

文章编号: 1000-0550(2011)01-0125-09

罗布泊盐湖“大耳朵”盐盘特征、成因及古环境意义^①

马黎春^{1 2 3} 李保国³ 蒋平安⁴ 盛建东⁴ 钟俊平⁴ 邱宏烈⁵ 武红旗⁴

(1. 中国农业大学资源与环境学院土壤和水系 北京 100193; 2. 美国纽约州立大学宾汉姆顿分校地质与环境科学系 宾汉姆顿 NY13902;
3. 中国地质科学院矿产资源研究所 北京 100193; 4. 新疆农业大学草业与环境科学学院 乌鲁木齐 830052;
5. 美国加州州立大学洛杉矶分校 洛杉矶 CA90032-8253)

摘要 干盐湖蒸发岩沉积是干旱内陆封闭盆地的主要成盐模式,其地表盐壳沉积特征、蒸发盐类矿物具有明显的分带性。罗布泊干盐湖保存了完整的“耳轮”型环状沉积模式和演化序列,在世界干盐湖中实属罕见。通过对罗布泊“大耳朵”干盐湖多级环状亚沉积环境下发育的盐壳地貌、沉积结构、龟裂形态、矿物组成以及地下卤水的地表排泄情况进行地面调查和实地采样,探讨了不同“耳轮”环带盐壳地貌成因、相互承接关系和发展演变过程;并概述了蒸发盐盘不同沉积阶段沉积特征,及盐壳龟裂结构发育演化过程与地下水埋深的关系。

关键词 罗布泊 “大耳朵”干盐湖 盐盘 沉积特征 沉积环境

第一作者简介 马黎春 女 1978年出生 博士后 地球化学 E-mail: lma@binghamton.edu

通讯作者 李保国 E-mail: libg@cau.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

内陆干旱区的封闭盆地常发育有面积广阔的干盐湖,以表面干涸龟裂的盐盘和周围的盐坪地貌为基本特征。尤其是极端干旱的沙漠地区,蒸发远大于降水,干盐湖相对于常年性盐湖,分布更为普遍。干盐湖成盐过程除包括间歇动荡的浅水面蒸发,还包括湖底暴露时期的地表蒸发析盐过程,具有丰富的同沉积成岩特征^[1],这使得盐盘沉积与演化过程变得十分复杂,仅有少数地质学家细致的研究了干盐湖亚沉积环境盐盘的沉积特征^[1-3],和不同亚沉积环境下(洪水期—蒸发浓缩—干化期)蒸发岩沉积结构及辨认标准^[4-6]。罗布泊位于中国新疆塔里木盆地东部广袤沙漠前缘的低洼地区,目前干涸的盐滩在遥感影像上呈现奇特的“大耳朵”型图案(图1),已受到普遍关注^[7-12]。本文旨在对“大耳朵”盐盘多级环状亚沉积环境下发育的盐盘沉积特征进行实地调查和取样,以探明不同环带地表盐壳沉积类型、沉积结构、龟裂特征、矿物类型以及地下卤水的地表排泄状况等。

1 研究区概况

罗布泊位于中国新疆塔里木盆地东部,中国最大沙漠塔克拉玛干沙漠的最东缘,是世界上著名的干旱中心,地理位置39.5°—41.5°N, 88°—92°E。作为塔

里木盆地曾经的尾间湖,罗布泊自第三纪末至第四纪初以来就成为整个塔里木盆地的积盐中心,汇集了厚达数米的盐层^[8],其中喀拉库顺、“大耳朵”以及罗北凹地都曾是古罗布泊湖盆的次级沉积洼地(图2)。但从构造与沉积学的角度讲,“大耳朵”地区和罗北凹地被认为是最主要的盐类物质沉积中心^[13,14]。“大耳朵”湖盆地势相对平缓,深度仅为5.2 m,西南平均坡度0.19‰,东北平均坡度0.09‰,为一偏心的浅水湖盆^[12],盐盘覆盖面积近5 500 km²^[15],海拔约800 m^[16]。

罗布泊地区气候异常干燥、炎热,年平均气温11.6℃,夏季最高气温>40℃,冬季最低气温-20℃以下,年降水量<20 mm,蒸发量>3 000 mm^[10],年日照时数>3 200 h,年积温>4 500℃。且风蚀强烈,全年盛行风方向为NE,年平均风速>5 m·s⁻¹,3~5月为多风季节,6~8月为大风季节,8级大风日>60 d,常常引起沙暴天气,位于罗布泊下风向的若羌、且末地区每年浮尘天气有115~193 d^[13]。

2 研究方法

为探明罗布泊“大耳朵”不同“耳轮”环带盐壳龟裂形态、表面特征及矿物分布特征,2005—2007年连

^①国家自然科学基金项目(批准号:41002028,40671080);国家自然科学基金重点项目(批准号:40830420);中国博士后科学基金资助项目(编号:20080430472);长江学者和创新团队发展计划项目(编号:IRT0412)资助
收稿日期:2009-12-02;收修改稿日期:2010-02-15

