

罗布泊盐湖晶间卤水运动特征及其动力学分析

焦鹏程¹⁾ 刘成林^{2,3)} 王弭力²⁾ 陈永志²⁾ 王新民⁴⁾

(1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 正定, 050803;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037 3) 北京大学城市与环境学系, 北京, 100871;

4) 新疆地质矿产局第三地质大队, 新疆 库尔勒, 841000)

摘 要 根据地下水运动的一般规律, 阐述了罗布泊盐湖钙芒硝储卤层及富钾卤水的特性, 并讨论了该卤水层的变化特性。在罗布泊干盐湖区采用¹⁴C 测年技术、人工放射性同位素技术和化学示踪技术, 研究晶间卤水循环速率、卤水渗流方向及渗透流速与实际流速, 揭示罗布泊盐湖晶间卤水处于缓慢的流动及交替状态。探讨了新构造活动、古气候变化、地层静压力作用、深部地层水及大气降水补给作用等因素对罗布泊盐湖晶间卤水运动的控制和影响, 提出了晶间卤水的运动模式。

关键词 罗布泊盐湖 晶间卤水 水运动

Characteristics and Dynamic Analysis of Inter-Crystal Brine Movement in the Lop Nur Salt Lake

JIAO Pengcheng¹⁾ LIU Chenglin^{2,3)} WANG Mili²⁾ CHEN Yongzhi²⁾ WANG Xinmin⁴⁾

(1) Institute of Hydrology and Environmental Geology, CAGS, Zhengding, Hebei, 050803 2) Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037 3) Department of Municipality and Environmental Sciences, Peking University, Beijing, 100871;

4) No. 3 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Karla, Xinjiang, 841000)

Abstract Based on general movement regularity of underground water, this paper describes in detail physical characteristics of brine aquifers and dynamic properties of brine movement as well as their variation in Luobei depression lying in the northeast of Lop Nur, Xinjiang. With such means as ¹⁴C-dating, I¹³¹ technique and chemical tracing technique, the authors studied the rate of circulation, the flowing direction, the vadose velocity and the actual flowing velocity of inter-crystal brine in Luobei playa, thus revealing the chronic flowing and exchange state of the inter-crystal brine. In addition, it is shown that various factors such as neotectonic activity, paleoclimate change, hydrostatic pressure of strata, oilfield water and precipitated water have exerted controlling influence on the movement of inter-crystal brine. Finally, a model of inter-crystal brine is suggested.

Key words Lop Nur salt lake inter-crystal brine movement of underground water

罗布泊盐湖位于塔里木盆地东端, 研究区(罗北凹地)位于其东北部, 南北长 80 km, 东西宽 10~30 km, 面积约 1 300 km² (图 1)。1995 年及 1996 年发现, 并确定了罗布泊罗北凹地大型卤水钾盐矿床^{①②}。该矿床在国内外属一种新类型^③, 富钾卤水主要赋存于钙芒硝岩的(次生)孔隙中。钙芒硝(岩)孔隙十分发育, 呈蜂窝状, 钻进过程中常出现“掉钻”

现象, 此外, 石膏(岩)、粉砂盐岩呈中粗粒松散结构, 孔隙较发育, 也是主要的储卤层。

盐湖区储卤层与一般的含水层具有显著的差异性。绝大多数天然地下水为低盐度及低粘滞性的流体, 其物理化学性质(如矿化度、温度、pH 值等)相对比较稳定, 含水层介质结构(孔隙大小及连通性、颗粒级配等)也具有很强的稳定性, 即含水层的水文地

本文由国土资源部科技项目(编号 992025)、国家科技攻关 305 项目(编号 96-915-08-05)和地质调查项目(编号 DKD2002002)资助。
改回日期 2002-4-26 责任编辑 宫月萱。

