

文章编号: D258-7106(2009)04-0503-07

库车盆地古近纪岩盐层中钾盐资源量预测研究*

唐敏^{1,3}, 刘成林², 焦鹏程²

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3 河南省有色金属地质矿产局第一地质大队, 河南 郑州 450016)

摘要 新疆库车盆地的古盐湖沉积了巨厚的岩盐层, 在构造环境上具备形成钾矿的条件。近年来, 在库车盆地古近纪岩盐中发现了众多的钾盐矿物及其组合。文章采用石盐质量法, 即通过统计和分析盆地中的石盐质量、海陆相沉积的比值关系及成钾概率, 预测出库车盆地古近纪可能沉积的钾盐资源量。其理论基础是, 海水和地表水中钾离子与钠离子含量存在一定的比例关系, 石盐与钾盐沉积量也应存在固定比值, 利用这一比值将已经发现并计算得出的石盐质量转换为钾盐资源量。分析确定库车盆地中带入钾总量的成钾概率是 4.69%, 据此, 预测出可能沉积蕴藏的钾盐资源量(KCl)可达 39.78 亿 t。

关键词 地质学; 石盐; 钾盐; 海相; 陆相; 成钾概率; 库车盆地

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

Prognosis of potash resource quantity in Eocene rock salt strata of Kuqa Basin, Xingjiang

TANG Min^{1,3}, LIU ChengLin² and JIAO PengCheng²

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 No. 1 Geological Party, Nonferrous Metals Geological and Mineral Resources Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450016, Henan, China)

Abstract

The ancient salt lake in Kuqa basin with a thick layer of rock salt had the structural environmental conditions for the formation of potash salt deposits. Lots of potash minerals and their associations were found in Tertiary evaporites within Kuqa basin. Making use of the method of rock salt quantity, the authors tentatively predicted the potash resource quantity in Kuqa basin. The procedure of the rock salt quantity method is as follows: first, the quantity of rock salt in Kuqa basin is analyzed; second, the stratigraphic thickness ratio between the marine facies and the continental facies is determined; finally, the probability of the formation of potash minerals is predicted. The theoretical basis of the rock salt quantity method is that potassium ions and sodium ions in sea water and surface water must have a certain proportional relation, and the rock salt and the potassium salt also have a fixed ratio in quantity. On such a basis, the rock salt quantity can be converted into the potash quantity. Accordingly, the probability of the formation of potash minerals in Kuqa basin within the Tarim basin is 4.69%. The probable reserved potash salt resource quantity (KCl) in Kuqa basin is up to 3 978 million tons.

Key words: geology, rock salt, potash salt, marine facies, continental facies, probability of potash formation, Kuqa basin

* 本研究得到国家“十一五”科技支撑 305 项目课题(2006BA07B06)和塔里木油田公司科技项目(41005050002)的共同支持
第一作者简介 唐敏, 女, 1979 年生, 在读硕士研究生, 自然地理学专业。Email: minruimail@sina.com
收稿日期 2009-04-14; 改回日期 2009-05-09。张绮玲编辑。

钾盐是中国紧缺的七大宗矿产资源之一,对外依存度高达75%。20世纪50年代以来,中国已探明的钾盐矿床集中分布在青海柴达木盆地和新疆塔里木盆地罗布泊中(王弭力等,1996;1998;2001),它们以现代盐湖卤水钾盐矿床类型为主。但对古代蒸发岩盆地中的钾盐矿床至今没有取得突破性的找矿进展。钾盐找矿一直列为国家和地矿部门重点攻关项目,中国能否再找到钾盐矿床,一直是钾盐专家们关心和思考的问题。未来的找钾工作,除了开展成矿条件与找矿标志等研究外,还应对蒸发岩盆地中可能沉积的钾盐资源量进行预测,从而使找钾工作具有更多的依据。

塔里木盆地西部的库车次级盆地在构造、沉积环境方面显示出对寻找钾矿十分有利的地质条件^{①②}(刘成林等,2008a;2008b;谭红兵等,2004;马万栋等,2006),并且现已在第三系岩盐中发现了众多钾盐矿物及其组合,进一步表明库车盆地的盐湖在第三纪已演化到了钾盐沉积阶段^③(刘成林等,2008a;2008b)。这为库车盆地的钾盐找矿提供了科学依据。本文根据以上基础及库车盆地的石盐质量,对库车盆地中可能蕴藏的钾盐资源量进行了预测。