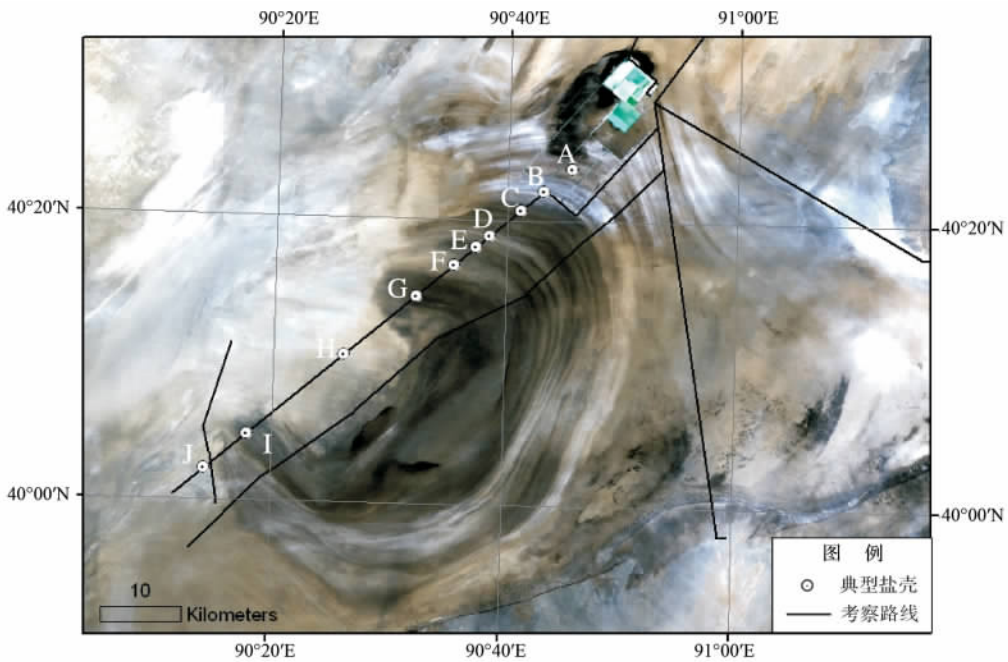


图 1 罗布泊“大耳朵”干盐湖典型盐壳环带采样点及考察路线图

Fig. 1 Locations of representative sampling sites and the survey routes in the “Great Ear” playa of Lop Nor Basin

续三年在罗布泊“大耳朵”干盐湖进行了实际地面调查和钻孔取样。调查路线及采样点的选择基于经过精校正的 2002 年 5 月 13 日 Landsat - 7 ETM + 遥感影像数据 2006 年 10 月 23 日 Landsat - 5 TM (Thematic Mapper) 影像数据及 2006 年 7 月 31 日获取的高分辨率 QuikBird 影像数据(分辨率 0.61 m), 通过对三期不同时相及不同分辨率遥感影像精细对比分

析, 选取影像上“耳轮”色调、纹理及表面形态变化较为稳定的区域进行地面调查和取样。采样点位置及调查路线见图 1。对所选取的 10 个典型亚沉积环带(A - J, 图 1) 所采集的 50 件盐壳固体样品进行了矿物鉴定和可溶盐总量分析。矿物分析采用美国 Phillips PW3040—MPD X 射线衍射仪; 可溶盐总量采用质量法和电导法同时测定。

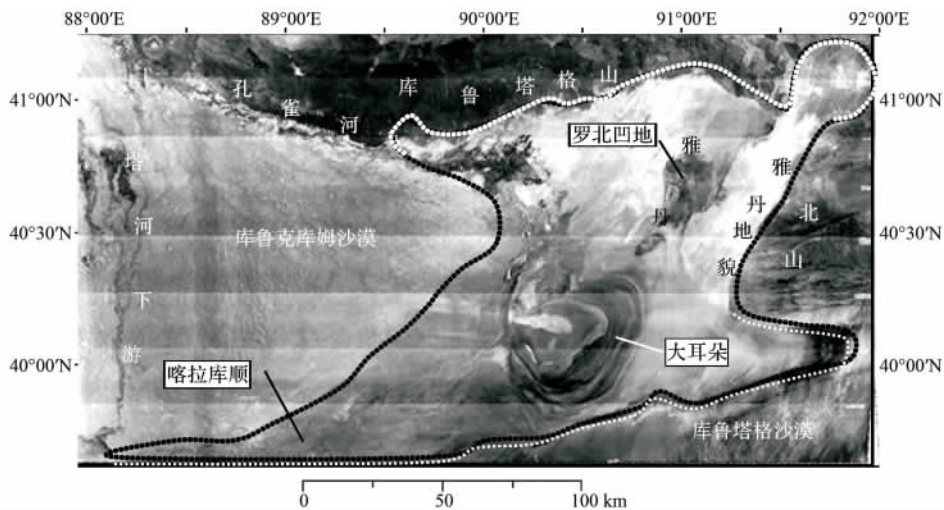


图 2 罗布泊干盐湖位置及其临近地区

(底图为 1961 年 Corona 遥感影像; 虚线勾绘区域为古代大罗布泊范围, 面积约 20 000 km²)

Fig. 2 The location of Lop Nor playa and its surrounding area

(Background images is a Corona image mosaic, 12/12/1961; the area surrounded by the dashed line represents the Ancient Great - Lop Nor covering an area of ~ 20 000 - km².)

3 干盐湖蒸发盐盘沉积特征

常见的蒸发岩沉积模式(盐湖)是干旱气候作用下成盐盆地水盐体系不断蒸发浓缩,各盐类物质逐渐达到饱和,呈固相析出^[4]。而干盐湖成盐过程除包括盐湖正常的卤水化学沉积外,其独特的成盐方式还在于湖水退出后,地下水毛管蒸发作用,在暴露的沉积物表面依然进行着强烈的析盐过程^[4,5,17],形成固液(卤水—盐体)并存的动态平衡体系。因此依据蒸发岩沉积阶段和沉积界面的不同,干盐湖蒸发盐盘沉积包括:(1)盐湖期浅水面蒸发;(2)湖底暴露时期地表析盐过程。

3.1 盐湖期浅水面蒸发成盐

通常来说,在干盐湖区发育的季节性盐湖(间歇有常年性盐湖)一般都很浅,深度仅几十厘米^[6,8,19],个别可达几米^[4,6,20]。这些浅湖,在干旱气候驱动作用下,湖面不断蒸发浓缩,致使盐类矿物逐步析出;结晶作用首先发生在卤水—空气界面,当达到石盐饱和,毫米至厘米级立方体单晶、骸晶、矩形板晶、倒转的漏斗状晶体析出^[1,4],并横向连接成片状的晶筏(图3A),随波漂荡,在其生长重力大于湖水浮力或在风浪干扰破坏作用下,沉入湖底(图3B),形成松散的盐类堆积层^[4],继而以这些杂乱堆积的晶筏为生长中心,开始缓慢的水下结晶过程(图3B),由于水下晶体的竞相增长,互相争夺空间造成晶体的垂向增长和延伸,形成人字形晶体或漏斗状晶体(图3C)。Lowenstein & Hardie^[4]通过室内实验总结出这两类晶体沉积特征明显不同,卤水表面快速蒸发形成的细粒石盐晶体富含液体包裹体,而水下缓慢生长的晶体常呈粗粒、含少量或不含液体包裹体。这两类晶体在盐类沉积层中的比例则取决于盐湖的蒸发速率,蒸发速度快,则以表生细粒为主,蒸发速度慢,则以底部粗粒为主。

