

环境温度对盐湖卤水化学组成及 储卤层渗透性变化的制约

袁小龙^{1,2,3)}, 张西营^{1,2)}, 盛金昌³⁾, 高东林^{1,2)}, 李斌凯^{1,2)}, 都永生^{1,2)}, 万维汉⁴⁾

- 1) 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 西宁, 810008;
2) 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁, 810008;
3) 河海大学水利水电学院, 南京, 210098; 4) 滨地钾肥有限责任公司, 青海海西州, 817000

内容提要:柴达木盆地昆特依盐湖浅部储卤层是一个多场耦合的动态平衡系统,受到水动力、气候、化学等多种因素控制。本文对昆特依盐湖浅部储卤层不同季节(夏季和冬季)卤水组成和储卤层渗透性特征进行了分析研究。结果表明:卤水中的主要离子含量从夏季到冬季发生了明显的变化,其中,K、Mg、Ca、Cl 的含量都相应增加,增加幅度为:Cl、Mg、K、Ca;而 SO_4^{2-} 和 Na 的含量却均有下降,且 SO_4^{2-} 下降更显著;抽水试验计算结果发现,从夏季到冬季,钻孔 ZK08 渗透系数 K 由 178m/d 降至 97m/d。本文研究表明,随着环境温度的降低,芒硝(Na_2SO_4)从卤水中结晶析出,是以上现象发生的主要原因,随着芒硝的析出,促进了含 K、Mg、Ca 等硫酸盐矿物(杂卤石)的溶解,使得卤水中 K、Mg、Ca 浓度增加;另一方面,析出的芒硝一定程度上堵塞了储卤层的孔隙,卤水的粘度也因温度降低而增加,这两个因素共同作用降低了储卤层渗透性。

关键词:昆特依干盐湖;环境温度;储卤层渗透性;卤水化学组成;固液转化

温度是含水层系统变化的一个重要因素,不仅会影响流体的粘度和密度,还会影响化学反应速率,从而触发了含水层系统中包括化学过程、溶质传输以及流体流动之间的多种耦合关系(Andre et al., 2005; Chaudhuri et al., 2013; Sandeep et al., 2016)。饱和多孔介质的渗流—溶解问题可以看成是一个耦合的非线性问题,包括孔隙演化、流体流动、溶质反应传输等(Zhao Chongbin et al., 2013)。渗流流体与孔隙介质的反应会导致含水层孔隙结构及渗透特性的改变(Chadam et al., 1991; Chen Juisheng et al., 2002; Kang Qinjun et al., 2008)。盐湖储卤层系统中水—盐作用自盐湖资源开发肇始就受到了广泛关注(Wang Wenxiang et al., 2010; Zhang Xiying et al., 2007; Zheng Xiuqing et al., 1994; Liu Zhu et al., 2015; Li Baolan et al., 2014; Zhang Yan et al., 2017)。盐湖沉积中胶结松散的盐层(储卤层)是一种典型的多孔介质,其孔隙结构的形成多由盐类溶解所致,富钾卤水主要赋存于盐层原生及溶融微孔之中,储卤层孔隙率及渗

透率在空间上存在极强的非均匀性(Wang Mili et al., 1991, 1997)。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,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,势必会改变储卤层特征(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(Jiao Pengcheng et al., 2003)。Liu Chenglin et al. (2002)利用类比法对罗布泊第四纪卤水钾矿储层孔隙进行了成因及储集机制研究,并将储卤孔隙划分为原生晶间孔隙、准原生晶间孔隙和次生孔隙,揭示了钙芒硝矿物结构及溶蚀作用对钙芒硝岩孔隙发育具有重要贡献。Zheng Xiuqing et al. (1994)通过对室内模拟试验、同位素示踪以及抽水试验数据研究分析,发现储卤层渗透系数在平面上和剖面上具有非均质性和各向异性的特点,在受到开采影响较大的区域,其渗透系数不再是常数,而是受到各种因素控制的变数。Weisbrod et al. (2012)研究发现,溶解通道的形成受到石盐自身的性质、内部结构非均质性、流体流速、卤水比重

注:本文为西部之光项目“柴达木盆地杂卤石矿层储集性能评价及最佳溶采区”、国家自然科学基金面上项目(编号 41672087, 51579078, 51679070)和国家重点基础研究发展计划项目(编号 2017YFC1502600)资助的成果。
收稿日期:2017-12-22;改回日期:2018-04-16;责任编辑:黄敏。
作者简介:袁小龙,男,1984 年生,助理研究员,主要研究方向为水文地质学。Email: xiaolongy@isl.ac.cn。

的影响,当卤水流速低于临界流速,溶液析盐导致通道堵塞使得卤水处于停滞状态,而且卤水密度在垂直方向上的差异性导致卤水向上溶解石盐,最终形成“帽子”溶腔。温度的改变引起新的水—盐作用,将改变含水层结构和水化学成分,例如反应表面减小,新的渗流通道的形成,水的物理化学特征变化等(Chen Juisheng et al., 2002)。储卤层孔隙卤水作为盐类物质搬运的介质、成盐作用的桥梁以及物源和聚集区在蒸发盐盆地中起着重要的意义(Spencer, 1992)。弄清内部化学反应、储卤层结构变化以及流体运移特性,对于更好的预测卤水在储卤层中的行为以及整个储卤层系统的时空演化都是非常必要的。

目前,关于盐湖区储卤层系统(孔隙结构、渗透性、卤水化学组分等)受到温度改变的影响方面的详细研究还没有见诸报道。因此,本文以柴达木盆地昆特依盐湖为实例,通过野外实际观测获得的不同环境温度下潜储卤层渗透特征及卤水化学分析结果,尝试探讨环境温度对潜储卤层结构及赋存卤水化学组成的影响。

