

文章编号 10258-7106(2010)04-0616-09

罗布泊“大耳朵”湖区钾元素地球化学与富集机理

马黎春^{1,2}, 李保国², 蒋平安³, 钟骏平³, 盛建东³, 邱宏烈⁴, 武红旗³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 3 新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4 美国加州州立大学洛杉矶分校, 美国 洛杉矶 CA90032-8253)

摘要 对罗布泊“大耳朵”干盐湖盐壳的沉积过程、钾元素空间分布特征及地下卤水化学性质进行了实地调查研究。“大耳朵”湖区地下卤水盐度为 341 g/L 左右, $\rho(K^+)$ 变化于 7.0~12.4 g/L, 平均值 9.61 g/L, 高浓度富钾卤水通过毛细管上升和地表析盐, 导致钾盐矿物在地表析出, 地表盐壳的 $w(K^+)$ 变化于 0~4.7 g/kg, 平均含量 2.05 g/kg, 钾盐矿物主要包括光卤石、杂卤石和软钾镁矾。研究表明盐壳盐类矿物在干盐湖地表的聚集及地球化学分布特征与地下卤水的化学性质有着密切关系, 盐壳沉积后期风蚀、雨淋、季节性的地表径流都会影响和重塑盐壳地球化学组成特征, 钾盐矿物可作为盐壳增长发育的指示矿物。

关键词 地球化学; 罗布泊; “大耳朵”干盐湖; 钾元素; 分布特征; 富集机理

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

Geochemical characteristics and enrichment mechanism of potassium in Lop Nur “Great Ear” playa

MA LiChun^{1,2}, LI BaoGuo², JIANG PingAn³, ZHONG JunPing³, SHENG JianDong³,
QIU HongLie⁴ and WU HongQi³

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 3 College of Pratacultural and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjing, China; 4 College of Natural and Social Sciences, California State University-Los Angeles, Los Angeles CA 90032, U.S.A.)

Abstract

Based on field investigation of the sedimentary process of evaporite crusts, spatial distribution characteristics of potassium and groundwater chemistry in the “Great Ear” playa of the Lop Nur basin, this study reports the spatial distribution and enrichment pattern of potassium and potash minerals in the surface salt crusts. The present-day concentrated groundwater brines have salinities of ~341 g/L and K^+ concentrations ranging from 7.0~12.4 g/L with the average being ~9.61 g/L. The investigation results show that the upward capillary flux from the concentrated K^+ -bearing brines results in the formation of such potash deposits on the ground surface as carnallite, polyhalite and picromerite. Potassium content in the surface crusts was measured to range from 0~4.7 g/kg, with an average of 2.05 g/kg. There is a close correlation between accumulation of evaporite minerals, geochemical distribution characteristics of surface salt crusts and chemical composition of groundwater

* 本文得到国家自然科学基金(40671080)、国家自然科学基金重点项目(40830420)、中国博士后科学基金资助项目(20080430472)及长江学者和创新团队发展计划资助(IRT0412)项目的共同资助

第一作者简介 马黎春, 女, 1978 年生, 主要从事地球化学、盐湖沉积学及干旱区环境研究, Email: mlc@cau.edu.cn

收稿日期 2010-03-15; 改回日期 2010-04-13。张绮玲编辑。

brines. In addition, this paper deals with the process of geochemical differentiation during the later stage of efflorescent salt crusts deposition, in which the geochemical composition was also affected and modified by aeolian erosion, rainfall infiltration and seasonal surface runoff. Potash minerals could be the indicator of salt crust growth.

Key words: geochemistry, Lop Nur, “Great Ear” Playa, potassium, spatial distribution, enrichment mechanism

元素在地球表生环境中的化学分异规律是由它的地球化学行为决定的(Nesbitt et al., 1982),在化学风化过程中,碱(Na、K)及碱土金属(Ca、Mg)相对容易迁移、淋失,富集于盆地的洼地。干旱气候环境下,盐类矿物相继析出,钾盐通常出现在盐类矿物沉积的后期。罗布泊是中国继柴达木盆地之后发现的又一个成钾盆地,近年来在罗北凹地开展了大量钾盐矿床聚集条件及成矿特征的研究工作,实现了中国找钾工作及钾盐成矿机理的重大突破(王弭力等, 2001;刘成林等, 2002; 2003; 2005; 2006)。然而,迄今为止,对于罗布泊“大耳朵”地区钾元素地球化学分布特征的研究还较少。干盐湖成盐过程及沉积模式有其特殊性,其地表地球化学及相应盐类矿物分布特征与地下卤水的空间分布和水化学类型密切相关(马黎春, 2008)。前人在不同纬度、不同构造背景及不同气候条件下已开展的与干盐湖相关的沉积模式研究(Casas et al., 1989; Hsu et al., 1969; Eugester et al., 1978; Lowenstein et al., 1985),对于研究罗布泊干盐湖蒸发盐盘地球化学分布特征都有很好的借鉴意义。本文将从地下卤水化学特征及盐壳地球化学组成的角度出发,在罗布泊“大耳朵”干盐湖区采取不同尺度和不同分辨率的系统采样,并结合卫星遥感数据,揭示“大耳朵”干盐湖区钾元素、钾盐矿物的空间分布特征及其富集机理。

1 材料和方法

1.1 采样方案

1.1.1 地下卤水采样

2005~2006年间在罗布泊“大耳朵”湖区共计施工钻孔 54 个,钻孔深度 2 m,采样区段横切“大耳朵”湖盆纵断面,其位置见图 1 的 OP 段。两年共采集地下水样 17 个,具体采样方案如下:

(1) 2005 年 9 月应用冲击式土钻,由“钾盐矿”O 点向“湖心”P 点每隔约 5 km 间隔处实施钻孔,在出水处测量地下水位埋深,采集地下水卤水样并迅速密封,同时现场测定 pH 值、卤水温度值。2005 年共

计施工钻孔 12 个,采集地下水样 6 个,总采样段长约 45 km,具体采样路线及钻孔点位置见图 1。

(2) 2006 年,在前一年工作基础上,又进行了 1 km 间隔加密施钻,由于罗布泊国投钾盐矿晒盐池在 2006 年扩建到 OB 样段(被开发为晒盐池,见图 1),因此加密样段为 BP 断面,BP 断面总长度为 38 km,从钾盐矿盐池边缘 B 点到湖心区域 P 点。另外,为弥补 OB 样段采样不足,在 OB 样段东侧,与之平行样段 HG 补充实施钻孔 4 个,采样间隔约 2.5 km,取样方法同 2005 年。2006 年共计施工钻孔 42 个,采集地下水样 15 个,OP 样段及 HG 断面钻孔路线及钻孔点位置见图 1。

1.1.2 地表盐壳采样

2005~2006 年在“大耳朵”干盐湖区选取典型区域,对地表盐壳进行了不同尺度和不同空间分辨率的系统采样,采样方案如下。

(1) 高分辨率采样:经过对多时段遥感影像进行精细解译,选取遥感影像上色调、纹理变化相对稳定的区域,于 2005 年 9 月在“大耳朵”湖区进行实地采样,分别对选取的典型白色纹理(B)及典型黑色纹理(W)布设采样带,采样段长 400 m,采样间隔 30 m,在盐壳地表特征变化明显区域,进行 10 m 间隔加密采样。典型白纹处(B)共计采样 40 个,典型黑纹处(W)共计采样 27 个,采样点位置见图 1。

(2) 低分辨率采样:2006 年 9 月借助高分辨率 QuikBird 影像(2006-07-31),对“大耳朵”湖盆纵断面上上色调、纹理及表面形态存在差异的盐壳进行典型采样,采样区域为 UB 断面,全长 50 km,共选取典型采样点 38 个,采样点位置见图 1(绿色圆点)。

1.2 室内分析方法

盐壳样品置阴凉处风干(15 天),混匀,四分法取样,碾磨过 1mm 筛,装入样品袋,避免吸潮。为排除不同含盐量及含盐类型盐壳样品吸湿水差异,每一样品在化学分析前均测定其风干后吸湿水含量(采用质量法),在最终结果计算时将其统一换算成干重分别计算。卤水样品经过滤,稀释到可测量浓度。阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 采用美国戴安(Dionex)公司 DX-120

