

柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析

李廷伟^{1,2}, 谭红兵¹, 樊启顺^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008;

2. 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 柴达木盆地西部有着丰富的地下卤水资源。通过野外实地考察取样, 参考已有数据资料, 选择了资源丰富, 区域代表性强的柴达木盆地西部茫崖拗陷, 特别是中部油墩子—南翼山背斜构造单元的地下油田卤水为主要研究对象; 分析了其基本水化学特征, 在此基础上初步探讨了卤水的成因、演化和物源信息, 为进一步开发利用卤水资源, 特别是评价其资源开发潜力有一定指导意义。

关键词: 柴达木盆地; 油田卤水; 水化学特征; 成因分析

中图分类号: P641.464

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2006)04-0026-07

柴达木盆地位于东经 $90^{\circ}00' \sim 98^{\circ}20'$, 北纬 $35^{\circ}55' \sim 39^{\circ}10'$ 之间。北面为祁连山, 南面为昆仑山, 西面为阿尔金山, 构成一个不规则菱形向心的汇水盆地, 为中、新生代形成的大型断陷盆地, 面积约12万平方公里。地势南北高, 中部及东南方向低。

近几年研究发现, 柴达木盆地西部赋存有储量巨大的第三纪卤水资源, 其中既有与石油共生的油田卤水, 也有与之无关的盐泉卤水。

第三纪油田水指第三系地层内赋存的高矿化度卤水。赋存于构造褶皱系统的各背斜构造部位, 地貌上表现为低山、丘陵区, 含水层岩性主要由一套微胶结的碎屑岩和灰岩等组成。透水性弱, 水头压力高, 与石油、天然气共生, 为高矿化度盐卤水。柴达木盆地西部第三系储油构造上大都有油田水资源分布。在第三系地层内分布井段长, 延伸面积大, 物质组分多, 以K、B、Li、I有益组分含量高为特点。

1 考察区气候地质概况

柴达木盆地西部属大陆性干旱气候, 干燥

寒冷, 风多雨少, 昼夜温差大。年平均气温 $1.1 \sim 3.9^{\circ}\text{C}$, 年最低气温出现在1~2月, 最低气温 $-26.5 \sim -34.3^{\circ}\text{C}$; 年最高气温出现在7~8月, 最高气温为 $27.7 \sim 31.2^{\circ}\text{C}$; 年平均降水量仅为21.9 mm, 且集中在6、7、8三个月, 而年平均蒸发量为3560.1 mm, 为降雨量的162.5倍; 全年盛行西北风, 风速最大为40 m/s。^[1]

二叠纪晚期印支运动使盆地全部隆起, 结束了海相沉积的历史, 开始了内陆盆地演化历程。在断陷区开始了侏罗系、白垩系河流、湖泊和沼泽相沉积; 始新世的沉积有填平补齐特点, 形成了一套岩性、厚度变化很大的红色建造; 渐新世因喜马拉雅运动, 周围山系上升, 盆地由隆起的局部断陷转为整体陷落, 大面积沉降, 盆地面积扩大, 西部地区此时已成为沉降中心, 在此区域内, 沉积了厚度达10000 m的第三系沉积物, 地层含盐度高, 岩性主要为碳酸盐岩、泥岩、盐岩类互层, 这种岩性组合, 为油田水提供了赋存场所。湖盆湖水呈半咸水—咸水, 由浅湖—较深湖—盐湖, 环境由氧化变为还原, 湖水咸化浓缩结晶出盐类矿物, 并形成各自独立的小盐湖。

3 油田卤水的水化学特征

3.1 油田卤水的主要离子组分和分类

油田卤水中含量高的离子有 Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等。一般情况下, 由于封闭环境下细菌的还原作用, 油田水中 SO_4^{2-} 含量不高。在高矿化度的油田水中,

Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 含量最高; 在低矿化度的淡水—微咸水中, HCO_3^- , CO_3^{2-} 含量相对较高。另外, 油田水往往比一般地下水富集微量元素, 如 Li、Br、B 等。表 2 是 15 个样品的主要离子质量浓度, 它们的矿化度均较高, 主要以 Na^+ 和 Cl^- 为主。尤其采自南翼山油水湖的 NYS-03, 04, Li、K、B 等含量很高, 均超过卤水矿床工业开采品位, 有很大的开发前景。

