

文章编号: 0258-7106(2010)04-0684-13

青海别勒滩干盐湖石盐流体包裹体均一温度分析及地质环境意义*

赵元艺¹, 李波涛², 焦鹏程¹, 钱作华^{1**}, 陈伟十¹

(¹ 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要 别勒滩位于察尔汗盐湖的最西端, 最主要的沉积物为石盐, 钾盐矿物主要为杂卤石、光卤石和钾石盐。文章研究了别勒滩区段盐类矿物形成的温度, 为确定钾盐的形成条件提供了参考依据。别勒滩地区石盐流体包裹体均一温度呈现出 3 个或 2 个温度区段, 即低温区段、中温区段和高温区段。低温区段均一温度变化范围为 19.5~49.3℃, 反映了大多数石盐结晶析出的卤水温度。中温区段均一温度变化范围为 50.1~99.3℃, 与盐湖底部卤水所达到的最高温度相对应。高温区段均一温度变化范围为 100.3~195.6℃, 可能为太阳池事件的响应。由太阳池下部对流层中沉积的盐类矿物组合或相关参数计算的古温度只能为其形成时的卤水温度, 不能代表当时的气温。在同一样品中, 既出现高温流体包裹体, 又出现中温或低温流体包裹体, 是矿物生长经历太阳池下部对流层环境与中部非对流层环境所致。别勒滩地区在 18 m 以上部位可能出现 6 次太阳池事件, 它们的位置(编号)分别为 0.40~1.00 m(S_6) 1.70~2.90 m(S_5) 7.90~8.10 m(S_4) 9.90~10.10 m(S_3) 10.80~11.00 m(S_2) 16.39~16.63 m(S_1)。其中第 6 次太阳池事件(S_6)可能是 1989 年发生的大水灾在盐湖沉积中的体现。

关键词 地球化学; 石盐; 流体包裹体; 太阳池事件; 青海别勒滩

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

An analysis of fluid inclusion homogenization temperature of halite from Bieletan salt playa lake in Qinghai and its geological significance

ZHAO YuanYi¹, LI BoTao², JIAO PengCheng¹, QIAN ZuoHua¹ and CHEN WeiShi¹

(¹ Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

² China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Bieletan area is located in the westernmost part of the Qarhan Salt Lake, with the most important sediments being halite and the main sylvite minerals being polyhalite, carnallite and sylvite. This paper has studied the temperature for the formation of mineral salts in Bieletan section in the hope that it might provide a basis for understanding the formation conditions of potash salt. The distribution characteristics of homogenization temperatures of halite in Bieletan area exhibit three or two temperature sections, which are respectively low-temperature section, medium-temperature section and high-temperature section. In the low-temperature section, the temperature change range is 19.5~49.3℃, which constitute the brine temperature range in which most salt minerals should be crystallized. In the middle-temperature section, the temperature change range is 50.1~99.3

* 本文得到国家高技术研究发展计划(863 计划)课题“青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发的关键技术”(编号: 2006AA06Z133)与金土工程课题“我国钾盐资源潜力数据库建设”(编号: JTXM-DW-KZ4-04)的联合资助

第一作者简介 赵元艺, 男, 1966 年生, 研究员, 从事矿床学与地球化学研究。Email: yuanyizhao2@sina.com

** 钱作华高工为中国地质科学院矿产资源研究所聘请人员。

收稿日期 2009-07-01; 改回日期 2009-11-26。李 岩编辑。

℃, which correspond to the highest temperature reached by the brine at the bottom of the salt lake. In the high-temperature section, the change range is 100.3~195.6℃, which seem to be the reflection of the solar pond event. The paleotemperature calculated by the deposited salt mineral assemblage or relevant parameters in the lower convection of the solar pond can only be used as the brine temperature during its formation, but it cannot represent the air temperature at that moment. The existence of both high-temperature fluid inclusions and medium- or low-temperature fluid inclusions in a sample might have been caused by inclusions which were formed in the lower part of the solar pond convection belt and in the central part of the solar pond non-convection belt. There probably occurred 6 solar pond events in shallow parts above 18m of Bielestan area, and the appropriate positions (serial numbers) are 0.40~1.00 m (S_6), 1.70~2.90 m (S_5), 7.90~8.10 m (S_4), 9.90~10.10 m (S_3), 10.80~11.00 m (S_2), and 16.39~16.63 m (S_1). Among these events, the 6th solar pond event S_6 might be the reflection of the flood that happened in Qarhan area in 1989.

Key words: geochemistry, halite, inclusions, solar pond event, Bielestan, Qinghai

察尔汗盐湖位于柴达木盆地中南部低洼区,以干盐滩为主,该盐湖矿床以钾盐为主,其次为镁盐和石盐(郑绵平等,1989)。自西向东分为别勒滩区段、达布逊区段、察尔汗区段和霍布逊区段(图见李波涛,2010;本期第 页图 1 本期),别勒滩区段钾盐为开发利用最晚的区段,目前正在试验通过固-液转化技术在此区段开发固体钾盐。中国是一个钾资源贫乏的国家,同时又是钾肥需求量巨大的国家。察尔汗钾矿床是中国目前最大的大型钾肥生产基地。而钾盐生产的主要原料为晶间卤水,近些年,随着晶间卤水水位的降低,面临钾资源快速递减的困扰,因此,对低品位固相钾盐的开发已经引起有关部门的重视。本文选择青海盐湖集团正在采卤的别勒滩(见李波涛,2010;本期 670 页图 1)采卤区的 S_4 盐层钻孔岩心中与固体钾盐矿物密切共生的石盐流体包裹体进行均一温度研究,以期探讨察尔汗盐湖形成的古环境提供参考。

1 别勒滩区段固体钾盐地质特征

本次研究样品采自 S_2T1-C 、 S_2T3-D 、 S_2T4-B 与 S_2T5-C 共 4 个钻孔岩芯(图见李波涛,2010;本期第 671 页图 2)。手标本、镜下及 X 射线测试结果表明,绝大多数样品中石盐是主要矿物。从扫描电镜分析结果看,主要矿物有:石盐、钾石盐、光卤石、杂卤石和石膏等。碎屑主要为石英和长石,含少量磁铁矿、锆石、角闪石等。粘土矿物为伊蒙混生的粘土。从 X 射线衍射组成半定量分析结果可以看出,试验区的钾盐矿物主要为杂卤石,同时有一部分光卤石和极少量的钾石盐(赵元艺等,2008)。钾盐矿物在 4

个钻孔中的出现位置及矿物种类为: S_2T1-C 钻孔的 1~11.09 m 处,主要含钾矿物为杂卤石和钾石盐; S_2T3-D 钻孔的 0~7.3 m 处,为杂卤石,7.3~22.4 m 处,为杂卤石和光卤石; S_2T5-C 钻孔的 14.04 m 以下,为杂卤石和钾石盐。

从岩芯样品的化学分析结果可以看出,4 个钻孔中固体 KCl 的平均含量($w(B)$,下同)为 2.24%,略小于固体钾盐的边界品位 3%;NaCl 平均含量为 62.12%; $MgCl_2$ 平均含量为 5.24%(表 1)。

2 流体包裹体样品与测试方法

采集研究样品总计 31 件(表 2)。每个包裹体片获得 13~15 个均一温度值。对每个样品磨制成包裹体测温片 S_2T3 钻孔的 14 个样品进行冰点和盐度测试,除 1 个样品没测得值之外,其他 13 个样品都获得盐度分布范围。虽然地层中含卤水,但钻进过程对样品影响有限,同时,钻探工作施工在春季进行,气温对样品也没有明显的影响。流体包裹体薄片采用冷粘法制取,测试仪器为 LinkamTHMSG 600 型冷热台,仪器测定温度范围在 $-196\sim+600^\circ\text{C}$,冷冻数据和均一温度数据精度分别为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。由于测试对象为石盐。样品一般冷冻至 -80°C 后升温,升温速率为 $0.3^\circ\text{C}/\text{min}$,在室温条件下测试。

