

国内外古陆表海盆成钾条件对比

——兼论华北成钾的可能性*

张永生, 邢恩袁, 陈文西

(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 克拉通古陆表海盆中的固体钾盐矿床占居全球钾盐资源总量的 90% 以上, 其中最典型的 2 个巨型钾盐矿床是加拿大萨斯喀彻温 and 俄罗斯涅帕。为探究华北奥陶纪古陆表海盆的成钾可能性, 对比分析了国内外同类型盆地的成钾条件, 结果表明: 萨斯喀彻温泥盆纪钾盐矿床的形成主要表现为巨量海水在稳定克拉通预备盆地的持续蒸发浓缩, 进而迁移至相对活动的亚稳定构造区汇聚成钾盐矿床, 其上覆盖着红层沉积, 其成钾模式概括为“泪滴式”; 俄罗斯涅帕寒武纪钾盐矿床的形成过程总体表现为半封闭巨型蒸发台盆接受巨量海水的多次补给并持续蒸发浓缩, 富钾卤水最终汇聚于受同沉积断裂控制的深拗中, 形成巨型钾盐矿床, 钾盐层系上覆为膏岩或灰岩等淡化沉积层, 其钾盐成矿模式概括为“牛眼式”。华北奥陶纪古陆表海盆与形成上述 2 大典型钾盐矿床的盆地具有十分相似的构造古地理和古气候环境条件, 且在华北西部的陕北盐盆已钻获厚 1.22 m 的钾石盐矿层和厚达 64.7 m 的钾石盐高矿化段, 根据盆地特殊地质条件, 建立了陕北奥陶纪盐盆的“复底锅”成钾模型。笔者认为, 华北奥陶纪古陆表海盆完全可能形成一定规模的海相固体钾盐矿床, 并对其中最有可能的陕北盐盆的钾盐资源潜力和找钾前景进行了分析讨论。

关键词 地质学; 古陆表海盆; 成钾条件; 华北; 奥陶纪; 成钾模式

中图分类号: P619.4; P619.211

文献标志码: A

Comparative study of palaeo-epicontinental marine basin potash-forming conditions between China and foreign countries with special reference to potash-forming possibilities in North China

ZHANG YongSheng, XING EnYuan and CHEN WenXi

(MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

Solid potash deposits in craton epicontinental basins account for over 90% of the total global potash resources. The most typical cases are the two giant potash deposits in Saskatchewan of Canada and Niepa of Russia, respectively. To explore the potash formation possibility of Ordovician palaeo-epicontinental marine basins in North China, the authors made a contrastive analysis of the same type of basins in China and abroad. The results show that the formation process of the Saskatchewan Devonian potash deposit can be summarized as follows: a great amount of sea water evaporated continuously and concentrated in a stable cratonic preparation basin, and then the sea water migrated into relatively active metastable structure areas, leading to potash concentration which was later covered by red bed sediments for protection; this potash formation model is summarized

* 本文得到国家重大基础研究计划 973 课题(编号: 2011CB403001)和中国地质调查局地调工作项目(编号: 1212011085516)的资助

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油气地质研究。Email: zys_601@126.com

收稿日期 2014-05-20; 改回日期 2014-08-30。张绮玲编辑。

as “tear drop” type. The formation of the Niepa Cambrian potash deposit is generally shown as follows: a semi-closed, giant evaporation basin accepted repeated supply of a huge amount of sea water and kept evaporation and concentration of sea water, and eventually K-rich brine converged in a deep platform depression controlled by synsedimentary faults, forming a giant potash deposit; potash formation was then covered by desalination sediments like karstenite or limestone instead of red bed, which, however, did not affect potash formation; this kind of potash formation model is summarized as “bull eye” type. Ordovician palaeo-epicontinental basins in North China have extremely similar tectonic palaeogeographic and climate conditions as the above 2 typical potash deposits on salification and potash concentration. In the Northern Shaanxi Salt Basin in the west of North China, 1.22 m thick sylvine ore horizon and 64.7 m thick highly mineralized sylvine layers have been detected; according to the special geological conditions of the basin, the “complex bottom pot” potash formation model in Northern Shaanxi Ordovician Salt Basin is put forward in this paper. It is thus held that marine solid potash deposits of some sizes are possibly existent in Ordovician paleo-epicontinental basins of North China, as shown by the contrastive analysis of the potash-forming conditions in China and abroad. In addition, some analyses and discussions are put forward for potash resources potential and prospect in the Northern Shaanxi Salt Basin.

Key words: geology, paleo-epicontinental marine basin, potash-forming conditions, North China, Ordovician, potash-formation model

已知的钾盐矿床和含钾盐湖卤水(矿)在世界六大洲均有分布,但很不均衡,主要分布在北美洲、亚洲、欧洲等地区。全球钾盐资源(储)量为 2153.99 亿吨(K_2O)(钱自强等,1994),钾盐矿床主要产于寒武纪至第三纪各主要成盐时代的海相层控蒸发岩中。从国外钾盐盆地所属的构造类型来看,与大型稳定克拉通古陆表海盆有关的钾盐资源量最大(2029.28 亿吨),占世界钾盐资源总量的 94.21%(刘成林等,2006)。从钾盐成矿时代看,重要的钾盐成矿期依次为泥盆纪、白垩纪、侏罗纪、二叠纪和寒武纪,其他时代地层蕴藏的钾盐资源量很少(其中包括奥陶纪)。

中国钾盐保有储量以 KCl 计,只有 10.17 亿吨,仅占世界钾盐资源总量的 0.47%,且主要分布在现代陆相盐湖中(郑绵平等,2006a;2006b;王弭力等,1997;刘成林等,2003)。因此,寻求古代海相固体钾盐矿床的找矿突破,方是立足国内、解决中国钾盐短缺问题的根本所在。

中国主要的古代盐盆地多产于“准克拉通(小陆块)”上,特别是在海相盐盆地均以前寒武纪为基底的陆块上。按中国成盐盆地所在构造域的特点,郑绵平等(2010)划分出华北盐类成矿域、扬子盐类成矿域、塔(里木)—柴(达木)盐类成矿域以及羌北—滇西盐类成矿带(“三域一带”)。本文将在对比分析国内外古陆表海盆成钾条件的基础上,重点讨论华北奥陶纪古陆表海盆成钾的可能性。

1 国外主要克拉通古陆表海盆的成钾条件和成钾模式

国外克拉通古陆表海盆中的钾盐矿床主要有加拿大萨斯喀彻温泥盆纪钾盐矿床、俄罗斯东西伯利亚涅帕寒武纪钾盐矿床、美国新墨西哥州二叠纪钾盐矿床、美国密执安州志留纪钾盐矿床、欧洲蔡希斯坦二叠纪钾盐矿床等。这些蕴藏于克拉通古陆表海盆的固体钾盐矿占居全球钾盐资源总量的 90% 以上,各钾盐矿床及其所属蒸发盆地的特征参数见表 1,其中的典型代表是加拿大萨斯喀彻温和俄罗斯涅帕 2 个巨型钾盐矿床,而在盆地面积与岩性特征上,这 2 个盆地与华北奥陶纪古陆表海盆有相似之处。

