

钾盐资源全球分布和我国找钾实践及方法探究

王春宁<sup>1,3</sup>, 余俊清<sup>1,2</sup>, 陈  良<sup>1,3</sup>, 张丽莎<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁, 810008;

2. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安, 710075;

3. 中国科学院研究生院, 北京, 100049)

**摘  要:** 世界各国大型古代海相固体钾盐矿床多数是在石油、盐岩矿、盐泉卤水等资源的勘查过程中被发现的。国内几十年的找钾实践证实, 我国缺乏大型海相固体钾盐矿床, 近年来在新生代陆相沉积盆地中寻找大型固体钾盐矿床的努力也没有取得明显进展。我国已探明的钾盐储量主要分布在青海柴达木盆地和新疆罗布泊的 11 个盐湖及其晶间卤水中, 约占资源总量的 90% 以上; 以固体钾矿赋存的资源量少且品位不高, 仅占已知总量的 2.6%。从 1958 年察尔汗盐滩生产出第一批 953 吨钾肥填补我国钾肥生产的空白, 到年产 150 万吨 KCl 的卤水钾盐开发规模的形成; 从 1995 年在罗布泊发现大型卤水钾矿, 到 2008 年预期生产 120 万吨 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 显示了我国干旱区盐湖卤水钾盐资源的重要位置。有专家建议, 今后的工作应在深入研究成果盆地基底构造和岩相古地理的基础上, 进一步划分可能成钾的次级盆地并进行重点勘探和研究。借鉴世界各国找钾经验, 将地质观察分析、地球物理探测、地球化学与水化学等方法综合运用, 我国的探盐找钾工作有可能取得突破性进展。

**关键词:** 全球钾盐资源; 中国钾盐资源; 中国找钾实践; 找钾方法

中图分类号: P619.211

文献标识码: A

文章编号: 1008—858X(2007)03—0056—17

钾盐广泛应用于农肥、化工、医药、纺织、印染、制革、玻璃、陶瓷、炸药等领域, 耗量巨大<sup>[1]</sup>, 对国家经济建设和资源安全具有非常重要的意义, 同时又是我国重要的紧缺矿物资源。目前, 我国的肥料施用量已居世界第一, 钾肥进口量居世界第二, 近年氯化钾产量已达 130 多万吨, 但也只能满足 15% 的消费量<sup>[2]</sup>。可见, 我国钾盐的紧缺态势仍很严峻, 如果钾盐找矿无重大突破, 长期进口钾盐局面将难以扭转, 这对我国资源安全、农业发展无疑会构成较大隐患。

要想实现中国钾盐资源找矿的突破, 有必要研究和总结钾盐找矿的经验与理论。本文根

据国内外主要钾盐矿床地质及其他资料, 对世界钾盐资源时间、空间及时空组合分布规律和主要产钾国的钾盐资源量、找矿经验、其境内主要大型钾盐矿床的成矿时代、发现过程、所用找钾方法等进行分类总结; 对中国的钾盐储量、分布特征以及近年来在塔里木盆地、罗布泊盆地、柴达木盆地及云南思茅盆地等地区的找钾实践历程进行分析整理; 对现有的诸如地质观察分析、物探和放射性测井、油盐兼探、水化学特征系数等找钾方法进行总结分析。希望通过这些研究有助于我们分析中国钾盐的找矿前景与方向。

收稿日期: 2007—04—28  
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(项目批准号: 40571173; 49971074)和中科院黄土与第四纪地质国家重点实验室主任基金 SKLLQG0532 共同资助  
作者简介: 王春宁(1981—), 男, 宁夏石嘴山人, 在读硕士研究生, 主要从事地球化学研究工作. E-mail: wangchunning05@

很不均衡的。

1 世界钾盐资源分布

至 1999 年为止, 世界上已发现 30 余个成钾盆地<sup>[3]</sup>。世界钾盐资源极为丰富, 资源总量达2 500亿吨(以 K<sub>2</sub>O 计), 绝大部分为地下固体钾盐, 少部分为含钾卤水, 据美国地质调查局统计, 2002 年世界钾矿探明储量 83 亿吨, 基础储量 170 亿吨<sup>[4]</sup>。然而, 它在时空上的分布则是

1. 1 时间分布

从产出的地质时代看, 前寒武纪尚未见有产出的报道。自寒武纪开始, 除奥陶纪没有发现钾盐矿床外, 其他的地质时代都有分布, 但在地史上钾盐矿床的分布却存在着很大的差异性<sup>[3]</sup>(详见表 1, 根据钱自强 1994 和魏东岩 1999 资料综合而成)。

表 1 世界主要含钾盐盆地与成钾年代

Table 1 The world major sedimentary basins with potash deposits and their ages of fomation

| 成盐成钾时代 |          | 盆地或矿床名称                                         | 钾盐资源量    | 所 占 比 例 | 地壳发展构造旋回 |        |
|--------|----------|-------------------------------------------------|----------|---------|----------|--------|
| 纪      | 世        |                                                 |          |         |          |        |
| 第四纪    | 晚更新世—全新世 | 察尔汗(中国)、大盐湖(美国)、西尔斯湖(美国)                        | 18.96亿吨  | 很小      | 喜马拉雅亚旋回  | 阿尔卑斯旋回 |
|        | 更新世—全新世  | 死海(以色列、约旦)                                      |          |         |          |        |
| 晚第三纪   | 中新世      | 西西里盆地(意大利)、东喀尔巴阡(俄罗斯、波兰)、马蛮地区(伊朗)、达拉基尔洼地(埃塞俄比亚) | 29.7亿吨   | 1.38%   |          |        |
| 早第三纪   | 渐新世      | 莱茵地堑(法国、德国)、埃布罗盆地(西班牙)                          |          |         |          |        |
|        | 始新—渐新世   | 江汉盆地(中国)                                        |          |         |          |        |
|        | 古新世      | 江城盆地(中国)                                        |          |         |          |        |
| 白垩纪    | 晚白垩世     | 呵叻盆地(泰国)                                        | 289.44亿吨 | 13.44%  | 燕山亚旋回    |        |
|        | 早白垩世     | 霍利—圣保罗(刚果)、察尔西塔(巴西)                             |          |         |          |        |
| 侏罗纪    | 晚侏罗世     | 塔吉克斯坦盆地(土库曼斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦)                     | 221.13亿吨 | 10.27%  |          |        |
| 三叠纪    |          | 阿基坦盆地(法国)、阿尔卑斯(奥地利)、赫米塞特盆地(摩洛哥)、北萨哈拉盆地(阿尔及利亚)   |          |         | 印支亚旋回    |        |
| 二叠纪    | 晚二叠世     | 亚马逊盆地(巴西)、新墨西哥盆地(美国)、蔡希斯坦盆地(德国、英国)              | 157.28亿吨 | 7.3%    | 华力西旋回    |        |
|        | 早二叠世     | 滨黑海低地盆地(俄罗斯、哈萨克斯坦)、乌拉尔山前拗陷带(俄罗斯)                |          |         |          |        |
| 石炭纪    | 中—晚石炭世   | 帕拉多克斯盆地(美国)                                     | 2.3亿吨    | 很小      |          |        |
|        | 早石炭世     | 滨海诸省盆地(加拿大)                                     |          |         |          |        |
| 泥盆纪    | 晚泥盆世     | 斯塔罗宾盆地(白俄罗斯)                                    | 1302.5亿吨 | 60.47%  |          |        |
|        | 中泥盆世     | 萨斯喀彻温盆地(加拿大)                                    |          |         |          |        |
| 志留纪    | 晚志留世     | 密执安盆地(美国)                                       | 不详       | 很小      |          |        |
| 寒武纪    |          | 盐岭盆地(巴基斯坦)、拉贾斯坦盆地(印度)、涅帕盆地(俄罗斯)                 | 132.68亿吨 | 6.16%   |          |        |

通过上表对比可见,泥盆纪可能是世界上最主要的成钾盐矿期,沉积的钾资源量占世界资源量的 60.47%;其次,白垩纪地层贮藏钾盐资源量占 13.44%,晚侏罗纪沉积钾盐 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,其他时代地层蕴藏的钾资源量相对更少<sup>[2]</sup>。

表 2 主要产钾国钾盐资源储量(万吨 K<sub>2</sub>O)

| 序号 | 国家   | 基础储量      | 储量      | 所占比例   |
|----|------|-----------|---------|--------|
| 1  | 加拿大  | 970 000   | 440 000 | 53.01% |
| 2  | 俄罗斯  | 220 000   | 220 000 | 21.69% |
| 3  | 白俄罗斯 | 100 000   | 75 000  | 9.04%  |
| 4  | 德国   | 85 000    | 71 000  | 8.55%  |
| 5  | 巴西   | 60 000    | 30 000  | 3.61%  |
| 6  | 泰国   | 不详        | 10 000  | 1.21%  |
| 7  | 美国   | 30 000    | 9 000   | 1.08%  |
| 8  | 以色列  | 58 000    | 4 000   | 0.48%  |
| 9  | 约旦   | 58 000    | 4 000   | 0.48%  |
| 10 | 乌克兰  | 3 000     | 2 500   | 0.30%  |
| 11 | 英国   | 3 000     | 2 200   | 0.27%  |
| 12 | 西班牙  | 3 500     | 2 000   | 0.24%  |
| 13 | 老挝   | 不详        | 2 000   | 0.24%  |
| 14 | 智利   | 5 000     | 1 000   | 0.12%  |
| 15 | 法国   | 不详        | 50      | 0.06%  |
| 16 | 其他   | 14 000    | —       | —      |
| 17 | 世界总计 | 1 700 000 | 830 000 | 100%   |

1.3 时空组合分布

从钾盐矿床的时空组合来看,寒武纪和侏罗纪产出的钾盐矿床只发现于亚洲;志留纪、泥盆纪和石炭纪钾盐矿床仅见于北欧和北美洲;二叠纪钾盐矿床产于欧洲和南、北美洲;三叠纪钾盐矿床仅限于沿西地中海国家;白垩纪钾盐矿床在南美洲和非洲板块分离处和亚洲多处有所发现<sup>[3]</sup>。

钾盐矿床在时空上的上述组合,很可能说明,不同地史时代,地球上的不同地区的地壳运动及其古气候的多样性<sup>[3]</sup>。

2 国外找钾经验及成果

世界钾盐资源(探明及远景储量)为

1.2 空间分布

世界钾盐矿床在空间即地球上的分布也很不均衡<sup>[3]</sup>。超大型钾盐矿床主要分布在北美、欧洲、南美、中东和亚洲等,其中加拿大、俄罗斯、白俄罗斯、德国4国探明储量占世界总量的 92%<sup>[1,4]</sup>(详见表 2,根据王孝峰 2005 资料改编)。

