



卤水表面附近盐岩结晶特征研究

冯阵东, 谭浩林, 周永, 史淑珍, 吴伟, 刘惟庆, 魏国营

引用本文:

冯阵东, 谭浩林, 周永, 史淑珍, 吴伟, 刘惟庆, 魏国营. [卤水表面附近盐岩结晶特征研究](#) [J]. 沉积学报, 2024, 42(1): 20-28.
FENG ZhenDong, TAN HaoLin, ZHOU Yong, et al. [Study of Crystallization of Halite Near the Surface of Brine](#) [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(1): 20-28.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[四川盆地灯影组三段混积特征及其地质意义](#)

Mixed Sedimentary Characteristics of the Third Member of Dengying Formation, Sichuan Basin, and Its Geological Significance
沉积学报. 2020, 38(3): 598-609 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.109>

[现代盐湖沉积与岩盐析出模拟的相似性及其对成盐模式的启示](#)

The Similarity of Salt-Forming between Flume Experiment and Modern Salt Lake
沉积学报. 2018, 36(6): 1119-1130 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.117>

[塔里木盆地下寒武统台缘带沉积结构特征及其形成过程](#)

Sedimentary Texture and Formation Process of the Lower Cambrian Plat-form Marginal Zone in the Tarim Basin, NW China
沉积学报. 2018, 36(4): 706-721 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.059>

[黔西北丁台地区下寒武统清虚洞组风暴沉积的发现及其意义](#)

Discovery and Significance of the Storm Deposit within the Lower Cambrian Qingxudong Formation in the Dingtao Area, Northwestern Guizhou
沉积学报. 2016, 34(3): 478-486 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.03.005>

[洪泽凹陷赵集次凹阜宁组四段盐岩深水再沉积成因探讨](#)

Study on Deep Water Resedimented Origin of Saline Sediments of E1f4 in Zhaoji Sag, Hongze Depression, Northern Jiangsu Basin
沉积学报. 2015, 33(2): 242-253 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.02.004>

文章编号:1000-0550(2024)01-0020-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.049

卤水表面附近盐岩结晶特征研究

冯阵东¹, 谭浩林¹, 周永², 史淑珍³, 吴伟², 刘惟庆², 魏国营¹

1.河南理工大学安全科学与工程学院,河南焦作 454003

2.河南理工大学资源环境学院,河南焦作 454003

3.河南理工大学建筑与艺术设计学院,河南焦作 454003

摘要 【目的】为了弥补现代盐湖沉积考察中丢失的信息,获取盐岩动态结晶过程,指导古盐湖沉积研究。【方法】借助室内石盐蒸发实验,观察卤水蒸发过程中氯化钠结晶特征,分析石盐结晶与沉积环境之间的关系,为盐湖沉积模式建立提供参考。

【结果与结论】石盐沉积位置受结晶习性影响,晶体可以在卤水界面之上沉积,其形成的动力除了蒸发泵作用外,还受空气湿度和石盐潮解共同控制;人字晶一般形成于漏斗晶基础之上,在发育空间受限时,绕不同漏斗晶核生长的纹层斜交后形成人字晶纹,两种晶型可以同时沉积于水面之上;盐湖干涸之前,可能经历岩层封锁水面的现象,并可能对临层的碎屑沉积物产生影响。

关键词 石盐;不同晶形;结晶特征;卤水表面;蒸发实验

第一作者简介 冯阵东,男,1983年出生,博士,讲师,油气地质及勘探,E-mail: fzd203@163.com

通信作者 史淑珍,女,讲师,shuzhensi@sina.com

中图分类号 P558.24 **文献标志码** A

0 引言

将今论古是地质学研究中的最基本方法,现有报道中,盐湖盆地沉积模式的建立^[1-8],多以现代盐湖中的水体分布及沉积特征为依据。然而,现代自然条件下湖盆的咸化、卤水的浓缩、晶体的沉积,往往需要漫长的过程,野外地质调查中观测到的湖盆一般对应盐湖演化的特定阶段^[8-9],演化模式是多个阶段拼接之后作出的推断^[10-16]。古盐湖的沉积过程中,可能在极度干旱后进入干盐湖阶段,同样也可能随着气候变化、淡水的注入,原先沉积的盐岩被再度溶解^[8-9],从而导致部分地质记录的缺失。实验室开展的蒸发实验,可以实现盐岩结晶的动态观测,有效弥补盐湖沉积中丢失的信息。自然界中出露水面的盐岩极易被再度溶蚀,笔者在室内蒸发实验中,记录到部分形成于卤水界面之上的晶体,对不同构造部位、不同晶型的石盐开展描述及分析,可以为盐湖沉积模式、沉积动力研究提供有益的参考。

1 实验模型设计

实验模型在长20 cm、宽14 cm、高16 cm规模的玻璃水槽基础上改造,使用形态保持比较好的泥层对模型地貌进行改造,整体参考东濮凹陷“两凹一隆一斜坡”的构造格局进行模型设计(图1)。模型中间设置隆起带,被其分割开来的是两侧洼陷带,模型右侧对应东濮凹陷东部的兰聊断层下降盘,北侧为减少玻璃边界影响,设置泥层用于隔绝卤水与玻璃接触。实验模型的设计,考虑饱和卤水分布范围对盐沉积位置的影响,以及不饱和水体对早期盐层厚度的溶蚀—再沉积改造,交替使用不饱和卤水(饱和NaCl溶液与自来水1:1混合溶液)、饱和卤水进行蒸发实验。自卤水注入开始计时,直至模型内溶液完全干涸作为一个蒸发阶段的结束,整组实验设计对应5个阶段,分别使用不饱和卤水(阶段1)、饱和卤水(阶段2)、不饱和卤水(阶段3)、不饱和卤水(阶段4)、饱和卤水(阶段5)进行蒸发实验。