1.1 涅帕钾盐矿床——“牛眼式”成钾模式

涅帕钾盐矿床位于俄罗斯东西伯利亚伊尔库茨克州北部的涅帕镇,为一巨型钾盐矿床,隶属于东西伯利亚蒸发台盆的一部分。东西伯利亚寒武纪蒸发台盆总面积达 250 万 km^2 ,盐盆地面积约 25 万 km^2 ,涅帕钾盐矿床位于盐盆地东南部,钾盐矿床分布面积超过 2 万 km^2 ,推测钾石盐矿石储量可达 700~800 亿吨,是世界上少有的巨型钾盐矿床(Др Ч Э И И,1977;刘群,1995)。涅帕钾盐矿床位于东西伯利亚地台南部的台向斜和边缘拗陷中,拗陷的东、南、西三面为外贝加尔褶皱带,二者之间有一条长期活动的断裂带。褶皱和断裂带的活动使盆地基底不断

下陷,为盐类快速堆积提供了足够的补偿空间,并在盐盆地边缘形成台阶,阻止高矿化度卤水外泄,使水体盐度逐渐增高,为成盐、成钾创造了极为有利的构造条件。盐盆地东北部有一条宽 10~150 km 的堡礁带,作为隔挡屏障,分隔盆地和广海,使盐盆地周期性接受海水的补给,保证了钾盐形成所需的物质来源。古地磁资料显示,寒武纪时西伯利亚地台处于北纬 10°左右的干旱气候带,对成盐、成钾极为有利。从这些资料看,东西伯利亚寒武纪蒸发台盆的古地理面貌与中国华北早古生代古陆表海盆相似,是一个四周有陆、岛、礁围绕,外围是深海槽的碳酸盐蒸发台盆(图 1)。

该钾盐矿床值得强调的特征是:西伯利亚地台从震旦纪末期开始便有白云岩、膏岩沉积,下寒武统底部出现岩盐,直到中寒武统,形成一套厚 1300~1700 m 的碳酸盐岩-蒸发岩建造(注:与华北地台的蒸发沉积在时间序列积累上有相似之处),下寒武统为含钾盐系,其中夹有数个白云岩、膏岩和少量灰岩

层(注:陕北盐盆马五 6 亚段含钾盐段与之较相似)。该钾盐矿床共发育有 6 个钾盐层,单层厚度 2~20 m 不等,钾盐层总厚 70~150 m,主要矿层为安加拉组加仁段和乌索立组中段;位于加仁段顶部和里特文采夫段底部的膏盐-碳酸盐岩层段显示了成钾晚期海水淡化的趋势,这是不利因素,但是并没有影响到其下部钾盐矿床的保存。这表明成钾规模达到一定程度后,晚期的海水淡化对早期矿床的破坏是有限的。此外,涅帕盆地的成钾特色还包括海水浓缩蒸发的可容空间面积巨大,补偿深度适中。总体容纳了巨量海水,而极端干旱气候条件保障了海水持续蒸发,最终形成巨型钾盐矿床。Schmalz(1970)认为此类克拉通古陆表海盆钾盐成矿模式为“牛眼式”(图 1),与其类似的还有美国志留纪密执安盆地和德国二叠纪蔡希斯坦盆地。

1.2 萨斯喀彻温钾盐矿床——“泪滴式”成钾模式
该钾盐矿床位于加拿大萨斯喀彻温省,在中泥盆世 Elk Point 巨型蒸发盆地的东南部。Elk Point 蒸

表 1 全球主要海相克拉通盆地成盐成钾特征及资源量汇总表

Table 1 A summary of characteristics of the potash formation in global marine typical cratonic basins and K₂O resources

盆地特征	加拿大 Elk Point 盆地	俄罗斯 东西伯利亚台盆	美国 新墨西哥盆地	美国 密执安盆地	欧洲 蔡希斯坦盆地	中国 华北台盆
形成时代	泥盆纪	寒武纪	二叠纪	志留纪	二叠纪	奥陶纪
盆地面积/km ²	65.19×10 ⁴	250×10 ⁴	15×10 ⁴	31.6×10 ⁴	1000×10 ⁴	65×10 ⁴
盐分布面积/km ²	20×10 ⁴	25×10 ⁴	9.6×10 ⁴	—	10×10 ⁴	5.6×10 ⁴
钾盐分布面积/km ²	9×10 ⁴	2×10 ⁴	4920	3.38×10 ⁴	—	2000(预测)
盐系地层厚度/m	>400	2000	490~1300	30~1105	>1000	800~900
盐岩厚度/m	8~230	1030~1430	120~900(估算)	600	424~1300	80~206
钾盐厚/m	33~60	70~150	40~180	0~30	134~293	1.1
钾盐矿层数	3 层	6 层	11 层	1 层	4 层	2 层
单层厚度/m	9~21	2~10	0.75~1.5	—	0.2~45 m	>1.22
钾盐矿床位置	盆地东南部(远离入海口的位	盆地东南部	盆地北部(远离入海口的位	位于纽约-密执安蒸发岩盆地西部的一个次级盆地	盆地中心范围	盆地西南部
钾盐类型	钾石盐和光卤石	光卤石类、钾盐-光卤石和钾石盐	杂卤石和钾石盐	钾石盐	钾石盐	钾石盐为主
含钾层顶底岩性	顶部:DAWSON BAY 组红层;底部:WINNIPEGOSIS 组白云岩	顶部:主要为灰岩和白云岩,下部夹岩盐和硬石膏层;底部:主要为红色砂岩、泥岩和碳酸岩盐(白云岩、泥灰岩)	顶部:Dewey lake 红层;底部:厚层礁灰岩,在礁后区为红色泥岩、白云岩、硬石膏和岩盐	顶部:泥质白云岩和白云岩;底部:白云岩、石灰岩、碎屑岩	顶部:碎屑岩与硬石膏互层;底部:红色陆源细碎屑岩	顶部:风化侵蚀面,马六段或马五 4 亚段直接与本溪组碎屑岩层接触;底部:马四段石灰岩
古气候、环境	强蒸发 高温干旱环境	强蒸发 干旱环境	强蒸发 高温干旱环境	强蒸发 高温干旱环境	强蒸发 高温干旱环境	强蒸发 高温干旱环境
沉积旋回	3 个大型沉积旋回	3 个沉积(蒸发)旋回	4 个沉积(蒸发)旋回	1 个大型沉积(蒸发)旋回	6 个沉积旋回,包括 4 个蒸发岩旋回	3 个沉积(蒸发)旋回
构造封闭特征	盆地周围被隆起包围,海水从西北补给,有预备盆地	坳陷被褶皱带包围,海水从东北部周期性补给	盆地被中央台地和暗礁带环绕,海水由西南方向盆地补给	环礁包围盆地,海水从东北和西南两个方向进入到盆地中	南部被褶皱山脉包围,北部有海峡与广海相通	盐盆被隆起包围,西部有海峡与广海相通,有预备盆地
资源量(K ₂ O)	1070 亿吨	700 亿吨	8500 万吨(部分)	—	资源量 133 亿吨	—