1 气候、构造与地层背景

昆特依盐湖位于柴达木盆地北部(图 1),北部与阿尔金山相邻,西部、南部和东部为俄博梁 I 号构造、葫芦山构造和冷湖构造带。由于青藏高原区域性构造隆升,早更新世晚期昆特依盆地逐渐从统一的柴达木盆地中分隔出来(Zhang Pengxi et al., 1987),中更新世以来,在强烈的蒸发作用下湖水不断浓缩,形成了完全封闭的盐盆地并沉积了大量蒸发盐沉积并赋存高矿化度卤水,距今约 3 万年左右已基本成为干盐湖(Han Fengqing et al., 1995; Wang Mili et al., 1997; Wang Jiuyi et al., 2012)。盆内沉积了一套以石盐为主、局部含杂卤石、石膏和芒硝的碎屑—蒸发盐沉积序列。研究区潜储卤层(以 ZK3608 钻孔为例)主要盐类矿物为石盐,含盐量一般大于 70%(图 2)。石盐矿物多为半自形,粒状,巨晶、中晶,部分石盐晶体受到溶蚀,呈孔洞状(图 3a),其内充填有杂卤石、芒硝及碎屑矿物。芒硝多为粒状细—中晶,其溶解度受温度影响较大,冬季以块状透明晶体($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)析出(图 3b)。储层中还存在一定量的杂卤石矿物,集合体一般呈纤维状、毛毡状(图 3c),分布于石盐晶体间,局部为层状。石膏主要以半透明、透明菱面体半自形晶散布于石盐及粘土颗粒中(图 3d)。储卤层中

的碎屑物质是盐类沉积过程中在相对淡化时期被带入的外源物质,含量为 2.54%~26.16%,主要为石英,含有少量钠长石、绿泥石和白云母等,一般充填于石盐晶间或附着于各种盐类矿物中。

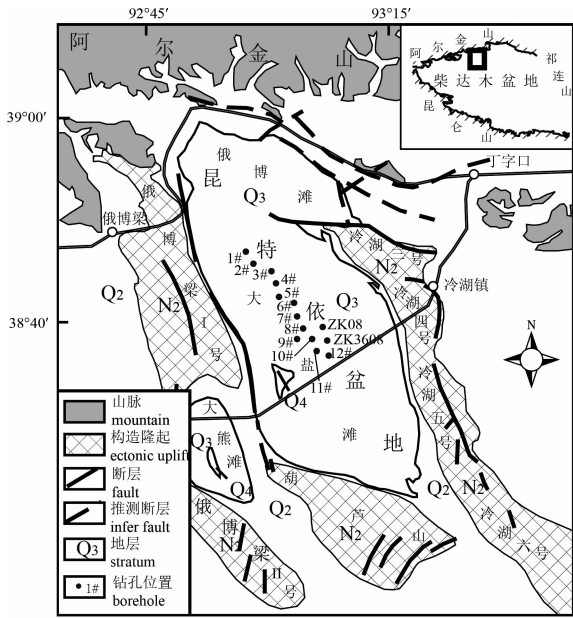


图 1 昆特依盐湖地质简图及钻孔位置
Fig. 1 Map of the natural geology and sampling sites in Kuntayi playa

昆特依盐湖为一个封闭的干盐湖,周边没有地表水汇入,由于极小的年降雨量以及超强的地面蒸发作用,使得大气降水补给微弱。因此,山区的降水和冰雪融水可能是补给地下卤水的主要来源。根据冷湖镇气象站观测资料,研究区平均年降水量为 15.7 mm,年均潜在蒸发量达到 3096 mm,年均温度为 2.7℃,一年中最低气温出现在一月份,平均气温为 -15℃;一年中最高气温在六、七月份左右出现,平均气温为 15~17℃,最高气温达 30℃以上。盐湖区为盐滩平原,其表面为坚硬的盐壳,无植被发育,盐壳下储存着丰富的卤水资源。盐湖储存的卤水为第四系盐类晶间水,其储存介质以石盐为主,胶结程度差,储卤层晶间孔隙、溶洞孔隙较发育,为卤水的储存提供了良好的空间。近年来,由于持续采卤活动,矿区地下卤水水位发生了不同程度的下降,最浅水位由 1997 年报道的地表以下 0.76 m 下降至 2016 年的 1.56 m,而这一水位值低于研究区卤水蒸发临界值 1.32 m(Wang Mili et al., 1997)。因此,除了工业开采外,现阶段的地下卤水几乎不参与自然界的水循环,蒸发作用对这些卤水的变化微乎其微。在潜储卤层,孔隙度在北部、西西南部低,多

在 20% 以下,最低为 10%,而在东、东南部则较高,多在 20% 以上,最大为 34% (Wang Mili et al., 1997)。

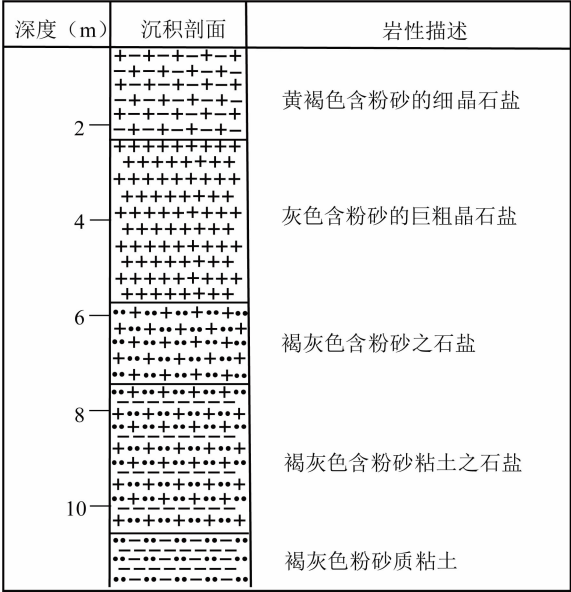


图 2 昆特依盐湖 ZK3608 钻孔浅部岩性示意图
Fig. 2 Indicative lithology column of ZK3608 borehole in Kunteyi playa