蒸发作用的继续,致使卤水面继续变薄,此时晶间和下伏泥层中过饱和的卤水不断结晶和增长(图3D,E)引起表层盐壳的横向膨胀,形成龟裂缝。刘振敏等^[21]在察尔汗盐湖野外观测实验中发现,当卤水深度在5~10 cm时,表层盐壳就开始发生盐裂,裂隙宽1 cm左右,长数米。这种盐裂会引起地下水位的进一步降低,致使表面卤水完全消失,盐类沉积物出露水面,进入干盐湖地表析盐阶段。

3.2 地表析盐过程

地表析盐过程与卤水化学沉积不同,其物质来源

主要依赖晶间卤水、地下潜水及可能的深部水的向上传输和补给,沉积界面始终暴露于空气^[1,2,20]。在成盐过程中,地下卤水不断补充近地表水分的蒸发损耗,主要通过毛管传导^[22]和裂隙上升至地表,形成毫米一次毫米级的细粒盐结晶及相互聚合的等径镶嵌结构^[19],并沿晶粒顶部不断向空中延展、增长形成各种形态的晶簇(图3F,G)。这些晶簇和湿润的地表极易捕获风中的沙尘^[17],胶结形成盐土混合物—盐壳(图4A—F)。长期的地表化学沉积与物理黏附沙尘,则导致地表盐壳不断生长。

目前在世界范围内广泛分布和正在形成的现代蒸发盐壳都是在这种机制下形成的,如智利的 Salar de Atacama,加利福尼亚的 Saline Valley 和 Death Valley,南美 Salars^[23]。在这一成盐过程中,驱动力是蒸发作用,蒸发作用的停止也就意味着地表析盐过程的结束^[19]。此外,在地表进行化学沉积的同时,下伏盐层和泥层中的结晶作用也在继续,形成纯净透明、晶型完整的自形立方体(图3D),这些晶体的迁移性增长通常占据溶孔和颗粒的孔隙,并没有一定的结晶方向^[24]和表层形成的细粒以及盐湖期形成的粗粒晶体极易区别^[4]。迁移性晶体的大量生长不仅会破坏早期形成的沉积层理还会导致盐壳的横向扩张,形成各种龟裂结构^[21]。

3.3 盐盘龟裂结构发育过程

盐盘龟裂结构的发育随地下水位埋深变化可经历几个阶段^[4,21]。在湖水消退初期,地下水位较浅,新鲜出露的盐层富含饱和卤水,盐类矿物以置换和嵌晶方式生长,不断填充沉积物孔隙,致使盐层体积不断增大,膨胀裂开,形成大致六边形的裂隙^[1,4],内径30~90 cm,见图4A。随后晶间和地下卤水沿裂隙优先上升,引起多边形脊的逐步增高,在上升过程中裂隙盐的相继析出,形成水平压应力,促使多边形脊进一步膨胀、扩张和掀耸^[6,21]。掀起的盐壳基底部分悬空,之后被新生的盐体填充,从而进一步抬高盐壳,以此循环往复,导致盐壳不断隆起,而多边形盐环因整体受力,持续变形,逐渐形成碗状或蜂窝状的盐壳地貌(图4B)。由于盐壳的不断增高和地下卤水的持续蒸发,导致晶间卤水面逐渐下降,毛管作用相应减弱,盐壳增长速率随之下降,当地下水位下降到一定深度时,毛管作用消失^[17],盐壳生长阶段宣告结束,进入长期的龟裂后期侵蚀阶段。风蚀、雨淋、温度、地表径流等气候因子是影响盐壳沉积后期演变的主要因素^[18]。风蚀作用将促使盐壳崩塌,并将沙尘搬运

