

内蒙古西部地区盐湖水化学特征

张燕霞^{1,2} 韩凤清¹ 马茹莹^{1,2} 王 腾^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 2008 年 9~10 月和 2009 年 9 月对内蒙古西部地区 14 个盐湖进行了考察、采样和分析。研究发现, 本区盐湖卤水主要离子含量顺序为 $\text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 次要离子为 $\text{Ca}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$, 微量元素为 $\text{B}_2\text{O}_3 > \text{Br}^- > \text{Li}^+$ 。 Na^+ 的分布特征为东部高, 北部中等, 西南部偏低; 而 Cl^- 为东高西低; K^+ 大致为南高北低; Mg^{2+} 为中部高, 西部低, 北部与南部中等。 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 的区域分布特征均不明显; 微量元素 Li^+ 、 Br^- 、 B_2O_3 含量虽局部(两大沙漠连接带)有所富集, 但绝对含量不高。对天然盐湖和人工采盐池的卤水进行了对比。采盐池中卤水因为蒸发强烈, 离子浓度显著高于天然盐湖。分析天然盐湖与采盐池卤水离子浓度的变化规律发现, 卤水蒸发初期 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子浓度随矿化度的升高而增大, Ca^{2+} 离子浓度明显下降, 卤水蒸发后期 Mg^{2+} 、 K^+ 大量富集, 整个卤水蒸发过程中微量元素 Li^+ 与 B_2O_3 浓度一直随矿化度的升高而增大。这些结果对内蒙古西部盐湖的研究与开发都具有积极意义。

关键词: 内蒙古; 盐湖; 卤水; 水化学

中图分类号: P641.464

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2013)03-0017-08

1 引 言

内蒙古自治区是我国盐湖分布较多的地区之一, 共有 375 个盐湖, 盐湖面积 1 441 km²。内蒙古高原盐湖分布不均匀, 具有明显的区域性特征^[1]。内蒙古盐湖面积都比较小, 绝大多数盐湖面积均在 100 km² 以下, 基本上是小盐湖群集的高原盐湖分布区。根据区域地质构造条件和自然地理环境分析, 内蒙古高原盐湖分布区与湖泊分区基本一致, 分为呼伦贝尔高原盐湖区、锡林郭勒—乌兰察布高原盐湖区、鄂尔多斯高原盐湖区、阿拉善高原盐湖区^[2]。本次研究的盐湖主要分布在内蒙古自治区西部阿拉善高原盐湖区腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠。该区属于高平原荒漠地貌区, 气候干燥, 属典型的大陆性干旱气候^[2]。

盐湖及其沉积物可以反映出盐湖演化的整个过程和成盐作用的程度, 盐湖赋存有丰富的天然卤水, 其中也含有各类有用的元素, 具有很高的经济价值, 是盐湖资源的重要组成部分。因此, 研究盐湖卤水的水化学特征, 对于了解该区盐湖的形成演化、成盐规律和资源的开发利用, 都具有积极的意义^[2]。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

本课题组成员分别于 2008 年 9~10 月和 2009 年 9 月对内蒙古西部地区部分盐湖进行了考察, 并采集了卤水样品。本次采集样品卤水类型多为湖表卤水与晶间卤水。卤水样品直接用塑料桶采集, 采样前先用待取卤水洗涤 5