2 153.99亿吨(K<sub>2</sub>O),分布于 26 个不同规模的盆地中<sup>[2]</sup>,虽基本上均为海相古代固体钾盐矿床,但其发现历程却大不相同(详见表 3,根据刘成林 2006 资料改编)。

通过上述对比可见,国外大型钾盐矿床的发现多是从含钾线索开始的,因此应该密切关注石油和盐岩矿勘查过程中的含钾信息和线索,对已有的石油钻井岩心和岩盐矿床进行细致的矿物学与岩石学研究,从中可能获得钾盐成矿的重要线索<sup>[2]</sup>。

2.1 美国

迄今为止,全球已知含钾盆地有 33 个,美国占 6 个,在其含钾盆地中,新墨西哥州卡尔斯

巴德(Carlsbad)钾盐矿床是美国最早发现的古 钾盐矿床,它一直是美国钾盐的主要供给地<sup>[9]</sup>。

表 3 世界大型固体钾盐矿床发现过程

Table 3 Discovery history of the world major potash- ore resources

| 发现方式 | 钾盐矿床名称、数目及所占比例                                                                                                                               |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | 石油勘探过程: 加拿大 Elk Poiht 盆地萨斯喀彻温钾矿; 美国密执安、帕拉多克斯、新墨西哥、俄罗斯滨里海凹地钾盐盆地; 英国蔡希斯坦; 巴西塞尔希培; 德国、法国莱茵地堑; 埃及苏伊士湾捷姆萨; 俄罗斯—乌克兰等前喀尔巴阡第三纪钾盐盆地(共 10 个, 占 38.46%) |
| 2    | 根据石盐和卤水研究预测: 俄罗斯东西伯利亚盆地中的涅帕盆地和日梁钾盐矿床; 德国蔡希斯; 白俄罗斯的彼里皮亚特; 以色列—约旦死海(共 5 个, 占 19.23%)                                                           |
| 3    | 盐岩矿床勘探与开采: 巴基斯坦的盐岭钾盐矿床; 俄罗斯上卡姆; 加拿大 Fundy 盆地新不伦瑞克; 中亚的中亚盐盆地(共 4 个, 占 15.38%)                                                                 |
| 4    | 地表有出露: 埃塞俄比亚达纳基尔洼地; 美国 Elk point 盆地。(共 2 个, 占 7.69%)                                                                                         |
| 5    | 寻找地下水: 泰国—老挝呵叻盆地钾盐矿床(共 1 个, 占 3.85%)                                                                                                         |
| 6    | 因资料缺乏不清楚: 巴西亚马逊; 西班牙埃布罗; 加蓬和刚果盆地; 意大利中西西里(共 4 个, 占 15.39%)                                                                                   |

新墨西哥州钾盐矿床是在海西运动末期较大的海退时期形成的。1912 年在得克萨斯州找石油时, 打过一口“野猫井”, 在冲洗液中发现含有 5.4% 的 KCl。1912 年在得克萨斯的钻井岩心中发现过杂卤石。4 年以后, 于 1925 年才在新墨西哥州钻孔岩心中发现钾石盐, 1931 年开始正式钾盐勘探, 第一座矿山同年正式投产<sup>[6-9]</sup>。Carlsbad 含钾蒸发岩产出得克萨斯州西部、新墨西哥州东南部二叠纪特拉华盆地的 Ochoa(上二叠统)海相岩层中, 地层时代距今约 2.4 亿年。含钾盐系分为 4 个建造, 由老至新分别是: (1)Castile 建造, 厚 0~560.83 m, 主要由石盐岩、石膏岩、硬石膏岩及其石灰岩夹层组成; (2)Salado 建造, 厚 396.24~701.04 m, 钾盐层(Mcnutt Member)赋存于该建造中。主要由石盐岩、含泥石盐岩、硬石膏岩、杂卤石岩和白云岩以及石灰岩所组成; (3)Rustler 建造, 厚 89.92~129.94 m, 由石盐岩、石膏岩、硬石膏岩、硅质岩和白云岩以及石灰岩所构成; (4)Dewey Lake 红层建造, 厚 170.69 m, 由硅质泥岩和砂岩组成。其中赋存钾盐的 Salado 建造面积约为 150 000 km<sup>2</sup>, 其中石盐面积约 96 000 km<sup>2</sup>, 杂卤石面积约 70 000 km<sup>2</sup>, 钾盐面积约为 4 920 km<sup>2</sup>。在 Salado 建造中, 共赋存 12 个钾盐矿带, 其中 11 个矿带分布于中部 Mcnmtt Member 中, 该岩段厚 120 m, 基本呈水平状, 微有约 1° 的倾

斜角。原生的钾盐矿物有钾石盐和无水钾镁矾, 次生的钾盐矿物有钾盐镁矾、钾镁矾、钾芒硝、钾石膏、软钾镁矾等; 与钾盐矿物共生的主要有石盐和含泥石盐, 伴生的矿物有白钠镁矾、硬石膏等。而第 12 个矿带则分布于上部 UPPER MEMBER 中<sup>[5-9]</sup>。

美国密执安志留纪钾盐矿床位于密执安州境内。该盆地近乎圆形, 直径约 725 km, 钾盐赋存于晚志留世 Salina 群的蒸发岩地层, 钾盐矿床面积约 33 800 km<sup>2</sup>。早在上世纪初, 有人就曾推测密执安盆地可能有钾盐。50 年代对石油天然气钻井岩心进行鉴定分析时, 曾发现少量的钾盐矿物, 并发现石盐屑溴含量高达 280·10<sup>-6</sup>。1966 年 Dow 化学公司对采自 A—1 盐层的 135 m 岩心进行研究, 发现在 2 135~2 580 m 井段中有 30 多米厚的钾石盐层, 含 K<sub>2</sub>O 最高达 40%, 含钾段的平均品位为 4%K<sub>2</sub>O, 镁和硫酸根的含量很低。以后结合油气勘探虽做了些研究工作, 但由于该矿床埋藏比较深, 且矿层薄品位低, 未进行系统勘探, 至今尚未开采利用<sup>[6, 10-12]</sup>。

美国帕拉多克斯盆地位于科罗拉多与犹他两州境内, 面积约 1.8 万 km<sup>2</sup>。该盆地 1921 年首次发现钾盐, 但直到 1950 年以后, 主要通过石油和钾盐钻井的物理探测并才对钾盐矿床赋存状态有了较为清楚的认识。1960 年的克

萨斯海湾公司首次从 Delhi-Taylor 石油公司获得许可权,在 Moab 附近 Cane Creek 背斜上开采钾盐。1962 年开始建竖井和加工厂,1964 年开始生产。起初采用房柱法开采,年产 KCl 54 万吨,由于矿体形态复杂和瓦斯爆炸的原因,1970 年起改用水溶开采,1972 年 3 月重新投产,年产 KCl 18 万吨<sup>[6 13-15]</sup>。

此外,威利斯顿钾盐盆地在 1960 年受到关注,1974 年开始勘探。由于矿床的埋深太大,不易用传统的竖井采矿方法,只能在有利地段采用溶液开采,至今尚未开发利用<sup>[6]</sup>。

## 2.2 俄罗斯

俄罗斯钾盐资源分布点多面广,其中需要我们重视的有分布在乌拉尔前缘拗陷带已开采多年的上卡姆钾盐矿床和分布在东西伯利亚地台的涅帕钾盐矿床<sup>[16]</sup>。

上卡姆钾盐矿床位于俄罗斯中部卡玛河西岸索里卡姆斯克含盐盆地内。1826 年在钻孔的 86 m 深处发现岩盐,1915 年提出找钾,钻孔打到含钾盐系,1925 年夏重新开钻,同年 10 月在 92 m 深处进入含钾盐系,总厚 110 m。它是二叠纪初期孔谷期形成的一个含盐盆地,盐盆面积约 6 500 km<sup>2</sup>,呈南北向展布。钾盐分布于含盐盆地中心微偏西部位,长 136 km,宽 40 km,面积 280 ~ 3 000 km<sup>2</sup>。钾盐矿段为钾盐和岩盐的互层,厚 100 ~ 110 m,分三个带:下部为钾石盐带,厚 10 ~ 35 m;中部为光卤石带,厚 43 ~ 50 m;上部为钾石盐带,厚 0 ~ 32.4 m。钾盐矿石品质优良,平均品位为 15% ~ 22% (K<sub>2</sub>O)。钾盐矿层埋藏较浅,仅 250 ~ 500 m,远景储量 157 亿吨<sup>[6 16]</sup>。

涅帕钾盐盆地位于东西伯利亚含盐盆地的东北部,在伊尔库茨克北面下通古斯河和涅帕河上游之间,面积约 2 万 km<sup>2</sup>。它从上世纪 30 年代初开始预测直至 1979 年找到钾盐矿床经历了近半个世纪,纵观其找钾过程,大致可划分为 3 个阶段。1. 钾盐预测阶段:上世纪 30 年代初在岩心中发现蓝色石盐颗粒;1936 年在盐泉卤水中发现钾、镁离子偏高;1950 年在岩盐岩心中发现钾石盐和光卤石包体,接着又在许多钻孔中打到了富钾卤水,并利用测井资料圈定

了伽玛异常段;1954 年进行专门的水化学找钾工作;1957 ~ 1958 年开展了钾盐普查钻探,但由于钻孔深度不够,而未穿达含钾地层。2. 全国开展钾盐普查阶段(1962 ~ 1971 年):重点开展涅帕—加仁、依尔京凹陷、近萨彦岭东南、乌斯季库兹科—查雅尔和坎斯克—塔谢耶夫五个地区的找钾工作,结果仅探明了三个区域性含钾层位,一个在乌索利组上部,两个在安哥拉组中,并在坎斯克—塔谢耶夫凹陷发现了 5 ~ 10 cm 的钾石盐层。3. 发现钾盐矿床阶段(1971 ~ 1979 年):1971 年编制了东西伯利亚含钾盆地成矿预测图;1976 年在涅帕盆地东北部的两个石油钻孔中发现了两个伽玛异常高带,推测有钾盐层存在;1977 年在深 596 ~ 634 m 处见到了厚 38 m 含钾石盐的光卤石盐层;1979 年揭露了 70 m 厚的以钾石盐为主的钾盐层。该钾盐层赋存于下寒武统安加拉组下部加仁段,由下而上有 K1 ~ K6 六个钾盐层。钾盐层由盆地边缘向中心增厚,由数米增至 150 余米,钾盐矿石平均品位 13% ~ 27%,钾盐埋藏北浅(600 ~ 900 m),南深(1 300 m)。含钾矿层呈东北—南西向展布,有上中下三个带,以中带规模最大,长 140 km,宽 10 ~ 20 km,面积约 1 400 km<sup>2</sup>。涅帕钾盐矿床即位于该带的东北端。含钾矿层呈有规律的展布,钾石盐形含钾层分布在各带的中心部位,光卤石型含钾层分布在各带的外侧,而钾石盐—光卤石型含钾层分布在其间。涅帕钾盐矿床已探明储量 30 亿吨,预测钾盐地质储量 700 亿吨,是一个特大型钾盐矿床<sup>[6 17]</sup>。

