

中国可溶性钾盐资源地质特征与潜力评价*

赵元艺¹, 焦鹏程¹, 李波涛², 钱作华^{**}

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学, 北京 100083)

摘要 中国可溶性钾盐资源严重不足, 属于大宗紧缺矿产之一。文章在系统地收集、整理、分析中国 16 个省(区)110 个预测区的钾盐资源调查研究成果的基础上, 对中国钾盐地质特征进行了系统研究, 首次对中国可溶性钾盐的资源潜力进行了预测, 并指出主要的有潜力地区, 为下一步开展钾盐勘查与科学研究提供参考依据。中国可溶性钾盐品位低、质量差, 但伴生的有益元素较多, 含盐系地层分布多, 主要地质时代均有石盐或卤水的聚集, 与此相对应, 在部分层位有钾盐层或含钾卤水的出现。中国已探明钾盐资源主要为陆相钾盐, 而且以第四纪盐湖卤水钾盐占多数, 并已进行大规模开发, 海相钾盐没有突破, 但具有较大的潜力。中国可溶性钾盐资源潜力为 128.52 亿吨, 资源潜力上亿吨的省(自治区)有四川(85.45 亿吨)、陕西(34 亿吨)、湖北(3.43 亿吨)、云南(3.17 亿吨)、新疆(1.07 亿吨)。总体看来, 中国钾盐研究程度不高, 资源潜力大多在 334₃ 的水平。

关键词 地质学; 可溶性钾盐; 资源潜力; 预测区; 中国

中图分类号: P629.21⁺1

文献标志码: A

Geological characteristics and resource potential of soluble potash in China

ZHAO YuanYi¹, JIAO PengCheng¹, LI BoTao² and QIAN ZuoHua¹

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

2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

As a mineral product in great demand, the soluble potash resources in China are seriously insufficient. In this paper, the research results of the potash resources in 16 provinces or autonomous regions and 110 prognostic areas in China have been collected, sorted, analyzed and compiled. On such a basis, some suggestions are put forward concerning the potential of the potash resources for further exploration projects. In spite of the fact that the soluble potash in China is mostly in low grade and poor quality, there still exist lots of favorable factors, such as relatively abundant associated beneficial elements, extensive salt strata and the accumulation of halite or brine water in main geological periods. Accordingly, potash beds and K-bearing brine water have been formed in certain stratigraphic horizons. Potash resources in China have been proved to be mainly in the forms of terrestrial potash salt, potash salt lakes and, especially, Quaternary salt lake brine. In addition, the work on marine potash has not attained a breakthrough, so that great potential remain existent in this aspect. The proved soluble potash resources in China have reached 12.852 billion tons (bt), and are mainly distributed in Sichuan (8.545 bt), Shaanxi (3.4 bt), Yunnan (0.317 bt), Hubei (0.343 bt) and Xinjiang (0.107 bt). In general, the geo-

* 本文得到金土工程课题“我国钾盐资源潜力数据库建设”(JTXM-DW-KZ4-04)和国家高技术研究发展计划(863计划)课题“青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发的关键技术”(2006AA06Z133)的联合资助

第一作者简介 赵元艺, 1966年生, 研究员, 主要从事矿床学与地球化学研究。Email: yuanyizhao2@sina.com

** 钱作华高工为中国地质科学院矿产资源研究所聘用人员。

收稿日期 2010-02-21; 改回日期 2010-04-15。李德先编辑。

logical research extent of potash resources is by far lower than that of petroleum, coal and iron deposits, with the main resource potential only at the level of 334₃.

Key words: geology, soluble potash, resource potential, prognostic area, China

钾盐是含钾矿物的总称,按在水中的溶解性分为可溶性钾盐矿物和不可溶性钾盐矿物两种。矿产资源潜力是指一定区域内潜在的矿产资源,采用相关矿产资源预测评价方法估算而未经查证的那部分矿产资源,在矿产资源/储量分类标准中指预测的矿产资源(即334资源量),有无经济意义尚不确定。它是进一步开展勘查工作以获得较可靠矿产资源量的基础。

中国钾盐资源短缺,是7种(石油天然气、铜、铝、铁、锰、铬、钾盐)大宗紧缺矿产之一,其中可溶性钾盐资源严重不足。2002年中国的钾盐产量仅为147万吨,2005年为232.65万吨^①,而中国钾肥消费量已达到1000万吨,对外依存度75%以上。以2000年中国需求的钾盐654万吨为基数,预测2010年将需求1214万吨,2020年将需求1717万吨(邵厥年等,2006)。按照230至250万吨的KCl与120万吨K₂SO₄的钾盐产量(合计约为370万吨KCl)计算,2010年,中国的钾盐产能仅为需求(1214万吨)的30%左右,对外依存度约为70%;而到2020年,对外依存度将达到78%。受多方面因素的影响,特别是资源条件的制约,中国钾盐的紧缺状况在较长时期内难以改观。

