

doi:10.3799/dqkx.2014.125

柴达木黑北凹地早更新世新型砂砾层 卤水水化学特征与成因

李洪普^{1,2,3}, 郑绵平^{1,3}, 侯献华^{1,3*}, 孙斌涛², 刘国泰², 窦全成²

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

2. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海格尔木 816000

3. 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 北京 100037

摘要: 柴达木黑北凹地深部砂砾石层内的承压水是近期在柴达木西部新发现的规模巨大的孔隙卤水, 水位埋深 8~24 m, 接近地表; 富水性中等偏强; 矿化度较高, KCl 含量达到可开发利用的要求, 井采时不易结盐, 可作为后续开发钾盐的备选区域。离子统计分析结果显示, TDS、Cl⁻、Na⁺、Cs⁺、B₂O₃、Ca²⁺、Mg²⁺、Sr⁺、NO₃⁻、Rb⁺ 在卤水中的浓度变化幅度小, 分布较均匀; SO₄²⁻ 的变化幅度大, 分布极不均匀; Br⁻、I⁻、Li⁺、K⁺ 变化幅度和均匀程度介于二者之间; Na⁺、Cl⁻、Ca²⁺、Sr²⁺、TDS 呈正态负偏高峰态, K⁺、SO₄²⁻、Li⁺ 呈非正态正偏高峰态。成分聚类分析图中, K⁺、SO₄²⁻、Li⁺ 首先聚为一亚类, Cl⁻、TDS、Na⁺ 聚为一亚类。从离子含量变化曲线图中可以看到, 该孔隙卤水从东至西, Na⁺、Cl⁻ 含量和变化趋势相同, 且它们与 TDS、B₂O₃ 的变化趋势相同。K⁺、SO₄²⁻、Mg²⁺ 三种组分含量较一致, 变化趋势相同, 且同时与 Li⁺ 的变化趋势相同。孔隙卤水钠氯系数 C_{Na}/C_{Cl} 值为 0.85~0.96, 溴氯系数为 0.01~0.34, 与盐岩溶滤卤水接近。在 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O 四元体系和 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻、SO₄²⁻-H₂O 五元体系 25 °C 介稳相图中反映出 2 种析盐规律, 一种为硫酸镁亚型, 另一种是氯化物型。其形成可能与化学沉积层中高矿化度晶间卤水与砂砾石层中原始孔隙(淡)水相互作用有关。

关键词: 黑北凹地; 卤水; 水化学成分; 水化学类型; 介稳相图; 砂砾岩。

中图分类号: P59; P61; P64

文章编号: 1000-2383(2014)10-1333-10

收稿日期: 2014-03-20

Hydrochemistry Characteristics and Origin of New Brine Sandy Gravel in Early Pleistocene of Heibei Concave in Qaidam Basin

Li Hongpu^{1,2,3}, Zheng Mianping^{1,3}, Hou Xianhua^{1,3*}, Sun Bintao², Liu Guotai², Dou Quancheng²

1. Key Laboratory of Saline Resources and Environment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Integrated Geological Exploration Team, Geermu 816000, China

3. R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposite, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: Confined water in deep sandy gravel layer is newly-discovered large-scale pore brines in Heibei concave in the western Qaidam basin, which poses as an alternative area for potash development due to the following features: medium to strong water yield property, closeness to the surface with water level ranging from 8 to 24 m, high degree of mineralization, high KCl content fit for commercial development, and small salt buildup when mined. The statistical results show that concentration changes of TDS, Cl⁻, Na⁺, Cs⁺, B₂O₃, Ca²⁺, Mg²⁺, Sr⁺, NO₃⁻, and Rb⁺ in the brine are small with even distribution. On the contrary, concentration changes of SO₄²⁻ are big with uneven distribution; concentration changes of Br⁻, I⁻, Li⁺, K⁺ and uniform degree fall in the range in-between those of the two above-mentioned groups of elements; Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺ and Sr²⁺, TDS show normal negatively skewed peak distribution, K⁺, SO₄²⁻, Li⁺ show non-normal positively skewed peak distribution. In component clustering analysis diagram, K⁺, SO₄²⁻, Li⁺ fall into a sub-class, whereas Cl⁻, TDS and Na⁺ fall into another sub-class. The ion content change curve shows that content of

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. 1212010011806, 1212011085521, 1212011220789)。

作者简介: 李洪普 (1968-), 男, 教授级高级工程师, 从事盐湖地质勘查、研究工作。E-mail: 745430898@qq.com

* **通讯作者:** 侯献华, E-mail: hxh2858@126.com

Na⁺ and Cl⁻ share the same change trend with that of mineralization degree and B₂O₃ in the pore brine from east to west. Compositions of K⁺, SO₄²⁻, Mg²⁺ are consistent, with the same change trend with that of Li⁺. Ratio of C_{Na}/C_{Cl} in pore brine is 0.85—0.96, and bromine chloride coefficient is 0.01—0.34, similar to those of salt karst filter brine. It finds two laws of salting, namely, magnesium sulfate and chloride in the metastable phase diagram (25 °C) of the quaternary system of Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻-H₂O and quinary system of Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻, SO₄²⁻-H₂O, which might have formed due to interaction of intercrystalline brine in the sedimentary formation and pore water in the sandy gravel.

Key words: Heibei concave; brine; hydrochemical composition; hydrochemical type; metastable phase diagram; sand and gravel.

研究区黑北凹地地处柴达木西部阿尔金山山前,范围涵盖梁中凹地—黑北凹地—察汗斯拉图凹地.近期在区内发现一个隐伏的巨大冲洪积扇群,长度大于 100 km,宽度 8~10 km,局部厚度大于 800 m,面积大于 1 000 km²,时代为早更新世,岩性为砂砾石层.该冲洪积扇群内富含氯化物型孔隙卤水,是柴达木盆地西部新发现的新型钾盐矿资源,矿化度较高,一般在 280~300 g/L 之间,品位稳定,KCl 品位一般在 0.30% 以上,化学成分单一,仅 KCl、NaCl 在边界品位或工业品位以上,在抽卤中不易结盐,易于开采.由于这些特点,该冲洪积扇群倍受专家、学者和投资者的关注.研究其水化学特征,对指导下一步找钾、开发具有重要意义.本文则首次针对该冲洪积扇群孔隙卤水进行了水化学研究.

1 地质背景

柴达木盆地北东以赛什腾山—宗务隆山断裂与南祁连褶皱系相连,北西以阿尔金断裂与塔里木盆地紧邻,南部以昆北断裂与东昆仑造山带相接(汤良杰等,2002).盆地西部在晚侏罗世呈拗陷盆地,广泛发育河流相—湖相碎屑岩建造;白垩纪盆地隆升,只在北缘的祁连山山前沉积一套红色粗碎屑岩建造,从山前向盆地内部沉积厚度逐渐减薄,粒度逐渐变细(刘志宏等,2004);新生代盆地(戴俊生和曹代勇,2000;周建勋等,2003;刘志宏等,2005;尹安等,2007)中广泛发育巨厚的湖相—河流相碎屑岩、膏盐岩建造(徐凤银等,2006;刘志宏等,2009).柴达木盆地中部存在着一条区域性断裂——柴中断裂,它形成于元古代,是柴南古陆核和柴北增生体之间的地

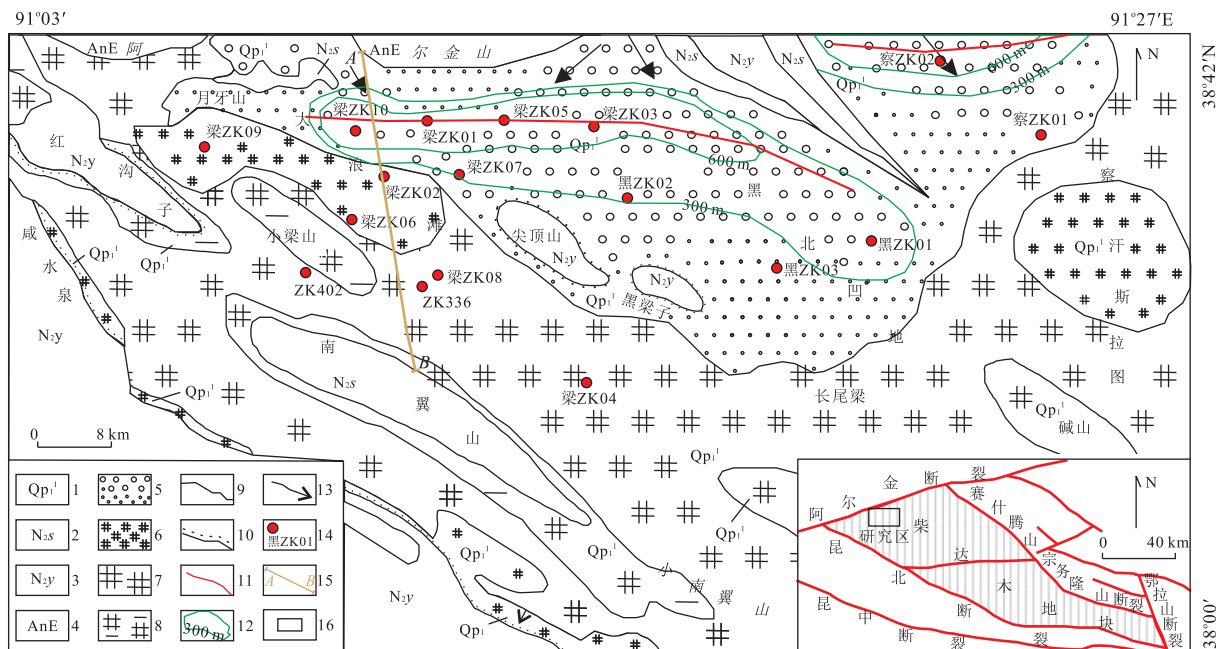


图 1 柴达木西部第四纪早更新世孔隙卤水储层分布

Fig.1 Early pleistocene of quaternary pore brine reservoir distribution map in western Qaidam