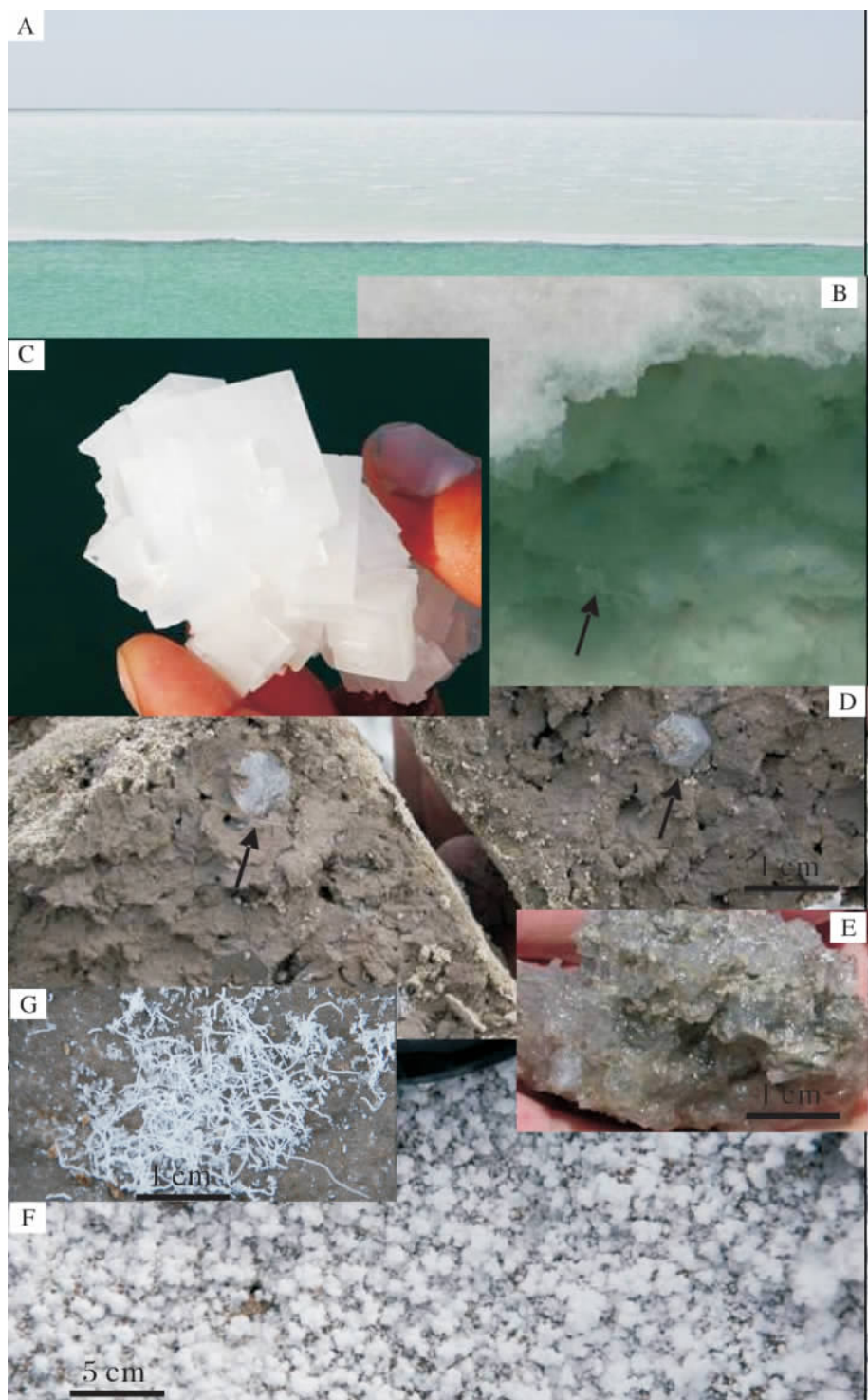


图3 不同亚沉积环境条件下发育的石盐晶体沉积特征

A 盐湖卤水—空气界面蒸发作用形成的片状晶筏、漂浮体; B 片状晶筏沉入湖底, 开始水下结晶作用, 箭头所示刚落入水中的片状漂浮体; C 湖底竞争性增长形成的巨粒石盐晶体; D 下伏泥层迁移性石盐晶体; E 富含饱和卤水的盐层, 石盐矿物置换、嵌晶式生长, 不断填充沉积物孔隙; F 湿润地表形成的细粒盐结晶, 晶粒顶部向空中延展, 形成各种形态的晶簇; G 部分地表盐结晶呈菌丝状延展 (照片 A—C: 2006 年摄于罗布泊钾盐矿蒸发池; D—G: 2006—2007 年摄于罗布泊“大耳朵”干盐湖)

Fig. 3 Sedimentary features of halite crystal developed in different sub-sedimentary environment

A. Flat halite crystal rafts and floats formed at air-brine interface; B. Crystallization starts when flat halite raft sink to the lake bottom (the black arrow shows where flat floats just fall into the water) ; C. Widespread competitive overgrowth takes place on the lake floor , ultimately which result in the development of large chevron crystals. D. Displacive halite crystals in mud layers; E. Randomly oriented interlocking halite crystals grew in brine-filled salt layers as cement. F. Irregular vug occurs at the humid surface, which are composed of millimeter scale, elongate, randomly oriented fine halite crystals with radial competitive growth fabrics; G. Some of these vugs have the form resembling a thread or filament (Photos A - C were taken in artificial pool of Lop Nor potassium extraction plant in 2006; photos D - G were taken in the "Great Ear" playa of Lop Nor basin)

