

采卤初期西台吉乃尔盐湖矿区卤水中钾、锂、硼水化学动态变化*

张西营, 马海州, 高东林, 王 涛, 杨海镇, 张明刚

(中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008)

摘 要:通过对 2003-2004 年采卤初期西台吉乃尔盐湖矿区卤水中钾、锂、硼水化学数据的分析,初步揭示了其在采卤过程中的动态变化及成因。研究表明,湖卤水中钾、锂、硼的变化主要受控于地表径流变化;地下卤水中钾、锂、硼的含量在停采恢复期高于采卤期,在孔隙卤水区高于晶间卤水区,而且三者空间上的分异程度有明显差异。相图分析表明停采恢复期已达到钾石盐析出阶段。大部分矿区的地下卤水基本处于滞流状态,地下卤水水位与钾锂硼之间没有显著的相关性。地下卤水中钾、锂、硼的变化很可能是由卤水本身物理化学性质的变化引起的,在短时间内,采卤活动和径流补给作用尚未对其产生显著影响。

关键词:西台吉乃尔盐湖;卤水;钾,锂,硼;水化学;动态变化

Dynamic changes of K, Li and B in hydrochemistry in brine of the mining area of Xitaijinair salt lake during the initial period of mining

ZHANG Xiyong, MA Haizhou, GAO Donglin, WANG Tao, YANG Haizhen & ZHANG Minggang
(*Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P. R. China*)

Abstract: Through analyzing the data of K, Li and B in the mining area of Lake Xitaijinair, the study results revealed the dynamic changes of K, Li and B and their seasons during early mining (from 2003 to 2004). The results show that the changes of contents of K, Li and B in lake brine mainly are controlled by the seasonal changes of surficial runoff. Three elements' contents in underground brine during recovering are higher than those during mining. But their contents in pore brine are higher than those in intercrystalline brine and three elements' spatial differentiation are obviously different. Studies on the phase diagram suggest that the brine during recovering has arrived the step when the sylvite is precipitating. The brine in mining area is basically in stagnation and there was no significant correlation between water levels and three elements' contents in underground brine. The changes of K, Li and B in underground brine probably are due to the physical and chemical changes of brine itself. And in short time, mining action and surficial runoff can not evidently influence the elements' changes in hydrochemistry.

Keywords: Lake Xitaijinair; brine; K, Li and B; hydrochemistry; dynamic changes

我国盐湖众多,分布地域广,盐湖矿产资源丰富,对盐湖资源的研究也比较成熟,不少盐湖已经进入或即将进入工业化生产阶段,如柴达木盆地的察尔汗盐湖^[1-14]和东台吉乃尔盐湖^[15-18],内蒙古的吉兰泰盐湖^[19-22],新疆的罗布泊^[23,24],西藏的扎布耶盐湖^[25-29]等。西台吉乃尔(以下简称西台)盐湖位于柴达木盆地中部,矿区面积约 570 多平方公里,矿区卤水中富含锂、钾、硼等资源,储量大,品位高,极具开采利用价值。矿区生产需要高品质的原卤,但不同地段和时间的卤水品质变化很大,如何在有利的地段和时间进行采卤是关系矿区生产的一个重要问题,同时,监测和分析卤水化学组分的时空变化也为矿区补水溶解地下固体盐矿层提供参考依据。本文利用西台湖矿区 2003 年 7 月至 2004 年 6 月为期一年的卤水水化学观测资料,对采卤初期主要有益组分钾锂硼的动态变化特征及成因进行了初步分析。

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-346)资助。2006-08-15 收稿;2006-10-24 收修改稿。
张西营,男,1977 年生,硕士;E-mail:xyzhchina@isl.ac.cn.