1.第四纪早更新世阿拉尔组;2.新近纪上新世狮子沟组;3.新近纪上新世上油砂山组;4.前新近纪;5.山前冲洪积扇(靠近山前为砂砾石建造,向盆地内为细碎建造);6.盐湖内带;7.盐湖外带;8.干盐湖;9.地质界线;10.角度不整合地质界线;11.断层;12.砂砾石层等厚度线;13.古水流方向;14.钻孔位置及编号;15.图 2 位置;16.研究区

表 1 调查区地层分层

Table 1 The survey area stratum

岩组(段、层)划分	代号	岩性	沉积环境	卤水类型
全新统达布逊组	Qh	化学沉积层	现代盐湖相沉积	晶间卤水
上更新统察尔汗组	Qp ₃	化学沉积层夹粘土层	干盐湖相、泥坪相	晶间卤水
中更新统尕斯库勒组	Qp ₂	化学沉积层与粘土层互层	干盐湖相、泥坪相	晶间卤水
上岩段	Qp ₁ ³	粘土层夹厚层石盐层	泥坪相、干盐湖相	晶间卤水
中岩段	Qp ₁ ²	粘土层夹薄层石盐层	泥坪相、局部干盐湖相	晶间卤水
下更新统阿拉尔组	下 上层 Qp ₁	Qp ₁ ¹⁻³	含石膏的粘土层夹砂砾石层	西部晶间
岩 中层 Qp ₁ ¹	Qp ₁ ¹⁻²	砂砾石层夹粘土层	西部干盐湖相、东部冲洪积相	卤水,东部
段 下层 Qp ₁ ¹⁻¹		砂砾石层,局部夹粘土层		孔隙卤水

壳缝合带,也是控制柴达木盆地沉积中心转移的主要断裂之一(图 1).沿柴中断裂以北发育南翼山、尖顶山、红沟子、大风山、小梁山、黄瓜梁、黑梁子、长尾梁、碱山等多个北西向背斜构造.其中靠近阿尔金山山前的尖顶山、小梁山等背斜构造控制着大浪滩—黑北—察汗斯拉图凹陷的地形、地貌(陈克造等, 1981;徐凤银等,2009).背斜构造出露地层主要为古近系和新近系,局部可见第四系.

向斜凹地分布(或钻遇)地层为第四系(表 1).根据梁中凹地—黑北凹地—察汗斯拉图凹地施工钻孔,可将第四系进一步划分为下更新统阿拉尔组(Qp₁)、中更新统尕斯库勒组(Qp₂)、上更新统察尔汗组(Qp₃)和全新统达布逊组(Qh).阿拉尔组(Qp₁)分为下岩性段(Qp₁¹)、中岩性段(Qp₁²)和上岩性段(Qp₁³).下岩性段(Qp₁¹)西部(梁 ZK09 处)为干盐湖相和泥坪相沉积,是晶间卤水储层,岩性为粘土层夹石盐层、含石膏的粘土层夹石盐层.东部(梁 ZK10 及以西)发生了相变,属山前冲洪积相沉积,是孔隙

卤水的储层,岩性为砂砾层、砂层及粘土层(图 1).按岩性、岩相特征进一步分为下岩性层(Qp₁¹⁻¹)、中岩性层(Qp₁¹⁻²)和上岩性层(Qp₁¹⁻³).下岩性层(Qp₁¹⁻¹)岩性为含砾中粗砂、砂砾石、含粉砂角砾、细粉砂层,局部夹粘土层,中岩性层(Qp₁¹⁻²)岩性为含砾中细砂、粉细砂夹粘土层,上岩性层(Qp₁¹⁻³)岩性为含石膏的粘土层夹粉细砂、局部含砾.中岩性段(Qp₁²)岩性为粘土层夹薄层的石盐层,属泥坪相沉积,局部为盐湖相沉积,赋存晶间卤水.上岩性段(Qp₁³)岩性为粘土层夹厚层的石盐层,属泥坪相沉积和盐湖相沉积,赋存晶间卤水.尕斯库勒组(Qp₂)岩性为粘土层与石膏层、厚层石盐层互层,属干盐湖相沉积及泥坪相沉积,赋存晶间卤水.察尔汗组(Qp₃)研究区出露少,岩性为石盐层、石膏层、芒硝层夹粘土层,大部分属干盐湖相沉积,少数为泥坪相沉积,赋存晶间卤水.达布逊组(Qh)岩性为石盐、含粉砂的石盐、杂卤石、含淤泥的石盐、含芒硝的石盐、含石盐的芒硝等,夹粘土层、淤泥层,属现代盐湖相沉积,局部为泥坪

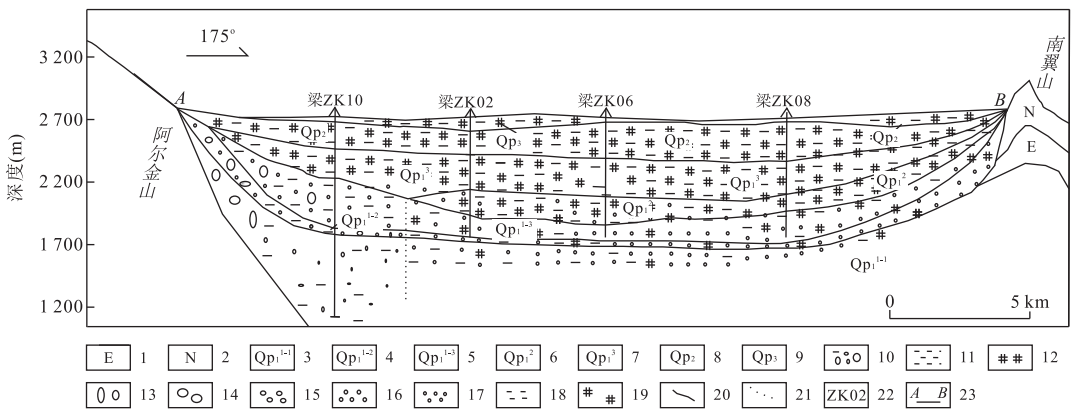


图 2 梁中凹地阿尔金山山麓—南翼山剖面

Fig.2 Beams depressions Altun foothills-Nanyishan profiles

1.古近系;2.新近系;Qp₁.第四系下更新统;3.下岩段第 1 层;4.下岩段第 2 层;5.下岩段第 3 层;6.中岩段;7.上岩段;8.中更新统;9.上更新统;10.冲洪积扇相;11.泥坪相;12.化学沉积相;13.砾石;14.粗砂;15.中砂;16.细砂;17.粉砂;18.粘土;19.石盐;20.地质界线;21.过度地质界线;22.钻孔位置及编号;23.剖面端点编号

相沉积,赋存晶间卤水(图 2)。

2 卤水地质特征

2.1 卤水分布规律

研究区石盐、杂卤石、芒硝等化学沉积层中石盐晶体或后期构造裂隙间一般赋存高矿化度地下水,统称为晶间卤水。松散的砂砾层孔隙中也赋存高矿化度地下水,称为孔隙卤水。由于晶间卤水分布于全新统达布逊组、上更新统察尔汗组、中更新统尕斯库勒组和梁 ZK09 孔及以西的下更新统阿拉尔组,且全新统达布逊组和上更新统察尔汗组基本覆盖了黑北凹地,因此,从面上看,晶间卤水层遍布于凹地区。垂向上,孔隙卤水只分布于梁 ZK10 及以东下更新统阿拉尔组,上部为盐湖相与泥坪相沉积物,下部为冲洪积扇群,晶间卤水赋存于上部,孔隙卤水一般隐伏于下部。总之,从柴达木西部梁中凹地经黑北凹地,至察汗斯拉图凹地,组成一个北西西向狭长的空间上相连、结构上相似的带状断陷凹地,其上部为化学沉积岩层与粘土层互层,下部为砂砾石层。化学沉积岩层内赋存承压性晶间卤水,砂砾石层内赋存承压性孔隙卤水。