此外,在滨里海凹地钾盐盆地,1900 年初石油勘探发现卤水中含钾,1912 ~ 1917 年石油钻发现岩盐及钾盐浸染体,1932 年在岩心中发现了钾石盐,1934 年在盐矿开采坑中发现杂卤石,在石油钻孔中进一步发现了钾盐矿床;在前喀尔巴阡第三纪钾盐盆地,1826 年在盐矿的开采过程中发现,1950 ~ 1952 年在石油钻孔中发现成层状的钾盐后,陆续开展大规模找钾工作<sup>[2 9]</sup>。

## 2.3 加拿大

加拿大钾盐储量非常丰富,主要集中在萨斯喀彻温省,而新步伦瑞克、曼尼托巴省和新斯

科舍省也有良好的勘探前景<sup>[4]</sup>。

萨斯喀彻温钾盐矿床是目前世界最大而发现又比较迟的钾盐矿床, 它位于加拿大西部萨斯喀彻温省的中部和南部, 萨斯喀吞(市)附近。该矿床的发现经历了漫长的过程。1900 年发现的大量盐泉, 是该地区赋存有盐矿床的最早标志。1907 至 1912 年, 在平原西北部靠近阿尔伯达麦克缪莱地区, 北阿尔伯达公司所钻两口井(深 429 m 和 450 m)已经穿过厚盐层, 但由于采用的钢丝绳冲击钻, 而未能取得岩心。以后又在此处钻井, 特别是科梯克井, 证实有一个厚约 61 m 的纯石盐层。1910 年在曼尼托巴省的尼巴娃, 主要为找盐钻了一口井, 但只发现浓度 70% 的盐水。1927 年在萨斯喀彻温省尤尼梯附近钻一口井, 1929 年钻探深度达 976 m, 在接近井底处钻过盐层 46 cm。1931 年钻落依科罗特 1 号井, 井深 1 059.6 m, 在深 1 046 m 处遇到强盐水流。1940 年 5 月完成的 C. P. R. 1 号井报告, 在地下 1 595.7 m 处见到 0.3 m 厚的盐层。而最早发现钾盐是 1943 年诺卡努斯石油天然气公司在萨斯喀彻温拉得维尔附近勘探石油时, 钻井岩心分析发现钾盐, 钾盐层厚度 10.37 m, 含钾品位 11.72% ( $K_2O$ ), 但由于埋藏深度达 2 334 m 而未引起重视。1944 年欧岐玛 1 号井深 2 263 m 处, 发现厚 27.45 m, 平均含钾品位 8.1% ( $K_2O$ ) 的钾盐层。1946 年在拉得维尔西北 480 km 的尤尼梯附近维尔巴达 2 号井中发现钾盐, 含钾品位为 21.64% ( $K_2O$ ), 矿层厚 3.35 m, 埋藏深度 1 057 m。同年在达维特逊 1 号井深 1 329 m 处, 也发现厚 3.05 m, 含钾品位 10.82% ( $K_2O$ ) 的钾盐层。1947 年在尤尼梯附近继续发现钾盐, 蒸发盐 1 号井深 1 129 m 处有厚 1.7 m, 含钾品位 17.21% 的钾盐层; 蒸发盐 2 号井深 1 129 m 处, 有厚 1.52 m, 含钾品位 17.44% ( $K_2O$ ) 的钾盐层。由于适合开采的钾盐层不断发现, 从 1950 年起便专门进行钾盐勘探。在 1950 年前只采用岩心分析法(亦见钻井泥浆分析含钾量的记载)。石油钻探公司 1950 年开始应用  $\gamma$  测井法在原有石油钻井中勘探钾盐, 1951 年, 对所有 200 个石油深井(其中半数在盐盆地内)均进行了详细的  $\gamma$  测井, 在此基础上

绘制出一张钾盐范围草图。从 1950 年到 1966 年内为寻找钾盐共打 250 个以上钻井, 同时汇集石油钻井所获资料, 绘制成钾盐矿床分布图。从而探明萨斯喀彻温钾盐矿床是一个大型优质钾盐矿床, 矿床厚度 1.5~3.0 m, 埋藏深度 1 000 m 以上, 有用矿物主要是钾石盐, 平均含钾品位 25% ( $K_2O$ ), 储量 454 亿吨<sup>[6, 18-22]</sup>。

此外, 在本世纪初期就知道加拿大沿海诸省石炭系沉积中赋存有钾盐。1919 年首次存新斯科舍省密西西比统 Windsor 群蒸发岩中发现钾盐。1939 年在勘探 Maglagash 盐矿时在 310 m 深处钻到钾盐层, 并在生产盐的过程中回收过钾盐。1962 年加拿大盐业公司在 Pug wash 矿山发现发现一条厚 2.5~3.1 cm 的钾石盐矿带。60 年代在 Cumberland 县的 Wallace 和 Roslin 地区进行地球物理测量和钻探工作, 有两个钻孔遇到光卤石和钾石盐矿。目前加拿大新不伦瑞克省 Moncton 盆地有两个钾盐生产矿山。Sussex 东北 7 km 的矿山由美洲钾盐公司(PCA)经营, 1978 年 3 月开始开凿第一座竖井, 深度为 760 m, 1983 年 7 月投产, 年产能力为 100 万吨 KCl。另一个矿山在 Sussex 西南 25 km 处的 Salt Spring 地区, 1975 年秋季开始勘探, 1985 年正式投产, 年产能力为 130 万吨 KCl<sup>[6, 23-29]</sup>。

2.4 中亚国家钾盐资源

中亚国家含钾盆地位于中亚南部吉沙尔山脉西南, 于土库曼斯坦东北和乌兹别克斯坦西部的高尔达克—库吉塔克地区, 面积 4 000 km<sup>2</sup> 以上。整个盆地已有钾盐矿点 14 个, 已进行勘探的有 6 个。有远景的钾盐矿床位于含钾盆地的西北部, 分布长 80 km, 宽 4~8 km, 面积 630 km<sup>2</sup>。钾盐层赋存于上侏罗统高尔达克组中部, 钾盐资源总量达 1 500 亿吨。其中丘别加坦钾盐矿床位于乌兹别克斯坦卡什卡达里区和土库曼斯坦的恰尔召乌区, 在德赫卡纳巴特村东 25 km, 矿床面积 300 km<sup>2</sup>, 钾盐层厚度 5~7 m, 平均品位 23.30%, 埋深 0~800 m, 已获得储量 6.86 亿吨, 其中工业储量 4.33 亿吨; 高尔达克钾盐矿床位于土库曼斯坦恰尔召乌区, 距高尔达克村 8 km, 钾盐层厚 1.5~8 m, 平均品位 9.99%~27.80%, 埋深为 70~700 m, 已探明工

业储量 1.06 亿吨;卡拉比耳钾盐矿床位于土库曼斯坦高尔达克村东南约 20 km, 矿床面积约 200 km<sup>2</sup>, 共有 8 个含钾层, 总厚度 31 ~ 137 m, 平均 88.5 m, 品位 8.85% ~ 30.78%, 含钾层埋藏 600 ~ 800 m, 储量 3.5 亿吨<sup>[6]</sup>。

## 2.5 泰国呵叻高原钾盐矿

呵叻高原钾盐矿位于泰国东北部呵叻高原, 有两个含盐盆地, 即北面的沙空那空盆地和南面的呵叻盆地, 其间为普潘隆起所隔。钾盐赋存于上白垩系一下第三系马哈沙拉勘建造。上世纪 50 年代泰国地质学家在该地区寻找地下饮用水时, 在岩心中发现了厚岩盐。70 年代分析岩盐中溴值变化规律, 在乌隆部署了第一口探钾井, 打到了厚层光卤石。至 1978 年相继打了 80 个钻孔, 证实了呵叻高原的呵叻盆地和沙空那空盆地赋存着厚大的钾盐矿床。80 年代初法国利用国际银行贷款试作水采试验, 后遭水淹而停止。美国曾计划在此开采, 鉴于高原缺水以及以光卤石为主的钾矿石, 开采困难, 至今进展不大。沙空那空盆地含钾层分布面积 9 800 km<sup>2</sup>, 已发现有乌隆、廊开、哇伦—农汉等钾石盐矿田。盆地含钾层平均厚度 43.21 m, 平均品位 9.91%, 埋藏 90 ~ 465 m, 远景储量 211.98 亿吨。呵叻盆地含钾层分布面积 15 100 km<sup>2</sup>, 已发现有邦内那隆、孔敬—加拉信、孔敬西、暖颂、亚索顿、南丘等钾石盐矿田。含钾层平均厚度 23.29 m, 平均品位 8.64%, 埋深 132 ~ 532 m, 远景储量 54.11 亿吨<sup>[6, 16, 26-30]</sup>。

目前泰国确定开发的矿区有两个: 一是邦内那隆矿区, 位于那隆镇 6 km 处, 控制储量 5.7 亿吨, 光卤石矿层埋深 100 ~ 150 m, K<sub>2</sub>O 品位 14%。泰国工业部利用世界银行 890 万美元贷款试验开发邦内那隆光卤石矿床。该矿于 1991 年确定为东盟开发项目, 东盟六国组建的东盟钾盐矿业公司, 其中泰国占 71% 的股份 (政府占 20%、私营公司 51%), 马来西亚、印尼各占 13%, 新加坡、菲律宾、文莱各占 1%。矿山建设规模为年产 KCl 100 万吨, 生产年限 30 年。总投资近 5 亿美元, 其中东盟六国投资 30%, 其余 70% 投资为日本福田协力基金会贷款。该矿为地下采矿, 主斜井已开工建设, 预计

2000 年建成投产, 准备采用冷结晶工艺方案生产钾肥。二是乌隆矿区, 该矿由泰国、加拿大合资组建的亚太钾矿有限公司承担开发建设。加拿大占 62.5% 股份, 泰国占 37.5% (其中政府占 10%、泰国中心化学公司占 27.5%)。在乌隆东南 20 km 处的 50 km<sup>2</sup> 范围内完成 102 个钻孔, 投资勘探费用 1 000 万美元, 控制储量 5 亿吨以上, 矿层平均厚度 13 m, K<sub>2</sub>O 平均品位 24%。1996 年 7 月提供可行性研究报告, 先期建设规模初步定为年产 100 万吨钾肥, 最终达到每年 200 万吨钾肥的规模<sup>[31-32]</sup>。

