

新疆典型干盐湖成钾条件对比与指标模型初探*

马黎春, 刘成林, 焦鹏程, 陈永志

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 选取新疆塔里木盆地及准噶尔盆地的2个典型终端干盐湖罗布泊和玛纳斯盐湖, 对其成钾条件和模式进行对比分析, 分别从盆地地理纬度、构造位置、盆地规模、所处气候带以及区域水文化学特征、盐类矿物组合特征、钾盐富集特征和品位等多个方面进行了研究。罗布泊地区气候干燥指数 >150 , 补给河流的 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值为3.29:1~5.08:1, 晶间卤水的 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值为3.71:1~6.66:1, 卤水氯化钾品位1.4%, 资源量达3.2亿吨。而玛纳斯湖干燥指数为8.63, 补给水源的 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 为1.5:1~12:1, 晶间卤水 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 为0.1:1~1.6:1, 卤水氯化钾品位0.33%, 资源量为37.23万吨。研究结果表明, 罗布泊在气候和物源补给上都比玛纳斯湖具有明显优势, 有利于形成大型钾盐矿。2个干旱区典型盆地可观察实验的成钾指标对比分析, 对于建立蒸发岩盆地成钾指标模型具有重要的参考意义。

关键词 地质学; 罗布泊盐湖; 玛纳斯盐湖; 干旱区; 成钾指标

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

A preliminary discussion on geological conditions and indicator pattern of potash deposits in typical playas of Xinjiang

MA LiChun, LIU ChengLin, JIAO PengCheng and CHEN YongZhi

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

Abstract

This paper provides a comparative analysis of the indicators of potash deposition in the aspects of geographical latitude, tectonic location, basin size, climate zones, hydrochemical characteristics, mineral assemblages, potash enrichment features and brine grades between the Lop Nur, the terminal lake of the Tarim Basin, and the Manas Salt Lake in the Junggar Basin of Xinjiang. The results show that the Lop Nur basin is superior to the Manasi Salt Lake in climate background and potassium supply and is thus favorable for the development of large-size potash deposits. In the Lop Nur basin, the aridity index is higher than 150 and the main inflow water has the $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ ratio from 3.29:1 to 5.08:1; in addition, the intercrystalline brine has the $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ ratio of 3.71:1 to 6.66:1, the KCl content of 1.4% and potash resource quantity (KCl) of 3.2×10^8 t. By contrast, the Manas Salt Lake has an aridity index of 8.63 and the $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ ratio of main inflow water from 1.5:1 to 12:1; besides, the intercrystalline brine has the $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ ratio of 0.1:1 to 1.6:1, the KCl content of 0.33% and potash resource quantity (KCl) of 37.23×10^4 t. This quantitative analysis of the potash deposit indicators for these two typical basins will promote a better understanding and development of

* 本文得到国家自然科学基金重点项目(20080430472)、国家自然科学基金项目(40830420)及中国博士后科学基金资助项目(20080430472)共同资助

第一作者简介 马黎春, 女, 1978年生, 主要从事地球化学、盐湖沉积学及干旱区环境研究。Email: mlc@cau.edu.cn

收稿日期 2010-03-31; 改回日期 2010-05-04。张绮玲编辑。

the potash indicator pattern in the arid evaporative basins of western China.

Key words: geology, Lop Nur salt lake, Manas salt lake, arid area, potash deposit indicator

新疆位于欧亚大陆腹地,地处中国西北边陲,地域辽阔,是世界上距离海洋最远的地区之一,由于该区气候极端干旱,也是中国主要的成盐区之一。新生代以来,青藏高原、天山以及帕米尔高原等巨大山脉的强烈隆起,使新疆形成“三山夹两盆”的地貌格局(邓铭江等,2005)。位于天山南、北两侧的准噶尔盆地和塔里木盆地在自然、地理、地质、气候条件和区域水文化学上都存在着很大的差异,使新疆盐湖在具有干旱区共性的基础上,各具特色,在演化方向上各不相同。本文选取新疆两大盆地中典型的终端干盐湖玛纳斯湖和罗布泊,对它们的成盐、成钾条件进行对比分析,这对于认识中国西部干旱区盐湖的形成演化机制和建立成钾指标模型具有重要的参考意义。

1 区域水文地质

1.1 准噶尔盆地玛纳斯湖

玛纳斯干盐湖位于新疆天山北麓,准噶尔盆地中南部,是玛纳斯河流域的尾间湖和积盐中心,地理位置 $85^{\circ}40' \sim 86^{\circ}50' E$, $45^{\circ}30' \sim 45^{\circ}58' N$ 。第四纪的古玛纳斯湖曾是一个规模很大的湖泊,后因陆梁隆起,被分隔成几个次级湖泊,包括艾里克湖、阿兰淖尔湖(包括小艾里克湖)、伊克哈格淖尔(目前的玛纳斯湖)和达巴松诺尔湖(邓铭江等,2005;董新光等,2005)。在玛纳斯湖演化过程中,受构造和气候持续干旱化的影响,总体经历了3个阶段^①,自东向西逐步迁移退缩,形成3个不同时期的干盐湖。干盐湖I(见图1),形成时间较早,位于玛纳斯湖以东约60 km处,呈东北走向,目前老湖区大部分已被风沙掩埋。干盐湖II,位于玛纳斯湖以东约30 km处,为典型干盐湖地貌景观,地表覆盖着坚硬盐壳,富含晶间卤水,已开发为盐场(夏子盖盐场),主要生产石盐。干盐湖III,就是如今的玛纳斯湖,属季节性干盐湖,存在几级湖积阶地,湖底平坦,呈椭圆形,地表覆盖有厚层盐壳,已开采盐矿。湖区周围,受强烈风蚀作用的影响,发育有风蚀洼地和零星固定、半固定沙

