

盆地钾盐找矿模型探讨*

刘成林, 焦鹏程, 王弼力

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 钾盐是中国紧缺的重要战略资源之一, 寻找大型钾盐矿是中国矿床学界的一大难题。文章通过综合国内外找钾成果, 提出了盆地找钾矿的准则, 主要涉及 ① 分析盆地含盐系沉积时期是否出现长期干旱气候条件和丰富的钾源补给, 确定蒸发沉积是否到钾盐析出阶段; ② 在什么层位成钾; ③ 钾盐在盆地什么构造部位沉积; ④ 在什么新构造部位找钾。钾盐找矿的基本步骤是, 在查明盆地成钾的宏观条件之后, 解决上述有关成钾科学问题并阐明成钾机理, 最后圈定找矿靶区, 并开展勘查评价。罗布泊盐湖找钾是盆地找钾的成功范例之一, 找钾模型就建立在与其相关的经验和理论基础之上, 即, 首先通过塔里木与柴达木盆地成钾宏观对比研究, 确定罗布泊具备成钾条件, 然后, 应用相关理论及经验圈定成矿靶区, 并实施工程验证, 最终取得了找钾重大突破, 这既得益于前人资料的积累和柴达木盆地经验与理论的应用, 也是不断创新成钾理论与长期开展实际地质工作的结果。总之, 钾盐找矿评价遵循“从已知到未知、从理论到实践、再理论再实践”的原则, 学习和吸收国内外新理论成果, 使得找钾工作不断上新台阶。

关键词 地质学; 罗布泊盆地; 钾盐; 找矿模型

中图分类号 619.21⁺1

文献标志码 A

A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China

LIU ChengLin, JIAO PengCheng and WANG MiLi

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Potash salt is one of the mineral resources in great shortage in China. The prospecting of superlarge potash deposits has been a big puzzle within the mineral resource realm of China. Based on a synthetic analysis of research conditions in this aspect both in China and abroad, this paper deals with the principles for potash exploration in evaporative basin from macro-scale to micro-scale angles, which include: ① to analyze whether there was a super-arid paleoclimate and considerable potassium supply during the long-term salt sedimentation, to ascertain if the paleo-lake water had developed to the crystallizing stages of potash salt owing to strong evaporation; ② to make certain in which strata potash was formed; and ③ to determine in which structural location of evaporative basin the potash deposits were formed; ④ to make sure which location of neotectonic transformation is favorable for exploring potash deposits under the modern landform conditions. The basic procedure for seeking potash deposits is as follows: first to find out the macroscopic potash-forming conditions, then to ascertain the microscopic potash-forming conditions, and finally to delineate the targets and distribution areas of the potential

* 本研究得到国家科技攻关 305 项目 2006BA07B06 和(2001BA609A-07-15)课题支持

第一作者简介 刘成林, 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事盐湖与钾盐矿床研究。Email: Liuchengl@263.net

收稿日期 2009-11-27; 改回日期 2010-04-30。张绮玲编辑。

potash deposits and conduct validating work through drilling. The potash exploration in the Lop Nur Playa is one of the successful representative cases for potash deposit exploration in China. A potash-seeking model has been established on the relevant experience and studies of the potash exploration of the Lop Nur Playa, i. e., first to conduct a comparative study of the potash-forming conditions between the Tarim and the Qaidam Basin and ascertain better potash-forming conditions for Lop Nur Playa, then to ascertain the targets for potash formation on the basis of relevant studies, and finally to carry out drilling for validating potash deposits in the target area. These achievements have made an important progress in discovering superlarge potash deposits in the Lop Nur Playa. In conclusion, the potash exploration and appraisal should follow the principle of "from known to unknown and from theory to practice and then from practice back to theory again". Through the perseverant study and absorption of theories and experiments available in China and abroad, the potash-seeking work will surely achieve new results in future.

Key words: geology, Lop Nur basin, potash, model for seeking and appraisal of ore deposits

钾盐是中国紧缺重要战略资源之一,而目前中国钾肥消费量的 70% 依靠进口。在中国,袁见齐教授(1946)最早提出找钾盐的问题。由于中国陆块经历过多次构造运动,其上发育的蒸发岩盆地也经历了多次地质作用,导致成钾作用的复杂化和矿层的变形与深埋藏化等,因此,寻找古代大型钾盐矿成了中国矿床勘查界“久攻不破”的难题。而在世界上,钾盐很丰富,主要钾盐矿床属于古代海相沉积成因。国外钾盐找矿经验显示,很多钾盐矿床,从线索的发现或提出找钾目标开始,到最终获得找钾突破或查明钾资源量,通常需要经过 20~30 年的研究与勘探(刘成林等,2006)。由此可见,钾盐找矿勘查在国内外都是一件有相当难度的工程。中国第一个超大型钾盐矿床(察尔汗钾矿床)于 20 世纪 50 年代被发现。相隔 40 年后,又在罗布泊发现了一个超大型钾盐矿床,对这两大钾盐矿床的成矿理论认识与找矿工作进行总结,借鉴国外成矿理论和经验,探讨适合中国的钾盐找矿模型,无疑将对中国今后盆地找钾评价提供有益的参考。

1 钾盐研究现状与中国找钾难点

1.1 国外钾盐现状

世界(国外)钾盐资源量为 2 144.7 亿吨,已探明 220.6 亿吨(K_2O) (钱自强等,1994),分布于 26 个不同规模的钾矿床中。统计(刘成林等,2006)显示,这

26 个钾盐矿中的 10 个是在石油勘探中发现的,占 38.46% ; 5 个为研究预测后发现,占 19.23% ; 有 4 个是在盐岩矿勘探与开采中发现,占 15.38% ; 2 个钾盐矿床地表出露被发现,占 7.69% ; 1 个是在寻找地下水过程中被发现,占 3.85% ; 其他 4 个矿床的发现过程因缺乏资料不清楚,占 15.39%。国外大型钾盐矿床的发现多数是从含钾线索开始的,即从石油和盐岩矿勘查过程中发现的含钾信息和线索开始,进而进行细致的地球化学、矿物学与岩石学研究,从中获得钾盐成矿的特征与规律的认识,最终带动钾盐勘探突破。

1.2 中国钾盐现状

目前,中国找到的钾盐矿床主要分布于柴达木盆地盐湖和罗布泊干盐湖(王弼力等,2001)中,其次为西藏盐湖(郑绵平等,1989),多属卤水矿。而中国古代钾盐矿床仅在云南勐野井(张嘉澍等,1980)、四川盆地三叠系(黄宣镇,1996)和江汉盆地^①获得一定规模资源量,地层为白垩系—第三系,但仍没有获得重大突破性进展。陕北奥陶系盐盆地,面积 4.6 万 km^2 ,属大型含盐盆地,已发现薄层钾盐矿物沉积(刘群等,1997),近年郑绵平等又发现了 1 m 厚钾矿化层, $\omega(KCl)$ 最高达 9%^②,显示了良好的找钾前景。渤海湾盆地,面积 10 多万平方公里,东营等次级盆地中发现杂卤石、钾盐镁矾沉积(刘群等,1987),具有较好的找钾条件。塔里木盆地本身属巨型盆地,同时具有多个海相盆地叠加的特点,其中的次级盆

① 江汉石油管理局勘探开发研究院. 1984. 江汉盆地钾盐矿床的发现与研究的申请报告.

② 郑绵平, 齐文, 袁鹤然, 刘喜方, 陈文西, 李金锁. 2009. 中国钾盐区域分析与找矿评价思考和建议. 我国重要成矿区带主要矿床类型成矿规律和找矿评价.

