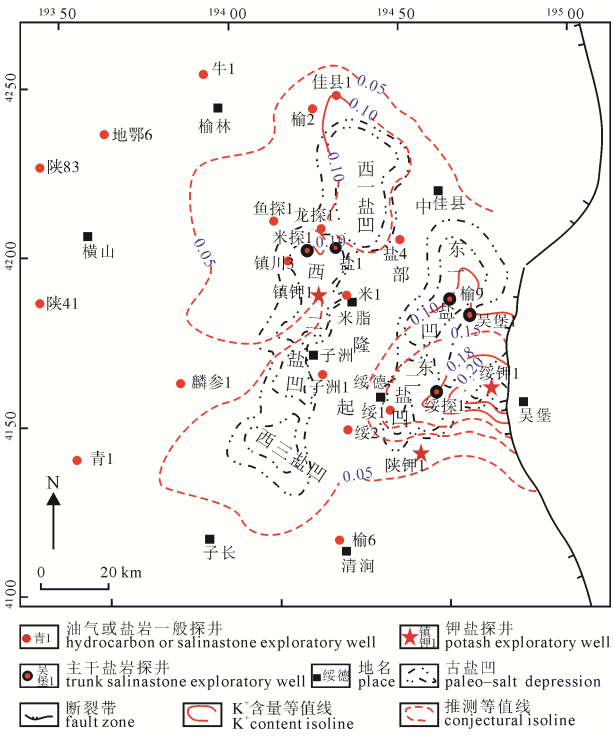


图 10 陕北奥陶纪盐盆马五 6 亚段 K⁺含量等值线图(%)
Fig. 10 Contour map of the K⁺ content in the O₂ M₅⁶ sub-member of Northern Shaanxi salt basin (%)

已达到钾石盐(KCl)-光卤石(KCl·MgCl₂·6H₂O)沉积阶段,具备成钾条件,其中以东部条件相对较好。在此分析基础上,根据表 1 中绥钾 1 井等 9 口井的单井 K⁺含量均值,初步编制陕北奥陶纪盐盆马五 6 亚段 K⁺含量等值线图(图 10)。

该图反映了单井实际数据和古构造条件的地质约束,显示出: K⁺平均含量 > 0.1% 的钾盐矿化异常区有 2 处,即北部的佳县 1—镇川 7—盐 4 井一带西一含钾盐凹和东南部的绥探 1—绥钾 1 东二含钾盐凹,后者显示为更有利的含钾盐凹。绥钾 1 井完整的含钾成盐韵律显示了陕北盐盆有利的成钾前景,该井与绥探 1 和榆 9 井地球化学数据的横向对比也证实了该盐凹及邻区高含钾段的普遍存在,因此本次绘制的 K⁺含量变化趋势图从地球化学角度较直观地显示了当前见钾盐井所揭示的钾盐聚集区的分布趋势,缩小了研究区钾盐有利区带的预测范围。

4 厚层钾石盐高矿化段的发现与找钾启示

自 20 世纪 80 年代中期以来,陕北奥陶纪盐盆的找钾工作已历经近 30 年的历程。从表 2 可以看出,1986 年,长庆石油勘探局在鄂尔多斯东部榆林—绥德地区完钻的洲 1 井、镇川 1 井和米 1 井等天然气探井中,钻遇奥陶系马家沟组马五段盐层;1987 年 7 月在佳县施工了一口“油盐兼探”井——榆 9 井,1989 年完钻后,在马五 6 亚段首次发现 4 cm 薄钾盐层(K⁺含量为 2.5%);进一步分析发现马五 6 亚段及其上部含钾石盐为钾镁盐沉积,所见矿物有钾石盐、光卤石、钾铁盐(陈郁华等, 1998)。1992 年施工的另一口钾盐普查井——陕钾 1 井,发现含有钾石盐矿物的低矿化井段厚 47 m,但其 K⁺含量普遍 < 0.1%(杨全喜等, 1993; 蒙庆, 1996; 刘群等, 1997)。2007 年完钻的岩盐探井——绥探 1 井在马五 6 亚段发现厚度 1.0 m 达边界品位的薄钾盐矿层(K⁺含量为 1.05%~3.02%)和厚度 0.1 m 达工业品位(K⁺含量为 4.94%)的极薄钾盐矿层(除此之外的其它井段 K⁺含量一般 < 0.1%),再到 2011 年的钾盐科学勘查井——绥钾 1 井在马五 6 亚段取得累计厚度达 64.7 m 的厚层钾石盐高矿化段(K⁺含量为 0.10%~1.24%),陕北奥陶纪盐盆的找钾工作正不断取得新的进展,特别是绥钾 1 井和绥探 1 井的钻探,取得了发现薄钾石盐矿层和厚层钾石盐高矿化段的重要新进展,不仅揭示了该盐盆巨大的潜在找钾前景,大大提高了人们寻找海相大型超大型固体钾盐矿床的信心,同时将该盐盆找钾的目标区范围缩小至 1000 km² 之内,为下一步钾盐勘查工作部署指明了明确的方向。