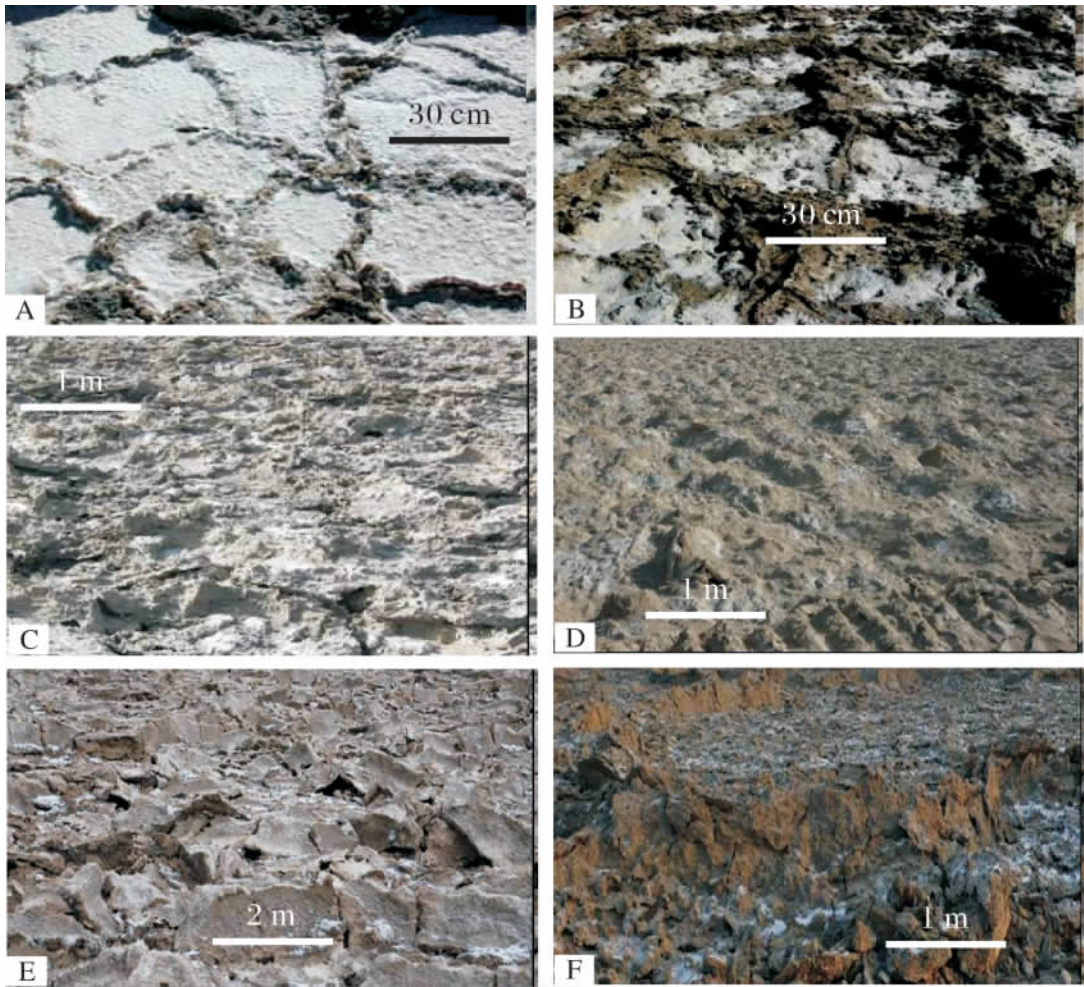


图4 罗布泊“大耳朵”干盐湖盐壳地貌景观

A. 盐壳龟裂初期; B. 典型蜂窝状盐壳; C. 蜂窝构造被破坏, 形成龟裂状盐壳; D. 长期风蚀作用形成丘状盐壳; E. 早期片流形成的板块状盐壳; F. 长垄蜂窝状盐壳地貌(2005—2007年摄于罗布泊)

Fig. 4 Ground feature of salt crusts in the “Great Ear” playa of Lop Nor basin

A. The early stage of polygonal cracks formation; B. Well-developed honeycomb-shaped halite crusts; C. The honeycomb-shaped structures are disrupted and tend to develop low relief surface due to wind erosion and dissolution by rain; D. Over time, this process causes the polygon halite crust to form mound-shaped pattern; E. The formation of plate-shaped halite crusts caused by the partial dissolution of early sheet flow; F. Ridge-like halite crusts within an overall of honeycomb-shaped pattern (photos were taken in the Lop Nor basin from 2005 to 2007)

至湖盆; 降水和地表径流将翘起的盐壳边缘溶解, 可溶盐随雨水下渗, 形成各种溶蚀洞, 而难溶的碎屑物和泥沙沉淀下来, 覆盖于盐壳表面^[19]。风蚀、雨淋的长期交互作用使前期形成的龟裂结构遭到破坏, 地表趋于平坦, 见图4C。再经后期的风蚀、磨蚀作用, 地表龟裂结构趋于老化, 顶部变得圆滑, 基部被风沙掩埋(图4D)。这一盐壳龟裂结构的发育演化过程, 普遍存在于世界各地的干盐湖^[6, 17-20], 因此可根据现代地表盐壳的发育状况大致判断盐壳发展的阶段、新老承接关系以及地下水位的埋深情况等。

序中分布十分广泛, 且具有相当的沉积厚度^[4], 因此对于现代干盐盘沉积特征的深入研究将对识别古代蒸发盐盘具有重要的借鉴意义。图5建立了干盐湖盐盘纵剖面沉积特征标准模型, 在这一模型中, 上部盐壳层富含溶孔、龟裂缝、胶结泥沙等碎屑物(主要为风沙源沉积), 下覆盐层和泥层发育大量迁移性石盐晶体(随机生长, 没有固定的生长方向, 占据溶孔和晶间孔隙, 通常一到几个厘米大小, 在晶体生长过程中易捕获泥物质)都是辨认古代干盐湖亚沉积环境的重要标志。

地质时期形成的蒸发盐盘在古代蒸发岩沉积层

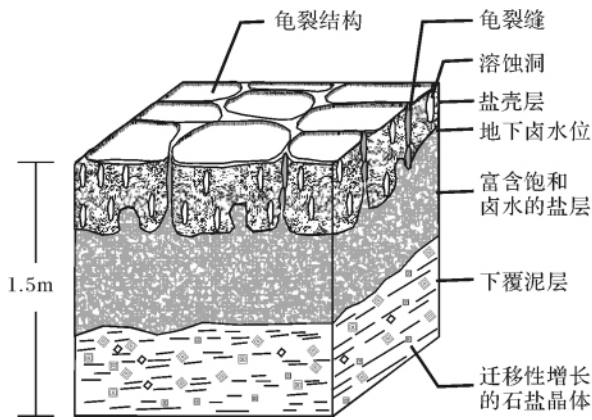


图5 干盐湖盐盘纵剖面沉积结构示意图

Fig. 5 Sketch map of vertical sedimentary structure of salt pans developed in playa environment

4 “大耳朵”干盐湖盐壳沉积类型及成因

罗布泊“大耳朵”干盐湖,地表盐壳龟裂结构、沉积特征、盐类矿物、地球化学特征都具有明显的分带性^[15],在遥感影像上表现为清晰的“耳轮”型沉积模式(图2),在世界干盐湖中实属罕见,为研究盐盘发育演化序列提供了极好案例。前文已对多级环状亚沉积环带盐盘地球化学分布模式做了详细介绍^[15-25],本文侧重于对10个典型环带地表盐壳龟裂结构、沉积特征和矿物类型的介绍。调查表明“大耳朵”干盐湖区发育有丘状、龟裂状、板块状和蜂窝状构造(图4),并从湖滨至湖心循环往复出现,呈现宽窄不一递变的带状分布。

4.1 蜂窝状盐壳微地貌特征

蜂窝状盐壳是干盐湖最为典型的地貌类型,意味着发育成熟的盐壳,已经经历了长期的地下卤水地表析盐和隆起过程。一般来讲,地下水位的深度是控制地下水毛管上升和地表析盐的重要因素。Bobst等^[26]认为地下水位埋深维持在50~70 cm,可持续不断供给表层盐壳,致使其不断长高。而盐壳沉积特征(土壤颗粒组成、盐类矿物间隙析出、裂隙)也会对卤水传导过程产生影响^[22]。“大耳朵”湖区的蜂窝状构造,一般内径60~100 cm,形态规则,脊高20~60 cm;在一级蜂窝构造基础上,发育有二级蜂窝构造,复式蜂窝内径可达6~8 m。脊部盐壳含盐量较高,达80%左右,其盐类矿物基本为石盐(NaCl),多溶孔,明显雨蚀痕迹,胶结的碎屑物质主要来源为风源,质地异常坚硬。蜂窝内部,可见一些小的地表径流的