## 2.6 死海盆地钾盐矿床

位于亚洲西部以色列和约旦国之间, 是约旦—阿拉伯地堑最深的部分。历史上最早利用死海浓盐水的是以色列, 1913 年建有一座小型钾肥厂, 制取钾肥和溴, 至 1947 年生产 K<sub>2</sub>O 能力达年产 6.5 万吨, 后因战争停产。1952 年以色列政府成立了死海工程股份有限公司年产 K<sub>2</sub>O 达 10 万吨。自 1975 年以来一直进行盐田蒸发和化学加工处理, 至 1985 年达到年产 KCl 120 万吨的产量。因为约旦河和泉水中在 12 000 年中带入的总盐量为 632 亿吨, 而死海水体中的总盐量仅为 150 ~ 500 亿吨, 其所差的盐量已进入沉积物中 (即 1/5 的盐已沉积, 4/5 的盐仍在水体中)。其中 KCl 量计算和观察的数值差一半, 前者为 40 亿吨, 后者为 20 亿吨。究其原因, 或许有一半 KCl 被埋藏起来而未被发现, 或者是计算盐泉中钾含量过高所致<sup>[6, 33-36]</sup>。

## 2.7 埃塞俄比亚达纳基尔洼地钾盐矿床

达纳基尔钾盐矿床位于埃塞俄比亚北部达纳基尔洼地中, 是一个在海平面以下 119 m 的内陆盆地, 盆地长 185 km, 宽 64.4 km。早在 1906 年就曾在黑山地区发现光卤石, 一次世界大战中曾开发地表光卤石矿。1954 年美国 Ralph. M. Parsons 公司获得黑山地区钾盐的开采权, 直至 1968 年在 Musley 发现了工业钾石盐矿, 共打了 300 口探钾井。1965 年建了生产竖井, 采深达 610 m。Musley 地区经 65 个钻孔验证, 矿体平均厚度为 15 m, 矿石中 KCl 平均品位为 31% ~ 32%, 初步估算 KCl 总储量为 1.6 亿吨。

其中以 300m 间距控制的储量为 6 622.6 万吨; 以 600 m 间距控制的储量为 3 233.1 万吨; 其他稀疏工程控制的储量为 6 187.7 万吨。后经 8 个外围钻孔证实, 钾盐矿体向东、向南都有延展, 向东随洼地的抬升, 矿体埋藏相对较浅。总之本区粗略框算钾盐总储量可达 10 亿吨<sup>[6,37-42]</sup>。

此外, 还有白俄罗斯的彼里皮亚特超大型盆地, 属陆台上大型地堑, 湖链西北端, 下有火山凝灰岩, 海相成因, 储量 5.746 亿吨, 1941 年在构造孔中发现含盐系, 1949 年在构造孔中偶然发现钾盐层, 1971 年完成勘探, 求得储量。德国—英国蔡希斯坦盆地钾盐矿床, 1839 年首次在生产石盐的矿山中发现钾盐矿物, 1870 ~ 1890 年发现钾盐矿床, 1930 年发现大规模钾矿<sup>[2,6]</sup>。

综上所述, 世界各国钾盐找矿经验表明, 单独使用一种方法所取得的效果都是有限的, 只有将地质观察分析、地球物理探测、地球化学与水化学等方法综合运用, 找钾工作才能取得更好的成果<sup>[43]</sup>。

3 中国钾盐资源分布

我国钾资源短缺, 约占世界钾基础储量总量的 1.8%, 其中以卤水状态赋存的现代盐湖钾盐资源占我国钾资源总储量的 92%; 以固体

状态赋存的钾资源量少且地质品位不高, 可供直接开采利用的固体钾矿资源仅占 2.6%, 主要分布在我国云南思茅地区<sup>[44]</sup>。

目前, 我国已探明的钾盐储量主要分布在青海柴达木盆地和新疆罗布泊的 11 个现代盐湖中。青海柴达木盆地 KCl 的资源总量为 7.13 亿吨, 其次是新疆罗布泊, 初步圈定 KCl 资源量 2.9 亿吨 (另有消息报道罗布泊地区的钾盐资源量不足 1 亿吨), 第三是西藏 35 个特种 (钾锂硼) 盐湖, KCl 资源量 0.66 亿吨。此外, 内蒙已发现的钾盐湖 11 个, 拥有资源量 257 万吨。我国已发现的古代固体钾盐矿床, 主要为云南勐野井古新世钾盐矿, KCl 储量 1.9715 万吨。以上总计 10.84 亿吨, 折合 K<sub>2</sub>O 6.85 亿吨<sup>[45]</sup>。中国西部钾盐的分布特征<sup>[46]</sup> 详见表 4 (根据涂怀奎 2002 资料改编)。

4 中国找钾的探索与实践

国外钾盐矿床研究表明, 巨型钾盐矿床都产于寒武纪、志留纪、二叠纪、侏罗纪、第三纪等海相碳酸盐岩系中<sup>[3]</sup>。我国 50 余年探盐找钾工作也证实在陆相中新世代沉积盆地中找到大型固体钾盐矿床的可能性不大, 可以基本否定东部 8 省白垩—古近系工业钾盐成矿的可能性<sup>[45]</sup>。

表 4 中国西部钾盐分布特征  
Table 4 Distribution characteristics of the potash resources in the west of China

| 盆地名称     | 主要地层与特征成分                    | 规模与成果                         |
|----------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 柴达木盆地  | 第三、四系与现代地层, 钾镁盐矿、光卤石、卤水丰富    | 特大型                           |
| 2 罗布泊盆地  | 第三系、石炭系, 卤水富 K、B、Na、石盐, 芒硝为主 | 大型—特大型                        |
| 3 西藏盐湖   | 第四纪陆相地层, 石盐、光卤石、钾镁盐矿等        | 小型众多                          |
| 4 四川盆地   | 三叠纪, 富钾卤水、杂卤石、钾镁盐矿等          | 液态钾矿预测 4 374 亿 m <sup>3</sup> |
| 5 鄂尔多斯盆地 | 奥陶系, 含石盐、石膏                  | 已找出钾盐盆地中心                     |
| 6 云南思茅盆地 | 旧盐碱, 红色不能食用的钾盐               | 中型固体钾盐矿                       |

中国特定的地质构造背景是, 稳定陆块规模较小, 难以找到国外那种巨型海相钾盐沉积盆地<sup>[45]</sup>。借鉴国外成钾盆地构造和岩相古地理研究经验, 应大力开展成盐盆地基底构造和岩相古地理的深入研究, 进一步划分次一级的

可能成钾的盆地。迄今为止, 我国已发现海相含盐地层有四川震旦系、寒武系和三叠系, 陕北奥陶系, 新疆寒武系和石炭系<sup>[3]</sup>。中国西部拥有新生代长期成盐的大型山间盆地 (柴达木、塔里木), 在晚新生代, 特别是第四纪形成相当规

模的盐湖和钾盐矿层。为此, 在新疆的塔里木盆地的莎车盆地有望找到钾盐层, 而青海柴达木盆地第四纪盐湖钾的储量也有进一步扩大的可能性<sup>[45]</sup>。

#### 4.1 新疆塔里木盆地

塔里木盆地是我国最大的沉积盆地。晚三叠世开始一直到中新世, 发育了两个巨大的前陆盆地, 分别是位于天山山前和昆仑山山前的塔西南坳陷和库车坳陷, 共以中央隆起作为他们的前陆隆<sup>[47]</sup>。塔里木盆地本身属巨型盆地, 具有多个海相盆地叠加的特点<sup>[2]</sup>, 其盐类资源丰富, 尤其是第三纪的盐类沉积既有陆相盐湖型, 又有与海相有关的潟湖—萨布哈型以及两者的混合型, 沉积厚度大, 分布范围广<sup>[48]</sup>。

库车坳陷: 有广厚的盐层和大量盐丘分布, 石盐储量不下千亿吨, 具有一定的找钾远景。它有广厚的石盐岩层, 可以作为成钾的物质基础; 有以海水为主的多方面物质来源, 这是成钾的基本条件; 加上古气候、古环境比较合适, 处在常常是大型钾盐矿床赋存的前陆部位, 有可能找到钾盐矿床<sup>[48]</sup>。库车盆地第三纪地层中发现次生光卤石, 可能是白垩—第三纪地层具有钾盐成矿的线索; 莎车盆地白垩—第三纪地层有厚盐类沉积, 这些地方虽没有发现钾盐矿物, 但由于具有巨厚盐类沉积, 也应具有较好成钾条件<sup>[2]</sup>。

塔西南坳陷: 目前在地表见有巨厚的以石膏岩为主的盐类沉积, 但它是典型的海湾—潟湖相沉积, 在海湾或潟湖较中心部位可以产生石盐及钾盐沉积, 有望找到厚度巨大的石盐层和钾盐层。但是该区长期沉降幅度太大, 目前尚不具备勘探的条件<sup>[48]</sup>。

沙雅隆起西部: 发育的石盐岩是库车坳陷次级凹陷的盐类沉积, 作为次级小盐盆, 规模较小, 盐类沉积以石盐岩为主, 偶而也可能有钾盐矿物或薄层, 值得注意。目前埋深相对较大, 仅可实施油盐兼探, 以确定其成钾的可能性<sup>[48]</sup>。

塔里木盆地的找钾工作不能局限于经典的海相成盐理论, 应该结合岩盐及含盐系地层地球化学、盆地构造变形历史及构造分异特征的综合分析研究, 寻找新的找钾指标, 以期发现可

能的钾盐矿床, 可以结合现有关于卤水、岩盐氯同位素研究数据, 参考岩盐  $\text{Br} \cdot 10^3 / \text{Cl}$  系数、卤水水化学特征, 表明  $\delta^{37}\text{Cl}$  值是贫 Br 地区指导找钾的一个有效指标(谭红兵, 2005)。运用这一指标推测, 莎车盆地形成岩盐的古卤水浓缩程度明显高于库车盆地, 特别是莎车盆地西部的喀什坳陷  $\delta^{37}\text{Cl}$  值最为偏负, 推测当时成盐古卤水已浓缩到晚期阶段, 可作为找钾远景区开展更进一步调查研究<sup>[49-50]</sup>。

因此, 在新疆塔里木盆地, 应借助石油勘探资料, 尤其钻井与地震等资料同时穿透不同时代海相沉积盆地的特点, 建立“立体找矿”模式与方法, 有望快速有效地查明塔里木盆地钾资源潜力<sup>[2]</sup>。