丘,沙丘形态主要为新月型和鱼鳞状(林瑞芬等,1996)。

现代玛纳斯湖主要补给来源有玛纳斯河、安集海河和塔西河^②。玛纳斯河发源于天山北坡西段依连哈比尔尕山脉,为天山北麓最大的河流,主要为冰川融水和大气降水,山区沿途接受基岩裂隙水补给,全长324 km,多年平均径流量12.58亿 m^3 。安集海河多年平均径流量3.01亿 m^3 ,6~9月为丰水期,占全年径流量的81.8%。塔西河发源于天山中段依连哈比尔尕山北麓,向北流入塔西河水库,全长120 km,多年平均径流量2.31亿 m^3 (石门子站1957~1995年资料)。但自20世纪50年代以来,玛纳斯河上游大规模兴修水利、开垦拓荒,大量引水及地下水开采使下游水量急剧减少,河流断流,至70年代末玛纳斯湖干涸,除每年6~8月泄洪外,其他时间多为干涸的盐土平原景观。90年代后期以来,玛纳斯河流域径流量稍有增加,1996~2000年5年(除1997年)的年均径流量均大于多年平均年径流量12.58亿 m^3 (林瑞芬等,1996),尤其近些年来,全疆河流水量普遍增加,年最大洪峰频频发生,使干涸多年的玛纳斯湖重新注水,形成季节性湖泊。

1.2 塔里木盆地罗布泊

罗布泊位于新疆天山南麓与阿尔金山北麓交汇地带,塔里木盆地东部边缘,地理位置: $88 \sim 92^{\circ} E$, $39 \sim 41^{\circ} N$,是塔里木地台东部的凹陷地段(胡东生等,2004),其形成演化主要受阿尔金及库鲁克塔格走滑断裂系统的控制。呈左行走滑的阿尔金断裂伴生若羌断层,与右行走滑的库鲁克塔格断裂伴生孔雀河断层,在罗布泊地区形成一个近东西向的拉张背景,罗布泊即是产生于这一构造背景的箕状凹陷(郭召杰等,1995),其海拔高度仅780 m左右,是整个塔里木盆地的最低洼处,为各大水系的最终归宿地和盐分聚集中心(夏训诚,1987)。发育于天山南麓和昆仑山北麓的冰川融水,均从盆地四周向北部汇集,汇入到塔里木河,再一起向东注入罗布泊,形成独特的“向心式”水系结构网(徐海量等,2005)。而其他不能注入的河流则无一例外消失于浩瀚沙漠之中,然

^① 中国地质科学院矿产资源研究所,2005.新疆优势矿产资源勘查评价研究,罗布泊及邻区盐湖钾盐资源评价研究(专题号:2003BA612A-06-15)(内部资料)。

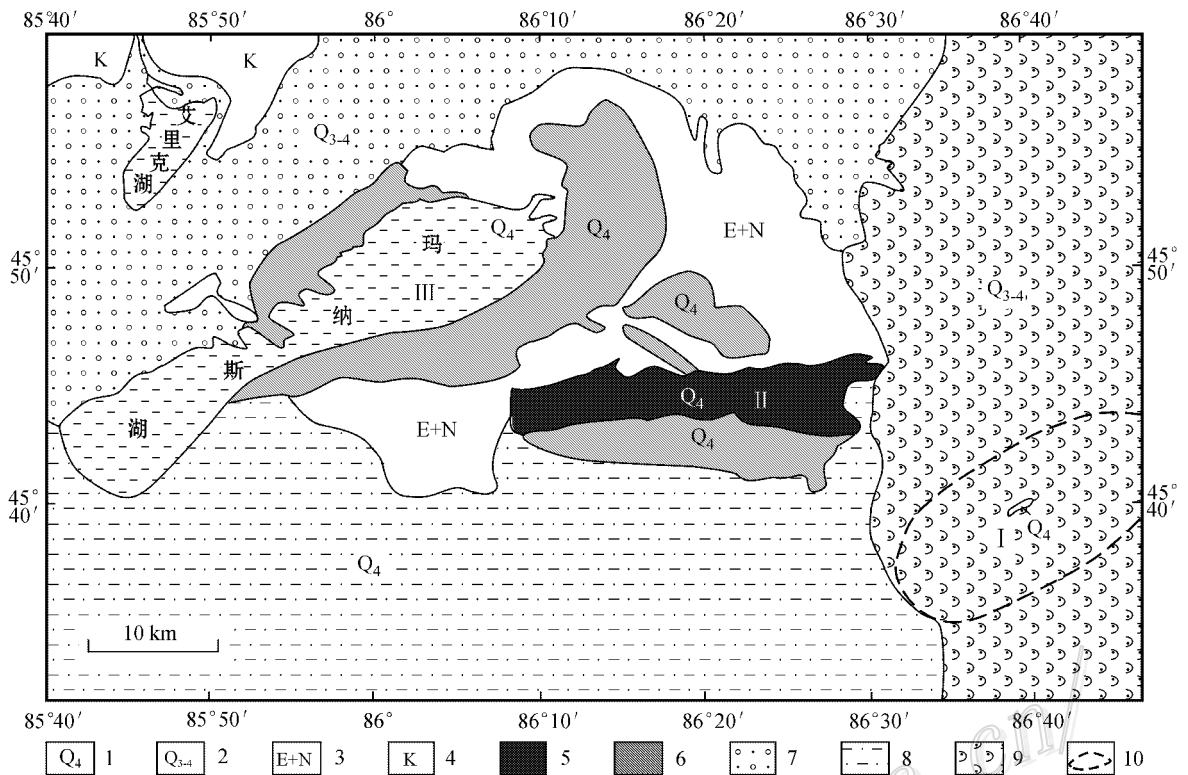


图 1 新疆玛纳斯干盐湖地质图(数据来源于刘成林, 2005^①)