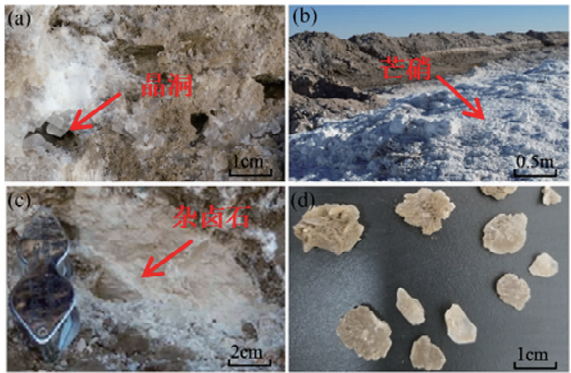


图 3 昆特依盐湖储卤层中的蒸发盐矿物
Fig. 3 Four kinds of evaporites in Kunteyi playa
(a)—石盐及晶洞; (b)—芒硝; (c)—杂卤石; (d)—石膏
(a)—Halite & crystal hole; (b)—mirabilite;
(c)—polyhalite; (d)—gypsum

2 样品与试验方法

2.1 样品采集与分析

卤水样品采集于昆特依盐湖大盐滩矿区的 12 个潜水钻孔(1#~12#)(图 1),每个样品采集于静止水位以下 10cm,采集时间分别为 2015 年 7 月 15~18 日(水温~13℃)和 2016 年 1 月 3~6 日(水温~2℃),各 12 件。卤水样品采集后,用聚乙烯塑料采样瓶密封后尽快送至实验室进行水化学分析。利

用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)对卤水样品中的 K、Ca、Mg、SO₄²⁻ 等进行测试,各组分的检测限如下:SO₄²⁻<0.1mg/L;K、Mg≤0.01mg/L;Ca≤0.001mg/L。Cl 用化学滴定法进行分析,误差小于 2%;Na 通过差减法获得。所有分析测试工作均在中国科学院青海盐湖研究所盐湖化学分析测试中心完成。

2.2 储卤层渗透性测定

为了评价气候变化对含水层渗透性特征的影响,笔者分别于 2013 年 7 月和 2014 年 1 月对研究区水文钻孔 ZK08(图 1)进行了单孔稳定流抽水试验。在抽水试验之前,均进行了试抽水,之后采用了单井抽水试验,试验分为抽水阶段和水位恢复阶段。抽水过程中当涌水量和水位降深保持至少 4 小时不变时,结束抽水;停止抽水后立即进行水位恢复观测,以恢复水位到达静止水位时作为抽水试验结束的标志。

根据研究区特定的水文地质条件,依据无界不带观测孔的稳定抽水处理方法,假设含水层为均质各向同性、无界无越流、隔水顶、底板及抽水前静止水位呈水平状,抽水孔为完整孔。本文依据势函数叠加原理,利用无界含水层单孔稳定抽水试验水位恢复资料求取储卤层渗透系数,即,整个抽水试验过程可以看成是稳定抽水过程和非稳定注水过程这两个相反过程的叠加(Nie Qinglin et al., 2009; Shi Zhongping, 2000)。对于稳定抽水过程和非稳定注水过程见公式(1)~(2),公式(3)为两个过程的叠加:

稳定抽水过程:

$$s_0 = \frac{0.366Q_0}{KH_0} \lg \frac{R_0}{r} \tag{1}$$

非稳定注水过程:

$$s_i = \frac{0.183Q_0}{KH_0} \lg \frac{2.25KH_0 t_i}{r^2 \mu} \tag{2}$$

水位恢复过程:

$$s_r = s_0 - s_i = \frac{0.183Q_0}{KH_0} \lg \frac{R_0^2 \mu}{2.25KH_0 t_i} \tag{3}$$

根据水位恢复资料绘制 s_r - $\lg t$ 散点图,拟合直线,求取直线斜率 i_i ,根据式(4)求取渗透系数 K 值。

$$K = \frac{0.183Q_0}{i_i H_0} \tag{4}$$

式中: s_0 为稳定水位降深/m; s_i 为水位回升值/m; s_r 为剩余降深/m; Q_0 为稳定涌水量/(m³·d⁻¹); H_0 为含水层厚度/m; R_0 为影响半径/m; μ 为给水

度; r 为井半径/m; t_i 为从停止抽水开始计起的对应于 s_i 的水位恢复时间/min。

3 试验结果及分析

3.1 环境温度对卤水化学组成的影响

卤水样品主要化学组分见表 1。可以看出,所有卤水样中 Cl、Na 含量最高,其次为 SO_4^{2-} 、K 和 Mg 的含量低且在区域上的变化幅度比较大,Ca 的含量最低,最高不超过 0.5 g/L。夏季卤水的总溶解性固体(TDS)变化为 333.95 g/L~350.49 g/L,平均值为 342.61 g/L;冬季为 326.20~348.52 g/L,平均值为 333.83 g/L,冬季卤水浓度较夏季略有降

低。阴离子中,夏季卤水中 Cl 的平均值为 180.36 g/L,而冬季的平均值为 187.18 g/L,明显高于夏季; SO_4^{2-} 的浓度呈现出来明显的季节性变化,夏季卤水中 SO_4^{2-} 浓度平均值为 33.12 g/L,而冬季则为 19.93 g/L,夏季明显高于冬季。阳离子中,夏季卤水中 Na 浓度(平均值为 117.36 g/L)比冬季(平均值 112.56 g/L)略有降低。与 Na 相反,Ca 浓度呈现明显增加趋势,夏季卤水中 Ca 的平均值为 0.22 g/L,而冬季则明显升高为 0.35 g/L。卤水中 K 和 Mg 的变化幅度不大且具有相似的变化趋势,冬季 K 和 Mg 的浓度要稍高于夏季,从夏季到冬季二者的浓度均稍有增加(图 4)。

表 1 研究区不同季节浅部卤水主要成分浓度(g/L)及取样温度(℃)