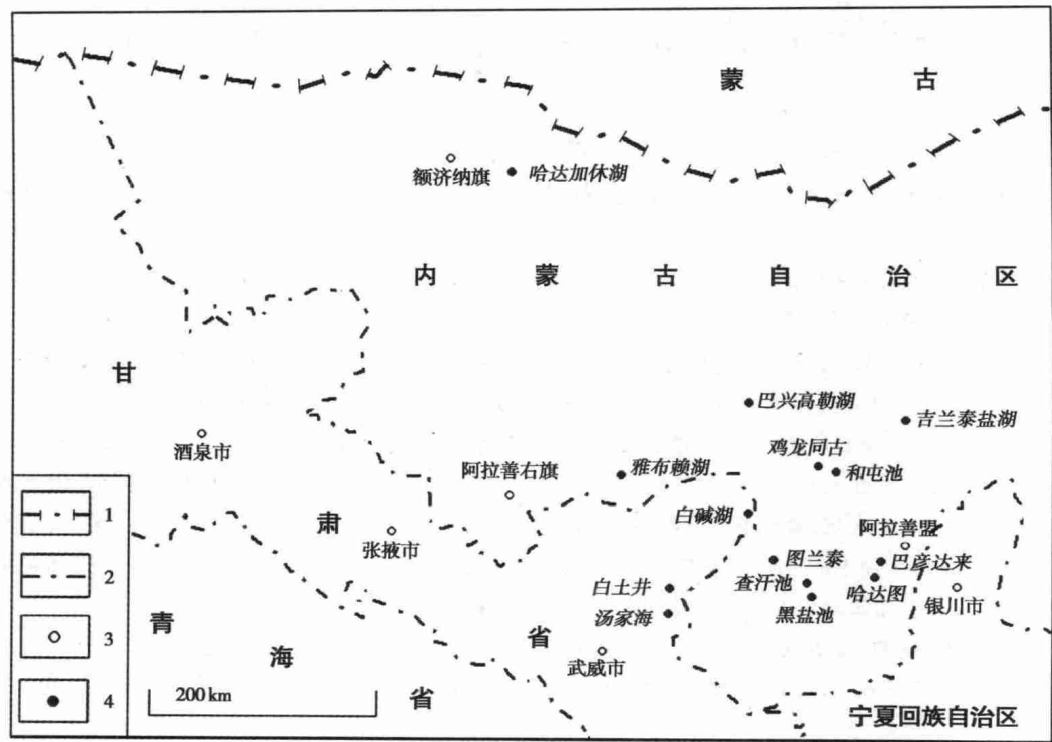
收稿日期: 2013-03-21; 修回日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(40772079) 和国家 973 项目(2012CB426501) 支持

作者简介: 张燕霞(1989-) 女, 硕士研究生, 主要研究方向为盐湖地球化学。

通信作者: 韩凤清。Email: hanfq@isl.ac.cn。

次,每个样品采样量为 5 L,现场进行密封,以便送实验室分析。样品采集点如图 1 所示,采样点、野外编号及卤水类型如表 1 所示。



1. 国界 2. 省界 3. 主要城市 4. 采样点

图 1 内蒙古西部地区采样盐湖分布示意图

Fig. 1 Sketch map of sampling salt lake in west Inner Mongolia

表 1 采样点、野外编号及卤水类型

Table 1 Sampling points , serial numbers and the type of brine

野外编号	盐湖名称	卤水类型	采样点坐标(北纬 ,东经)	湖面海拔 /m
HDHX01	哈达贺休湖	孔隙卤水	41°54′ ,101°50′	1 000
BSGL01	巴兴高勒湖	湖表卤水	39°59′ ,104°08′	1 200
YB01	雅布赖	晶间卤水	39°23′ ,102°49′	1 230
BJH01	白碱湖	湖表卤水	39°09′ ,104°09′	1 285
BTJ01	白土井	湖表卤水	38°27′ ,103°17′	1 370
TJH01	汤家海湖	湖表卤水	38°16′ ,103°16′	1 323
TLT01	图兰泰湖	湖表卤水	38°40′ ,104°19′	1 318
HYC - 01	黑盐池湖	湖表卤水	38°18′ ,104°41′	1 316
CHC01	查汗池	湖表卤水	38°23′ ,104°39′	1 313
JL01	鸡龙同古湖	湖表卤水	39°23′ ,104°50′	1 154
HT01	和屯池	晶间卤水	39°21′ ,105°00′	1 162
14 - 2	吉兰泰	晶间卤水	39°45′ ,105°43′	1 023
BYDL - 1	巴彦达来	晶间卤水	38°35′ ,105°24′	1 294
HDT - 1	哈达图	晶间卤水	38°31′ ,105°21′	1 265

2.2 样品的化学分析

卤水样品元素分析项目包括 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Li^+ 、 Br^- 、

B_2O_3 含量的测定等,所有分析项目均在中国科学院青海盐湖研究所按项目的不同,用不同测试方法及仪器分析完成(表2)^[3]。

表2 样品分析及测试精度^[3]

Table 2 Analysis methods and accuracy

分析项目	测试方法及仪器	测试精度
K^+ 、 SO_4^{2-} 离子含量	重量分析法	<0.5%
Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 及 HCO_3^- 离子含量	滴定分析法	<0.2%
Na^+ 离子含量	使用差减法计算	<2%
B_2O_3 含量	ICAP6500 DUO 等离子体光谱仪	<5%
Li^+ 含量	磷酸钠原子吸收光谱法	<2%