地,如库车和莎车盆地,属大型-超大型盆地;库车盆地第三系中已发现多种钾盐矿物;莎车盆地的白垩系—第三系具有厚层盐类沉积,巴楚断隆区寒武系海相地层也有膏盐类沉积,这些地区虽没有发现钾盐矿物,但巨厚盐类沉积也显示了较好的成钾条件。因此,在塔里木盆地,应借助石油勘探资料二次开发,通过钾盐成矿条件调查研究,可以快速查明塔里木等盆地钾盐资源潜力。此外,四川盆地三叠系(林传律,1994;林耀庭等,1996)、柴达木盆地西部第三系和湖北江陵盆地第三系^①等均发现富钾的油田水或卤水,钾含量达到工业品位甚至异常高,这些卤水本身就是钾盐资源,也是寻找固体钾盐的良好线索。

中国周边国家已发现3个巨型钾盐矿集区,即中亚盆地晚侏罗世—白垩纪钾盐矿集区,该盆地与中国塔里木盆地西部拗陷有密切联系;泰国-老挝呵叻盆地白垩纪钾盐矿集区,该盆地与云南思茅盆地相通;俄罗斯东西伯利亚寒武纪涅帕盆地钾盐矿,此外,巴基斯坦前寒武纪晚期—寒武纪早期地层的盐岭钾盐矿,在中国也有相应时代的蒸发岩盆地。通过与这些周边国家钾盐矿床对比分析发现,中国众多含盐盆地应具有良好的成钾潜力。

1.3 中国盐盆地找钾难点

中国古代地层钾盐找矿没有取得突破,除了投入相对不足外,可能还与中国复杂的大地构造背景密切相关。自中生代以来,由于印度板块向欧亚板块持续挤压、碰撞,导致青藏高原大幅度隆升,改变了中国的大地构造与地理格局。一方面,中国古地形面貌从“西低东高”态势,转变为“西高东低”,地形差异巨大,山脉越隆越高,盆地越降越深,致使含盐系埋藏越来越深。另一方面,由于受到强烈挤压,盆地大多呈“破碎”状态,同时,西部盆地的含盐系地层发生强烈褶皱变形等。因此,中国盆地具有“破碎”、“深埋”与“变形”等不利因素,呈“非稳定态”,其钾盐成矿过程与分布规律也与国外大型稳定海相盆地的钾盐矿床有明显差异,这不仅使盆地钾盐成矿复杂化,也增加了找矿的难度和成本。

尽管中国盐盆地不具备传统成钾理论所要求的“稳定构造环境”,然而,在中国众多盐盆地中已发现很多含钾线索或显示,具有较好的找钾前景。寻找这些钾盐矿床,需要再次对这些盐盆地地质资料进行系统梳理,利用新思路与新技术进行探索,为此,需

要针对中国盆地的特殊性,创新中国特色成钾理论,研制集成新型钾盐矿床的探测与勘查技术。

2 盆地钾盐找矿准则

袁见齐(1961)指出:“在寻找钾盐矿床的工作中,我们可以应用世界各国经验,但是,必须根据我国地质条件的特点和钾盐矿床的分布规律,来研究找矿方向和找矿方法”。笔者根据这个找钾思想,探讨建立中国盆地找钾模型。

目前,中国钾盐矿床主要可分为3大类:第一类为第四纪盐湖卤水钾矿;第二类为古代地层固体钾盐矿(海相及海陆过渡相);第三类是盆地深部地层卤水(或油田水)钾矿。目前,已探明和开发的钾盐矿床属第一类,今后找钾的重点是第二类,兼顾第三类。本文遵循“从已知到未知、从理论到实践、再理论再实践”原则,总结国内外成功的找钾经验,提出找钾勘查准则。

2.1 盆地钾盐找矿准则

确定盆地钾盐找矿原则,按曲懿华、刘群和蔡克勤等教授的意见,应分为宏观准则和微观准则。首先,必须研究盆地成钾的宏观条件,只有具备宏观条件,如干旱-极端干旱的气候环境等,盆地才可能出现钾盐沉积,这为接下来开展的沉积特征微观研究奠定了可靠的基础。

2.1.1 盆地找钾的宏观准则

以下介绍世界主要钾盐矿床形成的宏观条件,以其作为找钾的宏观准则。

(1) 气候环境 干旱-极端干旱气候条件是表生成盐成钾作用的先决条件,而干旱气候与地理、构造等有关。Borchert等(1964)指出,现代盐类沉积分布在两个半球的两大带,大约在赤道南北纬 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之间,海相蒸发岩沉积的最优先条件是在副热带无风带的边缘海地区。据统计^①(Warren, 2010),地质历史上各时代的钾盐矿床都分布在南北纬 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 带内,石盐盆地可稍向外扩展一些,到 35° 范围内,个别情况更高些。Warren(2010)总结出世界蒸发岩沉积规律,揭示显生宙两次巨量盐类沉积期与大陆拼合-离散相对应,第一次,从新元古代到寒武纪,第二次,从二叠纪到侏罗纪。每次造山运动和洋盆的打开,都伴有巨量盐类沉积。因此,巨量盐类沉积是地

① 地质矿产部矿床地质研究所. 1995. 中国钾盐成矿条件与国外典型矿床的对比研究报告.

球构造运动引起的全球及区域气候变化的响应。

(2) 沉积环境与物质来源 世界上已发现的古代钾盐矿床基本上属于海相沉积,这与海盆面积普遍较大、补给量大和海水中钾元素含量较高等有密切关系。几乎所有巨型石盐和硫酸盐沉积层系都是巨量海水渗入封闭凹陷后蒸发析出形成的(Warren, 2010)。古生代—中生代钾盐沉积环境主要是稳定克拉通中的巨型海相盆地,物质来源以海水为主,这个时期以“巨型海盆成钾”为主。中生代末以来,尤其是白垩纪—新近纪,以裂谷盆地环境为主,出现非海相钾盐沉积(Lowenstein et al., 1989);有深源补给,可以在中东死海盆地等小盆地内出现钾盐及天然碱巨量沉积(Bentor, 1961; Zak et al., 1968)。这个阶段可能以“裂谷成钾”为主。第四纪则基本为陆相沉积环境,如果陆相盆地规模较大并且物质来源丰富,尤其是补给水的K/Cl比值高于海水,例如罗布泊盐湖的沉积环境与物源条件(王弭力等, 1996; 刘成林等, 1999; 马黎春等, 2010),也可以导致钾盐大规模聚集成矿。

(3) 盆地构造 世界主要成钾盆地产出的大地构造环境(钱自强等, 1994; 刘成林等, 2006)有:①陆架、陆棚拗陷,有4个矿床,钾盐资源量1398亿吨,占资源总量64.90%;②地台、陆台凹陷与向斜,资源量631.28亿吨,占29.31%;③地堑、裂谷、海湾盆地,有9个矿床,资源量99.28亿吨,占4.6%。前两类属于稳定克拉通构造条件,巨型钾盐(国外古生代)成矿属于巨型陆表海盆的海水蒸发事件成矿,而第三类多属于不稳定大地构造环境,自中生代以后在裂谷盆地或大陆裂开初期,可能因深源补给在世界范围内出现“裂谷成钾”。

(4) 盆地规模 古代盐盆地面积分类原则(刘成林等, 2006):以1万km²为起点,按5倍递增进行盆地规模大小分类。根据这个原则,可以分出5类盆地:第一类,一般盆地,面积小于1万km²;第二类,大型盆地,面积为(1~5)万km²;第三类,超大型盆地,面积为(5~25)万km²;第四类,巨型盆地,面积为(25~125)万km²;第五类,超巨型盆地,面积大于125万km²。