文章全面系统地整理和分析了中国16个省(区)110个预测区(表1、图1)的钾盐资源预测评价成果资料,首次对中国钾盐资源的潜力进行预测,并指出了主要的有潜力地区,为中国下一步开展钾盐勘查与科学研究工作提供参考依据。

1 中国钾盐矿床地质特征

1.1 资源特点

中国可溶性钾盐资源相当贫乏,且分布不均,目前已探明的钾盐保有储量(K₂O)仅约5亿吨,若按可溶性钾资源量排名,中国排在世界第15名以后。总体看来,中国已探明的可溶性钾盐资源既有优势也有劣势。

劣势主要表现在:①以液体矿为主。国外钾盐资源主要是前第四纪固层状矿床,而中国的钾盐资源主要来自晶间卤水液体矿,例如察尔汗与罗布泊的钾盐矿床。②矿石品位低。中国已探明的现代盐湖层状固层矿层 $w(KCl)$ 为2%~6%,古代钾盐层状矿床的 $w(KCl)$ 为8.81%左右。而国外古代固层状矿床的 $w(KCl)$ 为15%以上。③质量差、可选性差。中国古代钾盐矿石中固体难溶物和不溶物比较多,盐湖卤水须经历长时间的太阳池等方法的处理,例如察尔汗盐湖需用太阳池方法生产出光卤石后再反浮选,增加了盐田成本,可选性差。

优势在于,中国盐湖卤水与地下卤水中同钾共生的元素种类丰富,例如柴达木盆地有关盐湖卤水中富含镁、钠、锂等元素,而西藏扎布耶盐湖卤水中富含硼、锂等元素。这种多种资源的共生也为进行多组份的开发提供了便利条件。

1.2 形成时代

钾盐据其形成时代可分为古代钾盐与第四纪(包括现代)钾盐两种。从震旦纪至今,中国在各个地质时代均有石盐或卤水的聚集,只是不同时代分布区域不同而已。与此相对应,在部分层位有钾盐层或含钾卤水的出现。

震旦纪时期,中国北方和南方均发现有厚层石膏或岩盐,反映了当时干旱气候的特点,如甘肃肃

表1 中国钾盐预测区数分布统计表

Table 1 Sketch map showing the distribution of potash prognostic areas in China

序号	省份	预测区数	序号	省份	预测区数
1	新疆	17	9	内蒙古	4
2	青海	13	10	湖北	2
3	西藏	51	11	甘肃	5
4	云南	6	12	陕西	1
5	四川	3	13	安徽	1
6	江苏	2	14	湖南	1
7	江西	1	15	山西	1
8	山东	1	16	河南	1

① 吴初国. 2006. 国土资源部编《2005·中国矿产资源年报》. 267-272.



图 1 中国钾盐预测区分布示意图

Fig.1 Sketch map showing the distribution of potash prognostic areas in China

北县的厚层石膏、湖北宜都和枝城的石膏与钙芒硝、四川甘洛县的石膏层,四川长宁震旦系灯影组下段溶滤卤水的钾含量达到 $2\ 300\sim 3\ 300\text{ mg/L}$ (郑绵平等 2006)。

寒武纪时期,在塔里木盆地中、北部和四川南部均发现下寒武统厚大的膏盐层,塔里木盆地寒武系膏盐层和川南下寒武统清虚洞组厚大的石盐层,临峰场盐层厚超过 600 m ,钾盐系数 8.7 ,溴氯系数 1.0 接近或达到钾盐异常指标(郑绵平等 2006)。

奥陶纪主要在鄂尔多斯形成稳定的局部盐化陆表海盆。在陕北形成累计厚达 $200\sim 300\text{ m}$ 的石盐层及分布面积约 $5\times 10^4\text{ km}^2$ 的石盐盆地。马家沟组 5~6 亚段石盐层中发现钾石盐、光卤石等钾盐薄层(刘群等,1997),其中上马家沟组第五段上部的岩芯中测得 $\omega(\text{K}^+)$ 为 $0.054\%\sim 0.16\%$ (关绍曾等,1996)。