痕迹和降水形成的溶蚀洞(通常几厘米大小),多有难溶性泥砂等碎屑物堆积于盐壳低洼处;地表湿润,含水率15%左右,地表析盐作用强烈,通常覆盖白色盐结皮,或菌丝状、菜花状晶簇(图3F—G),盐类矿物以石盐为主,发现少量光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)、杂卤石($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$)和软钾镁矾($K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$),此区域地下水位较浅,大概在45 cm。典型环带C(90.686°E 40.345°N)(图1),地面景观如图4B。个别沉积环带的蜂窝状盐壳,已脱离地下水影响,地表十分干燥,意味着地表析盐阶段结束,后期侵蚀作用开始扮演主要角色。而“大耳朵”湖区西南部的典型环带I(90.297°E 40.078°N)和G(90.538°E 40.243°N)(图1),蜂窝结构20~40 cm高,地下水位较低,2 m左右,但地表含水量却高达16%,调查表明盐壳底部细粒的黏土湖积物促使土壤毛管水强烈上升;整个湖区地下水空间分布情况和地下水位埋深调查见前文^[15-25]。

4.2 其它盐壳微地貌类型

龟裂状盐壳地貌通常承接于蜂窝状盐壳,这一区域,早期形成的龟裂构造已基本遭到破坏,侵蚀迹象十分明显,六边形边界不够完整,脊部倒塌,散乱堆积于多边形内部,盐壳基底部分悬空,悬空高10~50 cm;多边形长轴60~130 cm,短轴20~60 cm,一级鬼裂结构基础上,发育有二级龟裂结构,复式结构内径5~10 m,地表常见龟裂缝,裂缝宽1~3 cm。盐壳异常坚硬,含盐量在75%左右,盐类矿物基本以石盐为主,地表干燥,此区域目前地下水位埋深在60 cm左右,典型环带B(90.719°E 40.368°N)和D(90.642°E 40.315°N)(图1),地面景观如图4C。

丘状盐壳广泛分布于“大耳朵”湖盆边缘,形成时间较早,大多呈长丘状起伏,沿风向拉长,东北向展布,与盛行风向(NE)大致平行,丘高30~40 cm,丘长可达1~1.5 m,受风蚀作用明显,基部多被风沙掩埋,愈向湖盆边缘,地表愈趋于平坦,逐渐过渡为平坦的盐坪和泥坪地貌。地表以碎屑物为主,含盐量30%左右,盐类矿物主要为石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)、硬石膏($CaSO_4$)、碳酸钙($CaCO_3$)和少量白云石($CaCO_3 \cdot MgCO_3$),质地相对疏松,部分区域覆盖白色盐霜,地表整体干燥,典型环带A(90.759°E 40.395°N)和J(90.237°E 40.037°N)(图1),地表景观如图4D。

板块状盐壳是盐壳发育序列中的一个特殊单元,此类型盐壳表面光滑,质地坚硬,厚3~8 cm,含盐量高达90%以上,盐类矿物基本为纯的石盐。地表可

见大的盐壳板块相互挤压翘起, 掀耸高度可达 40 ~ 60 cm, 有些“板块”近乎直立, 围成多边形的“墙圈”, 但大部分在风蚀作用下已倒塌, 在一级构造基础上, 发育有二级构造, 一级构造内径 0.5 m 左右, 二级构造内径 3 ~ 5 m。典型环带 F(90.592°E, 40.280°N) (图 1) 地表景观见图 4E。关于板块状盐壳的成因, Lowenstein & Hardie^[4] 认为是局部片流溶解早期盐壳后重新蒸发和重结晶形成的, 因此盐壳相对纯净, 缺乏碎屑物沉积, 在盐盘沉积过程中此阶段属于浅盐湖蒸发成盐阶段, 而“大耳朵”干盐湖板块状盐壳表现出类似的沉积特征。

长垄蜂窝状盐壳是板块状盐壳和蜂窝状盐壳的过渡类型, 一方面, 地表可见大的板块状盐壳相互挤压翘起, 形成巨大的长垄, 垄高 40 ~ 70 cm, 长度可达几十米, 甚至上百米。另一方面, 在长垄之间又分布有发育完好的蜂窝状构造, 形态规则均匀, 内径 30 ~ 50 cm, 脊高 30 ~ 40 cm; 盐壳低洼处有潮湿的泥沙等碎屑物堆积, 含水量 15% 左右, 在遥感影像上此环带基本色调发暗, 但大的盐壳垄呈白色波纹状分布, 见图 1E(90.623°E, 40.301°N), 地面景观如图 4F。关于此盐壳成因, 可能的解释是早期曾发生过局部片流, 形成相对纯净的板块状盐壳(与上述 F 盐壳类型成因类似), 而后期仍长期接受地下水补给, 从而持续不断地进行地表析盐、隆起、垫高过程, 形成发育完好的蜂窝状构造。

4.3 盐坪地貌

“大耳朵”湖心区域, 也是最低区域。微地貌相对平坦, 经历过多次覆水过程, 地表覆盖厚的泥沙碎屑物质, 富含迁移性石膏晶体, 从沉积特征来看, 属于盐坪亚沉积环境。早期可能间歇发育有高盐沉积环境(蜂窝状构造, 盐矿物为石盐), 但后期大部分被溶解, 野外考察时, 部分区域地表仍可见溶蚀的残余蜂窝状构造, 垄高 10 ~ 20 cm, 低洼处有溶蚀洞(几厘米大小), 多被泥沙填充。在永久干涸前易受上游来水影响, 每逢较大洪水年份, 就可能有洪水进入, 洪流一方面携入大量泥沙, 另一方面则对前期形成的盐壳进行溶解和淋滤, 碎屑沉积物粒径相对较粗。而沉积物中大量毫米—厘米级石膏晶体的迁移性增长, 表明此区域曾长期浸透于石膏饱和的地下卤水, 目前地下水埋深已低于 2 m, 已不能干扰表层成盐过程^[12], 典型环带见图 1H。