3 石盐流体包裹体与均一温度特征

3.1 流体包裹体特征

镜下观察发现,石盐晶体中流体包裹体很发育,主要为单相液体包裹体(图 1a),气液两相包裹体(图

表 1 试验区 S₂ 线钻孔全孔 KCl、NaCl、MgCl₂ 含量
Table 1 The full-hole KCl , NaCl and MgCl₂ content along S₂ line of the test area

钻孔编号	孔深/m	α(B) %								
		KCl			NaCl			MgCl ₂		
		最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
S2T1-C	14.62	6.08	0.42	2.05	88.70	31.12	62.87	7.84	0.67	4.66
S2T3-D	22.41	9.50	0.19	2.05	89.96	2.47	50.20	13.76	0.41	5.96
S2T4-B	8.00	4.94	0.80	2.41	90.09	36.54	68.34	8.90	2.04	4.87
S2T5-C	14.02	10.07	0.36	2.45	91.35	18.9	67.08	8.98	0.67	5.45
平均				2.24			62.12			5.24

表 2 样品分布与特征
Table 2 Distribution and characteristics of samples

序号	样号	孔深/m	岩性	序号	样号	孔深/m	岩性
1	S2T1-CL1	0.00~0.20	粉砂石盐	17	S2T3-DL23	12.19~12.49	含粉砂细粒石盐
2	S2T1-CL3	0.40~0.60	粉砂石盐	18	S2T3-DL27	14.39~14.59	含粉砂中粗粒石盐
3	S2T1-CL5	0.80~1.00	粉砂石盐	19	S2T3-DL31	16.39~16.63	含粉砂中粗粒石盐
4	S2T1-CL7	1.20~1.40	粉砂石盐	20	S2T3-DL33	17.88~18.38	含粉砂中粗粒石盐
5	S2T1-CL9	1.60~1.80	粉砂石盐	21	S2T4-BL3	0.40~0.60	中粗粒石盐
6	S2T1-CL17	3.40~3.60	粉砂石盐	22	S2T4-BL5	0.80~1.00	中粗粒石盐
7	S2T3-DL1	0.40~0.60	含粉砂石盐	23	S2T4-BL9	1.70~1.90	中粗粒石盐
8	S2T3-DL3	1.80~2.00	含粉砂石盐	24	S2T4-BL11	2.10~2.30	中粗粒石盐
9	S2T3-DL5	2.70~2.90	含粉砂中粒石盐	25	S2T5-CL1	0.00~0.20	中粗粒石盐
10	S2T3-DL7	3.80~4.00	含粉砂中粒石盐	26	S2T5-CL3	0.40~0.60	中粗粒石盐
11	S2T3-DL9	4.60~4.80	含粉砂中粒石盐	27	S2T5-CL5	0.80~1.00	粉砂石盐
12	S2T3-DL11	5.80~6.00	含粉砂中粒石盐	28	S2T5-CL7	1.20~1.40	粉砂石盐
13	S2T3-DL13	6.60~6.80	含粉砂中粒石盐	29	S2T5-CL9	1.60~1.80	粉砂石盐
14	S2T3-DL15	7.90~8.10	含粉砂细粒石盐	30	S2T5-CL11	2.10~2.30	粉砂石盐
15	S2T3-DL19	9.90~10.10	含粉砂细粒石盐	31	S2T5-CL13	2.50~2.70	粉砂石盐
16	S2T3-DL21	10.80~11.00	含粉砂细粒石盐				

1b) 气相分数为≤10% (大多数<5%)和少量含子矿物的多相流体包裹体(图 1c、1d)。大多数流体包裹体晶形为立方体或长方体;大小从 2×2 μm²~87×47 μm²,流体包裹体一般平行排列,沿石盐晶面分布,显示出原生包裹体的特征。另外可见一些沿裂隙生长的次生流体包裹体(图 1e、1f)。

3.2 均一温度(t_h)特征

测试样品的 t_h 分布曲线见图 2~图 5。t_h 主要呈现出 3 个或 2 个温度区段,即低温区段(0~50℃)、中温区段(50~100℃)和高温区段(>100℃),现分述如下:

在钻孔 S2T1-C 中的 6 个测试样品中,5 个样品出现 3 个温度分布区段,1 个样品出现 2 个温度区段(图 2、表 3),低温区段样品 t_h 变化范围为 24.3~47.1℃,平均值范围 31.4~46.7℃;中温区段样品 t_h 变化范围为 51.9~99.3℃,平均值范围 67.4~84.9℃;高温区段样品 t_h 变化范围为 101.5~

156.0℃,平均值范围 101.6~139.9℃。
在钻孔 S2T3-D 中的 14 个测试样品中,5 个样品出现 3 个温度分布区段,9 个样品出现 2 个温度区段(图 3、表 3)。低温区段样品 t_h 变化范围为 19.5~49.3℃,平均值范围 19.5~49.3℃;中温区段样品 t_h 变化范围为 50.9~99.3℃,平均值范围 58.1~93.4℃;高温区段样品 t_h 变化范围为 100.3~188.6℃,平均值范围 110.8~156.8℃。

在钻孔 S2T4-B 中的 4 个测试样品中,2 个出现 3 个温度分布区段,2 个出现 2 个温度区段(图 4、表 3),低温区段样品 t_h 变化范围为 21.6~47.2℃,平均值范围为 22.9~47.2℃;中温区段样品 t_h 变化范围为 53.4~98.6℃,平均值范围为 75.4~87.6℃;高温区段样品 t_h 变化范围为 101.2~195.6℃,平均值范围为 112.4~156.8℃。

在钻孔 S2T5-C 中的 7 个测试样品中,3 个出现 3 个温度分布区段,4 个样品出现 2 个温度区段(图

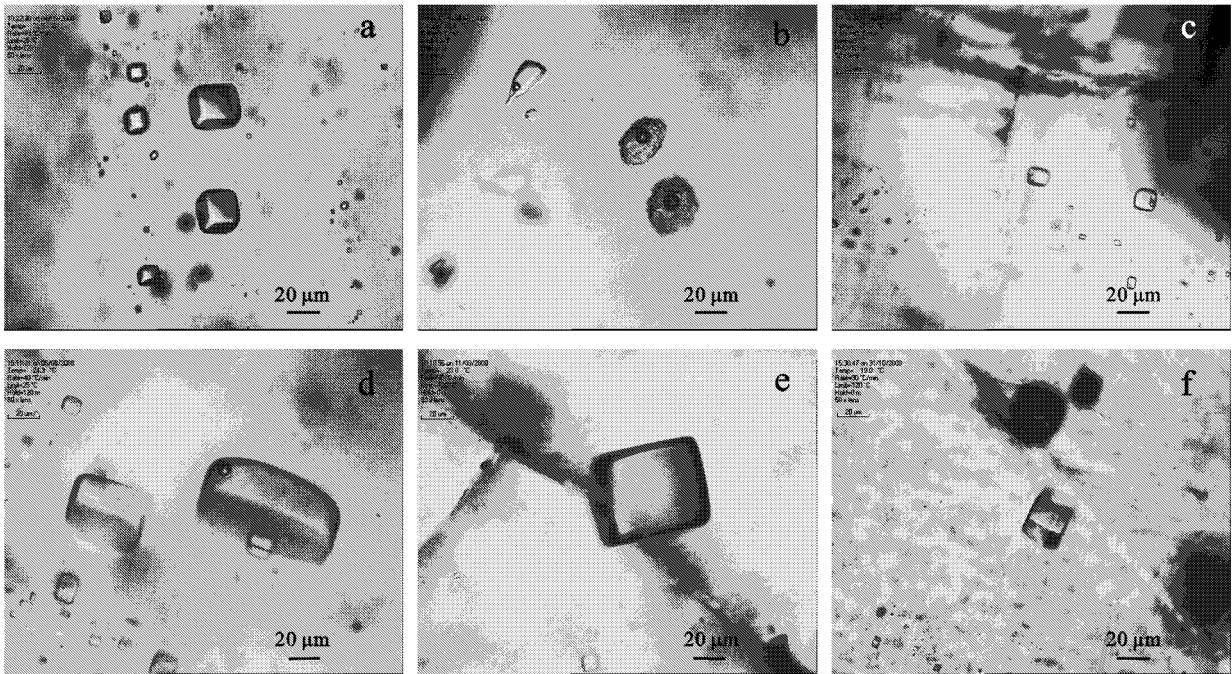


图 1 石盐流体包裹体特征

a. 石盐液相流体包裹体；b. 石盐气液两相流体包裹体；c, d. 含子矿物的流体包裹体；e, f. 沿裂隙分布的次生流体包裹体

Fig. 1 Characteristics of halite inclusions

a. Solution inclusions in halite ; b. Gas-liquid two-phase inclusions in halite ; c, d. Daughter mineral-bearing fluid inclusions ; e, f. Secondary inclusions distributed along the cracks