资料来源:钱自强等,1994;Э.И.И.И., 1977;甘克文,1982;Horita et al., 1996;并补充了华北台盆相关数据。

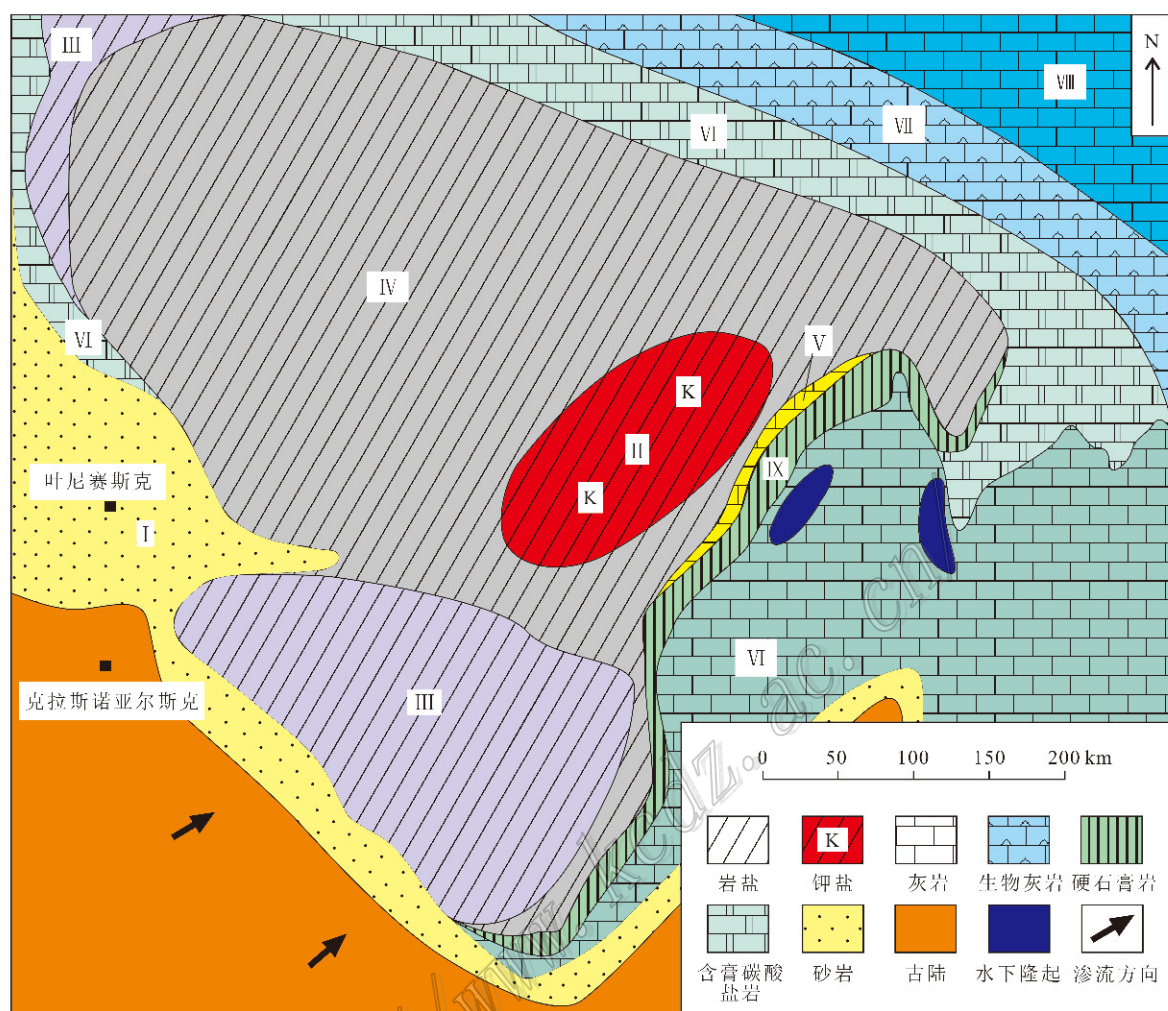


图 1 俄罗斯寒武纪涅帕含钾盆地古地理示意图(据 др ЧЭИИ, 1977; 刘群, 1995; 钱自强等, 1994 修改)

I—滨岸陆源沉积区; II—钾盐矿床沉积区; III—滨岸岩盐沉积区(受大陆水影响的沉积区); IV—受陆源高咸度水影响的沉积区; V—以碳酸盐为主的沉积区; VI—陆棚沉积区; VII—古杯海绵-藻类生物礁堤带; VIII—浅海相区; IX—硬石膏堤

Fig. 1 Paleogeographic sketch map of Cambrian Niepa potash basin in Russia (modified after др ЧЭИИ, 1977; Liu, 1995; Qian et al., 1994)

I—Shore, terrigenous deposition area; II—Potash Mineral deposition area; III—Shore, halite deposition area (zone influenced by continental water); IV—Deposition area influenced by high salinity terrigenous water; V—Deposition area dominated by carbonate sediments; VI—Continental shelf deposition area; VII—Ancient cup sponge-algal reef dike; VIII—Shallow facies area; IX—Anhydrite dam

发盆地总面积约 65 万 km^2 , 膏岩和岩盐分布广泛(钱自强等, 1994; Holter, 1972), 膏岩分布面积约 56 万 km^2 , 盐盆地面积约 20 万 km^2 , 钾盐矿床分布面积 9 万 km^2 , 不到全盆地面积的 1/6 (Klingspor, 1966; Worsley et al., 1979)。草原(Prairie)蒸发岩层是钾盐矿的产出层, 顶部为 Dawson Bay 组红层。草原(Prairie)蒸发岩层岩盐厚度 80~230 m, 钾盐矿厚为 30~60 m, 单层厚 4~5 m (齐文, 2013), $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 20%~30%, 钾盐资源量约为 1070 亿吨(K_2O), 占世界钾盐探明资源量的 50% 以上。萨斯喀彻温盆地

之所以能形成如此巨大的钾盐矿床, 与其特殊的地质条件有着密切的关系: 泥盆纪时期, Elk Point 盆地被周围的高地、岛弧、地台、陆架所包围, 具有 3 个次级盆地, 其中钾盐次级盆地距离广海入海口最远, 且其西北部分布有点状或线状生物礁, 作为隔挡屏障, 隔绝了广海, 使得该地区保持相对封闭的沉积环境。海水由西北口进入 Elk Point 盆地, 一直流向西南的萨斯喀彻温次盆地, 是成钾的主要物质来源(Holter, 1972; 钱自强等, 1994)(图 2)。