#### 4.2 新疆罗布泊盆地

新疆罗布泊素有“旱极”、“死亡之海”之称。在此特殊的地理环境之中, 却蕴藏着丰富的盐类资源, 尤其是钾盐资源。长期以来, 经过多方勘察论证, 已证实罗布泊地区罗北凹地是以卤水钾矿为主, 伴生有液体  $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$  和固体石盐、钙芒硝的大型至超大型综合性的盐类矿床。罗布泊盐湖周边基岩山区富钾花岗岩和火山岩、塔里木盆地古盐矿床和罗布泊北部中更新统化学沉积物形成的台地等为罗北凹地潜卤水矿床提供了丰富的物源物质条件, 而半封闭的构造成环境和干旱气候条件是其形成的有利条件。与世界著名盐湖比较, 罗北凹地潜卤水钾矿的  $\text{K}^+$  含量、储量及其化学成分具有独特优势, 具有较好的开发前景<sup>[51]</sup>。

罗布泊钾矿区(罗北凹地)外围的铁南凹地和罗西洼地盐湖, 控制和预测的卤水钾盐资源量达 2 182 万吨; 估计钾盐资源潜在经济价值达 459 亿元。铁南凹地, 钻探揭示潜水层(未揭穿)面积  $50 \text{ km}^2$ , 平均厚度  $5.08 \text{ m}$ , 孔隙度为  $34\%$ ,  $w(\text{KCl})$  为  $1.51\%$  (工业品位为  $1\%$ ), 卤水密度  $1.2491 \text{ g/cm}^3$ , 计算潜卤层的 KCl 资源量为 162.88 万吨, 预测潜卤层下部和承压层卤水钾盐资源量 754 万吨, 合计 KCl 资源量 917 万吨, 达到中型规模。罗西洼地, 钻探揭露潜卤层(W1)面积  $200 \text{ km}^2$ , 平均厚度  $4.56 \text{ m}$ , 孔隙度  $21.77\%$ ,  $w(\text{KCl})$   $1.30\%$ , 卤水密度  $1.2262$ , 计算

KCl 资源量为 316.49 万吨; 第一承压层(W2), 面积 150 km<sup>2</sup>, 平均厚度 10.45 m, 孔隙度 15.5%, KCl 品位 1.32%, 卤水密度 1.226 3 g/cm<sup>3</sup>, 计算资源量 393.28 万吨, 预测罗西洼地西部的潜卤层和承压层 KCl 资源量合计 555 万吨, 罗西洼地卤水 KCl 资源量合计为 1 265 万吨, 达到中型规模。同时, 在研究区干盐湖的浅部发现多处杂卤石、钾盐镁矾和光卤石沉积层或固体矿化点, 光卤石在干盐湖表面呈片一带状分布, 表明固体钾盐资源尚有调查评价的潜力。此外, 在盐湖区采用大地电场法探测地下富钾卤水分布, 结果验证了钻探揭露的地下卤水的分布规律<sup>[52]</sup>。

由中国地质科学院矿产资源研究所负责并承担的地调项目“罗布泊钾矿区外围盐湖钾盐资源潜力研究与评价”, 通过卫星影像分析、野外调查及室内测试分析, 获得了可靠的地质资料, 对罗布泊钾矿区外围盐湖钾盐资源进行了评价研究, 提出“上升卤水流体补给成钾”的新认识, 在罗布泊盐湖发现很多地下流体上涌的通道, 认为上升卤水流体补给对罗布泊盐湖钙芒硝沉积、储卤孔隙的形成、钾盐富集起到了重要作用, 甚至直接导致了固体钾盐的沉积。同时还提出“构造分异—反补成盐成钾”的新认识, 新构造活动导致罗布泊北部抬升, 受 NNE 向主压应力作用, 产生一系列 NNE 向的张性断层, 产生了盆地的“构造分异”, 统一的罗布泊被分隔、断陷, 形成多个次级盆地。在沉积演化中, 这些次级盆地不断受到南部大湖区湖水的周期性上升反向补给, 古湖水不断浓缩, 成矿物质逐渐积累, 最终卤水中钾元素富集成矿。上述认识深化了陆相钾盐成矿理论, 对陆相钾盐找矿和评价有一定的指导意义<sup>[52]</sup>。

近年来罗布泊地区的钾盐资源正在不断的开发利用, 2000 年成立国投新疆罗布泊钾盐公司, 利用天然卤水制取硫酸钾、氯化钾。目前已建成 21.6 km<sup>2</sup> 的盐田, 具备年产 10 万吨硫酸钾的生产能力。2006 年 4 月 25 日, 公司年产 120 万吨钾肥项目开工, 有消息报道, 项目将于 2008 年底建成试生产, 计划增加盐田面积 158 km<sup>2</sup>。该项目投产后, 国投罗钾公司的年生产能力将达到 130 万吨<sup>[53]</sup>。

4.3 青海柴达木盆地

柴达木盆地现代盐湖钾资源以两种方式存在, 一为高钾卤水, 一为固体矿层。高钾卤水分布在盆地中部强烈拗陷带湖区(如大浪滩、昆特依、一里坪、察尔汗等, 已构成工业可采钾矿床, 又以别勒滩的卤水中含钾量最高); 在地表湖水中钾的高含量出现在远离补给源的近盐类沉积岸边地区; 同一湖区表面湖水的钾含量低于相邻的晶间卤水; 同一层晶间卤水钾含量随深度的增加而递减<sup>[54]</sup>。

察尔汗盐湖位于柴达木盆地中东部, 东西长 204 km, 南北宽 20~40 km, 面积 5 856 km<sup>2</sup>, 海拔高度 2 677~2 680 m<sup>[55]</sup>。它是世界罕见的大型第四纪内陆盐湖钾镁盐矿床之一, 是一个以液态钾矿为主、固液并存且伴生多种有益元素的综合性矿床。液相、固相钾盐资源总量为 5.4 亿吨(KCl), 其中液相卤水钾矿为 2.44 亿吨, 固相钾矿 2.96 亿吨。卤水钾矿中批准的表内储量为 1.45 亿吨, 固体钾矿中表内储量为 0.22 亿吨, 表外储量 1.36 亿吨, KCl 含量 0.5%~1.0%的资源量 1.38 亿吨<sup>[56]</sup>。

察尔汗盐湖的东南西三面, 分布着上更新统和全新统洪积、冲积层。向干盐滩方向延伸, 相变为湖相化学沉积, 形成数十米厚、以石盐为主的含盐建造。按照沉积旋回, 划分为上、中、下三个含盐组, 其间赋存两个卤水含矿层。盐湖地表广泛沉积有石盐、钾石盐、钾镁盐矿, 并直接出露地表, 其中以石盐沉积为主, 含盐厚度一般为 20~60 m, 最大厚度 70.2 m, 含钾矿体即光卤石矿层赋存在石盐层中, 主要含钾矿物为光卤石, 其次为钾石盐; 除固体钾矿外, 还赋存着丰富的晶间卤水和碎屑层中的孔隙卤水, 并以晶间卤水为主。固体钾矿主要赋存在石盐层, 尤以上盐层为主。其特点是层数多, 由下向上共分 8 个层次, 分布面积广、厚度小(一般厚度 0.58~1.17 m)、品位低(KCl 含量 2%~16.68%, 一般为 3%~4%)、储量大(2.96 亿吨)。钾矿物组合在空间上有一定的分布规律, 由下向上、由西向东, 钾石盐减少, 光卤石增多。而液体钾矿则包括地表卤水(湖水)矿和地下卤水(晶间卤水与孔隙卤水)矿。地表卤水与地下

卤水紧密相连,互为依存,在矿区周围有河流补给低洼的地方形成了 9 个湖泊,自东向西为南、北霍布逊湖、团结湖、协作湖、达布逊湖、达布逊新湖、大、小别勒湖和涩聂湖。其中达布逊为全盐湖的浓缩中心,目前仍不断向浓缩方向发展,卤水由下向上浓度增大,由中心向边缘浓度减小,其面积最大,具有开采价值<sup>[55,57]</sup>。

察尔汗盐湖是我国目前唯一的大型钾肥生产基地,其钾资源的开发始于 20 世纪 50 年代,此后缓慢发展,至 20 世纪 90 年代初期,生产钾肥能力达到 20 多万吨,其后因国内钾肥市场紧缺,钾资源的开发迅速发展,90 年代中期兴建了数十家地方小型钾肥生产企业,2000 年实际生产钾肥 80.6 万吨,2002 年实际生产钾肥约 100 万吨<sup>[59]</sup>。将来如果在别勒滩矿区所确定的采输卤、盐田布置、工艺加工及老卤排放等方案均经济合理且技术可靠,则最终形成的总体规模有可能达到每年 150 万吨。对于马海矿区,在提高勘探程度并解决上述有关技术问题(其中包括深部和承压水含矿层的采卤问题)的前提下,其最终开发规模有望达到每年 60 万吨。因此青海省的卤水钾矿资源的最终总体开发规模有可能达到每年 280~300 万吨<sup>[58]</sup>。

#### 4.4 云南思茅盆地

1962 年我国地质学家首先在兰坪—思茅盆地的勐野井老硐中发现了钾石盐矿石,为红色不能食用的钾盐,成为中国第一个中型固态钾盐矿床。此后连续做了大量地质探查工作,先后发现了一处钾盐矿床,多个钾矿层和矿化点。“八五”期间地矿部对兰坪—思茅盆地再次开展找矿和科学研究,发现了更多的证据,表明中泰两国钾盐矿床在成矿层位和成矿母液来源方面都有着密不可分的源缘关系——兰坪—思茅盆地下第三系含钾卤水是从泰国呵叻盆地流入的。思茅钾盐矿床的地层为白垩系,与呵叻盆地同处在一个大地构造带上,成矿时代和层位基本相同,析盐矿物组合类似,母液卤水组成具有同源性,且其 Br 值含量变化符合卤水从北向南逐渐浓缩的趋势。呵叻盆地下、中、上盐组表示有三次成盐旋回,但卤水北流时只有下、中盐组浸没我国,上盐组沉积只局限在呵叻盆地

内,其北部沙空那空盆地石盐和石膏层已很薄;下盐组在我国境内只在思茅盆地有沉积,兰坪盆地缺失,但中盐组在兰坪—思茅坳陷带均有盐沉积,南部沉积物厚度大于北部。兰坪—思茅—呵叻盆地当属同一构造带内的多个成盐盆地体系,其不同的盆地不仅大小不一,凹陷深度也不一致,但它们的水体却是连通的,这就是导致兰坪—思茅—呵叻盆地盐矿(含钾盐)类型、盐矿物组合和微量元素极为相似的根本原因;兰坪—思茅盆地的含钾卤水,主要来自南方的呵叻盆地,卤水在呵叻盆地的下、中、上盐组和兰坪—思茅盆地浸没状况在各地有所不同(曲懿华,1997)。