第一作者 焦鹏程, 男, 1964 年生, 研究员, 从事水文地质学与盐湖矿床水文地质研究。

①中国地质科学院简报. 1995. 第 8 期(总第 315 期)。

②中国地质科学院简报. 1997. 第 1 期(总第 320 期)。

③中国地质科学院矿产资源研究所等. 1999. 新疆罗布泊地区钾矿床研究及资源评价报告(地科定 95-22)。

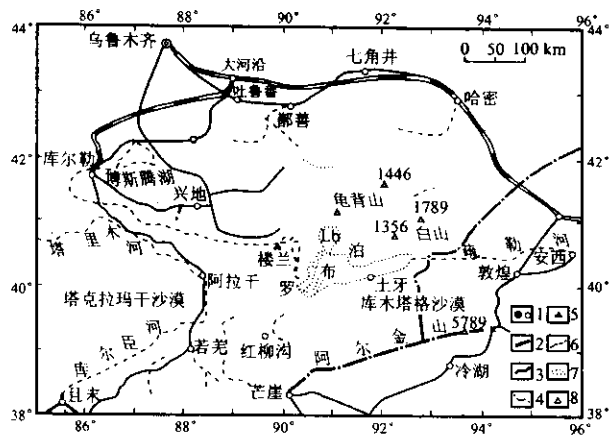


图 1 罗布泊盐湖位置图

Fig. 1 Location map of the Lop Nur

1-城镇 2-铁路 3-公路 4-行政区划 5-古遗址；

6-河流 7-干盐湖 8-山峰 1b-罗北凹地

1-city and town 2-railway line 3-highway 4-the border of administration regions 5-ancient ruins 6-rivers 7-playa；

8-mountainous peak 1b-Loubei depression

质参数一经确定,很少再发生改变。相比之下,盐湖区储卤层的特征及其赋存的晶间卤水均表现出较强的易变性,晶间卤水在运动、演化过程中与盐类储卤层之间发生盐溶-盐析物理化学作用,使得储卤层特征(如孔隙度、渗透系数等)和晶间卤水的物理化学性质(密度、粘度、盐度等)不断发生变化。研究晶间卤水的动力学特征,对确定含盐地层的成岩作用机理、研究卤水钾矿形成过程(卤水储集过程)、评价开发卤水钾盐矿床均具有重要的理论和实际应用意义。

前人在相关领域的主要研究成果有 姚德良等(1998)用改进型 Picards 方程模拟土壤水盐运移过程 李润民(1992)研究水盐均衡及储卤层结构、构造特点,着重分析了石盐晶间卤水在开采中的水动力条件 李文鹏(1996)通过计算机模拟察尔汗晶间卤水在注水开采模式下的固-液浓度的时空变化过程,预测了抽水过程中各种成分浓度及总采矿率的变化 Rosen(1994)分析了干旱区封闭盆地地下水的补给源及水循环条件,Donovan(1992)强调了水化学组分差异的动力学意义 Hardie(1990)则分析了断裂作用及深部 CaCl_2 型地热水对钾盐成矿的作用。

1 地下水运动的一般规律

天然状态下的地下水运动绝大多数服从达西定律,即渗透流速(v_f)与水力坡度(J)呈正比:

$$v_f = K \cdot J$$

式中, K 为多孔介质的渗透系数。

多孔介质中的水流运动是否符合达西定律,通常用雷诺数来判别(薛禹群,1986)。当渗透流速由低到高时,多孔介质中的地下水运动状态出现 3 种情况(图 2):

- (1)当地下水低速运动时,即雷诺数小于 1~10 之间的某个值时,为粘滞力占优势的层流运动,适用达西定律。
- (2)随着流速的增大,当雷诺数大致在 1~100 之间时,为一过渡带,由粘滞力占优势的层流运动转变为惯性力占优势的层流运动、紊流运动;
- (3)高雷诺数时的紊流运动。