1 矿区研究概况

西台吉乃尔盐湖位于海西蒙古族藏族自治州大柴旦境内,地理坐标:93°13′-93°34′E,37°33′-37°53′N(图1)。西台湖盆为构造断陷盆地,盆内有晚更新世-全新世数十米厚的含盐岩系沉积,包括冲积相的粘土和湖相盐类沉积,边缘为中-晚更新世的湖相砂质泥岩和砂质粘土沉积,湖盆呈近似三角形,为封闭的内流盆地,接受来自昆仑山北坡的那陵格勒河支流西台吉乃尔河的补给^[30]。湖区为典型的内陆干旱气候,表现为干燥多风、降雨稀少、蒸发强烈、昼夜温差大的特征。该湖为固液相并存而以液体卤水矿为主的盐湖,盐湖化学类型为硫酸镁亚型。

矿区地质勘查始于上世纪50年代。1959—1963年青海省地质局第一地质队(青海省柴达木综合地质勘查大队前身,以下简称柴综队)在该区开展了以锂为主的初步勘探;1988—1990年,柴综队开展了台吉乃尔地区锂、硼、钾综合普查工作;2001年12月—2002年3月底,柴综队在矿区完成野外工作并编著了《青海大柴旦镇西台吉乃尔湖锂矿区勘探报告》,该报告在前人工作的基础上对西台矿区进行了比较详细和全面的补充研究。2003年,青海中信国安科技发展有限公司在湖区建厂并开始了大规模采卤,现已经建成面积约40多km²的盐田、长约6km的主采卤渠道和4条采卤支渠、采卤试验井10多口以及总计31口观测井(点)的长期观测网。

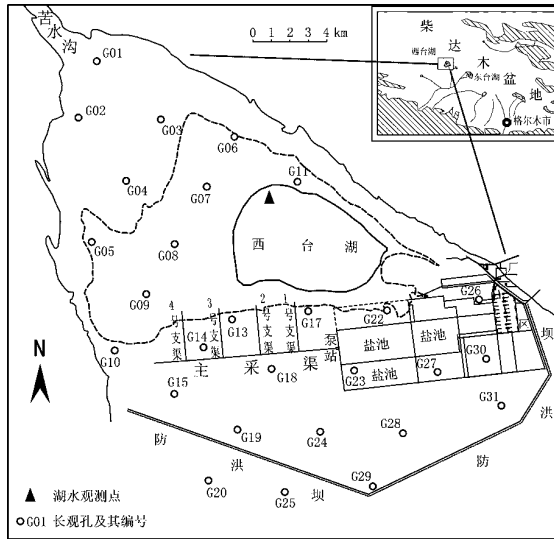


图1 西台湖位置图及矿区观测井分布

Fig. 1 Location map of Lake Xitaijinair and distribution of observation wells in mining area

2 样品采集与分析

样品由定深取样器定期(每月)在各观测孔中取得。采样后立即装瓶并用石蜡密封,以保证样品的原始状态。样品的分析测试和检测工作由青海中信国安科技发展有限公司分析测试部完成。具体分析方法如下:水样瓶去蜡封开瓶后,吸取25 ml冲稀到250 ml置于容量瓶中,再从容量瓶中吸取25 ml置另一冲稀到250 ml容量瓶中进行分析。其中K⁺、Li⁺采用原子吸收法;B₂O₃采用酸碱滴定法。卤水样的分析测试工作按照《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ0130.3-94)和《地下水质量检验方法》(DZ/T. 0064)进行,样品内检合格率均≥90%,无系统偏差,符合上述规范要求。

3 钾、锂、硼的水化学动态变化特征

西台湖矿区地表水(包括河水与湖水)是区内地下水的主要来源,受区域气候影响,地表水的季节性变化特征又直接影响着矿区内地下水的动态,同时地表水向矿区径流途中亦渗漏补给地下水,这都使得地下

水位受地表水季节性补给(每年融冰期和洪水期对地下水的脉冲式补给)的影响。矿区卤水根据赋存状态可分为地表卤水矿(湖水矿)和地下卤水矿两部分,后者按照赋水岩层地质时代和水理性质等,又可划分出孔隙潜卤水、晶间潜卤水和晶间承压卤水三个地下卤水矿层。孔隙潜卤水主要分布在矿区西北部的小部分地区,所占面积不到整个矿区的20%,而其余广大地区主要为晶间潜卤水和晶间承压水(合称晶间卤水),其所占面积大于80%,各卤水层之间都有着相应的水力联系^①。从观测井分布来看,孔隙卤水主要分布在G01至G05等5个长观孔控制的区域,而其它孔点则控制着广大的晶间卤水区(图1)。

