

东台吉乃尔湖间晶卤水 25°C 等温蒸发与天然蒸发试验

陈敬清 刘子琴 符廷进等*

一、前言

近廿年来,由于出现能源问题,尤其石油天然气价格增涨多倍,为此从卤水中提取无机盐类都尽量利用当地自然能源的有利条件。例如美国西尔斯湖本是利用人工蒸发获得固体盐类,近年来也改为盐田日晒。

等温蒸发和天然蒸发是盐田日晒工艺的应用基础工作,即从蒸发过程中的化学组成变化,水分的蒸失量,盐类析出的顺序、种类和数量以及物理化学性质的特异变化以获得盐类分离的控制条件,此外还可从析盐顺序来了解并推测盐湖的演变过程、沉积行为和共生矿物等。

世界各国学者对天然盐湖卤水进行过许多等温蒸发和天然蒸发的研究^[1],尤其是海水型的卤水如苏联的卡拉博加兹海湾、英吉尔湖,美国的大盐湖等。其中H. C. 库尔纳柯夫的研究^[2]指出在天然蒸发下还有介稳平衡的状态并绘出“太阳相图”。M. T. 瓦良什科亦曾根据海水型不同结晶方向的卤水(组成由人工配制)进行等温蒸发的研究^[3]、以探讨海水体系的介稳平衡问题,指出介稳边界与H. C. 库尔纳柯夫“太阳相图”符合,且 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 与 $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 可产生互变,此时由介稳到稳定,KCl与 $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 可转化为钾盐镁矾。金作美同志用等温蒸发的研究方法对Na, K, Mg/Cl, $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 五元水

盐体系的介稳图作了全部相区的研究^[4]。帕普洛、赫德遮列加在动态蒸发研究中指出 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 与KCl或 $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 与光卤石析出时有次生的钾盐镁矾存在^[5]。

东台吉乃尔湖位于柴达木盆地中部地带,其晶间卤水浓度较高,而且高度富集硼、钾和锂盐。原始卤水的化学组成位于介稳图的软钾镁矾区。锂的含量为已发现海水型卤水之冠。为此选择这种卤水进行等温蒸发与天然蒸发除上述一般意义外,还可观察到其中硼、锂的分布行为。

选择等温蒸发的温度系依据柴达木盆地主要蒸发季节的白天气温以及可采用的相图数据而定的。

二、实验部分

(一)实验原料:实验原料取自锂含量有代表性的汽二井钻孔的表面晶间卤水,其化学组成如下(重量%)

比重 1.251/30 $^{\circ}\text{C}$ LiCl 0.633, NaCl 11.54, KCl 3.27, MgCl_2 9.17, MgSO_4 5.06, B_2O_3 0.315。

依据上述卤水的化学组成其 $\text{MgSO}_4/\text{MgCl}_2$ 变质系数为0.552,属于硫酸盐型氯化镁亚型卤水。故选用Na, K, Mg//Cl, $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 五元水盐体系,除NaCl外未析出其它盐类前还得用Na, Mg//Cl, $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 四元交互体系。其相图点见图1、2中的原点。等温

* 刘承敏同志参加本项部分工作。

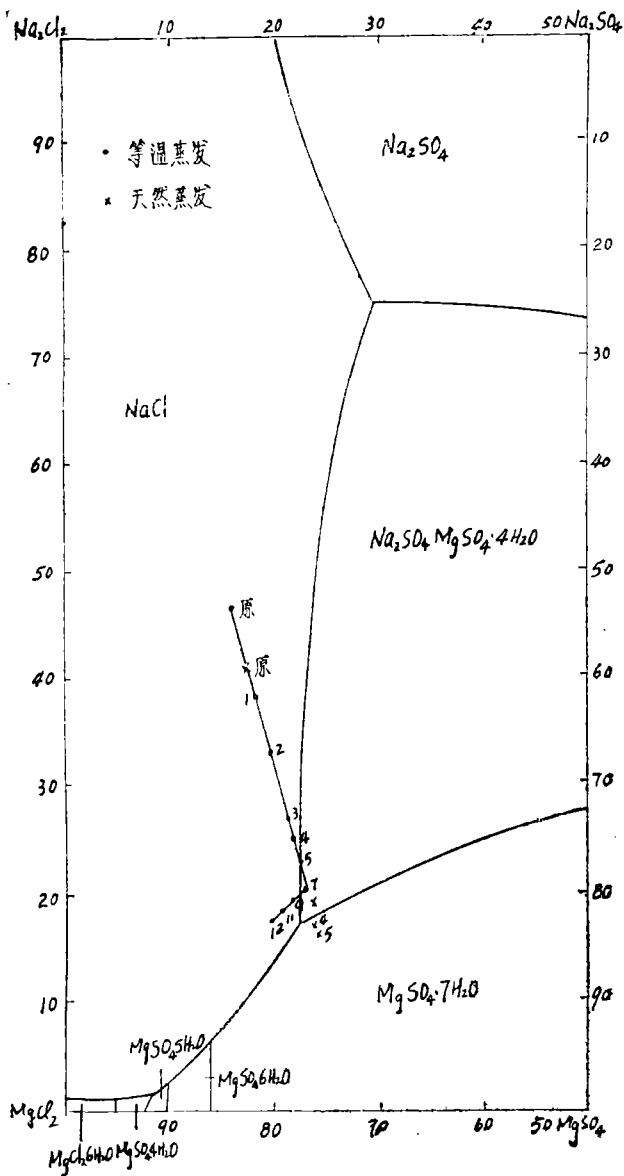


图1 东台吉乃尔湖晶间卤水Na, Mg¹¹Cl, SO₄-H₂O
蒸发结晶路线图

蒸发用水量为32094克,天然蒸发用水量为55公斤。

(二)实验装置: 等温蒸发系利用 750 × 650 × 650毫米鼓风干燥箱的内腔, 另加 4 个 45瓦灯泡作热源并以电子管继电器连接水银接触温度计控制温度, 温度控制在 25 ± 1℃。为了加速蒸发, 间断地利用空气压缩机在卤水表面进行鼓风。卤水先放在搪瓷桶, 量少时改在搪瓷盆中进行。天然蒸发先是放在大