1—全新统; 2—上更新统-全新统; 3—古近系-新纪系; 4—白垩系; 5—盐湖沉积; 6—盐沼; 7—砂砾; 8—沼泽; 9—沙丘; 10—古湖分布区

Fig. 1 Geological map of the Manas Playa in Xinjiang (data from Liu 2005^①)

1—Holocene; 2—Upper Pleistocene-Holocene; 3—Palaeogene-Neogene; 4—Cretaceous; 5—Salt lake deposit; 6—Salt marsh; 7—Gravel; 8—Marsh; 9—Sand dune; 10—Distribution area of ancient lake

而, 无论这些河流是否曾经补给过塔里木河, 在水文学上都与塔里木河干流有着直接或间接的联系, 统称为塔里木河水系。塔里木河水系上游主要有阿克苏河、叶尔羌河、和田河、喀什噶尔河; 中游有渭干河、库车河、策勒河、克里雅河、尼雅河、牙通古孜河和喀拉米兰河; 下游经反复改道同孔雀河、米兰河、若羌河、瓦石峡河、车尔臣河汇合, 共同注入罗布泊洼地(王弼力等, 2001)。在地质历史上, 塔里木河水系庞大, 横贯塔里木盆地北部, 为中国第一大内陆河, 其终端湖罗布泊水域辽阔, 覆盖面积曾达 20 000 km²(吴素芬等, 2003; 樊自立等, 2002; 2006), 被称之为内陆海。

第三纪以来, 塔里木盆地即在副热带高压控制下形成干旱气候, 后期青藏高原、天山以及帕米尔高原的强烈隆升, 更加剧了该区干旱化程度, 尤其是全

新世以来, 塔里木盆地气候极端干旱(夏训诚, 1987; 王弼力等, 2001), 一些河流开始断流, 塔里木河水系网逐渐瓦解, 作为终端湖的罗布泊水域范围缩小, 逐渐分离出几个次级湖泊, 北部的罗北凹地, 西南部的卡拉库顺和南部的“大耳朵”地区都曾经是古罗布泊解体后形成的几个次级沉积洼地, 但从构造与沉积学的角度上讲, “大耳朵”和罗北凹地被认为是最主要的积盐中心(图 2)(王弼力等, 2001; 刘成林等, 2003; Liu et al., 2006)。

20 世纪 50~60 年代, 塔里木河上游农垦事业迅速发展, 建造大中型水库 19 座, 拦截大量入湖水量, 加速了罗布泊干旱化的进程, 尤其是 1952 年普惠大堤的建立, 使塔里木河改道由铁干里克向南注入台特玛湖, 直接切断了罗布泊的主要入流水源, 导致罗布泊迅速干涸(王弼力等, 2001)。目前湖区呈典型

① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2005. 新疆优势矿产资源勘查评价研究, 罗布泊及邻区盐湖钾盐资源评价研究(专题号: 2003BA612A-06-15)(内部资料)。

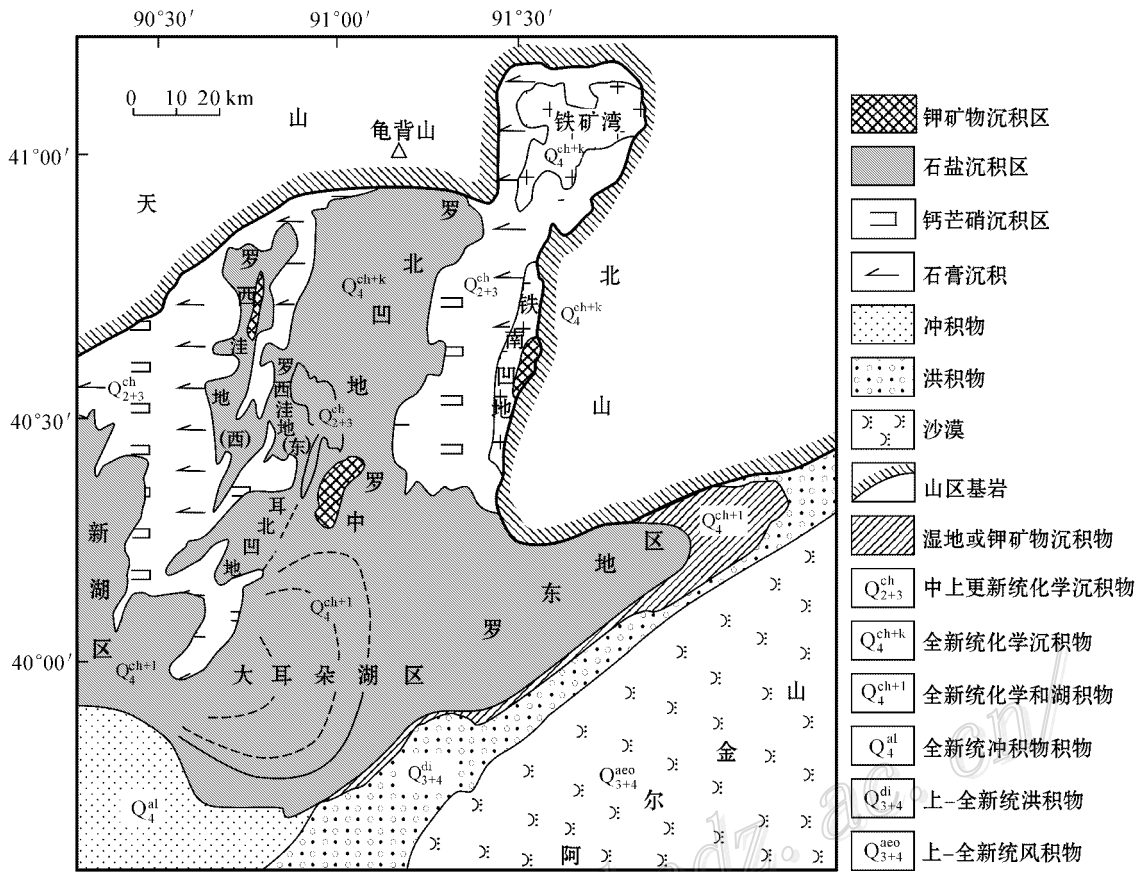


图2 新疆罗布泊地区地质图(据刘成林等 2003)