3.1 湖表卤水中钾锂硼的动态变化

台吉乃尔河水主要注入东台吉乃尔湖,只有在3-4月份融冰期和7-8月份洪水期,才有较多的河水补给西台湖,平时靠鸭湖水满外溢沿分流河注入西台湖,但入湖水量较小。为减少洪涝对矿区的影响和充分利用水资源,2003年7月在在矿区南部和东部筑坝,把西台河与分流河的水向西北引向苦水沟排入一里坪。据2003年7月至2004年6月一个水文年的观测,其间西台湖一直有水,但面积变化较大^②。

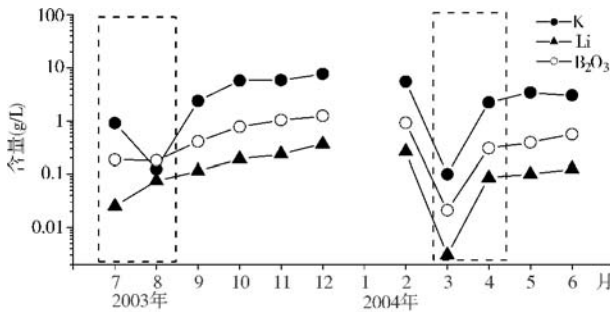


图2 西台湖钾锂硼含量随时间的变化(2003年7月-2004年6月)

Fig. 2 Content changes of K, Li and B with time in brine of Lake Xitaijinair (from July 2003 to June 2004)

2004年1月,因湖水退离观测点未采得样品,无数据。据分析,钾锂硼两两之间的相关系数均在0.95以上,其变化趋势也非常相似(图2)。每年的融冰期(3-4月)和洪水期(7-8月),地表径流补给湖水,石盐大量溶解导致湖卤水中钾锂硼等离子的浓度相对降低(图2中虚线框);其它月份则由于补给减少或中断以及强烈的蒸发作用致使湖水浓缩析出石盐,钾锂硼的含量也相对明显升高。因此,湖水中的钾锂硼变化主要受季节变化的影响。

3.2 地下卤水中钾的时空变化特征

钾离子含量在空间上的总体特征是西北部高,东部较低,南部最低,并且这种基本特征不随季节变化而有明显改变(图3),但其在时间上的变化还是比较明显的。为了便于分析比较,把整个观测年分为三个时段:初采卤期(2003年7-10月);停采恢复期(2003年11-2004年2月);后采卤期(2004年3-6月),对于后面的锂和硼同样按此划分标准予以分析讨论。

I 初采卤期(2003年7-10月),除在南部因有较淡卤水补给而使钾含量呈现低值外,矿区钾的品位整体上较高,采卤主(支)渠附近的钾含量也并未有明显异常,只是在丰水期由于地表淡水及较淡卤水补给湖区附近观测井而致使出现了钾含量的低值区(2003年8,9月)。由于此时刚开始采卤,矿区卤水水化学特征并没有明显变化。

II 停采恢复期(2003年11月-2004年2月),停采恢复期钾的整体品位明显高于采卤期,同样除南部因较淡卤水补给处含量较低外(相对采卤期仍有升高),大部分地区均表现为高值,并且2004年1月份在西北部的孔隙卤水区出现了本观测年钾的最高含量值区(图3中红色椭圆范围),接近20g/L。

III 后采卤期(2004年3-6月),3月份在湖区及其附近出现了一个钾的低值区,并在4月份形成了一

① 张天德等. 青海大柴旦镇西台吉乃尔湖锂矿区勘探报告. 青海省柴达木综合地质勘察大队,2002.

② 姚泽理等. 西台吉乃尔湖锂矿床2005年储量计算报告. 青海中信国安科技发展有限公司,2005.