5 “大耳朵”盐盘环状沉积环境与模式探讨

干盐湖演化过程要经历反复的洪水期和干化期的沉积旋回, 其交替过程除受气候影响主导外, 湖水的进退和演化方向主要受湖盆地形控制, 由盆地外围向中心产生不同的亚沉积环境并呈递变的带状分布, 在空间分布上则随盆地蒸发入流比产生相应的迁移。罗布泊“大耳朵”湖盆为一浅碟形湖盆, 湖盆深度仅 5.2 m, 坡度不及 0.2%^[12], 因此湖面垂向上的微小变化, 即可引起湖岸线横向上的大幅迁移, 从而在湖泊外围产生相应宽展的沉积分异环带; 致使地表蒸发盐类矿物, 盐壳沉积特征、地下卤水浓度、卤水化学特征都呈现相应带状分布。洪水期, 尤其是大的洪水, 可能将早期形成的盐壳全部溶解, 并由湖盆中心向边缘产生盐湖、浅水湖、盐滩、泥滩等一系列地貌景观, 而局部片流和季节性的洪水, 可能溶解部分盐壳, 并使盐壳留下相应溶蚀、再胶结和重结晶等沉积特征。干化期, 地表盐壳的形成主要受控于地下卤水的地表排泄和析盐过程, 长期的地表析盐将最终形成巨厚的盐壳, 并发育各种蜂窝状龟裂构造。“大耳朵”干盐湖区不同环带亚沉积环境发育的丘状、龟裂状、板块状、蜂窝状盐壳循环出现, 说明罗布泊在长期的演化过程中经历过多次充水和干涸过程旋回交替。板块状盐壳是局部片流溶解早期盐壳后重新蒸发和重新结晶的产物, 指示湖区可能的充水事件。蜂窝状构造意味着湖区长期经历地下卤水地表析盐和隆起过程。龟裂状盐壳通常承接于蜂窝状盐壳, 是盐壳龟裂后期长期遭受侵蚀的结果。长垄蜂窝状盐壳意味着早期曾发生过充水, 而后期仍长期接受地下水补给。丘状盐壳地貌广泛分布于湖盆边缘, 受风蚀迹象明显, 向湖盆边缘逐渐过渡为盐坪和泥坪地貌。“大耳朵”干盐湖地表盐壳横向上的沉积序列记录了罗布泊湖水消长、退缩和湖岸线迁移的演替过程。

6 结论

干盐湖蒸发岩沉积是干旱内陆封闭盆地的主要成盐模式, 其沉积过程包括间歇动荡的浅水面蒸发和湖底暴露时期的地表蒸发成盐过程。罗布泊“大耳朵”干盐湖盐壳沉积类型、微地貌特征、龟裂形态、矿物组成都呈现明显的“耳轮”型环带状分布。不同亚沉积环带发育有丘状、龟裂状、板块状和蜂窝状盐壳地貌类型, 并从湖滨至湖心循环往复出现。通过对不

同环带地表盐壳沉积特征、发育阶段、承接关系的实地调查研究,表明罗布泊干盐湖在干涸过程中经历过多次湖水消长、退缩和湖岸线迁移的过程。从目前世界范围内广泛分布的干盐湖来看^[17~23],还没有一个干盐湖如罗布泊一样在遥感影像上表现出如此清晰的“耳轮”型分布模式,因此对于罗布泊地表盐壳沉积特征的研究,将为丰富世界干盐湖资源,探讨多样化的干盐湖形成演化机制提供丰富的物质资料和极好案例。

参考文献(References)