搪瓷桶中, 量少时改在小搪瓷桶中进行。实验地点在察尔汉盐湖上。

(三)实验方法: 等温蒸发及天然蒸发每天在 8:00、14:00 及 20:00 观察三次, 包括气温、水温、比重、湿度等。每天称重一次, 每天或隔天用偏光显微镜观察固相的变化。一般间隔数天或新相出现时用砂蕊管连接取样管插入卤水中吸出所需卤水进行化学分析并测比重(等温蒸发还测粘度)等, 同时进行固液分离。等温蒸发用 #2 砂蕊管、天然蒸发用手摇离心机分离固相, 分离前后全部称重。分离后卤水继续蒸发, 分出固相取样进行化学分析和光学鉴定。必要时还进行显微照相。

化学分析系采用中国科学院化学研究所盐湖卤水分析方法^[7]进行。

(四)实验结果: 等温蒸发实验历时 6 个月左右, 天然蒸发 7 月至 9 月在察尔汉盐湖上进行。其液相测定结果见表 1、2, 蒸发结晶路线见图一、二, 固相测定结果见表 3、4, 析出固相的光学鉴定见表 5、6。

从上述图表中可以看出下列结果:

1. 蒸发结晶路线: 在仅有石盐析出阶段, 利用 Na, Mg¹¹Cl, SO₄-H₂O 四元水盐交互体系的 25℃ 稳定相图还是可以的, 且其延长线基本上都通过 NaCl 原点。当 KCl 开始析出后, 就要改选为 Na, K, Mg¹¹Cl, SO₄-H₂O 五元水盐体系。总的来看蒸发结晶过程基本上是沿着介稳相图或“太阳相图”的蒸发结晶路线进行并在其相区中析出固相。但是原卤水相组成坐落在金作美^[4]所作的介稳图上的软钾镁矾区, 可是在 25℃ 等温蒸发中没有见到软钾镁矾固相, 而天然蒸发则由于清晨水温低(在 15℃ 以下)在盐花中析出少量软钾镁矾, 但在 25℃ 左右分离固相亦见不到软钾镁矾, 这可