表 2 油田卤水水化学分析表(单位: 密度为 g/cm^3 , 质量浓度和矿化度为 g/L)

Table 2 Chemical compositions of the oilfield brines(density in g/cm^3 , others in g/L)

	密度	Li^+	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	B_2O_3	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl	Br^-	矿化度
NYS-01	1.21	0.18	4.21	105.71	12.92	2.48	2.82	0.66	0.53	194.44	0.08	198.58
NYS-02	1.20	0.18	3.89	106.62	12.88	2.50	2.81	0.67	0.54	195.64	0.09	199.78
NYS-03	1.32	1.89	43.04	15.04	117.91	7.78	12.81	0.03	—	296.96	0.54	310.58
NYS-04	1.26	1.12	35.75	44.84	69.10	5.05	10.73	0.16	0.29	237.73	0.28	249.32
YDZ-2-01	1.20	0.02	2.50	117.77	4.84	0.84	1.56	1.34	0.23	192.20	0.06	235.63
YDZ-2-02	1.20	0.01	1.84	116.60	4.45	1.79	1.27	1.56	0.31	191.75	0.08	227.39
YDZQ01	1.21	0.02	0.25	159.51	4.68	0.82	0.34	1.47	0.08	190.17	0.10	357.42
YDZQ02	1.21	0.02	0.24	168.00	4.07	0.83	0.41	1.40	0.09	190.17	0.10	365.93
KTMLKQ01	1.12	0.03	0.24	113.06	2.62	1.61	0.43	3.59	0.22	98.74	0.10	220.66
KTMLKQ02	1.10	0.04	0.18	124.27	2.25	1.68	0.61	4.08	0.35	81.39	0.10	214.94
KTMLKQ03	1.09	0.07	0.35	123.66	2.39	1.23	0.63	3.24	0.29	76.55	0.09	208.47
YOZQ01	1.20	0.09	0.75	178.31	13.29	2.54	0.67	0.23	0.08	179.32	0.00	375.28
YQZQ02	1.10	0.09	0.78	167.05	13.58	2.06	0.59	0.19	0.00	176.15	0.08	360.58
YQZQ03	1.19	0.09	0.60	187.47	13.51	2.13	0.73	0.15	0.00	179.59	0.08	384.35
ZK-5034#	1.13	0.00	0.30	68.48	6.51	1.30	0.81	0.57	0.07	129.99	0.10	121.59

由于油田水化学成分的复杂性, 尽管不少学者从不同角度对油田水化学成分的分类进行了广泛的探讨^[3-6], 但仍未取得统一认识。多数研究人员仍按苏林分类划分出 NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型和 CaCl_2 型, 本文分析的油田水样品皆为 CaCl_2 型。

3.2 基于油田水主要离子成分的地球化学模式识别

A·G·柯林斯通过与蒸发海水对比来研究海相油田水的演化^[3]。我国陆相地层中的油田水是由大陆派生的, 应与大陆蒸发水进行对比。

大陆蒸发水的模拟实验结果表明, 陆相地层中油田水的 Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- 可分为消耗离子和富集离子, 可以利用常量分析及有关资料在油田水化学成分分类的基础上, 进行不同沉积盆地各水层系的油田水地球化学识别^[9]。

考察区油田水在漫长的地质年代里经过各种地质构造运动, 特别是新构造运动, 随第三系地层褶皱隆起, 这种卤水在相对封闭的环境, 经过了压实、变质等复杂的地质作用, 随矿化度的增加, 部分离子富集起来。除富集 Cl、Na 等以外, 有的还含有一定量的 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} , 呈现明显的离子分异现象。

表 3 油田水化学成分比较(质量浓度单位: g/L)

Table 3 Element compare for field oil brines(proportion in g/L)