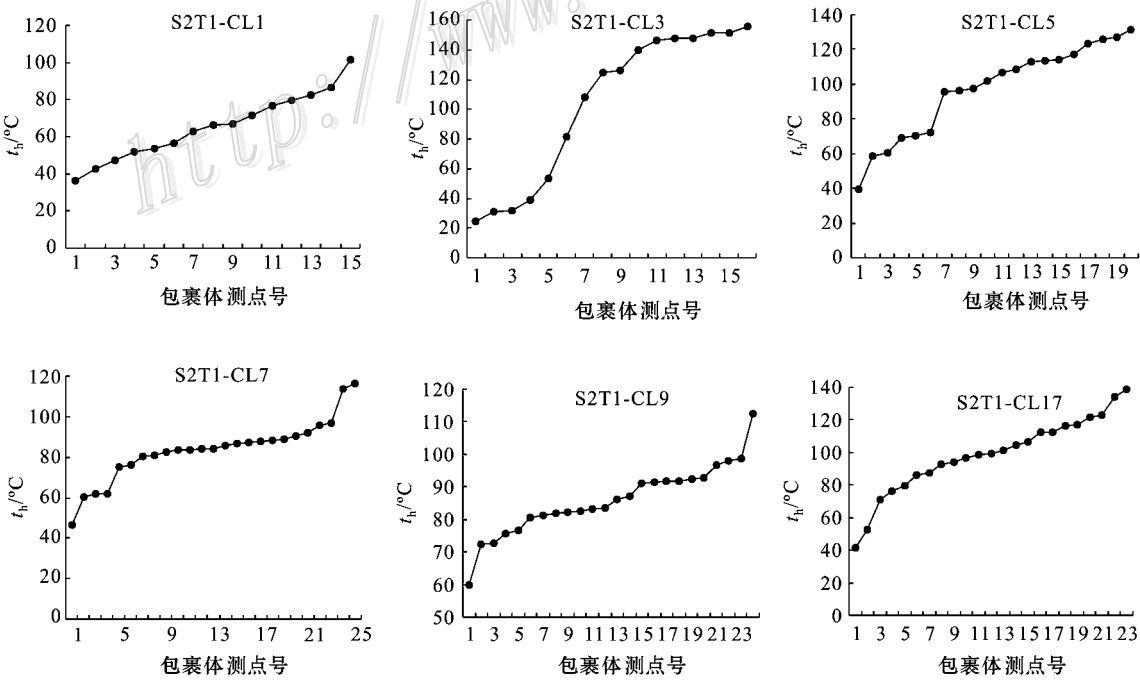


图 2 S2T1-C 钻孔样品石盐流体包裹体 t_h 分布曲线

Fig. 2 Homogenization temperature distribution curve of halite inclusions from drill hole S2T1-C

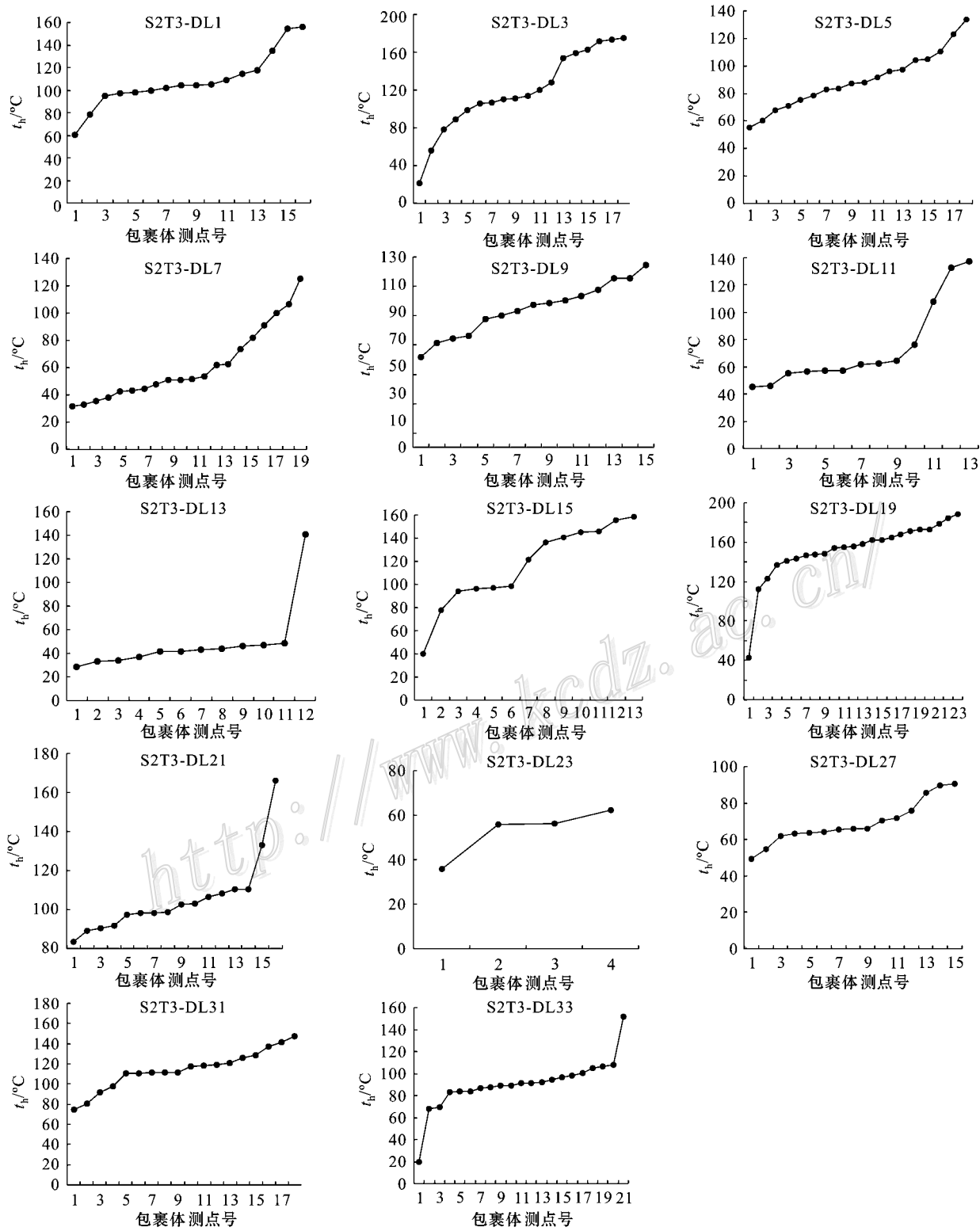


图 3 S2T3-D 钻孔样品石盐流体包裹体 t_h 分布曲线

Fig. 3 Homogenization temperature distribution curve of halite inclusions from drill hole S2T3-D