表3 内蒙古西部地区盐湖卤水组成及卤水矿化度

Table 3 Chemical composition and salinity of salt lakes brine in west Inner Mongolia

盐湖名称	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-
		离子的质量浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)					
哈达贺休	1.07	0.42	19.26	0.39	5.89	35.44	21.13
巴兴高勒湖	1.21	5.42	104.38	0.14	3.49	61.70	129.35
雅布赖	1.19	1.29	103.45	0.47	3.40	24.96	152.80
白碱湖	1.17	1.03	68.85	0.51	5.37	83.06	62.18
白土井	1.15	4.82	75.01	0.54	1.28	35.40	98.41
汤家海湖	1.17	0.91	85.22	0.41	1.60	52.90	98.32
图兰泰湖	1.06	0.58	26.73	0.50	2.04	21.71	32.41
黑盐池湖	1.05	0.96	20.66	0.17	1.64	8.48	31.36
查汗池	1.22	4.15	117.85	0.31	6.70	27.74	184.78
鸡龙同古	1.19	0.96	71.18	0.46	6.27	85.90	65.61
和屯池	1.23	2.25	113.93	0.19	11.02	42.72	178.34
吉兰泰湖	1.21	2.27	102.30	0.25	10.53	32.55	166.70
巴彦达来	1.23	4.30	134.61	0.19	3.92	119.45	134.63
哈达图	1.27	3.31	142.17	0.30	2.82	103.72	153.78
盐湖名称	HCO_3^-	CO_3^{2-}	矿化度		Br^-	Li^+	B_2O_3
		质量浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	
哈达贺休	0.97	0.04	83.06		5.63	1.32	35.42
巴兴高勒湖	1.46	<0.005	305.20		36.8	25.26	878.8
雅布赖	0.18	<0.005	286.45		2.27	1.50	31.64
白碱湖	0.07	0.03	221.07		2.48	1.66	31.91
白土井	0.18	<0.005	215.55		0.8	0.96	21.09
汤家海湖	0.27	<0.005	239.50		1.2	1.38	19.47
图兰泰湖	0.12	<0.005	84.02		0.87	1.34	14.33
黑盐池湖	0.24	0.03	63.43		1.5	1.66	23.25
查汗池	0.28	<0.005	341.66		8.58	3.82	93.02
鸡龙同古	0.58	0.16	230.82		5	9.22	183.3
和屯池	0.33	<0.005	348.63		23.75	16.10	89.23
吉兰泰湖	0.25	<0.005	314.73		1.88	3.62	21.09
巴彦达来	0.72	<0.005	397.46		24.43	1.23	90.84
哈达图	0.49	<0.005	406.35		51.9	1.27	118.51

使用酚红分光光度法^[4]测定盐湖卤水中的溴离子。该方法较荧光素分光光度法简单、快速、准确,实验结果相对标准偏差小,平均回收率高(96.58%),测定方法如下。

1) 标准曲线的绘制 取一系列溴离子标准溶液(含 Br^- 为 0 ~ 80 μg) 于 50 mL 容量瓶中,用去离子水稀释至约 30 mL,加入 1.00 mL $\text{pH} = 4.60$ 的 NaAc-HAc 缓冲溶液,0.40 mL 0.24 g/L 酚红溶液,充分摇匀,然后用移液管准确加入 1.00 mL 2 g/L 氯胺 T 溶液,摇动 1 min,立即加入 1.00 mL 25 g/L $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液,摇动 15 s,去离子水定容、摇匀。10 min 后以试剂空白作参比、1 cm 比色皿、595 nm 波长处测定吸光度,并以 Br^- 浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标作图。

2) 卤水中溴离子的测定 卤水试样前处理时,由于 I^- 的存在对该法测定 Br^- 干扰较大,所以测定卤水中 Br^- 之前,要预先除去 I^- 。具体步骤是:取 50 mL 分液漏斗,加入 1.00 mL NaAc-HAc ($\text{pH} = 4.60$) 缓冲溶液,5.00 mL 卤水,摇匀,加入 7.00 mL 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ NaNO_2 溶液,摇匀,放置 5 min;加入 2.00 mL 丁酮,摇动 5 min,放置 10 min;加入 5.00 mL 环己烷萃取,摇动 5 min,放置 10 min 后,将水相分液到 50 mL 容量瓶中。