总体上, 萨斯喀彻温钾盐盆地是泥盆纪时期形

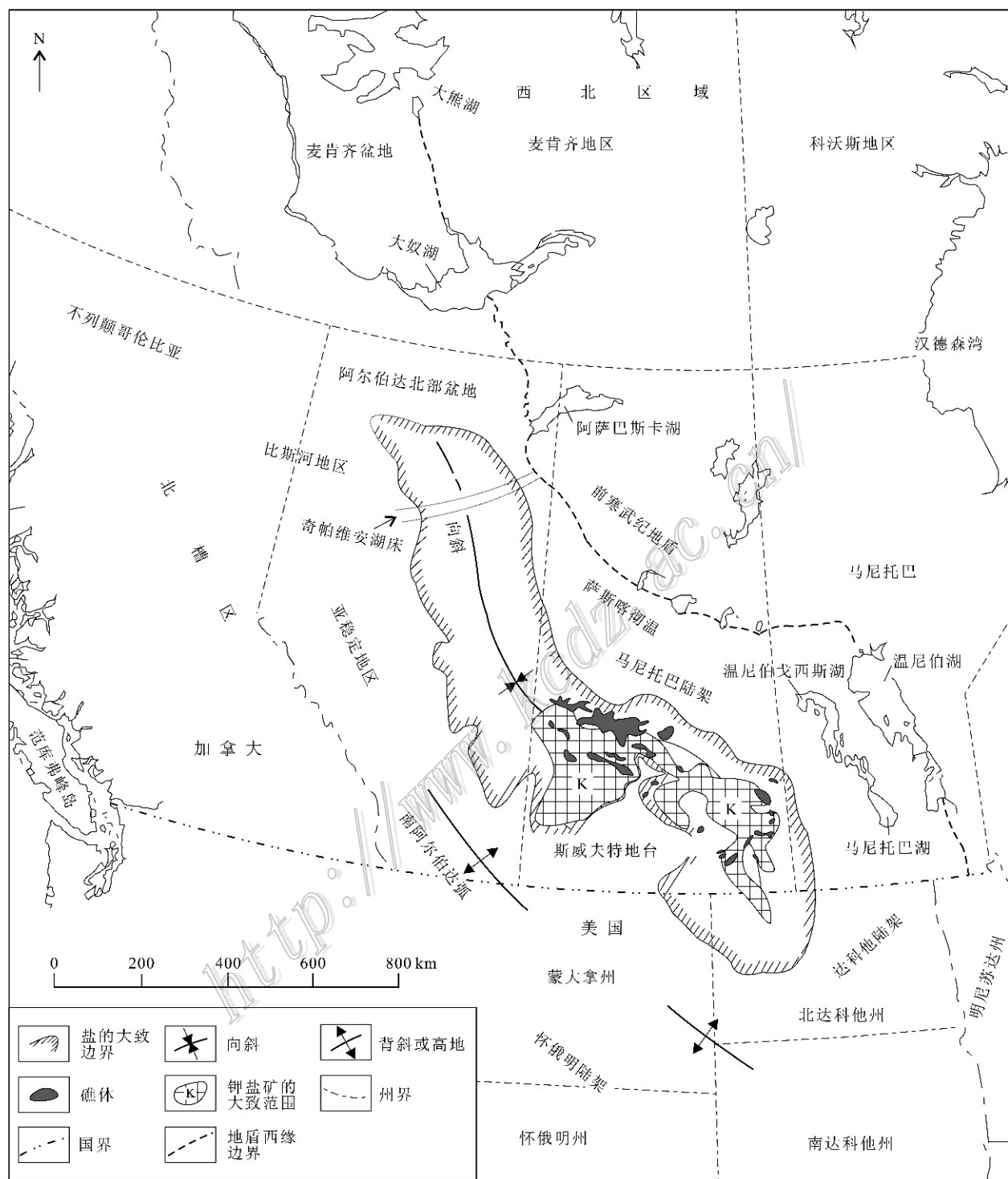


图2 加拿大萨斯喀彻温盆地与周围构造关系示意图(据 Holter, 1972; 钱自强等, 1994 修改)

Fig. 2 Relationship between the Saskatchewan basin of Canada and the surrounding structures (modified after Holter, 1972; Qian et al., 1994)

成的深拗陷型盆地,其发育于前寒武纪地盾和地槽之间的地台区,是最稳定的地盾南侧亚稳定构造区,有利于成钾次盆地的形成和钾盐成矿(郑绵平等,

2012),且成钾区距离海水入口较远,封闭性因盆地地形和盆地边缘的礁体而得到保证,钾盐沉积期正处于泥盆纪中期全球大面积构造运动导致的大幅度

海退,在盆地内部依次形成了碳酸盐—硬石膏—石盐—钾盐—红层的沉积顺序,盐岩段内部无明显的淡化夹层,顶部为厚层碳酸盐岩淡化层,代表草原蒸发岩沉积末期的一次短暂海侵,并未影响到已沉积钾盐矿层的保存,上覆红层代表了海退背景下的极端干旱气候环境沉积,红层的覆盖有效地阻止了先期形成的含钾盐系免于后期破坏,可以说具备了有利于巨型钾盐矿床形成的所有条件。

值得强调的是,萨斯喀彻温钾盐矿床特征为:在该钾盐盆地西北部存在两级更大的预备盆地,卤水最终向远离海水入口的萨斯喀彻温次盆地汇聚,形成巨型钾盐矿床(图2)。预备盆地的贡献主要体现在2个方面:其一,为早期卤水浓缩蒸发作准备,是成盐聚钾的中转站;其二,为成钾盆地提供了充足的富钾卤水物质来源。Schmalz(1970)认为该类型克拉通古陆表海盆钾盐成矿模式为“泪滴式”,与之相似的还有美国新墨西哥州二叠纪钾盐盆地。

2 华北克拉通古陆表海盆成钾可能性分析

华北盐类成矿域是中国最早形成蒸发沉积的构造单元。举世闻名的辽东海城-大石桥古元古代超大型菱镁矿矿床就是在干旱气候条件下潟湖环境的蒸发沉积产物(陈从喜等,2003;蒋少涌等,2004;项才等,2008;汤好书等,2009;肖荣阁,1999;肖荣阁等,2003)。早-中寒武世的华北盐类成矿域基本为干旱气候所控制,蒸发沉积作用较为显著,沧浪铺期见有较多的石膏及盐类沉积,龙王庙期全区的馒头组以及部分地区的毛庄组具有石盐假晶和干裂纹构造(陈旭等,2001;冯增昭等,1989)。整个寒武纪华北陆块均处于南半球中低纬度干旱带的位置(陈旭等,2001;Scotese et al., 1990;吴汉宁等,1991;Zhao et al., 1992;黄宝春等,1996;2000;朱日祥等,1998;杨振宇等,1999)。奥陶纪,华北地台蒸发岩广泛分布,范围包括东经 $108^{\circ}\sim 120^{\circ}$,北纬 $32^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间,膏岩分布面积达 65万 km^2 (冯增昭等,1990;刘群,1995)。奥陶纪马家沟组时期,地台周边有古陆及岛群环绕,内部总体为浅水陆表海蒸发台盆环境(图3),自西向东有庆阳隆起、吕梁山和太行山台隆的阻隔,为陕北盐盆的形成和巨量岩盐堆积奠定了基础(注:离石断裂对陕北盐盆形成演化可能起到关键的控制作用,其断裂性质、活动过程和控盆作用有

待深入研究)。以吕梁台隆为分隔,其西形成的蒸发岩以盐岩为主夹膏岩、钾石盐岩等,其东则主要是膏岩、或膏溶角砾岩,在晋、冀、鲁等省区多处分布有大、中型石膏矿床(刘群,1995)。可见,华北成盐域的成盐聚钾时代主要限于奥陶纪。