志留纪—泥盆纪仅见石膏层。在早石炭世自塔里木盆地西缘至河西走廊,以及华南地区为浅海环境,并有干旱沉积洲,如赣南-湘西有石膏层发育。在塔里木东部已有多口石油钻井岩芯见到石炭纪

“膏盐层”累计厚度 $100\sim 220\text{ m}$,分布面积约 $10\times 10^4\text{ km}^2$ (郑绵平等 2006),如满加尔凹陷巴楚组中段可见石盐层(刘群等,1997)。

二叠纪在安徽、陕西等地发现有上二叠统和下二叠统石膏层,并在新疆和田下二叠统发现石盐薄层。三叠纪上扬子为广大的蒸发台地环境,发育有一大套膏盐沉积,并赋有大量杂卤石矿层、薄层无水钾镁矾和大量富钾工业卤水层,在川西中三叠统雷坡组发现含 KCl 非常高的富钾卤水(关绍曾等,1996)。侏罗纪滇中发现有大量陆相膏盐沉积,在鄂西也发现盐湖。在滇西和昌都见海相侏罗系石膏和盐泉。晚侏罗世在准噶尔、柴达木、河西走廊等地也见及石膏层(郑绵平等 2006)。

第三纪时期,在滇西南勐野并有钾盐沉积,在塔里木西部新生界有海相和海陆过渡相蒸发岩沉积,库车盆地第三系含盐系中发现多种钾矿物(刘成林等 2008);江汉盆地沉积有钙芒硝盐层;中国第四纪盐湖带大致与现代干旱-半干旱气候带相一致。现代盐湖分布于新疆、青藏、陕甘宁、内蒙古、山西等地。包括大量的普通盐湖、钾镁盐湖、富产锂硼钾的

特种盐湖和富含硝酸盐的硝酸盐湖。普通盐湖分布广泛,特种盐湖主要分布在青藏高原,钾镁盐湖分布在柴达木和罗布泊,硝酸盐盐湖分布在新疆塔里木北部和天山凹陷等地。第四纪盐湖钾盐矿床除少数盐湖有一定数量的固体钾盐层沉积(如在察尔汗干盐湖局部富集有光卤石、钾石盐、杂卤石等),绝大多数是液体(卤水)矿床,而且具有多种盐类矿产共生的特点。

1.3 成矿控制因素

钾盐矿产是卤水沉积演化到最后阶段的产物,同时也是有关特定地质作用的产物。由于钾盐是极易溶的矿产,因此钾盐形成之后在地表难于找到它的直接标志,使找矿难度加大,世界上大部分钾盐都是在找油过程中发现的,因此,钾盐的形成条件与石油的形成有着极为密切的关系。

(1) 时空分布

迄今,世界上已发现的30余个成钾盆地,从地质时代看,除奥陶纪钾盐仅在中国出现外,自寒武纪开始,其他任何国家均有钾盐分布,但在各个地质时代的分布是明显不同的。世界上超大型的钾矿出现时代是寒武纪、泥盆纪、二叠纪和第三纪(魏东岩,1999)。从钾盐分布的构造位置上看,大型、超大型的钾盐矿床与地壳运动和板块构造活动有关,地壳运动和板块构造活动可营造大型拗陷、断陷盆地、地堑和裂谷,为钾盐成矿场所和物质来源提供条件。从钾盐分布的有关地域来看,超大型钾盐矿床集中分布于欧洲与北美洲。

(2) 大地构造条件

统计世界大型、超大型钾盐矿床所处的大地构造位置可知,中生代之前有两种构造位置,一种是地台内部与边缘拗陷处的巨型成盐盆地,地壳相对稳定,是一种重要的成钾大地构造背景;另一种是巨大的地堑或裂谷构造。中生代及以后的钾盐矿床,多产于与岩石圈张性断裂有关的地区,板块边界的张裂区、深大断裂所围限的构造盆地、或是深大断裂所形成的地堑和裂谷(刘成林等,2006)。

(3) 气候地理条件

钾盐矿床与其他盐类矿床一样,也需要干旱条件,由于钾盐是卤水演化到中晚期阶段的产物,故需要持续的干旱气候条件。干旱气候带的展布受纬度

控制,陕北奥陶纪产出的厚层石盐(含薄层钾盐),其古地磁研究表明,该地区当时位于北纬 $20\sim 25^\circ$ 之间的亚热带干旱气候带(魏东岩,1999)。另外,干旱气候也可由地形地貌的控制而形成,例如,柴达木盆地第四纪的干旱气候,地质地貌环境为高山阻挡潮湿空气所形成(袁见齐等,1983)。