整组于2020年8月11日20:48注入不饱和卤水开始实验,实验模型安置于实验室内,除短时间通风

之外基本处于相对封闭的空间,室内温度为自然温度(介于25 °C~39 °C)。室内湿度基本维持在35%左右,靠近卤水界面的湿度数据未曾测试,根据现代湖盆气象数据表明,气水界面附近湿度可以增大至90%以上^[17]。初始水体深度分布如图1所示:初始卤水界面淹没中央隆起带之上0.5 cm左右,西部洼陷带最大水深5.5 cm,东部最大水深5.0 cm,2020年9月25日7:19分最后一个蒸发阶段结束,完成了本次设计的5个实验阶段的全部内容。实验中记录到的盐层厚度迁移结果仍在整理过程中,在此仅报道卤水界面附近的盐岩结晶特征及分析结果。

2 石盐结晶特征及研究意义

实验过程中,根据结晶位置及特征差异,结晶可以划分为3种类型:初始饱和卤水界面上部的片状结晶(图2)、初始饱和卤水界面下部漏斗晶+人字晶、卤水界面之上的层状晶体。需要说明的是,实验虽然设计了5个实验阶段,但卤水页面上部结晶特征最为典型的是采用饱和卤水蒸发的2个阶段(分别为阶段2、阶段5,依次对应时间段为8月27日—9月4日、9月16日—9月25日),重点对如上2个阶段产生的现象进行描述、分析。其中,初始饱和卤水界面上部的片状结晶因长时间暴露在卤水界面之上,早期产生的晶体受潮解作用影响,透明度降低,其后的实验产生的片状结晶叠合在原有晶体之上,从而干扰结晶顺序的判断,故该部分结晶现象的描述采用2020年8月27日—9月4日实验阶段结果。其余两部分晶体(初始饱和卤水界面下部漏斗晶+人字晶、卤水界面之上层状晶体结晶),在不饱和卤水注入后被重

新溶解。最后一个实验阶段(第5阶段:9月16日—9月25日),能够在保持较大水深条件下结晶,更有助于观察层状结晶对下部卤水的影响、盐层暴露后的持续变形,故该部分现象的描述重点围绕第5阶段开展。

2.1 初始卤水表面上部

初始饱和卤水界面上部的片状结晶,其结晶特征如下(图2):最早产生的结晶位于初始卤水界面之上,对应模型边缘的浅水区域(图2a);早期产生的晶体作为晶核,其后产生的片状晶体绕核生长,每天相对高温的午后至傍晚晶体生长速度较快,而夜间结晶速度相应减慢(图2b~f);石盐可以在非渗透性的玻璃水槽内壁生长,其上部生长界限难以突破模型的上部边缘(图3);卤水与玻璃之间被泥层隔绝的条件下(对应图3中图片的上端),上部的片状晶体容易发生脱水变形,早期形成的片状晶容易发生褶皱变形、脱落,而后期产生的片状晶体紧邻玻璃一侧(图3b)。

这部分晶体生长,可以为易溶性蒸发岩结晶动力研究提供参考。前人曾经报道过该部分晶体,但未对其沉积动力进行分析^[18-19]。禚喜准等^[20]认为该部分盐岩是蒸发泵作用的产物。实验中采用的蒸发水槽为玻璃材质,其渗透率基本为零,水槽边界不具备毛细管力产生的条件;不可否认,盐岩的晶间空隙具备形成毛细管的可能,但在实验中同时发现片状晶体难以突破模型上缘,如果毛细管力是该部分晶体形成的主要动力,卤水干涸之前毛细管两侧液面无法达到平衡,晶体应该持续生长,且生长至模型上缘的片状晶不具备方向性,应该出现片状晶“溢出”水槽、沿着模型外侧生长的现象(图3b),

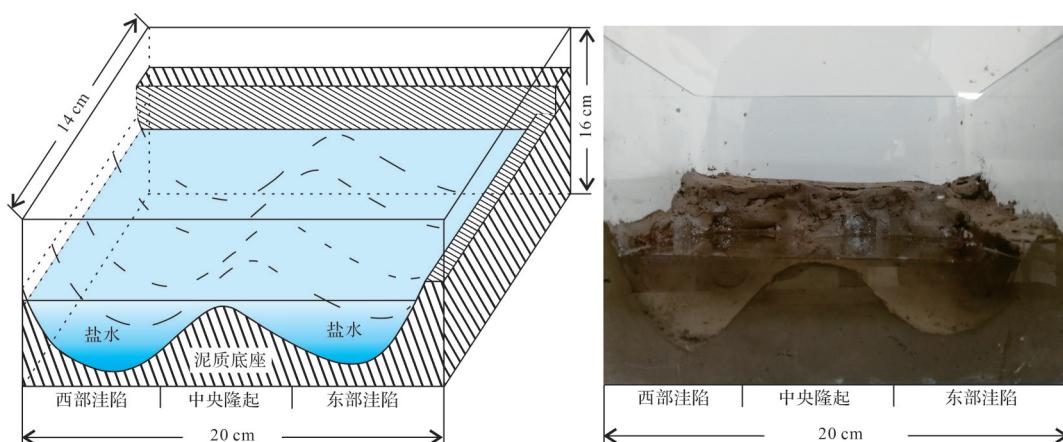


图1 常温蒸发实验模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of room temperature evaporation experimental model