2.2 卤水赋存特征

晶间卤水层由梁 ZK02、梁 ZK04、梁 ZK06、梁 ZK08、梁 ZK09、梁 ZK10、黑 ZK01 等及察 ZK01 等深孔控制,长度大于 120 km,宽度 8~10 km,分布面积大于 1 000 km²,顶板埋深 165.60~556.62 m,底板埋深 997.2~1 250.0 m,水位埋深 8~24 m,含水层纯厚度 89.99~600.00 m,水化学类型为硫酸镁亚型(郑绵平,2001;叶传永等,2003)。KCl 品位 1.00%~1.96%,NaCl 品位 19.32%~22.64%,MgCl₂ 品位 0.00%~1.93%,MgSO₄ 品位 0.00%~7.84%。其富水性弱,单位涌水量在 0.06~0.68 m³/(d·m) 之间;孔隙度 2.82%~16.51%,平均 11.10%,给水度 1.39%~9.58%,平均 9.85%。该层 KCl 品位虽然较高,但由于单井涌水量小、易结盐的特点,现阶段不利于开发利用。

孔隙卤水层(图 1)从西向东由梁 ZK10、梁 ZK01、梁 ZK03、梁 ZK07、黑 ZK01、黑 ZK02 等深孔控制,长度大于 100 km,宽 8~16 km,分布面积大于 1 000 m²,顶板埋深 122.10~797.20 m,底板埋深 1 600.65 m,厚度一般大于 1 000 m。水位埋深 8~24 m,含水层纯厚度 197~800 m。孔隙度大于 26.20%,给水度大于 12.00%。矿化度 280~

302 g/L,KCl 品位 0.31%~1.56%,NaCl 品位 18.79%~22.14%,MgCl₂ 品位 0.14%~1.81%,MgSO₄ 品位 0.00%~2.73%,水化学类型以氯化物为主,部分为硫酸镁亚型。该孔隙卤水层单位涌水量 33.55~231.89 m³/(d·m),抽水试验中最大单井涌水量达 2 268 m³/d,降深 56 m。富水性中等偏强。由于该卤水单井涌水量大、不易结盐,开发研究意义大。

3 采样方法

取样方法:在每个钻孔含水层中进行抽水试验时,水位稳定后每隔 4 小时采集一个水样。水样瓶为用蒸馏水冲洗干净的新样瓶,取样结束后及时将瓶口封紧。在瓶身贴上标签,用透明宽胶带粘牢,取样数量为 1 000 mL。

卤水样品的分析测试元素为 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Li⁺、B₂O₃、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、Rb⁺、Cs⁺、Sr²⁺、Br⁻、I⁻、NO₃⁻、PH 值、密度、溶解性总固体(矿化度)等。常量成分 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Li⁺、B₂O₃、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 等用常规重量法(误差 0%~5%)和滴定法(误差 0.2%~0.3%)测定;微量成分 Li⁺、Br⁻、Sr⁺ 等采用原子吸收光谱法(误差小于 2%);B 含量采用吸光光度法(误差小于 1%)。测试单位为青海省柴达木综合地质矿产勘查院。

4 孔隙卤水水化学特征

4.1 离子含量特征

4.1.1 常量离子含量特征 常量离子中,K⁺ 含量 0.81~3.41 g/L,除梁 ZK07 最低,为 0.81 g/L 外,其余都达到边界品位,梁 ZK01、梁 ZK05 孔等高于工业品位,各离子含量从西至东,变化较小。Na⁺ 含量 43.00~114.90 g/L,达到工业品位。Ca²⁺ 含量 2.43~5.67 g/L,比较低。Mg²⁺ 含量 1.55~5.97 g/L,低于工业品位。Cl⁻ 含量 75.21~187.70 g/L,和南翼山背斜构造区接近。SO₄²⁻ 含量 1.10~2.14 g/L,比较低。矿化度 126.29~310.80 g/L,大多数大于 270.00 g/L(表 2)。少数水化学类型为硫酸镁亚型,多数为氯化钠型。

4.1.2 微量离子含量特征 B₂O₃ 含量 55.85~151.60 mg/L,低于背斜构造区含量。Li⁺ 含量 0.74~

表 2 研究区向斜凹地钻孔多项分析离子平均含量
Table 2 Drilling multiple analysis of average ion content of syncline concave ground in the research area

样号	凹地砾砂层																	凹地化学 沉积层	南翼山 背斜构造
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
K ⁺ (g/L)	1.88	1.19	1.99	3.41	3.32	3.24	3.29	1.16	1.10	1.00	0.81	2.62	2.61	2.52	2.61	2.62	2.52	2.32	6.81
Na ⁺ (g/L)	80.40	43.00	96.00	102.30	101.80	102.60	103.40	114.50	114.10	114.70	114.90	97.55	96.89	94.04	96.29	96.92	96.08	102.80	86.32
Ca ²⁺ (g/L)	4.61	2.43	5.06	5.42	5.52	5.50	5.43	3.53	3.50	3.58	3.51	5.67	5.54	5.38	5.53	5.54	5.46	4.94	15.57
Mg ²⁺ (g/L)	4.54	2.44	4.81	5.62	5.54	5.47	5.53	1.81	1.77	1.68	1.55	5.97	5.82	5.61	5.91	5.89	5.76	4.58	1.32
Li ⁺ (mg/L)	2.47	1.75	2.96	1.53	1.54	1.53	1.49	1.03	0.95	0.91	0.74	2.41	2.33	2.35	2.38	2.36	2.35	1.79	2.50
Rb ⁺ (mg/L)	0.18	0.15	0.19	0.10	0.09	0.09	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.11	—
Cs ⁺ (mg/L)	0.96	0.60	1.14	0.53	0.52	0.51	0.53	1.01	1.04	1.03	1.06	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.82	—
Sr ²⁺ (mg/L)	50.12	29.21	59.18	45.49	45.92	50.23	51.55	63.03	64.00	62.92	62.92	82.02	78.92	72.84	77.55	81.98	74.38	64.86	—
Cl ⁻ (g/L)	144.20	75.21	170.10	183.60	184.60	184.60	185.70	184.90	186.70	187.70	187.70	177.70	176.70	170.70	175.70	175.20	175.20	180.45	171.06
SO ₄ ²⁻ (g/L)	1.47	1.78	1.51	1.61	1.43	1.47	1.52	1.96	2.14	1.94	2.01	1.38	1.28	1.27	1.10	1.28	1.27	1.54	263.33
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.45
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	55.01	188.20	6.76	13.05	13.05	13.05	19.58	19.53	37.32	27.95	31.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.13	246.24
B ₂ O ₃ (mg/L)	117.20	58.59	151.60	59.57	55.85	63.30	55.85	72.16	69.49	69.49	69.49	142.40	138.20	138.20	138.20	146.70	140.30	100.72	—
Br ⁻ (mg/L)	1.76	1.98	0.68	52.40	46.80	53.20	47.20	54.40	54.40	52.80	56.00	59.67	59.17	57.50	57.17	54.33	54.67	19.63	52.10
I ⁻ (mg/L)	0.00	0.37	0.00	—	—	—	—	7.90	7.65	7.90	7.60	5.45	5.90	5.65	5.80	5.85	6.05	1.37	36.44
NO ₃ ⁻ (mg/L)	21.00	20.00	28.80	41.60	40.80	42.40	42.40	39.00	34.50	34.50	57.00	16.00	15.40	15.00	15.60	15.60	14.40	82.32	—
密度(g/cm ³)	1.16	1.09	1.18	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.19	1.19	1.20	1.18	1.18	1.17	1.18	1.18	1.17	1.72	1.19
pH	7.39	7.70	7.40	7.70	7.75	7.70	7.76	7.48	7.50	7.49	7.51	7.52	7.14	7.47	7.24	7.17	7.47	13.19	—
矿化度(TDS)(g/L)	237.27	126.29	279.63	301.9	302.20	302.80	304.80	308.00	309.50	310.80	310.70	291.30	289.20	279.90	287.50	287.90	286.70	340.43	285.39
C _{Na} /C _{Cl}	0.86	0.88	0.87	0.86	0.85	0.86	0.86	0.96	0.94	0.94	0.94	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.92	0.78
[K ⁺]/[Na ⁺]/[Cl ⁻]	10.00	20.00	10.00	20.00	20.00	20.00	20.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	50.00	40.00
100×[SO ₄ ²⁻]/[Cl ⁻]	0.51	1.18	0.44	0.44	0.39	0.40	0.41	0.53	0.57	0.52	0.54	0.39	0.36	0.37	0.31	0.37	0.36	10.67	0.08
[Ca ²⁺]/[Mg ²⁺]	1.02	1.00	1.05	0.96	0.99	1.01	0.98	1.95	1.98	2.12	2.27	0.95	0.95	0.96	0.94	0.94	0.95	0.02	11.86
[Ca ²⁺]/[Mg ²⁺]	0.01	0.03	0.00	0.29	0.25	0.29	0.25	0.29	0.29	0.28	0.3	0.34	0.33	0.34	0.33	0.31	0.31	0.10	0.31
[K ⁺]/[Br ⁻]	1.07	0.60	2.93	0.07	0.07	0.06	0.07	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	2.23	0.13
水化学类型																		硫酸镁亚型	氯化钙型
备注																		晶间卤水	构造裂隙水