值得提出的是,在地质历史上,奥陶纪并不是一个重要成盐期,而是一个重要冰碛期。据Zharkov(1984)统计,奥陶纪盐类堆积的总量仅占各时代总量的0.8%,系显生宙成盐性能最差的一个时代。目前,全球总共报道的奥陶纪蒸发岩盆地只有15个,主要分布于北美大陆(6个)、欧亚大陆(5个)、澳洲大陆(4个),且以低蒸发程度的含膏盆地为主,含盐盆地仅有5个。在5个主要含盐盆地中,以加拿大北极盆地(Canadian Arctic basin)的盐盆面积最大,中国华北地台西部的鄂尔多斯盆地和澳大利亚坎宁盆地(Canning basin)次之,鄂尔多斯盆地是目前世界上唯一的奥陶纪含钾盆地。

现将华北与国外相似的克拉通古陆表海盆的成盐、成钾条件进行对比分析,并探讨华北克拉通古陆表海盆的成钾可能性。

(1) 古气候:古纬度研究表明,国内外钾盐盆地多处于赤道附近的中低纬度副热带高压带,为干旱气候带,有利于海水强烈蒸发,这是全球钾盐盆地成钾的共性,华北古陆表海盐盆也不例外(Zhao et al., 1992;杨振宇等,1999;黄宝春等,1996;2000;陈旭等,2001)。

(2) 海平面变化:国外巨型/超大型海相钾盐矿床在成钾前一般发生过大规模的海侵,奠定了钾盐大矿的物质基础。成钾作用发生于随后长期海退的中晚期,此间也有次级震荡性海水的入侵,形成一些薄的白云岩和膏岩淡化层等,但并未对大规模成钾造成实质性的影响(如涅帕钾盐矿床);华北西部陕北盐盆钾盐矿化度最高的绥德1井马五6亚段含钾盐系韵律与涅帕盆地含钾盐系韵律具有相似的沉积特征(图4)。

(3) 盐盆封闭性:国外巨型钾盐盆地的四周均发育不同类型的隔挡构造,如陆架、台地、台隆、岛弧、礁等围限,保持相对封闭的沉积环境,逐级逐层地阻隔着盐盆与广海的水体交换,促进盆内盐类聚集沉淀直至形成钾盐矿层;陕北含钾盐盆周缘被古陆或间歇性出露的隆起所包围,具备了类似的封闭条件(图3)。

(4) 可容空间:国外钾盐盆地的含钾韵律一般都

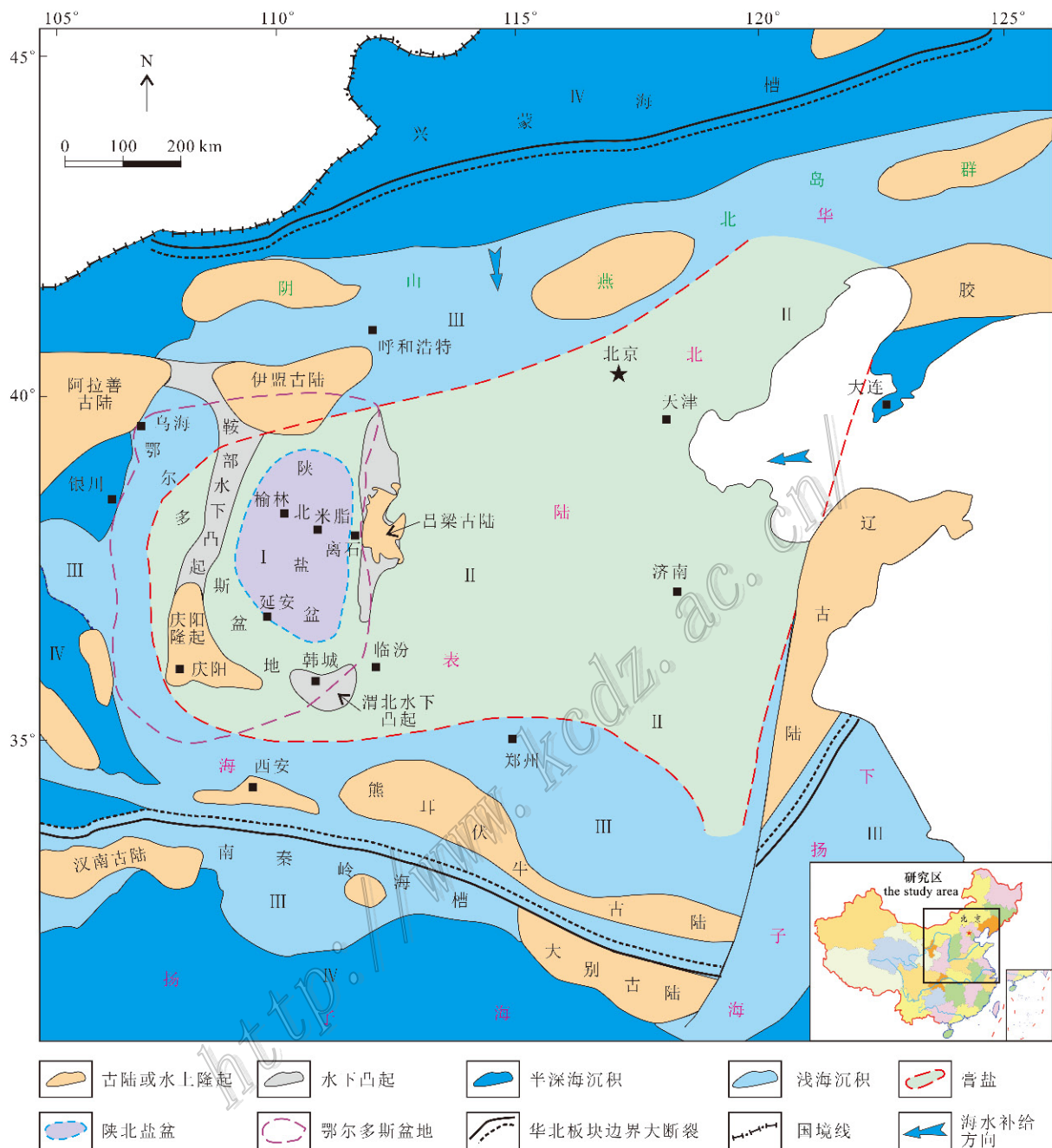


图3 奥陶纪华北古陆表海、鄂尔多斯盆地和陕北盐盆相对位置图
(据王鸿祯, 1985; 冯增昭等, 1990; 郭彦如等, 2012 修编, 有新资料补充)

I—岩盐; II—膏盐或膏溶角砾; III—浅海碳酸盐岩; IV—半深海碳酸盐岩或碎屑岩

Fig. 3 Relative locations of the North China Paleo-epicontinental Basin, Ordos Basin and Northern Shaanxi Salt Basin of Ordovician (modified after Wang, 1985; Feng et al., 1990; Guo et al., 2012; with some new information)

I—Saline deposits; II—Karstenite or gypsum karst breccia; III—Shallow marine carbonate rocks; IV—Bathyal carbonates or clastics

有百米以上厚度的盐岩沉积,这需要盆地基底不断下陷,为盐类快速堆积提供足够的空间。西伯利亚寒武纪蒸发台盆的构造特征与中国古陆表海盐盆尤为相似,除了盐盆被四周的陆、岛、生物礁围绕以外,涅帕钾盐盆地还受到褶皱带隆起和长期活动的盆缘