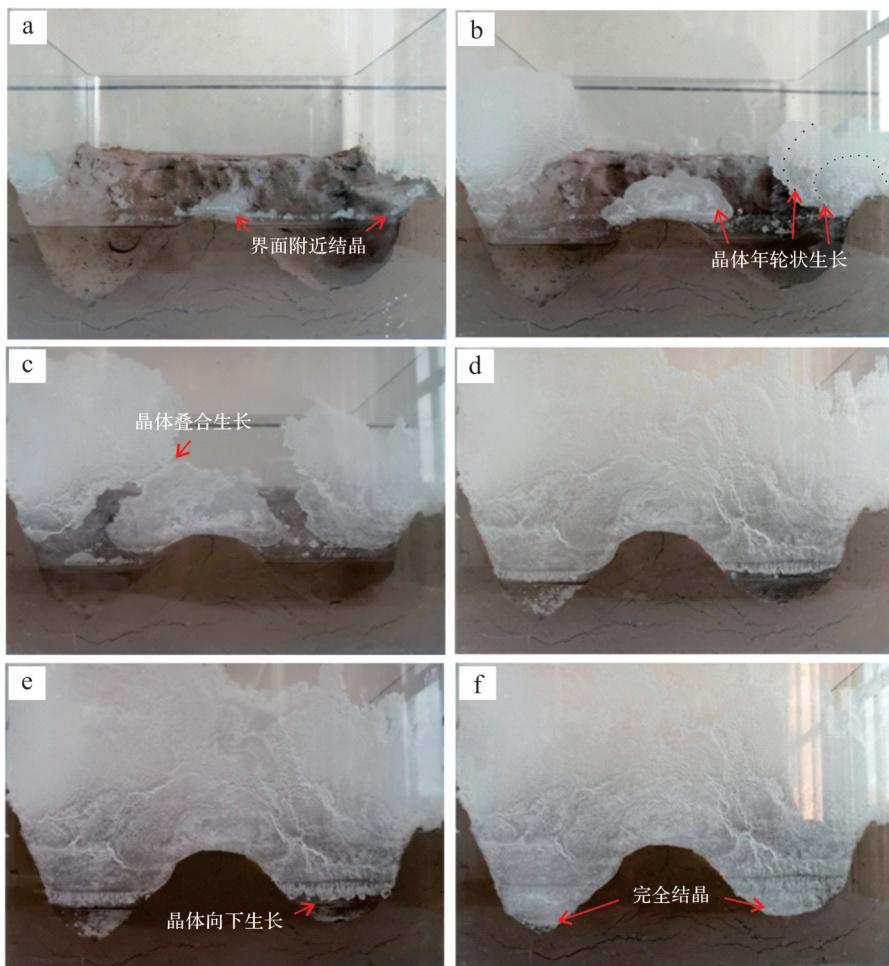


图2 气水界面上部片状晶体生长特征(比例尺见图1)

(a)2020年8月27日15:09;(b)2020年8月30日17:33;(c)2020年8月31日18:57;(d)2020年9月2日14:30;(e)2020年9月2日18:53;(f)2020年9月4日6:51

Fig.2 Growth of flake crystals at the upper part of gas-water interface (scale shown in Fig.1)

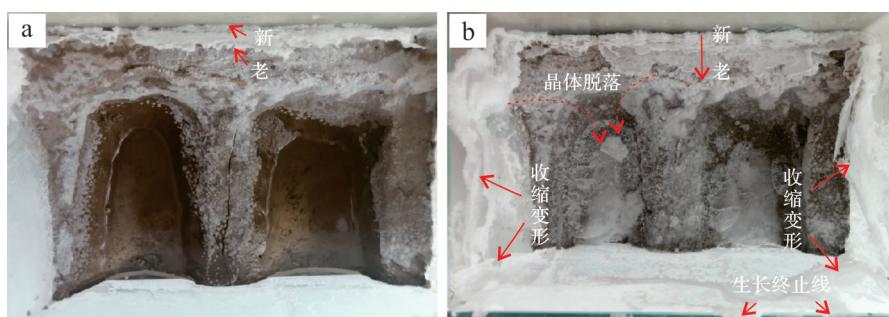


图3 片状晶体失水后的变形特征(比例尺见图1)

(a)2020年9月17日17:53;(b)2020年9月21日13:24

Fig.3 Deformation of flake crystals after water loss (scale shown in Fig.1)

事实上该现象并未出现。可见,卤水界面之上出现盐岩反重力向上生长,毛细管力并非该结晶的唯一动力,成因机制需要进一步探讨。

笔者认为不同阶段、不同构造位置结晶沉积的动力可能存在如下差异。

(1) 泥岩毛细管的蒸发泵作用,是影响晶核产生

部位的主要因素,浅水蒸发量大、卤水达到过饱和状态的时间更早,对应较早结晶的部位。由于实验中采用饱和氯化钠溶液进行蒸发实验,高温(午后大于35 °C)、快速蒸发的实验条件下,短时间内产生了晶体沉积,最早析出的晶体绝大部分位于空气—卤水—泥层—玻璃(对应中央隆起,见图2a)、空气—泥层

—玻璃界面附近(泥层顶面,见图2a),另有少量分布在空气—卤水—玻璃界面附近(对应洼陷带,见图2a)。由于卤水大于玻璃和泥层的比热,卤水较浅的中央隆起带附近,浅水升温快、蒸发量大,是造成空气—卤水—泥层—玻璃界面附近石盐率先析出的主要原因。空气—泥层—玻璃界面位于初始饱和卤水水面之上,结晶出的石盐与卤水无直接接触,推测泥层顶面受蒸发泵作用影响,卤水沿着毛细管向上运移,在泥层表面失水后结晶析出,因结晶时间相对充分,可以形成自形结构相对明显的漏斗晶(图4)。