按照上述分类,世界上现有的主要含钾盆地分下列几个类型:①巨型盆地,有6个,资源量1506.76亿吨,占总资源量69.95%;②超大型盆地,有7个,442.75亿吨,占总资源量20.56%;③大型盆地,有8个,蕴藏钾盐资源量至少66.78亿吨,

占世界总资源量3.1%。可见,巨型盆地所蕴藏的钾盐资源量最大,其次为超大型盆地,它们的钾盐资源量占世界钾盐总资源量的90%。

(5) 钾盐成矿地质时代 泥盆纪可能是世界上最主要的钾成盐矿期,沉积的钾盐资源量占世界资源量60.47%(钱自强等, 1994)。其次,白垩纪地层蕴藏钾盐资源量占13.44%,晚侏罗世沉积钾盐10.27%,两者构成第二个主要成钾期。二叠纪和寒武纪地层蕴藏钾盐资源量为6%~7%,属于第三位的成钾期,其他时代地层蕴藏钾盐资源量相对更少。

2.1.2 盆地找钾的微观准则

在掌握了成盐盆地形成的宏观地质背景之后,可以开展更精细的盐盆地找钾工作,必须按顺序解决下列4个科学问题,才可能达到目标。这4个科学问题环环相扣,如果某个问题不能解决或得不出结论,就意味着盆地找钾可以终止或暂停,这就是盆地钾盐找矿勘查的微观准则:

第一,盆地盐湖演化是否已达到钾盐析出阶段?

一般海水蒸发浓缩析盐系列是:碳酸盐—石膏—石盐—泻利盐等—钾盐(钾石盐、光卤石)—水氯镁石(陈郁华, 1983)。如果在含盐系中发现了钾石盐与光卤石,或发现水氯镁石等,就可以确定古盐湖演化已达到钾盐矿物析出阶段,盆地找钾工作可以继续下去。

第二,钾盐在什么层位沉积?

如果证实盆地演化已达钾盐矿物析出阶段,下一步工作应该是确定钾盐沉积的地层或层位。工作程序是:首先,划分蒸发沉积旋回,应该重点研究主要期次的蒸发沉积旋回,钾盐通常在主要期次成盐期(或盛盐期)晚期沉积,然后,开展系统地层沉积地球化学研究,含盐系地层矿物学研究。

第三,钾盐在盆地什么(古)构造部位(次级凹地)沉积?

确定钾盐在盆地的什么构造部位(次级凹地)聚集是找钾成功的关键。在盆地构造分析基础上,确定次级凹地的成因类型及展布方向,结合岩相古地理编图,分析补给来源方向和浓缩中心,就可以确定出钾盐沉积的可能位置。

第四,在盆地什么(新)构造部位(背斜)找钾? 由于中国盆地长期处于“非稳定状态”,表现为“深埋、变形与破碎”,因此,钾盐从沉积到埋藏成岩等阶段一直受到构造尤其新构造活动的影响,这给中国的钾盐勘探带来了巨大的困难。因此,必须在盆地

中找到一个探钾“窗口”,即在既有钾盐沉积、埋藏又相对较浅的构造部位。

然后,开展成钾作用机理研究,根据盆地成钾定量化特征参数,对靶区内可能沉积的钾盐资源量进行预测分析。有了上述充分的科学研究,可以进行风险钻探勘查。

3 钾盐找矿模型

找矿勘查离不开成矿理论的指导,但成矿理论模型主要描述成矿物质来源,控制条件与元素富集机理的自然规律过程,属于科学范畴。而找矿勘查属于工程技术范畴,必须将科学理论(成矿理论模型)转变为技术(找矿模型),才能实现科学找矿。找矿模型的功能是,首先,应确定盆地是否具有成钾的宏观地质条件,然后,确定盆地蒸发沉积是否已达到钾盐析出阶段,以及钾矿层或矿体所在位置。要达到这些目的,提出相应的宏观和微观找钾模型,必须将成钾理论进行“定量化”“定向化”和“定位化”,这“三化”的综合集成就应该是“找钾模型”。通过对中国盐湖钾盐成矿规律研究和国外成钾理论模式的综合分析,提出了以下钾盐找矿模型。

3.1 宏观对比分析

3.1.1 类比法找矿

开展柴达木盆地与塔里木盆地盐湖沉积环境、构造背景与气候等对比分析(表 1)。得出宏观结论:罗布泊具有与柴达木盆地相似的成钾条件与沉积环境,具有较好的找钾远景。

3.1.2 钾盐矿集区结构分析法

“成钾矿集区”,指目前含盐盆地中已探明 2 个以上,KCl 规模大于 2.5 亿 t 的钾盐矿分布区(宣之

强 2009)。主要特征是:①有一个主要的钾盐矿床,如柴达木盆地中的“察尔汗钾镁盐矿床”;罗布泊坳陷的“罗北凹地”卤水钾矿;②每个盆地都有数个,甚至多达 10 个以上钾盐矿床,KCl 资源合计储量都达数亿吨;③成钾地质背景与条件一致,但各钾矿的具体成因机制与分布模式则可多样,如柴达木盆地等具有不同的成因类型。“钾盐矿集区”的理论意义主要是,在一个大盐盆地中,如果出现钾盐成矿,一般不会单一的,而是系统性的,具有一定的分布结构模式。发现一个矿床后,就有理由寻找其他钾盐矿。

(1) 罗布泊钾盐矿集区结构——卫星式

罗布泊受到北北东向-南南西向主压应力作用,产生了一系列相同方向的张性断层或地堑式断陷带,形成一个较大规模的凹地,即罗北凹地,以及其他较小凹地,如罗西洼地和耳北凹地,并形成罗北凹地超大型钾盐矿及几个中型卤水矿床(图 1)。这些矿床的空间排列组基本围绕罗北凹地分布,即一个大矿床周围有一堆小矿床的“卫星式模式”(刘群等,1987)。因此发现罗北凹地钾盐矿以后,扩大找矿,又发现了其他钾矿床。

(2) 柴达木盆地钾盐矿集区结构——彗星式

柴达木盆地形似一个不规则三角形状箭头,呈东南-北西向展布,盆地中最大的钾盐矿床——察尔汗超大型钾盐矿,就位于盆地东南前锋部位,由东向西北向展开,还分布有一系列大、中、小型钾盐矿床。这些钾盐矿床的平面分布特征类似彗星结构,因此,将柴达木盆地钾盐矿集区的结构称为“彗星式结构”。自上世纪 50 年代发现察尔汗超大型钾盐矿以后到 90 年代中期,钾盐勘探与研究陆续向柴达木盆地西部推进,不断发现一些大中型钾盐矿床,这是

表 1 柴达木与塔里木盆地盐湖沉积对比
Table 1 Comparison of salt lake sedimentation between Qaidam and Tarim Basins

	柴达木盆地	塔里木盆地及罗布泊
盆地面积/km ²	120 000	560 000
最终汇水区(盐湖)面积/km ²	察尔汗 5 860	罗布泊 20 000
沉积环境与成盐时代	盆地西部盐湖出现于早更新世;东部盐湖出现于晚更新世末	盐湖出现于晚更新世末(1994 年前资料),推测盐湖沉积时代应与柴达木盆地相似
成钾时代	盆地西部-早中更新世;东部-晚更新世末以来	全新世,地表盐壳晶间卤水(1994 年前资料)
第四纪气候	干旱	干旱-极端干旱
构造分隔	盆地被明显分隔成多个次级盆地	盆地有明显构造分隔特征
钾盐资源/储量	数亿吨 ^①	推测具有相当规模的钾盐资源量
两者关系	第四纪初两盆地可能相通(朱允铸等,1990),因此,推测罗布泊成盐环境、时代与柴达木盆地西部盐湖相近	

① 青海国土资源厅. 2001. 青海盐湖矿产资源整体开发利用及管理研究报告.