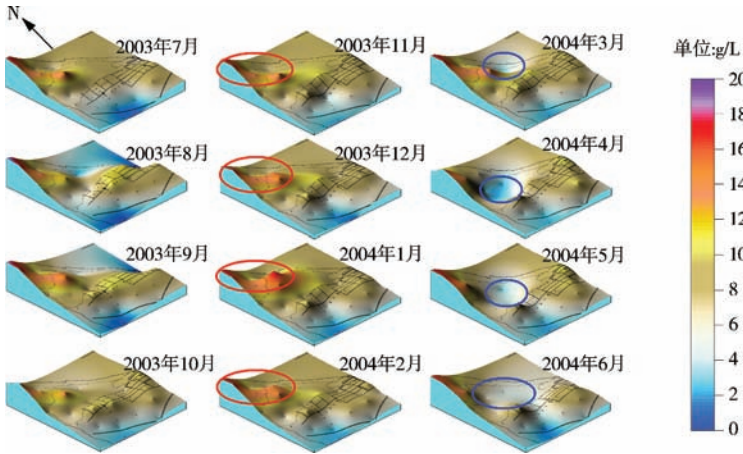


图3 2003年7月至2004年6月钾的时空变化

Fig. 3 Spatial and time changes of K from July 2003 to June 2004

个较明显的“低值涡”区(图3中蓝色椭圆范围),此后“低值涡”区渐消失,但痕迹依然清晰可见,这与此时洪水期丰富的地表径流有关.

3.3 地下卤水中锂的时空变化特征

锂在空间分布上最大的特点是在西北部孔隙卤水区表现为明显的高值,东部和东南部相对要低,其余地区则更低(图4),这种地区分布的差异性比钾明显要大.此外,南部的低值区同样也反映了此处有淡卤水补给而导致锂离子的品位很低.锂在时间上未有显著变化,亦即基本分布格局未有大的变化,但在停采恢复期(2003年11月-2004年2月),虽然矿区的整体品位明显上升,但西北部孔隙卤水区的含量仍要明显高于其它地区.自2004年3月开始的新的采卤活动导致了在矿区中部出现了类似钾离子一样的“低值涡”区,同时后采卤期(2004年3-6月)的品位要低于初采卤期(2003年7-10月).总体而言,锂的时空变化特点与钾离子基本类似.

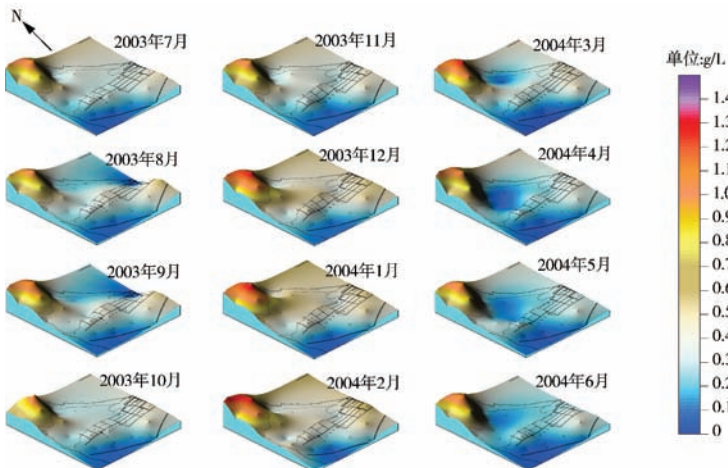


图4 2003年7月至2004年6月锂的时空变化

Fig. 4 Spatial and time changes of Li from July 2003 to June 2004

3.4 地下卤水中硼的时空变化特征

硼的高值区基本分布在自西北至东南的穿过湖区和采卤渠的带状区域上,在东北部和西南部的较小范

围内为明显的低值区,但硼的整体品位分布比较均衡,不象钾和锂那样在空间上有明显的分异(图5)。从时间上来看,在初采卤期的8、9月份,由于丰水期的到来使东北部出现了明显的低值区,这与钾锂相似;在停采恢复期(2003年11月-2004年2月),矿区硼含量整体明显上升,2004年1月在西北部的孔隙卤水处出现了本观测年的最高值(接近3 g/L),硼的含量在整个矿区分布相对钾锂要均匀;后采卤期(2004年3-6月)在矿区中部的采渠附近形成了一个较明显的低值区,但到6月份时已得到明显改观。