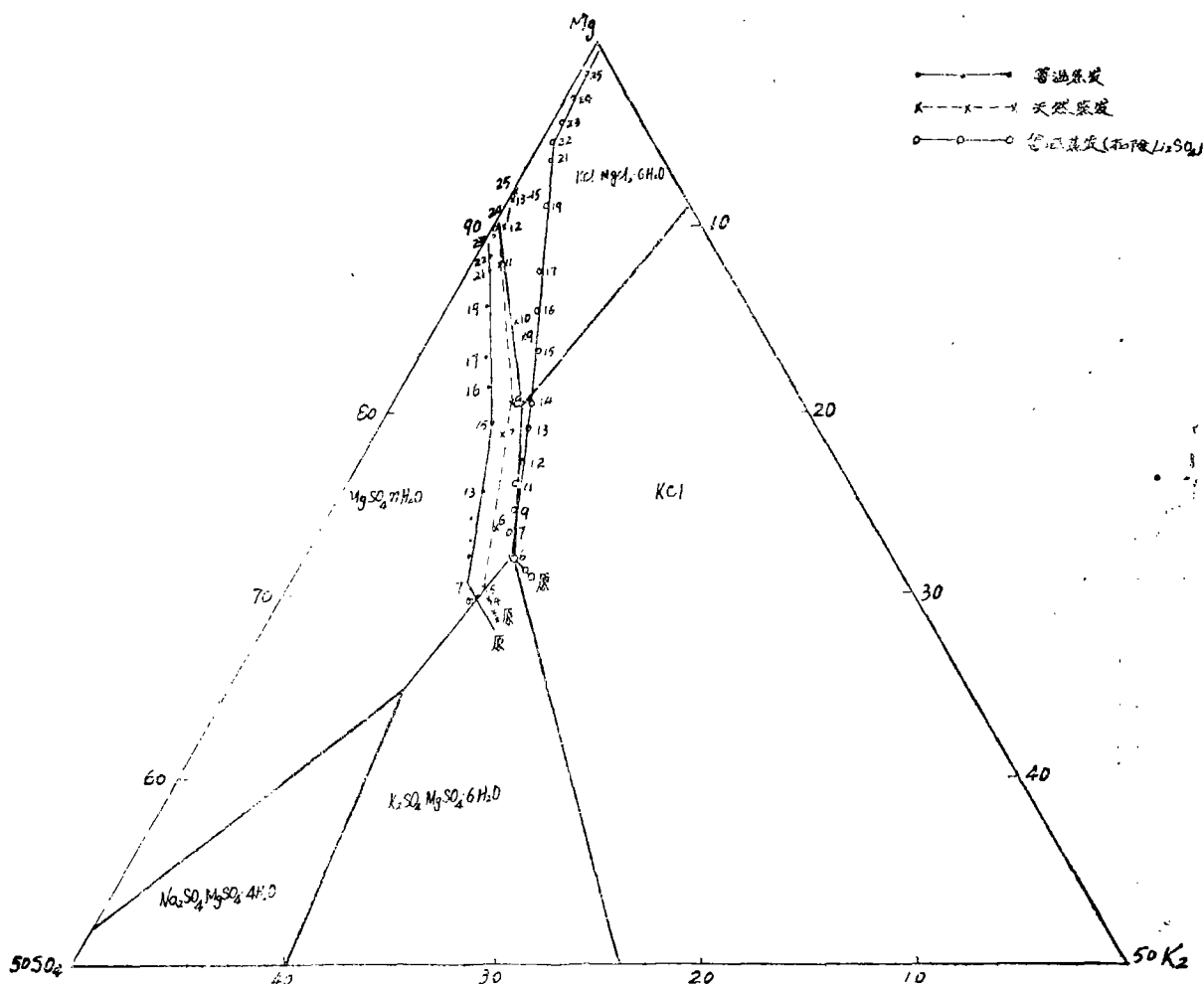


图2 东台吉乃尔湖晶间卤水Na, K, Mg//Cl, SO₄-H₂O蒸发结晶路线图

能是实验条件不同,造成介稳状况不一致。在蒸发结晶过程中析出固相的顺序是NaCl, NaCl + KCl, NaCl + KCl + MgSO₄·7H₂O, NaCl + KCl + MgSO₄·7H₂O + MgSO₄·6H₂O, NaCl + KCl + MgSO₄·6H₂O + KClMgCl₂·6H₂O, NaCl + KClMgCl₂·6H₂O + MgSO₄·6H₂O, NaCl + KClMgCl₂·6H₂O + MgSO₄·6H₂O + MgCl₂·6H₂O,……。这里不论在天然蒸发或等温蒸发都发现有次生的钾盐镁矾,这是由于KCl或KClMgCl₂·6H₂O与MgSO₄·6H₂O起固相反应而形成的。在实验中卤水继续蒸发,总重量减少,比重理应连续性地增加,而实验却产生阶段性的降低,这说明由于固相反应生成次生钾盐镁矾而放出结

晶水所致。另外在等温蒸发中还发现有MgSO₄·5H₂O和MgSO₄·4H₂O析出。出现这二种矿物,标帜着其蒸发结晶路线是按稳定相图进行,其中MgSO₄·5H₂O在动态蒸发中还未见到报导。同样卤水在天然蒸发中也没有见到这种矿物,这也说明了在蒸发速度快的情况下(0.214克/天·平方厘米)不会出现,而蒸发速度为(0.015克/天·平方厘米)的等温蒸发中由于接近于稳定状态则才有此矿物析出。MgSO₄·4H₂O必须在较慢速度或是经过长期放置才有可能出现。

整个蒸发结晶路线(未扣除Li₂SO₄)与介稳图共饱线有一定的偏离,要是按锂的当量数扣除硫酸根的当量数再计算体系指数,

表2 东台吉尔湖晶间卤水天然蒸发液相测定结果

编 号	比重/℃	化 学 分 析 结 果 (重 量 %)						M/1000MH ₂ O				Na + Mg + SO ₄ + Cl = 200M				K ₂ + Mg + SO ₄ = 100 M				固	相
		NaCl	KCl	Mg Cl ₂	MgSO ₄	B ₂ O ₃	总盐量	2NaCl	2KCl	Mg Cl ₂	MgSO ₄	Mg	SO ₄	K ₂	Mg	SO ₄	H ₂ O				
原	1.2525/24.6	11.39	3.20	9.27	5.00	0.312	28.86	24.69	5.44	24.64	10.51	58.74	17.56	10.63	68.80	20.57	1957	NaCl			
3	1.2995/24.5	5.76	4.74	14.05	7.48	0.48	32.03	13.07	8.43	39.09	16.46	80.95	23.99	10.48	69.06	20.46	1252	NaCl + KCl			
4	1.3035/23.0	5.27	4.58	14.81	7.78	0.50	32.44	12.03	8.19	41.60	17.23	83.02	24.32	9.74	69.80	20.47	1189	NaCl + KCl + MgSO ₄ ·7H ₂ O			
5	1.3072/25.0	5.21	4.47	15.22	7.90	0.51	32.80	11.96	8.04	42.90	17.59	83.49	24.28	9.33	70.22	20.44	1162	NaCl + KCl + MgSO ₄ ·7H ₂ O			
6	1.3023/28.0	4.65	4.02	17.12	6.79	0.59	32.58	10.69	7.22	48.05	15.07			8.43	73.92	17.65	1171	NaCl + KCl + MgSO ₄ ·7H ₂ O			
7	1.2980/25.5	4.57	2.95	20.00	5.94	0.72	33.46	10.59	5.36	56.86	13.35			6.03	78.96	15.00	1125	NaCl + KCl + MgSO ₄ ·7H ₂ O + K ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·6H ₂ O(微量)			
8	1.3110/24.1	2.94	2.92	21.67	5.24	0.75	32.77	6.75	5.25	60.96	11.66			5.87	81.11	13.02	1117	NaCl + KCl + KClMgCl ₂ ·6H ₂ O + MgSO ₄ ·6H ₂ O			
9	1.3050/21.4	2.82	2.19	22.49	4.36	0.82	31.86	6.40	3.89	62.45	9.57			4.55	84.27	11.19	1170	NaCl + KClMgCl ₂ ·6H ₂ O + MgSO ₄ ·6H ₂ O			
10	1.3160/25.4	2.81	1.59	23.63	4.86	0.89	32.89	6.44	2.87	66.60	10.85			3.14	84.97	11.90	1097	NaCl + KClMgCl ₂ ·6H ₂ O + MgSO ₄ ·6H ₂ O			
11	1.3225/25.8	2.66	0.69	25.86	4.33	1.04	33.54	6.18	1.26	73.60	9.76			1.34	88.32	10.34	1060	NaCl + KClMgCl ₂ ·6H ₂ O + MgSO ₄ ·6H ₂ O			
12	1.3455/28.0	2.23	0.27	28.66	4.08	1.19	35.24	5.31	0.50	83.70	9.43			0.49	90.38	9.14	971	NaCl + KClMgCl ₂ ·6H ₂ O + MgSO ₄ ·6H ₂ O			
13	1.3625/26.2	2.22	0.075	30.97	3.62	1.31	36.89	5.42	0.15	92.84	8.59			0.13	92.07	7.80	908	NaCl + KClMgCl ₂ ·6H ₂ O + MgSO ₄ ·6H ₂ O			
14	1.3655/30.8	2.10	0.022	31.08	3.71	1.52	36.91	5.14	0.05	93.20	8.80			0.04	92.04	7.93	903	NaCl + KClMgCl ₂ ·6H ₂ O + MgSO ₄ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O			
15	1.3887/25.5	0.23	微	31.91	3.55	2.94	35.69	0.56	微	93.87	8.26			92.53	7.48		906	NaCl + KClMgCl ₂ ·6H ₂ O + MgSO ₄ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O			