Fig. 2 Geological map of the Lop Nur Playa in Xinjiang(after Liu et al. ,2003)

干盐湖地貌景观,广泛发育有各种干涸龟裂盐壳,盐盘覆盖面积近 5 500 km²(马黎春,2008)。湖区长期遭受风蚀,在湖区西部、西北部孔雀河下游、东北部白龙堆、东部阿奇克谷地以及三陇沙等地都分布有雅丹地貌(夏训诚,1987)。整个湖区异常干燥,只是偶尔在洪水年份时,季节性的洪流沿孔雀河下游向东南延伸,在孔雀河河口附近形成小范围的积水。

2 气候背景

玛纳斯河流域属于北半球中温带大陆性干旱、半干旱气候,夏季炎热,冬季寒冷漫长,降水量少,蒸发量大,多年平均降水量 191 mm,多年平均蒸发量 1 650 mm。光照充足,热量丰富,多年平均气温 6.8℃,最高气温出现在 7 月份,最低气温出现在 1

月份^①。

而罗布泊地区属中纬暖温带极端干旱气候,气候炎热干燥,年平均气温 11.6℃,夏季最高气温 ≥ 40℃,冬季最低气温 -20℃ 以下,年降水量 ≤ 20 mm,年蒸发量 ≥ 3 000 mm,主蒸发期为 3~10 月,年日照时数 > 3 200 h,年积温 > 4 500℃(胡东生等,2004)。据罗布泊钾盐矿实测数据:2003~2004 年 3~10 月蒸发量分别为 4 416.4 mm 和 4 757.2 mm,最高气温分别为 41.7℃ 和 44.4℃,最低气温分别为 -22.7℃ 和 -22.6℃,年降水量分别为 14.1 mm 和 7.7 mm(据罗布泊钾盐矿气象观测站)。罗布泊地区全年盛行风方向为 NE 向,风沙盛行,3~5 月为多风季节,一年中 2/3 的风沙天气出现在这一季节,年平均风速 > 5 m/s,6~8 月为大风季节,风力可达 8~10 级,8 级大风日 > 60 d,最大风速 17~25 m/s,

① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2005. 新疆优势矿产资源勘查评价研究,罗布泊及邻区盐湖钾盐资源评价研究(专题号: 2003BA612A-06-15)(内部资料)。

表 1 玛纳斯干盐湖主要入流水源化学组成

Table 1 Chemical composition of main inflow water in the Manas Playa

样品	$\rho(B)(\text{mg/L})$							$\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$
	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	HCO_3^-	
潜水 1	15.75	47.34	34.02	6.26	1.63	26.35	109.60	10.35
潜水 2	54.26	125.50	7.92	15.02	2.47	33.61	132.00	4.55
潜水 3	92.77	325.60	135.50	19.38	3.83	66.87	93.00	4.13
潜水 4	10.50	31.13	35.16	4.85	2.06	12.26	114.80	19.62
潜水 5	36.76	82.84	72.93	11.51	1.96	14.95	152.70	5.33
潜水 6	7.00	10.06	17.98	2.67	0.52	32.95	129.2	7.43
潜水 7	8.75	15.80	24.97	3.83	1.05	26.42	134.30	12.00
潜水 8	11.55	30.17	5.59	1.53	0.24	58.28	104.50	2.08
潜水 9	12.25	34.48	39.00	0.61	0.28	66.31	111.90	2.29
潜水 10	106.80	234.60	33.97	22.78	1.60	252.70	370.30	1.50

注 潜水 1~潜水 10 的数据来源于刘志明等(2006)。

瞬时最大风速超过 40 m/s,常引起沙暴天气,若羌、且末地区每年浮尘天气有 115~193 d(王弭力等, 2001 据若羌气象站资料)。

3 区域水文地球化学特征

3.1 玛纳斯湖

玛纳斯河流域从山区至平原矿化度逐渐升高,冲洪积扇中上部以潜水为主,水化学类型为 HCO_3^-Ca 或 $HCO_3^-(SO_4)-Ca$ 型水,矿化度小于 1 g/L,洪积扇下部为 $SO_4(Cl)-Na$ 型、 $Cl(SO_4)-Na$ 型和 $Cl-Na$ 型,矿化度一般大于 3 g/L,局部高达 30~50 g/L。承压水为 $HCO_3^-Ca(Na)$ 型、 $HCO_3^-(SO_4)-Ca$ 型和 $HCO_3^-(SO_4)-Ca(Na)$ 型,矿化度一般小于 0.5 g/L^①。沿地下水流动方向,地下潜水化学分析数据见表 1。由于采样深度不同,地下水混合淋滤、粘土吸附、生物作用等综合影响,该区地下水化学演化趋势表现出复杂和波动性。除潜水 5、6 为深层地下水样外,其余样品均为浅层水样(刘志明等,2006)。由表 1 可知,入流潜水钾离子含量由山区至平原区总体呈下降趋势,中上游区段(潜水 1~7) $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值除 1、4、7 号样品异常偏高外,其他样品的 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值波动于 4.13:1~7.43:1 之间,均比下游区段(潜水 8~10)明显偏高,这可能跟洪积扇下游地形坡度变缓,堆积物颗粒变细,透水性变差,粘土吸附作用增强有关。