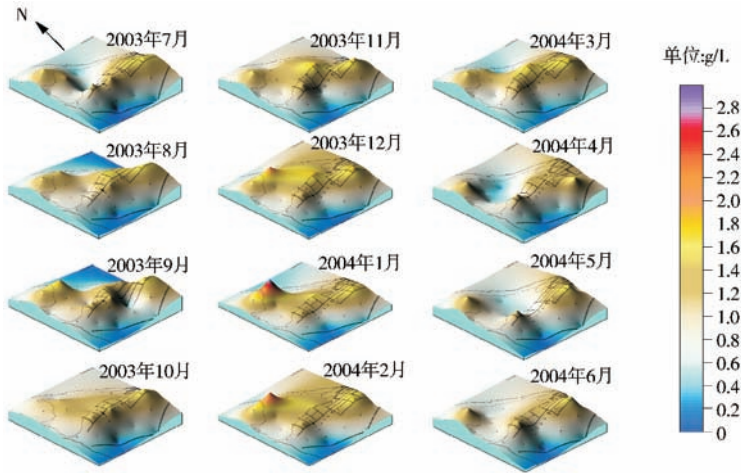


图5 2003年7月至2004年6月硼的时空变化

Fig. 5 Spatial and time changes of B_2O_3 from July 2003 to June 2004

3.5 不同类型卤水中钾锂硼的变化

为进一步了解不同时期钾锂硼在不同类型卤水中的变化规律,我们对本观测年的数据进行了统计分析(表1)。从表1中可以看出,地下卤水中钾锂硼的含量在停采期一般较采卤期要高;而就不同卤水类型而言,三种组分在孔隙水中的含量要高于晶间水,其中钾和锂相差一倍或更多,而硼则相差不多;随着时间的变化,三种元素的变化趋势基本上是一致的。至于湖表卤水,三种有益组分在不同时段几乎都要低于地下卤水(承压水和孔隙水),其总体平均值更是要远低于后者,但湖表卤水与地下卤水的变化特点相似,具有一定的同步性。

表1 不同类型卤水中钾锂硼含量随时间的变化

Tab. 1 Content changes of K, Li and B in different type brines with time

时段	年.月	K(g/L)			Li(g/L)			B(g/L)		
		承压水	孔隙水	湖表水	承压水	孔隙水	湖表水	承压水	孔隙水	湖表水
初采卤期	2003.7	6.699	12.020	0.900	0.287	0.627	0.025	0.889	0.967	0.186
	2003.8	6.716	11.882	0.125	0.289	0.602	0.075	0.911	1.005	0.180
	2003.9	7.704	13.308	2.349	0.301	0.698	0.114	0.945	1.082	0.405
	2003.10	7.406	11.031	5.723	0.298	0.602	0.192	0.985	0.988	0.771
停采期	2003.11	7.422	12.177	5.808	0.285	0.606	0.235	0.987	1.026	1.029
	2003.12	7.379	12.594	7.662	0.375	0.820	0.363	1.041	1.073	1.231
	2004.1	7.861	13.394	-	0.367	0.815	-	1.041	1.209	-
	2004.2	7.407	12.809	5.459	0.376	0.823	0.263	1.075	1.132	0.918
后采卤期	2004.3	7.448	12.843	0.100	0.259	0.683	0.003	0.991	1.006	0.021
	2004.4	6.120	8.882	2.217	0.205	0.531	0.085	0.820	0.819	0.305
	2004.5	6.230	10.882	3.404	0.212	0.581	0.100	0.831	0.917	0.388
	2004.6	5.927	10.511	3.008	0.198	0.556	0.125	0.836	0.868	0.554
平均值		7.026	11.861	3.341	0.288	0.662	0.144	0.946	1.008	0.544

3.6 水位变化与钾锂硼变化的关系

一般认为,水位变化是影响卤水水化学成分变化的一个重要的动力学因素,如对察尔汗首采区的研究认为高水位对应着高的钾离子含量^[31]. 对本观测年各观测井钾锂硼含量与水位高程相关性研究表明,大部分观测井三元素与水位之间为负相关,仅有部分观测井(基本分布在湖区附近及采渠中心部位)为正相关,相关系数绝对值整体也偏低(图6),这说明水位变化对地下卤水中钾锂硼的变化影响不甚明显. 水位变化的统计分析也表明,各观测孔的标准差和变异系数有明显的分异现象,除了采渠中心附近(降落漏斗区)的一些观测井较高外,其余大部分地区都很小,这说明大部分矿区地下卤水基本处于滞流状态,目前抽卤活动对地下卤水原始水动力状态并未有大的改变.