断裂带的控制,正如陕北盐盆在奥陶纪时期受控于离石断裂/吕梁台隆(图3)。

(5) 成钾物质来源: 国外典型古陆表海盆的成钾物质来源基本上都是海水, 目前的研究表明, 陕北盐盆的成钾物质来源主要是海水, 但也不能排除其

他来源,需要进一步研究。

(6) 成盐成钾韵律组合: 国外钾盐盆地盐系地层成盐韵律演化各异,但是最终多以陆相红层结束,表明极端干旱气候持续至海水蒸发殆尽(北美型),但西伯利亚涅帕钾盐盆地并非如此,其含钾盐系加

仁段的顶、底部均为碳酸盐岩,不同于北美含钾层系的红层封顶,且含钾盐系地层中夹有数个白云岩、硬石膏岩和少量灰岩层(图 4),这是受长期海退背景下次级海侵造成的短暂淡化所致,但并未影响形成钾矿床且是世界罕见的巨型钾盐矿床,这表明未见红

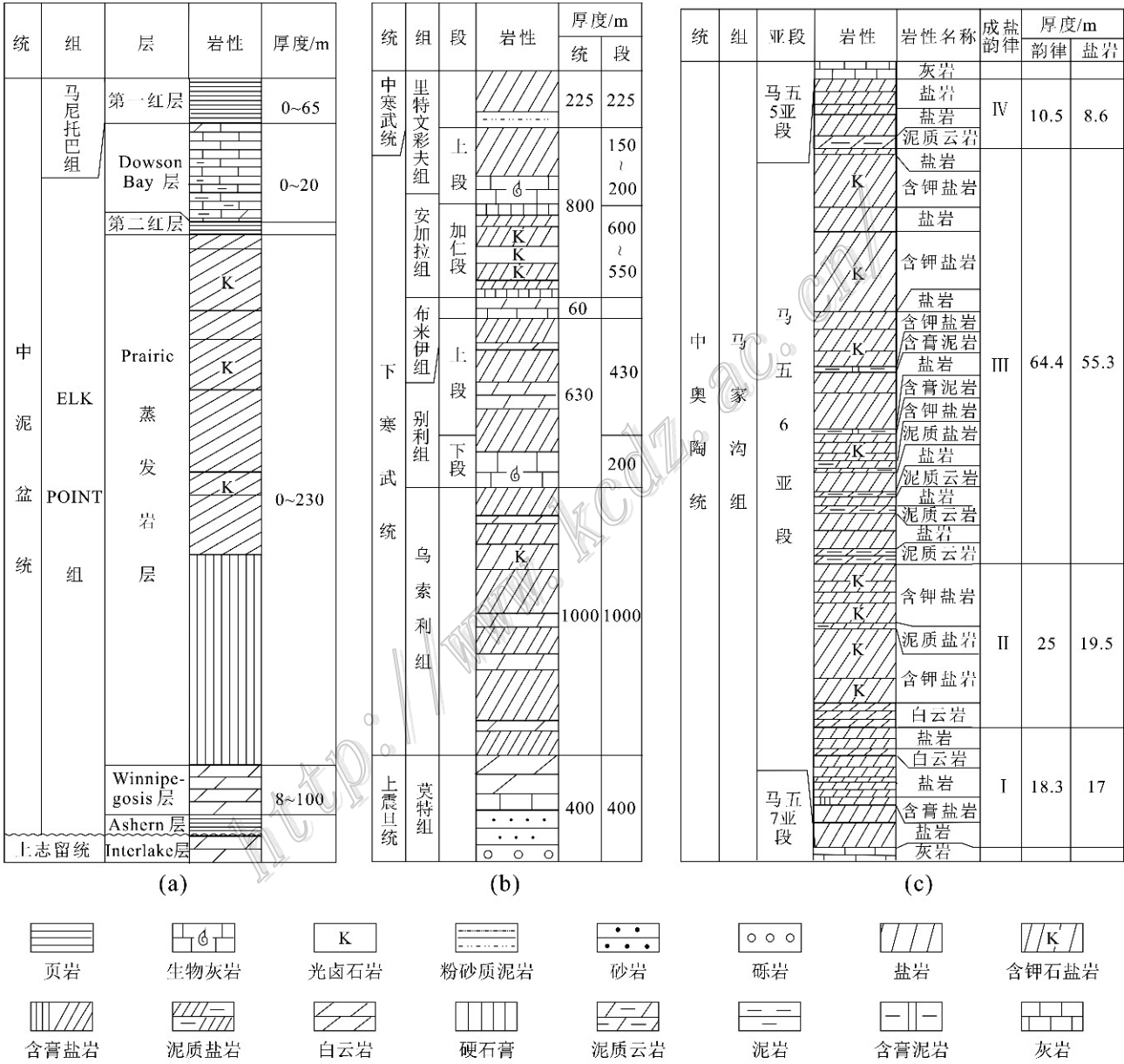


图 4 国内外典型盐盆地含钾地层柱状图(国外盐盆地数据来自 др ЧЭИИ, 1977; 刘群, 1995; Holter, 1972; 钱自强等, 1994)

a. 萨斯喀彻温盆地钾盐矿床岩性柱; b. 涅帕盆地钾盐矿床岩性柱; c. 陕北盐盆含钾岩性柱

Fig. 4 Typical potash stratigraphic columns of Northern Shaanxi, Niepa and Saskatchewan basins (data of foreign basins after др ЧЭИИ, 1977; Liu, 1995; Holter, 1972; Qian et al., 1994)

a. Potash deposit lithologic column of the Saskatchewan Basin; b. Potash deposit lithologic column of the Niepa Basin; c. Potassium-bearing lithologic column of the Northern Shaanxi Salt Basin

层封盖也未必不存在具规模的钾盐矿床。

(7) 成钾预备机制：华北古陆表海盆在奥陶纪时期,处于一个有利于大套蒸发岩形成的古地理环境。岩性组合、岩相展布和地层厚度上的调查对比表明:主要蒸发岩段马一、马三和马五段由东向西除了蒸发岩厚度增大之外,似乎也有盐度增高的趋势;平面上可见自东向西的岩相变化,依次由灰岩、白云岩向硬石膏转变,到盐盆内部为石盐沉积。到目前为止,至少在陕北盐盆西部及其与太原-临汾拗陷之间的离石隆起带上都发育有生物礁,表明了陕北盐盆除了长期暴露的古陆可隔挡广海之外,水下隆起也可以起到间歇性的隔挡作用。济南—徐州、石家庄—潞城和太原—临汾一带,尤其是太原—临汾一带很有可能是西部的陕北盐盆的成盐、成钾的预备盆地(陈文西等,2010)。因此,从预备机制和陆表海盆总体分布范围和面积上看,华北蒸发台盆与加拿大 Elk Point 蒸发盆地具有一定的可比性。

3 华北古陆表海盆成钾模式

华北奥陶纪蒸发台盆与俄罗斯东西伯利亚寒武纪蒸发台盆的构造古地理面貌相似,是一个四周有陆、岛、礁围绕,外围是深海槽的碳酸盐蒸发台盆(图 3),同时又具备与加拿大萨斯喀彻温钾盐盆地相类