注:1.梁 ZK03SD01;2.梁 ZK03SD02;3.梁 ZK03SD03;4.梁 ZK05SD01;5.梁 ZK05SD02;6.梁 ZK05SD03;7.梁 ZK05SD04;8.梁 ZK07SD03;9.梁 ZK07SD04;10.梁 ZK07SD05;11.梁 ZK07SD06;12.黑 ZK02I SD01;13.黑 ZK02I SD02;14.黑 ZK02I SD03;15.黑 ZK02I SD04;16.黑 ZK02I SD05;17.黑 ZK02I SD06;18.黑 ZK02I SD07;19.黑 ZK02I SD08;20.黑 ZK02I SD09;21.黑 ZK02I SD10;22.黑 ZK02I SD11;23.黑 ZK02I SD12;24.黑 ZK02I SD13;25.黑 ZK02I SD14;26.黑 ZK02I SD15;27.黑 ZK02I SD16;28.黑 ZK02I SD17;29.黑 ZK02I SD18;30.黑 ZK02I SD19;31.黑 ZK02I SD20;32.黑 ZK02I SD21;33.黑 ZK02I SD22;34.黑 ZK02I SD23;35.黑 ZK02I SD24;36.黑 ZK02I SD25;37.黑 ZK02I SD26;38.黑 ZK02I SD27;39.黑 ZK02I SD28;40.黑 ZK02I SD29;41.黑 ZK02I SD30;42.黑 ZK02I SD31;43.黑 ZK02I SD32;44.黑 ZK02I SD33;45.黑 ZK02I SD34;46.黑 ZK02I SD35;47.黑 ZK02I SD36;48.黑 ZK02I SD37;49.黑 ZK02I SD38;50.黑 ZK02I SD39;51.黑 ZK02I SD40;52.黑 ZK02I SD41;53.黑 ZK02I SD42;54.黑 ZK02I SD43;55.黑 ZK02I SD44;56.黑 ZK02I SD45;57.黑 ZK02I SD46;58.黑 ZK02I SD47;59.黑 ZK02I SD48;60.黑 ZK02I SD49;61.黑 ZK02I SD50;62.黑 ZK02I SD51;63.黑 ZK02I SD52;64.黑 ZK02I SD53;65.黑 ZK02I SD54;66.黑 ZK02I SD55;67.黑 ZK02I SD56;68.黑 ZK02I SD57;69.黑 ZK02I SD58;70.黑 ZK02I SD59;71.黑 ZK02I SD60;72.黑 ZK02I SD61;73.黑 ZK02I SD62;74.黑 ZK02I SD63;75.黑 ZK02I SD64;76.黑 ZK02I SD65;77.黑 ZK02I SD66;78.黑 ZK02I SD67;79.黑 ZK02I SD68;80.黑 ZK02I SD69;81.黑 ZK02I SD70;82.黑 ZK02I SD71;83.黑 ZK02I SD72;84.黑 ZK02I SD73;85.黑 ZK02I SD74;86.黑 ZK02I SD75;87.黑 ZK02I SD76;88.黑 ZK02I SD77;89.黑 ZK02I SD78;90.黑 ZK02I SD79;91.黑 ZK02I SD80;92.黑 ZK02I SD81;93.黑 ZK02I SD82;94.黑 ZK02I SD83;95.黑 ZK02I SD84;96.黑 ZK02I SD85;97.黑 ZK02I SD86;98.黑 ZK02I SD87;99.黑 ZK02I SD88;100.黑 ZK02I SD89;101.黑 ZK02I SD90;102.黑 ZK02I SD91;103.黑 ZK02I SD92;104.黑 ZK02I SD93;105.黑 ZK02I SD94;106.黑 ZK02I SD95;107.黑 ZK02I SD96;108.黑 ZK02I SD97;109.黑 ZK02I SD98;110.黑 ZK02I SD99;111.黑 ZK02I SD100;112.黑 ZK02I SD101;113.黑 ZK02I SD102;114.黑 ZK02I SD103;115.黑 ZK02I SD104;116.黑 ZK02I SD105;117.黑 ZK02I SD106;118.黑 ZK02I SD107;119.黑 ZK02I SD108;120.黑 ZK02I SD109;121.黑 ZK02I SD110;122.黑 ZK02I SD111;123.黑 ZK02I SD112;124.黑 ZK02I SD113;125.黑 ZK02I SD114;126.黑 ZK02I SD115;127.黑 ZK02I SD116;128.黑 ZK02I SD117;129.黑 ZK02I SD118;130.黑 ZK02I SD119;131.黑 ZK02I SD120;132.黑 ZK02I SD121;133.黑 ZK02I SD122;134.黑 ZK02I SD123;135.黑 ZK02I SD124;136.黑 ZK02I SD125;137.黑 ZK02I SD126;138.黑 ZK02I SD127;139.黑 ZK02I SD128;140.黑 ZK02I SD129;141.黑 ZK02I SD130;142.黑 ZK02I SD131;143.黑 ZK02I SD132;144.黑 ZK02I SD133;145.黑 ZK02I SD134;146.黑 ZK02I SD135;147.黑 ZK02I SD136;148.黑 ZK02I SD137;149.黑 ZK02I SD138;150.黑 ZK02I SD139;151.黑 ZK02I SD140;152.黑 ZK02I SD141;153.黑 ZK02I SD142;154.黑 ZK02I SD143;155.黑 ZK02I SD144;156.黑 ZK02I SD145;157.黑 ZK02I SD146;158.黑 ZK02I SD147;159.黑 ZK02I SD148;160.黑 ZK02I SD149;161.黑 ZK02I SD150;162.黑 ZK02I SD151;163.黑 ZK02I SD152;164.黑 ZK02I SD153;165.黑 ZK02I SD154;166.黑 ZK02I SD155;167.黑 ZK02I SD156;168.黑 ZK02I SD157;169.黑 ZK02I SD158;170.黑 ZK02I SD159;171.黑 ZK02I SD160;172.黑 ZK02I SD161;173.黑 ZK02I SD162;174.黑 ZK02I SD163;175.黑 ZK02I SD164;176.黑 ZK02I SD165;177.黑 ZK02I SD166;178.黑 ZK02I SD167;179.黑 ZK02I SD168;180.黑 ZK02I SD169;181.黑 ZK02I SD170;182.黑 ZK02I SD171;183.黑 ZK02I SD172;184.黑 ZK02I SD173;185.黑 ZK02I SD174;186.黑 ZK02I SD175;187.黑 ZK02I SD176;188.黑 ZK02I SD177;189.黑 ZK02I SD178;190.黑 ZK02I SD179;191.黑 ZK02I SD180;192.黑 ZK02I SD181;193.黑 ZK02I SD182;194.黑 ZK02I SD183;195.黑 ZK02I SD184;196.黑 ZK02I SD185;197.黑 ZK02I SD186;198.黑 ZK02I SD187;199.黑 ZK02I SD188;200.黑 ZK02I SD189;201.黑 ZK02I SD190;202.黑 ZK02I SD191;203.黑 ZK02I SD192;204.黑 ZK02I SD193;205.黑 ZK02I SD194;206.黑 ZK02I SD195;207.黑 ZK02I SD196;208.黑 ZK02I SD197;209.黑 ZK02I SD198;210.黑 ZK02I SD199;211.黑 ZK02I SD200;212.黑 ZK02I SD201;213.黑 ZK02I SD202;214.黑 ZK02I SD203;215.黑 ZK02I SD204;216.黑 ZK02I SD205;217.黑 ZK02I SD206;218.黑 ZK02I SD207;219.黑 ZK02I SD208;220.黑 ZK02I SD209;221.黑 ZK02I SD210;222.黑 ZK02I SD211;223.黑 ZK02I SD212;224.黑 ZK02I SD213;225.黑 ZK02I SD214;226.黑 ZK02I SD215;227.黑 ZK02I SD216;228.黑 ZK02I SD217;229.黑 ZK02I SD218;230.黑 ZK02I SD219;231.黑 ZK02I SD220;232.黑 ZK02I SD221;233.黑 ZK02I SD222;234.黑 ZK02I SD223;235.黑 ZK02I SD224;236.黑 ZK02I SD225;237.黑 ZK02I SD226;238.黑 ZK02I SD227;239.黑 ZK02I SD228;240.黑 ZK02I SD229;241.黑 ZK02I SD230;242.黑 ZK02I SD231;243.黑 ZK02I SD232;244.黑 ZK02I SD233;245.黑 ZK02I SD234;246.黑 ZK02I SD235;247.黑 ZK02I SD236;248.黑 ZK02I SD237;249.黑 ZK02I SD238;250.黑 ZK02I SD239;251.黑 ZK02I SD240;252.黑 ZK02I SD241;253.黑 ZK02I SD242;254.黑 ZK02I SD243;255.黑 ZK02I SD244;256.黑 ZK02I SD245;257.黑 ZK02I SD246;258.黑 ZK02I SD247;259.黑 ZK02I SD248;260.黑 ZK02I SD249;261.黑 ZK02I SD250;262.黑 ZK02I SD251;263.黑 ZK02I SD252;264.黑 ZK02I SD253;265.黑 ZK02I SD254;266.黑 ZK02I SD255;267.黑 ZK02I SD256;268.黑 ZK02I SD257;269.黑 ZK02I SD258;270.黑 ZK02I SD259;271.黑 ZK02I SD260;272.黑 ZK02I SD261;273.黑 ZK02I SD262;274.黑 ZK02I SD263;275.黑 ZK02I SD264;276.黑 ZK02I SD265;277.黑 ZK02I SD266;278.黑 ZK02I SD267;279.黑 ZK02I SD268;280.黑 ZK02I SD269;281.黑 ZK02I SD270;282.黑 ZK02I SD271;283.黑 ZK02I SD272;284.黑 ZK02I SD273;285.黑 ZK02I SD274;286.黑 ZK02I SD275;287.黑 ZK02I SD276;288.黑 ZK02I SD277;289.黑 ZK02I SD278;290.黑 ZK02I SD279;291.黑 ZK02I SD280;292.黑 ZK02I SD281;293.黑 ZK02I SD282;294.黑 ZK02I SD283;295.黑 ZK02I SD284;296.黑 ZK02I SD285;297.黑 ZK02I SD286;298.黑 ZK02I SD287;299.黑 ZK02I SD288;300.黑 ZK02I SD289;301.黑 ZK02I SD290;302.黑 ZK02I SD291;303.黑 ZK02I SD292;304.黑 ZK02I SD293;305.黑 ZK02I SD294;306.黑 ZK02I SD295;307.黑 ZK02I SD296;308.黑 ZK02I SD297;309.黑 ZK02I SD298;310.黑 ZK02I SD299;311.黑 ZK02I SD300;312.黑 ZK02I SD301;313.黑 ZK02I SD302;314.黑 ZK02I SD303;315.黑 ZK02I SD304;316.黑 ZK02I SD305;317.黑 ZK02I SD306;318.黑 ZK02I SD307;319.黑 ZK02I SD308;320.黑 ZK02I SD309;321.黑 ZK02I SD310;322.黑 ZK02I SD311;323.黑 ZK02I SD312;324.黑 ZK02I SD313;325.黑 ZK02I SD314;326.黑 ZK02I SD315;327.黑 ZK02I SD316;328.黑 ZK02I SD317;329.黑 ZK02I SD318;330.黑 ZK02I SD319;331.黑 ZK02I SD320;332.黑 ZK02I SD321;333.黑 ZK02I SD322;334.黑 ZK02I SD323;335.黑 ZK02I SD324;336.黑 ZK02I SD325;337.黑 ZK02I SD326;338.黑 ZK02I SD327;339.黑 ZK02I SD328;340.黑 ZK02I SD329;341.黑 ZK02I SD330;342.黑 ZK02I SD331;343.黑 ZK02I SD332;344.黑 ZK02I SD333;345.黑 ZK02I SD334;346.黑 ZK02I SD335;347.黑 ZK02I SD336;348.黑 ZK02I SD337;349.黑 ZK02I SD338;350.黑 ZK02I SD339;351.黑 ZK02I SD340;352.黑 ZK02I SD341;353.黑 ZK02I SD342;354.黑 ZK02I SD343;355.黑 ZK02I SD344;356.黑 ZK02I SD345;357.黑 ZK02I SD346;358.黑 ZK02I SD347;359.黑 ZK02I SD348;360.黑 ZK02I SD349;361.黑 ZK02I SD350;362.黑 ZK02I SD351;363.黑 ZK02I SD352;364.黑 ZK02I SD353;365.黑 ZK02I SD354;366.黑 ZK02I SD355;367.黑 ZK02I SD356;368.黑 ZK02I SD357;369.黑 ZK02I SD358;370.黑 ZK02I SD359;371.黑 ZK02I SD360;372.黑 ZK02I SD361;373.黑 ZK02I SD362;374.黑 ZK02I SD363;375.黑 ZK02I SD364;376.黑 ZK02I SD365;377.黑 ZK02I SD366;378.黑 ZK02I SD367;379.黑 ZK02I SD368;380.黑 ZK02I SD369;381.黑 ZK02I SD370;382.黑 ZK02I SD371;383.黑 ZK02I SD372;384.黑 ZK02I SD373;385.黑 ZK02I SD374;386.黑 ZK02I SD375;387.黑 ZK02I SD376;388.黑 ZK02I SD377;389.黑 ZK02I SD378;390.黑 ZK02I SD379;391.黑 ZK02I SD380;392.黑 ZK02I SD381;393.黑 ZK02I SD382;394.黑 ZK02I SD383;395.黑 ZK02I SD384;396.黑 ZK02I SD385;397.黑 ZK02I SD386;398.黑 ZK02I SD387;399.黑 ZK02I SD388;400.黑 ZK02I SD389;401.黑 ZK02I SD390;402.黑 ZK02I SD391;403.黑 ZK02I SD392;404.黑 ZK02I SD393;405.黑 ZK02I SD394;406.黑 ZK02I SD395;407.黑 ZK02I SD396;408.黑 ZK02I SD397;409.黑 ZK02I SD398;410.黑 ZK02I SD399;411.黑 ZK02I SD400;412.黑 ZK02I SD401;413.黑 ZK02I SD402;414.黑 ZK02I SD403;415.黑 ZK02I SD404;416.黑 ZK02I SD405;417.黑 ZK02I SD406;418.黑 ZK02I SD407;419.黑 ZK02I SD408;420.黑 ZK02I SD409;421.黑 ZK02I SD410;422.黑 ZK02I SD411;423.黑 ZK02I SD412;424.黑 ZK02I SD413;425.黑 ZK02I SD414;426.黑 ZK02I SD415;427.黑 ZK02I SD416;428.黑 ZK02I SD417;429.黑 ZK02I SD418;430.黑 ZK02I SD419;431.黑 ZK02I SD420;432.黑 ZK02I SD421;433.黑 ZK02I SD422;434.黑 ZK02I SD423;435.黑 ZK02I SD424;436.黑 ZK02I SD425;437.黑 ZK02I SD426;438.黑 ZK02I SD427;439.黑 ZK02I SD428;440.黑 ZK02I SD429;441.黑 ZK02I SD430;442.黑 ZK02I SD431;443.黑 ZK02I SD432;444.黑 ZK02I SD433;445.黑 ZK02I SD434;446.黑 ZK02I SD435;447.黑 ZK02I SD436;448.黑 ZK02I SD437;449.黑 ZK02I SD438;450.黑 ZK02I SD439;451.黑 ZK02I SD440;452.黑 ZK02I SD441;453.黑 ZK02I SD442;454.黑 ZK02I SD443;455.黑 ZK02I SD444;456.黑 ZK02I SD445;457.黑 ZK02I SD