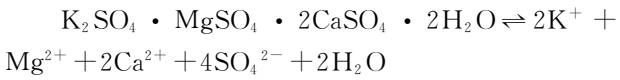
Table 1 Major ions in shallow brine from different temperature in two different seasons									
		Cl	SO_4^{2-}	K	Mg	Ca	Na	TDS	T
2015 年 7 月(夏)	最小值	176.13	21.81	1.58	1.97	0.10	97.92	333.95	12.2
	最大值	183.69	45.28	10.83	16.06	0.32	131.08	350.39	15.6
	平均值	180.36	33.12	5.07	6.48	0.22	117.36	342.61	13.5
2016 年 1 月(冬)	最小值	181.45	10.96	2.17	2.22	0.25	98.77	326.20	1.4
	最大值	190.01	39.32	12.31	16.71	0.50	121.82	348.52	3.7
	平均值	187.18	19.93	6.22	7.59	0.35	112.56	333.83	2.6

水化学分析表明,卤水中主要离子浓度从夏季到冬季发生了不同程度的变化。这些变化的离子中,以 SO_4^{2-} 浓度变化最显著,其降幅达 40 %。在冬季,由于芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)是低温环境下才析出的冷相盐类矿物(Zheng Mianping et al., 2010a),温度的降低必然会导致卤水中芒硝矿物的大量析出,这种现象在研究区普遍存在(图 3b)。理论上,受到芒硝大量析出的影响,卤水中的 Na 浓度降低幅度与 SO_4^{2-} 浓度降低幅度之比大约为 1 : 2,但实际分析结果表明,卤水中的 Na 的降幅仅为 4 %左右,说明受到其他钠盐矿物(NaCl)的溶解弥补了卤水中 Na 离子的损失。而冬季卤水中 Cl 离子浓度显著增加,进一步说明因芒硝析出导致 Na 损失的量受到了含 Na 矿物(如 NaCl)溶解的补充。随着环境温度降低,发生了明显的溶解—沉淀作用,即芒硝矿物析出,石盐矿物溶解。

与芒硝矿物类似,软钾镁矾、白钠镁矾等矿物也是盐湖中常见的冷相矿物,会因环境温度降低而析出。根据这一推论,在冬季时,卤水中的 K、Mg 离子浓度将因此类矿物的析出而浓度降低,而这一推论与实际分析结果相违背,说明可以忽略这一因素对 K、Mg 离子浓度的影响。

卤水中 K、Mg 离子浓度在冬季表现出增加趋势可能与芒硝析出带出结晶水有关;另一方面,杂卤

石的溶解可能是诱发 K、Mg 离子浓度变化的另一个原因。杂卤石($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)是一种水溶性较小的复盐,在溶液中存在如下溶解平衡:



前期研究发现,储卤层孔隙中存在一定量的杂卤石矿物,并在局部层位富集。蒸发试验研究表明(Zhu Jianrong et al., 2011),氯化钾和光卤石等含钾矿物在原始卤水中是极度不饱和的,因此可以认为 K、Mg 离子浓度增加与此类矿物溶解无关。杂卤石是我们在矿物分析中发现的大量存在于石盐粒晶间及淤泥或粘土层中的含钾、镁矿物(Liu Zhu et al., 2015),它是一种微溶含钾矿物(An Lianying et al., 2009),在晶间卤水—含杂卤石的储卤层系统中,卤水受到芒硝析出的影响,整个水—盐不再处于平衡状态,一定量的杂卤石发生溶解,导致卤水中 K、Mg、Ca 离子浓度呈微弱增加趋势。溶解作用的结果会导致卤水中 K、Mg、Ca 和 SO_4^{2-} 的增加,但增加幅度显然很有限。少量杂卤石的溶解对于 K、Mg、 SO_4^{2-} 等常量离子来说,几乎不会改变它们在卤水中的总体分布,因此,K 和 Mg 在冬季和夏季的含量并没有重要的变化,而因芒硝大量析出导致大量的 SO_4^{2-} 损耗也不会因此而有重要补益。但对于

卤水中含量本来就很少的 Ca 来说,杂卤石的微量溶解则会导致该离子变化特征明显,导致冬季时 Ca 离子的含量明显要高于夏季。研究区蒸发试验及相图结果表明,卤水在蒸发大约 36% H₂O 后将析出软钾镁矾、白钠镁矾、泻利盐以及氯化钾等钾混盐矿物,而在蒸发掉 54% 重量的水之后才开始析出光卤石矿物(Zhu Jianrong et al., 2011),因此,原始卤水中 K 和 Mg 远未达到饱和状态。

进一步分析发现,卤水的化学组成在空间上也存在差异性。研究区北部(1#, 2#)和南部(8#~12#)卤水主要成分随季节变化幅度较小,而中部(3#~7#)卤水主要成分随季节变化更明显(图 4)。中部钻孔所在位置正好也是研究区沉积中心,而浅部卤水水位具有由沉积中心往边缘逐渐变低的特

点,说明边缘较低水位的卤水可能受到季节温度变化影响的程度较小,表现在卤水主要成分变化上,其幅度也相应较小。另一方面,工业开采抽卤使得中部卤水受到强烈的扰动,促使卤水与储卤层之间发生明显的固-液转化作用,受到温度因素的影响明显;矿区边缘卤水受到扰动相对较小,卤水与储层之间接近平衡状态,因而卤水成分变化也较小。

3.2 环境温度对储卤层的影响

盐类储卤层与碎屑储层的差别主要在于二者的孔隙结构特征的差异性和储层介质溶解的差异性。普通含水层的孔隙类型单一,水流对其改造作用甚微,具有稳定的水动力特征;盐类储卤层中石盐晶体之间的孔隙是地下卤水的主要赋存场所,是由各类孔隙(晶间孔隙、溶洞溶隙等)组成的复合体,它们对