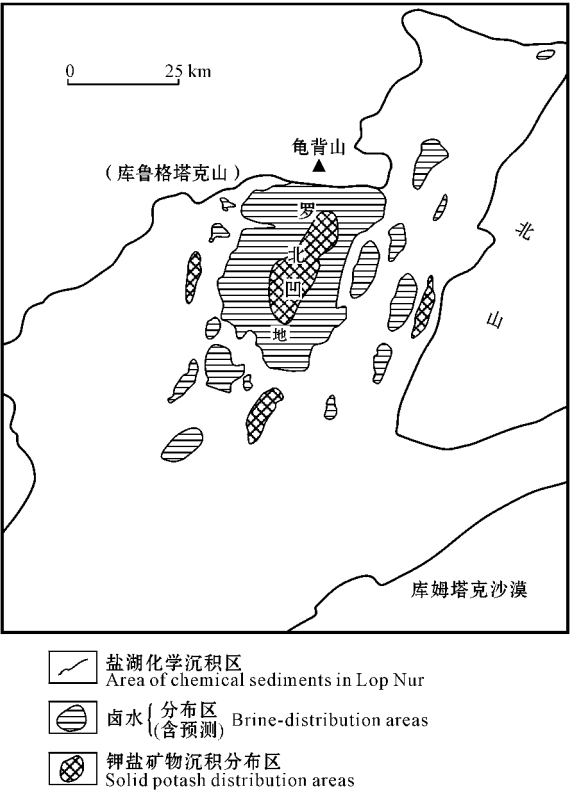


图 1 罗布泊钾盐矿集区——卫星式结构(刘成林等 2009)
Fig. 1 The "Satellite Type" pattern of potash deposits distribution in the Lop Nur Playa(after et al. ,2009)

先发现察尔汗超大型钾矿后,由“点及面”展开;“无意识”应用了钾盐矿集区结构特征模型,取得了扩大找钾的新成果。

另外,可能还其他结构类型,例如“串珠状”模式(刘群等,1987),在此就不赘述。

3.2 找矿标志确定

(1) 首要解决的科学问题

第一,盐湖演化是否已达到钾盐析出阶段?
确定盐系地层是否存在钾盐矿物。这需要系统开展地层盐类矿物电镜能谱、X 衍射、红外光谱、盐矿物流体包裹体组成与薄片鉴定等分析。

第二,钾盐在什么层位沉积?

开展高精度地层地球化学分析,查明地层中钾、镁等含量峰值分布情况,这些峰值区段可能就是成钾层位;此外,结合硫同位素及微量元素地球化学分析,确定海水、火山期后热水及深部油田水是否补给古盐湖,如盐湖沉积时期出现上述 3 类补给来源,表明成钾物质更丰富,有利于成钾。

(2) 开展“三化”研究

定向化研究 研究区域构造应力场、主压应力方向,分析控盆构造类型(断裂,或向斜凹陷)及性质,研究盆地演化与次级凹地形成,确定控制次级凹地在盆地中的展布方向。

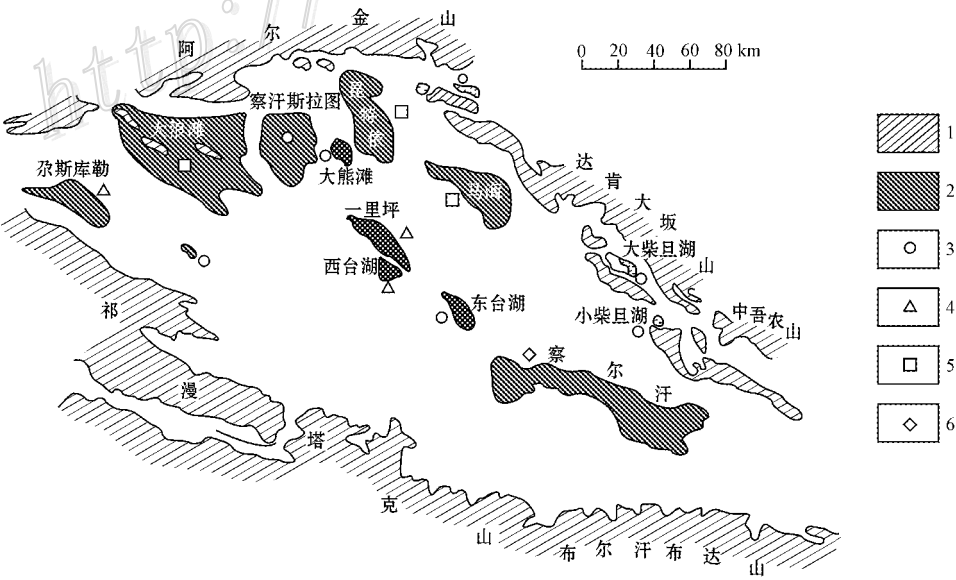


图 2 柴达木盆地钾盐矿集区——彗星式结构
1—山区基岩;2—钾盐矿集区;3—小型钾盐矿;4—中型钾盐矿;5—大型钾盐矿;6—超大型钾盐矿

Fig. 2 The "comet-type" pattern of potash deposits distribution in Qaidam Basin
1—Bedrock of mountain area;2—Potash deposits area;3—Small-size potash deposit;4—Medium-size potash deposit;5—Large-size potash deposit;6—Superlarge potash deposit

定位化研究 编制盆地蒸发岩岩相沉积特征定量分布图(蒸发岩沉积相等厚度图等),确定补给源方向及浓缩中心,结合定向研究成果,缩小和圈定成钾靶区,结合石油地震剖面分析,定位出“探钾窗口”。

成矿定量化 在成钾条件与模式研究基础上,预测古代蒸发盆地可能成矿的钾盐资源量,为进一步勘查提供数据参考。研究方法有:钾盐矿床特征参数模型(唐敏等,2009a)和石盐质量法(唐敏等,2009b)等。

4 第四纪盐湖找钾范例——罗布泊钾盐矿床

4.1 前人工作积累

1950~1994年,中国科学院、原地质矿产部等部门的有关单位对罗布泊进行了科学考察和地质调查与研究。在罗布泊地区近地表发现了成钾线索,并进行研究与找钾前景初析(郑绵平等,1990;李培清等,1987),甚至在近地表处已发现小型钾盐矿化层和矿点^{①②},但由于调查工作主要在地表浅部和航空^③遥感(李廷祺,1991)方面开展,工作区自然环境恶劣,交通条件极差,地质调查连续性与系统性得不到保障,因此,没能找到具有工业价值的钾矿床。

总之,1995年之前,很多专家认为罗布泊盐湖具有找钾前景,并做出了积极的探索性研究,但仍未揭示出罗布泊盐湖大规模成钾的关键性科学问题(即巨量钙芒硝沉积并伴有钾盐成矿,矿随次级深盆迁移富集等)。

原地质矿产部矿床地质研究所,自20世纪80年代初以来,一直在柴达木盆地盐湖开展钾盐成矿规律研究和资源远景评价,通过吸收前人资料和成果,研究并掌握了柴达木盆地钾盐成矿与分布规律,积累了丰富的资料和盐湖钾盐工作经验,并在“八五”计划后期,开展柴达木与塔里木对比分析,确定了罗布泊具有成钾条件和找矿前景。