(2) 卤水—空气界面之上,水蒸气含量以及湿度差异可能是控制石盐分布范围的主要因素。片状晶体在玻璃容器的内壁上反重力生长,因玻璃不具备毛细管,这部分晶体的生长难以用蒸发泵作用来解释,片状晶体的成因需要结合实验环境进行探讨。实验中玻璃水槽内为空气流通相对局限的环境,内部水蒸气主要来源于卤水的蒸发,靠近水面湿度较大,在距离卤水顶面增大的过程中,空气中的相对湿度逐步降低。片状晶晶核产生之后,下部仍与卤水接触,卤水能够提供晶体生长所需要的钠离子、氯离子。在模型内空气湿度、石盐吸湿特性的影响下^[21-23],凝结于晶体表面上的水蒸气溶解部分晶体,形成饱和的氯化钠液态薄膜,而玻璃水槽内壁冷凝的水蒸气与晶体表面的液态薄膜相连,在浓度差作用下,离子以晶核为中心向周边扩散。午后随着室内温度降低,卤水蒸发量降低到一定程度之后,水槽内壁上液态薄膜的蒸发量大于水蒸气的补给量,晶体重新结晶(因昼夜温差存在,蒸发速度存在差异,片状晶体内出现明显的年轮状条纹。以图2b为例,右侧高部位的片状晶体中,明显绕着27日产生的晶核生长,能够清楚看到28日、29日晶体生长规模)。模型中,卤水上部距离水面越近空气湿度越大,与卤水直接接触的玻璃内壁上,晶体生长达到模型上缘

以后(对应洼陷带上部,见图2f、图3),因空气中的水蒸气与周边空气快速交流,空气湿度难以达到氯化钠潮解所需要的相对湿度,晶体停止生长;卤水与玻璃之间被泥层隔绝的条件下(对应图3中图片的上端),卤水产生的水蒸气一边向上运动,一边向四周湿度较低的部位扩散,从而造成该部位的空气相对湿度,氯化钠仅在低部位结晶,晶体向上生长至一定高度后,因湿度降低、片状晶体脱水并发生褶皱,从模型内壁脱离、剥落(图3b)。午后温度降低的过程中,水槽内壁上凝结的水蒸气向下流动,在片状晶体与玻璃结合部溶解部分氯化钠,并随着温度—湿度变化产生多个变形的片状晶体薄层,从而出现较老的片状晶靠近模型中心、较新的片状晶紧邻水槽的玻璃内壁(图3)。

2.2 初始卤水表面下部

初始饱和卤水界面上部(水面下降出露部分)漏斗晶与人字晶镶嵌生长:本阶段为使用饱和盐水蒸馏实验,初始卤水界面上部的玻璃水槽内壁上布满早期阶段沉积的片状晶体(图5a)。随着卤水的蒸发,气液界面下降,部分卤水界面处形成的漏斗晶粘连在玻璃内壁上(图5b),脱离卤水界面的漏斗晶仍有生长变大的趋势(图5c)。多个小型漏斗晶作为晶核,后期晶体存在明显的绕核生长特征,沿着同一晶面生长的晶纹平行展布,漏斗晶相邻的两个晶面同时生长,当生长空间受到限制后,开始形成斜交的“人字型”晶纹,人字晶尖端指向生长方向(图5d),两侧晶纹的斜交部位,表现为弯曲的白色条带,该条带处于早期漏斗晶的对角线上(图5d)。部分晶面的晶体生长空间受限,人字晶两侧规模大小不一,两组晶纹的交叉线略有偏移(图5d)。随着蒸发进行,人字晶生长至一定规模之后,晶体内的条纹结构逐渐模糊(图5e),新的石盐沉积以片状晶为主。分布于卤水之上的漏斗晶、人字晶仍受卤水蒸发影响,温度较



图4 泥岩表面形成的漏斗晶(比例尺见图1)

(a,b,c)2020年8月27日15:10

Fig.4 Hopper crystals formed on the surface of mudstone (scale shown in Fig.1)

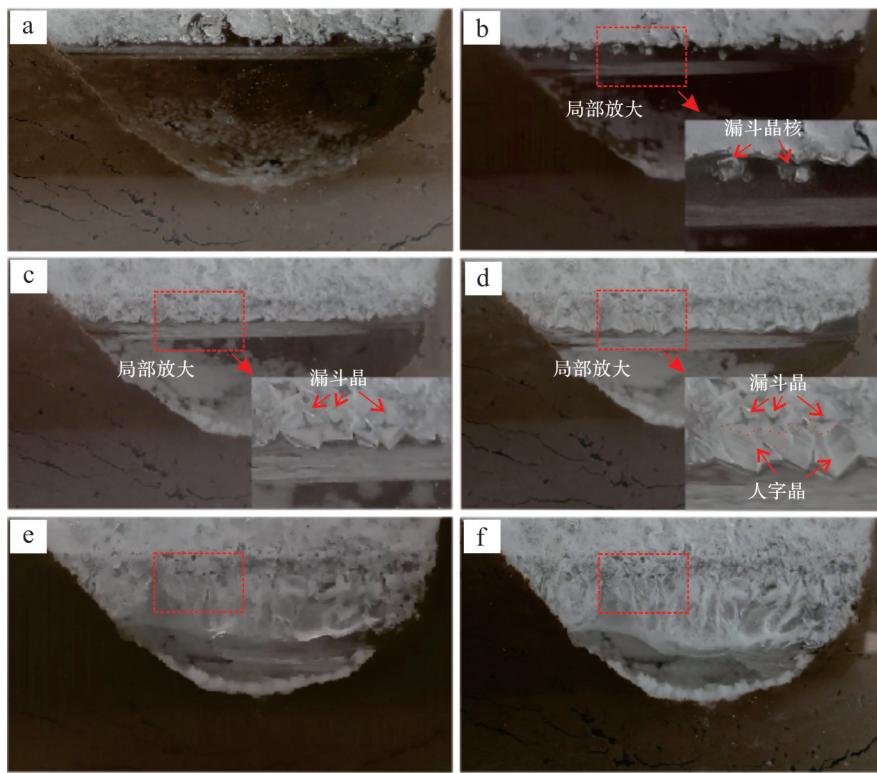


图5 气水界面下部漏斗晶与人字晶镶嵌生长过程(比例尺见图1)