1 库车盆地特征

库车盆地位于塔里木盆地北部,南天山构造带

以南,为NEE向的长条状拗陷,面积为 2.85×10^4 km²(图1)。该拗陷北邻南天山造山带,南靠塔北前缘隆起带,受近南北向挤压的长期影响,形成了现今四带两凹的构造格局,即北部单斜带、克拉苏-依奇克里克构造带、秋立塔克背斜带、南部平缓背斜带及拜城凹陷、阳霞凹陷,为一个再生前陆盆地,蕴含了大量的石油、天然气、盐岩、膏岩资源。

库车盆地在古近纪属于海相-海陆过渡相沉积盆地,蒸发岩厚度巨大,分布范围广(图2,两个时期的蒸发岩等厚图叠合而成)。古新统化石有瓣鳃类: *Modiolus elegans* Sow、*Modiolus* spp.、*Cardita* sp.; 腹足类: *Turritella* sp.、*Eulimella* sp.; 介形虫类: *Loxocochoa* aff.、*Laculata* Mand. 等; 有孔虫类: *Quingueloculina* sp. 这些化石反映出该时期是咸化海湾-泻湖沉积环境^①。始新统化石有瓣鳃类: *Sphonia* cf.、*angusta* Desh 等; 腹足类: *Ampullina* sp.、*Newtoniella* sp. 等,其沉积环境是浅水淡化泻湖环境或接近正常咸度的浅水海湾环境^②。在该时期盆地古盐湖沉积了巨厚的岩盐层,据塔里木油田钻井资料统计,盐层最大厚度高达1254 m(唐敏等,2008),库木格列木群(古新统和始新统)中岩盐层平均厚度127.05 m,最大含盐率79.97%,平均含盐率11.84%^③。盆地中有巨量的膏盐沉积,意味着盆地中聚集了巨量钾元素。

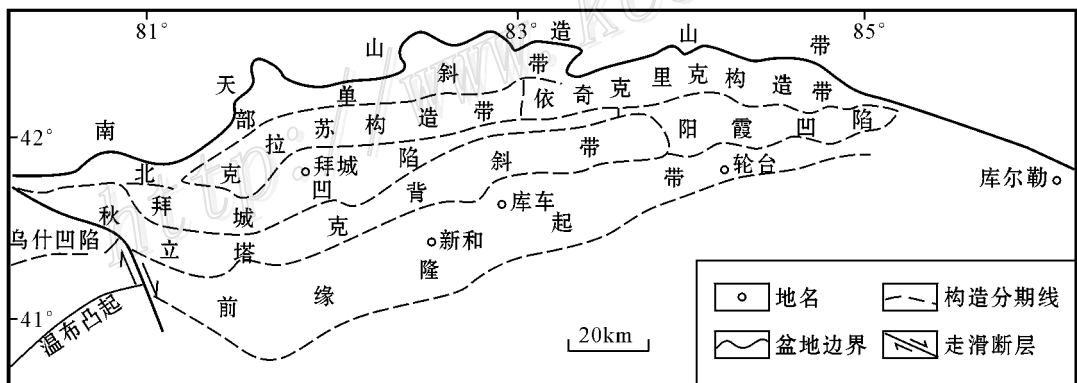


图1 库车拗陷大地构造简图(据塔里木油田分公司资料)

Fig. 1 Simplified geotectonic map of Kuqa basin (data from Tarim Oilfield Company)

① 地质部矿床地质研究所,新疆地矿局第八地质大队. 1981. 新疆库车盆地第三纪成盐条件及找钾远景研究报告. 9,16,84,106.

② 刘成林. 2007. 塔里木盆地古代钾盐成矿条件与潜力研究(报告). 中国地质科学院矿产资源研究所.

③ 杨海军,刘成林,顾乔元,等. 2008. 塔里木盆地重要蒸发岩拗陷成盐及油气生储条件(报告). 塔里木油田公司. 中国地质科学院矿产资源研究所.