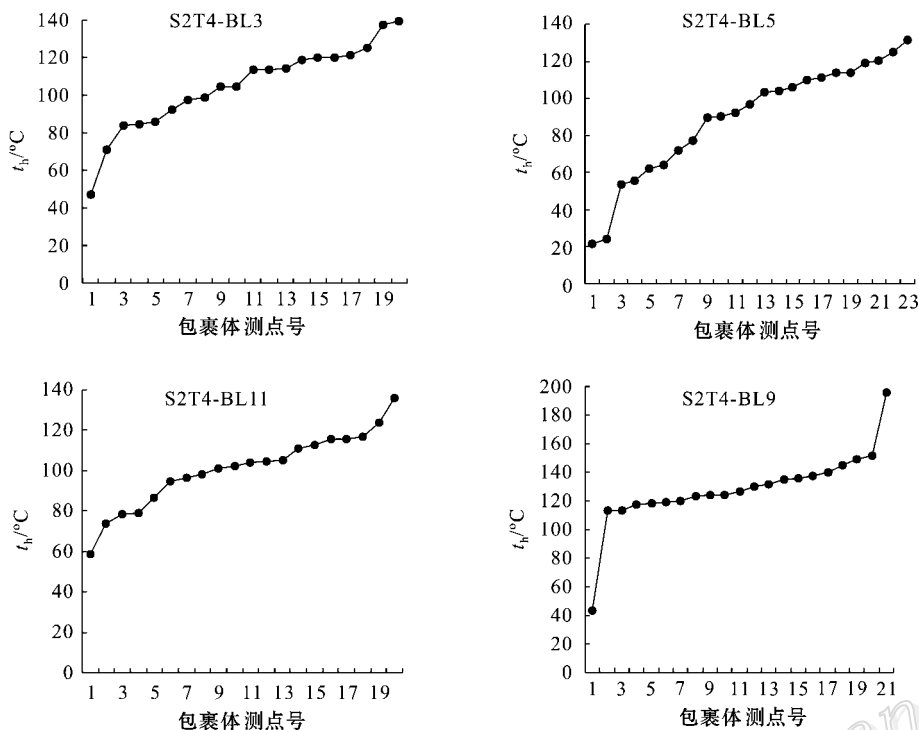
图 4 S2T4-B 钻孔样品石盐流体包裹体 t_h 分布曲线

Fig. 4 Homogenization temperature distribution curve of halite inclusions from drill hole S2T4-B

5、表 3), 低温区段 t_h 变化范围为 29.3~49.2℃, 平均值范围为 31.2~49.2℃; 中温区段 t_h 变化范围为 50.1~98.2℃, 平均值范围为 64.0~90.9℃; 高温区段样品 t_h 变化范围为 100.4~159.7℃, 平均值范围为 100.8~131.8℃。

4 个钻孔样品的流体包裹体 t_h 低温区段变化范围为 19.5~49.3℃; 中温区段 t_h 变化范围为 50.1~99.3℃, 平均值范围为 58.1~93.4℃; 高温区段 t_h 变化范围为 100.3~195.6℃, 平均值范围为 100.8~156.8℃。

4 讨论

可以看出, 在全部 31 件测试样品中, 15 件样品出现 3 个温度分布区段, 16 件样品出现 2 个温度区段。每个区段反映或对应着一次加热事件或地质作用事件。

4.1 低-中温阶段

袁见齐等(1991)研究了石盐流体包裹体的均一温度, 指出某些类型的流体包裹体均一温度代表了沉积时期石盐的结晶温度。Roberts 等(1995)研究了美国死谷(Death Valley)的石盐流体包裹体, 认为

其均一温度可以较好地代表石盐结晶时期的古水温(刘成林等, 2006)。别勒滩地区的石盐低温区段均一温度变化范围从 19.5~49.3℃, 反映了大多数石盐结晶析出的卤水温度。中温区段均一温度变化范围为 50.1~99.3℃, 平均值为 58.1~93.4℃(高温部分的解释见下文), 明显高于表层卤水温度。

4.2 高温阶段流体包裹体的太阳池成因

本文认为高温区段流体包裹体的形成与太阳池效应有关, 因为在相同的采样、制样及测试条件下, 有些样品中出现高温区段, 而另一些中并未出现高温现象(图 2~5, 表 3)。将高温流体包裹体的成因归结为石盐形成后在埋藏或在样品准备过程中(刘兴起等, 2005)及成岩后期有热液叠加与火山活动(张芳等, 2001), 是值得商榷的。本文推测这些高温流体包裹体可能是在太阳池的底部对流层中形成的。

太阳池是贮存太阳能的盐水池的简称。深度一般为 1~3 m, 它不同于一般的淡水池和浓度均匀的盐水池, 而是表层盐水浓度很低, 越往下浓度越高。其由上向下, 一般分为 3 个区域(图 6): ①表面对流层, 主要起到阻止风的扰动和保温作用; ②中部非对流层, 其盐水浓度上低、下高, 呈梯度变化, 是太阳