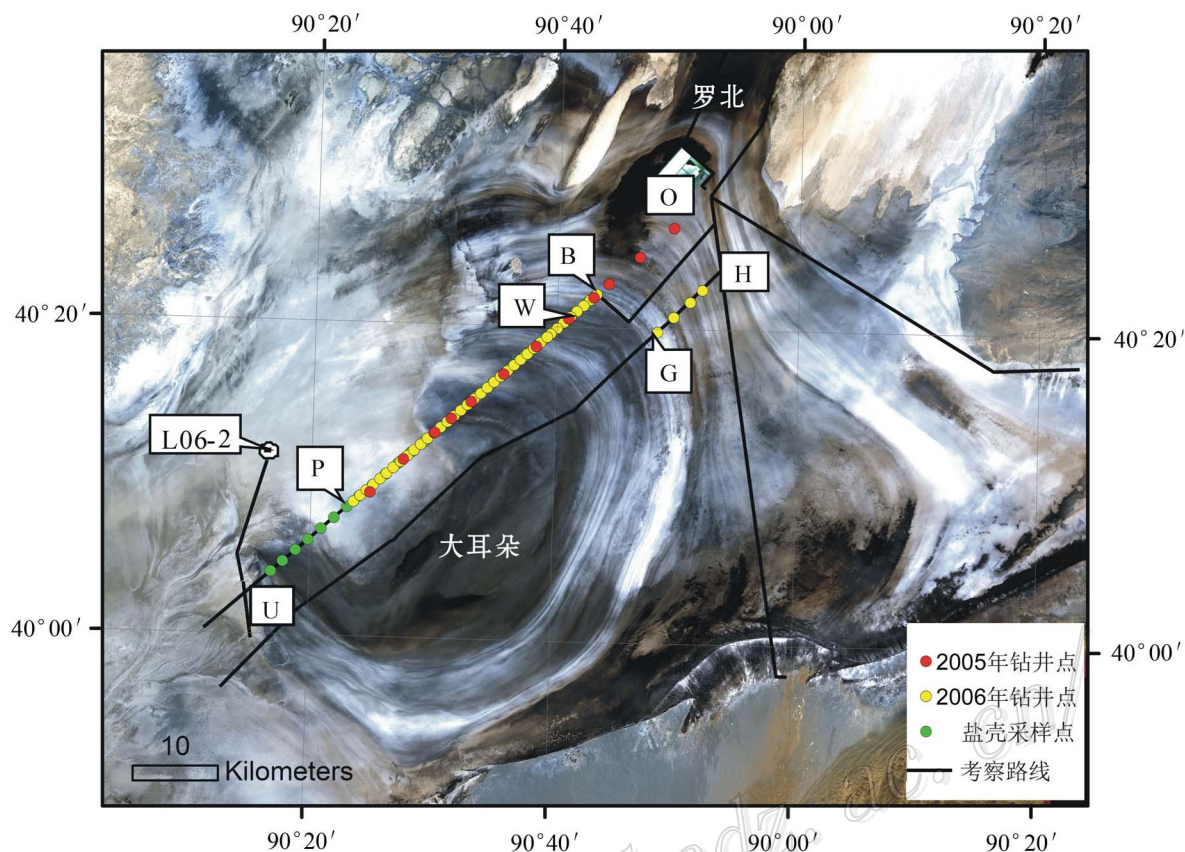


图 1 罗布泊“大耳朵”干盐湖区钻孔路线及采样点位置图

Fig. 1 Sampling locations and drilling routes in the “Great Ear” area of Lop Nur Salt Lake

型离子色谱(GP50 梯度泵, DS4 电导检测器, LC20 柱温箱, PeakNet 色谱工作站)进行测定。色谱条件: IonPac AS14 分析柱(4×250 mm), IonPac AG14 保护柱(4×50 mm), 淋洗液 3.5 mmol/L 碳酸钠/1.0 mmol/L 碳酸氢钠, 流速为 1.2 mL/min, 运行时间 10 min, 进样体积 25 μ L。阳离子 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 使用美国 Perkin Elmer 公司 Optima 3300DV 电感耦合等离子体发射光谱仪进行测定; 矿物分析采用美国 Phillips PW3040-MPD X 射线衍射仪(工作管电压: 40 kV; 管电流 20 mA)。

2 地球化学数据资料分析

罗布泊曾经是塔里木河的尾间湖, 水域辽阔, 覆盖面积曾达 20 000 km², 如今已完全干涸, 除少量季节性地表径流在某些洪水年份可能到达孔雀河口地区外, 基本无地表水补给, 目前整个湖区呈现典型的干盐湖地貌景观(马黎春, 2008)。干盐湖在成盐过程

中蒸发作用强烈, 地下卤水主要是通过毛细管传导和裂隙上升至地表以补充近地表水分的蒸发损耗, 并在地表析出各种盐类矿物(Lowenstein et al., 1985), 后期再与风沙胶结形成坚硬的盐泥混合物(盐壳)。罗布泊目前正处于干盐湖成盐阶段, 地下卤水的化学性质对于地表盐壳地球化学特征及盐类矿物组成的重塑有着至关重要的作用。

2.1 卤水地球化学特征

野外调查发现“大耳朵”湖区普遍存在地下卤水地表排泄现象, 地下卤水埋深较浅, 除“湖心”浅色区域外(图 1), 大部分地区在 2 m 以内, 有些区域地下水位埋深仅几十厘米, 甚至几个厘米(马黎春, 2008), 地下卤水很容易通过毛细管或裂隙上升至地表, 致使地表盐壳湿润, 盐类矿物析出。湿润的盐壳地表造成光谱强烈吸收, 在遥感影像上呈现明显的暗色调(见图 1)。与世界上大多数干盐湖类似, 地下卤水的季节性变化会导致地表盐壳干湿状况的周期性变化, 湿季, 地下卤水水位上升, 地表盐壳湿润, 在

有些干盐湖区(如 Lake Eyre)甚至出现暂时性的水体(Baas-Becking et al., 1956),在遥感影像上呈现暗色调;干季,前期湿润的盐壳迅速干涸,地表覆盖白色盐霜,在遥感影像上呈现亮色调。罗布泊干盐湖盐壳也会出现季节性的变化,然而除小的季节性变异外,罗布泊盐湖似乎终年保持整个盆地系统的水分蒸发与补给平衡。通过对罗布泊地区多时段(1958~2009 年)遥感影像解译,湖区大部分区域在遥感影像上终年呈现暗色调,说明盆地周缘补给地下水基本可维持 5 000 多 km² 盐壳的巨大蒸发,地下水位波动始终处于一定的范围,并保持地表盐壳湿润。2005~2006 年笔者连续两年在湖区进行地下水位观测,结果表明,同一区域地下水位埋深基本稳定,年季变化不大(马黎春,2008)。对所采集的地下卤水样品进行化验分析表明,大耳朵湖区地下卤水已达石盐饱和,盐度变化于 330~364 g/L 之间,平均盐度 341.03 g/L,分析结果见表 1。

依据 M·T·瓦里亚什科的水化学分类方案(瓦里亚什科,1965),水化学类型属硫酸盐型,进一步划分为硫酸镁亚型。野外实测地下卤水 pH 值为中性-微酸性,pH 值变化于 6.5~7.1 之间。K⁺ 含量较高,ρ(K⁺)浮动于 7.0~12.4 g/L,平均含量 9.61 g/L。依据水盐体系相图原理与方法,将各采样点实测卤水化学成分换算为耶涅克指数,投影到 K⁺、Na⁺、

Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻-H₂O(25℃)五元体系稳定平衡相图上(图 2),可知,目前“大耳朵”湖区地下卤水析出阶段大多数位于软钾镁矾(K₂SO₄·MgSO₄·6H₂O)相区,少数进入钾石盐(KCl)相区,卤水已演化至钾盐析出阶段。与罗北凹地卤水投影点多分布于白钠镁矾和软钾镁矾相区相比,“大耳朵”地区卤水蒸发浓缩明显(见图 2),因此,高浓度富钾卤水的上升和地表析盐过程,势必会造成钾元素及钾盐矿物在干盐湖表面呈现特定的分布模式。