表 3 东台吉乃尔湖晶间卤水 25℃ 等温蒸发固相测定结果

编号	相应液相 / 30℃	化 学 分 析 结 果 (重量%)				矿 物 组 成 (重量%)										Σ
		NaCl	KCl	MgCl ₂	MgSO ₄	LiCl	B ₂ O ₃	H ₂ O	NaCl	KCl	MgSO ₄ ·7H ₂ O	MgSO ₄ ·5H ₂ O	MgSO ₄ ·4H ₂ O	KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O	MgCl ₂ ·6H ₂ O	
1	1.2701	78.02	1.04	2.60	1.64		0.09	16.70	75.89							23.20
2	1.2832	78.08	1.47	2.60	2.42		0.097	15.43	76.41							22.35
3	1.3059	75.94	1.71	3.39	2.51	0.434	0.124	16.48	74.61							24.13
5	1.3170	53.40	27.16	3.37	2.04	0.251	0.119	14.03	52.45	26.11						21.68
7	1.3236	30.52	24.90	4.00	13.33	0.293	0.137	27.24	29.63	23.86	23.20					23.38
9	1.3229	11.63	12.75	4.51	27.69	0.312	0.157	43.42	10.65	11.63	52.23					25.78
11	1.3235	12.78	13.87	5.31	25.23	0.354	0.186	42.81	11.76	12.66	46.74					29.43
12	1.3237	11.53	14.96	5.38	25.13	0.348	0.202	42.99	10.52	13.75	45.95					30.70
13	1.3265	14.25	14.78	5.11	27.08	0.324	0.179	38.79	13.46	13.83	47.09					25.79
14	1.3273	12.43	14.26	6.92	28.29	0.409	0.244	38.10	11.57	3.08	18.39			33.49		33.52
15	1.3248	7.42	20.00	12.95	24.15	0.458	0.233	35.48	6.55					46.59	18.51	30.34
16	1.3257	5.55	15.68	22.46	12.82	0.361	0.184	43.49	4.93					5.18	50.88	22.13
17	1.3261	5.26	12.16	20.25	16.30	0.422	0.233	46.04	4.57					2.34	41.02	26.33
19	1.3314	6.16	11.75	20.21	16.68	0.428	0.240	45.19	5.44						41.63	23.93
21	1.3468	8.05	10.92	20.70	15.51	0.513	0.294	47.62	7.45						39.16	26.44
22	1.3595	9.35	9.81	20.15	16.54	0.593	0.327	44.16	8.75						35.21	27.93
23	1.3665	5.01	4.50	14.88	29.25	0.715	0.384	46.41	4.33						15.67	31.55
24	1.3710	4.72	4.00	7.54	35.95	4.21	0.300	43.58	4.27						14.78	23.73

已计Li₂SO₄, 另外
MgSO₄·5H₂O
有部分为Mg²⁺
SO₄H₂O

表 4

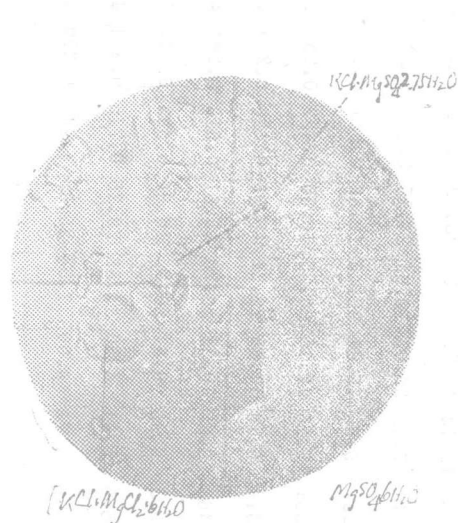
东台吉乃尔湖晶间卤水天然蒸发固相测定结果

编号	相应液 相比重 /℃	化 学 分 析 结 果 (重 量 %)						矿 物 组 成 (重 量 %)							Σ
		NaCl	KCl	MgCl ₂	MgSO ₄	B ₂ O ₃	H ₂ O	NaCl	KCl	MgSO ₄ ·7H ₂ O	MgSO ₄ ·6H ₂ O	KCl MgCl ₂ ·6H ₂ O	MgCl ₂ ·6H ₂ O	夹带 母液	
1	1.2780/ 23.0	78.62	1.19	2.54	1.61	0.095	16.04	76.81						22.62	99.43
2	1.2965/ 24.6	73.28	2.00	3.46	2.19	0.13	19.08	71.57	0.75					27.66	100.08
3	1.3050/ 23.0	54.55	18.27	3.15	4.56	0.13	19.47	53.19	17.15	5.20				26.00	101.54
4	1.2980/ 25.5	17.61	13.96	4.25	24.04	0.17	40.14	16.60	13.27	46.36				23.11	99.84
5	1.3110/ 24.1	33.25	17.09	15.62	3.12	0.20	30.92	32.50	8.69		3.26	28.61		26.67	100.73
6	1.3225/ 25.8	6.33	13.53	23.18	12.00	0.28	44.68	5.60			20.56	47.31		26.92	100.39
7	1.3625/ 26.2	7.83	8.13	19.90	17.58	0.40	46.56	7.13			31.26	30.50		30.53	99.42
8	1.3655/ 30.8	3.40	0.19	37.71	3.86	0.37	54.83	2.92			5.63	0.70	63.95	24.34	97.54
9	1.3887/ 25.5	3.47	微	38.57	4.20	0.62	53.76	3.04			6.53		67.92	21.09	98.58