4.2 与成钾有关的问题

(1) 罗布泊具备成钾条件

罗布泊地处亚洲大陆腹地,气候条件属干旱-极

端干旱,物质来源丰富,包括盆地周边钾长石花岗岩风化产物,盆地西部第三纪蒸发岩及盐泉等补给。盆地面积巨大,汇水面积也大,大量地表水为盐类物质搬运提供了载体,从构造上看,罗布泊在第四纪时期为塔里木盆地的最终汇水区,是可溶性盐类物质的汇聚区(sink)。第四纪早期,塔里木盆地与柴达木盆地相通(朱允铸等,1990)。说明两者沉积环境相似,而且柴达木盆地西部的盐类沉积物质可能还补给罗布泊。这些条件显示,罗布泊具有较好的成钾条件。

(2) 罗布泊盐湖已演化到了钾盐析出阶段

据有关前人资料^{①②}(郑绵平等,1990),罗布泊地区地表曾发现钾盐矿物,加之,浅坑卤水氯化钾品位达1%以上,这是罗布泊可以成钾的重要显示。

(3) 成钾构造部位——次级凹地确定

卫星影像遥感分析,罗布泊北部出现一个不规则葫芦形区域,应是一个次级凹地,即罗北凹地^③,在其南部出现一个暗黑色近圆形阴影,根据柴达木盆地的经验,这是一片较为潮湿的地区,可能与钾盐沉积有关(李廷祺,1991),即地表固体钾盐矿物吸潮而形成,也可能是地下水水位埋藏较浅造成的。此凹地的封闭性很好,只有一个较窄的通道与南部大耳朵湖区相连,这样大湖区湖水可以有节制地补给次级凹地,有利于反向补给成钾(刘成林等,1996),由于罗北凹地远离补给区,有利于进入凹地的湖水蒸发浓缩,盐类保留下来,最终钾盐聚集成矿。

基于上述三方面分析,对比研究塔里木盆地与柴达木盆地盐湖,确定罗北凹地具有成钾前景。

4.3 钾盐找矿突破

1995年,开始了罗布泊盐湖新一轮找钾工作。由于以前有关罗布泊钾盐的地质资料主要来自地表,导致认识也是表象化的。因此,王弭力研究员负责的罗布泊钾盐团队提出,必须在钾盐远景预测区开展钻探调查,否则,只能在地表“转圈圈”,重复前人的工作,不可能取得实质性进展或突破。

钾盐团队首次对罗布泊东北部“罗北凹地”进行钾盐钻探调查,钻探发现了埋藏于第四系盐类层中的卤水钾矿^④(王弭力等,1996)。调查组在罗北凹地

① 新疆地质矿产勘探开发局第一区调. 1988~1989 K-46-XXXⅡ幅(库木库都克)和 K-46-XXⅣ幅(太平台)1:20万区域地质调查.

② 新疆第三地质大队等. 1992. 罗布泊航空伽玛能谱异常地区查证.

③ 地矿部航空物探遥感中心. 1991. 罗布泊 1:50万航空γ能谱测量(国家科技攻关305项目).

④ 中国地质科学院简报. 1995. 第8期(总第315期).

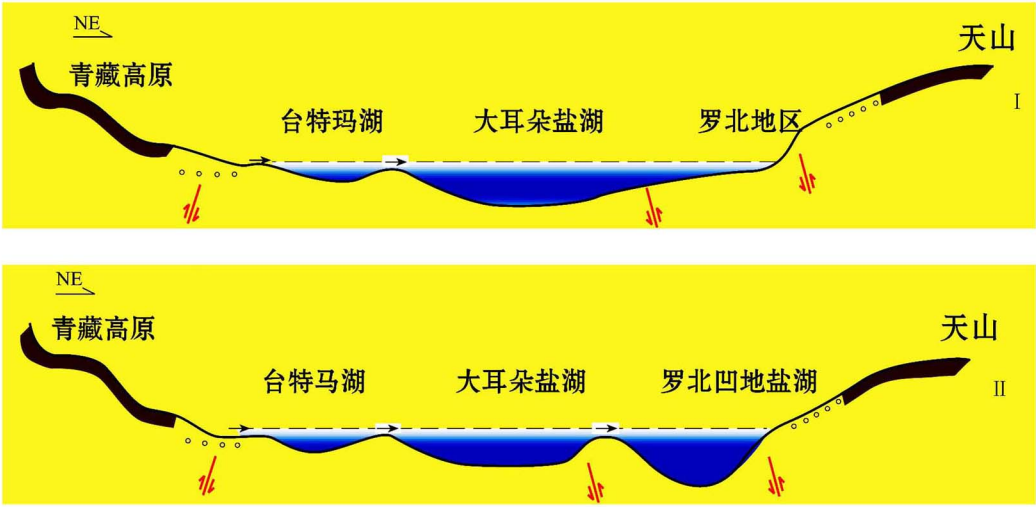


图 3 罗布泊“高山深盆迁移”成钾模式图解(据 Wang et al., 2005 修改)

Fig. 3 Schematic demonstration of the “high mountain, deep basin and shifting” model for potash formation in the Lop Nur Lake(modified after Wang et al., 2005)

施工钻探揭示了第一层卤水层,储卤层岩性主要由钙芒硝组成,孔隙很发育,卤水 $w(KCl)$ 平均 1.59%。获得罗北凹地潜卤水层 KCl 储量达 4 356 万吨,预测较深地层存在数个承压富钾卤水矿层。揭开了钙芒硝巨量沉积并形成、储集富钾卤水矿的关键科学问题),确定了罗布泊钾矿为一种新类型钾盐矿床。

随后,继续在罗北凹地开展钾盐科研和勘查,揭示出了潜卤层下部存在数个承压卤水矿层,证实了此前提出的科学预测,获得罗北凹地卤水 KCl 资源量达 2.5 亿吨(王弼力等,2001),属超大型规模,这是中国 40 年来找钾工作的重大突破。

4.4 理论拓展与外围扩大找钾

“高山深盆”成盐模式是袁见齐教授(1983)通过研究柴达木盆地盐湖总结出来的成盐理论,对我们的研究有重要启示。自新近纪末以来,由于新构造活动的影响,罗布泊成了塔里木“高山深盆”中的次级深盆,而中更新世末期以来,罗布泊演化形成更次一级的“深盆”罗北凹地,成为卤水最终汇集区,这是一种“矿随盆移”现象,钾盐得以在罗水凹地内聚集形成超大型规模矿床,这就是“高山深盆迁移”模式(图 3)。

盐湖卤水蒸发析盐顺序可简化为碳酸盐、硫酸盐(钙盐)和氯化物 3 个阶段。一般盐湖沉积中,卤水钾元素在石盐大量析出后才富集成矿,通常存储于石盐晶间,但罗布泊卤水钾矿却形成和储存于第

二阶段早期的硫酸盐-巨量钙芒硝岩中,这种成矿模式称为“两段式成钾论”(图 4)。

调查发现,罗布泊存在地堑式构造断陷(带)系,其内出现一些中小型盐湖或盐洼,并在地表出现钾盐沉积,在这些断裂带内形成和储集富钾卤水,笔者将这种成钾模式称为“含水墙”模式(刘成林等,2009;2010)。该理论认识扩大了盐湖找钾的思路和