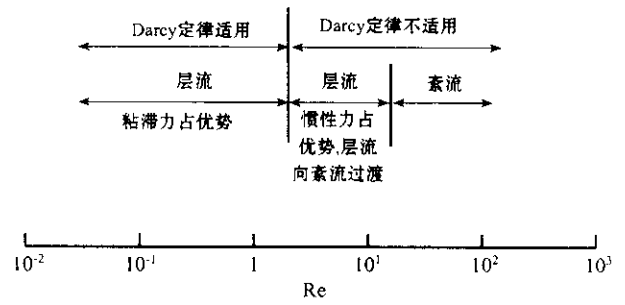


图 2 雷诺数判别多孔介质中水流状态

Fig. 2 Division of state of water flowing in porous media according to Reynolds

盐湖晶间卤水的运动缓慢,为层流运动,卤水运动规律适用达西层流理论来研究。于升松等(2000)在青海察尔汗盐湖研究中,通过实验也证实了晶间卤水运动符合达西定律。

2 罗布泊晶间卤水动力学特征

罗布泊晶间卤水动力学特征,主要从卤水循环速率、卤水渗流方向和渗透流速及实际流速等方面来论述。

2.1 地层卤水的循环速率

在罗北凹地中北部的 ZK1200B 孔(图 3)中采用定深抽水取样的方法,取得卤水 ^{14}C 年龄样品 3 件,取样深度分别为 8.0 m、10.5 m 和 16.5 m。测试数据及求得的地下水年龄列入表 1。

由表 1 可见,尽管 ZK1200B 孔 2 个样品年龄出现倒置,但深 8 m 和 17 m 地层卤水年龄平均 2 900 a,即卤水的周转周期约为 3 000 a,要比地层年龄(10 000 a 以上)小,说明近 3 000 a 来,罗北凹地地下卤水运动活跃,不断受到外来水的补给,出现‘更新替代’现象。这种‘更新替代’过程应当是造成晶间卤水与储卤盐层之间发生盐溶-盐析物理化学作

表 1 罗北凹地卤水¹⁴C 年龄

Table 1 Ages of ¹⁴C-dating of brine in Luobei depression

样品编号	h/m	实验室编号	现代碳百分数及误差/%	样品年代及误差/Ma	δ ¹³ C/‰
ZK1200B-观 1 孔	17	DS-98016	74.4732±3.3	2440±365	-9.44
ZK1200B-观 1 孔	8	DS-98017	61.5083±1.55	4020±210	-13.5
ZK1200B	10.5	DS-98036	75.3246±2.99	2340±330	—

注：由国土资源部环境地质开放研究实验室分析。

用及孔隙发育的重要机制。

2.2 潜卤层卤水运动方向和渗流速度

笔者 1997 年采用人工放射性同位素技术的应用研究成果^①阐述了罗北凹地卤水运动特征。罗北凹地 29 个钻孔流向测定结果(图 3)表明：潜卤水流向以 ZK0000 孔为界，大致分为南北 2 个区域，

ZK0400 孔以北潜卤水主要渗流方向为向北和西北流动，ZK0000 至 ZK0300 孔一带潜卤水向东和南东径流。由此可见，在穿过 ZK0000 孔的横勘探线一带存在潜卤水的分水岭。由图 3 还可以看出，罗北凹地钾矿区北部边界的东部、西部边界的中部和东部边界的中北部为补给边界。