那么其蒸发结晶路线在光卤石析出前基本上与介稳图相近。

2. 固相的析出: 东台吉乃尔湖晶间卤水在25℃等温蒸发过程中析出的固相矿物计有石盐、石膏、钾石盐、泻利盐、六水泻盐、光卤石、钾盐镁矾、五水泻盐、四水泻盐和

水氯镁石; 另有硫酸锂的固相, 据推测应为一水硫酸锂。与介稳图应析出的矿物(石盐、钾石盐、泻利盐、六水泻盐、光卤石和水氯镁石)相比较多出四种, 即钾盐镁矾、五水泻盐、四水泻盐和一水硫酸锂。含有前三者的盐类晶体照片见照片一、二、三。在天然蒸发过程



照片一钾盐镁矾与其它盐类晶体照片(45×8)

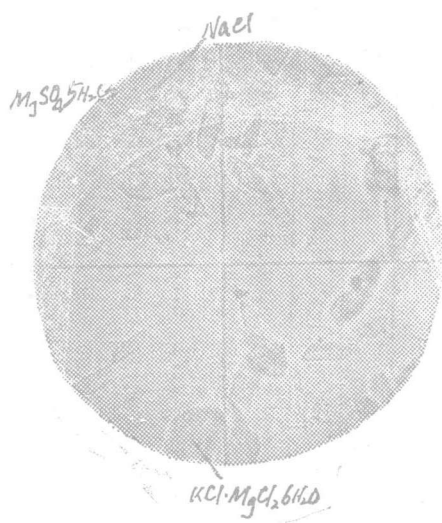
照片二MgSO₄·5H₂O与其它盐类晶体照片(45×8)

表 5 东台吉 尔 湖 晶 间 卤 水 等 温 蒸 发 析 出 固 相 光 学 测 定 结 果

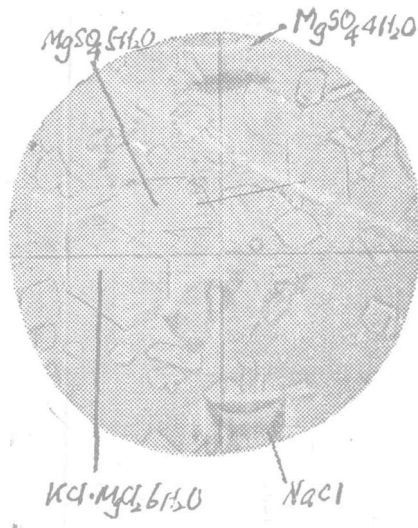
编 号	晶 体 形 状	颜 色	味 觉	解 理 断 口	干 涉 色	消 光	轴 性	晶 系	折 光 率			光 性	光 轴 2 V	结 论 矿 物 名 称	化 学 式	卤 水 比 重
									Ng	Nm	Np					
6	a 立方体	无色透明		完全		完全消光	均质	等轴		1.5443				岩盐	NaCl	1.3195
	b 立方体	无色透明		完全		完全消光	均质	等轴		1.4904				钾石盐	KCl	
	c 柱状、块状	无色透明		清楚	红蓝绿黄	斜, 平行(少)	二轴	斜方	1.4625	1.4554	1.4344	负		泻利盐	MgSO ₄ ·7H ₂ O	
11	a 立方体	无色透明		完全		完全消光	均质			1.5443				岩盐	NaCl	1.3228
	b 立方体	无色透明		完全		完全消光	均质			1.4902				钾石盐	KCl	
	c 细粒柱状	无色透明		清楚	红蓝绿黄橙	斜, 平行	二轴		1.4606	1.4552	1.4328	负		泻利盐	MgSO ₄ ·7H ₂ O	
	d 细粒菱形	无色透明	苦	清楚	红蓝绿黄橙	平行, 斜(小)	二轴	单斜	1.4638	1.4622	1.4367	负		六水泻盐	MgSO ₄ ·6H ₂ O	
13	a 细粒	无色透明		完全		完 全	均质			1.5442				岩盐	NaCl	1.3265
	b 细粒	无色透明		完全		完 全	均质			1.4903				钾石盐	KCl	
	c 细粒	无色透明		清楚	红蓝绿黄橙	斜, 平行	二轴		1.4606	1.4554	1.4328	负		泻利盐	MgSO ₄ ·7H ₂ O	
	d 细粒菱形	无色透明		清楚	红蓝绿黄橙	平行, 斜(多)	二轴		1.4638	1.4622	1.4367	负		六水泻盐	MgSO ₄ ·6H ₂ O	
	e 细粒假六边形	无色透明		清楚	一 级 灰	斜, 平行(多)	二轴	斜方	1.4963	1.4737	1.4672	正		光卤石	KClMgCl ₂ ·6H ₂ O	
15	f 细粒	无色透明		不清	红蓝绿黄橙	斜	二轴	单斜	1.5180	1.5062	1.4937			钾盐镁矾	KClMgSO ₄ ·2.75H ₂ O	
	a 细粒	无色透明		完全		完 全	均质	等轴		1.5443				岩盐	NaCl	1.3257
	b 粒状菱形	无色透明		清楚	红蓝绿橙黄	斜	二轴	单斜	1.4636	1.4624	1.4382	负		六水泻盐	MgSO ₄ ·6H ₂ O	
	c 假六边进形	无色透明		不清	红蓝绿青橙黄	平行, 斜	二轴	斜方	1.4963	1.4745	1.4676	正		光卤石	KClMgCl ₂ ·6H ₂ O	
	d 粉 状	无色透明		不清	一 级 灰	斜	二轴		1.5187	1.5071	1.4948			钾盐镁矾	KClMgSO ₄ ·2.75H ₂ O	