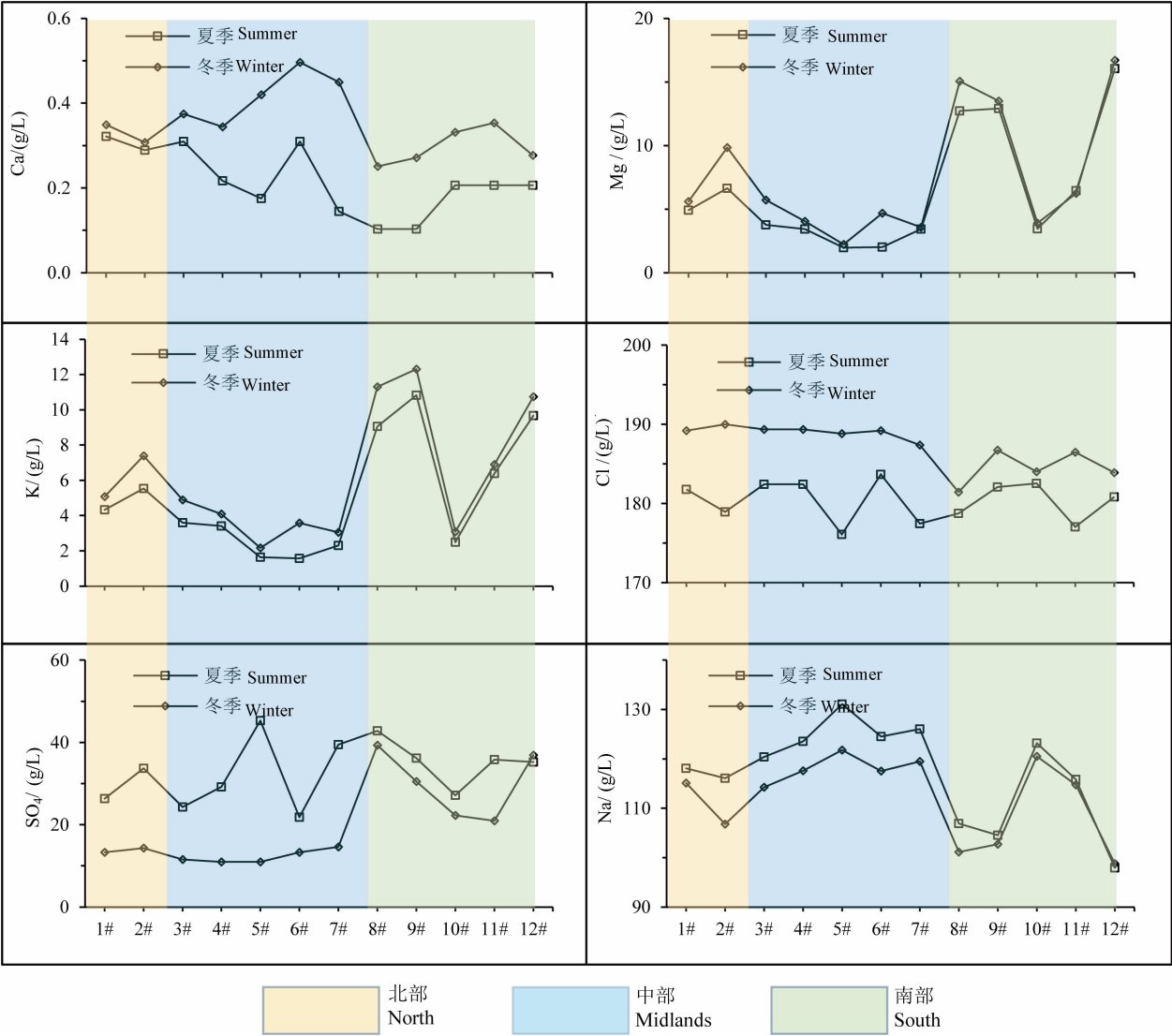


图 4 夏季和冬季储卤层卤水中主要离子含量对比

Fig. 4 Comparison of major ions in brine from the reservoir between summer and winter

卤水的动态有着不同的贡献,但其渗透性及连通性因石盐晶体大小及压实程度不同而相差较大,渗透性较强、连通性较好的储层在地下卤水运动中起主要的储水和导水作用。碎屑岩中常常发育裂隙而成为流体储藏空间,而蒸发岩也出现断裂及裂隙,但其有塑性强\自愈合功能的特点,一般不具储集性能。盐湖储卤层具有极强的溶解性,这就使得卤水对其结构具有极强的改造作用,并且容易受到外界因素的影响;而普通含水层结构及渗透性受到外界影响相对微弱。

由试验结果可以看出(表 2),2014 年 1 月份(冬季)抽水试验测得的渗透系数(78.65m/d)明显低于 2013 年 7 月份(夏季)(134.50 m/d)。结果表明,随着环境温度逐渐降低,储卤层的孔隙尺寸变小,储层导水作用和孔隙之间连通性相对变差,储卤层的渗透性发生了明显改变。

表 2 不同季节钻孔 ZK08 渗透系数

Table 2 Hydraulic conductivity of the borehole ZK08

试验日期	渗透系数 K(m/d)
2013-07	134.50
2014-01	78.65

含水层的渗透系数的大小受到两方面因素的影响,一方面与含水层的渗透率有关,即与颗粒或孔隙的形状、大小,以及排列方式有关;另一方面,与流体的密度和粘滞性有关,有如下关系式,

$$K = k \frac{g}{\nu}$$

(5)

其中:K 为渗透系数(m/s);k 为渗透率(m²);g 为重力加速度;ν 为水的运动粘滞系数(m²/s)。

公式(5)表明,渗透系数 K 与水的黏滞系数 ν 呈反比。由于冬季卤水温度降低,导致大量芒硝析出,而析出的芒硝晶体势必导致储卤层孔隙尺寸变小甚至堵塞,从而导致储卤层的渗透率(k)降低。另一方面,温度变化直接影响流体粘滞性,流体的粘滞性(ν)随温度降低而升高(Du Guangsheng, 2014)。因此,在冬季,随着卤水温度的降低,卤水的渗透率变小而粘滞系数增加,双重因素致使含水层的渗透性(K)显著降低。总之,冬季低温环境使得储卤层卤水流动性减弱和渗透性降低。

3.3 盐类储卤层物性特征变化讨论

由于第四纪气候的干旱特征表现出周期性的变化(Kang An et al., 2003; Owen et al., 2006; Yang Yibo et al., 2013),昆特依盐湖沉积经历了多次成盐期与淡化期,使得盐湖沉积在空间上表现出