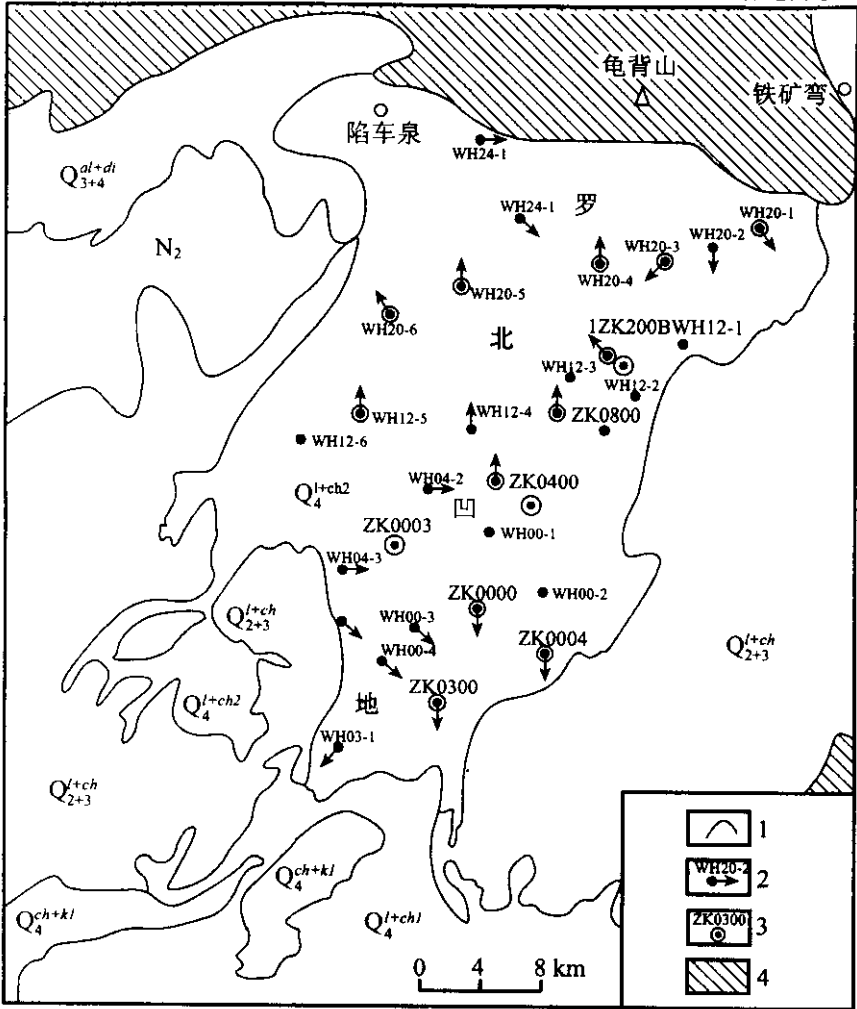


图 3 罗北凹地浅层卤水渗流方向图

Fig. 3 The flowing directions of shallow-buried brine in Luobei depression
1-地质界线 2-地下水流向 3-测孔位置 4-基岩 ZK0000 钻孔坐标 北纬 40°41'28",90°57'34"
1-geological boundary line 2-flowing direction of underground water 3-location of borehole 4-bed rock ;
coordinate of drill hole ZK0000 40°41'28"N,90°57'34"E

①中国地质科学院地质研究所等. 2000. 罗布泊地区钾盐资源开发利用研究报告.

渗流速度的测量结果表明,罗北凹地潜卤水流动缓慢,渗透流速大多小于 0.2 m/d (占 89.7%),渗透流速南低北高,ZK0400 孔以南平均值为 0.040 m/d ,ZK0800 孔以北(约 800 km^2)平均值为 0.108 m/d ,且沿纵勘探线从 ZK0000 孔往北渗流速度逐渐增大。渗透流速值随深度变化明显,多呈现双峰及多峰态势,渗透流速峰值均出现于孔隙发育的中粗晶石膏岩及钙芒硝岩层内,反映出湖相沉积物岩性、结构上的垂向变化,即主要反映出地下水动力学特征在垂向分布上的不均匀性。

2.3 浅坑化学示踪试验研究成果

化学示踪法是水文地质研究中测定地下水流向和实际流速的较经典的手段。1996~1997 年,在罗北凹地开展了多组人工化学示踪试验,取得了宝贵的资料和研究成果。罗北凹地北部 2 个浅坑组化学示踪试验,确定出地下水流向为 210° 和 60° ,实际平均流速分别为 6.5 m/d 和 11.2 m/d 。

综上所述,罗北凹地卤水尽管运动缓慢,但始终处于交替和流动的状态,这种流动性为含盐系或储卤层的埋藏、成岩变化提供了重要地质营力。致使钙芒硝矿物发生重结晶、交代及溶蚀等作用,并在钙芒硝岩内形成大量蜂窝状孔隙^①。

3 罗布泊晶间卤水运动机理分析

罗北凹地地下水处于不停的流动状态,经分析

研究认为,地下卤水运动的动力主要有 5 种方式。

3.1 新构造活动的水动力学意义

(1)盆地的差异性升降作用 根据地层对比分析显示(王弼力,2001),罗北凹地的沉降中心位于其北部,在第四纪期间不断下沉,因而,罗北凹地长期以来就形成了‘南高北低’的地势格局,也就造成了一定的水力坡度,大部分晶间卤水在此水力坡度的‘驱动’下处于流动状态。

(2)断裂作用 在盆地内及其周边新构造活动形成的断裂构造直接改变了不同含水层之间的水力联系,如断裂构造可能成为盆地深部水(油田水)补给浅层水的通道,边部断裂则能改变干盐湖盆地的边界条件,从而导致了卤水的流场改变。