呵叻上盐组在我国没有沉积;呵叻的中盐组在我国分布于全坳陷带,且全带均有钾矿化,南部勐野井已找到钾盐矿,而呵叻盆地中盐组仅有钾矿化,可见该盐组成钾性我国地域优于呵叻同层位;呵叻的主钾盐层位的下盐组,在我国大多数地区尚无钻探控制,仅从少数地区钻孔资料推断,区内当有下盐组存在。例如磨墨 ZS212 孔,在打穿上盐层,继而又穿透了 57 m 泥岩层后,在 219.5 m 处又打到近 180 m 厚的下盐层,且薄片鉴定发现有钾石盐矿化。此外在勐野井矿硐中发现一种棕黑色老盐砾石,其 Br 值达  $216 \times 10^{-6} \sim 364 \times 10^{-6}$ ,结构与已发现盐层截然不同,推断是下盐组石盐在盐体后期塑变时带至上部盐层中。今后若能在思茅盆地的某些开阔凹陷(如景谷、勐伴、尚勇等),施工适当深度的钻孔,打到下泥砾盐层(相当呵叻的下盐组)的钾矿层,其含钾性亦当更佳。预测该层位在我国境内的钾矿物组合,由北向南,当以钾石盐、光卤石为主,或许有少量水氯镁石,但其浓缩程度当低于呵叻盆地,矿石类型将优于呵叻盆地<sup>[59]</sup>。

#### 4.5 中国找钾历程回顾

1955~1956 年,青海省交通厅公路局在修筑敦格公路穿越柴达木盆地时发现了著名于世的察尔汗干盐滩。1957 年中科院盐湖调查队奉命赴青海察尔汗,考察队员郑绵平和高仕扬在察尔汗卤坑中发现和鉴定了含钾光卤石矿物以及原生盐湖沉积光卤石钾盐层,从此揭开了

中国钾盐从无到有的历史。1958年秋天,用原生光卤石矿生产出第一批含KCl 50%的953吨钾肥,填补了中国钾肥生产的空白,此时距1860年世界最早开采钾盐的德国迟后一百年。

1961年袁见齐先生先后发表了“中国内陆盐湖钾盐沉积的若干问题”、“略谈我国钾肥资源的找矿方向和找矿方法”等文章,他从中国发现陆相盐湖钾矿实际出发,结合世界成钾规律,谈到泻湖相钾盐矿床、陆相钾盐矿床的找矿方向及可能,指出找钾应该海陆并举、不宜全部排斥陆相成钾的可能性等等。

1965~1976年盐湖地球化学开拓者张彭熹先生及同事完成了柴达木盆地众多盐湖考察,除重点的察尔汗及达布逊外,还有大小柴旦湖、大小别勒湖、涩聂湖、尕斯库勒湖、苏干湖、昆特依和马海等盐湖,同时鉴定了大浪滩钾盐矿岩芯。张彭熹先生及其同事进行的早期盐湖地质考察,为我国钾肥生产基地建设及未来盐湖硼、锂盐化工大型企业的建设,提供了详细资料和科学依据。为了提高钾肥的自给率,国家计委于1975年决定开发青海察尔汗盐湖,建议一期工程年产钾肥20万吨,二期为80万吨,表明中国政府及工程科学等专家对开发和生产钾肥的重视。

1978年全国科学技术大会召开,迎来科学的春天,中国钾盐工作有了长足发展。1980年袁见齐先生发表“钾盐矿床成矿理论研究的若干问题”,首次提出“高山深盆”陆相成盐成钾模式概念,到1983年完善了该理论,发表了著名的“高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式剖析”,充实了陆相成盐成钾学说。

1984年在青海西宁召开全国盐类沉积学术会议。这是一次全国找钾工作的检阅和动员会议,为了迅速改变中国严重缺钾状况,“七五”计划地矿部在柴达木盆地西部和北部开展了第三系和第四系第二轮钾盐普查,基本查明盆地钾资源及成因,普查昆特依、马海及大浪滩等大中型盐湖钾矿床求得D级KCl储量约2亿吨左右,实现中国钾矿储量翻一番目标。

中国盐湖及盐湖钾盐综合考察和理论研究在中科院盐湖所张彭熹先生领导下取得了丰硕成果。张先生多次组织领导和参加全国盐湖资

源地质考察,证实青海柴达木盆地蕴藏大量盐湖钾资源,总结出中国盐湖具有多、大、富、全等特色,代表著作有《柴达木盆地盐湖》、《西藏盐湖》等,建立了现代盐湖成盐成钾演化实验研究室,完善大陆成钾的理论体系,解决了百余年来钾盐矿成因理论界对形成缺失 $\text{MgSO}_4$ 盐的“异常”钾盐蒸发岩成因争论问题,认为柴达木盆地众多盐湖不是残留湖,而是冰后期在更新世干盐湖基础上发育的新生溶蚀湖,指出察尔汗盐湖是由1份深断上升 $\text{CaCl}_2$ 型水和40份河水配比混合演化形成的缺失 $\text{MgSO}_4$ 盐的“异常”钾盐蒸发岩。该成果完善了现代盐湖钾盐形成模式,发展了大陆成钾理论,引起美国、俄国和日本等学者关注和广为引用<sup>[60-64]</sup>。

国外钾盐矿床研究表明,巨型钾盐矿床都产于寒武、泥盆、志留、二叠、侏罗、第三纪等海相碳酸盐岩系中。我国三十余年的探盐找钾工作也证实陆相中新生代沉积盆地中找到大型固体钾盐矿床的可能性不大,于是以袁见齐教授为代表的盐矿地质工作者及时地提出寻找钾盐工作的重点应转移到海相成因的大型沉积地的主张。迄今为止,我国已经发现海相含盐地层有四川震旦系、寒武系和三叠系,陕北奥陶系,新疆寒武系和石炭系。借鉴国外成钾盆地构造和岩相古地理研究经验,应大力开展成盐盆地基底构造和岩相古地理的深入研究,进一步划分次一级的可能成钾盆地。这些成钾盆地或者是水下隆起围限,或者是礁堤带的围限,或者是深大断裂的围限,总之,必须要有一个封闭半封闭的环境。就我国已发现的海相含盐地层而论,魏东岩(1999)认为新疆寒武系和陕北奥陶系应作为找钾的重点层位,当需进一步深入工作。此外,要特别重视富钾卤水的寻找。我国在川东北和成都西部三叠系中,在沙市第三系,特别是在青海西部柴达木盆地第四系盐湖中,都发现了深部或浅层地下含钾卤水。最近在罗布泊罗北凹地发现了含钾的浅部潜卤水。富钾卤水易开发利用且数量大、分布广,具有重要的经济意义。含钾卤水在我国潜力很大,不但在海相含盐地层中,而且在中新生代成盐盆地中,还可以在新疆、内蒙沙漠地带,应及时进行航空 $\gamma$ 能谱、磁力测量和遥感技术工作,并配

合油气勘探来进行<sup>[3]</sup>。

1995 到 1999 年,由中国地质科学院矿床所牵头,新疆地矿局第三地质大队及地矿部遥感中心参加的“九五”国家项目课题组在罗北凹地发现了大型卤水钾矿,这是科学家预见的结果。按已控制面积、矿层厚度和平均品位计算,罗北凹地钾矿床已揭示的卤水 KCl 地质储量超过了 2.5 亿吨,达到大或特大型规模。目前仅发现潜卤水型和深部承压卤水型液态钾矿,尚未发现有价值的固体钾盐<sup>[60]</sup>。此外首次发现卤水钾矿床储藏于钙芒硝岩中,属一种新类型钾盐矿床;继而在罗北凹地外围又发现四个中型钾盐矿床。钾盐成矿理论方面,提出和完善了“高山深盆迁移论”、“两段式成钾论”及“含水墙成钾”模式等,这些成矿认识,指导了罗布泊盐湖钾盐大规模勘查和扩大找矿。在钾盐开发方面,2000 年成立新疆罗布泊钾盐公司,建成年产 4 万吨硫酸钾示范厂,2006 年 4 月 25 日,国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司 120 万吨钾肥项目开工。罗布泊钾盐的开发可望在我国西部欧亚大陆桥沿线建成第二个钾肥生产基地,对缓解我国钾盐紧缺状况,促进地方经济发展、保持社会稳定、巩固边防均具有重要意义<sup>[53]</sup>。

21 世纪中国钾盐和钾肥该如何发展?目前中国钾盐资源已探明资源量主要分布于青海柴达木盆地,近年发现新疆塔里木盆地罗布泊第四纪盐湖也蕴藏有超大型规模的钾盐资源。这些钾盐资源分布于上千平方公里的干盐湖中,属卤水钾矿,需要建设大面积盐田才能进行大规模开采,其采矿工艺较为复杂,加之交通运输不便等,导致开采成本相对较高<sup>[3]</sup>。同时鉴于柴达木盆地盐湖资源中钾、镁、硼、锂、芒硝等资源共生异常丰富,在发展盐湖钾肥工业时,应特别重视资源的综合利用,做到既降低综合生产成本,增强产品市场竞争力,又有利于生态环境保护。在借鉴国际盐湖开发先进经验和技术的的基础上,结合中国实际情况,进行综合利用和高附加值开发,只要规划设计和组织协调得当,在当前改革开放政策指导下,一个崭新、高效、高产值的盐化工综合利用基地将屹立于中国西部柴达木盆地中<sup>[60]</sup>。

## 5 现有找钾方法研究

### 5.1 地质观察分析

首先,要特别注意对成盐成钾有利的找矿标志和线索的利用。例如:调查盐泉,注意观察含钾、溴量较高的泉泄地段;研究亲盐岩性特点,注意寻找如天青石、菱镁矿、自形石英及其他卤素沉积的指示矿物;详测代表性含盐或可能含盐的沉积剖面,注意分析盐相的纵横变化,酌定成盐找钾的层位;考察盐聚与盐溶的特殊地貌,注意研究石膏帽、盐溶角砾岩、盐溶假晶、盐溶疙瘩等的表露特征。其次,要着重研究盐类沉积剖面的特点和考察地下地质与地表地质的相互关系,在重点地段必须打钻进行深部揭露<sup>[43, 61]</sup>。