玛纳斯湖区周围地势平坦,湖体受玛纳斯河及周边地下潜水补给量变化而发生游移变迁,目前湖区大多数时候为干涸状态,在洪水季节偶尔出现暂时性湖泊,尤其是丰水年份,大的洪水可能完全淹没玛纳斯湖,冲淡湖水,甚至蔓延至东南部的夏子盖盐场。枯水期,湖水迅速向西北迁移,退缩至现在的玛纳斯湖,直至最后干涸。分析结果表明(表 2),无论是枯水期还是丰水期,玛纳斯湖水、晶间卤水、和丰盐场和夏子盖盐场卤水钾离子含量均很低,除玛纳斯河北岸 1 号样品 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值(7.48:1)异常偏高外,其他样品的 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值波动于 0.1:1~1.63:1 之间。经计算,2002 年 6 月枯水期,玛纳斯干盐湖晶间卤水氯化钾含量仅为 0.11%~0.89%,属低品位含钾卤水,干盐湖区分布的小的上升泉,氯化钾含量也不高,仅为 0.28%,夏子盖干盐湖晶间卤水氯化钾含量为 0.18%~0.22%,卤水化学组成分析结果见表 2。玛纳斯河流域上游区段至终端湖 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值变化趋势见图 3。

3.2 罗布泊

罗布泊干盐湖地势相对平缓,高差仅为 5.2 m,总体地势是四面高,中心低,西南平均坡度 0.19‰,东北平均坡度 0.09‰(李保国等,2008)。盆地东、南、北三面环山,西面为库鲁塔格沙漠。目前已无地表河水补给湖区,主要接受周边山地冲洪积扇侧向补给及盆地边缘少量泉水补给。2005~2006 年连续两年在罗布泊“大耳朵”地区进行地下水位观测,结

① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2005. 新疆优势矿产资源勘查评价研究,罗布泊及邻区盐湖钾盐资源评价研究(专题号: 2003BA612A-06-15)内部资料)。

表2 玛纳斯干盐湖卤水化学组成

Table 2 Chemical composition of brine in the Manas Playa

采样时间	采样地点	$\rho(B)(\text{mg/L})$					$\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$
		Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	
洪水期	和丰盐场(玛纳斯湖水)	0.22	471.2	13.00	3.20	3.40	0.22
	艾里克湖北部盐坑1	1.35	260.4	15.90	2.30	23.80	1.35
	艾里克湖北部盐坑2	1.63	1089.0	125.50	0.10	17.70	1.63
	夏子盖干盐湖北部浅坑	0.15	1842.9	11.80	63.10	87.20	0.15
	夏子盖干盐湖北部洼地积水	0.28	795.8	35.20	31.70	23.20	0.28
	夏子盖盐湖1	0.22	1898.8	32.10	3.40	44.30	0.22
	夏子盖盐湖2	0.58	1926.7	23.20	2.90	60.60	0.58
	夏子盖干盐湖	0.72	1947.6	44.80	3.10	57.30	0.72
	玛纳斯湖北岸1	7.48	0.14	0.70	0.20	0.10	7.48
	玛纳斯湖北岸2	0.48	1856.9	1.20	2.60	32.30	0.48
	玛纳斯湖南岸1	0.10	1972.1	30.70	16.80	23.60	0.10
	玛纳斯湖南岸2	0.11	1689.4	43.40	14.80	15.70	0.11
	枯水期	玛纳斯湖北岸	0.38	1830.4	215.9	3.50	33.20
玛纳斯湖盐坑		0.91	1809.4	226.8	3.60	72.10	0.91
和丰盐场		0.33	1760.5	335.2	1.90	14.60	0.33
和丰盐场盐池		2.89	1704.5	663.5	1.50	314.90	2.89

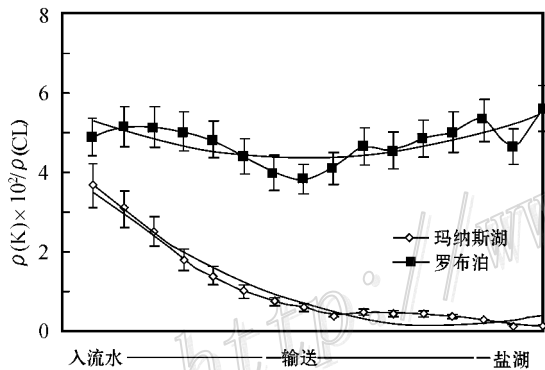
注:资料来源^①。图3 玛纳斯湖及罗布泊上游至终端湖 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 变化趋势(取5个相邻样点滑动平均值)

Fig. 3 The variation trend of $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ from up-river section to terminal lake in the Manas salt Lake and the Lop Nor Salt Lake (based on moving average of 5 samples)

果表明地下水位深度在整个区域具有差异性,盆地东北部地下水位埋深一般在35~70 cm,而盆地中心及西南区域地下水位埋深低于2 m(马黎春,2008)。

2006年9月在盆地东南边缘红柳井及其南150 m处(冲积扇扇缘)采集地下潜水样品,潜水埋深约50 cm左右,矿化度145 g/L左右(见表3),pH值为

7.8,水化学类型为Cl-Na型。红柳井矿化度较低,约5 g/L,pH值为8.15,由于Ca离子浓度相对较高,导致 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 浓度很低,水化学类型也为Cl-Na型,可能是溶解盆地边缘早期沉淀石盐所致。“大耳朵”湖区高浓度晶间卤水富含 Na^+ 、 Cl^- ,极其贫 Ca^{2+} 和 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$,含有相当数量的 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 K^+ 离子,pH值变化于6.6~7.2,矿化度约350 g/L(马黎春,2008),已经达到杂卤石($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)和钠镁矾($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)析出阶段(Ma et al., 2009)。