3.2 古气候变化的水动力

第四纪期间,古气候周期性波动频繁,受古气候波动的影响,罗布泊湖水位也经历频繁的涨落变化,卫星影像图上的‘大耳朵’影象就是古湖水位变化留下的环状古湖岸痕迹。由于自晚更新世以来,罗北凹地已从罗布泊大湖区中分隔出来,在古湖水的上升期,罗北凹地就受到来自罗布泊大湖水的充分补给(图 4),低水位期间补给减少、甚至中断(刘成林等,1999)。如此过程周而复始,反复进行,这也是造成罗北凹地盐层中晶间卤水不断运动的主要机理之一。

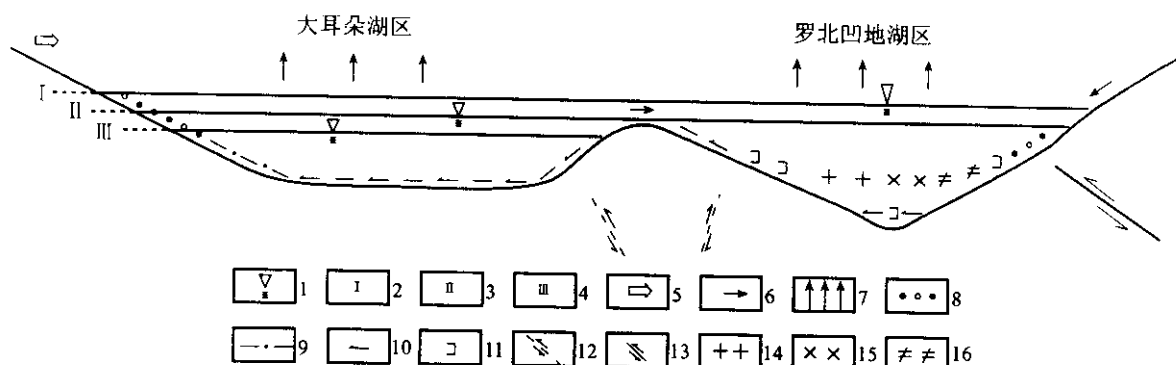


图 4 古气候变化对罗北凹地晶间卤水水流的影响

Fig. 4 The impact of climate changes on the flow of inter-crystal brine in Luobei depression

1-湖水水位标记 2-丰水期水位 3-正常水位 4-枯水期水位 5-河流水补给 6-山区径流补给 7-蒸发作用 8-冲洪积砂砾;

9-粉砂粘土 10-石膏 11-钙芒硝 12-推测断层 13-断层 14-石盐 15-杂卤石 16-钠镁矾

1-lake water level label 2-high water level 3-normal water level 4-lower water level 5-river alimentation;

6-run-off of mountainous area 7-evaporation 8-diluvial and alluvial sediments 9-silty clay 10-gypsum 11-glauberite;

12-the inferred fault 13-fault 14-halite 15-polyhalite 16-loewite

3.3 罗北凹地周边地下补给水的水动力

罗北凹地地势低洼,其东、西两侧为台地,北部与龟北山相接。东、西两侧及龟北山低山区的地下水位高于罗北凹地卤水水位,形成侧向径流补给,人工放射性同位素技术的应用研究成果、环境氡同位素的示踪结果及元素地球化学分析(王弼力等,2001)证实了侧向径流补给带的存在。

3.4 大气降水补给及陆面蒸发作用的水动力

罗布泊地区气候异常干旱,多年平均降水量只有 23.1 mm(1953~1988 年)^①,但降水多为暴雨。据资料记载(林振耀等,1992),若羌站在 1981 年 7 月至 1988 年 7 月,发生了两场罕见的大暴雨。1981 年的大暴雨,在短短十几个小时内,降水量达到 73.5 mm;1988 年 7 月的大暴雨,在二十多个小时内降水量达 48.2 mm。这样的大暴雨,对极端干旱气候区地下水的补给意义重大。笔者在 1996 和 1997 年野外勘查期间(9~12 月),罗北凹地均有两次以上的降雨(雪)过程,尤其是 1997 年 11 月 24 日的降雪量较大,可见到融雪水沿地表向溶隙运移,对潜卤水能形成有效补给。大气降水的补给导致浅部盐层的溶蚀,继而对晶间卤水成分与水动力条件产生影响。