### 5.2 物探和放射性测井<sup>[43, 61]</sup>

(1)电法:对于发现和追索矿化水、卤水层是有效的。由于卤水的电阻值与浓度关系密切,如淡水的电阻率为几十欧姆/米,而强矿化水的电阻率则为 0.0 几 ~ 0.00 几欧姆/米,因此,可根据这种特性去寻找矿化水、卤水层。电法可分为电剖面法和电测深法,前者可以探索沿水平方向上电阻变化情况,常用于构造比较发育、褶皱剧烈的盐矿区,可以查明盐层构造的特点;后者则可以确定盐矿的平面分布、大致埋藏深度及一般构造。我国安徽定远盐矿就是电法勘探发现的,在利用电法解决当地水文地质问题时,发现了由盐矿引起的 K 型电异常。

(2)重力法:由于岩盐具有密度低的特点,在岩盐分布区域内,重力测量的结果常常表现为重力负异常(极小值)。据此,可以发现和查明地下盐矿及其大致分布范围,可以了解盐层埋藏深度和估定盐层的厚度。对埋藏有盐丘的地区,查明盐丘的构造甚为有效。我国云南江城、江西周田地区,使用重力勘探在确定盐体分布范围、表部构造性质及埋藏深度等方面,经钻探证实效果很好。

(3)地震法:常用的是反射波地震法,用于探测埋藏较浅、范围不大的盐丘构造颇具良效;

在盐类矿床赋存不深(200 米内)的情况下, 根据震速的差异, 可以区分岩盐与钾盐。国外应用地震法探测钾盐比较广泛, 效果也不错, 例如罗马尼亚境内的不少钾盐矿床就是采用地震法找到的。

(4)岩心钻探: 岩心钻探是寻找任何时代钾盐矿床最基本最可靠的方法, 从岩心样品种鉴定含钾矿物。但是必须从已知的钾盐岩系中, 根据各种标志将最有远景的层划分出来<sup>[69]</sup>。

(5)自然伽玛( $\gamma$ )能谱测井法: 钾同位素  $K_{40}$  能放出 1.46 兆电子伏特(m. e. v)单能量  $\gamma$  射线, 这是沉积岩中最丰富的放射性同位素。因此, 它亦是对天然  $\gamma$  射线测井产生效应的重要原因。已经发现, 在天然  $\gamma$  射线放射性与钾盐矿床  $K_2O$  含量之间, 存在一种明显的经验关系。所以, 可用自动记录的一条经校准的闪烁型天然  $\gamma$  放射性曲线来精确地判断矿床  $K_2O$  含量百分数。萨斯喀彻温 and 帕腊多克斯两个大型钾盐矿床就是利用许多石油钻井  $\gamma$  测井记录异常, 从而确定了钾盐矿床的工业意义。最近在埃及红海沿岸德钾盐矿床也是采用放射性测量法而被发现的。

(6)伽玛伽玛( $\gamma-\gamma$ )测井法: 该测井法是测量放射源的伽玛射线同井壁岩石作用产生的散射伽玛射线的强度。岩石的密度越大, 其散射伽玛射线的强度越小。据此, 可以判别岩石的密度特征。当盐层中含有池质而自然伽玛又很高时, 这时使用该测井法查明密度弄清异常性质是很有效的, 当密度大时可以认为放射性异常是泥质引起的, 当密度很低时, 则可以判定为钾盐。该测井法对氯化物型钾盐反映很灵敏, 对硫酸钾与氯化物混合型钾盐反映则稍次些。

(7)中子伽玛测井法: 其实质是记录入井的中子源所发射的快中子轰击并壁岩石时, 组成岩石的元素的原子在捕获中子时所释出的二次伽玛射线。此种射线强度的大小, 表示中子流速度的快慢情况。岩石介质中轻元素特别是氢的存在是使中子流减速的主要因素, 而钾盐矿物绝大多数都含结晶水, 也就是说含有氢, 因此根据这一特点, 用以区分是否含有结晶水的和含有不同结晶水的钾盐矿物, 并可确定其百分含量。

5.3 油钾兼探

现知的一些大型钾盐矿床, 多是在寻找石油和开发石油中发现的。据报道, 国外已知的钾盐矿床不少于 42 个, 至少分布在 24 个国家, 其中有 15 个国家找油采油时发现了 16 个钾盐矿床或盆地, 其钾盐储量占国外钾盐总储量的 50%以上。我国在湖北、四川、山东等地区都不同程度地开展了油钾兼探工作, 取得了一些成果<sup>[43, 69]</sup>。

5.4 水化学特征与找钾系数

水化学特征是指地下水的基本要素如矿化度、水质类型及与成矿有关的元素钾、溴、氯、镁等相对富集程度的特征。由于钾盐具有遇水易溶的特点, 因而应用卤水、盐泉水的水化学特征找钾, 是既直接又可靠的方法。现知的大多数盐矿床都是根据地表盐泉或钻井深层卤水而发现的; 一些钾盐矿床的发现, 水化学特征的研究在指示找钾上起到了相当重要的作用。要获得能反映水化学特征的各种要素, 首要的工作就是调查和寻获盐泉点和卤水点, 及时取盐泉和卤水样(淡水样不具找钾意义)进行化学分析。用以测定咸水成分及其含量, 确定其水质类型, 测定其矿化度。一般认为: 水质类型为氯化物型和硫酸镁亚型的对找钾有利, 矿化度愈高的表示含盐性也愈高。常用且有效的某些元素相对比值即找钾特征系数有: 溴氯系数 ( $m_{Br} \cdot 10^3 / m_{Cl} > 0.4$ ); 钾氯系数 ( $m_K \cdot 10^3 / m_{Cl} > 18$ ); 钾盐系数 ( $m_K \cdot 10^3 / \sum m_{盐} > 10$ ); 钠氯系数 ( $\partial m_{Na} / \partial m_{Cl} < 0.6$ ); 镁氯系数 ( $\partial m_{Mg} / \partial m_{Cl} = 0.75 \pm$ )。该异常值的界限, 目前认识还不一致, 只能供实际工作应用时参考。例如某水样中  $K \cdot 10^3 / \sum_{盐} > 10.33$ ,  $K \cdot 10^3 / Cl > 18.71$ , 就说明当时已经超过了  $NaCl$  沉积的碱度, 可能有钾盐沉积。这种水样越多, 在矿区找到钾盐层的可能性便越大, 前苏联就是根据该标志发现了上达姆和英迭尔钾盐矿床, 并且预测乌拉尔—恩巴地区钾盐的广泛分布, 后来这种推断已被钻探工作证实<sup>[43, 69]</sup>。

此外, 由于富钾热液是形成钾盐矿床的重要物质来源之一, 也有学者认为矿物岩石流体

包裹体的富钾成分、富钾热泉、富钾盐湖均是寻找钾盐矿床的重要指示<sup>[67]</sup>。

总之,根据钾盐矿床的特点,在寻找此类矿床时,地表地质工作、岩心钻探、矿物鉴定、水化学分析、物探测井等方法均应采用,只有这些方法密切配合才能迅速的有效的找到钾盐矿床。同时,据国外资料,钾盐经常和石油、天然气以及其他盐类(NaCl、石膏等)共生,因此,在探寻这些矿床时,必须十分注意探寻钾盐矿床,特别是对油井要进行放射性测井<sup>[66]</sup>。

## 6 结语与展望

世界主要固体钾盐资源多数是在上世纪五六十年代的大规模石油、盐岩勘探过程中发现的。由于中国特定的地质构造背景,至今还未找到大型海相钾盐沉积盆地<sup>[45]</sup>。国内找钾实践和研究方向历经了早期的“找钾应该海陆并举,不宜全部排斥陆相成钾的可能性等”到“高山深盆的陆相成盐成钾”,从“钾盐工作的重点应转移到海相成因的大型沉积盆地”到“进一步划分可能成钾的次级盆地并进行重点勘探研究”<sup>[3,60]</sup>,对形成缺失 $MgSO_4$ 盐的“异常”钾盐蒸发岩成因争论问题的解决<sup>[61-63]</sup>,以及“高山深盆迁移论”、“两段式成钾论”、“含水墙成钾模式”等陆相成钾理论模式的提出<sup>[53]</sup>,都表明中国的成钾理论和找钾方法一直处在不断发展和完善之中。

进入 21 世纪,作为农业大国的中国钾盐资源严重不足的问题依然存在,我们应继续重视各地探盐找钾研究和普查勘探工作。最新监测结果显示,过量开采导致察尔汗等盐湖卤水补给不足、资源匮乏,老卤、废卤的就地排放导致盐湖矿床污染,而马海盐湖矿区潜卤水水位已从-0.5 米下降到-2.5 米,氯化钾的品位也从 2.7% 下降到 1.23%。这些都表明加强对已探明盐湖钾盐资源的可持续开发是今后应当给予更多关注的重大问题。此外,青海柴达木盆地的现代卤水中锂、硼、钾盐资源综合利用和新技术开发的任务艰巨,许多方面的问题仍有待解决。

## 参考文献:

- [1] 郑大中,郑若锋.钾盐矿床的物质来源和成矿机制[J].云南地质,2006,25(2):125-142.
- [2] 刘成林,王弼力,焦鹏程,等.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,2006,29(1):1-8.
- [3] 魏东岩.试论钾盐矿床的成矿条件[J].化工矿产地质,1999,21(1):1-6.
- [4] 王孝峰.我国与世界钾资源及开发利用现状[J].磷肥与氮肥,2005,20(1):10-13.
- [5] 魏东岩.美国新墨西哥州钾盐矿床及其开发[J].化工矿产地质,2001,23(1):31-38.
- [6] 钱自强,曲懿华,刘群.钾盐矿床[M].北京:地质出版社,1994.
- [7] Adams S. S. Ore control, Carlsbad porash district, southeast New Mexico [J]. Third Symposium on Salt, 1970(1):246-257.
- [8] Dunlap J. C. Geologic studies in a New Mexico potash Mine [J]. Economic Geology, 1951(46):909-923.
- [9] Jacks A. D., Franco L. A. Deposition and giagenesis of Permian evaporates and associated carbonates and clastics on shelf areas of the Permian basin [J]. Fourth Symposium on Salt, 1974(1):67-89.
- [10] Dellwing J. F. Origin of the Salina salt of Michigait [J]. Petrology, 1955(25):83-110.
- [11] Bellwing J. F., Evans R. Depositional processes in Salina salt of Michigan Ohio and New York [J]. Petroleum Geologist Rult., 1969(54):949-956.
- [12] Matthews R. D., Egleson G. C. Origin and implications of Mid-Basin potash factices in the Salina salt of Michigan [J]. Fourth Symposium on salt, 1974(1):15-34.
- [13] Hite R. J. Potash-leaming evaporate cycles in the salt anticlines of the Paradox basin [J]. Colorado and Utah, 1961.
- [14] Hite R. J., Loluman S. W. Geologic appraisal of Paradox salt deposits for waste emplacement [J]. 1973.
- [15] Jones R. W. Origin of salt anticlilies of Paradox basin [J]. Geologists, 1959(43):1869.
- [16] 林耀庭.对解决我国钾盐资源途径的思考[J].矿产保护与利用,1996,4(2):14-17.
- [17] 刘群.西伯利亚涅帕钾盐矿床地质、发现经过及其对我国找钾工作的启示[J].地球化学,1995(1):45-54.
- [18] 连云港化工矿山设计研究院六连情报组编著.加拿大萨斯喀彻温钾盐矿床[J].化工矿物与加工,1972(4):45-56.
- [19] Bear C. A. Geological problems in Saskatchewan potash mining due to peculiar conditions during deposition of potash beds [J]. Fourth Symposium on salt, 1970(1):101-118.
- [20] Colin D. E. The Dawson Bay formation and its relationship to the uklerlying prairie Evaporate in the Saskatoon area, Saskatchewan [J]. Potash technology, 1983,41-46.