2.2 盐壳钾元素地球化学分布特征

盐壳物质组成(或离子组成)在特定的地质环境与背景下,具有某种内在联系与共生组合规律,野外调查结果表明,遥感影像呈黑色纹理处,地下卤水毛细管上升强烈,地表湿润,盐壳含水量一般达 15% 左右,而白色纹理处,地下水毛细管作用不发育,地表十分干燥,盐壳含水量还不到 1% (马黎春,2008)。地下卤水地表排泄的空间差异性,导致“大耳朵”湖区地表盐壳含盐量、地球化学组成特征、盐类矿物组合都表现出明显的空间异质性,并与地下卤水排泄模式呈现同一分布模式。

高分辨率采样分析结果表明:典型“黑色纹理”与典型“白色纹理”间的地表盐壳易溶盐总量及各离子含量都存在明显差异性,“黑色纹理”W 处盐壳含盐量、Cl⁻、Na⁺、K⁺ 含量都偏高,ω(K⁺)为 2.63

表 1 罗布泊“大耳朵”地区卤水化学组成特征
Table 1 Chemical composition characteristics of brines in the Lop Nur “Great Ear” area

样号	ρ(B)/(g/L)							化学型	耶涅克指数		
	总盐	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		2K ⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻
1	349.91	214.53	15.34	119.75	10.60	0.64	17.73	SM	13.14	71.41	15.45
2	357.17	204.61	17.34	108.25	11.33	0.50	21.65	SM	11.82	73.47	14.71
3	364.69	195.72	20.17	130.75	9.80	0.44	12.53	SM	14.65	60.85	24.50
4	348.61	206.61	17.43	129.50	8.48	1.10	12.28	SM	13.55	63.80	22.65
5	337.14	184.68	16.06	105.00	10.10	8.90	11.80	SM	16.42	62.36	21.21
6	328.02	182.92	15.52	99.00	10.05	7.05	12.85	SM	15.60	64.83	19.57
7	332.51	185.18	15.26	101.00	9.40	7.45	13.65	SM	14.21	67.05	18.74
8	330.75	182.63	16.12	96.00	11.00	8.85	15.40	SM	14.84	67.50	17.67
9	359.89	208.21	17.59	119.75	13.88	0.54	18.23	SM	15.88	67.77	16.36
10	340.13	185.09	18.43	98.50	12.40	8.20	16.95	SM	15.04	66.80	18.16
11	331.08	186.39	15.56	99.50	9.30	5.95	14.00	SM	13.79	67.47	18.74
12	336.79	179.82	18.84	103.50	8.90	11.55	13.70	SM	12.95	64.78	22.27
13	337.04	185.70	18.17	104.00	8.95	7.65	12.05	SM	14.23	62.29	23.48
14	332.32	187.24	13.88	103.00	7.40	9.30	10.90	SM	13.68	65.48	20.85
15	343.93	204.07	13.21	132.00	7.58	0.74	10.03	SM	14.89	64.03	21.09
16	335.18	191.55	12.68	103.00	7.50	8.55	11.35	SM	13.71	67.44	18.84
17	332.29	188.28	13.97	104.00	6.70	8.00	10.75	SM	12.64	65.94	21.42
平均值	341.03	192.54	16.21	109.21	9.61	5.61	13.87		14.18	66.07	19.75

表 2 典型黑白纹理 W-B 区域及 UB 断面盐壳化学组成统计特征描述

Table 2 Descriptive statistics of salt crust chemical composition for typical black-white lamination W-B along the fine resolution sample and the U-B transect

采样区域	统计特征	$w(B)/(g/kg)$						
		总盐	Cl^{-}	SO_4^{2-}	K^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}
典型 白纹 B $n=27$	最大值	580.2	320.1	50.6	2.7	24.2	2.0	312.2
	最小值	301.3	136.5	23.6	1.4	12.4	0.38	68.5
	平均值	408.75	219.67	32.38	2.27	17.68	1.38	134.86
	标准差	156.04	94.38	8.12	1.32	5.98	0.98	68.98
	变异系数(%)	38.17	42.96	25.07	58.14	33.84	70.75	51.15
典型 黑纹 W $n=27$	最大值	677	392.4	33.2	4.2	26.1	2.1	350
	最小值	387	168.2	21.6	1.6	16.2	0.4	94
	平均值	469.55	250.68	26.23	2.63	20.47	1.40	167.78
	标准差	180.63	119.34	4.50	0.93	6.58	0.61	74.24
	变异系数(%)	38.47	47.61	17.16	35.25	32.16	43.54	44.25
UB 断面 $n=38$	最大值	895.1	487	51.7	4.7	50	4.7	319
	最小值	254.0	102	18.1	0	10.3	0.4	62
	平均值	509.70	282.59	25.68	2.05	26.78	1.94	169.88
	标准差	241.10	161.85	8.53	1.50	15.09	1.11	93.91
	变异系数(%)	47.30	57.27	33.22	73.32	56.35	57.30	55.28