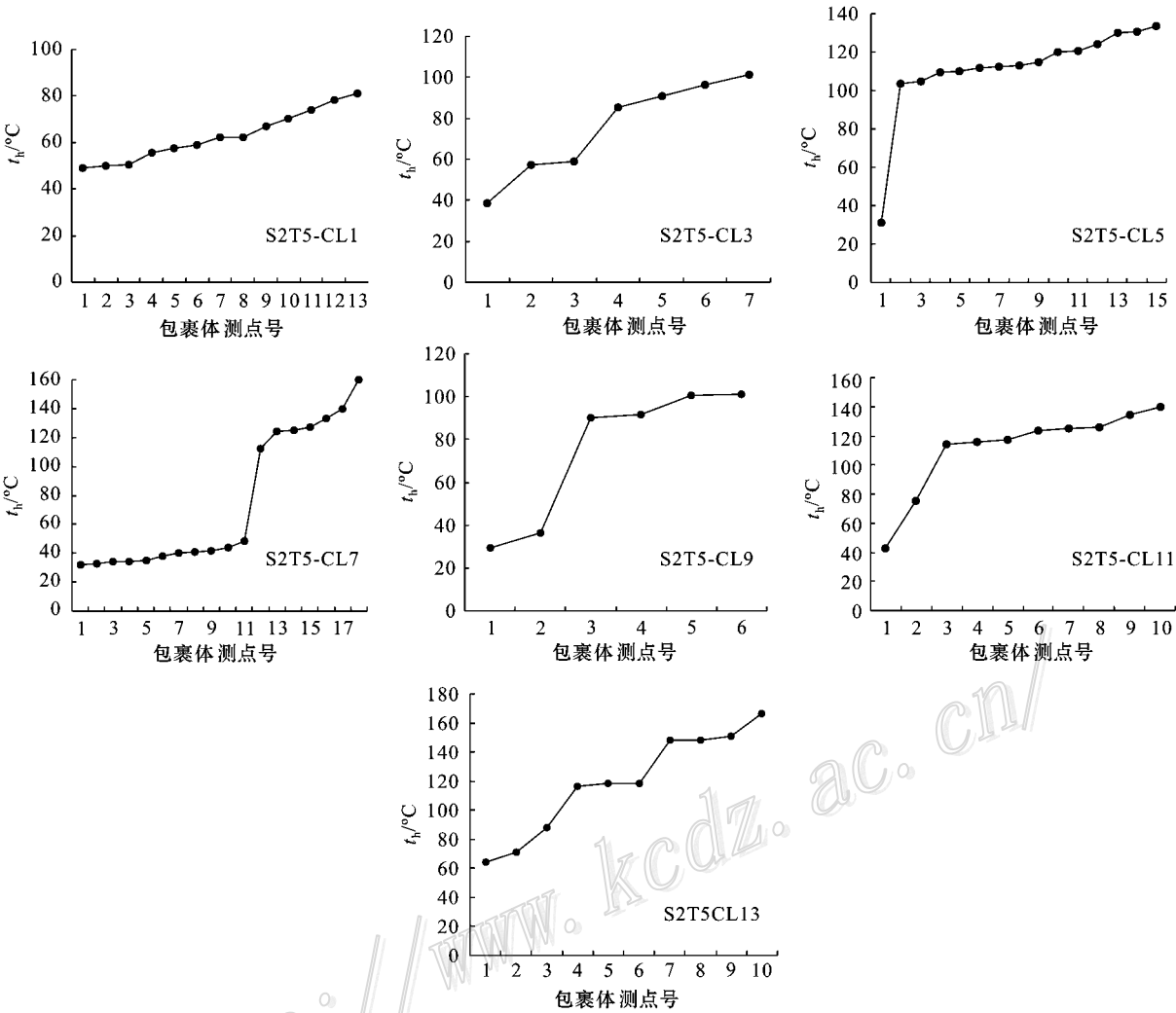


图 5 S2T5-C 钻孔样品石盐流体包裹体 t_h 分布曲线

Fig. 5 Homogenization temperature distribution curve of halite inclusions from drill hole S2T5-C

辐射进入下层的“窗口”,同时抑制了下层热向上对流,因而起到隔热和保温作用;③底部对流层,是太阳池的关键部分,它的盐水浓度较高,接近饱和,并基本均匀,当温度不均匀时,可以通过对流和热传导而达到均匀状态,因而其作用是集热和蓄热。在这3个区域中,以底部对流层的盐水浓度和温度为最高。对不同规模和地区的太阳池而言,底部对流层的温度不同,由于有上部的水体压力以及下部过饱和盐水溶液,沸点超过100℃是容易出现的。例如,1980年6月23日,美国新墨西哥大学的实验太阳池池水发生沸腾,测到的最高温度为106.5℃;以色列所建的面积4万平方米的贝特·哈阿拉互5号大型太阳池,1982年6月向池内充盐液,到1983年4月,池底最高温度已达102℃(李积才,1994)。

太阳池根据成因分为人工太阳池和天然太阳池2种,人工太阳池是根据太阳池原理建成的用于采暖、发电等目的的各种类型太阳池(罗莎莎等,2004)。在中国,人工太阳池的典型实例是扎布耶盐湖用于提锂的太阳池。1999年秋冬之际,由本文第一作者负责在扎布耶盐湖修建了第一个太阳池,该太阳池及以后的相关试验取得了初步成功,现今作为国家计委扎布耶盐湖示范工程主体结晶池的太阳池,是在由富锂卤水制取富锂混盐的理论“不蒸发而升温”的基础上,将太阳池底部对流层卤水直接用富锂卤水的方法制得的(赵元艺等,2004)。该太阳池底层卤水中部的最高温度在2005年6~8月约2个月的时间内达57℃(黄维农,2008)。

本文将地质历史中形成天然太阳池的作用称作

表 3 各个钻孔样品中流体包裹体均一温度分布与区段划分

Table 3 Homogenization temperature distribution and section division of the samples from every drill hole

钻孔号	样品号	$t_h/^\circ\text{C}$					
		低温区段		中温区段		高温区段	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
S2T1-C	S2T1-CL1	36.6~47.1	42.1	51.9~86.8	68.7	101.6	
	S2T1-CL3	24.3~38.6	31.4	53.2~81.6	67.4	108.3~156.0	139.9
	S2T1-CL5	39.7		58.6~97.3	77.4	101.5~131.2	116.6
	S2T1-CL7	46.7		60.2~96.8	82.4	113.6~116.4	115
	S2T1-CL9			59.8~98.7	84.8	112.5	
S2T3-D	S2T1-CL17	41.5		52.6~99.3	84.9	101.1~138.4	116.9
	S2T3-DL1			60.3~99.3	88.1	102.3~156.0	120.2
	S2T3-DL3	21.7		55.9~99.1	80.5	105.7~174.9	137.7
	S2T3-DL5			55.3~97.4	79.6	104.1~133.5	115.3
	S2T3-DL7	31.4~47.6	39.5	50.9~90.7	64.2	100.3~125.3	110.8
	S2T3-DL9			62.1~98.4	83.4	100.5~124.6	111.1
	S2T3-DL11	45.3~45.7	45.5	55.4~76.5	61.5	107.6~137.4	125.8
	S2T3-DL13	28.7~48.1	40.3			140.6	
	S2T3-DL15	39.9	39.9	78.1~98.7	92.9	121.6~158.7	143.4
	S2T3-DL19	42.3	42.3			112~188.6	156.8
	S2T3-DL21			83.6~98.8	93.4	102.4~166.2	117.6
	S2T3-DL23	35.9	35.9	55.7~62.4	58.1		
	S2T3-DL27	49.3	49.3	54.5~90.6	70.6		
	S2T3-DL31			74.6~97.4	86.0	110.4~147.8	122.3
	S2T3-DL33	19.5		68.1~98.1	86.9	100.3~151.4	114.2
S2T4-B	S2T4-BL3	47.2		70.9~98.6	87.6	104.4~139.4	119.4
	S2T4-BL5	21.6~24.2	22.9	53.4~97.0	75.4	103.1~131.5	114.3
	S2T4-BL9	43.7				113.2~195.6	132.6
	S2T4-BL11			58.8~98.2	83.2	101.2~136.2	112.4
S2T5-C	S2T5-CL1		49.2	50.1~80.9	64.0		
	S2T5-CL3	38.6		57.3~96.6	77.9	101.3	
	S2T5-CL5	31.2				103.8~133.6	117.0
	S2T5-CL7	32.1~48.7	38.3			112.3~159.7	131.8
	S2T5-CL9	29.3~36.4	32.9	90.2~91.5	90.9	100.4~101.2	100.8
	S2T5-CL11	42.7		75.2		114.3~140.1	124.5
	S2T5CL13			64.1~87.8	74.4	116.3~166.5	138.2



图 6 太阳池结构简图

Fig. 6 Structural diagram of the solar pond

“太阳池事件”,太阳池事件的识别标志理论上应该是从浅部到深部,温度和盐度具有相同的逐渐升高的变化趋势。由于太阳池中部非对流层的盐度和温度相对底部对流层的较低,由这 2 部分沉积的盐类矿物往往混合在一起,因此如果出现高温-高盐度与中低温-中低盐度的盐类矿物流体包裹体混杂在一起,就可以作为判断太阳池存在的标志。

太阳池事件的形成方式包括 2 种情况:一种是浓度比较高的卤水由于外来淡水的加入而形成盐度从上到下逐渐减小的太阳池,本文称其为“液-液”型太阳池;另一种是外来淡水或低浓度卤水溶解原有固体盐层所形成的太阳池,本文将其称为“固-液”型太阳池。“液-液”型太阳池的形成是普遍的,雨过天

晴时,海水虾池由于太阳池效应而引起的温度升高导致池中对虾毁灭性死亡与疾病爆发就是最好的例子(苏永全,1995;叶兆弘,2004)。青藏高原“液-液”型天然太阳池的实例有2个。一个是西藏那曲地区的错尼湖,1976年测温发现湖水水温-深度曲线呈现明显的S型,当时认为这是由于湖下温泉所致(佟伟,2000)。2001年4月,发现错尼湖湖水的盐度自上向下逐渐升高,湖表冰下表层盐度 $w(\text{NaCl})_{\text{eq}}$ 为1.5%~2.5%,湖底最深部约42.5 m处的盐度 $w(\text{NaCl})_{\text{eq}}$ 则达14%,在-15℃的温度条件下,湖水下层温度达18℃,比气温高出33℃,此现象充分证明了其太阳池的效应(罗莎莎,2003)。另一个,1999年7月中旬,在扎布耶盐湖(年均气温约2.5℃)的查布野钙华岛泉水(为淡水,水温8~10℃)出口与南湖卤水(盐度约23%)交界处卤水中部的温度约35℃,人手置于其中明显有“热”的感觉。