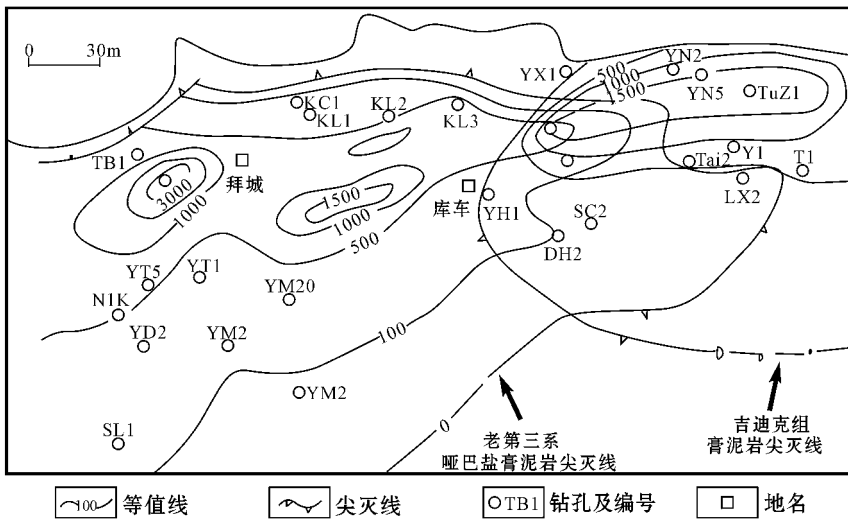


图 2 库车盆地第三系蒸发岩沉积等厚度分布图(周兴熙, 2000)

Fig. 2 The distribution of Tertiary evaporates in the Kuqa basin (Zhou 2000)

2 钾盐资源总量预测

当前,矿产资源的预测方法有很多,例如对银矿资源的潜力预测可以引用丰度估计法、聚类分析法和加权丰度法进行资源预测(叶水盛等,2008);再如,铀矿资源预测评价可运用多重关联分析法,选择铀成矿预测变量(因子),列出参考单元和预测单元变量的原始数据,计算关联度,最后生成和圈定出铀矿远景区(祝宏勋等,2008)。

钾盐预测方法的研究,已采用体积估算法对中国古代蒸发盆地钾盐成矿的可能性进行分析与预测(刘成林等,2008b;唐敏等,2008),据此,预测库车盆地的钾盐资源量达 59.39 亿吨。

本文尝试利用石盐质量法,进一步预测库车盆地古近纪时期可能蕴藏的钾资源量。这种预测方法的理论基础是:海水和陆地水中钾离子与钠离子含量存在一定的比例关系,这样沉积出的石盐与钾盐量也存在固定的比值,因此利用这一比值可将已经发现并计算得出的石盐质量转换为钾盐质量。最后,通过分析库车盆地的成钾概率来确定钾矿资源量。

2.1 石盐矿质量计算

2.1.1 石盐矿体积计算

由塔里木油田钻井资料统计获得不同钻孔中岩盐的厚度及深度等参数,利用 3Dmine 矿业工程软件绘制石盐矿体模型,据此计算出石盐体积。

利用 3Dmine 软件中的“提取地层顶底板功能”先

提取石盐矿层的顶板散点数据,从而利用“散点生成DTM”功能得出石盐矿层的顶板,用同样方法提取石盐矿层的底板,对于每个石盐矿层的顶底板(即DTM面),分别利用连接三角网和合并三角网为一个实体功能画出石盐矿体(图略)。这样就把每个钻孔在该时期最早出现的石盐层与最晚出现的石盐层圈定为一个实体,利用软件中的查询实体属性,获得石盐矿层的体积。古新世的石盐矿层体积 $V_{\text{古新世}} = 5\,635 \times 10^8 \text{ m}^3$,始新世的石盐体积 $V_{\text{始新世}} = 52\,465 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.1.2 石盐质量(资源量)计算

将石盐矿层的体积与石盐密度相乘,可获得盆地的石盐质量,计算公式: $M = V \times \rho \times T \times C$ (M 为石盐总质量, V 为石盐体积, ρ 为石盐密度, T 为石盐层在地层中的厚度百分比, C 为石盐层中石盐含量)。根据库车盆地在始新世—古新世地层中石盐的沉积量,按照上述步骤,可以获得古新世、始新世时期库车盆地的石盐岩参数(表 1)。利用计算公式,最后得出库车盆地地下第三系石盐质量 $M_{\text{NaCl}} = 35\,169.81$ 亿 t。

表 1 古新世、始新世时期库车盆地的石盐岩矿参数

Table 1 Rock salt parameters of Kuqa basin during Palaeocene and Eocene

地层	$V/10^8 \text{ m}^3$	$\rho/t \text{ m}^3$	$T/\%$	$C/\%$
古新统	5635	2.165*	38	83.5
始新统	52465	2.165*	33	83.5