(4) 物质来源

钾盐成盐物质来源归根结底就是卤水的来源,综合国内外盐类矿床的研究进展,在深入分析各种地质-地球化学标志的基础上,可将中国钾盐成盐物质来源分为如下6类(刘群等,1987):

- ① 以海水为主要来源:以四川三叠纪盆地为代表。
- ② 以海水为主或前期以海水为主受陆源水或深部水影响:以云南思茅盆地和新疆库车盆地为代表。
- ③ 以陆源水为主,但受海泛影响:以山东大汶口、广东三水、广东龙归等盆地为代表。
- ④ 以深部水补给为主,陆源水补给为辅:以西藏扎布耶盐湖与柴达木盆地大柴旦盐湖为代表。
- ⑤ 以陆源水补给为主,受深部水影响和改造:以江汉盆地江陵凹陷为代表。
- ⑥ 陆源补给为主:柴达木盆地的大部分盐湖,西北地区大部分盐湖,东部大部分盆地等。

1.4 主要成因模式

钾盐矿床按其成因可分为陆相与海相两类,中国已经发现的钾盐矿床主要为陆相第四纪钾盐矿床,主要分布于青海的柴达木盆地、新疆罗布泊的干盐湖和西藏扎布耶锂硼钾盐湖等。此外,湖北江汉盆地第三系陆相盐湖也有一定的钾盐资源量^①。云南兰坪-思茅盆地古近系可能属于海陆交互沉积,也产有一定规模钾盐(曲懿华等,1998)。古代海相沉积,目前仅在四川盆地三叠系海相碳酸盐岩型蒸发岩系中探明杂卤石矿床(黄宣镇,2003;林耀庭等,2004)。国际上的大型钾盐矿床主要为海相,综合研究中国海相沉积条件,其成钾显示明显,但尚待突破。

1.4.1 中国几个重要钾盐矿床的形成条件与机理

(1) 察尔汗钾盐矿床

察尔汗钾盐盆地成钾模式可总结为:①在青藏

① 湖北省国土资源厅,2004.湖北省矿产储量表.

高原整体强烈上升的背景下,从中新世以来,柴达木盆地一直处于相对沉降状态,形成规模巨大的高山深盆成盐环境(袁见齐等,1983),汇水面积达 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上,在闭流盆地中发育蒸发成盐作用。②第四纪初期形成的柴达木古湖面积巨大,在新构造运动的影响下,湖盆的最大沉降中心经多次变迁,最初在西部芒崖一带,然后向东北方向迁移,晚更新世前向东南,即现代察尔汗盐湖区迁移。由于沉降中心的变迁,水体及其中的钾等成分也随之迁移,由于察尔汗盐湖是盆地第四纪以来的沉降中心,湖盆面积大,汇聚与积累的盐类物质总量也最大。③成盐期的气候以干旱为大背景,但也有短暂的潮湿气候交替,有利于钾镁等易溶组分的迁移和在盐湖晚期阶段富集。④在高山深盆的地形条件下,高山区物理风化作用强,化学风化作用弱,造成沉积去粘土/碎屑比小,发源于高山的河流坡降度大,流程短、流速快,被粘土和植物吸附的钾量较少,钾主要汇集于水流的下游盆地中。⑤察尔汗盐湖是浅水沉积,干旱但卤水湖长期存在。在气候变化的影响下,盐类的沉积和溶解交替发生,选择性溶解作用促使钾、镁等易溶组分不断与早期的盐类沉积分离,从而在晚期卤水中大量富集,为大规模的钾盐沉积提供了条件(袁见齐等,1981;1994)。

(2) 罗布泊钾盐矿床

罗布泊钾盐矿属于卤水钾盐矿,罗布泊盐湖出现巨量钙芒硝沉积,而富钾卤水主要赋存于钙芒硝的孔隙中(刘成林等,2002),因而与传统意义上与石盐紧密共生的富钾盐湖相比,它也是一个特殊的盐湖,罗布泊钾盐矿床也是一种新类型钾盐矿床(王弭力等,2006)。罗布泊罗北凹地的发展及其钾盐的富集经历了3个阶段(刘成林等,1999a):首先,早中更新世时期,为统一的大湖区;第2阶段,中更新世中晚期,出现南北分异;第3阶段,晚更新世时期,罗布泊北部抬升及罗北凹地形成。可以看出,罗布泊含钾卤水的形成过程是:新构造运动使罗布泊北部抬升,导致罗北凹地从罗布泊大湖中分隔出来,形成较封闭的次级盆地。由于气候周期性波动,罗布泊大湖水经历多次涨落,罗北凹地受到间歇性补给,强烈蒸发作用使湖水浓缩并保存下来,此作用反复进行,使得罗北凹地卤水的钾等物质富集成矿(王弭力等,2001)。研究结果表明,钾等物质主要来源于塔里木