取适量除去 I^- 后的卤水于 50 mL 容量瓶中,加入 5.00 mL 10% NaCl 溶液,以下按前述标准曲线的步骤操作,得出样品卤水中溴离子的浓度。

经测试分析,本次采样盐湖卤水中各种离子含量如表 3 所示。

3 内蒙古西部地区盐湖卤水水化学特征

3.1 卤水常量元素水化学分析

如表 3 所示,内蒙古西部地区盐湖卤水中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 8 种离子含量占到总离子含量 98% 以上,是该区盐湖卤水的主要化学组成,也是确定盐湖成盐作用和盐湖卤水化学类型的决定因素。这 8 种离

子中又以 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子占优势,这 3 种离子占该区盐湖卤水离子总数量的 90% 以上。由此可知该区盐湖卤水所析出的蒸发盐类主要是含钠的硫酸盐和氯化物盐类,如芒硝 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和石盐 NaCl 。本区盐湖中吉兰泰盐湖的石盐资源储量达 1.1227×10^8 t,雅布赖盐湖的芒硝储量达 3.137×10^6 t,都是具有工业开采价值的盐湖矿床^[2]。

研究区大部分盐湖卤水中阳离子含量顺序为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$,巴兴高勒湖、白土井、巴彦达来和哈达图这 4 个盐湖卤水的阳离子含量排列顺序为 $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$,这种阳离子排列顺序的差异,可能与地质环境、物质来源以及盐湖演化阶段有关。

研究区盐湖卤水阳离子中 Na^+ 占主要优势,因为 Na^+ 的水化能力大,易于溶解被带到海洋、河流或盐湖中,钠是能以溶解状态在沉积循环中大量富集的元素^[6], Na^+ 平均含量为 84.69 g/L。 Na^+ 浓度在本盐湖区的分布特征为东部高(如巴彦达来、哈达图、和屯池等盐湖的 Na^+ 浓度范围在 114 ~ 142 g/L 之间),北部中等(如雅布赖、吉兰泰湖、巴兴高勒湖的 Na^+ 浓度范围在 102 ~ 104 g/L 之间),西部偏低(如白土井、汤家海湖、黑盐池湖等盐湖的 Na^+ 浓度范围在 19 ~ 85 g/L 之间)。

研究区盐湖卤水的 K^+ 含量较低,在 0.42 ~ 5.42 g/L 之间。本区的钾离子没有形成大规模的富集,是由该区不具备富 K 的地球化学背景和成钾的自然条件决定的。首先,在表生条件下 K^+ 迁移、搬运过程中易被土壤和生物介质所吸附,从而限制了 K^+ 在盐湖卤水中的富集;其次,本区盐湖盆地汇水面积小,K 的来源有限,所以很难形成有工业开采价值的富钾矿化卤水^[1]。本盐湖区域中的 K^+ 浓度分布特征大致为南部高(如查汗池、哈达图、白土井等盐湖的 K^+ 浓度范围在 3.31 ~ 4.82 g/L 之间),北部低(如哈达贺休、鸡龙同古湖、吉兰泰等盐湖的 K^+ 浓度范围在 0.42 ~ 2.27 g/L 之间),但北部个别盐湖的 K^+ 含量也比较高,如巴兴高勒湖的 K^+ 浓度为 5.42 g/L,南部个别盐湖的 K^+ 含量较低,如图兰泰盐湖 K^+ 浓度为 0.58 g/L。

卤水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 易与 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 形成不溶盐,所以盐湖卤水中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 平均含量不高,分别在 1g/L 以下与 10g/L 以下。 Ca^{2+} 由于浓度含量较低,区域分布特征不明显。 Mg^{2+} 在研究区域的分布特征为中部高(如吉兰泰、和屯池、白碱湖盐湖的 Ca^{2+} 浓度范围在 $5.37 \sim 11.02\text{g/L}$ 之间),北部与南部中等(如巴彦达来、雅布赖湖、哈达图盐湖的 Ca^{2+} 浓度范围在 $2.82 \sim 3.92\text{g/L}$ 之间),西部低(如白土井、汤家海与图兰泰湖的 Ca^{2+} 浓度范围在 $1.28 \sim 2.04\text{g/L}$ 之间)。