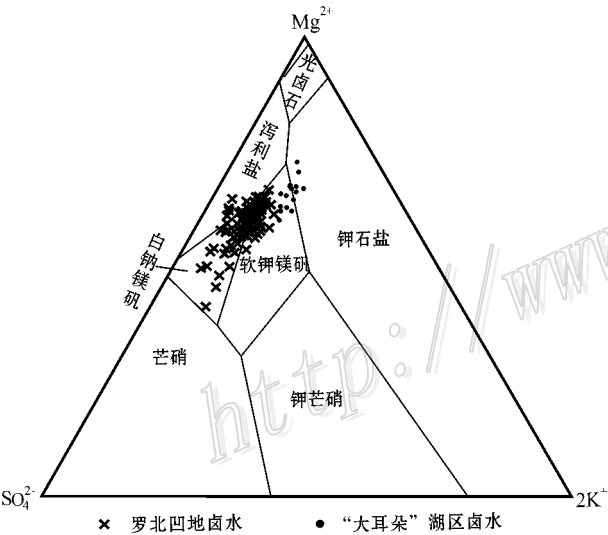


图 2 罗布泊盐湖卤水 K^{+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} - $H_2O(25^{\circ}C)$ 五元体系相图

Fig. 2 Stable phase graph of the quinary system of K^{+} , Na^{+} , Mg^{2+} , Cl^{-} and SO_4^{2-} - $H_2O(25^{\circ}C)$ for brine in the Lop Nur salt lake

g/kg,而“白色纹理”处盐壳含盐量较低, $w(K^{+})$ 较低,为 2.27 g/kg,分析结果见表 2。

UB 断面从“大耳朵”湖盆东北至西南边缘,穿越整个“大耳朵”湖盆,包括丰富的盐壳类型,其盐壳物质组成与遥感影像色调的对应关系,有助于我们探索地下卤水排泄状况与钾离子空间分布特征及富集规律。采样分析结果表明,盐壳含盐量与遥感影像

表观反射率表现出明显的负相关性,相关系数 $G\gamma G = -0.68(p<0.01)$ (马黎春,2008)。表观反射率较高的区域,即遥感影像上的浅色环带,地表干燥,含盐量较低(300 g/kg 左右)。而表观反射率较低的区域,即深色环带,地表湿润,含盐量较高(800 g/kg 左右)。而钾元素也表现出相应的空间分异模式,其空间分布特征见图 3。

图 3 为 2002 年 5 月 13 日 Landsat 7 ETM⁺ 数据,为了更好的分辨盐壳含水量、物质组成差异,对 1、2、3、4、5、7 波段进行主成分分析,用前 3 个主成分合成工作底图。由图 3 可知,深色环带钾离子、含盐量较高,浅色环带含盐量较低,整个湖盆纵断面 UB 钾离子含量 $w(K^{+})$ 变化于 0~4.7 g/kg,平均含量 2.05 g/kg。尤其是湖心区域,钾离子含量较低,一方面由于此区目前高浓度的地下富钾卤水不能到达地表,另一方面,此区域毗邻入水口,在罗布泊最终干涸前,季节性的洪水仍可到达此区域,对前期形成的盐类矿物进行淋滤,相对活泼的 K 离子更容易遭受淋失,迁移。除湖心区以外的广大区域,在遥感影像上呈暗色调(见图 3),指示高浓度的富钾卤水通过毛细管和裂隙进行地表排泄,地表析盐作用强烈,地表盐壳通常覆盖白色盐结皮,或菌丝状、菜花状晶簇,矿物分析结果表明,盐类矿物主要以石盐为主,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[$K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$](Ma et al., 2009),X 射线衍射分析结果见图 4。

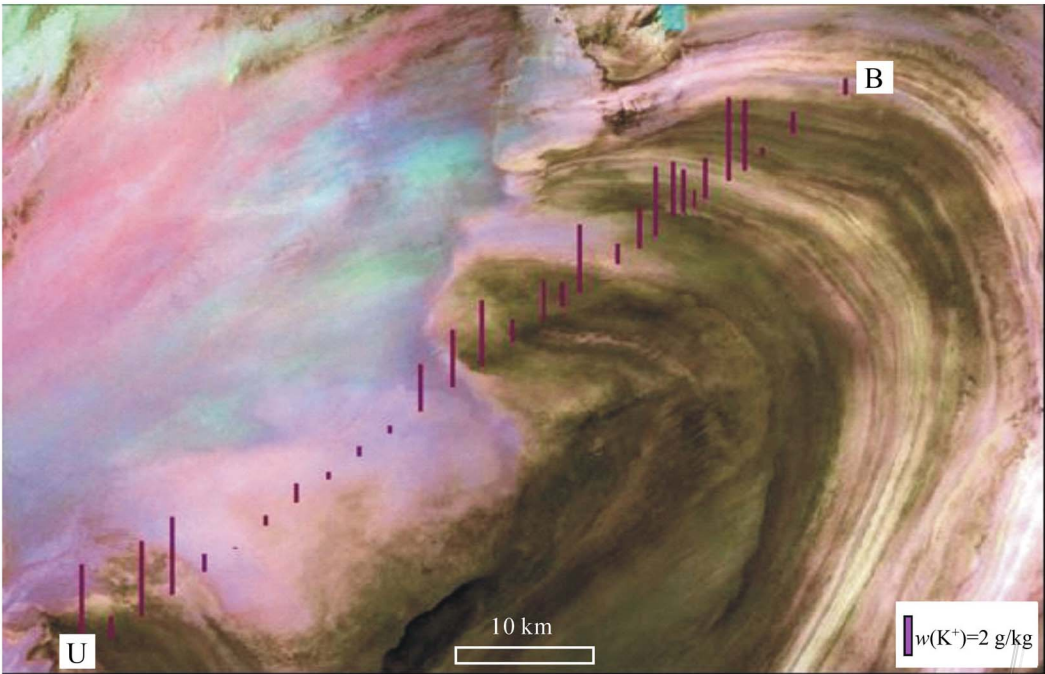


图 3 UB 断面盐壳钾元素含量空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of potassium element along the UB transect