2.96 mg/L, 其在梁 ZK03 孔较高, 为 1.76 ~ 2.96 mg/L; 在梁 ZK07 孔偏低, 为 0.74 ~ 1.03 mg/L; 且整体低于南翼山背斜构造区含量。Rb⁺ 含量最高 0.19 mg/L。Cs⁺ 含量除黑 ZK02 孔低于 0.10 外, 一般 0.51 ~ 1.14 mg/L。Sr²⁺ 含量 29.01 ~ 82.02 mg/L, 其在黑 ZK02 孔一带偏高, 其含量与尖顶山一线上新统上段狮子沟组的泥质岩、泥灰岩、石膏、天青石等互层的含盐岩的含矿岩系有关。Br⁻ 含量 0.68 ~ 59.61 mg/L, 其在梁 ZK03 中偏低, 一般 0.68 ~ 1.98 mg/L。I⁻ 含量最高 7.90 mg/L, 其在梁 ZK07 较高, 一般 7.65 ~ 7.90 mg/L; 梁 ZK05 中小于 0.001 mg/L(表 2)。

4.2 离子分布规律

为了描述承压孔隙卤水分布规律, 以研究区 5 个水化学类型为氯化物型的全分析样品(梁 ZK01、梁 ZK03、梁 ZK05SQ01、梁 ZK07、黑 ZK02)为研究对象进行分析研究。