- Casas E, Lowenstein T K. Diagenesis of saline pan halite: comparison of petrographic features of modern, Quaternary, and Permian halites [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59: 724-739
- Hsu K J, Siengenthaler C. Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem [J]. *Sedimentology*, 1969, 12: 11-25.
- Eugester H P, Hardie L A. Saline Lakes in Lakes-Chemistry [M]//Lerman A, ed. *Geology Physics*. New York: Springer Verlag, 1978: 237-293
- Lowenstein T K, Hardie L A. Criteria for the recognition of salt-pan evaporites [J]. *Sedimentology*, 1985, 32: 627-644
- Smoot J P, Lowenstein T K. Depositional environments of non-marine evaporites [M]//Melvin J L, ed. *Evaporites, Petroleum, and Mineral Resources*. Amsterdam: Elsevier, 1991: 189-347
- Schubel K A, Lowenstein T K. Criteria for the recognition of shallow perennial saline lake halites based on recent seiments from the Qaidam basin, Western China [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 89: 569-584
- 周廷儒. 论罗布泊的迁移问题 [J]. *北京师范大学学报*, 1978, (3): 34-40 [Zhou Tingru. On the question about the wandering of the Lop Nur lake [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition*, 1978, (3): 34-40]
- 樊自立, 李培清, 张丙乾. 罗布泊的盐壳 [C]//夏训诚. 罗布泊科学考察与研究. 北京: 科学出版社, 1987: 141-156 [Fan Zili, Li Peiqing, Zhang Bingqian. The Salt Crust of the Lop Nur [C]//Xia Xuncheng, eds. *Scientific Investigation and Research in the Lop Nur Lake Region*. Beijing: Science Press, 1987: 141-156]
- 谢连文, 李锋, 李兵海, 等. 罗布泊盐湖环状影像成因解释 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2004, 4(4): 76-80 [Xie Lianwen, Li Feng, Li Binghai, et al. The genesis of the ring salt crust images of the Lop Nur salt lake [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2004, 4(4): 76-80]
- 胡东生, 张华京. 罗布泊荒漠地区湖泊蒸发盐资源的形成及环境演化 [J]. *冰川冻土*, 2004, 26(2): 212-218 [Hu Dongsheng, Zhang Huajing. Lake-evaporated salt resources and the environmental evolution in the Lop Nur Region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(2): 212-218]
- 马黎春, 李保国, 蒋平安, 等. 罗布泊干盐湖电磁感应电导率与“耳纹”成因关系探讨 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 651-654 [Ma Lichun, Li Baoguo, Jiang Pingan, et al. The correlation between the electromagnetic induction measurements and pixel values associated with the “Great Ear” rings in Lop Nur [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 50(2): 651-654]
- 李保国, 马黎春, 蒋平安, 等. 罗布泊“大耳朵”干盐湖区地形特征与干涸时间讨论 [J]. *科学通报*, 2008, 53(6): 905-914 [Li Baoguo, Ma Lichun, Jiang Pingan, et al. High precision topographic data on Lop Nur basin's Lake “Great Ear” and the timing of its becoming a dry salt lake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 905-914]
- 王弼力. 罗布泊盐湖钾盐资源 [M]. 北京: 地质出版社, 2001 [Wang Mili. *Potassium Resources in the Lop Nur Salt Lake* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001]
- 杨谦. 罗布泊不是游牧湖 [J]. *湖泊科学*, 2004, 16(1): 1-9 [Yang Qian. The Lop Nur is not a wandering lake: views from the evolution of Lop Nur [J]. *Journal of Lake Science*, 2004, 16(1): 1-9]
- 马黎春. 罗布泊“大耳朵”干盐湖区盐壳特征及与“耳纹”相关性的探讨 [D]. 北京: 中国农业大学, 2008 [Ma Lichun. A study on the relationships between the salt crust characteristics and the tonal changes of the “Great Ear” rings in the Lop Nur dry salt lake area [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008]
- 夏训诚. 罗布泊科学考察与研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1987 [Xia Xuncheng. *Scientific Investigation and Research in the Lop Nur Lake Region* [C]. Beijing: Science Press, 1987]
- Lowenstein T K, Hein M A, Bobst A L, et al. An assessment of stratigraphic completeness in climate-sensitive closed-basin lake sediments: Salar de Atacama, Chile [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(1): 91-104.
- Twidale C R. Landform development in the Lake Eyre region, Australia [J]. *Geography Review*, 1972, 62: 40-70
- Smoot J P, Casens-Seidell B. Sedimentary features produced by efflorescent salt crusts, Saline Valley and Death Valley, California [C]//Renaut R W, Last W M, ed. *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes*. SEPM Spec. Publ., 1994, 50: 73-90
- Hunt C B, Robinson T W, Bowles W A, et al. Hydrologic basin, Death Valley, California, US Geol Surv. Prof. 494-B, 1966: 138
- 刘振敏, 杨更生. 察尔汗盐湖盐壳类型及形成条件 [J]. *化工矿产地质*, 1997, 19(2): 105-108 [Liu Zhengming, Yang Gengsheng. The types of salt-crust structures and formation condition in the Qarhan Salt Lake [J]. *Geology of Chemistry Minerals*, 1997, 19(2): 105-108]
- Hsu K J, Schneider J. Progress report on dolomitization-hydrology of Abu Dhabi subkhas [R]. 1973
- Stoertz G E, Ericksen G E. Geology of salars in northern Chile; U. S Geological Survey [R]. Professional Paper 811, 1974: 65
- Eugester H P, Hardie L A. Sedimentation in an ancient playa-lake complex: the Wilkins Peak Member of the Green River Formation of Wyoming [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1975, 86: 319-334

25 Ma Lichun , Li Baoguo , Jiang Pingan , *et al* . Investigation of evaporate deposits in the "Great Ear" area of Lop Nor salt plain , Xinjiang Province , China. American Geophysical Union , Fall Meeting 2009 , abstract # H51C-0777

26 Bobst A L , Lowenstein T K , Jordan T E , *et al* . A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama , northern Chile [J] . Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology , 2001 , 173: 21-42

Sedimentary Features , Origin and Paleoenvironmental Significance of “Great Ear” Salt Pans in the Lop Nor Playa

MA Li-chun^{1 2 3} LI Bao-guo³ JIANG Ping-an⁴ SHENG Jian-dong⁴
ZHONG Jun-pin⁴ QIU Hong-lie⁵ WU Hong-qi⁴

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

2. Department of Geological Sciences , State University of New York at Binghamton , Binghamton , NY13902 , U. S. A;

3. College of Resources and Environment , China Agricultural University , Beijing 100193;

4. College of Pratacultural and Environment Sciences , Xinjiang Agricultural University , Urumqi 830052;

5. College of Natural and Social Sciences , California State University - Los Angeles , Los Angeles CA 90032 , U. S. A)

Abstract The majority of present-day evaporite deposition occurs in arid closed continental basins in which the playa lake is most common. The distribution of evaporite minerals and sedimentary features of salt crust are usually zonal in a playa lake. The integrated zonal configuration is preserved well in the Lop Nor playa , which is represented by a series of concentric rings that closely resemble a great human ear in satellite images. This type of natural phenomenon is very rarely seen in a playa lake. The Lop Nor basin consists of a broad , flat salt plain , and salt crusts covering approximately 5 500 km² with the lowest parts at 780 m above sea level. After investigating the fracture texture of salt crust , sedimentary structures , evaporite mineral composition , and the condition of groundwater brine discharge in the multicyclic "Great Ear" rings , we can discuss the origin of different salt crust types , the connection between adjacent concentric zones , and the evolutionary process of the concentric configuration of the "Great Ear" salt pans. This research also gives a general overview of the sedimentary features in different cycles of salt-pan evaporite , as well as the relationship between the development of polygonal fissure structures of salt crust and the groundwater brine table. The types of salt-crust structure include polygon crack , well-developed honeycomb-shaped halite crusts , mound-shaped pattern and plate-shaped halite crusts. However , the sediment beneath the surface is typically saturated with concentrated brines and displacive evaporites. There is visual evidence of discharging groundwater in the numerous moist salt pans covering most of the salt plain , suggesting that the capillary fringe of the groundwater table is close to the surface of the salt pans. The development of salt crust structures were generally controlled by the groundwater table with a depth of < 2m in the Lop Nor playa. But it is also affected by many factors such as sediment permeability , brine density , evaporites , cracks and atmospheric conditions.

Key words Lop Nor basin; “Great Ear”; playa; salt pan; sedimentary features; sedimentary environment