除哈达贺休与鸡龙同古湖之外,本区盐湖卤水中阴离子排列顺序均为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$ 。本区盐湖卤水中阴离子主要为 Cl^- ,平均含量 107.84g/L ,这与氯化物盐类在水中的溶解度大,物质来源较广(通过岩石风化,由河水和潜水补给)有关。本区 Cl^- 的区域分布特征大致为东部高,西部低。东部地区盐湖如吉兰泰盐湖、和屯池、哈达图等盐湖 Cl^- 浓度范围在 $129.35 \sim 178.34\text{g/L}$ 之间,西部地区盐湖如图兰泰湖、黑盐池湖等盐湖 Cl^- 浓度范围在 $21.13 \sim 98.41\text{g/L}$ 之间。

盐湖卤水中 SO_4^{2-} 含量范围在 $8.48 \sim 119.45\text{g/L}$ 之间,平均离子含量为 52.55g/L , SO_4^{2-} 含量在本研究区域内无明显区域分布特征。卤水中的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 易与 Na^+ 作用,生成 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 等盐类沉积,因此 HCO_3^- 与 CO_3^{2-} 在本区盐湖卤水中含量较低,分别在 1.5g/L 以下与 0.2g/L 以下。 HCO_3^- 浓度区域分布特征为西部高(如哈达贺休与巴兴高勒湖的 HCO_3^- 浓度分别为 0.97g/L 与 1.46g/L),中部低(如白土井、查汗池、汤家海湖等盐湖的 HCO_3^- 浓度在 $0.07 \sim 0.28\text{g/L}$ 之间),东部中等(如和屯池、吉兰泰湖、哈达图等盐湖的 HCO_3^- 浓度在 $0.25 \sim 0.72\text{g/L}$ 之间)。 CO_3^{2-} 在各盐湖含量都特别低或者低于检测限,离子含量在 $<0.005 \sim 0.16\text{g/L}$ 之间,区域分布特征不明显。

由表3可以看出,本区盐湖卤水矿化度平均为 252.90g/L ,这些卤水都属于高矿化度盐

湖卤水,处于饱和或未饱和浓盐水溶液状态。卤水矿化度最高的盐湖为哈达图盐湖,卤水矿化度为 406.34g/L ,卤水矿化度最低的盐湖是黑盐池,卤水矿化度为 63.53g/L 。盐湖卤水矿化度受自然条件的影响比较明显,特别受气候影响尤为突出,本研究区属于干旱气候地区,年蒸发量高,卤水蒸发强烈,矿化度较高^[2]。

3.2 盐湖卤水微量元素分布

Br^- 主要在海水中富集,平均含量值为 65mg/L ^[6]。由表3可以得知,内蒙古盐湖卤水中 Br^- 含量在 $0.87 \sim 51.90\text{mg/L}$ 之间,远远低于海水的平均溴含量值,这与本区盐湖为陆相成因盐湖,补给均为地下水或降水以及盐湖演化处于较早阶段有关。其中哈达图盐湖 Br^- 离子含量值为最高,达 51.90mg/L 。除哈达图之外,和屯池、巴彦达来湖与巴兴高勒湖这3个盐湖的 Br^- 含量也达到了 20mg/L 以上,较本区其他盐湖的 Br^- 含量值高10倍左右。

与青藏高原盐湖相比, Li^+ 在内蒙古西部地区盐湖卤水中含量并不高。内蒙古西部地区盐湖卤水 Li^+ 含量在 $1.23 \sim 25.26\text{mg/L}$ 之间,而青藏高原富锂盐湖的 Li^+ 含量在 $120 \sim 260\text{mg/L}$ 之间^[7]。本区 Li^+ 含量值较高的盐湖为巴兴高勒湖(25.26mg/L)、鸡龙同古湖(9.22mg/L)与和屯池(16.10mg/L)。除上述3个盐湖之外,研究区域的其它盐湖卤水中 Li^+ 含量值均低于 5mg/L 。

内蒙古西部盐湖卤水 B_2O_3 含量在 $0.80 \sim 51.90\text{mg/L}$ 之间,含量分布不均。其中哈达图盐湖的 B_2O_3 含量值最高(51.90mg/L),是海洋水平均含量(4.5mg/L)的12倍,说明哈达图的硼富集程度比较高。