4.2.1 离子分布特征

因受诸多因素控制, 盐湖卤水中各元素(在卤水中呈各种离子状态)的含量分布特征各不相同, 现用均匀性和是否服从正态分布来衡量它的分布特征。

为了定量地研究其均匀程度, 本文采用数理统计学中变异系数 C_v 表征。

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \bar{x}^2}}, \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (2)$$

式(1)中: C_v 为变异系数, x 为某种浓度算数平均值, x_i 为某种元素的一个分析数值, n 为分析的样品数。某种元素的 C_v 值越大, 表明它在卤水中分布的变化幅度就越大, 其分布呈不均匀性; 反之, C_v 越小, 则表明它在卤水中分布的变化幅度越小, 即分布比较均匀。

元素是否服从正态分布, 也是元素分布的主要特征之一。可利用数理统计方法中的偏态、峰态检验法予以判别各种组分浓度的频率分布直方图以及近似的频率分布函数曲线, 进而判断元素在卤水中的分布是否符合正态分布规律。

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{nS^3}, \quad (3)$$

$$C_e = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{nS^4} - 3, \quad (4)$$

式(3)和式(4)中符号同变异系数 C_v 公式, $C_s < 0$ 为负向偏离, $C_s > 0$ 为正向偏离; $C_e < 0$ 为低峰态, $C_e > 0$ 为高峰态。标准正态分布则 $C_s = 0, C_e = 0$ 。实际上允许有一定的差别, 认为属于正态分布。

调查区孔隙卤水离子成分的变异系数(C_v)、偏差系数(C_s)、和峰太系数(C_e)见表 3。按 C_v 值由小到大排列, 可得到如下列序。

若以 C_v 值等于 0.5 和 1 为界, 可以分出 3 组虚线所隔的组分。这表明孔隙卤水的离子变化幅度不同, 分布不完全均匀。总体而言, TDS、Cl⁻ 和 Na⁺ 的 C_v 值非常小, 表明它们在卤水中的浓度值基本很稳定, 变化幅度很小, 分布很均匀。Cs⁺、B₂O₃、Ca²⁺、Mg²⁺、Sr⁺、NO₃⁻、Rb⁺ 的 C_v 值大于前者, 但仍然在 0.5 以下, 表明这些元素的离子在卤水中也较稳定, 变化幅度不大, 分布较均匀。SO₄²⁻ 的 C_v 值较大, 表明此离子在卤水中分布不稳定、不均匀, 变化幅度较大。Br⁻、I⁻、Li⁺、K⁺ 离子成分介于二者之间。

从总的数值来看, C_v 值大于 1 的组分只有 1 个, 为 SO₄²⁻, 可见研究区孔隙卤水离子元素的分布相对比较均匀(张彭熹, 1987; 郑喜玉和刘建华, 1996)。

从表 3 可以看出, 孔隙卤水中, K⁺、SO₄²⁻、Li⁺、Br⁺ 和 I⁺ 呈非正态分布, 其中 K⁺、SO₄²⁻、Li⁺ 呈正偏高峰态, I⁺ 为正偏低峰态, Br⁺ 为负偏低峰态。Na⁺、Cl⁻、Ca²⁺、Sr²⁺、TDS、Rb⁺、Cs⁺ 及 NO₃⁻

表 3 研究区孔隙卤水分布特征

成分	C_v	C_s	C_e	特征
K ⁺	0.88	2.37	5.42	非正态正偏高峰态
Na ⁺	0.16	-2.39	7.77	正态负偏高峰态
Ca ²⁺	0.41	-1.50	1.46	正态负偏高峰态
Mg ²⁺	0.42	-0.40	-0.42	正态负偏低峰态
Cl ⁻	0.15	-3.44	12.88	正态负偏高峰态
SO ₄ ²⁻	1.99	2.88	7.24	非正态正偏高峰态
Li ⁺	0.79	2.33	5.37	非正态正偏高峰态
B ₂ O ₃	0.39	0.33	-1.87	正态正偏低峰态
Rb ⁺	0.50	0.87	-0.05	正态正偏低峰态
Cs ⁺	0.37	0.18	-2.13	正态正偏低峰态
Sr ²⁺	0.43	-1.24	1.23	正态负偏高峰态
Br ⁻	0.56	-1.12	-0.69	非正态负偏低峰态
I ⁻	0.70	-0.55	-1.54	非正态正偏低峰态
NO ₃ ⁻	0.44	0.44	-0.71	正态正偏低峰态
密度	0.02	-2.17	7.15	正态负偏高峰态
pH 值	0.02	-0.53	-0.25	正态负偏低峰态
矿化度(TDS)	0.16	-2.88	10.20	正态负偏高峰态

注: Cl⁻ < Na⁺ = TDS < Cs⁺ < B₂O₃ < Ca²⁺ < Mg²⁺ < Sr⁺ < NO₃⁻ < Rb⁺ ; < Br⁻ < I⁻ < Li⁺ < K⁺ ; < SO₄²⁻。

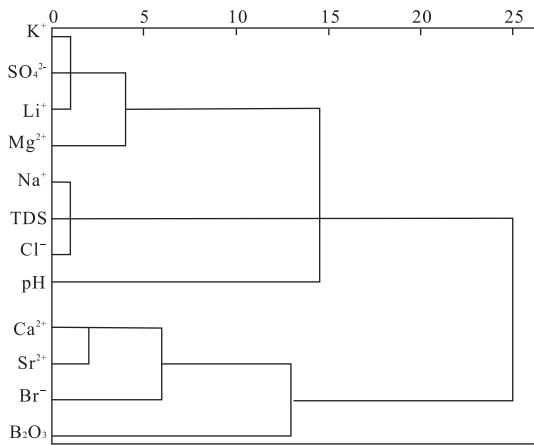


图 3 研究区孔隙卤水基本成分聚类分析

Fig.3 Pore brine basic component clustering analysis in the research area

呈正态分布,Na⁺、Cl⁻、Ca²⁺、Sr²⁺和 TDS 为呈负偏高峰态,Rb⁺、Cs⁺、NO₃⁻呈正偏低峰态。

4.2.2 基本成分聚类分析特征 从研究区基本成分聚类分析谱系图看(图 3),K⁺、SO₄²⁻、Li⁺首先聚为一类,然后和 Mg²⁺聚为一亚类,Cl⁻、TDS、Na⁺聚为一亚类,Ca²⁺、Sr²⁺、Br⁻、B₂O₃聚为一亚类。

4.2.3 离子变化特征 从离子含量变化曲线(图 4)中可以看出,纵向上,从西(梁 ZK10 孔)至东(黑 ZK01 孔),环阿尔金山山前近 50 km 范围内,Na⁺、Cl⁻含量和变化趋势相同,它们与矿化度、B₂O₃的变化趋势相同.K⁺、SO₄²⁻、Mg²⁺三种组分含量较一致,变化趋势相同,三者与 Li⁺的变化趋势相同。Ca²⁺、Sr²⁺变化趋势相同。

本次所采的样品中,钠氯系数 C_{Na}/C_{Cl}值 0.85~

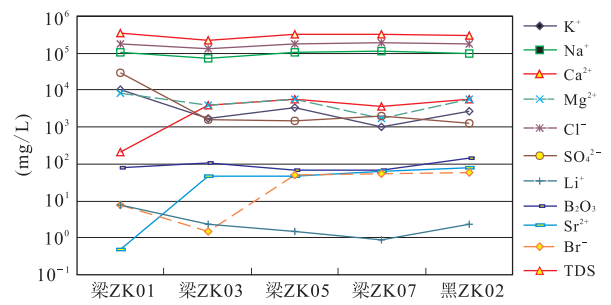


图 4 研究区深层孔隙卤水主要离子含量纵向变化曲线
Fig.4 Deep pore brine mainly ion content in vertical change curve in the research area

0.97,溴氯系数 0.01~0.34,钙镁系数值为 0.03~2.27,多数小于 2,脱硫系数 0.31~9.45。

4.3 相图及析盐规律

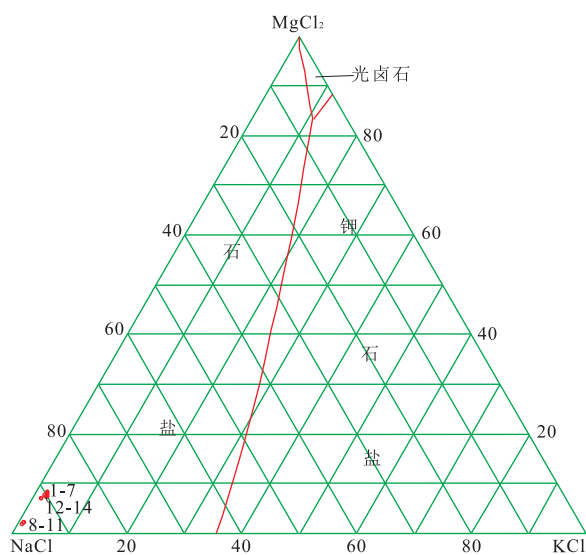
卤水水化学类型取决于其主要阳离子 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺和主要阴离子 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻的富含程度和相互作用,也就是说不同的水化学类型的卤水具有相应的主要离子组成和水盐平衡体系。根据表 2 主要化学组成,可以看出梁 ZK03、梁 ZK05、梁 ZK07 和黑 ZK02 孔样品主要离子平衡体系为:Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O。而梁 ZK01 孔样品主要离子平衡体系为:Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻、SO₄²⁻-H₂O。