续表

编 号	晶 体 形 状	颜 色	味 觉	解 理 断 口	干 涉 色	消 光	轴 性	晶 系	折 光 率			光 性	光轴 角 2V	结 论		卤 水 比 重
									Ng	Nm	Np			矿物名称	化 学 式	
19	a	无色透明		完全		完 全	均质			1.5441				岩盐	NaCl	1.3314
	b	菱形粒状		清楚	红蓝绿橙黄	斜	二轴		1.4636	1.4624	1.4376	负		六水泻盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	c	假六边柱状		不清	红蓝绿黄	平行, 斜	二轴		1.4944	1.4750	1.4675	正		光卤石	$\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
22	a	无色透明		完全	红蓝绿青橙黄	完全消光	均质			1.5443				岩盐	NaCl	1.3596
	b	无色透明		清楚	红蓝绿橙黄	斜	二轴		1.4645	1.4625	1.4368	负		六水泻盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	c	无色透明		不清	红蓝绿青橙黄	平行, 斜	二轴		1.4940	1.4744	1.4622			光卤石	$\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	d	菱形		清楚	一级灰	斜	二轴		1.4921	1.4903	1.4723			五水泻盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
24	a	无色透明		完全		完 全	均质			1.5443				岩盐	NaCl	1.3710
	b	无色透明		不清	红蓝绿青橙黄	平行, 斜	二轴		1.4945	1.4746	1.4673	正		光卤石	$\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	c	无色透明		清楚	一级灰	斜	二轴		1.4938	1.4924	1.4730	负		五水泻盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
	d	无色透明		清楚	一级灰	斜	二轴		1.4973	1.4912	1.4907			四水泻盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
25	a	无色透明		完全		完 全	均质			1.5445				岩盐	NaCl	1.3718
	b	无色透明		不清	红蓝绿橙黄	平行, 斜	二轴	斜方	1.4954	1.4743	1.4674	正		光卤石	$\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	c	无色透明		清楚	一级灰	斜	二轴	单斜	1.4967	1.4910	1.4904			四水泻盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
	d	无色透明		不清	红蓝绿橙黄	斜	二轴	单斜	1.5251	1.5044	1.4906	正	80	水氯镁石	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	

表 6 东台吉乃尔湖晶间卤水天然蒸发析出固相光学测定结果

编 号	晶体形状	颜 色	味觉	解理口 断面	干 涉 色	消 光	轴 性	晶 系	折 光 率			光 轴角 2V	结 论	卤水 比重
									Ng	Na	Np		矿物名称	
2	a	无色透明		完全		完全消光	均质	等轴		1.5441			岩盐	1.3413 /7.2℃
	b	无色透明		完全		完全消光	均质	等轴		1.4904			钾石盐	KCl
	a	无色透明		完全		完全消光	均质	等轴		1.5442			岩盐	NaCl
	b	无色透明		完全		完全消光	均质	等轴		1.4902			钾石盐	KCl
3	c	无色透明	苦	清楚	二 级 (蓝绿黄红)	平行, 斜	二轴	斜方	1.4616	1.4552	1.4325		泻利盐	MgSO ₄ ·7H ₂ O
	a	无色透明		完全		完全消光	均质	等轴		1.5441			岩盐	NaCl
	b	无色透明		完全		完全消光	均质	等轴		1.4901			钾石盐	KCl
	c	无色透明		清楚	二 级 (蓝绿黄红)	平行, 斜	二轴	斜方	1.4609	1.4558	1.4323		泻利盐	MgSO ₄ ·7H ₂ O
6	d	无色透明		清楚	二 级 (灰白橙黄蓝红)	斜消光	二轴	单斜	1.4749	1.4622	1.4609		软钾镁矾	K ₂ SO ₄ MgSO ₄ ·6H ₂ O
	a	无色透明		完全		完全	均质	等轴		1.5443			岩盐	NaCl
	b	无色透明		完全		完全	均质	等轴		1.4903			钾石盐	KCl
	c	无色透明		清楚	二 级 (蓝绿黄红)	平行, 斜	二轴	斜方	1.4612	1.4557	1.4331		泻利盐	MgSO ₄ ·7H ₂ O
8	d	无色透明		不清	二 级 (蓝绿黄红)	平行, 斜	二轴	斜方	1.4946	1.4748	1.4678		光卤石	KClMgCl ₂ ·6H ₂ O
	e	无色透明		清楚	二 级 (蓝绿黄红)	斜消光	二轴	单斜	1.4635	1.4620	1.4384		六水泻盐	MgSO ₄ ·6H ₂ O
	a	无色透明		完全		均质	均质			1.5441			岩盐	NaCl
	b	无色透明		不清		平行, 斜	二轴	正	1.4595	1.4745	1.4675		光卤石	KClMgCl ₂ ·6H ₂ O
13	c	无色透明		清楚	斜	斜	二轴	负	1.4635	1.4620	1.4383		六水泻盐	MgSO ₄ ·6H ₂ O
	d	无色透明		不清	斜	斜	二轴	负	1.5256	1.5073	1.4941		水氯镁石	MgCl·6H ₂ O



照片三 $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 与其它盐类的
晶体照片 (45×8)