盆地西部第三系含盐系,其次为周边山区火山期后温泉水及盆地地层水等(刘成林等,1999b)。关于罗布泊钾盐矿床的成因研究,有“高山深盆迁移”和“二段式”成钾模式(Wang et al., 2005),以及断裂成储富钾卤水的“含水墙”模式(刘成林等,2009)等。由此可见,罗布泊盐湖钾盐成因具有独特性和复杂性。

(3) 扎布耶钾盐矿床

西藏扎布耶盐湖是一个特殊的富钾、锂、硼盐湖,其天然沉积碳酸锂(Li_2CO_3)属目前发现的世界独有现象,并且其卤水中铯的含量也是目前所有盐湖中最高的,因此,对其成矿模式进行研究具有重要意义。扎布耶盐湖是青藏高原碰撞带地球动力学效应的最年轻成矿作用的产物,其形成是内外条件耦合的结果。晚更新世时期(40~28 Ka B.P.)的夏季风强盛期(末次冰期大间冰期),泛湖汇聚深部成矿热水,30~20 Ka B.P.和15~5 Ka B.P.是扎布耶2次热水强烈活动期,大量的热水携带有锂、硼、钾、铯等物质,加入到湖水中。28 Ka B.P.主玉木冰期以来,气候干冷-干暖交替,并受新构造(水动力)驱动,形成多级盐湖,大量易溶盐钾、锂、硼、铯向最低阶湖浓缩迁移。扎布耶盐湖的这种成矿模式与南美的高山深盆成钾模式有所不同(郑绵平等,2001)。

对中国中生代成盐盆地的沉积特征与成盐环境的综合研究,可将其成盐模式概括为两种,即地堑-裂谷-山间盆地(串珠式)成矿模式和大陆边缘活动带-活化地台(卫星式)成盐模式(刘群等,1987)。其中串珠式的适用实例为察尔汗等柴达木盆地钾盐湖、兰坪-思茅盆地和汶蒙盆地,卫星式的适用实例为江汉等中国东部地区盆地。尽管不同的盐湖有着不完全相同的成岩方式与盆地演化过程,但它们总的演化机理有一定的相似性。

1.4.2 海相钾盐矿床形成基本规律

试验证实,每升海水蒸干所沉淀的盐类为(麦昌荣,1986^①): $\text{CaCO}_3 + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 0.06 cm^3 ; CaSO_4 0.59 cm^3 ; NaCl 12.87 cm^3 ; MgSO_4 0.94 cm^3 ; KCl 0.48 cm^3 ; MgCl_2 1.48 cm^3 。

盐类沉淀的顺序:正常海水的比重由1.03经蒸发浓缩密度达1.1时,开始沉淀 CaSO_4 ,密度达1.2时沉淀 $\text{CaSO}_4 + \text{NaCl}$;密度达1.26时,大量沉淀 NaCl ;密度达1.3时 NaCl 沉淀量减少;当剩余水体含盐度大于35%时, KCl 才开始沉淀。现今全世界

① 麦昌荣. 1986. 对新疆塔里木盆地第三系找钾盐矿床可行性论证书. 地科院五六二队.

利用海水生产石盐的盐田,就是利用海水受日晒蒸发作用来产生食盐的。根据海水生产蒸干后沉淀钾盐量与石盐的比例约为1:30(即0.03)^①,用这个比例可以预测古蒸发盆地可能形成钾盐的资源量,但是由于钾盐形成之后相对石盐流失的较多,因此用这个比例进行钾盐资源量的预测时,往往降低这个比例,选择0.01较为适宜。

蒸发岩盐类矿床的成矿模式,国际上概括为“牛眼式”和“泪滴式”两种(Schmalz,1970)。与广海隔绝的海湾和海水盆地,其中积存的海水,在长期干旱少雨的条件下,蒸发量大于补给量(包括大气降雨量及地表水地下水补给量),便被逐渐蒸发减少,水位逐渐下降,水中含盐度逐渐增高,所含盐类便按各自的沉积深度,分别按顺序沉积下来,形成从外向里,由碳酸盐(石灰岩、白云岩)硫酸盐(石膏、芒硝)石盐、钾盐的环带状沉积序列,钾盐矿床分布于最里圈。不同盐类沉积构成的图形,与打靶的靶环相似,故称为“牛眼式”。因为至钾盐沉积期,盆内积水仅为原水体的0.5~0.1%,只能残存于盆内地形的最低处——沉积中心。若盆地很大,也可以出现几个沉积中心均有钾盐沉积。一般以最深的—个,钾盐矿层最厚,规模最大。