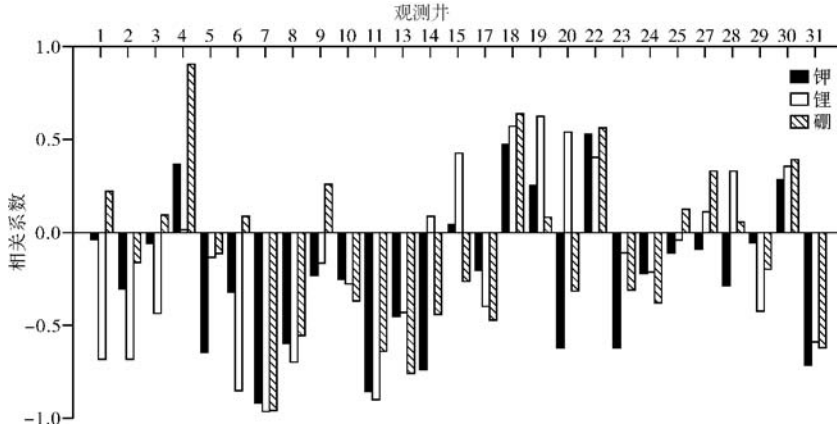


图6 钾锂硼含量与水位的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between contents of K, Li and B and water levels

上述分析表明,钾锂硼的变化与水位变化没有明显的关系,其时空变化特征很可能与其自身的理化性质有关,至少目前支持高水位高钾含量的证据尚不充分,这与对察尔汗盐湖的观察不一致,个中原因值得探讨. 同时大部分矿区地下卤水基本处于滞流状态,因此当前抽卤活动的影响半径还是有限的.

4 相图分析

根据盐湖卤水的化学组分,按 M. Г. 瓦里亚什科分类方法,孔隙卤水区的水化学类型主要是氯化物型,而晶间卤水和湖表卤水则主要为硫酸盐型,因此对两种类型的卤水分别作四元体系介稳相图^[32]和五元体系介稳相图^[33]分析(图7),以观察它们在三个不同时段即初采卤期(以2003年8月为代表)、停采期(以2004年1月为代表)和后采卤期(以2004年4月为代表)的析盐状况.

晶间卤水(基本属于硫酸镁亚型)的投影点主要集中在泻利盐相区与软钾镁矾、钾石盐及光卤石三个相区的共结线附近,但同时也看到,停采期的投影点更接近钾石盐相区,这表明抽卤活动对晶间卤水的整体析盐状况影响不大,但停采期卤水基本已达到了钾石盐析出阶段(图7a). 至于湖表卤水,其投影点分布比较离散,这与其受外界因素变化影响很大有关. 孔隙卤水(基本属于氯化物型)的投影点都在石盐相区之内,它们均未达到钾石盐或光卤石析出阶段(图7b).

相图分析表明三个时段基本处于类似的析盐阶段,抽卤活动似乎并未对其析盐状况造成明显影响. 停采期基本达到了钾石盐析出阶段,这很可能与其所处季节为冬季、卤水温度较低、一些冷相矿物^[34](如芒硝)的大量析出从而相对提高了钾的含量有关.

5 结论和讨论

对西太湖矿区地下和地表卤水时空变化初步分析表明:

(1) 矿区地下卤水中钾锂硼的空间分布主要表现为孔隙卤水区的高值和晶间卤水区的相对低值,三者

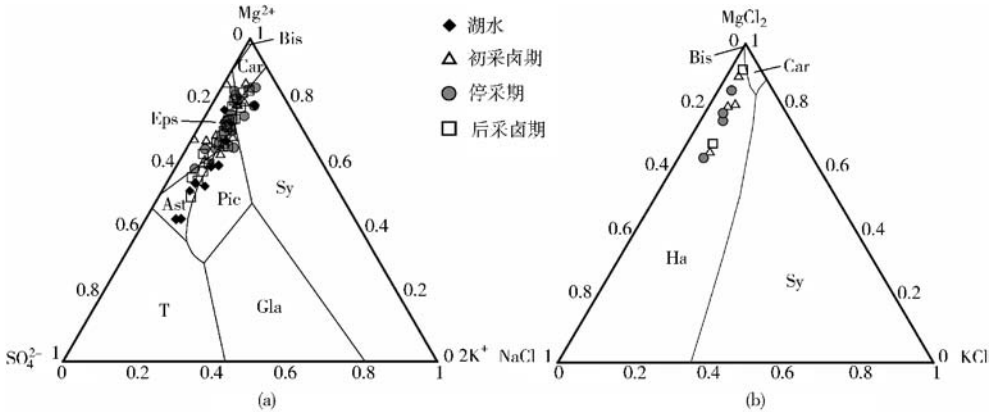


图7 不同时段卤水的介稳相图

Ast:白钠镁矾; Bis:水氯镁石; Car:光卤石; Esp:泻利盐; Gla:钾芒硝;
Ha:石盐; Pic:软钾镁矾; Sy:钾石盐; T:无水芒硝

Fig. 7 Metastable phase diagram of brines in different periods

的区别主要在于分异程度上的差异。

(2) 钾锂硼在停采期的含量要高于采卤期,除在采卤渠中部附近三种元素的含量变化较大外,其余大部分地区随时间的变化并不明显,尤其是在西北部孔隙卤水区。

(3) 湖卤水中钾锂硼的含量变化主要受控于地表径流补给的变化(或季节的变化)。同时湖表卤水与地下卤水中的钾锂硼变化表现出一定的同步性,但这种同步性未必表明它们的驱动因子是相同的。

(4) 地下卤水水位的变化与钾锂硼含量之间没有显著的相关性,而大部分地区的卤水基本处于滞流状态,采卤活动和补给基本未改变它们的原始状态,这也可以从一定程度来解释矿区大部分地区钾锂硼含量变化都不甚明显的原因,显然这对于以当前的采卤方式扩大采卤量是不利的。地下卤水中钾锂硼的变化很可能主要是由其本身的理化性质的变化所引起的,外因尚处于次要地位。

(5) 不同时段地下卤水的析盐状况并没有明显变化,虽然停采恢复期已基本达到钾石盐析出阶段,但这也很可能是由于卤水自身理化性质随季节变化而引起的,这个问题值得进一步研究,同时需要进一步预测在复杂条件下盐类结晶析出的规律以改善结盐状况和提高卤水品质。

卤水是一个理化性质极为复杂的动态变化体系,影响其变化的因素很多,在短时间内和有限的资料条件下只能作出初步的结论,采卤活动和补给作用所引起的流场变化与化学场变化之间的关系尚不明确。对卤水水化学的时空动态变化的监测具有长期性,这需要进一步加大监测力度以便为矿区采卤活动提供可靠的依据。

致谢:青海中信国安科技发展有限公司提供了数据资料,公司各位领导对本研究工作一直大力支持,在此笔者表示衷心感谢。

6 参考文献

- [1] 李润民. 察尔汗盐湖石盐晶间卤水钾矿在开采中尚需进行的研究工作. 化工矿产地质, 1996, 18(3): 213-218.
- [2] 郑秀清, 施婉, 董悦安. 察尔汗盐湖首采区含钾卤水水量水质模拟. 西北地质科学, 1997, 18(1): 63-69.
- [3] 李海龙, 马国祥. 察尔汗盐湖地下卤水动态规律研究. 海洋与湖沼, 1999, 30(2): 212-218.
- [4] 徐少康. 察尔汗盐湖察尔汗二级补给系统 S3 盐层晶间卤水中 KCl 的分异特征、富集规律及其成因. 盐湖研究, 1999, 7(1): 1-10.
- [5] 于升松, 谭红兵, 邵明显等. 察尔汗盐湖 S4 层晶间卤水的粘滞性. 海洋与湖沼, 2000, 31(5): 553-557.