3.3 盐湖卤水与盐湖采盐池离子浓度对比

本次采样过程中,不仅采集了盐湖卤水样品,同时也对盐湖采盐池进行了卤水样品的采集,各盐湖采盐池与天然盐湖卤水中的主要离子浓度对比数据如表4所示。

表 4 内蒙古西部地区盐湖卤水与盐湖采盐池卤水组成

Table 4 Brine composition of salt lakes and salt lake mining pool in west Inner Mongolia

盐湖与采池名称	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
离子的质量浓度/(g·L ⁻¹)						
巴兴高勒湖	5.42	104.38	0.14	3.49	61.7	129.35
巴兴高勒采池	16.65	123.92	0.09	10.5	92.9	165.45
汤家海湖	0.91	85.22	0.41	1.6	52.9	98.32
汤家海采池	1.24	108.7	0.29	1.83	67.71	124.43
图兰泰湖	0.58	26.73	0.5	2.04	21.71	32.41
图兰泰采池	6.08	100.79	0.09	23.65	88.82	163.98
黑盐池湖	0.96	20.66	0.17	1.64	8.48	31.36
黑盐池采池	7.17	45.43	0.21	11.95	35.4	85.3
哈达图湖	3.3	142.17	0.3	2.82	145.46/(mg·L ⁻¹)	153.78
哈达图盐田	7.5	161.93	0.17	6.11	166.64	166.64
盐湖与采池名称	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	矿化度	Li ⁺	B ₂ O ₃	
质量浓度/(g·L ⁻¹)			/(g·L ⁻¹)	质量浓度/(mg·L ⁻¹)		
巴兴高勒湖	1.46	<0.005	305.2	25.26	878.8	
巴兴高勒采池	2.54	<0.005	410.78	72.02	2596	
汤家海湖	0.27	<0.005	239.5	1.38	19.47	
汤家海采池	0.11	0.01	304.26	1.5	10.82	
图兰泰湖	0.12	<0.005	84.02	1.34	14.33	
图兰泰采池	0.6	<0.005	383.72	5.5	73.28	
黑盐池湖	0.24	0.03	63.43	1.66	23.25	
黑盐池采池	0.21	0.08	185.63	5.52	100.6	
哈达图湖	0.49	<0.005	406.34	0.56	54.78	
哈达图盐田	1.01	<0.005	487.9	1.27	118.51	

由表 4 数据可以看出,盐湖采盐池中的离子浓度高于盐湖卤水中的离子浓度,各采盐池矿化度比盐湖中矿化度高出很多,表明盐湖卤水在采盐池中蒸发强烈。各盐湖由于上层卤水结晶之后,使整个盐湖处于相对封闭状态,蒸发过程缓慢。而人工晒盐是把自然盐湖的卤水引入人工开采的采盐池中,使卤水暴露在空气中,蒸发面积增大,蒸发速率加快,有利于各种盐类矿物如石盐和芒硝等结晶析出。本区石盐和芒硝是在不同季节析出的,由于芒硝的溶解度与温度成正比,而石盐的溶解度与温度变化关系不明显,一般夏季析出石盐,冬季析出芒硝,石盐一般在常温下(15~25℃)密度为 1.220~1.290 析出,而芒硝是在低温条件下(0~-10℃)密度为 1.083~1.248 时析出^[2]。本盐湖区采样时间在 8 末到 9 月底,处于夏末秋初的气候干热期,各盐湖处于石盐析出阶段。

由表 4 数据还可以看出,巴兴高勒采盐池

中的 Mg²⁺、K⁺ 及微量成分 Li⁺、B₂O₃ 的浓度比天然盐湖中高 3 倍左右,富集程度高,Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 这几种离子的富集倍数仅有 1.2~1.5 倍,可能由于这几种离子为常量元素,它们在盐湖卤水中接近饱和,在蒸发过程中富集程度低于其它元素,采盐池卤水的矿化度比天然卤水的矿化度高 100 g/L。CO₃²⁻ 在各采盐池中含量都特别低或者低于检测限,无变化规律可寻。Ca²⁺ 在采盐池中的变化与多数离子相反,这可能与蒸发过程中 Ca²⁺ 与 SO₄²⁻ 形成石膏有关。