极强的不均一性;来自地表渗流及地下越流等具有较强的溶解能力的低矿化度水体的侵入溶解,使得局部储卤层孔隙发育,形成高渗区;而受到外界水体补给微弱的区域,储层水体矿化度高,溶蚀能力受限,与储卤层基本处于溶解—沉淀平衡状态,从而形成低渗区,表现为卤水浓度高、储层渗透性小的特点。这也是储卤层水平上渗透性发生突变的主要原因,受到周而复始的季节温度变化的影响,以及采卤过程与地表径流等因素共同作用下,储卤层结构特征及赋存的卤水水化学特征在空间上均表现出不均一的特点。盐类储卤层中各矿物的分布也极不均匀,以石膏为例,Picknett et al. (1976)认为离子强度效应为石膏分布不均匀的主要原因,即 CaSO₄ 的溶解度与卤水中 NaCl 的浓度有关,由于卤水中 NaCl 浓度有差异,引起石膏等矿物的溶解度不同,其浓度也有差异,由于温度等周围环境条件的改变,该类矿物的析出在时间和空间上均存在差异性。储卤层渗透性在横向和纵向的分布具有很强的非均匀性,平面渗透性强的区域亦是垂向变异最大的地段。这是盐湖储卤层渗透性区别于一般孔隙介质的一个重要特征,它反映出储卤层具有极强的非均质性和各向异性的特点。基于上述特征,卤水的化学性质也表现出空间上的非均质性。可见储卤层的结构演化与卤水物理化学过程存在着一定的相互制约关系。

由于盐湖区地下卤水系统是一个受到多种因素影响的复杂系统,环境温度作为诸多影响因子中的一个敏感因子影响着储卤层系统水—盐作用过程。关于储卤层这一特殊多孔介质结构演化的研究目前还处于定性分析阶段,而近年来发展的核磁共振技术在表征孔隙结构等资源勘探领域有着广泛的应用,逐渐成为重要的储层评价方式(Li Yading et al., 2017),因此,运用先进技术手段对盐湖储卤层孔隙结构开展定量研究,将是我们研究的一个重点方向,具有重要的科学及生产指导意义。

4 结论

(1)通过对昆特依盐类储卤层随环境温度变化的响应,初步查明了储卤层渗透性及卤水化学性质随环境温度变化特征。

(2)水化学分析表明,卤水中 Ca、Mg、K 离子浓度随环境温度降低均有不同程度的增加,而 SO₄²⁻ 和 Na 离子浓度则相对减少,这很可能与冬季芒硝的析出促使杂卤石的溶解有关。

(3)盐类储卤层渗透性随环境温度降低而发生了显著的减小,主要与冬季时芒硝的结晶及卤水粘滞性增大有关。

(4)浅部储卤层是一个复杂的动态平衡系统,温度是其重要的影响因素之一,环境温度的改变会打破原有的系统平衡而导致一系列新的固-液转化作用的发生,进而会对储卤层物理化学性质产生重要影响。

致谢:野外工作过程中得到滨地钾肥责任有限公司杜建宁总经理、张富军工程师等大力帮助和支持,研究生刘铸、张岩参加了本次野外;论文修改过程中,中国地质科学院矿产资源研究所刘成林研究员在论文修改过程中提出了很多建设性的宝贵意见。在此一并表示衷心感谢!

References

- An Lianying, Yin Huian, Tang Minglin. 2010. Feasibility study of leaching mining of deeply buried polyhalite and kinetic leaching modeling. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1690~1696 (in Chinese with English abstract).
- Andre B J, Rajaram H. 2005. Dissolution of limestone fractures by cooling waters: Early development of hypogene karst systems. *Water Resources Research*, 41(1): 2195~2208.
- Chadam J, Peirce A, Ortoleva P. 1991. Stability of Reactive Flows in Porous Media: Coupled Porosity and Viscosity Changes. *Siam Journal on Applied Mathematics*, 51(3): 684~692.
- Chaudhuri A, Rajaram H, Viswanathan H. 2013. Early-stage hypogenekarstification in a mountain hydrologic system: A coupled thermohydrochemical model incorporating buoyant convection. *Water Resources Research*, 49(9): 5880~5899.
- Chen Juisheng, Liu Chenwung. 2002. Numerical simulation of the evolution of aquifer porosity and species concentrations during reactive transport. *Computers & Geosciences*, 28(4): 485~499.
- Du Guangsheng. 2014. Engineering fluid mechanics. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 11~13(in Chinese).
- Han Fengqing, Huang Qi, Wang Kejun, Wang Huaan, Yuan Li. 1995. Study of geochemical evolution and palaeoclimatic fluctuation of Kuntayi salt lake in the Qaidam basin, Qinghai. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 502~508 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Wang Mili, Chen Yongzhi, Wang Xinmin. 2003. Characteristics and dynamic analysis of inter-crystal brine movement in the Lop Nur salt lake. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(3): 255~260(in Chinese with English abstract).
- Kang An, Zhu Xiaomin, Han Dexin, Wang Yanbin, Kang Qiang. 2003. Quaternary sporopollen assemblages and paleoclimatic fluctuation in Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 22(1): 12~15(in Chinese with English abstract).
- Kang Qinqun, Zhang Dongxiao, Chen Shiyi. 2008. Simulation of dissolution and precipitation in porous media. *Journal of Geophysical Research*, 108(B10): 10~1029.
- Lewis A. Owen, Robert C. Finkel, Ma Haizhou, Patrick L. Barnard. 2006. Late Quaternary landscape evolution in the Kunlun Mountains and Qaidam Basin, Northern Tibet: A framework for examining the links between glaciation, lake level changes and alluvial fan formation. *Quaternary International*, 154~155, 73~86.
- Li Baolan, Gao Donglin, Yuan Xiaolong, Zhang Yushu, Liu Zhu. 2014. Storage characteristics of intercrystalline brines in Kuntayi salt lake. *Journal of Salt Lake Research*, 22(2): 26~32(in Chinese with English abstract).
- Li Minghui, Yi Chaolu, Fang Xiaoming, Gao Shaopeng, Zhang Weilin. 2010. Evaporative minerals of the upper 400m sediments in a core from the Western Qaidam Basin, Tibet. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1213~1228 (in Chinese with English abstract).
- Li Yading, Yang Cheng, Feng Shun, Li Zhen. 2017. The method for studying shale pore size distribution by using nuclear magnetic resonance. *Geological Review*, 63(supp.): 119~120 (in Chinese without English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, Li Shude. 2002. Formation of pores and brine reserving mechanism of the aquifers in Quaternary potash deposits in Lop Nur Lake, Xinjiang, China. *Geological Review*, 48(4): 437~443 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhu, Gao Donglin, Li Binkai, Yuan Xiaolong, Zhang Yan, Li Baolan. 2015. Sedimentary characteristics and origin of polyhalite of Kuntay salt lake mine in Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 23(1): 30~37 (in Chinese with English abstract).
- Nie Qinglin, Gao Guangdong, Xuan Huashan, Nie Qiuyue, Nie Shizhan, Ye Qiang. 2009. Methods of determining parameters of a confined aquifer with pumping tests. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 36(4): 37~40(in Chinese with English abstract).
- Picknett R G, Bray L G, Stenner R D. 1976. The chemistry of cave waters, in T. D. Ford & C. H. D. Cullingford (eds.). *The Science of Speleology*. pp 212~266.
- Sandeep V R, Chaudhuri A, Kelkar S. 2016. Permeability and flow field evolution due to dissolution of calcite in a 3-D porous rock under geothermal gradient and through-flow. *Transport in Porous Media*, 112(1): 1~14.
- Shi Zhongping. 2000. Determining aquifer parameters by using recovery data of steady pumping test in a single borehole. *Journal of Xi'an engineering university*, 2000, 22(2): 71~74. (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiuyi, Fang Xiaomin, Appel E, Song Chunhui. 2012. Pliocene-Pleistocene Climate Change At the NE Tibetan Plateau Deduced From Lithofacies Variation In the Drill Core