4.3.1 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O 四元体系介稳相图 将梁 ZK03、梁 ZK05、梁 ZK07 和黑 ZK02 孔样品绘于(25 °C)Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O 四元体系介稳相图中(表 4,图 5),该卤水分布于石盐区中钾、镁很低,钠很高的区域,即石盐矿物结晶区,显示

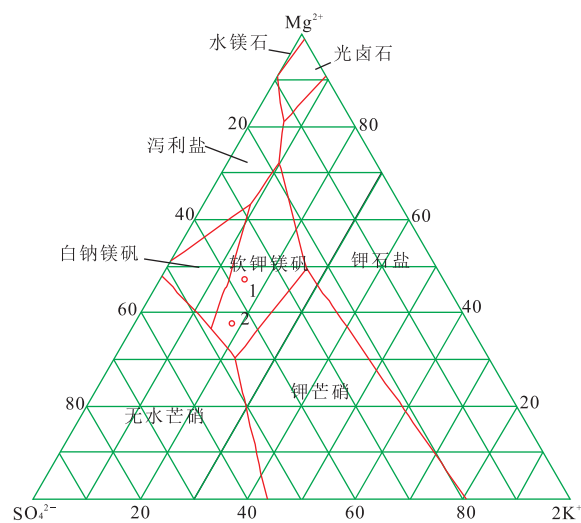
表 4 K⁺、Na⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O(25 °C)介稳相图指数

Table 4 K⁺, Na⁺, Mg²⁺//Cl⁻-H₂O 25 °C of interface stability phase diagram index

图点号	样品编号	水化学组分(%)			相图指数(%)		
		KCl	NaCl	MgCl ₂	KCl	NaCl	MgCl
1	梁 ZK03D01	0.31	17.36	1.53	1.588	90.531	7.881
2	梁 ZK03D02	0.21	9.7	0.88	1.873	90.248	7.878
3	梁 ZK03D03	0.32	20.45	1.60	1.423	91.509	7.068
4	梁 ZK05D01	0.54	21.39	1.83	2.254	90.118	7.628
5	梁 ZK05D02	0.53	21.53	1.81	2.208	90.222	7.570
6	梁 ZK05D03	0.51	21.57	1.79	2.142	90.426	7.432
7	梁 ZK05D04	0.52	21.72	1.80	2.155	90.395	7.450
8	梁 ZK07D03	0.18	23.88	0.59	0.733	96.907	2.359
9	梁 ZK07D04	0.18	24.37	0.58	0.703	96.985	2.312
10	梁 ZK07D05	0.16	24.5	0.55	0.637	97.165	2.198
11	梁 ZK07D06	0.13	24.34	0.51	0.517	97.457	2.026
12	黑 ZK02S(I)Q01	0.42	20.55	1.96	1.824	89.698	8.478
13	黑 ZK02S(II)D01	0.42	20.80	1.98	1.808	89.726	8.466
14	黑 ZK02S(II)D02	0.41	20.21	1.88	1.807	89.923	8.269

图 5 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- - H_2O (25 °C) 介稳相图Fig.5 K^+ , Na^+ , Mg^{2+} // Cl^- - H_2O (25 °C) of interface stability phase diagram表 5 研究区 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- - H_2O (25 °C) 度介稳相图指数Table 5 K^+ , Na^+ , Mg^{2+} // Cl^- - H_2O (25 °C) of interface stability phase diagram index table in the research area

图点号	样品编号	离子含量(g/L)			相图指数(%)		
		K^+	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	$2K^+$	Mg^{2+}	SO_4^{2-}
1	梁 ZK01D05	9.44	8.73	26.47	15.98	47.55	36.47
2	梁 ZK01D011	11.40	7.26	33.34	18.42	37.74	43.85

图 6 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- 、 SO_4^{2-} - H_2O (25 °C) 度介稳相图Fig.6 K^+ , Na^+ , Mg^{2+} // Cl^- , SO_4^{2-} - H_2O (25 °C) of interface stability phase diagram

卤水类型为单一的氯化物型。

4.3.2 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系

介稳相图 将梁 ZK01 孔样品绘于(25 °C) Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系介稳相图中(表 5、图 6),该卤水分布于软钾镁矾区域,即软钾镁矾矿物结晶区,显示卤水类型为单一硫酸镁亚型。

5 成因讨论

(1) 研究区孔隙卤水离子统计分析结果显示 TDS、 Cl^- 、 Na^+ 及 Cs^+ 、 B_2O_3 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^+ 、 NO_3^- 、 Rb^+ 在卤水中的浓度值稳定,变化幅度小,分布均匀,说明深层孔隙卤水体系中水—盐达到了一定的平衡。 Br^- 、 I^- 、 Li^+ 、 K^+ 变化幅度大于前者,均匀程度小于前者,说明卤水与周围储卤层之间发生了一定的物质交换。 SO_4^{2-} 的变化幅度大,分布极不均匀,表明孔隙卤水在部分地段与晶间卤水发生了很强的物质交换,致使 SO_4^{2-} 减少。

组分 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Li^+ 呈非正态分布,且呈正偏高峰态; Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 、TDS 呈正态分布,且呈负偏高峰态。成分聚类分析图中, K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Li^+ 首先聚为一亚类, Cl^- 、TDS、 Na^+ 聚为一亚类。离子含量变化曲线图及表格分析中说明,纵向上,从西至东,环阿尔金山山前近 50 km 范围内, Na^+ 、 Cl^- 含量和变化趋势相同,它们与 TDS、 B_2O_3 的变化趋势相同。 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 三种组分含量较一致,变化趋势相同,三者同时与 Li^+ 的变化趋势相同。这些从不同的角度说明两个问题,一是 K^+ 的来源与硫酸镁亚型晶间卤水有关,晶间卤水与孔隙卤水之间具有渊源性。二是孔隙卤水矿化度与溶解的石盐矿物($NaCl$)相关,水—盐的溶滤作用增强是卤水矿化度增高的重要因子。

(2) 根据表 2 可以看出,本次所采的样品中,钠氯系数 C_{Na}/C_{Cl} 值 0.85~0.96,和晶间卤水值(0.92)接近,而高于构造裂隙卤水值(0.78);溴氯系数 0.01~0.34,低值接近于晶间卤水值(0.1),高值接近于构造裂隙卤水值(0.31),同时与盐岩溶滤卤水的钠氯系数和溴氯系数较接近。钠氯系数(C_{Na}/C_{Cl} , 摩尔浓度比)的增高代表着地表风化作用带来更多的 Na 而明显缺少 Cl,卤水中的 C_{Na}/C_{Cl} (摩尔浓度比)、 $([Br^-] \times 1000)/[Cl^-]$ 两系数具有最大的稳定性。当 C_{Na}/C_{Cl} 约为 0.86~0.87, $([Br^-] \times 1000)/[Cl^-]$ 为 0.33 时,为海成沉积卤水;当 C_{Na}/C_{Cl} 值为 0.87~0.99 或更高和 $([Br^-] \times 1000)/[Cl^-]$ 值为 0.33 或更小时,则为岩盐溶滤卤水;当 C_{Na}/C_{Cl} 值小

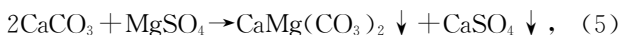
于 0.87 和 $([\text{Br}^-] \times 1\ 000)/[\text{Cl}^-]$ 值大于 0.33 时, 则为沉积变质卤水。

从表 2 中看到, 各样品的钙镁系数值为 0.01~2.27, 多数小于 2。钙镁系数 $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{Mg}^{2+}]$ 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 说明研究区孔隙形成时间短, 封闭性差, 变质程度低。

从表 2 可见, 所取样品脱硫系数 $100 \times [\text{SO}_4^{2-}]/2[\text{Cl}^-]$ 值为 0.39~1.18, 该值远低于晶间卤水值(10.67), 远高于构造裂隙卤水值(0.08)。脱硫作用主要发生在还原环境下, 脱硫作用作为一种环境指标, 封闭性越好, 其值越小。研究区孔隙卤水经历了硫酸盐的还原作用, 导致其脱硫系数低于晶间卤水值, 由于其封闭性差于南翼山背斜构造区构造裂隙水, 说明其脱硫作用弱于南翼山背斜构造。