(a)2020年9月16日13:53;(b)2020年9月17日6:11;(c)2020年9月17日17:57;(d)2020年9月18日7:51;(e)2020年9月19日4:46;(f)2020年9月19日15:53

Fig.5 Mosaic growth process of hopper and chevron crystals at the lower part of the gas-water interface (scale shown in Fig.1)

低的凌晨晶体表面受冷凝水汽影响,透明度明显偏低,温度较高、蒸发量较大的午后,呈镶嵌排列的漏斗晶+人字晶条纹相对清晰(图5f)。

实验记录了漏斗晶—人字晶镶嵌生长的动态过程,可以为不同沉积环境下的盐岩晶型研究提供参考。前人研究一般认为,漏斗晶晶核形成于卤水界面之上^[12-15],多个漏斗晶联合可以形成漂浮于卤水界面之上的晶筏,当晶体生长到一定大小之后,在湖面波浪等动力作用下,晶体下沉至湖盆底部,并在卤水底部进一步生长;人字晶是湖盆萎缩至一定程度之后^[10-12],多个漏斗晶之间的桥接部分。基于以上认识,部分学者提出漏斗晶(特别是大晶粒漏斗晶)反应的水体深度大于人字晶^[5,7]。依据本次实验结果可以作出如下推断:(1)漏斗晶与人字晶伴生的盐层中,漏斗晶一般形成时间较早,人字晶中斜交的晶纹是绕不同漏斗晶核生长,空间受到限制后的产物;(2)卤水蒸发,漏斗晶产生一定量之后,晶核之间的空间变小,其后必然产生人字晶,而漏斗晶+人字晶的组合可以出现在任何水深环境下,除了前人提出的浅水环境外,还可能出现在水面之上。

2.3 盐层封锁卤水顶面

在卤水蒸发到一定程度后,卤水之上逐步形成层状晶体,该现象在使用饱和卤水开展蒸发实验(阶段2、阶段5)时更明显,以实验阶段5表现出的特征为例对该现象进行说明(图6),其特征如下:(1)晶体层出现在卤水过饱和阶段,此时卤水界面上部可见漂浮的漏斗晶,实验中饱和卤水在9月16日13:53注入(图6a),9月17日下午卤水界面处可以观测到漂浮的漏斗晶(图6b),对应的卤水边界出现类似水体结冰的层状晶体,泥层上部早期蒸发成因的盐可以作为卤水进一步结晶的晶核,晶体沿着卤水顶面层状生长,由于玻璃水槽内壁存在漏斗晶与人字晶镶嵌生长,推测水上盐层内同样可能捕获漏斗晶;(2)成层分布的晶体从边界向中心逐步生长(图6b~f),卤水与空气接触面积缩小,实验中9月17日—9月19日,可以观测到层状晶体自边界向卤水中心逐步生长,卤水界面之上的盐层具有较高的透明度;(3)层状晶体出现封锁界面之后,局部晶体层与卤水脱离,盐层与卤水之间混入空气的部位常表现为白色,与卤水接触的部位厚度持续增加,并可能造成水面晶体层的厚度不均;(4)成层晶体并不能完全封闭

卤水,常残留气孔(图6e,f),实验中9月19日卤水之上绝大部分被层状晶体覆盖,仅靠近玻璃水槽内壁,裸露的小范围内卤水界面与空气接触,按照层状晶体的生长速度,9月20日应该实现对卤水界面的全面覆盖,然而9月21日21:03仍然能够观测到残余气孔(图6f)。水上盐层逐步与卤水脱离,可能是造成气孔无法完全封闭的原因。

自然条件下,盐湖强烈蒸发,进入干盐湖之前是否经历盐层封锁水面的现象?由于实验设计的水深较小,物理模型与盐湖盆地的相似性,直接决定了实验结果的参考价值。本次实验模型规模较小,考虑边界的影响,盐湖盆地中的小型洼槽经历盐层封锁相对容易理解。自然条件下的大型湖盆受风、水流影响较大,在强水流的影响下,推测该现象仍可能出现,理由如下:(1)观测盐层逐步封锁卤水面,不难发现其过程与水面结冰十分相似。寒冷条件下,面积较小、风浪影响较弱的水面相对容易冰封,而面积较大湖盆,受风浪扰动影响,虽然短时间内难以冰封,但在温度降低到一定程度之后,即便在强水流和大

风浪的干扰下,表面仍可以形成较厚的冰层,这点在中国东北地区的河流、湖泊中都可以得到证实。与之相类比,卤水蒸发萎缩至一定阶段后,小型的洼槽可能较早被盐层封锁,而大型盐湖受风浪影响大,水面进一步萎缩,与之相伴的是湖盆面积减小、水体进一步变浅,边界的盐层逐步向中心封锁,从而出现盐层封锁湖面后,底部仍存在卤水的现象。(2)形成盐层封锁水面的物理模型,具备的深度/宽度比值较大;现代盐湖沉积进入干盐湖阶段之前很少出现盐层封锁,可能是深度/宽度比值较小造成的,但在地质条件下,断陷湖盆的断层切割之后,正断层的下降盘可能形成相对局限且深度较大、宽度有限的水体环境。

盐湖表面一旦形成盐层封锁,可能对以下沉积过程造成干扰。

(1)盐层封锁水面,会造成卤水蒸发速度降低,浅水条件下漏斗晶同样可以长时间生长,形成大晶粒的漏斗晶。传统认识中,大晶粒漏斗晶需要长时间的生长,浅水蒸发环境下水体快速干涸,石盐晶核