笔者推测,“固-液”型太阳池在地质历史时期是常见的,在沉积序列中,盐湖沉积之后的淡化事件往往会引起太阳池的形成,但由于认识不足或其他原因而常常未被发现。如果确有太阳池事件存在,那么据其下部卤水对流层中析出的盐类矿物组合或相关参数计算的古气候的可靠性就需要进一步研究。本文认为,由太阳池下部对流层中沉积的盐类矿物组合或相关参数计算的古温度可以代表其形成时的卤水温度。

4.3 前人对高温阶段的解释

20世纪70年代以前,一些学者对古代地层和实验室形成的石盐气相流体包裹体的均一温度进行了研究(Drey et al., 1949; Roedder et al., 1979; McCulloch, 1959),测得的均一温度介于30~100℃之间,同现代水体温度相比,均一温度显得较高。其原因被解释为,石盐形成后在埋藏或在样品准备过程中,石盐流体包裹体可能因压实变形发生了延展或泄漏(刘兴起等,2005)。

之后,对兰坪-思茅盆地石盐矿床盐矿物流体包裹体均一温度的解释,认为其测温结果可分为2组,①平均80℃左右,最高97℃,最低50℃。是蒸发盐类矿床的流体包裹体形成温度。②平均140℃左右,最高170℃,最低107℃,代表蒸发成岩后期有热液叠加与补给,与区域上火山活动有关(张芳等,2001)。

对罗布泊盐湖石盐流体包裹体均一温度的解释为:少数流体包裹体均一温度与石盐结晶卤水温度

(30℃~52℃)一致,大多数均一温度明显偏离结晶温度,多数高出卤水温度约20~90℃,少数低于卤水温度约6~30℃。均一温度大致呈2~5个温度段分布,说明流体包裹体均一温度可能受到多个因素的影响,在排除人为影响因素外,还需要考虑气候条件、沉积环境、成岩作用等因素,同时也要考虑矿物结构特征可能对流体包裹体均一温度产生的影响(刘成林等,2005)。

4.4 别勒滩地区太阳池事件的确定

对S2T3-D钻孔样品中的流体包裹体均一温度进行统计,从地表到深部间隔性地出现3段均一温度大于100℃的流体包裹体集中区间,其分布深度分别为0.0~2.0 m、7.9~11.0 m和16.39~18.38 m(表4、图7)。在这3个区段中,含高温-高盐度流体包裹体的石盐与中低温-中低盐度流体包裹体的石盐混杂在一起,因此可以初步判断其中可能出现过太阳池事件。

为了正确地判断太阳池的存在,本文将均一温度大于100℃的流体包裹体数占有流体包裹体总数的百分比超过50%作为判别标志(表5、图8)。对S2T1-C钻孔,在0.40~0.60 m与0.80~1.00 m两段集中出现均一温度高于100℃的流体包裹体;对S2T3-D钻孔,在0.40~0.60 m、1.80~2.00 m、7.90~8.10 m、9.90~10.10 m、10.80~11.00 m和16.39~16.63 m共6段集中出现均一温度高于100℃的流体包裹体;对S2T4-B钻孔,在0.40~0.80 m、0.80~1.00 m、1.70~1.90 m和2.10~2.30 m四段集中出现均一温度高于100℃的流体包裹体;S2T5-C钻孔,在0.80~1.00 m、2.10~2.30 m、2.50~2.70 m三段集中出现均一温度高于100℃的流体包裹体。对这4个钻孔中流体包裹体均一温度高于100℃的样品出现的位置进行综合,可以得出别勒滩地区在18 m以浅部位可能出现6个太阳池事件,它们的位置(编号)分别为0.40~1.00 m(S_6)、1.70~2.90 m(S_5)、7.90~8.10 m(S_4)、9.90~10.10 m(S_3)、10.80~11.00 m(S_2)和16.39~16.63 m(S_1)(图8)。

由于目前对别勒滩地区所经历的前5个太阳池事件(即 S_1 ~ S_5)只有“流体包裹体均一温度平均值高于100℃”这一个证据,随着其他证据的积累,将会得出更详细的太阳池沉积事件划分方案。对于 S_6 ,推测为新近时期所形成。1989年格尔木河发生特大洪水,洪水于6月20日出现,洪峰水流量达410 m³/s,

表 4 S2T3-D 钻孔流体包裹体均一温度(t_h)和盐度随深度变化特征

Table 4 Homogenization temperature(t_h) and salinity change of inclusions with the depth in drill hole S2T3-D

序号	样品编号	孔深/m	t_h 平均值/℃	盐度特征
1	S2T3DL1	0.40~0.60	108.14	低盐度
2	S2T3DL3	1.80~2.00	118.57	中高盐度
3	S2T3DL5	2.70~2.90	89.51	低盐度、中高盐度
4	S2T3DL7	3.80~4.00	61.31	低盐度、中高盐度
5	S2T3DL9	4.60~4.80	94.49	低盐度、中高盐度
6	S2T3DL11	5.80~6.00	73.86	中高盐度
7	S2T3DL13	6.60~6.80	48.49	中高盐度
8	S2T3DL15	7.90~8.10	115.99	
9	S2T3DL19	9.90~10.10	151.80	中高盐度
10	S2T3DL21	10.80~11.00	105.52	中高盐度
11	S2T3DL23	12.19~12.49	52.58	中高盐度
12	S2T3DL27	14.39~14.59	69.19	中高盐度
13	S2T3DL31	16.39~16.63	114.26	低盐度、中高盐度
14	S2T3DL33	17.88~18.38	90.21	低盐度、中高盐度

注 盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0~23.3% 的溶液为低盐度; $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})>23.3\%$ 的溶液为中高盐度(刘斌等,1999)。样品分布位置见表 2。空白为未测出盐度值。

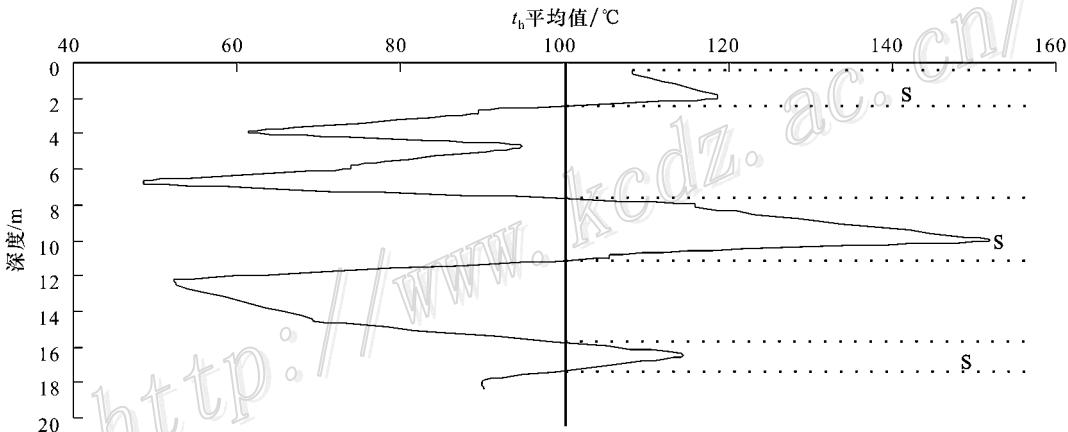


图 7 均一温度随深度的变化及太阳池位置(S 为出现太阳池的位置)

Fig. 7 Homogenization temperature changes with the depth and locations of the solar pond event
(S signifying the site of the solar pond)