SG-1, Western Qaidam Basin, China. *Journal of Sedimentary Research*, 82(12), 933~952.

Wang Mili, Li Changhua, Liu Chenglin. 1991. Microscopic pores in the brine-bearing layers in Kunteyi potash deposit with reference to sem researches. *Geology of Chemical Minerals*, 16 (1):1~9(in Chinese with English abstract).

Wang Wenxiang, Li Wenpeng, Liu Zhenying, Hao Aibing, Wang Shijun, Jiao Pengcheng. 2010. A tentative discussion on in-situ experimental liquefaction and exploitaion of low grade solid potassium resources in Qarhan salt lake. *Mineral Deposits*, 29 (4), 697~703(in Chinese with English abstract).

Weisbrod N, Alon-Mordish C, Konen E, Yechieli Y. 2012. Dynamic dissolution of halite rock during flow of diluted saline solutions. *Geophysical Research Letters*, 39 (9), L09404 ~L09410.

Wei Xinjun, Jiang Jixue. 1993. The evolution of the quaternary salt lake in the Qaidam Basin. *ActaGeologicaSinica*, 67(3), 255~265(in Chinese with English abstract).

Yang Yibo, Fang Xiaomin, Albert Galy, Erwin Appel, Li Minghui. 2013. Quaternary paleolake nutrient evolution and climatic change in the western Qaidam Basin deduced from phosphorus geochemistry record of deep drilling core SG-1. *Quaternary International*, 313~314, 156~167.

Zhao Chongbin, Hobbs, Ord. 2013. Effects of Medium Permeability Anisotropy on Chemical-Dissolution Front Instability in Fluid-Saturated Porous Media. *Transport in Porous Media*, 99(1), 119~143.

Zhang Xiyang, Ma Haizhou, Gao Donglin, Wang Tao, Yang Haizhen, Zhang Minggang. 2007. Dynamic changes of K, Li and B in hydrochemistry in brine of the mining area of Xitaijinair salt lake during the initial period of mining. *Journal of Lake Sciences*, 19(6): 727~734. (in Chinese with English abstract).

Zhang Xiangru, Fan Qishun, Wei Haicheng, Yuan Qin, Qin Zhanjie, Li Jiansen, Wang Mingxiang. 2017. Boron isotope geochemistry characteristics of carbonate in Qarhan Salt Lake, Qinghai province. *ActaGeologicaSinica*, 91(10): 2299~2308 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yan, Gao Donglin, Ren Qianhui, Li Binkai, Wang Mingxiang. 2017. Permeability of unconfined aquifer under the Dayantan mine area near the Kuntuy salt lake in the Qaidam Basin. *Arid Zone Research*, 34(1), 36~42(in Chinese with English abstract).

Zheng Mianping, Liu Xifang. 2010a. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in Qinghai-Tibet Plateau, China. *ActaGeologicaSinica*, 84 (11): 1585 ~ 1600 (in Chinese with English abstract).

Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, Qi Wen, Kong Fanjing, Nie Zhen, Jia Qinxian, Bu Lingzhong, Hou Xianhua, Wang Hailei, Zhang Zhen, Kong Weigang, Lin Yongjie. 2016. Progress and prospect of salt lake research in China. *ActaGeologicaSinica*, 90 (9): 2123 ~ 2165 (in Chinese with English abstract).

Zheng Xiuqing, Li Duo, Xie Shilian. 1994. The analysis of halite permeability in Qarhan salt lake. *Journal of Hebei College of Geology*, 17(2), 198~204(in Chinese with English abstract).

Zhu Jianrong, Zhang Zhihong, Dong Shengfa, Ma Yanfang, Zhang Yongfeng, Du Jianning. 2011. The law of precipitation of mineral salts about the brine of Kunteyi salt lake by natural evaporation and its mathematical model. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 40(4): 39~42 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

安莲英, 殷辉安, 唐明林. 2010. 溶浸开采神埋藏杂卤石可行性及溶浸动力学模拟. *地质学报*, 84(11): 1690~1696.

杜广生. 2014. 工程流体力学. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 11~13.