收集研究区历史时期主要入流河水化学分析数据,见表3,表明罗布泊主要补给河流塔里木河、孔雀河、若羌河和车尔臣河水化学特征较为类似,阴离子主要以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主,阳离子主要为 Na^+ 和 Mg^{2+} ,水化学类型为 $\text{SO}_4(\text{Cl})(\text{HCO}_3)-\text{Na}(\text{Mg})(\text{Ca})$ 混合型。与普通河水相比,塔里木盆地发育的河水 SO_4^{2-} 含量偏高,指示水川融水和大气降水在汇入到塔里木河过程中,与流经区域富含硫酸盐的老地层曾发生过反应(王弭力,2001),溶解了较多的 SO_4^{2-} 。此外,塔里木河是典型的沙漠河流,以其高盐度为典型特征,矿化度从上游至下游区段总体呈上升趋势,

① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2005. 新疆优势矿产资源勘查评价研究,罗布泊及邻区盐湖钾盐资源评价研究(专题号:2003BA612A-06-15)(内部资料)。

表 3 罗布泊干盐湖主要入流水源及晶间卤水化学组成

Table 3 Chemical composition of main inflow water and intercrystalline brine in the Lop Nor Playa

	$\rho(B)$ (mg/L)							$\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	
塔河 1	157.20	362.26	74.66	72.06	7.99	139.38	233.72	5.08
塔河 2	148.20	238.26	91.48	48.8	7.2	118.6	242.34	4.86
塔河 3	243.42	301.04	72.07	46.03	8.00	139.62	130.56	3.29
塔河 4	186.00	276.00	72.60	56.70	9.22	—	—	4.96
塔河 5	263.00	420.00	64.30	86.20	16.50	—	—	6.27
塔河 6	47.10	22.20	20.70	11.10	3.01	—	—	6.39
塔河 7	19.20	29.60	57.80	14.00	2.06	—	—	10.73
塔河 8	13.70	34.60	48.20	11.60	1.87	—	—	13.65
塔河 9	252.00	329.00	86.70	67.30	12.10	—	—	4.80
塔河 10	888.00	807.00	215.00	185.00	24.10	—	—	2.71
塔河 11	186.00	244.00	66.50	48.70	7.29	—	—	3.92
塔河 12	142.00	200.00	58.90	45.10	6.01	—	—	4.23
孔雀河	214.99	441.46	53.02	132.11	8.99	173.00	361.23	4.18
若羌河	240.73	239.62	58.74	48.54	9.99	194.50	223.17	4.15
车尔臣河	106.61	229.54	33.70	52.58	10.99	103.31	168.99	10.31
红柳井	2368	2038.33	287.96	78.83	31.86	1385.09	50.03	1.35
地下水	63049	16704.03	977.5	4775	760	59250	150.02	1.21
晶间卤水 1	206609	17428.9	1100.1	12275.1	8475.1	129500.0	109.5	4.10
晶间卤水 2	208212	17593.6	537.5	8225.0	13875.2	119750.1	119.4	6.66
晶间卤水 3	204069	13206.4	740.0	10025.1	7575.1	132000.0	121.3	3.71
晶间卤水 4	208586	18170.1	622.5	25250.0	11725.0	105750.2	125.2	5.62

注 塔河 1、孔雀河、若羌河、车尔臣河分析数据,引自樊自立等(1987)塔河 2 引自郑喜玉等(2002)塔河 3、红柳泉、地下水、晶间卤水 1~4 由本文作者分析。塔河 4~12 数据来自^①采样区域为塔里木河中下游地区。“—”为未测。

下游区段河水矿化度可达 1 500 mg/L 左右。沙漠河流通常地处气候极端干旱区,蒸发强烈,另一方面塔里木河距离长(全长 2 179 km),在流淌过程中水分蒸发,盐分不断增加,在下游区段还有可能溶解早期沉淀的石盐矿物,致使下游区段矿化度迅速升高,Cl⁻含量较高,实测 pH 值约 7.8。

由表 3 可知,从主要入流水源至盆地中心的高浓度卤水,钾离子含量表现出逐步富集的趋势。主要入流水源中,河水带来丰富的 K⁺,其 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值除车尔臣河(10.31:1)塔河 7(10.73:1),塔河 8(13.65:1)样品异常高外,多浮动于 3.29:1~5.08:1。盆地边缘侧向补给的地下水及泉水贡献不大, $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值仅为 1.21:1 和 1.35:1;干盐湖高浓度晶间卤水表现出富集 K⁺ 的特征, $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值波动于 3.71:1~6.66:1,已达到钾盐析出阶段(Ma et al., 2009)。

4 成钾潜力与成钾指标定量分析

盐湖是干旱气候条件和封闭(半封闭)地形制约下发展演化的大陆地表景观综合体(瓦里亚什科,1965)。封闭的水文地质条件和蒸发量大于降水量的气候条件,使汇集于地形洼地的天然水体连续蒸发,形成盐类化学沉积,钾盐一般发生于盐类矿物沉积的后期。世界上没有两个完全相同的盐湖,因为盆地在形成机制、构造背景、基岩类型、区域气候以及演化历史上都有很大不同,使得盐湖在化学演化方向和矿物组合特征上都各不相同,但决定一个盐湖是否能成钾,除受构造背景和气候条件约束外,还要考虑丰富的物质来源和钾富集过程中各种地质作用的控制。

表 4 为罗布泊和玛纳斯盐湖成钾指标参数。由

^① 中国地质科学院矿产资源研究所, 2005. 罗布泊及邻区盐湖钾盐资源评价研究(专题号: 2003BA612A-06-15) [内部资料].