7月12日发展至历史最大洪水,洪峰水流量达680 m³/s。1989年12月卫星照片资料显示,涩聂湖扩大103.04 km²(于升松,2000),说明此次洪水可以导致别勒滩石盐溶解和再结晶沉积,在这个过程中形成太阳池是完全有可能的。因此可以推测S₆太阳池事件很可能是这次大水灾所造成的,反过来说,这种大水灾事件在石盐流体包裹体中已有体现。

5 结 论

(1) 别勒滩地区石盐流体包裹体均一温度呈现

出3个或2个温度区段,即低温、中温和高温区段。低温区段样品均一温度变化范围为19.5~49.3℃,为大多数石盐结晶析出的卤水温度。中温区段样品均一温度变化范围为50.1~99.3℃,平均值为58.1~93.4℃,为盐湖底部卤水所达到的最高温度。

(2) 由太阳池下部对流层中沉积的盐类矿物组合或相关参数计算的古温度只能说明其形成当时的卤水温度,该水温与气温之间没有必然的联系,水温不能代表当时的气温。在同一样品中,高温-高盐度流体包裹体与中低温-中低盐度流体包裹体同时出现,是石盐结晶经历了太阳池下部对流层环境与中

表 5 均一温度(t_h)高于 100℃ 的流体包裹体统计表

Table 5 Statistics of halite inclusions with homogenization temperatures(t_h) higher than 100 °C

序号	钻孔编号	样号	深度/m	测定流体包裹体数/个	t_h 高于 100℃ 的流体包裹体			
					数量/个	百分数/%	t_h 范围/℃	t_h 平均值/℃
1	S2T1-C	S2T1CL1	0~0.20	15	1	6.7	101.6	101.6
2		S2T1CL3	0.40~0.60	16	10	62.5	108.3~156	139.93
3		S2T1CL5	0.80~1.00	21	11	52.38	101.5~131.2	116.56
4		S2T1CL7	1.20~1.40	25	2	8	113.6~116.4	115
5		S2T1CL9	1.60~1.80	24	1	4.2	112.5	112.5
6		S2T1CL17	3.40~3.60	23	11	47.83	101.1~138.4	116.92
7	S2T3-D	S2T3DL1	0.40~0.60	16	10	62.5	102.3~156	120.2
8		S2T3DL3	1.80~2.00	18	13	72.22	105.7~174.9	137.74
9		S2T3DL5	2.70~2.90	18	5	27.78	104.1~133.5	115.26
10		S2T3DL7	3.80~4.00	20	3	15	100.3~125.3	110.77
11		S2T3DL9	4.60~4.80	15	6	40	100.5~124.6	111.13
12		S2T3DL11	5.80~6.00	13	3	23.08	107.6~137.4	125.83
13		S2T3DL13	6.60~6.80	12	1	8.33	140.6	140.6
14		S2T3DL15	7.90~8.10	13	7	53.85	121.6~158.7	143.39
15		S2T3DL19	9.90~10.10	23	22	95.65	112~188.6	156.78
16		S2T3DL21	10.80~11.00	16	8	50	102.4~166.2	117.61
17	S2T4-B	S2T3DL31	16.39~16.63	18	14	77.78	110.4~147.8	122.34
18		S2T3DL33	17.88~18.38	21	5	23.81	100.3~151.4	114.22
19		S2T4BL3	0.40~0.60	20	12	60	104.4~139.4	119.37
20		S2T4BL5	0.80~1.00	23	11	47.83	103.1~131.5	114.33
21	S2T5-C	S2T4BL9	1.70~1.90	21	20	95.24	113.2~195.6	132.58
22		S2T4BL11	2.10~2.30	20	12	60	101.2~136.2	112.35
23		S2T5CL3	0.40~0.60	7	1	14.29	101.3	101.3
24		S2T5CL5	0.80~1.00	15	14	93.33	103.8~133.6	117.03
25		S2T5CL7	1.20~1.40	19	7	36.84	112.3~159.7	131.79
26		S2T5CL9	1.60~1.80	6	2	33.33	100.4~101.2	100.8
27		S2T5CL11	2.10~2.30	10	8	80	114.3~140.1	124.51
28		S2T5CL13	2.50~2.70	10	7	70	116.3~166.5	138.16

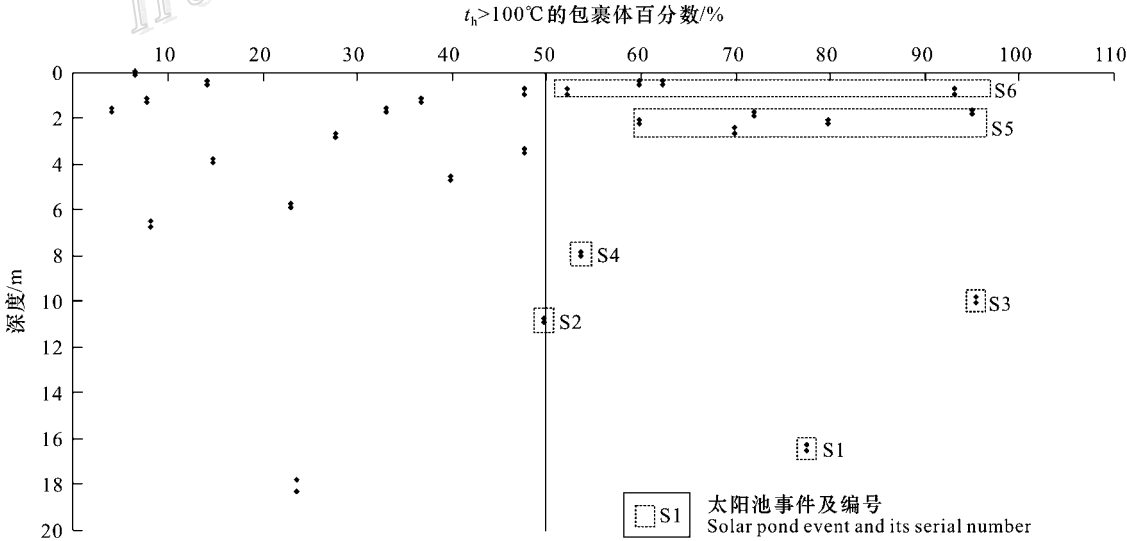


图 8 别勒滩地区太阳池事件位置

Fig. 8 The location of the solar pond event in Bieleitan area

部非对流层环境所致。

(3) 高温区段样品中流体包裹体均一温度变化范围为 $100.3 \sim 195.6^{\circ}\text{C}$ ，平均值为 $100.8 \sim 156.8^{\circ}\text{C}$ ，是在太阳池的底部对流层中形成的。别勒滩地区在 18 m 以上部位可能出现 6 个太阳池事件，它们的位置(编号)分别为 $0.40 \sim 1.00 \text{ m}$ (S_6) $1.70 \sim 2.90 \text{ m}$ (S_5) $7.90 \sim 8.10 \text{ m}$ (S_4) $9.90 \sim 10.10 \text{ m}$ (S_3) $10.80 \sim 11.00 \text{ m}$ (S_2) $16.39 \sim 16.63 \text{ m}$ (S_1)，其中第 6 次太阳池事件可能是 1989 年发生的水灾在盐湖沉积中的体现。

志 谢 本文野外钻探施工由青海省柴达木综合地质大队完成，样品采集期间得到井忠民高级工程师的大力支持。矿物的显微镜鉴定由刘丹阳高级工程师完成。扫描电镜的测试工作由中国石油勘探开发研究院石油地质试验研究中心魏宝和高级工程师完成。X 射线粉晶衍射分析由中国地质科学院矿产资源研究所韩景仪副研究员完成。化学组成分析工作由中化地质矿山总局中心实验室(即原化工部化工地质中心实验室)何汉江高级工程师完成。论文承蒙中国地质科学院矿产资源研究所刘成林研究员与中国地质大学(北京)蔡克勤教授认真审核并提出宝贵意见，在此对上述单位与个人表示衷心的感谢。