5 结语

绥钾 1 井在马五 6 亚段盐系发育 3 套成盐韵律,在韵律 II 和韵律 III 这两套相对完整的含钾成盐韵律中发现累计厚达 64.7 m 的大套厚层钾盐高矿化段,含钾石盐多为褐红色或褐色,中下部(韵律 II)局部层段 K⁺含量接近边界工业品位,且 K⁺纵向分布具有一定的规律性,可结合地球化学特征和岩石学特征

表 2 陕北奥陶纪盐盆海相找钾进程与成果
Table 2 Historical summary of Ordovician marine potash exploration in Northern Shaanxi salt basin

年度	井别	钾盐矿层	矿化段	K ⁺ 含量/%	备注
1989	榆 9	4.0 cm		2.5(边界品位)	首次发现
1991	陕钾 1		47.0 m	0.03~0.15(低钾盐矿化)	K ⁺ 含量普遍 < 0.1%
2007	绥探 1	1.0 m 0.1 m		1.05~3.02(边界品位) 4.94(工业品位)	重要进展, 其它井段 K ⁺ 含量普遍 < 0.1%
2011	绥钾 1		64.7 m	0.10~1.24(高钾盐矿化)	重要新进展, K ⁺ 含量普遍 > 0.1%

进行横向对比。在盐盆构造分异格局内(张永生等, 2013), 结合多口盐探井地球化学数据编制了盐盆马五6亚段 K^+ 含量等值线图, K^+ 平面分布趋势显示东南部的绥探1-绥钾1所在的东二盐凹是含钾凹陷。本次对绥钾1井的钻探资料的综合分析继榆9井、绥探1井之后陕北盐盆钾盐勘查取得的新的进展, 该井显示了陕北盐盆东南部地区的含钾前景; 但对陕北盐盆钾盐平面分布规律的认识及有利目标区的预测还需要今后进一步地研究完善。

目前, 在面积约 $5.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的陕北盐盆中钻穿马五6亚段的探井尚不足20口, 且分布很不均衡; 业已解剖出的、子洲—绥德一线以北的5个次级盐凹仍有2个盐凹无任何钻探资料, 该线以南的岩盐探井资料亦很少; 成钾显示较好的东二盐凹的地震资料仅限于油气勘探采集的二维地震剖面, 且测线密度较稀, 地质资料和研究精细程度低, 缺少相关地质资料的精细刻画与描述, 仅依据少量的单井岩相和地球化学数据确定有利次级成钾盐洼具有一定的局限性。鉴此, 建议下一步将陕北盐盆钾盐勘查纳入国家矿产资源整装勘查规划, 继续给予大力支持, 以期早日取得陕北盐盆海相固体钾盐矿床勘查的突破。

致谢: 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心化验室司东新高工、崔锦高工及时提供相关盐样的测试数据, 焦健博士协助部分制样, 在此一并致谢!

参考文献:

- 包洪平, 杨承运, 黄建松. 2004. “干化蒸发”与“回灌重溶”——对鄂尔多斯盆地东部奥陶系蒸发岩成因的新认识[J]. 古地理学报, 6(3): 279-288.
- 包洪平, 杨承运. 2000. 鄂尔多斯东部奥陶系马家沟组微相分析[J]. 古地理学报, 2(1): 31-42.
- 陈文西, 袁鹤然. 2010. 陕北奥陶纪盐盆的区域成矿地质条件分析[J]. 地质学报, 84(11): 1565-1575.
- 陈郁华, 袁鹤然, 杜之岳. 1998. 陕北奥陶系钾盐层位的发现与研究[J]. 地质论评, 44(1): 100-105.
- 陈郁华. 1983. 黄海水 25℃恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素分布规律[J]. 地质学报, (4): 379-395.
- 冯增昭, 鲍志东, 康祺发, 张永生, 谭健, 李振亚, 庞福民, 赵学仁. 1999. 鄂尔多斯奥陶纪古构造[J]. 古地理学报, 1(3): 83-94.
- 冯增昭, 鲍志东, 张永生, 谭健. 1998. 鄂尔多斯奥陶纪地层岩石岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社: 8-55.
- 冯增昭, 陈继新, 张吉森. 1991. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社: 49-92.
- 刘群, 杜之岳, 陈郁华, 金若谷, 袁鹤然, 张峯根, 祝有海, 陈英华. 1997. 陕北奥陶系和塔里木石炭系钾盐找矿远景[M].