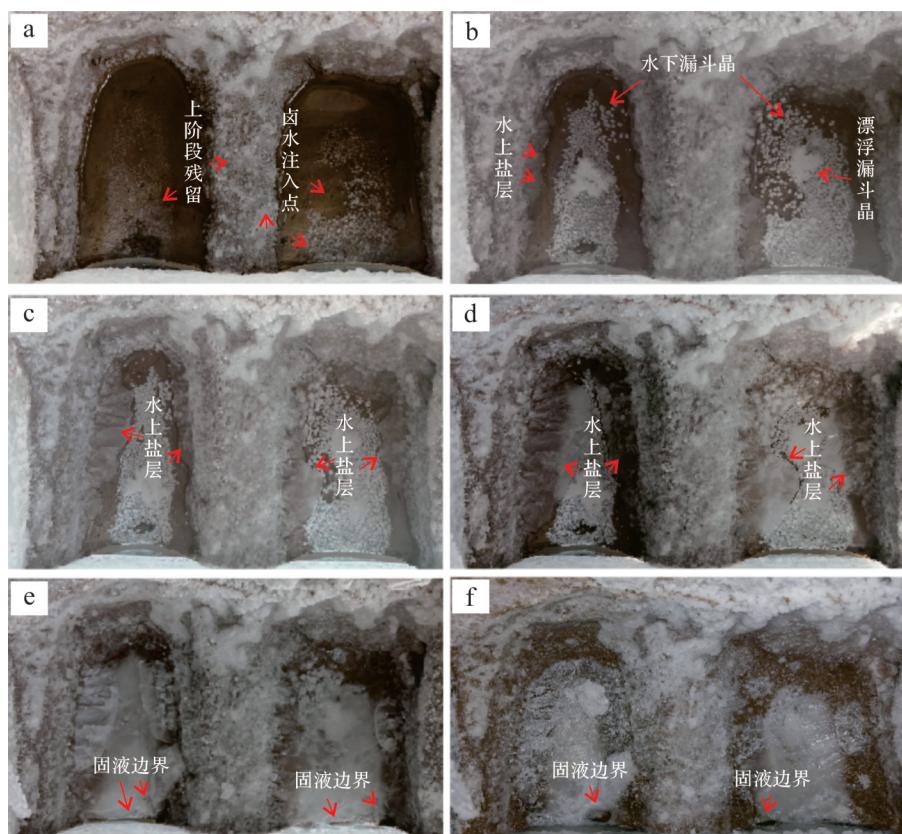


图6 盐层封锁卤水顶面过程(比例尺见图1)

(a)2020年9月16日13:53;(b)2020年9月17日17:57;(c)2020年9月18日7:51;(d)2020年9月18日14:35;(e)2020年9月19日15:52;(f)2020年9月21日21:03

Fig.6 Process of blocking top surface of brine by salt layer (scale shown in Fig.1)

与卤水环境脱离后,晶粒停止生长,前期研究以此为依据推断大晶粒漏斗晶沉积时对应深水环境^[7]。实验结果表明(图6,7)卤水顶面层状结晶形成以后,卤水仅在极小范围内与空气接触,蒸发速度明显降低。实验中,层状石盐基本完成水面封锁的时间为9月19日(图6f),从剖面上看,卤水深度约2 cm(图7a),9月21日卤水仍有少量蒸发,卤水与盐层基本脱离,中间混入空气(图7b);9月22日午后记录到的卤水深度降低至0.5 cm(图7c),随着盐层气孔进一步减小,9月24日早晨记录到的底部卤水的深部没有进一步降低,反而增大到1 cm(图7d)。推测温度较高的午后,蒸发形成的水蒸气向上运动受阻,在盐层底部凝结,早晨温度降低之后,盐层下部空间内的水蒸气冷凝重新聚集于模型底部,从而造成水深不降反升的现象。实验室初始卤水深度较小的情况下,盐层封闭水面后,底部卤水蒸发十分缓慢,早期形成于底部的漏斗晶可以在较长时间内保持与卤水接触,晶体颗粒进一步长大。推测在自然条件下,盐湖表面被盐层封闭后,湖盆可能具备一定的水深,在蒸发速度极为缓慢的情况下,相对孤立的漏斗晶粒径生长,形成2 cm以上漏斗晶,具备可能。总之,大颗粒漏斗晶的存在仅能代表卤水与晶核长时间接触,但不一定指示深水沉积的环境。

(2) 盐层封锁水面,可能影响其相邻层位的碎屑

岩。一方面,水体表面被盐层封锁之后,卤水底部的有机质缺乏与氧气接触的机会,可能为浅水条件下有机质的保存提供便利,从而出现浅水成盐与暗色页岩互层;另一方面,盐层封锁水面后短时间内形成类似“平底锅”的古地形,携带碎屑物质进入盐湖的不饱和水体,可以将水面盐层再度溶解,原本处于盐层之上的碎屑岩坠落,重新沉积形成相对孤立的砂体。方志雄^[24]在潜江凹陷的研究中,将该部分砂体的成因归结为“盐湖密度流沉积”,并认为是在盐湖水体分层的基础上,携带泥沙的水流沿着盐跃层(温跃层)界面流动产生的。本次实验结果可以为该部分砂体的解释提供一种新思路,而携带泥沙的水流沿着盐层表面流动、溶解后坠落,从而形成相对孤立于沉积体系之外的砂体,整个过程相对更容易实现。

3 结论

(1) 石盐可以在卤水界面之上沉积,其形成的动力除了蒸发泵作用外,还受空气湿度和石盐潮解共同控制:石盐一般只在潮解的范围内沉积,卤水界面附近空气湿度较大,距离增大后相对湿度逐步降低至石盐潮解的临界湿度之下,晶体向上增长现象终止;这部分晶体的上缘受蒸发量(随着气温变化)、水蒸气补给等因素影响,潮解线下侧一定范围内,湿度较大时片状晶体溶解,湿度降低后晶体表面的溶液