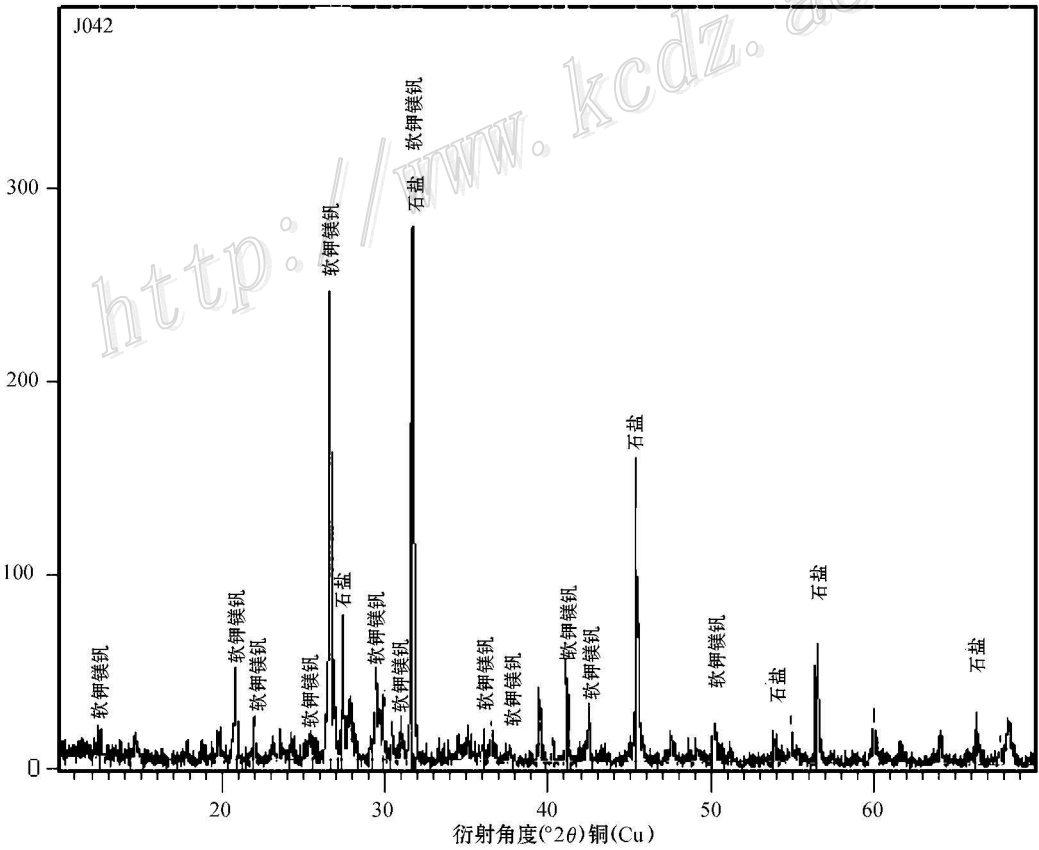


图 4 地表盐壳 X 射线衍射谱图
Fig. 4 X-ray power diffraction spectrum of efflorescent salts

2.3 钾元素空间分布的主要控制机制和影响因素

干盐湖区地下卤水的地表排泄过程是地表盐壳钾元素聚集与空间分布的主控因素。一般来讲,地下水位深度是控制干盐湖区地下水毛细管上升、地表排泄和析盐过程的首要因素。当地下水位下降到一定深度,毛细管作用消失,盐壳地表析盐过程结束。Bobst 等 (2001) 认为地下水位埋深维持在 50~70 cm 左右,可持续不断的供给表层盐壳,致使盐壳不断长高。而刘振敏等 1997 年观测察尔汗盐湖时发现,地下水位埋深 > 60 cm,盐壳即进入老化阶段。Tyler 等 (1997) 在 Owens 干盐湖的观测结果表明,湖区不同亚沉积区域地下水排泄能力有很大差异,砂质沉积物区表面干燥,地下水毛细管作用不发育;而湖相粘土沉积区,即使地下水位埋深下降到 2 m 以下,仍能发生地下水的地表排泄过程。Hsu 等 (1969) 认为,地表粗粒性碎屑物将切断或减弱毛细管作用。然而,除沉积物颗粒组成这个常规性影响因素外,干盐湖地下卤水的传导和地表排泄过程十分复杂,在这一系统中,高浓度的卤水、致密的盐体、沉积物间隙盐类的析出,盐体膨胀裂开形成的悬空,都会影响地下卤水的向上传导和蒸发,因此在世界不同干盐湖区广泛开展的盐壳蒸发率观测试验,得到的测定结果却差异很大,浮动于 10~230 mm/a 之间 (Tyler et al., 1997; Cochran et al., 1988; Allison et al., 1985; Yechieli et al., 1990; Malek et al., 2002; Rosen, 1994),这无疑源于盐壳-卤水蒸发系统本身的复杂性。由于盐壳沉积特征(结构、质地、矿物迁移性增长、裂隙)对卤水传导过程的影响涉及变量较多,到目前为止,其作用过程还很难量化 (Tyler et al., 1997; Yechieli et al., 2002; Rosen, 1994)。