中析出的固相与介稳图一致，只有到水氯镁石终结点后经长时间的放置才出现有四水泻

盐，另外硫酸锂因为未测锂，故未有结果。
关于钾盐镁矾与五水泻盐及四水泻盐出现原因的探讨在蒸发结晶路线中已有说明故不重述至于硫酸锂的出现，这在海水型卤水蒸发过程中还未见报导，其原因主要是东台吉乃尔湖晶间卤水锂含量高，到水氯镁石析出时锂盐浓度已超出 $\text{Li, Mg//Cl, SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 四元交互体系中 $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的溶解度。

3. 新相析出的化学组成和性质与组成的关系：根据蒸发结晶路线图东台吉乃尔湖晶间卤水 25°C 等温蒸发出现的新相先后有 KCl $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{KClMgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{KClMgSO}_4 \cdot 2.75\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 及 $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 天然蒸发出现的新相先后有 KCl , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。这些析出新相时的液相化学组成及比重如表 7。

表 7 析出新相时的液相组成

	新相	比重/温度 $^\circ\text{C}$	化学组成 (重量%)						
			LiCl	NaCl	KCl	MgCl_2	MgSO_4	B_2O_3	总盐量
25℃ 等温 蒸发	KCl	1.317 /30	0.898	4.39	4.84	15.80	8.49	0.549	33.51
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.3198/30		4.29	4.74	16.07	8.61	0.567	33.71
	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.3235/30	1.136	3.53	4.13	18.40	8.10	0.636	34.16
	$\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.3265/30	1.222	3.08	3.68	20.01	7.43	0.694	34.20
	$\text{KClMgSO}_4 \cdot 2.75\text{H}_2\text{O}$	1.3273/30	1.216	2.71	3.45	20.88	7.01	0.728	34.04
	$\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.3595/30	2.11	2.14	0.28	28.94	5.15	1.17	36.50
	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.3710/30	2.24	1.91	0.11	30.98	4.35	1.26	37.34
	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.3718/30	2.21	1.87	0.10	31.92	3.67	1.30	37.56
天然 蒸发	KCl	1.2995/24.5		5.76	4.74	14.05	7.48	0.48	32.03
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.3035/23.0		5.27	4.58	14.81	7.78	0.50	32.44
	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 与 $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.311 /24.1		2.94	2.92	21.67	5.24	0.75	32.77
	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.3655/30.8		2.10	0.22	31.08	3.71	1.52	36.91