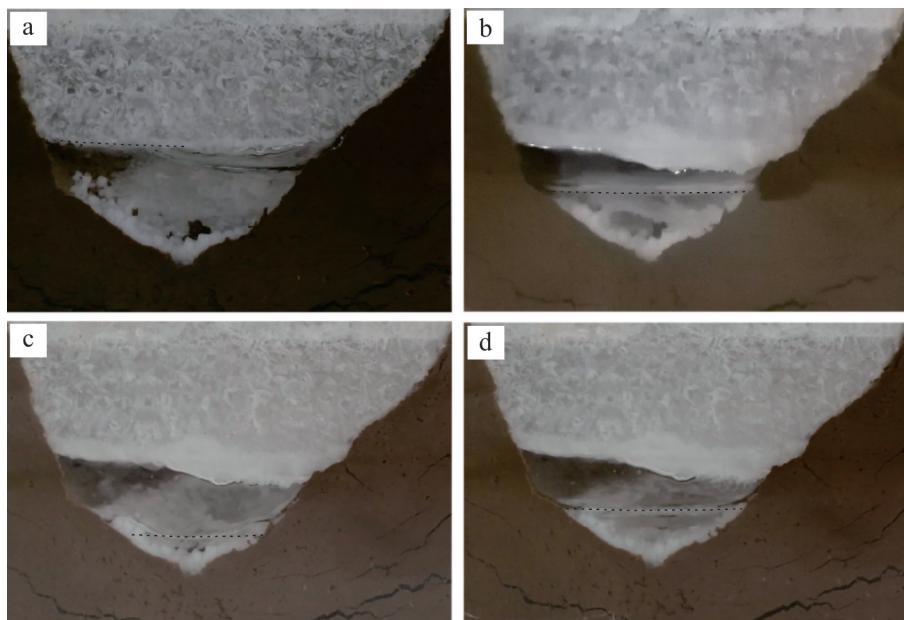


图7 盐层封锁水面对水体蒸发的影响(比例尺见图1)

(a)2020年9月19日15:53;(b)2020年9月21日21:04;(c)2020年9月22日14:42;(d)2020年9月24日7:34

Fig.7 Impact of salt layer blocking water surface on water evaporation (scale shown in Fig.1)

重新结晶,湿度进一步降低后晶体发生脱水变形、片状剥落。

(2) 对于同一阶段产生的漏斗晶和人字晶,一般人字晶形成于漏斗晶之后:早期产生的漏斗晶作为晶核,绕着不同漏斗晶核生长的晶纹因发育空间受限,纹层斜交形成“人”字,人字晶中间的斜交条纹沿着早期漏斗晶正方形对角线延展,两种晶型可以同时沉积于水面之上。

(3) 盐湖极度萎缩过程中,在干盐湖演化阶段前,可能经历盐层封锁水面的现象,该现象可以降低湖水蒸发速度,为浅水条件下形成大颗粒漏斗晶提供便利;同时,可能造成湖盆水动力条件发生改变,影响相邻层位碎屑岩的沉积,盐层下侧可以形成浅水岩盐+暗色页岩互层,岩盐上部可能出现相对孤立的砂体,这部分砂体是水上盐层溶解、上部碎屑物质再沉积后产生的。

参考文献(References)

- [1] 孙中良,王芙蓉,侯宇光,等. 盐湖页岩有机质富集主控因素及模式[J]. 地球科学,2020,45(4):1375-1387. [Sun Zhongliang, Wang Furong, Hou Yuguang, et al. Main controlling factors and modes of organic matter enrichment in salt lake shale[J]. Earth Science, 2020, 45(4): 1375-1387.]
- [2] 冯洪真,俞剑华,方一亭,等. 五峰期上扬子海古盐度分析[J]. 地层学杂志,1993,17(3):179-185. [Feng Hongzhen, Yu Jianhua, Fang Yiting, et al. Analysis of paleosalinity during the Wufeng age in Upper Yangtze sea[J]. Journal of Stratigraphy, 1993, 17(3): 179-185.]
- [3] 李春荣,陈开远. 潜江凹陷潜江组元素演化特征及其古气候意义[J]. 石油地质与工程,2007,21(6):18-21. [Li Chunrong, Chen Kaiyuan. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of elements in the Qianjiang Formation, Qianjiang Depression[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21 (6): 18-21.]
- [4] 陈开远,何胡军,柳保军,等. 潜江凹陷潜江组古盐湖沉积层序的地球化学特征[J]. 盐湖研究,2002,10(4):19-24. [Chen Kaiyuan, He Hujun, Liu Baojun, et al. Geochemistry character in paleo-saline depositional sequence on Qianjiang Group in Qianjiang Depression[J]. Journal of Salt Lake Research, 2002, 10 (4): 19-24.]
- [5] 高红灿,郑荣才,肖应凯,等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组盐岩成因:来自沉积学和地球化学的证据[J]. 石油学报,2015,36(1):19-32. [Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Xiao Yingkai, et al. Origin of the salt rock of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin: Evidences from sedimentology and geochemistry[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 19-32.]
- [6] 纪友亮,冯建辉,王声朗,等. 东濮凹陷沙三段高频湖平面变化及低位砂体预测[J]. 高校地质学报,2003,9(1):99-112. [Ji Youliang, Feng Jianhui, Wang Shenglang, et al. High frequency lake-level change of 3rd member of Shahejie Formation and prediction of lowstand sand body in Dongpu Depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(1): 99-112.]
- [7] 袁静,赵澄林,张善文. 东营凹陷沙四段盐湖的深水成因模式[J]. 沉积学报,2000,18(1):114-118. [Yuan Jing, Zhao Chenglin, Zhang Shanwen. Genetic model of the deep water salt lake of the Paleogene Sha-4 member in Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 114-118.]
- [8] Hovorka S D, Holt R M, Powers D W. Depth indicators in Permian basin evaporites[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2007, 285(1): 335-364.
- [9] Casas E, Lowenstein T K. Diagenesis of saline pan halite: Comparison of petrographic features of modern, Quaternary and Permian halites[J]. Journal of Sedimentary Research, 1989, 59(5): 724-739.
- [10] 徐洋,曹养同,刘成林,等. 库车盆地始新世盐湖物源及蒸发浓缩程度研究[J]. 地质学报,2018,92(8):1617-1629. [Xu Yang, Cao Yangtong, Liu Chenglin, et al. Provenance and degree of evaporation and concentration of Eocene salt lake in the Kuqa Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(8): 1617-1629.]
- [11] 张华,刘成林,曹养同,等. 塔里木古海湾新生代海退时限及方式的初步探讨[J]. 地球学报,2013,34(5):577-584. [Zhang Hua, Liu Chenglin, Cao Yangtong, et al. A tentative discussion on the time and the way of marine regression from Tarim bay during the Cenozoic[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34 (5): 577-584.]
- [12] 张华,刘成林,赵艳军,等. 老挝他曲地区石盐流体包裹体特征、氢氧同位素组成及成盐物质补给方式[J]. 地质学报,2015,89(11):2134-2140. [Zhang Hua, Liu Chenglin, Zhao Yanjun, et al. Characteristics and hydrogen-oxygen isotopic compositions of halite fluid inclusions in the Thakhek area, Laos, and the way of salt material supplies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(11): 2134-2140.]
- [13] Benison K C. Permian surface water temperatures from Nippewalla Group halite, Kansas[J]. Carbonates and Evaporites, 1995, 10(2): 245-251.
- [14] Roberts S M, Spencer R J. Paleotemperatures preserved in fluid inclusions in halite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(19): 3929-3942.
- [15] Lowenstein T K, Li J R, Brown C B. Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: Method verification and a 100, 000 year paleotemperature record, Death Valley, CA[J]. Chemical Geology, 1998, 150(3/4): 223-245.
- [16] Eggenkamp H G M, Kreulen R, van Groos A F K. Chlorine stable isotope fractionation in evaporites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(24): 5169-5175.