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		
下辽河	0.05	0.03	0.39	0.10	2.65		
华北	1.42	0.17	17.77	0.02	0.38		
江汉	2.21	0.32	166.58	33.01	1.04		
松辽	0.04	0.02	2.96	0.13	2.89	陆相	据刘崇禧 1983 年 ^[7]
鄂尔多斯	6.37	1.58	53.78	2.86	0.37		
鄂尔多斯	0.81	0.56	15.28	4.01	1.20		
美国	22.20	3.84	87.79	1.20	0.34	海相	
苏联	24.83	6.02	132.14	0.30	0.34		
南翼山	53.2	4.45	231.19	0.38	0.34		
油墩子	4.51	1.07	191.07	1.44	0.18		
KTMLK	2.42	1.51	85.56	3.64	0.29		
油泉子	13.46	2.24	178.35	0.19	0.03		
ZK-5034 #	6.51	1.3	129.99	0.57	0.07		

通过阴阳离子对比(表 3), 可以发现考察区的离子富集更接近于海相, 而考察区油田水的溴含量皆较低, 又与海相油田水相悖。我国的大部分沉积盆地为内陆湖泊, 湖水的蒸发序列与海水相同, 但溴含量很低, 溴氯比也较低^[8]。另外, 我国油田水尤其是陆相油田水化学成分复杂、变化很大, 单从离子含量不能说明其成因。

4 油田水成因分析及物质来源

油田卤水的成因和演化是一个比较复杂的问题。早在 1965 年以前, 基于水化学成分, 多数海相沉积环境中的油田水被认为是沉积时圈闭的海水。然而, 氢、氧同位素引入之后, 认为油田水主要与淡水注入、排替原生水有关^[8]。此后, 许多学者将水化学和同位素资料相结合进行综合研究, 相继提出了海水蒸发浓缩后与淡水混合成因、完全暴露的蒸发海水成因等观点^[8-9], 并识别出成岩改造同生水^[9]。近 10 年来, 油田水薄膜渗滤作用成因理论已受到广泛的质疑^[8-11]。目前, 主要通过对比卤水蒸发曲线来研究油田水的成因类型和演化过程^[11]。

4.1 油田水地球化学特征及成因分析

为揭示出油田水系统的演化和水文地质条件的封闭性, 常用到钠氯系数、脱硫系数、钙镁系数和钠钙系数等, 研究这些系数的变化对研究油田水的成因有很大的帮助。

根据海水的蒸发曲线, 海洋水中钠氯系数和溴氯系数具有较大的稳定性:

1) 钠氯系数, 表示卤水中钠盐的富集程度。正常海水的系数为 0.87, 海水浓缩, 石盐开始析出以后, 此系数值不断降低, 因此沉积卤水的钠氯系数值应该小于 0.87。溶滤卤水的系数值一般比较高, 可接近 1。只有在溶滤钾盐—石盐岩时, 该系数值才会比较低, 甚至降到 0.87 左右。在溶滤钾石盐时, 可降到 0.70 左右;

2) 溴氯系数, 正常海水的为 3.4。在海水蒸发、浓缩并结晶盐时, 溴不形成固有矿物, 进入固相矿物的量相当少, 遗留在溶液中的量总是比较多, 而且越缩越多, 故沉积卤水的溴氯系数都大于 3.4。而溶滤卤水的溴含量或溴氯系数通常比较低, 一般小于 1。对于深层卤水, 当钠氯系数大于 0.87, 溴氯系数在 0.083 ~ 0.83