另外由组成——性质图(见图 3)也可以看出当新相析出时有转折点出现。

4. 物料平衡与硼、锂的富集：各种蒸失

水率、固相析出率和成卤率见图 4。

元素硼在蒸发过程中到水氯镁石析出前 (B_2O_3 含量达 1.30%) 不以固相析出；在

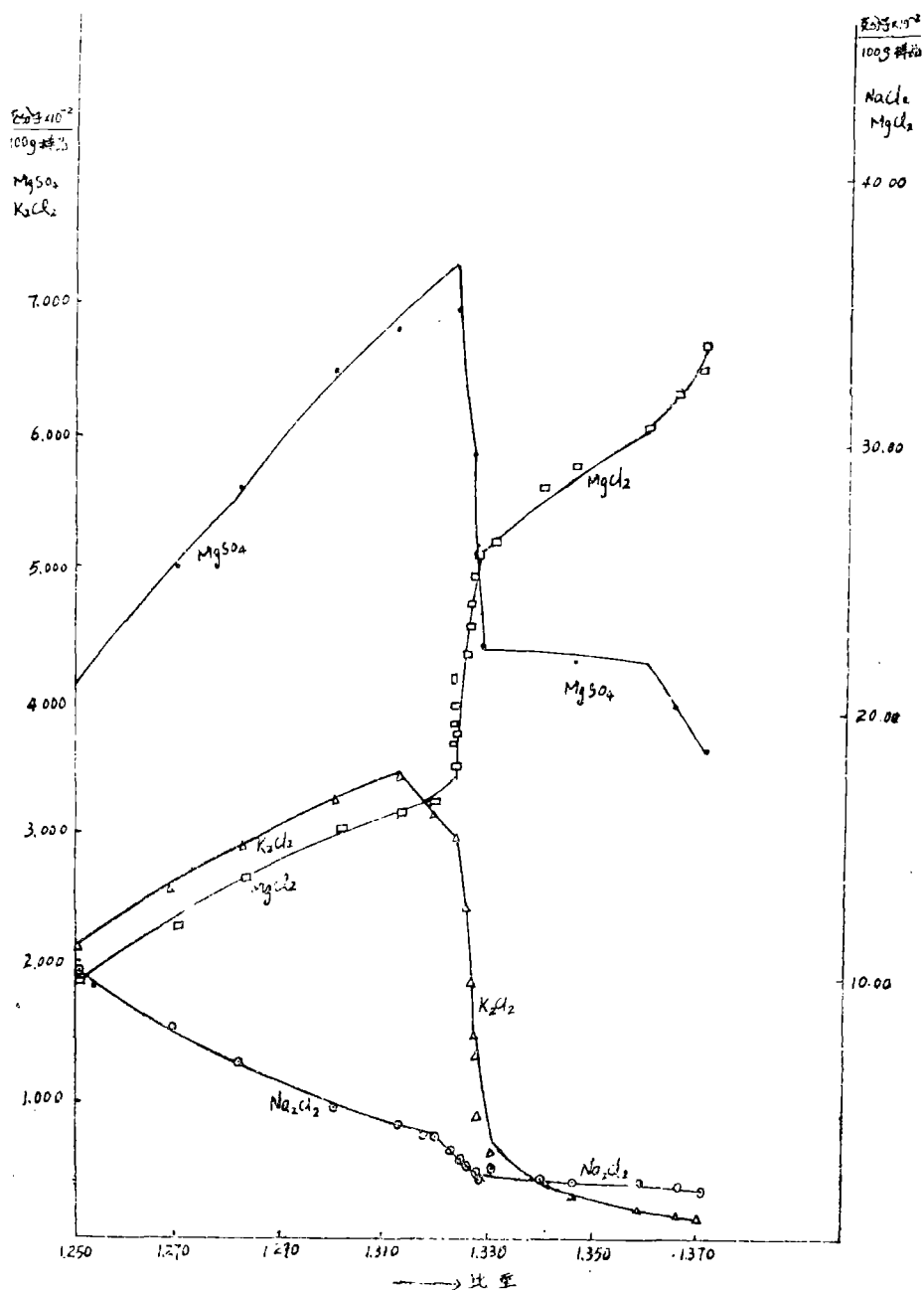


图 3 东台吉乃尔湖晶间卤水25℃等温蒸发比重—组成图

天然蒸发中继续蒸发，当 B_2O_3 达 2.94% 时也不会析出。锂的含量当 $LiCl$ 在 2.24% 前不会析出固相，高于此含量时继续蒸发即有硫酸锂析出。

三、结 论

1. 在蒸发过程中的蒸发结晶路线系按介

稳相图进行，当蒸发速度过慢时出现稳定相图的固相如五水泻盐与四水泻盐。由于锂盐含量高，造成蒸发结晶线的偏离，若扣除硫酸锂量，则与介稳相图相差较少。此外， B_2O_3 含量达到 2.94% 时还不以固相析出。

2. 天然蒸发过程固相按介稳图的相区析出。而在等温蒸发中除天然蒸发析出的固相

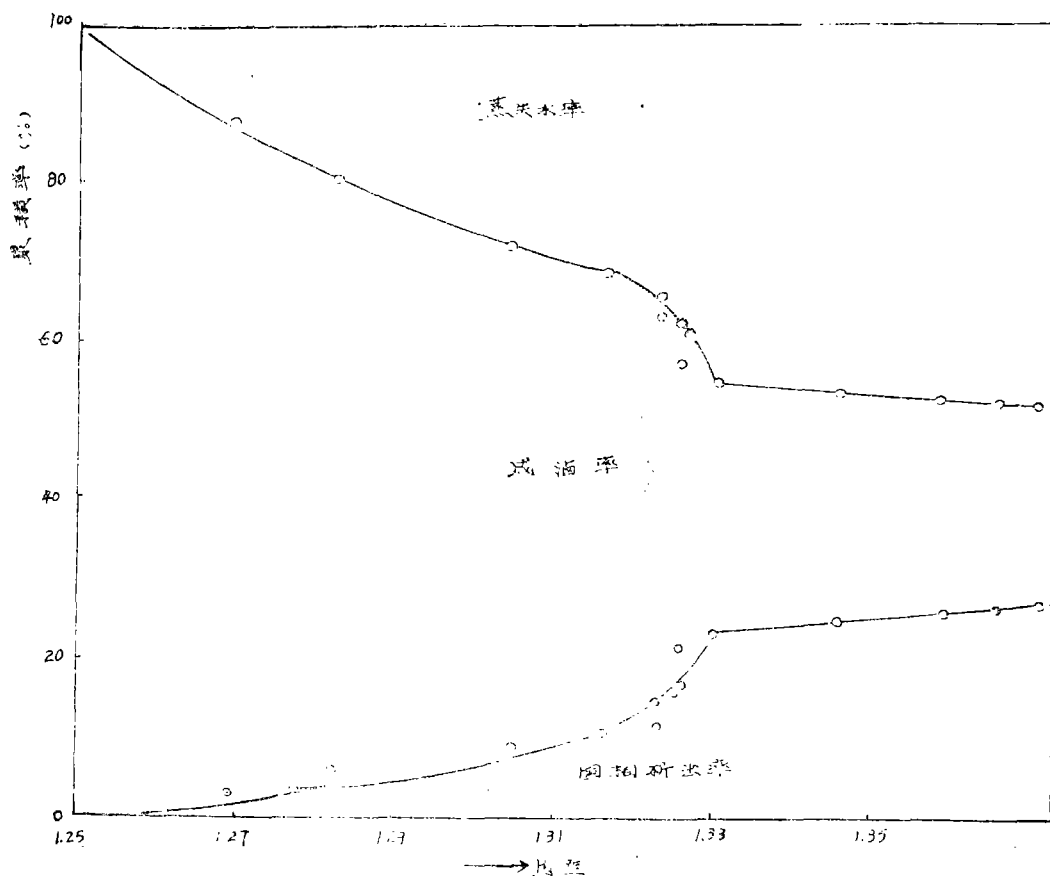


图4 东台吉乃尔湖晶间卤水25℃等温蒸发蒸失水率,成卤率及固相析出率关系图

外还有次生钾盐镁矾,蒸发速度放慢时还析出四水泻盐与五水泻盐以及由于锂盐浓度增大而析出硫酸锂盐。

3.析出新相时液相的化学组成、比重与各个阶段的蒸失水率、固相析出率和成卤率的关系可作为盐田日晒的控制依据。

四、参考文献

[1]А. Ы. Згановский и Другий, Справочник по растворимости солей Систем Том II стр 1207—8

[2]Н.е Курнаков, Б.М. Николаев, ИСФХА 1938 10 333—66

[3]М.Г.Валяшко Е.Ф.Соловьева:

Труды ВНИИГ Том211950

Труды ВНИИГ Том271953

[4]金作美等, (Na⁺, K⁺, Mg^H) (Cl⁻, SO₄⁻)H₂O 五元系统介稳平衡的研究 (25℃) 化学学报, 38卷, 4期313页, 1980

[5]Pablo Hadzeriga: Trans Soc. Mining Eng. AIME 238(4)P.413-17 1967

[6]中国科学院兰州地质研究所, 青海柴达木盆地东台吉乃尔湖区锂矿地质研究报告1959.未发表

[7]中国科学院化学研究所, 盐湖卤水分析方法 内部