表4 塔里木盆地罗布泊和准噶尔盆地玛纳斯湖成钾指标参数对比

Table 4 Comparative analyses of potash deposition indicators between the Lop Nor Playa in the Tarim Basin and the Manas Salt Lake in the Junggar Basin

成盐盆地	罗布泊干盐湖	玛纳斯干盐湖
地理纬度	39°30'~41°00' N	45°30'~45°58' N
地形地势	高山深盆	中山深盆
多年平均温度/°C	11.6	6.8
蒸发量/mm	>3 000	1 650
降水量/mm	23.1	191
干燥度	>150	8.63
年平均风速/m/s	5.1	2.5
构造位置	终端湖	终端湖
几何形态	长条形	长条形
盐湖盆地规模/km ²	20 000	250
补给流域规模/km ²	56×104	1.98×104
$\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$		
主要补给水源	3.29~5.08	1.5~12
湖水、晶间卤水	3.71~6.66	0.1~1.63
粘土吸附作用	微弱	强烈
盐类矿物组成	石膏、钙芒硝、石盐、杂卤石、钠镁钒、钾盐镁矾等	石膏、石盐、无水芒硝、白钠镁钒、泻利盐等
卤水 $\rho(KCl) \%$	1.4	0.33
成钾规模/万吨	32 000	37.23

表4可知,罗布泊和玛纳斯湖都位于中高纬度干旱气候带,远离海洋,大陆性气候明显,加之巨大山系的屏蔽,干旱程度加剧,十分有利于成盐成钾。由于两个成盐盆地所处具体地理位置和周围山系地形地势差异,气候特征仍存在差异性,基本以天山为界,位于北疆准噶尔盆地的玛纳斯湖流域属于温带大陆性干旱-半干旱气候,而南疆塔里木盆地的罗布泊属于暖温带大陆性干旱气候^①。两者比较,罗布泊地区气候更加炎热、干燥,干燥度大于150,而玛纳斯湖干燥度为8.63,具体气候指标参数见表4。此外,罗布泊常年盛行东北风,风力强,也十分有利于水体蒸发析盐。从构造位置来说,罗布泊和玛纳斯湖都是流域的尾间湖,且盆地都是水文封闭的,有利于K⁺的聚集。但两者补给源区规模差异较大,罗布泊补给源为塔里木河流域,在地理意义上等同于塔里木盆地,总面积56万km²,远远大于玛纳斯河流域的1.98万km²^①。从物质来源上来说,补给水量越大,就

越有可能输送丰富的K⁺到流域的终端,形成规模巨大的钾盐矿(包括液体钾矿),此外补给水源的K⁺含量及富集过程也十分重要。玛纳斯湖与罗布泊相比,入流水源 $\rho(K) \times 10^2 / \rho(Cl)$ 比值偏低,且在输送过程中存在强烈的粘土吸附现象,导致最后的汇流中心玛纳斯湖钾品位较低,卤水 $\rho(KCl)$ 仅为0.33%,远低于罗布泊的1.4%。因此,罗布泊无论是在气候条件、构造背景还是在物源补给上都表现出明显的优越性,十分有利于形成大型钾盐矿,目前罗布泊钾资源量为3.2亿吨^①(王弼力等,2001),而玛纳斯湖仅为37.23万吨^②。

5 结论

干旱区内陆盆地钾盐成矿需满足的主要条件:盆地水文的封闭性,创造钾盐聚集的场所,干燥的气候条件,丰富的物质来源。盆地的封闭性,是一个定性指标,在内陆干旱区易于满足。而气候条件,对钾盐成矿具有一定的变化范围,气候太湿,水量过充沛,不易富集活泼的K⁺;气候太干,缺乏地表径流,不利于K⁺的溶解、输送,钾盐也难以富集成矿。对盆地成钾进行评价预测,须确定成钾条件参数的定量-半定量标值。塔里木盆地和准噶尔盆地同处于中国西北干旱区,均为典型的内陆封闭盆地,它们的终端湖罗布泊和玛纳斯湖在成盐成钾模式与规模上表现出极大的差异性,通过对它们的成钾条件和指标参数定量对比分析,确定出了陆相卤水成钾的指标参数阈值应介于两指标之间,而罗布泊已出现薄层固体钾矿化,它的成钾指标可作为固体钾盐成矿的阈值。本文初步探索了干旱区蒸发岩盆地成钾标志模型,为干旱内陆区钾盐成矿规律提供了基础参数。

References

- Deng M J, Wang S J, Dong X G and Zhang S M. 2005. Sustainable utilization of water resources in Xinjiang[M]. Beijing: China Water-Power Press(in Chinese with English abstract).
- Dong X G and Deng M J. 2005. Groundwater resources in Xinjiang[M]. Urumuqi: Xinjiang Science and Technology Press(in Chinese with

① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2005. 罗布泊及邻区盐湖钾盐资源评价研究(专题号:2003BA612A-06-15)(内部资料).

② 《新疆通志·地质矿产志(1986~2000年)》:434.