* 引自戈定夷等,1989。 ρ 为石盐密度, T 为石盐层在地层中的厚度百分比, C 为石盐层中石盐含量。

2.2 海、陆沉积环境影响比例

2.2.1 海、陆相划分依据

硫同位素是反映海陆环境变化的良好指标之一,对库车盆地古近纪石膏的硫同位素开展了较精细的地球化学分析^①,以确定该时期海、陆沉积的比例。

现代蒸发岩以及形成这些蒸发岩的海湾水硫酸盐,几乎有相同的硫同位素组成(格里年科等,1980),内海及海湾硫酸盐的硫同位素组成具有较大的变化(格里年科等,1980),没有大陆河流补给的海水,硫酸盐硫同位素的组成与大洋相近,如红海 $\delta^{34}\text{S}=20.3\%$ (Hartmann et al.,1966),有大陆河流流入的海,及大洋的近河口地段,硫酸盐硫同位素比值明显减小,如里海的 $\delta^{34}\text{S}$ 是8.6%(UI'masova,1971),卡拉博加斯戈尔湾的 $\delta^{34}\text{S}$ 为7.7%(UI'masova,1971)等。根据硫酸盐硫同位素组成的变化特征,设定 $\delta^{34}\text{S}\geq 20\%$ 的地层为海相沉积(完全海相), $\delta^{34}\text{S}\leq 10\%$ 地层为陆相沉积(即纯陆相), $\delta^{34}\text{S}=15\%$ 地层为海陆过度相沉积(介于两者之间定义为海陆过渡相)。

2.2.2 沉积相划分结果

选择小库孜拜沟剖面(古新统塔拉克组和始新统小库孜拜组),对石膏(层)进行高密度采样测试,据此探讨地层硫同位素比值随时间的变化趋势,以揭示海陆环境变化,得出在该时期海相环境所占比值 $N_{\text{海}}$ 和陆相环境所占比值 $N_{\text{陆}}$ 。

根据上述设定的海相、陆相硫同位素指标,在地层柱中首先根据硫同位素指标,从下向上连续分段,统计硫同位素的平均值(A),再利用海相系数公式 $P_{\text{海}}=(A-10)/10$ 和陆相系数公式 $P_{\text{陆}}=1-P_{\text{海}}$,计算得出海相分数($P_{\text{海}}$)和陆相分数($P_{\text{陆}}$),最后将海相分数与陆相分数分别与地层厚度相乘,得到海相地层厚度与陆相地层厚度,计算结果见表2。

由表2计算得到:小库孜拜沟剖面海相地层厚度共计35.734m,陆相地层厚度共计151.746m。因此,该时期(古新统和始新统地层厚度是187.48m)海相环境所占比值 $N_{\text{海}}=19.06\%$,陆相环境所占比值 $N_{\text{陆}}=80.94\%$ 。

2.3 NaCl与KCl质量转换关系

因海水和陆地水中的K/Na比值不等,在获得

表2 海相地层厚度与陆相地层厚度统计表

Table 2 Thickness statistics of marine facies and continental facies strata

序号	采样位置 起点/m	采样位置 终点/m	地层厚度/m	A($\delta^{34}\text{S}$ 平均值/‰)	$P_{\text{海}}$ (海相分数)	$P_{\text{陆}}$ (陆相分数)	海相地层 厚度/m	陆相地层 厚度/m
1	194.64	194.03	0.61	17.750	0.775	0.225	0.473	0.137
2	194.03	192.62	1.41	17.300	0.730	0.270	1.029	0.381
3	192.62	191.04	1.58	17.700	0.770	0.230	1.217	0.363
4	191.04	189.74	1.3	17.800	0.780	0.220	1.014	0.286
5	189.74	188.03	1.71	17.350	0.735	0.265	1.257	0.453
6	188.03	183.79	4.24	15.825	0.583	0.418	2.470	1.770
7	183.79	180.33	3.46	14.720	0.472	0.528	1.633	1.827
8	180.33	173.79	6.54	13.933	0.393	0.607	2.572	3.968
9	173.79	171.04	2.75	13.275	0.328	0.673	0.901	1.849
10	171.04	165.2	5.84	12.867	0.287	0.713	1.674	4.166
11	165.2	160.97	4.23	12.750	0.275	0.725	1.163	3.067
12	160.97	160.01	0.96	13.267	0.327	0.673	0.314	0.646
13	160.01	129.82	30.19	12.525	0.253	0.748	7.623	22.567
14	129.82	128.58	1.24	11.400	0.140	0.860	0.174	1.066
15	128.58	101.22	27.36	10.675	0.068	0.933	1.847	25.513
16	101.22	84.5	16.72	11.833	0.183	0.817	3.065	13.655
17	84.5	34.91	49.59	10.825	0.082	0.918	4.091	45.499
18	34.91	25.91	9	10.133	0.013	0.987	0.120	8.880
19	25.91	12.16	13.75	10.200	0.020	0.980	0.275	13.475
20	12.16	9.46	2.7	15.600	0.560	0.440	1.512	1.188
21	9.46	7.16	2.3	15.700	0.570	0.430	1.311	0.989
合计			187.48				35.734	151.746