北京: 原子能出版社: 24-229.

- 蒙庆. 1996. 陕北奥陶系成盐地质条件及找钾远景[J]. 化工矿产地质, 18(1): 22-30.
- 曲懿华. 1975. 常见盐类矿物简易鉴定法[J]. 化工矿山技术, (1): 17-35.
- 谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 樊启顺. 2007. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水资源水化学特征及化学演化[J]. 古地理学报, 9(3): 313-320.
- 王泽中, 翟永红. 1993. 浅水台地坳陷型蒸发岩成因探讨[J]. 地质探索, 9: 22-29.
- 杨全喜, 李江. 1993. 陕北奥陶系首次发现钾石盐[J]. 化工地质, 15(4): 223-227.
- 袁鹤然, 郑绵平, 陈文西, 张永生, 刘建华. 2010. 陕北成盐盆地奥陶纪成钾找钾远景分析[J]. 地质学报, 84(11): 1554-1564.
- 张吉森, 曾少华, 黄建松, 马振芳, 王泽中. 1991. 鄂尔多斯东部地区岩盐的发现、成因及其意义[J]. 沉积学报, 9(2): 34-43.
- 张永生, 金振奎, 谭健. 1999. 鄂尔多斯地区奥陶系马四组麦粒状白云石的发现及其成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 18(1): 18-25.
- 张永生, 张传录, 康祺发. 1997. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟群块状白云岩的包体研究[J]. 岩石矿物学杂志, 16(3): 213-219.
- 张永生, 郑绵平, 包洪平, 郭庆, 于常青, 邢恩袁, 苏奎, 樊馥, 龚文强. 2013. 陕北盐盆马家沟组五段六亚段沉积期构造分异对成钾凹陷的控制[J]. 地质学报, 87(1): 101-109.
- 张永生. 2000. 鄂尔多斯地区奥陶系马家沟群中部块状白云岩的深埋藏白云石化机制[J]. 沉积学报, 18(3): 424-430.
- 郑绵平, 刘文高, 许德明. 1974. 我国的成盐时代和有利成钾地区的探讨[J]. 地质矿产研究(内部刊物): 120-125.
- 郑绵平, 齐文, 张永生. 2006. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. 地质通报, 25(11): 1239-1246.
- 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 刘喜方, 陈文西, 李金锁. 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 84(11): 1523-1553.
- 郑绵平, 张震, 张永生, 刘喜方, 尹宏伟. 2012. 我国钾盐找矿规律新认识和进展[J]. 地球学报, 33(3): 280-294.

References:

- BAO Hong-ping, YANG Cheng-yun, HUANG Jian-song. 2004. “Evaporation drying” and “reinflusing and redissolving” — a new hypothesis concerning formation of the Ordovician evaporites in eastern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 6(3): 279-288(in Chinese with English abstract).
- BAO Hong-ping, YANG Cheng-yun. 2004. Study on microfacies of Majiagou formation, Lower Ordovician, Eastern Ordos, North China[J]. Journal of Palaeogeography, 2(1): 31-42(in Chinese with English abstract).
- BRAITSCHE O. 1971. Salt deposits: Their origin and composition[M]. Berlin and New York: Springer-Verlag.
- CHEN Wen-xi, YUAN He-ran. 2010. Regional ore-forming geo-