“泪滴式”:由于泻湖濒临广海,一般有水道与广海沟通,海水受潮汐作用沿水道进出,对泻湖的水位起调节作用,不会有盐类沉积;当泻湖与广海沟通的水道,受广海潮汐作用的长期改造,水道被逐渐淤浅甚至堵塞,强烈的蒸发作用使泻湖水下降,其中溶解度较低的碳酸盐,在泻湖湾口浅滩沉积下来,既起到拦阻广海海水向泻湖倒灌,也促进泻湖蒸发水位下降,泻湖水中盐分增高,因而才有可能出现从水道区至泻湖区里,由碳酸盐—石膏—石盐的横向沉积序列。这类的沉积模式称之为“泪滴式”。泻湖盐类沉积期间,泻湖湾口砂坝不可能太高,只能挡住正常的潮汐海水不向泻湖倒灌,但遇到风暴及特高潮期,以及强烈的海底火山喷发、海底地震等引起的海啸,广海海水则越过泻湖湾口低砂坝进入湖内,使未蒸干的水体淡化,停止了盐类沉积。泻湖的积水在蒸发—补给—蒸发的反复过程中,由于新进海水再次补充了盐分,泻湖中含盐浓度逐渐增高,只要达到盐类各自的沉积盐度就会产生盐类的沉积作用。若泻

湖环境没有大的改变,虽经长期蒸发浓缩沉积—海水间歇补给—再蒸发浓缩沉积,也不易达到钾盐沉积期。当湖区逐渐沉积充填淤浅,最终剩余含盐度高的水体,被海洋的潮汐作用及岸坡淡水水流带回广海而没有钾盐沉积,泻湖即被填满消亡。但是在泻湖沉积期间,当水道被完全堵塞与广海隔绝时,便转变为“牛眼式”沉积。

在地球演化的主要地质历史时期,中国均发育有海相地层,按照上述两种海相钾盐矿床形成基本规律,可以指导中国海相找钾。

2 中国钾盐资源潜力评价

2.1 评价方法

在总结已有资料的基础上,确定钾盐的预测区。然后对每个预测区,采用体积法和钾盐/钠盐系数法进行预测。对部分海相成钾的潜力区,按照KCl/NaCl质量比为0.01的经验数据,依据石盐的质量进行预测,这种方法简称为石盐质量法,该方法是类比法的一种。

体积法预测的数学模型为: $Q=S \times H \times \rho \times C$

式中, Q 为预测的钾盐(以KCl计)资源量(亿吨或千万吨), S 为潜力区的面积(m^2), H 为含钾盐层的厚度(m), ρ 为钾盐层的密度(t/m^3),各预测区的盐层密度是有差异的,为统一起见,选择青海别勒滩矿石密度 $1.7 t/m^3$ ^②为钾盐层中KCl的含量(%)。若钾盐资源存在于晶间卤水中,预测时还需在预测模型中乘以孔隙度。

若钾盐资源呈湖表面卤水的液体形式存在,则按 $Q=S \times H \times \rho \times C/3$ 式计算。

式中, Q 为预测的液体钾盐(以KCl计)资源量(亿吨或千万吨), S 为潜力区卤水的面积(m^2), H 为卤水的深度(m), ρ 为卤水的密度(t/m^3), C 为卤水中钾盐KCl的含量(%),当由K含量换算为KCl时换算系数为1.9,1/3为卤水量的体积系数,这是因为当水深参数较少时,所计算的湖盆地多为圆锥形,其体积应为圆柱体的1/3。当用水深平均数时,不必考虑该系数。

在上述评价的基础上,从相关省/自治区的角度进行汇总,计算出主要省/自治区的钾盐资源潜力。

① 麦昌荣. 1986. 对新疆塔里木盆地地下第三系找钾盐矿床可行性论证书. 地科院五六二队.

② 焦鹏程. 2009. 青海别勒滩低品位固体钾矿液化开发的关键技术. 国家863课题结题报告. 中国地质科学院矿产资源研究所.