① 杨海军,刘成林,顾乔元,等.2008.塔里木盆地重要蒸发岩坳陷成盐及油气生储条件(报告).塔里木油田公司.中国地质科学院矿产资源研究所.

表3 海水和库车地表水钾/钠系数值

Table 3 K/Na ratios of seawater and surface water in Kuqa

分析项目	c(KCl)	c(NaCl)	K/Na
海水	0.763 g/kg	27.667 g/kg	0.0276
库车地表水	0.0108 g/L	0.4639 g/L	0.0233

海陆环境比值关系后,由海洋水成分特征值(瓦里亚什克,1965;地质科学院情报所编译,1972)和库车盆地地表水水化学组成特征值^①获得K/Na系数(表3)。

2.4 盆地钾盐(KCl)质量计算

分别用 $Q_{\text{海}}$ 表示海水中K/Na比值, $Q_{\text{地表水}}$ 表示地表水中K/Na比值。确定库车盆地古盐湖沉积带入盆地中KCl总量计算公式是: $M_{\text{KCl}} = M_{\text{NaCl}} \times N_{\text{海}} \times Q_{\text{海}} + M_{\text{NaCl}} \times N_{\text{陆}} \times Q_{\text{地表水}}$ (M 为质量)。根据上述已经求出的NaCl质量及各项参数值,计算出古近纪时期带入库车盆地氯化钾总量 $M_{\text{KCl}} = 848.28$ 亿t。这些钾物质进入盆地以后,主要有4个流向,第一,形成固体钾盐矿层;第二,被粘土矿物吸附或者进入其晶格;第三,被有机物吸附;第四,残留于潜水层和承压层中,在后期的地质作用中被迁移。因此,带入盆地中的大量钾元素有多少可以形成钾矿,是受多种因素控制的。对此,本文采用成矿概率的概念进行了相关的探讨。

2.5 钾盐成矿概率的分析

(1) 成矿概率的数学模型

成矿概率是矿床学研究的一个新课题,确定概率值的难度很大。概率学是研究随机现象数量规律的数学分支学科。随机现象则是指在基本条件不变的情况下,通过一系列试验或观察得到不同结果的现象。而事件的概率是衡量该事件发生的可能性的量度。虽然在一次随机试验中某个事件的发生是带有偶然性的,但那些可在相同条件下大量重复的随机试验却往往呈现出明显的数量规律(曹彬,1986)。因此,成矿概率(值)引用概率学的基本原理进行研究确定,即在多种成矿要素对成矿控制作用下,各种要素对成矿所做贡献等级(参数)的运算关系结果,也可称为成矿可能性(以百分数表示)。假设各种成矿要素之间互不影响,具有独立性,可使用独立事件的概率乘法公式,即 $P(ABC) = P(A)P(B)P(C)$ (廖昭懋等,1986;陈凯等,1984)。