- [17] 朱宝文,宋理明,许存平,等. 环青海湖地区草地近地层气象要素变化特征[J]. 中国农业气象,2007,28(4):389-392. [Zhu Baowen, Song Liming, Xu Cunping, et al. Characteristics of changes of micro-meteorology in surface layer of grassland in regions around Qinghai Lake [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(4): 389-392.]
- [18] 冯阵东,吴伟,程秀申,等. 食盐析出实验对盐湖盆地沉积研究的启示[J]. 沉积学报,2014,32(2):238-244. [Feng Zhen-dong, Wu Wei, Cheng Xiushen, et al. Enlightenment from salt precipitation experiment to the researching on saline lacustrine basin sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2): 238-244.]
- [19] 彭君,冯阵东,国殿斌,等. 再论东濮凹陷沙三段成盐模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(3):9-15. [Peng Jun, Feng Zhendong, Guo Dianbin, et al. Revisiting salt-forming models in the Third member of Shahejie Formation in Dongpu Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 9-15.]
- [20] 糜喜准,张林炎,陈晓帅,等. 现代盐湖沉积与岩盐析出模拟的相似性及其对成盐模式的启示[J]. 沉积学报,2018,36(6): 1119-1130. [Zhuo Xizhun, Zhang Linyan, Chen Xiaoshuai, et al. The similarity of salt-forming between flume experiment and modern salt lake [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36 (6): 1119-1130.]
- [21] Haines W B. Studies in the physical properties of soils: II. A note on the cohesion developed by capillary forces in an ideal soil [J]. The Journal of Agricultural Science, 1925, 15 (4) : 529-535.
- [22] Billings S W, Bronlund J E, Paterson A H J. Effects of capillary condensation on the caking of bulk sucrose [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 887-895.
- [23] Kwok K, Mauer L J, Taylor L S. Kinetics of moisture-induced hydrolysis in powder blends stored at and below the deliquescence relative humidity: Investigation of sucrose-citric acid mixtures [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58 (22): 11716-11724.
- [24] 方志雄. 江汉盆地盐湖沉积充填模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 197-211. [Fang Zhixiong. The filling models of Jianghan salt lake basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 197-211.]

Study of Crystallization of Halite Near the Surface of Brine

FENG ZhenDong¹, TAN HaoLin¹, ZHOU Yong², SHI ShuZhen³, WU Wei², LIU WeiQing², WEI GuoYing¹

1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

2. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

3. School of Architectural and Artistic Design, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

Abstract: [Objective] In order to make up for the information lost in the investigation of modern salt lake deposits, obtain the dynamic crystallization process of halite and guide the study of ancient salt lake deposits. [Methods] With the help of indoor halite evaporation experiment, showing the crystallization characteristics of NaCl during brine evaporation and the relationship between halite crystallization and sedimentary environment may be analyzed, so as to provide reference for the establishment of salt lake sedimentary model. [Results and Conclusions] It was found that the location of halite deposition is affected by the crystallization habit, and the crystals are deposited above the brine interface. Together with the action of the evaporation pump, the formation dynamics are also influenced by air humidity and halite deliquescence. Chevron crystals are generally formed at the base of hopper crystals. When growth space is limited, the laminae grown around different hopper crystal nuclei cross obliquely to form chevron crystals, and the two crystalline fabrics are deposited on the water surface at the same time. Before a salt lake completely dries, it may experience the phenomenon of the salt layer blocking the water surface, and may affect the clastic sediment in the adjacent layer.

Key words: halite; different crystalline form; crystallization characteristics; brine surface; evaporation experiment