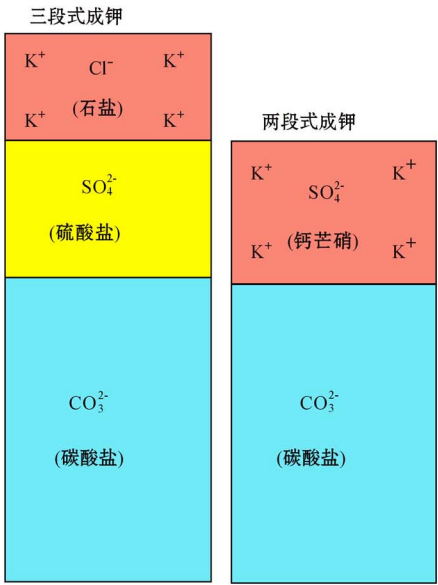


图 4 罗布泊“两段式”成钾模式(Wang et al., 2005)
Fig. 4 The “two stages” model for potash formation in the Lop Nur Lake(after Wang et al., 2005)

方向,并应用在罗布泊找矿中,在罗北凹地外围多个次级盐湖凹地及断陷带开展钾盐钻探调查,新增了数千多万吨氯化钾资源量。

4.5 罗布泊成钾的定量、定向化特征分析

自中更新世以来,罗布泊北部受到构造运动影响,一方面,发生抬升活动;另一方面,产生地堑式断裂及次级盆地(凹地),导致了成钾凹地(钾盐矿区)的分布具有方向性和一定等间距性,成钾区面积与盆地面积有一定比例关系,分析研究获得了罗布泊成钾的定向化与有关参数量化数据(刘成林等,2009),为钾盐成矿靶区预测研究提供了一些参考数据。

4.6 成钾理论研究深化

罗布泊是现代钾盐成矿研究的天然实验室,可以非常清晰地看到盆地构造、成钾凹地,乃至整个盆地的地质、构造、地貌与水系等特征。罗布泊自第三纪末以来,成为塔里木盆地的汇水区;它是一个向北倾斜的“箕状”盆地,这是受到东天山向南逆冲、压制的结果。第四纪早期,气候干旱,当湖水因补给减少、蒸发损失时,罗布泊古湖湖水收缩到北部低洼处,并沉积盐类矿物,矿物晶间充满卤水;到中更新世,北部抬升,总体沉降中心迁移至南部,部分晶间卤水也随之向南迁移,而使罗布泊南部的大耳朵湖区成为最大沉降区,所有补给河水均朝这个最低点汇集。由于,河水补给较丰富,补给量大于蒸发量导致南部沉积环境主要为微咸水-咸水湖,沉积粉砂岩-泥岩,有少量石膏沉积,因此,不能出现钾盐沉积。但是,在北部抬升区内,由于地堑式断裂作用,产生了向下沉降的次级凹地,其基底向北倾斜,与北部整体的抬升方向相反,由此,形成盆地构造反转运动。这些凹地位于抬升区内,远离补给源区,补给受到一定限制或间歇性补给,导致补给量小于蒸发量,晶间卤水得以保存,最后聚集成矿。

通过对中国盐湖成钾研究发现,盆地构造反转起了重要作用(刘成林等,2008):首先,受构造活动影响,蒸发盆地基底出现“单斜状态”,即呈“箕状盆地”,蒸发沉积中心与沉降中心重叠,起到了成钾预备盆地的作用;第二,大地构造应力方向发生变化,盆地出现构造反转,蒸发沉积中心也随之迁移到新的沉降区,使盐类物质集中到盆地的另一端;第三,盆地构造反转过程中,地处较高位势的抬升区内部,再次出现局部的构造反转,形成抬升区内的次级沉降盆地,早期盐类晶间卤水汇集于其中,此次级盆地

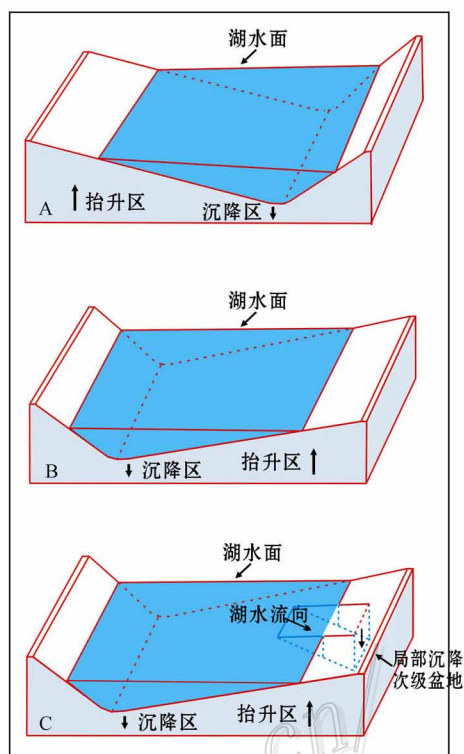


图5 盆地“构造反转成钾”模式示意图(刘成林等,2008 修改)

Fig. 5 The potash-formation model of tectonic reversal movement in basins (after Liu et al., 2008)

与大的沉降区之间一般存在门槛,可以阻挡卤水回流向大的沉降区,同时,大沉降区湖水在高水位时也会周期性反补给这些次级凹地,卤水在次级盆地内继续蒸发就可沉积钾盐矿(图5)。这种成钾的典型例子发生在罗布泊北部的罗北凹地。由于构造反转活动受一定区域应力场控制,次级反转成钾凹地的形成与分布具有一定规律性,据此模式,可以对蒸发盆地成钾靶区进行定位,圈定找钾靶区。国外一些典型钾盐矿床也是分布于盆地斜坡上的次级凹地(图6),而非最深的沉降区,这可能也是盆地构造反转运动所致。

6 结 语

综观国内外超大型钾盐矿床的发现史显示,钾盐找矿突破不是一蹴而就的事,需要长期坚持,甚至几上几下的反复,才有可能取得突破性成果。因此,需要不断总结和凝练盆地找钾准则,为今后中国找钾勘查提供理论支持。

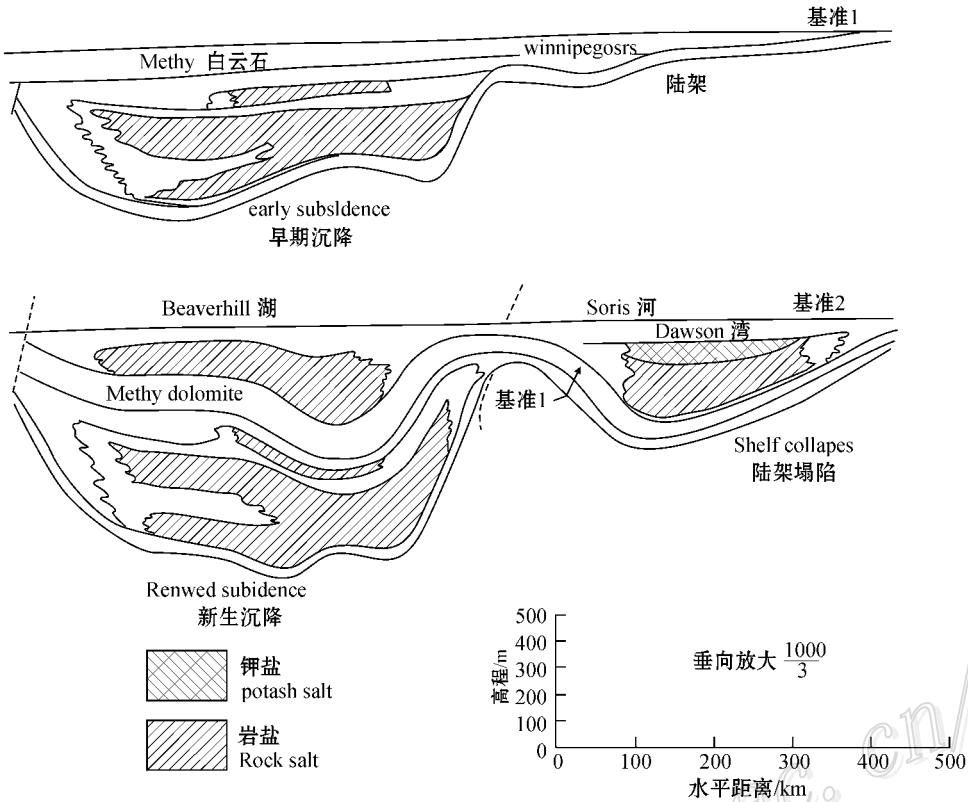


图 6 加拿大泥盆纪 Elk Point 盆地成钾次级凹地构造剖面(Sonnennfeld ,1984)