蒸发岩盆地中带入的钾物质能否聚集成为钾盐

矿以及形成多大规模的钾盐矿,受很多因素制约,因此,钾盐成矿可以用概率多少表示。盆地成钾概率主要涉及盆地封闭性、古气候、构造条件、沉积环境及盆地面积等,是这些变量的复杂函数。由于这些变量之间没有互相影响的关系,属于独立事件,据此综合分析,提出成钾概率公式:

$$K = P(f, q, g, h, m) = f \times q \times g \times h \times m$$

在成矿概率公式中,成矿概率 K 数值最大为100%,表示肯定能成矿、成大矿,系数为0表示基本不能成矿。 f 为封闭性系数,设定3个值,1代表盆地封闭性好,0.5代表封闭性适中,0是指盆地不封闭; q 为气候系数,或者为古气候条件,设3个值,1是极干旱的气候系数,0.5代表干旱气候系数,0代表半干旱-湿润气候系数;构造系数 g 设3个值,稳定地带为1,相对活动的稳定地带为0.5,活动地带为0或小概率; h 为环境系数,也分为3个值,海相环境用1表示,海陆过渡相环境用0.5表示,陆相盐湖环境,以晶间卤水矿为主,其固体钾盐层品位低即可用小概率或0表示;面积系数 m 用3个值表示,当盆地面积大于25万 km^2 时,面积系数为1,面积在1~25万 km^2 ,面积系数是0.5,小于1万 km^2 , m 值是0或者是小概率系数。

上述5个参数,只要有一个参数为0,其他参数再好,盆地内也不可能沉积钾矿。

(2) 钾盐成矿概率分析

库车盆地成钾参数值确定,参照钾盐矿床特征参数(唐敏等,2009)。库车盆地古近纪时期是一个封闭-半封闭(间歇性开放,接受补给)的盐湖盆地,有一个通道与其西南部的喀什凹陷相通^②,但在主成盐期是向北倾斜的箕状盆地^②,其封闭应该比较好,有利于成矿, f 值取0.75。从早侏罗世开始直到古近世与新近世,整个中亚和塔里木盆地,基本都以干旱气候为主,而中亚盆地出现巨型钾盐矿沉积,其间夹有短暂潮湿气候带^①,总体上,古气候属于干旱气候,取值0.5。库车盆地是一个断陷盆地,有一定活动性,具有边断、边陷、边沉积的特点,但基底相对稳定,因此构造条件是相对活动的稳定地带,概率值取0.5。上文已经利用石膏硫同位素对库车盆地在古近纪时的沉积环境进行了讨论,并且有资料显示库车盆地沉积环境属于海陆过渡相^{①②},因此公式中 h 值可取0.5。因库车盆地的面积达2.8万 km^2 ,属

① 地质部矿床地质研究所,新疆地矿局第八地质大队,1981.新疆库车盆地第三纪成盐条件及找钾远景研究报告.9,16,84,106.

② 刘成林,2007.塔里木盆地古代钾盐成矿条件与潜力研究(报告).中国地质科学院矿产资源研究所.

于大型盆地,有利成钾,故盆地面积参数的取值是0.5。利用上述公式及参数,库车盆地的成钾概率 $K = f \times q \times g \times h \times m = 0.75 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 = 0.0469$ 或 4.69%。

(3) 钾盐资源量预测

通过上述计算分析,库车盆地古新统和始新统时期聚集了 848.28 亿吨氯化钾,由于受古气候,沉积环境等因素影响,并不代表盆地中一定有这么多氯化钾沉积成矿,主要代表被海水及地表水带入盆地的钾总量,为此,需要用成钾概率进行修正。

将钾总量与计算获得的库车盆地成钾概率相乘,最终得到库车盆地在古近纪时期可能沉积的钾盐矿储量,库车盆地古近纪可能沉积的钾盐(KCl)矿资源量 $= K \times M_{KCl} = 4.69\% \times 848.28 = 39.78$ 亿吨。这数值与利用国外海相钾盐特征参数(唐敏等, 2009)进行体积法预测结果 59.39 亿吨(唐敏等, 2008)相比较,预测出的钾盐矿资源量减少了 20 亿吨左右,这与两种方法的不同有关。库车盆地成钾概率系数的确定也是半经验性的,有待进一步精细研究。