似的地质条件(卤水在华北古陆表海内由东向西运移,最终汇聚到陕北盐盆)。但与国外巨型板块处于稳定克拉通不同,华北古陆表海盆发育于较活动的小陆块准克拉通背景下,因此,其成钾模式显然不能生搬硬套国外相关钾盐成矿理论模型,它既不是“牛眼式”,也不是“泪滴式”。

地球物理资料最新解释成果表明:陕北盐盆含钾目的层马五 6 亚段沉积期总体表现为“两坳夹一隆”的构造分异格局,次级成盐凹陷有 5 个,揭示陕北盐盆既不是“平底锅”,也不是单一的“尖底锅”,而是由多个次级凹陷组成的“复底锅”(张永生等,2013)(图 5)。这种“复底锅”成钾预测模式是基于华北古陆表海预备盆地的卤水多次迁移后,汇聚于陕北盐盆的条件下,经内部进一步分异最终汇聚在某个或某些次级成钾凹陷/洼陷中的一种预测模式。在这种“复底锅”型盐盆里,后期高度浓缩的富钾卤水或分流入每个凹陷,或主要迁移至东南部的少数盐凹中,集中汇聚形成钾盐矿床。不同的迁移汇集方式将决定着最终固体钾盐矿床的分布型式:是在一个规模较大的凹陷中汇聚成钾,或是分散在多个较深的凹陷中分聚成钾,而钾盐矿床的总体规模取决于成钾“时间窗”内富钾卤水的汇聚量和蒸发强度。“复底锅”成钾预测模式提出了陕北找钾的新思路,奠定了今后在 5 个次级盐凹中寻找有利聚钾

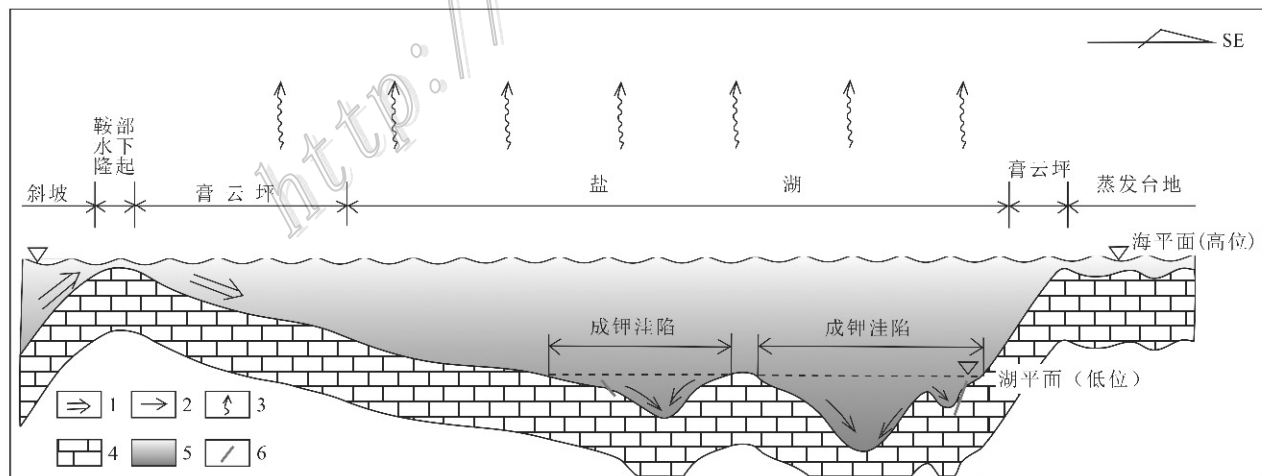


图 5 陕北奥陶纪盐盆地马家沟期马五 6 亚段“复底锅”成钾预测模式

1—海水补给方向; 2—富钾卤水分流汇聚方向; 3—海水蒸发; 4—碳酸盐岩; 5—海水; 6—同沉积断层

Fig. 5 The bottom morphology of Ordovician 6 substage of m5 stage in northern Shaanxi salt basin and the migration type of potash-rich brine

1—Supply directions of sea water; 2—Shunt and convergence directions of potash-rich brine; 3—Sea water evaporation; 4—Carbonate rocks; 5—Sea water; 6—Syndimentary faults

带的勘查新格局。

4 陕北盐盆海相固体钾盐资源潜力与前景

4.1 陕北盐盆钾盐勘查历程

陕北盐盆是中国最有希望获得海相固体钾盐矿勘查突破的有利远景区之一。前人的系列研究成果表明,陕北盐盆是世界上少有的奥陶纪含钾蒸发岩盆地。中奥陶统马家沟组发育一套海相碳酸盐岩-蒸发岩沉积序列,自下而上为马一段至马六段,其中,马五段又自上而下进一步分为10个亚段,马五6亚段为该区主力含钾盐岩层段,其溴值和溴氯系数普遍较高,已达到钾石盐-光卤石沉积阶段。多口井中见到钾盐矿化显示,部分井已钻获较薄的钾石盐矿层。这些成果为该盐盆钾盐勘查工作的进一步开展奠定了良好的基础。

陕北盐盆钾盐勘查评价工作大体分为4个阶段:

(1) 初期成矿预测阶段:1955年,延长油矿延1井钻至奥陶系,见多层石盐岩,这是在陕北地区首次发现盐岩;

(2) 油盐兼探找钾阶段:上世纪80年代,原国家计委成立了“地矿、石油、化工三部门联合油气勘查区成钾条件调查组”,对陕北盐盆进行“油盐兼探”的地质调查,于1987年施工了1口“油盐兼探”井(榆9井),首次发现盐层中有4 cm厚的钾石盐薄层,在世界上首次发现了奥陶纪含钾盆地;

(3) 钾盐预查阶段:上世纪90年代初,原国家计委重新将陕北钾盐普查任务下达给原地矿部,计划在“八五”期间施工钾盐普查井3口,实际上仅施工完成1口井(陕钾1井),其余2口井因任务调整而未能付诸实施。此后10余年,陕北盐盆找钾工作暂停;

(4) 钾盐普查阶段:2006~2009年,国家设立“西部地区钾盐资源调查评价”地调工作项目;从2010年起,国家正式启动新一轮钾盐资源大调查工作,2010~2012年间在陕北盐盆投资3500万元,施工钾盐科学钻探井2口,钻获厚度1.22 m达边界工业品位的钾石盐矿层和64.7 m的厚层钾石盐高矿化段,取得了陕北盐盆找钾的重要进展。

从陕北奥陶纪盐盆的找钾工作已历经近30年的历程可以看出: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1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($w(K^+)$ 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 $w(K^+)$ 普遍 $<0.1\%$ (杨全喜等,1993;蒙庆,1996;刘群,1995)。在2007年完钻的岩盐探井——绥探1井中,在马五6亚段发现厚度1.22 m达边界品位的薄钾盐矿层($w(K^+)$ 为1.05%~3.02%)和厚度0.1 m达工业品位($w(K^+)$ 为4.94%)的极薄钾盐矿层(除此之外的其他井段 $w(K^+)$ 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($w(K^+)$ 为0.10%~1.24%)。由此可见,陕北奥陶纪盐盆的找钾工作正在不断取得新的进展。