Fig. 6 The creating and locating of Subbasin for Devonian potash formation in Elk Point Basin in Canad(after Sonnennfeld , 1984)

通过综合国内外找钾成果 ,提出盆地找钾原则 ,即宏观准则和微观准则。宏观准则需要确定以下几个问题 :① 盆地所处古地理与古气候环境 ,② 沉积环境 ,③ 大地构造环境 ,④ 盆地规模等。而微观准则主要涉及盆地内部的沉积演化与地质构造 :① 盆地蒸发沉积演化是否到钾盐阶段 ? ② 在什么层位成钾 ? ③ 在盆地什么(古)构造部位沉积 ? ④ 在什么新构造部位找钾 ? 只有搞清上述问题 ,同时探讨钾盐成因机理 ,并圈定成钾靶区后 ,方可进行钻探勘查。

盆地找钾成功的典型例子是罗布泊找钾。通过对柴达木盆地钾盐的长期研究 ,包括吸收前人之成果 ,将找钾经验与理论认识应用于罗布泊盐湖找钾调查 ,取得了找钾的重大突破。罗布泊找钾的突破 ,既离不开前人资料积累 ,也与柴达木找钾经验和理论应用有关。然而 ,罗布泊钾盐矿床又是一个有别于柴达木盆地钾矿的新型矿床 ,因此 ,突破传统理论认识 ,研究和发展陆相成钾理论 ,是罗布泊找钾突破的关键所在。

目前 ,在中国很多古代盆地含盐系中已发现钾盐矿物或薄钾矿层 ,甚至小型钾盐矿床 ,然而 ,能否

找到大型-超大型钾盐矿床 ? 在盆地的什么构造部位寻找等问题 ,目前仍然不很清楚 ,这种状况有点类似 1995 年以前罗布泊找钾的情况。因此 ,根据盆地实际地质情况 ,开展科学研究 ,提出新的成钾认识和找矿思路 ,然后 ,开展一些先期钻探工程验证是必需的 ,为下一步勘查提供指导。

总之 ,钾盐调查与研究从柴达木盆地转移到罗布泊 ,在研究区转移与认识变迁过程中 ,不断学习和吸收国内外各种成钾理论 ,借鉴各种找矿技术和方法 ,可以促使钾盐找矿工作不断上新台阶。

References

Bentor Y K. 1961. Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 25 :239-260.

Borchert H and Muir R O. 1964. Salt deposits[M]. New York : D. Van Nostrand Company Ltd. Princeton.

Chen Y H. 1983. Sequence of salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation (25℃) of the Huanghai Sea water[J]. Acta Geologica Sinica , 4 :379-390(in Chinese with English abstract).

- Huang X Z. 1996. The first polyhalite deposit in China[J]. *Yunnan Geology*, 15(1): 52-61(in Chinese with English abstract).
- Li P Q, Fan Z L, Li R J and Zhang B Q. 1987. The formation conditions, distribution and resource assessment of potash salt[A]. In : Xia X C, ed. *Scientific investigation and research in the Lop Nur* [M]. Beijing : Science Press. 182-198.
- Li T Q. 1990. Discussion on prospective reserves of potassium deposit in Lop Nur Region using remote sensing in geology[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 1 : 29-34(in Chinese with English abstract).
- Lin C L. 1994. Metamorphic evolution of K-bearing rock series of the Triassic and implication in search for potash salt in Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 14(2): 122-129(in Chinese with English abstract).
- Lin Y T, Yan Y J and Wu Y L. 1996. High-grade Brine in the Sichuan Basin : Hydrogeochemistry, origin and its resource significance[J]. *Sedimentary Facies and Paleogeography*, 16(4): 12-22(in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L, Chen Y Z and Li C H. 1996. A " contrary-direction lake chain " model for salt deposition in the west of Qaidam Basin, Qinghai Province[A]. In : Zheng M P, ed. *Saline lake resources, environment and global changes* [C]. Beijing : Geol. Pub. House. 37-45(in Chinese).
- Liu C L, Wang M L and Jiao P C. 1999. Hydrogen, oxygen, strontium and sulfur isotopic geochemistry and potash-forming material sources of Lop salt lake, Xinjing[J]. *Mineral Deposits*, 18(3): 268-275(in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C, Li S D and Chen Y Z. 2006a. Features and formation mechanism of faults and potash-forming effect in the Lop Nur salt lake, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 936-943.
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C and Chen Y Z. 2006b. The exploration experiences of potash deposits in the world and probing of countermeasures of China's future potash-deposits in vestigation[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 28(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L and Jiao P C. 2008. The roles of tectonic reversal on the potash formation in evaporation basins[A]. In : *The paper collection of ninth congress of mineral deposits* [C]. Beijing : Geol. Pub. House. 199-209(in Chinese).
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C and Chen Y Z. 2009. The probing of regularity and controlling factors of potash deposits distribution in Lop Nur salt lake, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(6): 796-803(in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Jiao P C, Chen Y Z and Wang M L. 2010. Formation mechanism of potash-bearing brine in fault belts of Lop Lake, Xinjing[J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 602-608(in Chinese with English abstract).
- Liu Q, Chen Y H, Li Y C, Lan Q C, Yuan H R and Yan D L. 1987. Salt sediments of terrigenous clastic-chemogenic type in Meso-Cenozoic of China[M]. Beijing : Beijing Science and Technology Pub. House. 22-24, 131(in Chinese).
- Liu Q, Du Z Y, Chen Y H, Jin R G, Yuan H R, Zhang F G, Zhu Y H and Chen Y H. 1997. Potash salt-searching prospects in northern Shanxi Ordovician and Tarim Carboniferous [M]. Beijing : Atomic Energy Press. 30-37(in Chinese).
- Lowenstein T K, Spencer R J and Zhang P X. 1989. Origin of ancient potash evaporites : Clues from the modern nonmarine Qaidam Basin of western China[J]. *Science*, 245 : 1090-1092.
- Ma L C, Liu C L, Jiao P C and Chen Y Z. 2010. Preliminary discussion on geological conditions of potash deposition and indicator pattern in representative Playa in Xinjiang Province[J]. *Mineral Deposits*, 29(4)(in Chinese with English abstract).
- Qian Z Q, Qu Y H and Liu Q. 1994. Potash deposits[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 11-13(in Chinese).
- Sonnemeld P. 1984. Brines and evaporites [M]. Orlando : Academic Press. 404-406.
- Tang M, Liu C L, Jiao P C, Chen Y Z, Cao Y T and Hu Y N. 2009a. Quantitative analysis and significance of the marine potash deposits in the world[J]. *Acta Sedimentation Sinica*, 27(2): 326-333(in Chinese with English abstract).
- Tang M, Liu C L and Jiao P C. 2009b. Prognosis of potash resource quantity in Eocene Rock salt strata of Kuqa Basin, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 503-509(in Chinese with English abstract).
- Wang M L, Li T Q, Liu C L, Yang Z C and Li C H. 1996. Important discovery of a potash deposits in Luobei subbasin of the Lop Nur, Xinjiang, China[A]. In : Geological Society of China, ed. *Selected papers presented to the academic exchange meeting of major achievements of the geological sciences obtained in the Eight Five-Year Plan period* [C]. Beijing : Metallurgical Industry Press. 446-449(in Chinese).
- Wang M L, Liu C L, Jiao P C and Yang Z C. 2001. Saline Lake potash resources in the Lop Nur, Xinjiang[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 199-209(in Chinese with English abstract).
- Wang M L, Liu C L, Jiao P C, et al. 2005. Minerogenic theory of the superlarge Lop Nur Potash deposit, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 53-65.
- Warren J K. 2010. Evaporites through time : Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 98 : 217-268.
- Xuan Z Q. 2009. Division of sylvite concentrating area and its outline on prospecting of salt basin in China : Memorialize of 60 Years of Sylvite prospecting in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 31(1): 61-64(in Chinese with English abstract).
- Yuan J Q. 1946. Outline of salts in northwest of China [J]. *Monthly Magazine of Salt Affair*, 5(1-2): 14-24(in Chinese).
- Yuan J Q. 1961. Brief discuss of exploitation directions and methods for potash fertilizer[J]. *Geology in China*, 6 : 27-33(in Chinese).
- Yuan J Q, Huo C Y and Cai K Q. 1983. The high mountain-deep basin saline environment- a new genetic model of salt deposits[J]. *Geological Review*, 29(2): 159-165.