3 讨论与结论

利用石盐质量法求算蒸发岩盆地中聚集的钾总量,进而预测古代蒸发岩盆地钾盐成矿资源量,可为钾盐地质勘查提供理论依据。研究显示,库车盆地古近纪盐湖已演化到钾盐沉积阶段,并具有较好的成钾条件,故有必要开展钾盐成矿资源量的预测研究,笔者曾用体积法对库车盆地成钾资源量进行过预测,本文又提出另一方法——石盐质量法再进行预测。首先,根据石油钻井等资料,求得盆地石盐总质量,然后根据硫同位素比值变化,求得进入盆地的海水与地表水比例值,再按照海水及库车地表水钾钠固定比例关系,计算求得古盐湖沉积时期伴随 NaCl 带入盆地的氯化钾物质总量为 848.28 亿吨。由于地质作用的复杂性,这些钾物质不可能全部沉积成钾盐矿层。钾盐成矿受多种因素控制,这些影响因素相互独立,发育程度不一,具有概率性,这些因素的乘积就是成矿概率,确定库车古近纪钾盐成矿概率为 4.69%,预测可能成矿的钾盐(KCl)资源量 $=$ 石盐总量 \times 成钾概率 $= 848.28$ 亿吨 $\times 4.69\% = 39.78$ 亿吨。这个结果的可靠性主要取决于库车盆地石油钻孔勘探的密度,目前,资料主要来自 50

多个钻孔,对石盐质量计算可能还比较粗略,但基本反映了可能沉积的钾盐资源量的大致轮廓,随着今后钻井增多,结果会更加接近实际情况。总之,尽管钾盐成矿过程是一个漫长、复杂、甚至反复的地质过程,但是,只要抓住了问题的关键,即是否在一个较封闭的盆地环境中沉积了巨量的石盐,显示盆地中已积累了大量的钾物质,那么成钾定量预测就是可行的。本文尝试开展成矿资源量预测研究,以期有助于库车盆地古代钾盐研究和找矿勘查。

志 谢 本项研究得到塔里木油田公司研究院大力支持,研究使用 3Dmine 矿业软件由北京东旺达科技公司提供,软件使用方面得到公司技术人员的帮助,工作中还得到曹养同、胡妍娜同学的协助,在此表示感谢。

References

- Cao B. 1986. Probability theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press. 1-48(in Chinese).
- Chen K and Wang Y X. 1984. An introduction to probability theory and its applications[M]. Beijing: China Water Power Press. 31-41.
- Ge D Y, Tian H X and Zeng R G. 1989. Concise guide mineralogy[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 22(in Chinese with English abstract).
- Hartmann M and Nielsen H. 1966. Sulfer isotopes in the hot brine and sediments of Atlantic Deep Red Sea [J]. Marine Geol., 4: N4.
- Institute of Information, Chinese Academy of Geological Sciences. 1972. Data on general exploration of potash deposits in overseas (special)[M]. 16.
- Liao Z M and Yang W L. 1986. Probability theory and mathematical statistics[M]. Beijing: Beijing Normal University Press. 51-63(in Chinese).
- Liu C L, Jiao P C, Chen Y Z, Wang M L and Xuan Z Q. 2008a. The discovery and significance of potassium salt minerals in Tertiary evaporate strata of Kuqa basin[A]. In: Proceedings of the Ninth National Symposium on deposits[C], Beijing: Geol. Pub. House. 374-375(in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L and Jiao P C. 2008b. Probing of feasibility and prediction of potash formation in the evaporate basins of China[A]. In: Proceedings of the Ninth National Symposium on deposits[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 368-369(in Chinese).
- Ma W D and Ma H Z. 2006. Geochemical characteristics on brine and potash perspective in the western Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 24(1): 76-106(in Chinese with English abstract).
- Tan H B, Ma H Z, Ma W D, Dong Y P, Zhang X Y and Xu J X. 2004. Research on geological and geochemical characteristics of paleo-salt rock and its potash ore formation in western Tarim Basin[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 3: 194-199(in Chinese with English abstract).