或更小时, 则与岩盐溶滤有关; 当钠氯系数约为 0.87, 溴氯系数在 3.4 左右时, 则为正常海水行

生而来; 当钠氯系数小于 0.87, 而溴氯系数大于 3.4 时, 则说明海水发生了变质^[12]。

表 4 油田卤水样品的地球化学参数计算结果

Table 4 The results of geochemistry research index for the oil field brines

	$\frac{\rho(\text{Li}^+)}{\rho(\text{Br}^-)}$	$\frac{n(\text{Na}^+)}{n(\text{Cl}^-)}$	脱硫系数	$\frac{n(\text{Ca}^{2+})}{n(\text{Mg}^{2+})}$	$\frac{2n(\text{Na}^+)}{n(\text{Ca}^{2+})}$	$\frac{\rho(\text{Br}^-) \times 10^3}{\rho(\text{Cl}^-)}$	$\frac{\rho(\text{K}^+) \times 10^3}{\rho(\text{Cl}^-)}$	$\frac{\rho(\text{K}^+)}{\rho(\text{Br}^-)}$
NYS-01	2.08	0.84	0.07	3.16	28.52	0.43	21.65	50.00
NYS-02	1.93	0.84	0.07	3.12	28.86	0.46	19.88	42.84
NYS-03	3.52	0.08	0.00	9.19	0.44	1.81	144.94	80.15
NYS-04	3.99	0.29	0.01	8.30	2.26	1.18	150.38	127.22
YDZ-2-01	0.35	0.94	0.13	3.50	84.84	0.31	13.01	42.02
YDZ-2-02	0.16	0.94	0.15	1.51	91.38	0.41	9.60	23.20
YDZQ01	0.19	1.29	0.15	3.44	118.34	0.51	1.30	2.57
YDZQ02	0.18	1.36	0.14	2.96	144.06	0.52	1.26	2.41
KTMLKQ01	0.33	1.77	0.67	0.99	150.22	1.03	2.48	2.40
KTMLKQ02	0.45	2.35	0.93	0.82	192.20	1.20	2.19	1.82
KTMLKQ03	0.74	2.49	0.78	1.18	180.74	1.16	4.58	3.93
YQZQ01	—	1.53	0.03	3.17	46.80	0.00	4.18	—
YQZQ02	1.13	1.46	0.02	3.99	42.88	0.46	4.42	9.63
YQZQ03	1.14	1.61	0.02	3.84	48.38	0.44	3.31	7.52
ZK-5034 #	0.02	0.81	0.08	3.04	36.68	0.75	2.30	3.05

钙镁系数 $[\frac{n(\text{Ca}^{2+})}{n(\text{Mg}^{2+})}]$, 反映了地层水的变质程度。时间越长, 封闭性越好, 则变质程度越高, 值就越高。深层水的钙镁系数一般大于 3, 我们可以从表 3 中看到, 除开特米里克以外, 其它各样品的钙镁系数值都大于或接近于 3; 而另一反映封闭程度的脱硫系数 $100 \times \frac{n(\text{SO}_4^{2-})}{2n(\text{Cl}^-)}$ 也出现类似情况。在油田水中, 硫酸盐还原的现象很广泛, 脱硫作用的结果不仅是除去水中的硫酸盐, 还包括生成硫化氢气体并进入到天然气中。脱硫作用主要发生在还原环境下, 这种环境对保存油气很有利, 故脱硫作用作为一种环境指标, 封闭性越好, 其值越小。其它各样品的值皆接近于 0, 而开特米里克的值又远远大于 0。按一般原理, 由于硫酸盐的还原, 往往导致油田水中 SO_4^{2-} 含量较低, 但来自内陆湖的陆相油田水中 SO_4^{2-} 含量却通常较高, 而海相油田水中 SO_4^{2-} 含量较低。在浓度相同的条件下, 陆相油田水 SO_4^{2-} 的含量为海相油田水的 5~10 倍。 SO_4^{2-} 是我国高矿化陆相油田水中除 Cl^- 以外常占第 2 位的阴离子。

其原因是内陆湖泊在气候干燥、降水量少、缺少径流条件下, 强烈地蒸发浓缩作用使溶解度小的碱土金属碳酸盐首先自水中析出, 而后是硫酸钙沉淀, 并向着富集硫酸钠、硫酸镁和一定数量的氯化钠方向发展的结果, 又如当地层温度高、脱硫作用减缓或停止, 则也可能在水中残留较多的 SO_4^{2-} 。而在膏盐地区的油田水中由于石膏等矿物的溶解 SO_4^{2-} 含量更高, 如江汉盆地第三系油田水^[13]。

另外, 由于浓缩析盐, 卤水中 Na^+ 与 Ca^{2+} 常存在一定的负相关性。特别是开特米里克背斜构造单元具很高的钠氯系数比的同时, 钠钙系数比也较高, 其原因可能是卤水在地层中运移过程中曾遇到过石膏或硬石膏层, 渗入水富含 CaSO_4 成分, Ca^{2+} 与吸附状态 Na^+ 发生阳离子交换, Na^+ 被解吸, Ca^{2+} 进入固相, 而 SO_4^{2-} 以及两倍于它的 Na^+ 则进入油田水, 导致出现开特米里克构造单元钠氯系数、钠钙系数比较高的异常情况。其中地下水系统中 Na 与 Ca 的交换是引起地下水化学成分变化的重要过程, 其交换反应式: $2\text{Na}^+ + \text{Cax} \rightleftharpoons 2\text{Nax} + \text{Ca}^{2+}$, 咸、淡