- Zak I and Bendor Y K, 1968. Some new data on the salt deposits of the dead sea area[A]. In : Proceedings of the Hanover Symposium[C]. 15021 : 137-146.
- Zhang J S and Li G X. 1980. The geological characteristics of potash deposits of Mengyejing, Jiangcheng, Yunnan Province[A]. In : Potash Geology Investigation Party of Geological Bureau of Yunnan , ed. The paper collection of potash geological researches , Simao Prefecture , Yunnan Province[C]. 38-44(in Chinese).
- Zhang M P, Xiang J, Wei X J and Zhang Y. 1989. Aline Lakes on the Qinghai-Xizang(Tibet)Plateau[M]. Beijing Scientific and Technical Publishing House. 102-112.
- Zheng M P, Qi W, Wu Y S and Liu J Y. 1991. Preliminary study on sedimentary environment of the lop Nur salt lake and its prospect for potassium[J]. Chinese Science Bulletin (23):1810-1813 (in Chinese).
- Zhu Y Z, Zhong J H, Wu B H and Liu C L. 1990. Preliminary approach to relationship between uplifting history of Altun Mountains and salt-forming condition in Tarim and Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 11(2): 136-143(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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的分布规律[J]. 地质学报, 4 : 379-390.
- 黄宣镇. 1996. 中国首例杂卤石矿床[J]. 云南地质, 15(1): 52-61.
- 李培清, 樊白龙, 李荣健, 张丙乾. 1987. 罗布泊洼地钾盐形成条件, 分布规律和资源评价[A]. 见 : 罗布泊科学考察与研究[M]. 北京 : 科学出版社. 182-198.
- 李廷祺. 1991. 新疆罗布泊地区钾盐远景规模的遥感地质研究[J]. 国土资源遥感, 7(1): 29-34.
- 林传伟. 1994. 四川盆地三叠系含钾岩系变质演化特点及找矿意义[J]. 四川地质报, 14(2): 122-129.
- 林耀庭, 颜仰基, 吴应林. 1996. 四川盆地某地富矿卤水水文地球化学特征及其成因资源意义[J]. 岩相古地理, 16(4): 12-22.
- 刘成林, 王弼力, 陈永志, 李长华. 1996. 柴达木盆地西部盐类矿床形成机理——“反向湖链”模式[A]. 郑绵平主编, 盐湖资源环境与全球变化[C]. 北京 : 地质出版社. 37-45.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程. 1999. 新疆罗布泊盐湖氢氧锶硫同位素地球化学及钾矿成矿物质来源[J]. 矿床地质, 18(3): 268-275.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 陈永志. 2006b. 世界主要古代钾盐矿实践与中国找钾对策[J]. 化工矿产地质. 28(1): 1-8.
- 刘成林, 焦鹏程, 曹养同. 2008. 蒸发岩盆地构造反转对钾盐成矿控制研究[A]. 见 : 第九届全国矿床会议论文集[C]. 北京 : 地质出版社. 370-373.

- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 陈永志. 2009. 罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析[J]. 地球学报, 30(6): 796-803.
- 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 王弼力. 2001. 罗布泊断陷带内形成富钾卤水机理研究[J]. 矿床地质. 29(4): 602-608.
- 刘群, 陈郁华, 李银彩, 蓝庆春, 袁鹤然, 阎东兰. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑-化学岩型盐类沉积[M]. 北京 : 科学技术出版社. 23.
- 刘群, 杜之岳, 陈郁华, 金若谷, 袁鹤然, 张峰根, 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. 30-37.
- 马黎春, 刘成林, 焦鹏程, 陈永志. 2010. 新疆典型干盐湖成钾条件与指标模型初探[J]. 矿床地质, 29(4): 593-601.
- 钱自强, 曲懿华, 刘群. 1994. 钾盐矿床[M]. 北京 : 地质出版社. 11-13.
- 唐敏, 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 曹养同, 胡妍娜. 2009a. 世界海相钾盐矿床特征定量化分析及其意义[J]. 沉积学报, 27(2): 326-333.
- 唐敏, 刘成林, 焦鹏程. 2009b. 库车盆地古近系岩盐层中钾盐资源量预测研究[J]. 矿床地质, 28(4): 503-509.
- 王弼力, 李廷祺, 刘成林, 杨智琛, 李长华. 1996. 新疆罗布泊罗北凹地钾矿的重大发现[A]. “八五”地质科学重要成果学术交流会议论文集选集[C]. 北京 : 冶金工业出版社. 446-449.
- 王弼力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京 : 地质出版社. 199-209.
- 宣之强. 2009. 中国含盐盆地成钾矿集区划分与找矿前景概述——中国找钾 60 年[J]. 化工矿产地质, 31(1): 61-64.
- 袁见齐. 1946. 西北盐产概论[J]. 盐务月报, 5(1-2): 14-24.
- 袁见齐. 1961. 略谈我国钾肥资源的找矿方向和找矿方法[J]. 中国地质, 6 : 27-33.
- 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 1983. 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, 29(2): 159-165.
- 张嘉澍, 李官贤. 1980. 云南江城勐野井钾盐矿床地质特征[A]. 见 : 云南省地质局钾盐地质科学研究队. 云南思茅地区钾盐地质研究论文集[C]. 38-44.
- 郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京 : 北京科学技术出版社. 106-112.
- 郑绵平, 齐文, 吴书玉, 刘俊英. 1990. 晚更新世以来罗布泊盐湖的沉积环境和找钾前景初析[J]. 科学通报, (23): 1810-1813.
- 朱允铸, 钟坚华, 吴必豪, 刘成林. 1990. 阿尔金山上升史与塔里木、柴达木成盐关系初探[J]. 石油与天然气地质, 11(2): 136-143.