- Tang M, Liu C L, Jiao P C, Cao Y T and Hu Y N. 2008. Potash mineralization forecast for resources in ancient evaporite basin- for example in Kuqa Basin[A]. In :Proceedings of the ninth national Symposium on deposits[C]. Beijing :Geol. Pub. House. 382-383(in Chinese).
- Tang Min, Liu C L, JIAO P C, Chen Y Z, Cao Y T and Hu Y N. 2009. Quantitative analysis and significance of the marine potash deposits in the world[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(2): 28-35 (in Chinese with English abstract).
- Ul' masova M I. 1971. Varieties of halite rocks in the Khodzhaikan deposit(in Russian). Nauchn. Tr. Tashk. Gos. Univ. 403, 8-13. Chem. Abstr. , 78 60 632.
- Valyashko, M. G. 1965. Geochemical Regularity for the Formation of Potash Deposits[M]. Translated by Fan L, et al. Beijing :China Industry Press(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 eighth five-year plan period[M]. Beijing :Metallurgical Industry Press. 446-449(in Chinese).
- Wang M L, Liu C L, Jiao P C, Han W T, Song S S, et al. 2001. Resources of potash in Lop Nur salt lake[J]. Beijing : Geol. Pub. House. 199-209.
- Wang M L, Liu C L, Jiao P C, Yang Z C and Li Y W. 1998. Characteristics of the Luobei subbasin superlarge potash deposit in the Lop Nur and its development prospects[J]. Mineral Deposits, 17 (Supp.): 433-435(in Chinese).
- Ye S S, Yang F C and Yu P, Cai H J and Wu B. 2008. Application on potential evaluation of mineral resources in prospecting area with lower degree in research[J]. Global Geology, 27(2):188-197.
- Zhou X X. 2000. The features of tertiary halite-gypsum caprocks and their control on forming of oiland gas pools in kuqa depression[J]. Journal of Palaeogeograph, 24(4):51-57(in Chinese with English abstract).
- Zhu H X, Pan H P and Jian X X. 2008. Application of multiple correlation analysis method to the prognosis and evaluation of uranium metallogenesis in Jiangzha region[J]. Uranium Geology, 24(4) 233-249.
- Гриненко В А, Гриненко Л Н. 1980. Sulfur isotope geochemistry[M]. Translation by Zhao R. Beijing : Science Press. 77-83(in Russian).
- 陈 凯,王玉孝. 1984. 概率论及其应用[M]. 北京 :水利电力出版社. 31-41.
- 戈定夷,田慧新,曾若谷. 1989. 矿物学简明教程[M]. 北京 :地质出版社. 220.
- 格里年科 B A, 格里年科 Л Н. 1980. 硫同位素地球化学[M]. 赵瑞译. 北京 :科学出版社. 77-83.
- 廖昭懋,杨文礼. 1986. 概率论与数理统计[M]. 北京 :北京师范大学出版社. 51-63.
- 刘成林,焦鹏程,陈永志,王弼力,宣之强. 2008a. 库车盆地第三系岩盐地层钾矿物组合发现及其意义[A]. 见 :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. 2008b. 中国古代蒸发盆地钾盐成矿可能性分析与预测[A]. 见 :第九届全国矿床会议论文集[C]. 北京 :地质出版社. 368-369.
- 马万栋,马海州. 2006. 塔里木盆地西部卤水地球化学特征及成钾远景预测[J]. 沉积学报, 24(1): 76-106.
- 谭红兵,马海州,马万栋,董亚萍,张西营,许建新. 2004. 塔里木盆地西部古岩盐地质地球化学特征与成钾条件分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 3 :194-199.
- 唐 敏,刘成林,焦鹏程,曹养同,胡妍娜. 2008. 古代蒸发岩盆地钾盐成矿资源量预测--以库车盆地为例[A]. 见 :第九届全国矿床会议论文集[C]. 北京 :地质出版社. 382-383.
- 唐 敏,刘成林,焦鹏程,陈永志,曹养同,胡妍娜. 2009. 世界海相钾盐矿床特征定量分析及意义[J]. 沉积学报, 27(2) 28-35.
- 瓦里亚特克 M Г. 1965. 钾盐矿床形成的地球化学规律[M]. 范立等,译. 北京 :中国工业出版社.
- 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]. 见 :中国地质学会编. 八五地质科技重要学术交流会议论文集[C]. 北京 :冶金工业出版社. 446-449.
- 王弼力,刘成林,焦鹏程,韩蔚田,宋松山,等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[J]. 北京 :地质出版社. 199-209.
- 王弼力,刘成林,焦鹏程,杨智琛,李亚文. 1998. 罗布泊罗北凹地超大型钾矿床特征及其开发前景[J]. 矿床地质, 17(增刊):432-436.
- 叶水盛,杨凤超,于 萍,蔡红军,武 斌. 2008. 研究程度较低地区的矿产资源潜力评估方法应用研究[J]. 世界地质, 27(2): 188-197.
- 周兴熙. 2000. 库车坳陷第三系盐膏质盖层特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 古地学报, 24(4): 51-57.
- 祝宏勋,潘红平,简兴祥. 2008. 多重关联分析法在降扎地区铀成矿预测评价中的应用[J]. 铀矿地质, 24(4): 233-249.

附中文参考文献

- 曹 彬. 1986. 概率论[M]. 哈尔滨 :哈尔滨工业大学出版社. 1-48.