目前世界范围内广泛分布和正在形成的现代蒸发盐壳都是在地下卤水的地表排泄过程中形成的,其地球化学组成特征和地下卤水的化学性质都有着密切关系,如智利的 Salar de Atacama 干盐湖 (Bobst et al., 2001),加利福尼亚的 Death Valley 干盐湖 (Crowley, 1996) 都开展了地表盐壳盐类矿物分区及地下卤水化学特征变化的监测研究。罗布泊“大耳朵”干盐湖区,地下卤水正处于钾盐析出阶段,因此地下卤水毛细管上升和地表排泄的空间格局,将导致钾元素及钾盐矿物在干盐湖地表呈现相同的空间分布格局 (见图 3)。而当地下水下降到一定深度,或毛细管上升受到阻断,地表盐壳脱离地下水影响范围,就意味着地表成盐阶段的结束,后期侵蚀作用开

始扮演主要角色。风蚀、雨淋、季节性的地表径流都会影响盐壳沉积后期化学性质的改变。风蚀作用一方面对地表盐壳进行物理性破坏,另一方面将盆地边缘沙漠地区的沙尘搬运至湖盆,覆盖于盐壳表面。降水和地表径流将钾等易溶性盐类最先溶解、淋滤到盐层下部,而难溶性盐类矿物和泥沙等碎屑物沉淀于盐壳表面。风蚀、雨淋长期交互作用逐渐对前期形成的盐壳化学组成进行改造,而这些改造均不利于钾盐等易溶性盐类在盐壳表层的富集。依据地球化学分异的基本原理,盐类矿物的溶解和迁移性取决于盐类本身的溶解度,溶解度大的矿物先溶解,迁移、活动性强,而溶解度小的矿物后溶解,迁移能力弱。如图 5 所示,湖心区域 L06-2 钻孔 (位置见图 1),表层钾离子含量极低,指示易溶的含钾矿物遭受溶解、淋滤,但罗布泊地区降水稀少,年平均降水量仅有 20 mm 左右,也限制了钾离子的迁移距离, L06-2 孔只在 20 cm 深度处出现一小的聚集峰,钾离子纵断面分布特征见图 5。

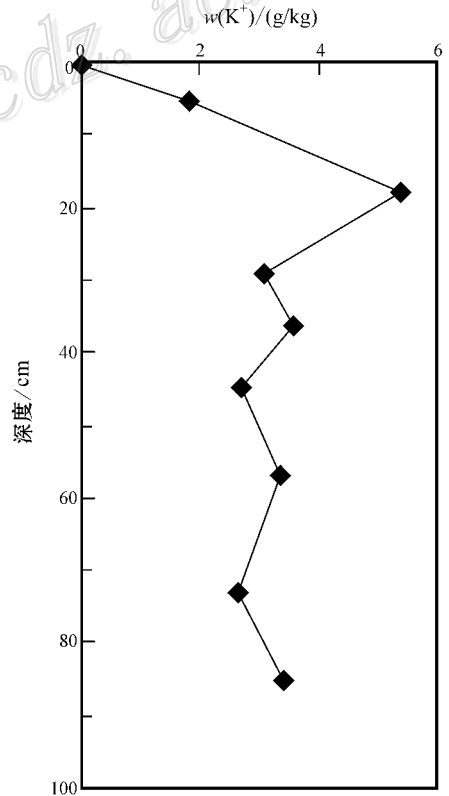


图 5 L06-2 钻孔剖面钾离子含量分布特征

Fig. 5 Vertical distribution characteristics of potassium content along profile L06-2

综上所述,在盐壳的形成过程中,高水位的含盐潜水,在强烈的蒸发作用下沿毛细管上升,可将易溶盐带至表层进行富集,尤其溶解度较大的含钾矿物最易在剖面上部聚集,但当地表盐壳脱离地下水影响后,含钾矿物也最易遭受溶解和淋滤。正是由于钾元素这种相对活泼、易迁移的地球化学特性,决定着含钾矿物在干盐湖表面的迁移、再分布和空间分布规律。因此,在地下水位较浅,卤水活动性较强的干盐湖区,钾盐矿物可作为地表盐壳增长和发育的指示矿物。

3 结 论

通过对罗布泊“大耳朵”干盐湖区地下卤水空间分布特征、水化学类型、表层盐壳和地下卤水的相互关系的野外调查、实地采样和室内分析,揭示了“大耳朵”干盐湖区浅层沉积物钾元素及钾盐矿物空间分布特征。主要得出以下结论。

(1) “大耳朵”湖区目前地下卤水盐度约 341.03 g/L, pH 值为中性-微酸性, $\rho(K^+)$ 变化于 7.0~12.4 g/L, 平均 9.61 g/L; 卤水已演化至钾盐析出阶段, 处于软钾镁矾($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$)析出相区, 少数进入钾石盐(KCl)析出相区。

(2) 干盐湖地表蒸发盐矿物类型是地下卤水化学性质的直接体现, “大耳朵”湖区高浓度的富钾卤水毛细管上升和地表析盐过程, 造成钾元素及含钾矿物在地表析出, 并与地下水地表排泄表现出相同的空间分布模式。整个湖盆纵断面钾离子含量 $w(K^+)$ 变化于 0~4.7 g/kg, 平均含量 2.05 g/kg, 表层盐壳钾盐矿物主要有光卤石、杂卤石和软钾镁矾。

(3) 对盐壳形成后期, 脱离地下水影响后, 受风蚀、雨淋等影响而发生的化学分异过程进行了讨论, 认为风蚀、雨淋、季节性的地表径流都会影响和重塑盐壳化学组成特征, 并不利于钾盐等易溶盐矿物在干盐湖地表的保存和富集, 钾盐矿物可作为干盐湖地表盐壳增长和发育的指示矿物。

志 谢 感谢新疆农业大学研究生唐光木、谢云波、刘开源、耿魁、延安、孔德庸、王培、韩剑、陈鹏翔、华玉山等在野外考察、采样和室内分析中给予的极大帮助, 使本研究顺利进行!