韩凤清, 黄麒, 王克俊, 王华安, 原力等. 1995. 柴达木盆地昆特依盐湖的地球化学演化与古气候变化. *海洋与湖沼*, 26(5): 502~508.

焦鹏程, 刘成林, 王弭力, 陈永志, 王新民. 2003. 罗布泊盐湖晶间卤水运动特征及其动力学分析. *地球学报*, 24(3): 255~260.

康安, 朱筱敏, 韩德馨, 王延斌, 康强. 2003. 柴达木盆地第四纪孢粉组合及古气候波动. *地质通报*, 22(1): 12~15.

李宝兰, 高东林, 袁小龙, 张玉淑, 刘铸. 2014. 昆特依大盐滩矿床晶间卤水的赋存特征研究. *盐湖研究*, 22(2): 26~32.

李明慧, 易朝路, 方小敏, 高少鹏, 张伟林. 2010. 柴达木西部钻孔盐类矿物及环境意义初步研究. *沉积学报*, 28(6): 1213~1228.

李亚丁, 杨成, 冯顺, 李振. 2017. 利用核磁共振研究页岩孔隙分布的方法. *地质论评*, 63(supp.): 119~120.

刘成林, 王弭力, 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. *地质论评*, 48(4): 437~443.

刘铸, 高东林, 李斌凯, 袁小龙, 张岩, 李宝兰. 2015. 柴达木盆地昆特依盐湖大盐滩矿区杂卤石沉积特征及成因浅论. *盐湖研究*, 23(1): 30~37.

聂庆林, 高广东, 轩华山, 聂秋月, 聂士展, 叶强. 2009. 抽水试验确定承压含水层参数方法探讨. *水文地质工程地质*, 36(4): 37~40.

Spencer R. 1992. 蒸发盐盆地中孔隙流体的作用. 刘成林(译). *国外矿床地质*, 2: 92~108.

石中平. 2000. 单孔稳定抽水试验水位恢复资料确定含水层参数. *西安工程学院学报*, 22(2): 71~74.

王弭力, 刘成林, 李长华, 魏宝和, 何锦发, 宣之强. 1991. 青海昆特依盐湖富钾卤水储层扫描电镜分析. *化工矿产地质*, 16(1): 1~9.

王弭力, 杨智琛著. 1997. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景. 北京: 地质出版社, 84~99.

王文祥, 李文鹏, 刘振英, 郝爱兵, 王石军, 焦鹏程. 2010. 察尔汗盐湖低品位固体钾矿液化开采的现场试验研究探讨. *矿床地质*, 29(4): 697~703.

魏新俊, 姜继学. 1993. 柴达木盆地第四纪盐湖演化. *地质学报*, 67

(3): 255~265.

张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社, 32~157.

张西营, 马海州, 高东林, 王涛, 杨海镇, 张明刚. 2007. 采卤初期西台吉乃尔盐湖矿区卤水中钾、锂、硼水化学动态变化. 湖泊科学, 19(6): 727~734.

张湘如, 樊启顺, 魏海成, 袁秦, 秦占杰, 李建森, 王明祥. 2017. 青海察尔汗盐湖碳酸盐的硼同位素地球化学特征. 地质学报. 91(10): 2299~2308.

张岩, 高东林, 任倩慧, 李斌凯, 王明祥. 2017. 柴达木盆地昆特依盐湖大盐滩矿区潜水含水层的渗透性. 干旱区研究, 34(1): 36~42.

郑绵平, 刘喜方. 2010a. 青藏高原盐湖湖水化学及其矿物组合特征. 地质学报, 84(11): 1585~1600.

郑绵平, 张永生, 刘喜方, 齐文, 孔凡晶, 乜贞, 贾沁贤, 卜令忠, 侯献华, 王海雷, 张震, 孔维刚, 林勇杰. 2016. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望. 地质学报, 90(9): 2123~2165.

郑秀清, 李铎, 谢石连. 1994. 察尔汗盐湖首采区岩盐渗透性分析. 石家庄经济学院学报, 17(2): 198~204.

朱建荣, 张志宏, 董生发, 马艳芳, 张永峰, 杜建宁. 2011. 昆特依盐湖卤水自然蒸发析盐规律及模型建立. 盐科学与化工, 40(4): 39~42.

Constraint of Environmental Temperature on Chemical Composition of Brine and Permeability of Aquifer in the Saline Lake

YUAN Xiaolong^{1,2,3)}, ZHANG Xiyong^{1,2)}, SHEN Jinchang³⁾, GAO Donglin^{1, 2)},
LI Binkai^{1,2)}, DU Yongsheng^{1,2)}, WAN Weihai⁴⁾

1) Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources,
Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008;

2) Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of the Qinghai Province,
Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008;

3) College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098;

4) Lenghu Bindi Postash Co., Ltd. Haixizhou, Qinghai, 817000

Abstract

The shallow brine aquifer in the western Qaidam Basin is a multi-coupled dynamic equilibrium system and controlled by hydrodynamic force, climate and chemical factors. The study carried out an analysis for compositions of brine and permeability of brine aquifer in the shallow brine aquifer in different seasons (summer and winter). The results show that the concentrations of major ions in brine vary obviously from summer to winter and the concentrations of K, Mg, Ca and Cl increase correspondingly, with an increasing order of Cl, Mg, K, Ca. While the concentrations of SO_4^{2-} and Na decrease, with SO_4^{2-} decreasing more obvious than Na. Calculation results of pumping test suggest that permeability coefficient K in drilling core ZK08 decreases from 178 m/d to 97 m/d from summer to winter. The reason for that is that precipitation of mirabilite(Na_2SO_4) with decreasing of environment temperature not only improves dissolution capacity of K, Mg and Ca in brine and increases concentrations of K, Mg and Ca, but also decreases the permeability of the aquifer. In addition, the viscosity of brine increases with temperature decreasing. Therefore, it can be concluded that two factors jointly result in decreasing of the aquifer permeability.

Key words: Kunteyi salt lake; environmental temperature; brine aquifer permeability; hydrochemical components of brine; fluid-mineral inversion