水混合和水岩作用过程中 Na^+ 、 Ca^{2+} 交换吸附或解吸是一个可逆的动态变化过程。

样品 NYS-03、04 钾氯系数已远远大于 75, 已达到钾盐阶段, 大量的 NaCl 已经析出,

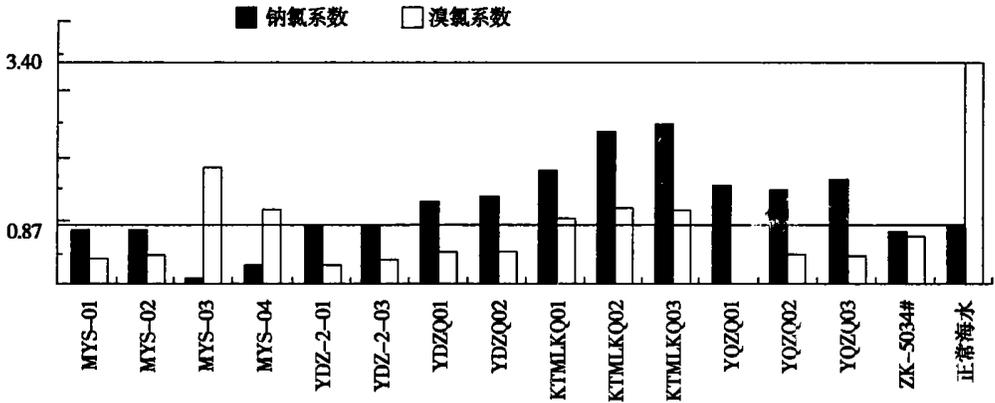


图2 $n(\text{Na}^+)/n(\text{Cl}^-)$ 和 $\rho(\text{Br}^-) \times 10^3 / \rho(\text{Cl}^-)$ 分析

Fig. 2 The analysis of the samples on $n(\text{Na}^+)/n(\text{Cl}^-)$ & $\rho(\text{Br}^-) \times 10^3 / \rho(\text{Cl}^-)$

综合以上分析, 考察区油田水钠氯系数皆大于或接近于 0.87, 溴氯系数皆小于 3.4, 而在 0.083~0.83 之间(图 2)。另外综合考虑钠氯系数、钠钙系数所以都应与石盐的溶滤有关, 并非正常海水衍生而来, 尤其是其较低的 Br^- 含量也说明了这一问题。

4.2 物质来源

在考察区气候条件和地质背景的基础上, 综合常量分析数据及地球化学参数, 推测考察区油田卤水的物质来源主要有以下几个方面:

1) 中酸性火山岩的水-岩相互作用

柴达木盆地的主体是由印支运动以后转化为内陆盆地的。在整个中生代漫长的地质年代中, 周边山区出露有大面积的印支期、燕山期中酸性岩体及火山岩、碎屑岩, 岩石中含有较丰富的钾、钠、钙、镁、锂、锶、硼等组分。岩石经过风化、淋滤等作用, 通过地表水、地下水汇入盆地, 有用组分得以富集^[14]。从水化学特征分析, 柴达木盆地西部油田卤水多富 Ca^{2+} 而贫 Mg^{2+} , 主要是由于地下深部发生的碳酸盐胶结物、石膏溶解、长石酸性淋滤和方解石白云石化等水-岩反应引起;

2) 火山-地热水的补给

Mg^{2+} 也随 K^+ 一起析出, 相比之下 Ca^{2+} 出现过剩, 这也是其钠钙系数较低而钙镁系数较高的原因。

青藏高原是世界上水热活动的重要地区之一。油田卤水样品中的 K^+ 、 B^{3+} 、 Li^+ 等含量较高, 而淋滤周围岩石的汇集速度较慢, 含量相对而言较低, 故火山-地热水的补给成为可能。柴达木盆地周缘山区的断裂带附近分布着许多中生代至近代的火山活动而火山活动形成地热水中含有丰富的 K^+ 、 B^{3+} 、 Li^+ 等。在第三纪时盆地的地形是东高西低, 火山-地热水中的 K^+ 、 B^{3+} 、 Li^+ 均可汇集到盆地西部, 进入油田卤水;