表 2 中国有关省/自治区钾盐资源量统计表

Table 2 Statistics of potash resource quantities in some provinces or autonomous regions of China

省份/自治区	预测资源潜力(万吨)
青海	289.83
新疆	10 726.97
四川	854 483.08
湖北	34 310
河南	2 095
云南	31 710.71
江西	340
江苏	2 977
安徽	1 242
西藏	2 510.94
湖南	2 944
内蒙古	249.37
陕西	340 000
山东	900
山西	195.6
甘肃	183.92
合计	128 515 8.42

2.2 评价结果

经预测,中国各省钾盐资源潜力为 128.52 亿吨(表 2)。资源潜力上亿吨的有四川(85.45 亿吨)、陕西(34 亿吨)、湖北(3.43 亿吨)、云南(3.17 亿吨)、新疆(1.07 亿吨)。尽管西藏有 51 个预测区,但其资源潜力并不大。总体上,中国钾盐资源潜力主要集中于四川、陕西、云南、新疆等西部地区,这些地区钾盐资源主要为海相成因,而中部与东部地区所占比例较少。

3 结 论

(1) 中国钾盐已探明资源量主要为陆相钾盐,而且以第四纪盐湖卤水钾盐占多数,并已进行开发,而海相钾盐没有突破,但具有较大的潜力,应该加强科研力度,为找矿提供更多科学依据。

(2) 中国可溶性钾盐品位低、质量差,但具伴生元素多且盐湖钾盐埋藏浅等有利条件。在各个地质时代均有石盐或卤水的聚集,但是不同时代它们的位置不同。与此相对应,在部分层位有钾盐层或含钾卤水的出现。

(3) 全国钾盐资源潜力为 128.52 亿吨,资源潜力上亿吨的省(自治区)有四川(85.45 亿吨)、陕西(34 亿吨)、云南(3.17 亿吨)、湖北(3.43 亿吨)、新疆(1.07 亿吨)。总体看来,钾盐预测的资源量大多仅在 334₃ 级的水平。

志 谢 本项工作得到初娜硕士、金土工程项目办公室阎卫东先生、金土工程项目负责人谭永杰总工程师、杨东来教授级高工及李景朝教授的指导,得到中国地质调查局发展研究中心王永志博士的帮助,得到初娜硕士、刘成林研究员、陈永志副研究员的积极配合,得到袁遵高工的大力协助,在资料收集过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所李厚明研究员与王高尚研究员的支持。论文成文后得到刘成林研究员的认真审阅并提宝贵意见。在此一并致谢。

References

- Guan S Z, Jiang Z L, Wei D Y, Yang L P, Xuan Z Q, Chen Y C, Cui T X, Liu Z M, Deng X L and Yi X M. 1996. Chinese saline deposits in relation to plate tectonics [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 18(2): 73-81 (in Chinese with English abstract).
- Huang X Z. 2003. Hydrogeological conditions in the Nongle polyhalite deposit, Quxian County [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 23(1): 14-17 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L and Wang M L. 1999a. Evolution of Quaternary depositional environments and forming of potash deposits in Lop lake, Xingjiang, China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*. 20 (Supp): 264-270 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L and Jiao P C. 1999b. 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, Chen Y Z and Li S D. 2002. Formation of pores and brine reserving mechanism of the Aquifers in Quaternary potash deposits in Lop Nur Lake, Xinjiang, China [J]. *Geological Review* 48(4): 437-444 (in Chinese with English abstract).
- Lin Y T and He J Q. 2004. The characters and genies meanings of shallow polyhalite potash deposit in Huayingshan, Sichuan [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 26(3): 145-149 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C and Chen Y Z. 2006. The exploration experiences of potash deposits in the world and probing of countermeasures of China's future potash-deposits investigation [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 28(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Jiao P C, Chen Y Z, et al. 2008. Discovery and significance of potassium mineral association in tertiary salt stratum in Kuche Basin [A]. In Chen Y C, Xue C J and Zhan C Q, eds. *Main attacking deep, pushing forward westward and keeping in view the world; The memoir of the ninth session national deposite conference* [C]. Beijing: Geol. Pub. House. 374-375 (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 Geoscientica Sinica*. 30(6): 1000-1006 (in Chinese with English abstract).