此外,在雨季或丰水年,山区(或台地)形成的洪流也能直接补给罗北凹地卤水,从而驱动地下卤水流动。

同理,陆面蒸发作用也是导致卤水垂向运动的主要驱动力之一。罗布泊地区气候干旱,陆面蒸发作用是该区地下水排泄的唯一途径。潜卤水的强烈蒸发,使表层卤水盐度增高,比重增大。较重的表层卤水向下运移,导致了潜卤水的垂向交替运动。

3.5 深部地层水补给的水动力

罗布泊地区新构造活动强烈,在静压力和构造运动双重因素作用下,深部地层水(包括油田水)可能在塔里木盆地低压带及构造活动带溢出补给罗北凹地晶间卤水。最近 2 年来,笔者在罗布泊干盐湖地表发现许多地下流体上升的通道口或泥火山口,进一步证实了深部地层水的补给是存在的。地层水的补给形成向上的或侧向的动力,导致晶间卤水的垂向交替和侧向流动。

综上所述,罗布泊盐湖晶间卤水的运动受该区气候、地形地貌和构造活动等的控制,对晶间卤水运动的制约作用主要表现为对晶间卤水补给条件的控制及‘施加’驱动力。图 5 表示了这些作用因素与晶间卤水运动特征的关系。

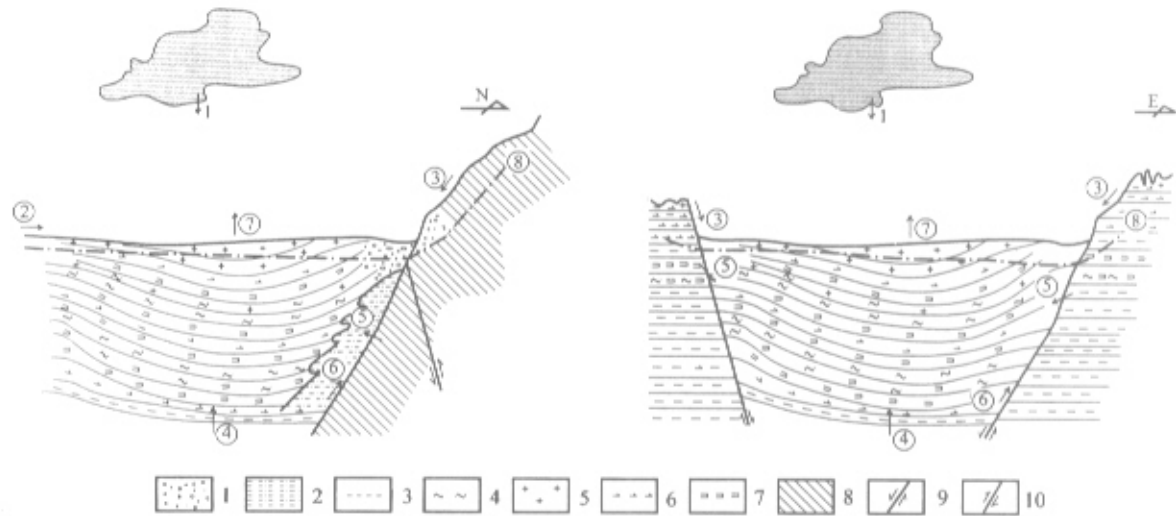


图 5 罗布泊罗北凹地盐湖晶间卤水运动模式示意图

Fig. 5 Sketch map of model of inter-crystal brine movement in Luobei depression, Lop Nur

- ①-干盐湖区的大气降水;②-丰水期南部湖水的补给;③-坡流;④-深部地层水补给;
⑤-侧向潜流补给;⑥-沿断裂带运移的深部水;⑦-陆面蒸发作用;⑧-潜水
1-砂砾石 2-粉砂 3-粘土 4-淤泥 5-石盐 6-石膏 7-钙芒硝 8-基岩 9-逆断层 10-正断层
①-precipitated water;②-the alimentation of lake water from the southern Lop Nur during high water level period;③-run-off on surface;④-the alimentation of water from the deeply-located strata of the basin;⑤-the alimentation of lateral underground run-off;⑥-the deeply-located water rising along faults;⑦-evaporation;⑧-potential water;⑨-thrust fault;⑩-normal fault