References

- Drey R M, Garrels R M and Howland A L. 1949. Liquid inclusions in halite as a guide of geologic thermometry[J]. *American Mineralogist*, 34: 26-34.
- Huag W N. 2008. Applied fundamental research and optimization on the Zabuye salt lake lithium carbonate production technics (dissertation for Doctor degree [D]). Supervisor: Wang X K and Sun Z N. Tianjin: Tianjin Univ. Sci. & Technol. 35 (in Chinese with English abstract).
- Li B T, Zhao Y Y, Qian Z H, Jiao P C, Liu C L and Wang S J. 2010. A comparative study of material composition of solid sylvite before and after liquefaction and its significance in Bieletan area of Qarhan salt lake, Qinghai, China[J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 669-683 (in Chinese with English abstract).
- Li J C. 1994. Solar energy utilize of salt lake—Solar pond[J]. *J. Salt Lake Research*, 2(4): 61-66 (in Chinese with English abstract).
- Liu B and Shen K. 1999. Thermodynamics of fluid inclusion[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 44-72 (in Chinese).
- Liu C L, Chen Y Z, Jiao P C, Li M Q and Wang M L. 2005. The research on the homogenous temperatures of inclusions in halite from the isothermal evaporation of brine and natural halite from Lop Nur Playa, Xinjiang, China[J]. *J. East China Institute of Technology (Natural Science)*, 28(4): 307-310 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Chen Y Z, Chen W S, Jiao P C, Wang M L and Li S D. 2006. Studies of fluid inclusions in glauberite of middle-upper pleistocene strata and their paleoclimatic significance in Lop Nur Salt Lake[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(1): 95-96 (in Chinese with English abstract).
- Liu X Q and Ni P. 2005. Advances in studies of fluid inclusions in halite formed in earth's surface environments[J]. *Advances in Earth Science*, 20(8): 856-859 (in Chinese with English abstract).
- Luo S S. 2003. Development and application of saline solar pond technology in Tibet[J]. *Energy Engineering*, (3): 25 (in Chinese with English abstract).
- Luo S S and Zheng M P. 2004. Study and application of the solar pond[J]. *Energy Research and Information*, 20(1): 29-30 (in Chinese with English abstract).
- Mc Culloch D S. 1959. Vacuole disappearance temperatures of laboratory-grown hopper halite crystals[J]. *J. Geophysical Research*, 64: 849-854.
- Roberts S M and Spence R J. 1995. Paleotemperatures preserved in fluid inclusions in halite[J]. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 59(19): 3929-3942.
- Roedder E and Belkin H E. 1979. Application of studies of fluid inclusions in Permian Salado Salt, NM, to problems of siting the waste isolation pilot plant[A]. In: Mc Carthy G J, ed. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*[C]. New York: Plenum Press. 313-321.
- Su Y Q. 1995. The healthy culture of Shrimp[M]. Beijing: China Ocean Press. 50-125 (in Chinese).
- Tong W, Liao Z J and Liu S B. 2000. Records of hot springs in Tibet[M]. Beijing: Sci. Press. 84-89 (in Chinese).
- Ye Z H. 2004. The solar ponds effect of seawater prawn pond[J]. *J. Jimei Univ. (Natural Sci.)*, 9(3): 210-215 (in Chinese with English abstract).
- Yu S S. 2000. Potassium brine water dynamics and its prediction in the first mining area of Qarhan salt lake[M]. Beijing: Sci. Press. 258 (in Chinese).
- Yuan J Q, Cai K Q and Xiao R G. 1991. The characteristics and genesis of inclusions in salt from Mengyejing potash deposit in Yunnan Province[J]. *Earth Sci.*, 16(2): 137-142 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F, Di W H and Wang Z P. 2001. Studying of salt mineral fluid inclusion at salt evaporite deposits in Lanping-Simao basin[J]. *Mineral Resour. & Geol.*, 15(2): 114 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y Y, Zheng M P, Bu L Z, Nie Z and Liu X F. 2005. Study on salt pan technology of lithium salt extracting from carbonate-type saline lakes, Tibet[J]. *Sea-lake Salt and Chemical Industry*, 32(2): 6-7 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y Y, Han J Y, Wang S J, Jiao P C, Liu C L and Qian Z H. 2008. New cognition and its significance of mineral composition of solid potassium salts in Bieletan, Qinghai[A]. In: Chen Y C, Xue

C J and Zhan C Q, ed. Main attack partes profunda, push forward westward and keeping in view the world: The memoir of the Ninth Session National Deposit Conference[C]. The Ninth Session National Deposit Conference, 2008. Beijing: Geol. Pub. House. 395-397(in Chinese).

Zheng M P, Xiang J, Wei X J and Zheng Y. 1989. Salt lakes on the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau[M]. Beijing: Beijing Sci. & Technol. Press. 330(in Chinese).

附中文参考文献

- 黄维农. 2008. 扎布耶盐湖碳酸锂生产工艺应用基础研究和优化(博士论文) [D]. 导师: 王学魁, 孙之南. 天津: 天津科技大学. 35.
- 李波涛, 赵元艺, 钱作华, 焦鹏程, 刘成林, 王石军. 2010. 青海察尔汗盐湖别勒滩区段固体钾盐液化前后物质组成对比及意义[J]. 矿床地质, 29(4): 669-683.
- 李积才. 1994. 盐湖太阳能的利用——太阳池[J]. 盐湖研究, 2(4): 61-66.
- 刘 斌, 沈 昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社. 44-72.
- 刘成林, 陈永志, 焦鹏程, 李荫清, 王弼力. 2005. 罗布泊卤水室内蒸发及天然石盐流体包裹体均一温度分析探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 28(4): 307-310.
- 刘成林, 陈永志, 陈伟十, 焦鹏程, 王弼力, 李树德. 2006. 罗布泊盐湖更新世晚期沉积钙芒硝流体包裹体特征及古气候意义探讨[J]. 矿物学报, 26(1): 95-96.

刘兴起, 倪 培. 2005. 表生环境条件形成的石盐流体包裹体研究进展[J]. 地球科学进展, 20(8): 856-859.

罗莎莎. 2003. 西藏地区盐湖太阳池技术开发应用的研究[J]. 能源工程, (3): 25.

罗莎莎, 郑绵平. 2004. 太阳池的研究与应用[J]. 能源研究与信息, 20(1): 29-30.

苏永全. 1995. 虾类的健康养殖[M]. 北京: 海洋出版社. 50-125.

佟 伟, 廖志杰, 刘时彬. 2000. 西藏温泉志[M]. 北京: 科学出版社. 84-89.

叶兆弘. 2004. 海水虾池的太阳池效应[J]. 集美大学学报(自然科学版), 9(3): 210-215.

于升松. 2000. 察尔汗盐湖首采区钾卤水水动态及其预测[M]. 北京: 科学出版社. 258.

袁见齐, 蔡克勤, 肖荣阁. 1991. 云南勐野井钾盐矿床石盐中流体包裹体特征及其成因的探讨[J]. 地球科学, 16(2): 137-142.

张 芳, 耿文辉, 王滋平. 2001. 兰坪-思茅盆地石盐矿床盐矿物流体包裹体特征[J]. 矿产与地质, 15(2): 114.

赵元艺, 郑绵平, 卜令忠, 乜 贞, 刘喜方. 2005. 西藏碳酸盐型盐湖卤水锂盐提取盐田工艺研究[J]. 海湖盐与化工, 32(2): 6-7.

赵元艺, 韩景仪, 王石军, 焦鹏程, 刘成林, 钱作华. 2008. 青海别勒滩固体钾盐矿物组成的新认识及其意义[A]. 见: 陈毓川, 薛春纪, 张长青, 主编. 主攻深部 挺进西部 放眼世界——第九届全国矿床会议论文集[C]. 第九届全国矿床会议, 2008. 北京: 地质出版社. 395-397.

郑绵平, 向 军, 魏新俊, 郑 元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 330.

http://www.kongfz.com