- [21] Pearson W. J. Symposium on salt Ohio Geol[ J ]. Salt deposits of Canada, 1963; 197—239.
- [22] Worley N., Fuacsy A. The Potash-bearing members of the Devonian Prance evaporate of southeastem Saskatchewan, south of the mining area[ J ]. Economic Geology, 1979(74); 377—388.
- [23] Andale J. P., Crosky K. S., Waugh D. C. Porash at Salt Spring, New Brunswick, Econ[ J ]. Geology, 1979(74); 389—396.
- [24] Potash deposits of Canada maritime provinces[ J ]. Phosphorus and Potassium, 1975(20); 21—23.
- [25] Potash resources of the maritime Provinces of Canada[ J ]. Phosphorus and Potassium, 1984(133); 26—29.
- [26] Ralston B. V., Waugh D. C. Stratigraphic Comparison on the Mississippian potash deposits in New Brunswick[ J ]. Sixth Symposium on Salt, 1985(1); 115—130.
- [27] 维敷, 李志伟, 单卫国. 呵叻盆地钾镁盐矿沉积特征及成因探讨[ J ]. 云南地质, 2003(2); 142—150.
- [28] 地矿部地矿司编著. 泰国钾盐地质考察报告[ R ]. 1979.
- [29] Hite R. J., Thawat Japakasatr. Potash deposits of Khorat Plateau[ J ]. Thailand and laos.
- [30] Hite R. J. Progress report on the potash deposits of the Khrat Plateau[ J ]. Thailand, 1982.
- [31] 胡红江, 续培信. 开发钾盐矿资源、实施“走出去”战略[ J ]. 中国井矿盐, 2005(36); 5—7.
- [32] 李文光. 开发泰国、老挝钾矿资源[ J ]. 现代化工, 2002(2); 48—49.
- [33] Zak. I., Bentor. Y. K. New Data of Dead Sea[ J ]. Geology of Saline Deposits, 1972.
- [34] Zak. I. Sediment log and Bromine Geochemistry of Marine and continental evaporate in the Dead Sea Basin[ J ]. Fourth Symposium on salt, 1974.
- [35] Zak. I., Freund R. Asymmetry and Basin Migration in the Dead Sea Rift[ J ]. Tectonophysics, 1981(80); 27—38.
- [36] Yaacov K. B. Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age[ J ]. Geochemical et Cosmaehimica Acta, 1961(25).
- [37] Halwerda J. G., Hutchinson. R. W. Potash—Bearing evaporates in the Danakil area Ehiopia[ J ]. Economic Geology, 1968(63); 124—150.
- [38] Hutchinson R. W., Engels G. G. Tectonic significance of regional geology and evaporate Lithofacies in northeastern Ethiopia[ J ]. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond 1970(267); 313—329.
- [39] Laughton. A. S. The Gulf of Aden, in relation to the Red Sea and the Afar Depression of Ethiopia in World Rift System Geol[ J ]. Survey Canada, 1966(56—14); 78—97.
- [40] Tromp S. W. The age and origin of the Red Sea Graben[ J ]. Geology Magazine, 1950(87); 385—392.
- [41] Swartz D. H., Arden D. D. Geologic history of the Red Sea Area Bull[ J ]. A. A. P. G., 1960(44—2); 1621—1637.
- [42] James G. H., Richard W. H. Potash—bearing evaporates in the Danakil area, Ehiopia[ J ]. Economic Geology, 1968, 63(2); 124—150.
- [43] 李时若. 钾盐找矿工作步骤与方法的探讨[ J ]. 化工矿物与加工, 1976(5); 25—31.
- [44] 王学买. 浅谈青海卤水钾资源的开发[ J ]. 化工矿物与加工, 2000(9); 13—15.
- [45] 郑绵平, 项仁杰, 葛振华. 我国钾、镁、锂、硼矿产资源的可持续发展[ J ]. 国土资源情报, 2004(3); 27—32.
- [46] 涂怀奎. 论中国西部钾矿资源分布特征与开发前景[ J ]. 甘肃地质学报, 2002, 11(1); 69—75.
- [47] 马万栋, 马海州, 谭红兵, 等. 塔里木盆地西部含盐系地层成盐元素的地球化学初步研究[ J ]. 盐湖研究, 2003, 11(2); 35—40.
- [48] 陈荣林. 塔里木盆地第三纪含盐系地质特征研究[ J ]. 化工矿产地质, 1996, 18(4); 276—282.
- [49] 谭红兵, 马海州, 肖应凯, 等. 塔里木盆地西部古岩盐氯同位素分布特征与找钾分析[ J ]. 中国科学, D 辑, 地球科学, 2005 35(3); 235—240.
- [50] Tan HB, Ma HZ, Wei HZ. Chlorine, sulfur and oxygen isotopic constraints on ancient evaporite deposit in the Western Tanim Basin, China[ J ]. Geochemical Journal, 2006(40); 569—577.
- [51] 顾新鲁, 赵振宏, 李青海, 等. 罗布泊地区罗北凹地潜卤水钾矿床成因与开发前景[ J ]. 水文地质工程地质, 2003(2); 32—36.
- [52] 刘成林. 罗布泊钾矿区外围盐湖钾盐资源研究与评价新进展[ J ]. 矿床地质, 2003, 286.
- [53] 王弭力, 刘成林, 焦鹏程. 罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展与开发现状[ J ]. 地质论评, 2006, 52(6); 757—764.
- [54] 张彭熹, 等. 柴达木盆地盐湖[ M ]. 北京: 科学出版社, 1987. 92—105.
- [55] 王石军. 察尔汗盐湖资源开发前景展望[ J ]. 化工矿产地质, 1999 21(3); 175—180.
- [56] 王石军. 察尔汗盐湖钾镁盐矿床可采储量特征及其开采探讨[ J ]. 化工矿物与加工, 2005(1); 30—32.
- [57] Duan ZH, Hu WX. The accumulation of potash in continental basin; The example of the Qarhan Saline Lake, Qaidam Basin, West China[ J ]. Eur. J. Mineral, 2001(13); 1223—1233.
- [58] 王学买. 浅谈青海卤水钾资源的开发[ J ]. 化工矿物与加工, 2000(9); 13—15.
- [59] 曲懿华. 兰坪—思茅盆地与泰国呵叻盆地含钾卤水同源性研究[ J ]. 化工矿产地质, 1997, 1(2); 81—84.
- [60] 宣之强. 中国盐湖钾盐 50 年回顾与展望[ J ]. 盐湖研究, 2000 8(1); 58—62.
- [61] 张彭熹, 张保珍, T. K. 洛温斯基, 等. 古代异常钾盐蒸发岩的成因——以柴达木盆地察尔汗盐湖钾盐的形成为例[ M ]. 北京: 科学出版社出版, 1993.
- [62] 张彭熹, 张保珍, Lowenstein T. K., 等. 试论古代异常钾盐蒸发岩的成因——来自柴达木盆地的佐证[ J ]. 地球化学, 1991(2); 134—143.
- [63] 张彭熹. 中国蒸发岩研究中几个值得重视的地质问题的讨论[ J ]. 沉积学报, 1992, 10(3); 78—84.

- [ 64] Zhang PX, Zhang BZ, Yang WB. Environmental Evolution of the Water Body of Qinghai Lake since the Postglacial Age[ J] . Chinese Journal of Geochemist, 1989(8): 112- 125.
- [ 65] 云南地质局第十六地质队编著. 怎样找钾盐[ M] . 北京: 地质出版社, 1978.
- [ 66] 连云港化工矿山设计研究院六连情报组编著. 化工矿物简介(续)[ J] . 化工矿物与加工, 1972(2): 36- 41.
- [ 67] 郑大中, 郑若锋. 论钾盐矿床的物质来源和找矿指示[ J] . 盐湖研究, 2006, 14(4): 9- 17.

## A Review on the Exploration of Global Potash Resources with an Emphasis on the Past and Present Status of China with a Methodological Perspective

WANG Chun-ning<sup>1, 3</sup>, YU Jun-qing<sup>1, 2</sup>, CHEN Liang<sup>1, 3</sup>, ZHANG Li-sha<sup>1, 2</sup>

- (1. *Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;*
- 2. State of Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi' an, 710075, China;*
- 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China )*

**Abstract:** Major potash-ore resources of the world were discovered primary in the exploration of other resources such as petroleum, ancient evaporate deposits and underground brines. They were predominantly reserved in oceanic sedimentary basins of the globe. In China, however, potash deposits extensively developed in ancient oceanic basins are essentially deficient, as suggested by the survey of potash resources in the past several decades. There has been no substantial progress either made to explore potash ores from China' s large continental basins of Cenozoic Era. The sylvite reserves of China, therefore, largely relies on potash-bearing brines reserved in about 11 salt lakes and/or playa lakes from Qaidam Basin, Qinghai Province, and Lop Nor, Xinjiang, which accounts for > 90 % of the known total reserves. The ancient potash—ore resources of China by far accounts only for 2. 6 % of the known total and the ore grade usually is low. The production of the first batch of 935—ton potassium fertilizer was started in 1958 from the Qarhan playa, Qaidam Basin, which filled blank on manufacturing potassium fertilizer in China. The out put of the manufacturing production there increased dramatically and in 2006 reached 1. 5 million—ton KCl per year. The exploration of the potassium-bearing brine in the Lop Nor Playa Lakes has been carried out since 1995 and it is anticipated that an annual manufacturing production of 1. 2 million—ton K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> would be accompanied by the end of 2008. Emphasis regarding future investigations of ancient potash resources should be placed on distinguishing sub—basins favorable for potash deposition from large evaporite basins in China. Based on the results and experience derived from potash search in the world, methodological improvement for the exploration is considered to be important. Further exploration in this way may help to achieve the goal targeted several decades ago.

**Key words:** World potash resources; Sylvite resources of China; Potash exploration; Potash exploration methods