汤家海湖与采盐池中离子浓度变化不大,汤家海采盐池大概在析盐初期,采盐池中 K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 离子浓度大概是原盐湖卤水的 1.3 倍,这几种离子的浓度随盐湖卤水矿化度的升高而增加。汤家海采盐池中 Ca²⁺ 与 HCO₃⁻ 较原盐湖卤水中含量有所下降,可能在卤水蒸发的初期, Ca²⁺ 与 SO₄²⁻、HCO₃⁻ 等阴离子

相互反应生成钙盐沉淀,消耗了这几种离子。

图兰泰采盐池中 Mg^{2+} 、 K^{+} 比天然盐湖中的离子浓度高 10 倍, Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 及微量元素 Li^{+} 与 B_2O_3 比天然盐湖中的离子浓度高 4 倍左右,图兰泰采盐池中的 Ca^{2+} 只有原天然盐湖的 1/5。图兰泰采盐池的矿化度是原天然卤水的 4.57 倍,采盐池矿化度达 383.72 g/L,说明该采盐池蒸发强烈, Mg^{2+} 、 K^{+} 大量富集, Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 等阴离子相互反应使 Ca^{2+} 离子含量明显减少。

黑盐池采盐池与上述 3 个盐湖采盐池的蒸发状况类似,采盐池中 Mg^{2+} 、 K^{+} 比天然盐湖中的离子浓度高,浓度比为 7.35, Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 及微量元素 Li^{+} 与 B_2O_3 是天然盐湖卤水离子浓度 3 倍左右,采盐池中的 Ca^{2+} 只有原天然盐湖的 1.2 倍,远没有其他离子的浓度比高。

哈达图采盐池与汤家海采盐池类似,采盐池中 Mg^{2+} 、 K^{+} 及微量成分 Li^{+} 、 B_2O_3 浓度比天然盐湖中的离子浓度高 2 倍, Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 比天然盐湖中的离子浓度高 1.3 倍,采盐池中的 Ca^{2+} 浓度贫化到只有原天然盐湖的一半含量。

综上所述,盐湖卤水在蒸发析盐过程中离子成分变化规律是,卤水蒸发初期 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 离子浓度随矿化度的升高而增大, Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 等阴离子相互反应使 Ca^{2+} 离子含量明显减少。卤水蒸发后期 Mg^{2+} 、 K^{+} 大量富集。整个卤水蒸发过程中微量元素 Li^{+} 与 B_2O_3 的离子浓度一直随矿化度的升高而增大。

4 结 论

本文通过对内蒙古地区 14 个盐湖进行取样、离子成分检测、水化学分析后得出以下结论。

1) 研究区盐湖卤水常量离子分布特征
本区盐湖卤水主要离子为 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} ,次要离子为 Ca^{2+} 、 HCO_3^{-} 、 CO_3^{2-} ,微量元素有 Li^{+} 、 Br^{-} 、 B_2O_3 。盐湖卤水阳离子中 Na^{+} 占主要优势, K^{+} 含量不高,大部分盐湖卤水中的 Mg^{2+} 浓度在 10 g/L 以下, Ca^{2+} 浓度在 1 g/L 以下。

阴离子排列顺序大致为 $\text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^{-} > \text{CO}_3^{2-}$,阴离子以 Cl^{-} 占主要优势,平均含量为 107.84 g/L, Cl^{-} 含量高主要因为其溶解度高且来源较广泛,本区盐湖卤水中 SO_4^{2-} 的平均含量为 52.55 g/L, SO_4^{2-} 含量无明显区域分布特征。 HCO_3^{-} 与 CO_3^{2-} 由于在卤水中与其他阳离子反应,浓度都不高,大部分 CO_3^{2-} 在检测限以下检测不到。本区盐湖卤水的矿化度平均为 252.69 g/L,本区的干燥干旱气候是高矿化度的主要影响因素。

2) 研究区盐湖卤水微量元素分布特征
卤水中的主要微量元素 Li^{+} 、 Br^{-} 都没有在本盐湖区内有富集,其主要因素是本区盐湖皆为陆相成因,补给源为地下水或降水。本区盐湖卤水中平均 Br^{-} 含量值为 5.63 mg/L,平均 Li^{+} 含量值为 5.02 mg/L; B_2O_3 较其他微量元素有一定富集,说明本区硼富集程度高。