- logical conditions of the Ordovician northern Shanxi salt basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1565-1575(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-hua, YUAN He-ran, DU Zhi-yue. 1998. Discovery and Study on Ordovician Potash Salt Horizons in Northern Shaanxi[J]. *Geological Review*, 44(1): 100-105(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-hua. 1983. Salting evaporator sequence and distribution of some micro-element in the Yellow sea water at the evaporation with the constant temperature at 25℃[J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, (4): 379-395(in Chinese with English abstract).
- FENG Zeng-zhao, BAO Zhi-dong, ZHANG Yong-sheng, KANG Qi-fa, TAN Jian, LI Zhen-ya, PANG Fu-min, ZHAO Xue-ren. 1999. Palaeotectonics of Ordovician in Ordos[J]. *Journal of Palaeogeography*, 1(3): 83-94(in Chinese with English abstract).
- FENG Zeng-zhao, BAO Zhi-dong, ZHANG Yong-sheng, TAN Jian. 1998. Lithofacies Palaeogeography of the Early Palaeozoic in Ordos area[M]. Beijing: Geological Publishing House: 8-55(in Chinese).
- FENG Zeng-zhao, CHEN Ji-xin, ZHANG Ji-sen. 1991. Lithofacies palaeogeography of the Early Paleozoic in Ordos area[M]. Beijing: Geological Publishing House: 49-92(in Chinese).
- FENG Zeng-zhao, ZHANG Yong-sheng, JIN Zhen-kui. 1998. Type, origin, and reservoir characteristics of dolostones of the Ordovician Majiagou Group, Ordos, North China Platform[J]. *Sedimentary Geology*, 118(1-4): 127-140.
- LIU Qun, DU Zhi-yue, CHEN Yu-hua, JIN Ruo-gu, YUAN He-ran, ZHANG Feng-gen, ZHU You-hai, CHEN Ying-hua. 1997. Ore-searching prospects of Potash in the Ordovician Northern Shaanxi and Carboniferous Tarim[M]. Beijing: Atomic Energy Press: 24-229(in Chinese).
- MENG Qing. 1996. Potash-hunting prospects of the Ordovician sequences in North Shaanxi with reference to their geological conditions[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 18(1): 22-30(in Chinese with English abstract).
- QU Yi-hua. 1975. Common salt mineral simple assay method[J]. *Chemical Mining Technology*, (1): 17-35(in Chinese).
- TAN Hong-bing, CAO Cheng-dong, LI Ting-wei, FAN Qi-shun. 2007. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oil field brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 313-320(in Chinese with English abstract).
- WANG Ze-zhong, ZHAI Yong-hong. 1993. Origin of shallow platform postrift evaporite rocks[J]. *Geoscience Exploration*, 9: 22-29(in Chinese).
- YANG Quan-xi, LI Jiang. 1993. First discovery of Ordovician potash in Northern Shaanxi[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 15(4): 223-227(in Chinese with English abstract).
- YUANG He-ran, ZHENG Mian-ping, CHEN Wen-xi, ZHANG Yong-sheng, LIU Jian-hua. 2010. Potash prospects in the Ordovician Northern Shaanxi Salt Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1554-1564(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ji-sen, ZENG Shao-hua, HUANG Jian-song, MA Zhen-fang, WANG Ze-zhong. 1991. The Occurrence and Significance of Halite in Eastern Ordos[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9(2): 34-43(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yong-sheng, JIN Zhen-kui, TAN Jian. 1999. The Discovery and Genetic Study of Wheat Dolomite Crystals in the Ordovician Majiagou 4th Formation, Ordos Area[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 18(1): 18-25(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yong-sheng, ZHANG Chuan-lu, KANG Qi-fa. 1997. Inclusion Study of Massive Dolostones of Ordovician Majiagou Group in Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 16(3): 213-219(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yong-sheng, ZHENG Mian-ping, BAO Hong-ping, GUO Qing, YU Chang-qing, XING En-yuan, SU Kui, FAN Fu, GONG Wen-qiang. 2013. Tectonic Differentiation of $O_2m_5^6$ Deposition Stage in Salt Basin, Northern Shanxi, and Its Control over the Formation of Potassium Sag[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 101-109(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yong-sheng. 2000. Mechanism of Deep Burial Dolomitization of Massive Dolostones in the Middle Majiagou Group of the Ordovician, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 424-430(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, LIU Wen-gao, XUN De-ming. 1974. Study of salt forming era and favorable investigate potassium area[J]. *Geology and Mineral Resources Research*(internal publication): 120-125(in Chinese).
- ZHENG Mian-ping, QI Wen, ZHANG Yong-sheng. 2006. Present situation of potash resources and direction of potash search in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1239-1246(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, YUAN He-ran, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, CHEN Wen-xi, LI Jin-suo. 2010. Regional Distribution and Prospects of Potash in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1523-1553(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Zhen, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, YIN Hong-wei. 2012. Potash Exploration Characteristics in China: New Understanding and Research Progress[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(3): 280-294(in Chinese with English abstract).