- [6] 王石军. 察尔汗盐湖盐田生产现状及改进措施. 盐湖研究, 2001, 9(2): 42-47.
- [7] 刘兴起, 谭红兵, 葛文胜. 察尔汗盐湖采卤过程中晶间卤水水位时空变化规律的趋势面分析. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 381-386.
- [8] 陈祥. 察尔汗盐湖卤水中 CaCl_2 对盐田生产的影响. 盐湖研究, 2002, 10(3): 44-47.
- [9] 陈祥. 浅论察尔汗盐湖盐田生产. 化工矿物与加工, 2004, (2): 21-24.
- [10] 安莲英, 殷辉安, 唐明林等. 察尔汗盐湖固液矿转化实验研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 75-77.
- [11] 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. 化工矿物与加工, 2005, (1): 30-32.
- [12] 张兆广, 祁燕. 察尔汗盐湖低品味卤水自然蒸发试验研究. 盐湖研究, 2006, 14(1): 17-23.
- [13] 郭新华, 王春男, 马明珠. 青海柴达木盆地察尔汗盐湖首采区钾镁盐矿床开发及老卤排放对液体钾矿的影响现状. 西北地质, 2006, 39(1): 98-104.
- [14] 杨占敖, 哈占芳, 张跃东. 青海盐湖集团一期工程采卤现状综述及可持续发展探讨. 盐湖研究, 2005, 13(3): 46-51.
- [15] 杨建元, 程温莹, 张勇等. 东台吉乃尔湖晶间卤水综合利用途径研究. 矿物岩石, 1995, 15(2): 81-85.
- [16] 杨建元, 程温莹, 邓天龙等. 东台吉乃尔湖晶间卤水兑卤制取高品味钾镁混盐研究. 海湖盐与化工, 1995, 24(4): 21-24.
- [17] 张军, 刘铸唐, 张宝全等. 东台吉乃尔盐湖卤水比蒸发系数测定及回归方程. 盐湖研究, 1997, 5(2): 7-12.
- [18] 张辉, 韩风清, 梁青生. 柴达木盆地东台吉乃尔盐湖盐类沉积特征及成盐年代的初步研究. 化工矿产地质, 2001, 23(2): 83-85.
- [19] 白福易, 潘存峰. 吉兰泰盐湖规划采区采盐过程中水动态、水化学监测分析. 海湖盐与化工, 1994, 23(4): 1-7.
- [20] 白福易, 潘存峰. 吉兰泰盐湖地下水水盐动态长期监测. 海湖盐与化工, 1997, 26(6): 13-17.
- [21] 于升松, 白福易, 李浩基. 吉兰泰盐湖资源环境与可持续发展研究. 北京: 科学出版社, 2001: 1-219.
- [22] 白福易, 徐志强, 潘存峰. 吉兰泰盐湖水溶开采工艺技术开发应用. 海湖盐与化工, 2005, 34(6): 30-34.
- [23] 刘成林, 焦鹏程, 王弭力等. 新疆罗布泊第四纪盐湖上升卤水流体及其成钾意义. 矿床地质, 2003, 22(4): 386-392.
- [24] 江梅. 罗布泊钾肥工程地下卤水采输方案探讨. 海湖盐与化工, 2005, 34(2): 29-34.
- [25] 赵元艺, 郑绵平, 卜令忠. 西藏扎布耶盐湖盐田高品位 Li_2CO_3 混盐的制取试验及意义. 地球学报, 2003, 24(5): 459-462.
- [26] 乜贞, 张永生, 卜令忠等. 西藏扎布耶盐湖卤水冬季制卤试验研究. 地质通报, 2005, 24(4): 386-390.
- [27] 赵元艺, 郑绵平, 卜令忠等. 西藏碳酸盐型盐湖卤水锂盐提取盐田工艺研究. 海湖盐与化工, 2005, 34(2): 1-7.
- [28] 罗莎莎, 郑绵平. 西藏地区盐湖锂资源的开发现状. 地质与勘探, 2004, 40(3): 11-14.
- [29] 田淑芳, 秦绪文, 郑绵平等. 西藏扎布耶盐湖总含盐量遥感定量分析. 现代地质, 2005, 19(4): 596-602.
- [30] 郑喜玉, 张明刚, 徐昶等. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社, 2002: 163-164.
- [31] 于升松等. 察尔汗盐湖首采区钾卤水动态及其预测. 北京: 科学出版社, 2000: 301.
- [32] 牛自得, 程芳琴. 水盐体系相图及其应用. 天津: 天津大学出版社, 2002: 251.
- [33] 金作美, 肖显志, 梁式梅. $(\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}), (\text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}), \text{H}_2\text{O}$ 五元体系介稳平衡研究. 化学学报, 1980, 38(4): 313-321.
- [34] 郑绵平. 第四纪盐湖与古气候. 第四纪研究, 1998, 18(4): 297-307.