4.2 陕北盐盆钾盐资源潜力分析

华北奥陶纪古陆表海盆大范围发育蒸发岩,膏岩分布面积达65万 km^2 ,位于华北地台西部鄂尔多斯盆地中东部的陕北盐盆,面积达5.6万 km^2 (图2),岩盐(NaCl)总资源量达6万亿吨之多,如此巨量盐岩的堆积,为相当规模固体钾盐矿床(KCl)的形成奠定了坚实的物质基础。

由此推断,位于华北西部鄂尔多斯盆地中东部的陕北奥陶纪盐盆即便形成不了数百亿吨的巨型海相钾盐矿床,但形成一定规模、资源量在亿吨级或数亿吨级或更大的大型海相固体钾盐矿床是完全有可能的。

4.3 陕北盐盆找钾前景讨论

从上述国内外相似古陆表海盆钾盐矿床类比分析不难看出,中国华北古陆表海蒸发盆地规模与加拿大Elk Point蒸发盆地相当(均为65万 km^2 ,属巨型),盐盆地面积约为前者的1/4,含钾目的层岩盐厚度与加拿大萨斯喀彻温钾盐矿床相当;另外,陕北盐盆成钾区域地质条件和含钾韵律淡化层较多的特征与东西伯利亚涅帕钾盐矿床相似,且已具备明显的成钾显示和找钾线索。特别是绥钾1井和绥探1井的钻探,取得了发现钾石盐薄矿层和厚层钾石盐高矿化段的重要进展,不仅揭示了该盐盆巨大的潜在

找钾前景,提高了人们寻找海相大型固体钾盐矿床的信心,同时将找钾的目标区范围缩小至2000 km²之内,为下一步钾盐整装勘查规划部署提供了明确的首选目标区。

志 谢 恭贺郑绵平院士 80 寿辰暨从事地质工作 60 周年!

参考文献/References

陈从喜,蒋少涌,蔡克勤,马 冰. 2003. 辽东早元古代富镁质碳酸盐岩建造菱镁矿和滑石矿床成矿条件[J]. 矿床地质, 22(2): 166-176.

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 旭,阮亦萍,布科 A J. 2001. 中国古生代气候演变[M]. 北京: 科学出版社. 1-336.

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.

冯增昭,陈继新. 1989. 华北地台早古生代岩相古地理[J]. 沉积学报, 7(4): 15-55.

冯增昭,王英华,张吉森,左文岐,张秀莲,洪国良,陈继新,吴胜和,陈玉田,迟元苓,杨承运. 1990. 华北地台早古生代岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社. 1-270.

甘克文. 1982. 世界含油、气盆地的基本类型及其远景评价[J]. 石油学报, (增刊): 24-33.

郭彦如,赵振宇,付金华,徐旺林,史晓颖,孙六一,高建荣,张延玲,张月巧,刘俊榜,刘 虹. 2012. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理[J]. 石油学报, 33(S2): 95-109.

黄宝春,朱日祥. 1996. 华北地台早古生代古地磁结果的大地构造意义[J]. 地球物理学报, 39(增刊): 166-172.

黄宝春,朱日祥, Otofuj Y, 杨振宇. 2000. 华北等中国主要地台早古生代早期古地理位置探讨[J]. 科学通报, 45(4): 337-345.

蒋少涌,陈从喜,陈永权,姜耀辉,戴宝章,倪 培. 2004. 中国辽东地区超大型菱镁矿床的地球化学特征和成因模式[J]. 岩石学报, 20(4): 765-772.

刘成林,焦鹏程,王弼力,杨智琛,李树德,陈永志. 2003. 罗布泊第四纪含盐系成岩作用特征研究[J]. 沉积学报, 21(2): 240-246.

刘成林,王弼力,焦鹏程,陈永志. 2006. 世界主要古代钾盐找矿实践与中国找钾对策[J]. 化工矿产地质, 28(1): 1-8.

刘 群. 1995. 西伯利亚涅伯钾盐矿床地质、发展经过及其对我国找

钾工作的启示[J]. 地球学报, (1): 45-54.

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.

齐 文. 2013. 加拿大萨斯喀彻温盆地 KP488 区块钾盐资源评价[R]. 内部学术报告.

钱自强,曲一华,刘 群. 1994. 国外矿床地质丛书——钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社. 1-273.

汤好书,武 广,赖 勇. 2009. 辽宁大石桥菱镁矿床的碳氧同位素组成和成因[J]. 岩石学报, 25(2): 455-467.

王鸿祯. 1985. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社. 1-117.

王弼力,杨智琛,刘成林,等. 1997. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景[M]. 北京: 地质出版社. 1-173.

吴汉宁,常承法. 1991. 华北和华南块体古生代至中生代古地磁极移曲线与古纬度的分布变化[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 21(3): 99-105.

项 才,陈跃月,曹洪亮,刘 敏. 2008. 辽宁岫岩县偏岭地区晚大石桥期沉积环境及构造古地理[J]. 地质与资源, 17(3): 166-169.

肖荣阁. 1999. 硼及硼同位素地球化学在地质研究中的应用[J]. 地学前缘, 6(2): 361-368.

肖荣阁,大井隆夫,费红彩,野村雅夫. 2003. 辽东地区沉积变质硼矿床及硼同位素研究[J]. 现代地质, 17(2): 137-142.

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.

杨振宇, Otofuj Y, 黄宝春,孙知明. 1999. 华北陆块冈瓦纳大陆亲缘性的古地磁证据[J]. 地质论评, 45(4): 402-407.

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.

郑绵平,齐 文,张永生. 2006a. 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,王炳铨,徐仁杰. 2006b. 化工、盐湖矿产资源可供性分析及勘查开发战略研究-化工、盐湖卷[R]. 中国工程院重大咨询项目《中国可持续发展矿产资源战略研究》.

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.

朱日祥,杨振宇,马醒华,黄宝春,周 秀. 1998. 中国主要地台显生宙古地磁极移曲线与地块运动[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 28(S1): 1-16.

Holter M E. 1972. Geology of prairie evaporite formation of

- saskatchewan, Canada[M]. *Geology of Saline*, Paris: UNESCO. 183-189.
- Horita J, Weinberg A, Das N and Holland H D. 1996. Brine inclusions in halite and the origin of the Middle Devonian prairie evaporites of western Canada[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 956-964.
- Klingspor A M. 1966. Cyclic deposits of potash in Saskatchewan[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 14(2): 193-207.
- Schmalz R F. 1970. Environment of marine evaporate deposition[J]. *Miner. Ind.*, 35(8): 1-7.
- Scotese C R and Mckerrow W S. 1990. Revised world maps and introduction[R]. Geological Society, London, *Memoirs*, 12(1): 1-21.
- Worsley N and Fuzesy A. 1979. The potash-bearing members of the Devonian prairie evaporite of southeastern Saskatchewan, south of the mining area[J]. *Econ. Geol.*, 74(2): 377-388.
- Zhao X X, Coe R, Liu C and Zhou Y. 1992. New Cambrian and Ordovician paleomagnetic poles for the North China block and their paleogeographic implications[J]. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres.*, 97(B2): 1776-1788.
- Zharkov M A. 1984. Paleozoic salt-bearing formations of world[M]. Berlin: Spring-Verlag. 1-427.
- др ЧЭИИ. 1977. Закономерности строения соляных отложений ксбрия Юга Сибирской платформы[R]. Москва "Недра".

<http://www.kcdz.ac.cn/>