References

- Allison G B and Barnes C J. 1985. Estimation of evaporation from the normally “dry” Lake Frome in South Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 78: 229-242.
- Bobst A L, Lowenstein T K, Jordan T E, Godfrey L V, Ku T and Luo S D. 2001. A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 173: 21-42.
- Baas-Becking L G M and Kaplan I R. 1956. The microbiological origin of the sulphur nodules of lake Eyre[J]. *Trans R. Soc. S., Aust.* 79: 52-65.
- Casas E and Lowenstein T K. 1989. Diagenesis of saline pan halite: comparison of petrographic features of modern, Quaternary, and Permian halites [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 59: 724-739.
- Cochran G F, Lopes T J, Mihevc T and Tyler S W. 1988. Study of salt crust formation mechanisms on Owens (Dry) Lake, CA [M]. *Water Resources Publ.* 41108. Desert Research Institute, Reno, NV.
- Crowley J K. 1996. Mapping playa evaporite minerals and associated sediments in Death Valley, California with multispectral[J]. *Journal of Geophysical Research*, 101(1): 643-659.
- Eugester H P and Hardie L A. 1978. Saline lakes in Lakes-Chemistry, geology, physics[M]. Lerman A, ed. New York: Springer Verlag. 237-293.
- Hsu K J and Siengenthaler C. 1969. Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem[J]. *Sedimentology*, 12: 11-25.
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C, Chen Y Z and Li S D. 2002. Formation of pores and brine reserving mechanism of the aquifers in Quaternary potash deposits in Lop Nur Lake, Xinjiang, China [J]. *Geological Review*, 48(4): 437-443(in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Jiao P C, Wang M L, Yang Z C, Li S D and Chen Y Z. 2003. Characteristics of diagenesis of the Quaternary salt-bearing strata, Lop Nur Lake, Xinjiang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 240-246(in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Chen Y Z and Jiao P C. 2005. The research on the homogeneous temperatures of inclusions in halite from the isothermal evaporation of brine and natural halite from Lop Nur Playa, Xinjiang, China [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 28(4): 306-31 (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 paleoclimate significance in Lop Nur salty lake, Xinjiang, NW China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(1): 94-98 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z M and Yang G S. 1997. The types of salt-crust structures and formation condition in the Qarhan Salt Lake[J]. *Geology of Chemistry Minerals*, (2): 105-108(in Chinese).
- Lowenstein T K and Hardie L A. 1985. Criteria for the recognition of salt-pan evaporates[J]. *Sedimentology*, 32: 627-644.

- Ma L C. 2008. 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(dissertation for doctor degree)[D]. Supervisor: Li B G. Beijing: China Agricultural University(in Chinese with English abstract).
- Ma L C, Li B G, Jiang P A, Lowenstein T K, Zhong J P, Sheng J D and Wu H Q. 2009. Investigation of evaporate deposits in the "Great Ear" area of Lop Nor salt plain, Xinjiang Province, China [A]. In: American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract # H51C-0777.
- Malek E, Bingham G E and McCurdy G D. 1990. Evapotranspiration from the margin and moist playa of a closed desert valley[J]. Journal Hydrology, 120:15-34.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 299 : 715-717.
- Rosen M R. 1994. The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas [J]. Geological Society of America, Special Paper. 289:1-18.
- Tyler S W, Kranz S, Parlange M B, Albertson J, Cochran G, Lyles B and Holder G. 1997. Measurement of evaporation and salt flux at Owens Dry Lake in eastern California, U. S. A[J]. Journal of Hydrology, 200:10-135.
- Valyaskko M Г. 1995. Geochemical regularity for the formation of potash deposits[M]. Fan L, et al., translation. Beijing: China Industrial Press. 17-19(in Chinese).
- Wang M L, Liu C L and Jiao P C. 2001. Saline Lake Potash Resources in the Lop Nur, Xinjiang[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese with English abstract).
- Yecheili Y and Wood W W. 2002. Hydrological processes in saline systems: Playas, sabkhas, and saline lakes[J]. Earth Science Reviews, 58:343-365.

附中文参考文献

- 瓦里亚什科 М Г. 1965. 钾盐矿床形成的地球化学规律[M]. 范立等, 译. 北京: 中国工业出版社. 274-309.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 陈永志, 李树德. 2002. 罗布泊第四纪卤水钾矿储层孔隙成因与储集机制研究[J]. 地质论评, 48(4): 437-443.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 杨智琛, 李树德, 陈永志. 2003. 罗布泊第四纪含盐系成岩作用特征研究[J]. 沉积学报, 21(2): 240-246.
- 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包裹体均一温度分析探讨[J]. 东华理工学院学报, 28(4):306-31.
- 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包裹体特征及古气候意义探讨[J]. 矿物学报, 26(1):1-9.
- 刘振敏, 杨更生. 1997. 察尔汗盐湖盐壳类型及形成条件[J]. 化工矿产地质, (2):105-108.
- 马黎春. 2008. 罗布泊“大耳朵”干盐湖区盐壳特征及与“耳纹”相关性的探讨(博士论文)[D]. 导师:李保国. 北京:中国农业大学.
- 王弼力, 刘成林, 焦鹏程. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京:地质出版社.