(3) Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ 四元体系和 Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ (25 °C) 五元体系介稳相图中同一砂砾石层中采取的孔隙卤水样品, 其水化学类型表现为两种截然不同的类型, 一种为硫酸镁亚型, 另一种是氯化物型; 晶间卤水层内所采的样品皆为硫酸镁亚型, 孔隙卤水层内即表现为硫酸镁亚型, 又有氯化物型。这从介稳相图上说明孔隙卤水与晶间卤水具有内在的成因联系。

(4) 早更新世早期, 在丰水的地质环境中沉积的冲洪积扇群属古地下水向南的径流区, 在喜山运动影响下, 随着南部南翼山背斜构造、尖顶山背斜构造等的形成, 阻挡了古地下孔隙(淡)水向南运移, 冲洪积扇群由原来的径流区改变为古排泄区, 富集大量的原始孔隙(淡)水, 随后, 早更新世中晚期以来的粘土层、化学层沉积于砂砾石层顶部, 起到了盖层作用, 封存了冲洪积扇群中砂砾石层内的孔隙(淡)水。晶间卤水的储卤层一般形成于早更新早期—全新世, 时间跨度比较长, 因气候处于干燥, 或干冷与温暖(温)交替的古气候使湖水逐渐蒸发、浓缩、咸化, 沉积了含石膏、芒硝、岩盐等一套盐湖相蒸发岩系, 促使钾富集, 形成了富含钾的固体盐岩层, 因固液相转化作用, 同时形成了富含钾的晶间卤水。笔者推测, 由于喜山期第三幕构造运动, 致使硫酸镁亚型晶间卤水层内产生构造裂隙, 加之孔隙(淡)水水头高, 晶间卤水与其产生了水力联系, 产生化学反应, 析出固体硫酸盐的逆变质作用而形成孔隙卤水。同时产生如下反应式:



这种作用大量消耗了 Mg^{2+} , 析出白云石和石膏, 使硫酸镁亚型卤水发生逆变质作用, 形成氯化钠型卤水。

氯化物型孔隙卤水分布区段, 有大量的石膏沉积, 钻孔中薄片鉴定结果显示有大量碳酸盐(白云石化)析出, 且在氯化物型卤水中 Ca^{2+} 含量显示高异常; 聚类分析图中 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Li^+ 首先聚为一类, 然后和 Mg^{2+} 聚为一亚类, 说明后期其受碎屑层(含白云岩岩屑)影响较大。

6 结论

柴达木西部阿尔金山南麓早更新世早期砂砾石层中的孔隙卤水分布规模较大, 水位埋深 8~24 m, 接近地表, 富水性较强, 矿化度较高, KCl 含量达到可开发利用的要求, 结盐程度小, 容易开采, 可作为后续开发钾盐的备选区域。

通过离子统计分析, TDS、 Cl^- 、 Na^+ 、 Cs^+ 、 B_2O_3 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^+ 、 NO_3^- 、 Rb^+ 在卤水中的浓度变化幅度小, 分布较均匀, SO_4^{2-} 的变化幅度大, 分布极不均匀, Br^- 、 I^- 、 Li^+ 、 K^+ 变化幅度和均匀程度介于二者之间; 组分 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Li^+ 呈非正态正偏高峰态, Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 、TDS 呈正态负偏高峰态。成分聚类分析图中, K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Li^+ 首先聚为一亚类, Cl^- 、TDS、 Na^+ 聚为一亚类。离子含量变化曲线图及表格分析表明, 纵向上, 该孔隙卤水从东至西, Na^+ 、 Cl^- 含量和变化趋势相同, 且它们与矿化度、 B_2O_3 的变化趋势相同。 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 三种组分含量较一致, 变化趋势相同, 且同时与 Li^+ 的变化趋势相同。孔隙卤水钠氯系数值 0.85~0.97, 溴氯系数 0.01~0.34, 与盐岩溶滤卤水的 $C_{\text{Na}}/C_{\text{Cl}}$ 和 $([\text{Br}^-] \times 1\ 000)/[\text{Cl}^-]$ 之较接近。在 Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ 四元体系和 Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ (25 °C) 五元体系介稳相图中反映 2 种析盐规律, 一种为硫酸镁亚型, 另一种是氯化物型。现今的孔隙卤水可能是由析出于固体硫酸盐的晶间卤水与冲洪积扇群中砂砾石层内的原始承压孔隙(淡)水混合, 产生逆变质作用所形成。

References

- Chen, K.Z., Yang, S.X., Zheng, Y.X., 1981. The Salt Lakes on the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 36(1): 13-20 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J.S., Cao, D.Y., 2000. Evolution Characteristics of Ceno-

- zoic Structural Style in the Qaidam Basin, *Geological Review*, 46(5): 455—460 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Wan, C. B., Yang, J. G., et al., 2005. Cenozoic Structural Features and Deformation Regularities of the Northern Qaidam Basin, China. *Chinese Journal of Geology*, 40(3): 404—414 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Wang, P., Liu, Y. J., et al., 2009. Structural Features and Determination of Deformation Time in the Nanyishan-Jiandingshan Area of Qaidam Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(5): 796—802 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Yang, J. G., Wan, C. B., et al., 2004. Nature of Mesozoic Basins in the Northern Edge of Qaidam Basin. *Oil & Gas Geology*, 25(6): 620—624 (in Chinese with English abstract).
- Tang, L. J., Jin, Z. J., Dai, J. S., et al., 2002. Regional Fault Systems of Qaidam Basin and Adjacent Orogenic Belts. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 676—682 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. Y., Shi, J., Zhang, S. Y., et al., 2009. Evolution of Qaizhong Fault and Its Effects on the Basin Formation in Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 803—808 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. Y., Yin, C. M., Gong, Q. L., et al., 2006. Mesozoic-Cenozoic Structural Evolution in Qaidam Basin and Its Control over Oil and Gas. *China Petroleum Exploration*, (6): 9—16 (in Chinese with English abstract).
- Ye, C. Y., Wang, Z. M., Zhao, S. Q., et al., 2013. Study on Saline Lake. Science Press, Beijing, 15—23 (in Chinese).
- Yin, A., Dang, Y. Q., Chen, X., H., et al., 2007. Cenozoic Evolution and Tectonic Reconstruction of the Qaidam Basin: Evidence from Seismic Profiles. *Journal of Geomechanics*, 13(3): 193—211 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. X., 1987. Saline Lake in Qaidam Basin. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zheng, M. P., 2001. On Saline Lakes of China. *Mineral Deposits*, 20(2): 181—189 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X. Y., Liu, J. H., 1996. The Composition and Origin of Salt Lake Brines in Xinjiang. *Scientia Geographica Sinica*, 16(2): 115—123 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. X., Xu, F. Y., Hu, Y., 2003. Mesozoic and Cenozoic Tectonism and Its Control on Hydrocarbon Accumulation in the Northern Qaidam Basin of China. *Acta Petrolei Sinica*, 24(1): 19—24 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈克造, 杨绍修, 郑玉玺, 1981. 青藏高原的盐湖. *地理学报*, 36(1): 13—20.
- 戴俊生, 曹代勇, 2000. 柴达木盆地新构造样式的演化特点. *地质论评*, 46(5): 455—460.
- 刘志宏, 万传彪, 杨建国, 等, 2005. 柴达木盆地北缘地区新生代构造特征及变形规律. *地质科学*, 40(3): 404—414.
- 刘志宏, 王芃, 刘永江, 等, 2009. 柴达木盆地南翼山—尖顶山地区构造特征及变形时间的确定. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(5): 796—802.
- 刘志宏, 杨建国, 万传彪, 等, 2004. 柴达木盆地北缘地区中生代盆地性质探讨. *石油与天然气地质*, 25(6): 620—624.
- 汤良杰, 金之钧, 戴俊生, 等, 2002. 柴达木盆地及相邻造山带区域断裂系统. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(6): 676—682.
- 徐凤银, 施俊, 张少云, 等, 2009. 柴达木盆地柴中断裂带演化及其对成盆作用的控制. *石油学报*, 30(6): 803—808.
- 徐凤银, 尹成明, 巩庆林, 等, 2006. 柴达木盆地中、新生代构造演化及其对油气的控制. *中国石油勘探*, (6): 9—16.
- 叶传永, 王志明, 赵世勤, 等, 2013. 盐湖研究. 北京: 科学出版社, 15—23.
- 尹安, 党玉琪, 陈宣华, 等, 2007. 柴达木盆地新生代演化及其构造重建——基于地震剖面的解释. *地质力学学报*, 13(3): 193—211.
- 张彭熹, 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社.
- 郑绵平, 2001. 论中国盐湖. *矿床地质*, 20(2): 181—189.
- 郑喜玉, 刘建华, 1996. 新疆盐湖卤水成分及成因. *地理学报*, 16(2): 115—123.
- 周建勋, 徐凤银, 胡勇, 2003. 柴达木盆地北缘中、新生代构造变形及其对油气成藏的控制. *石油学报*, 24(1): 19—24.