- English abstract).
- Fan Z L, Cheng Y N and Wang Y J. 2006. Study on the Tarim River and its watercourse evolution in Xinjiang: Recorded in the "Records of Rovers" [J]. *Arid Zone Research*, 23: 8-15 (in Chinese with English abstract).
- Fan Z L, Li P Q and Zhang B Q. 1987. The salt crust of the Lop Nur [A]. In: Xia X C, ed. *Scientific investigation and research in the Lop Nur lake region* [C]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Fan Z L and Ma Y J. 2002. Utilization of water resources, ecological balance and land desertification in the Tarim Basin, Xinjiang [J]. *Collections of Essays On Chinese Historical Geography*, 17: 27-31 (in Chinese).
- Guo Z J and Zhang Z C. 1995. A new geological perspective on the Lop Nor formation and development [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1(2): 82-87 (in Chinese with English abstract).
- Hu D S and Zhang H J. 2004. Lake-evaporated salt resources and the environmental evolution in the Lop Nur region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(2): 212-218 (in Chinese with English abstract).
- Li B G, Ma L C, Jiang P A, Duan Z Q, Sun D F and Qiu H L. 2008. High precision topographic data on Lop Nur basin's Lake "Great Ear" and the timing of its becoming a dry salt lake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(6): 905-914 (in Chinese).
- Lin R F, Wei K Q and Chen Z Y. 1996. A study on the paleoclimate and paleoenvironment of sedimentary core from the Manas Lake, Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25(1): 63-72 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Jiao P C, Wang M L, Yang Z C, Li S D and Chen Y Z. 2003. Characteristics of diagenesis of the Quaternary salt-bearing strata, Lop Nur Lake, Xinjiang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 240-246 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C, Li S D and Chen Y Z. 2006. Features and formation mechanism of faults and potash-forming effect in the Lop Nor Salt Lake, Xinjiang, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 936-943.
- Liu Z M, Liu S Y and Wang G L. 2006. Water-rock interaction simulation of ground water in the plain of Manasi River Basin, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 885-892 (in Chinese with English abstract).
- Ma L C, Li B G, Jiang P A, Lowenstein T K, Zhong J P, Sheng J D and Wu H Q. 2009. Investigation of evaporate deposits in the "Great Ear" area of Lop Nor salt plain, Xinjiang Province, China [J]. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract # H51C-0777*.
- Ma L C. 2008. A study on the relationships between the salt crust characteristics and the tonal changes of the "Great Ear" rings in the Lop Nur dry salt lake area [Dissertation for Doctor degree] [D]. Supervisor: Li B G. Beijing: China Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Valyashko M G. 1965. Geochemical regularity for the formation of potash deposit [M]. Fan L, et al. translation. Beijing: China Industrial Press. 3 (in Chinese).
- Wang M L, Liu C L, Jiao P C et al. 2001. Saline lake potash resources in the Lop Nur, Xinjiang [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Wu S F, Han P, Li Y, Xue Y and Zhu Z C. 2003. Predicted variation tendency of the water resources in the headwaters of the Tarim river [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25: 708-714 (in Chinese with English abstract).
- Xia X C. 1987. *Scientific investigation and research in the Lop Nur Lake region* [C]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Xu H L, Ye M and Song Y D. 2005. The Dynamic Variation of Water Resources and Its Tendency in Tarim River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 60(3): 487-494 (in Chinese with English abstract).
- Zheng X Y, Zhang M G, Xu C and Li B X. 2002. Summarization of salt lake in China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 瓦里亚什科 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.
- 邓铭江, 王世江, 董新光, 章曙明. 2005. 新疆水资源及可持续利用 [M]. 中国水利水电出版社.
- 董新光, 邓铭江. 2005. 新疆地下水资源 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社.
- 樊自立, 李培清, 张丙乾. 1987. 关于罗布泊是否游移的问题 [A]. 见: 罗布泊科学考察与研究 [C]. 夏训诚, 北京: 科学出版社.
- 樊自立, 马映军. 2002. 塔里木盆地水资源利用与生态平衡及土地沙漠化 [J]. *中国历史地理论丛*, 17: 27-31
- 樊自立, 陈亚宁, 王亚俊. 2006. 新疆塔里木河及其河道变迁研究 [J]. *干旱区研究*, 23: 8-15
- 郭召杰, 张志诚. 1995. 罗布泊形成及演化的地质新说 [J]. *高校地质学报*, 1(2): 82-87
- 胡东生, 张华京. 2004. 罗布泊荒漠地区湖泊蒸发盐资源的形成及环境演化 [J]. *冰川冻土*, 26(2): 212-218.
- 李保国, 马黎春, 蒋平安, 段增强, 孙丹峰, 邱宏烈. 2008. 罗布泊"大耳朵"干盐湖地形特征与干涸时间讨论 [J]. *科学通报*, 53(6): 905-914.
- 林瑞芬, 卫克勤, 程致远. 1996. 新疆玛纳斯湖沉积柱样的古气候古环境研究 [J]. *地球化学*, 25(1): 63-72.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 杨智琛, 李树德, 陈永志. 2003. 罗布泊第四纪含盐系成岩作用特征研究 [J]. *沉积学报*, 21(2): 240-246.
- 刘志明, 刘少玉, 王贵玲. 2006. 新疆玛纳斯河流域平原地下水水-岩作用模型 [J]. *地质学报*, 80(6): 885-892.
- 马黎春. 2008. 罗布泊"大耳朵"干盐湖盐壳特征及与"耳纹"相关性的探讨 [博士论文] [D]. 导师: 李保国. 北京: 中国农业大学.
- 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.
- 吴素芬, 韩萍, 李燕, 等. 2003. 塔里木河源流水资源变化趋势预测 [J]. *冰川冻土*, 25: 708-711
- 夏训诚. 1987. 罗布泊科学考察与研究 [C]. 北京: 科学出版社.
- 徐海量, 叶茂, 宋郁东. 2005. 塔里木河流域水资源变化的特点与趋势 [J]. *地理学报*, 60(3): 487-494
- 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 李秉孝. 2002. 中国盐湖志 [M]. 北京: 科学出版社.