①引用若羌县数据。

由图 5 可见,罗布泊盐湖晶间卤水主要从地下水和大气降水演化而来。主要有 3 个来源:①来源于大气降水起源的当地或区域地下水系统,现代大气降水包括了汇水盆地内的雨水、雪水、河水及所有地表水流;②来源于盆地碎屑及盐类沉积物中的同生沉积水;③盆地深部油田水的补给。这些补给水对晶间卤水运动的控制作用在不同部位、不同时间存在较大差别,例如构造运动、古气候变化可能在区域上较长期内控制水运动格局,而现代降水、深部地层水可能对晶间卤水运动的作用范围有限、作用时间较短。

在时间上,各种因素在不同时期对水运动的控制作用也存在很大差异,某一时期水的运动可能主要受某一种或两种因素的制约。总之,罗布泊罗北凹地盐湖已经死亡,但其中的晶间卤水仍处于“活动”状态,卤水运动特征是所有水动力作用因素的综合体现。这个认识,不仅有助于深入研究储卤层成岩作用机理,更对该卤水钾矿的开采具有重要的实际意义。

参 考 文 献

- 刘成林,王弼力. 1999. 罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用. 地球学报, 20(增刊): 264~270.
- 李文鹏,刘振英. 1996. 察尔汗盐湖溶解驱动开采钾盐的数值模型研究. 见 盐湖资源环境与全球变化. 北京: 地质出版社, 70~85.
- 李润民. 1992. 察尔汗盐湖石盐晶间卤水钾矿在开采中水动力条件研究. 化工地质, 14(2): 33~40.
- 林振耀,郑度. 1992. 新疆塔里木盆地东缘水汽输送探讨. 干旱区研究, 9(2): 1~6.
- 薛禹群主编. 1986. 地下水动力学原理. 北京: 地质出版社, 2~20.
- 姚德良,李新. 1998. 塔里木盆地绿洲农田土壤水盐运动动力学模式研究. 干旱区地理, 21(1): 10~17.
- 于升松等. 2000. 察尔汗盐湖首采区钾卤水动态及其预测. 北京: 科学出版社, 142~143.

- 王弼力,刘成林,焦鹏程等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源. 北京: 地质出版社, 33~37, 105~119.

References

- Duffy C J, Al-Hassan S. 1988. Groundwater circulation in a closed desert basin: Topographic scaling and climatic forcing. Water Resources Research, 24: 1675~1688.
- Hardie L A. 1990. The role of rifting and hydrothermal CaCl_2 brines in the origin of potash evaporites. An Hypothesis. American Journal of Science, 290: 43~106.
- Li Runmin. 1992. Study on the conditions of dynamics of underground water in the inter-crystal brine potash deposits of Qarhan salt lake. Geology of Chemical Minerals, 14(2): 33~40 (in Chinese).
- Li Wenpeng, Liu Zhenying. 1996. The numerical modelling of dissolving and driving exploitation of potassium salt in Qarhan salt lake. Saline Lake Resources, Environment and Global changes published. Beijing: Geological Publishing House, 70~85 (in Chinese).
- Lin Zhenyao, Zheng Du. 1992. A probe to the transport of water vapour in the eastern edge of Tarim Basin. Arid Land Geography, 9(2): 1~6 (in Chinese).
- Liu Chenglin, Wang Mili. 1999. Evolution of Quaternary depositional environments and Forming of potash deposits in Lop lake, Xinjiang, China. Acta Geoscientia Sinica, 20 (Sup.): 264~270 (in Chinese with English abstract).
- Rosen M R. 1994. The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. Geological Society of America Special Paper, 289: 1~18.
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng et al. 2001. Salt lake potash resource of Lop Nur, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 33~37, 105~119 (in Chinese with English abstract).
- Xue Yuqun et al. 1986. Principal of dynamics of underground water. Beijing: Geological Publishing House, 2~20 (in Chinese).
- Yao Deliang, Li Xin. 1998. Study on mechanical model of water-salt movement in soil of oasis cropland in Tarim basin. Arid Land Geography, 21(1): 10~17 (in Chinese).
- Yu Shengsong et al. 2000. Variation and prediction of brine in the first-exploiting area of Qarhan salt lake. Beijing: Science Publication House, 142~143 (in Chinese with English abstract).