3) 蒸发岩的地下溶解

对于早期为干旱气候的盐湖沉积盆地的卤水, 地下岩盐的溶解是其高矿化度产生的主要方式^[19]。虽然地下岩盐的溶解对矿化度的影响是近距离的, 但通过地下水的垂向运移也可以影响较大的范围。正是由于地下岩盐的溶解, 才出现深部水近于甚至大于 1 的 $n(\text{Na}^+)/n(\text{Cl}^-)$ 比。

5 结论

①柴达木盆地西部地下卤水资源丰富, 矿化度较高, K^+ 、 B^{3+} 、 Li^+ 等资源品位高, 有很大的开发利用前景;

②柴达木盆地西部地下卤水几乎均已达到析盐阶段(南翼山油水湖的卤水已到达析钾阶段),且由于封闭性较好,变质程度较高;

③从水化学特征分析,柴达木盆地西部油田卤水多富 Ca^{2+} 、 Li^{-} 而贫 Mg^{2+} , 主要与中酸性火山岩的水-岩相互作用以及火山地热水的补给有关。

参考文献:

- [1] 柳大纲, 陈敬清, 张长美. 柴达木盆地盐湖类型和水化学类型[J]. 盐湖研究, 1996, 4(3-4): 9-16.
- [2] 李元奎, 等. 油泉子-开特米里克构造带综合评价及有利勘探目标选择[J]. 青海石油, 2004, 22(1): 24-35.
- [3] 柯林斯 A G. 油田水地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- [4] 刘崇禧. 我国陆相盆地油田水化学特征及演变规律[J]. 石油实验地质, 1988, 4(2): 130-137.
- [5] 汪义先. 泌阳凹陷油田水地球化学特征及其与油气的关系[J]. 石油实验地质, 1983, 3(4): 298-303.
- [6] 李贤庆, 侯读杰, 张爱云. 油田水地球化学研究进展[J]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 51-54.
- [7] 刘崇禧. 我国中、新生代陆相盆地油田水文地球化学特征及与油气聚集的关系[J]. 石油勘探与开发, 1983, (2).
- [8] Kharaka Y K, Law D M, et al. Role of organic species dissolved in formation water from sedimentary basins in mineral diagenesis [J]. Role of organic Matter in Sediment Diagenesis, 1986, 38: 111-122.
- [9] Connolly C A, Walter L M, et al. Origin and evolution of formation waters, Western Canada Sedimentary Basin [J]. Applied Geochemistry, 1990, 5: 375-413.
- [10] Fisher J B, Boles J R. Water-rock interaction in Tertiary sandstones, San Joaquin basin, California, USA: diagenetic controls on water composition [J]. Chemical Geology, 1990, 82: 83-101.
- [11] Hanor J S. Physical and chemical controls on the composition of waters in sedimentary basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 1994, 11(1): 31-45.
- [12] 汪蕴璞. 深层卤水形成问题及其研究方法[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- [13] 颜婉荪. 我国陆相沉积盆地油田水化学特征及分类探讨[J]. 西南石油学院学报, 1990, 12(2): 6-14.
- [14] 杨谦. 柴达木盆地钾盐形成条件及盐类聚集过程, 青海柴达木盆地晚生代地质环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [15] 李武, 程向锦, 等. 油田水地球化学技术综合应用研究进展[J]. 物探与化探, 2003, 27(6): 416-422.

Hydrochemical Characteristics and Origin Analysis of the Underground Brines in West Qaidam Basin

LI Ting-wei^{1,2}, TAN Hong-bing¹, FAN Qi-shun^{1,2}

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China,
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: There are abundant resources in Qaidam Basin. Based on data from literature and collected from field work, the hydrochemical characteristics of the representative Mangya Depression was discussed. In addition, the origin, evolution and metamorphic differentiation of the brines were preliminarily discussed.

Key words: Qaidam Basin; Underground brine; Hydrochemical characteristics; Origin.