- 796-803 (in Chinese with English abstract).
- Liu Q, Chen Y H, Li Y C, et al. 1987. Terrigenous clast -chemical rock type saline deposit of Mesozoic and Cenozoic in China [M]. Beijing: Beijing Science & Technology press. 1-137 (in Chinese).
- Liu Q, Du Z Y, Chen Y H, et al. 1997. Prospecting perspective of potash between Ordovician in northern Shaanxi and Carboniferous in Tarim Basin [M]. Beijing: Atomic Energy Press. 1-229 (in Chinese).
- Qu Y H, Yuan P Q, Shuai K Y, et al. 1998. Metallogenic regularity and prognosis of potash in Lanping-Simao basin [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-114 (in Chinese).
- Schmalz R F. 1970. Environment of marine evaporate deposition [J]. Miner. Ind., 35(8):1-7.
- Shao J N, et al. 2006. The availability research of mineal resource in China [A]. In: Chinese academy of engineering (2006) major consulting projects, "China's sustainable development strategy of mineral resources, Vot. of availability [M]. Beijing: Science Press. 90.
- Wang M L, Liu C L, Jiao P C, et al. 2001. Potash in Lop Nur salt lake, Xinjiang, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-114 (in Chinese).
- 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.
- Wang M L, Liu C L and Jiao P C. 2006. Investigation and scientific research progress and exploitation present situation of Lop Nur Salty Lake potash deposits, Xinjiang, China [J]. Geological Review, 52(6):757-764 (in Chinese with English abstract).
- Wei D Y. 1999. On conditions for origination of potash deposits [J]. Geology of Chemical Minerals, 21(1):1-6 (in Chinese with English abstract).
- Yuan J Q and Huo C Y. 1981. Genesis of the sylvinitic deposits in the Charhan saline lake, Qinghai Province [J]. Earth Science, (1):207-213 (in Chinese with English abstract).
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Yuan J Q, Cai K Q, et al. 1994. Salt deposit in China [M]. 162-228 (in Chinese).
- Zheng M P. 2001. Study advances in saline lake resources on the Qinghai-Tibet plateau [J]. Acta Geoscientia Sinica, 22(2):97-102 (in Chinese with English abstract).
- Zheng M P, Qi W and Zhang Y S. 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).
- 小林,尹学敏. 1996. 中国板块构造与盐类矿产 [J]. 化工矿产地质, 18(2):73-81.
- 黄宣镇. 2003. 渠县农乐杂卤石矿床的水文地质条件 [J]. 四川地质学报, 23(1):14-17.
- 林耀庭, 何金权. 2004. 四川华蓥山浅层杂卤石钾矿地质特征及其成因意义 [J]. 化工矿产地质, 26(3):145-149.
- 刘成林, 王弼力. 1999a. 罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用 [J]. 地球学报, 21(Supp.):264-270.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程. 1999b. 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, 李树德. 2002. 罗布泊第四纪卤水钾矿储卤层孔隙成因与储集机制研究 [J]. 地质论评, 48(4):437-444.
- 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):1-7.
- 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 王弼力, 宣之强. 2008. 库车盆地第三系岩盐地层中钾盐矿物组合发现及其意义 [A]. 见:陈毓川, 薛春纪, 张长青. 主攻深部 挺进西部 放眼世界——第九届全国矿床会议论文集 [C]. 北京:地质出版社. 374-375.
- 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.
- 刘群, 陈郁华, 李银彩, 等. 1987. 中国中生代陆源碎屑. 化学岩型盐类沉积 [M]. 北京:北京科学技术出版社. 1-137.
- 刘群, 杜之岳, 陈郁华, 等. 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. 1-229.
- 曲懿华, 袁品泉, 帅开业, 等. 1998. 兰坪-思茅盆地钾盐成矿规律及预测 [M]. 北京:地质出版社. 1-114.
- 邵厥年, 等. 2006. 我国矿产资源可供性研究 [A]. 中国工程院 (2006) 重大咨询项目《中国可持续发展矿产资源战略研究》可供性分析卷 [M]. 北京:科学出版社. 90.
- 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. 1-229.
- 王弼力, 刘成林, 焦鹏程. 2006. 罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展与现状 [J]. 地质论评, 52(6):757-764.
- 魏东岩. 1999. 试论钾盐矿床的成矿条件 [J]. 化工矿产地质, 21(1):1-6.
- 袁见齐, 霍承禹. 1981. 青海察尔汗盐湖钾盐矿床成因的若干问题 [J]. 地球科学, (1):207-213.
- 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.
- 袁见齐, 蔡克勤, 等. 1994. 中国盐类矿床 [M]. 北京:地质出版社. 162-228.
- 郑绵平. 2001. 青藏高原盐湖资源研究的新进展 [J]. 地球学报, 22(2):97-102.
- 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.

附中文参考文献

关绍曾, 江宗龙, 魏东岩, 杨流平, 宣之强, 陈延成, 崔天秀, 刘振敏, 邓