3) 盐湖卤水与盐湖采盐池离子对比
通过对比盐湖卤水与采盐池卤水离子浓度,得出盐湖卤水蒸发析盐过程中离子浓度变化的规律。卤水蒸发初期 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 离子浓度随矿化度的升高而增大, Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 等阴离子相互反应使 Ca^{2+} 离子含量明显减少。卤水蒸发后期 Mg^{2+} 、 K^{+} 大量富集。整个卤水蒸发过程中微量元素 Li^{+} 与 B_2O_3 一直随矿化度的升高而增大。

参考文献:

- [1] 郑喜玉,张明刚,徐昶,等.中国盐湖志[M].北京:科学出版社,2002:40-41.
- [2] 郑喜玉,等.内蒙古盐湖[M].北京:科学出版社,1992:137-153,203.
- [3] 中国科学院青海盐湖研究所分析室.卤水和盐的分析方法[M].北京:科学出版社,1988:35-64,252-263.
- [4] 陈玉峰.油田水中溴、碘离子分析方法的改进和研究[D].西宁:中国科学院青海盐湖研究所,2007.
- [5] 张彭熹,等.柴达木盆地盐湖[M].北京:科学出版社,1987:92-93.
- [6] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984:30-40.
- [7] 韩凤清.青藏高原盐湖 Li 地球化学[J].盐湖研究,2001,9(1):55-61.
- [8] 李博昀,刘振敏,徐少康,等.腾格里沙漠地区盐湖卤水

- 水化学特征[J]. 化工矿产地质 2002 24(1):33-38.
- [9] 李磊, 吴启勋, 宋萍, 等. 盐湖化学类型的判别分析研究[J]. 盐湖研究 2004 12(1):46-50.
- [10] 庞西磊, 尹辉. 阿拉善高原盐湖化学特征的主成分分析研究[J]. 四川地质学报 2009 29(2):199-203.

Hydrochemical Characteristics of Salt Lakes in Western Region of Inner Mongolia ,China

ZHANG Yan-xia^{1 2}, HAN Feng-qing¹, MA Ru-ying^{1 2}, WANG Teng^{1 2}

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: 14 salt lakes were investigated in western part of Inner Mongolia from September to October in 2008 and September in 2009. The order of the major ions content in brine is $\text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, the secondary ions is $\text{Ca}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$, and the minor ions is $\text{B}_2\text{O}_3 > \text{Br}^- > \text{Li}^+$. The distribution of Na^+ is high in the east, medium in the north, and low in the southwest, Cl^- is high in the east and low in the west, K^+ is high in the south and low in the north, and Mg^{2+} is high in the middle, low in the west, medium in the north and south. Regularities of SO_4^{2-} , Ca^{2+} and CO_3^{2-} ions distribution are not obvious in this region. The content of minor elements Li^+ , Br^- and B_2O_3 in brine are not high but enriched in the connection area of Badan Jaran Desert and Tengger Desert. By comparing 5 salt lakes' natural brine with their artificial solar pools, it has been found that higher ion concentration in the solar pools than natural lakes because of the stronger evaporation. The rules of brine evaporation process have been found that, Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} ions concentration increase with salinity while Ca^{2+} content decrease in the beginning of brine evaporating; Mg^{2+} and K^+ are enriched in the brine during the end of brine evaporating; the minor elements Li^+ and B_2O_3 are increasing with salinity in the whole process of evaporation. The research results are very important for further study and development of Inner Mongolia salt lakes.

Key words: Inner Mongolia; Salt lakes; Brine; Hydrochemistry

《盐湖研究》2014 年征订启事

《盐湖研究》是原国家科委批准的学术类自然科学期刊,由中国科学院青海盐湖研究所主办,科学出版社出版,1993 年创刊并在国内外公开发行人。

《盐湖研究》是国内唯一的研究盐湖科学和技术的专业性期刊。面向国内外报导交流盐湖、地下卤水、油田水、海水等基础、应用、开发和技术及管理的研究报告、论文和成果,探讨其资源的分离提取技术与综合利用途径。

《盐湖研究》为季刊, A4 开本, 72 页, 每季末月 5 日出版发行。单价: 15.00 元/本, 全年订价: 60.00 元。中国标准刊号: ISSN1008-858X; CN63-1026/P。邮发代号: 56-20。全国各地邮局均可订阅, 也可直接与《盐湖研究》编辑部联系, 联系电话: 0971-6301683