

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.225>



柴达木盆地西部构造裂隙孔隙卤水 地球化学组成及来源示踪

李洪普¹, 潘彤², 李永寿^{1,3}, 靳芳¹, 韩光¹, 王国仓⁴

1. 青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室, 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海格尔木 816099
2. 青海省地质矿产勘查开发局, 青海西宁 810001
3. 中国科学院青海省盐湖研究所, 青海西宁 810008
4. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心, 甘肃兰州 730070

摘要: 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙卤水是我国重要的深层卤水资源之一, 关于其成因争论较大. 对柴达木盆地西部碱石山、红三早四号、鸭湖和俄博梁 II 号四个地区构造裂隙孔隙卤水样品的常量、微量元素以及 He、Ne、Ar 同位素进行了研究. 结果表明, 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙卤水钠氯系数介于 0.84~0.91, 钾系数介于 3.19~12.35, 钾氯系数介于 5.26~20.61, 脱硫酸系数介于 0.33~2.00; 水化学类型在 Piper 图上显示为 Cl-Na 型; 同位素中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 介于 0.01~0.16 Ra, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 介于 318~352, $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 介于 0.182~0.193, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 介于 9.8~10.6, $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 介于 0.025~0.032. 由此认为基岩山区岩石风化破碎, 其盐分被地下水迁移至盆地内, 经蒸发成盐、埋藏, 与深部地下水发生水-岩作用, 富集形成高矿化度构造裂隙孔隙卤水.

关键词: 构造裂隙孔隙卤水; $^3\text{He}/^4\text{He}$; $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$; $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$; 离子特征系数; 柴达木盆地西部; 地球化学.

中图分类号: P597.1; P619.2

文章编号: 1000-2383(2022)01-036-09

收稿日期: 2021-09-18

Geochemical Composition and Origin Tracing of Structural Fissure and Pore Brine in Western Qaidam Basin

Li Hongpu¹, Pan Tong², Li Yongshou^{1,3}, Jin Fang¹, Han Guang¹, Wang Guocang⁴

1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Salt Lake Resources Exploration and Research in Qaidam Basin, Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud 816099, China
2. Qinghai Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Xining 810001, China
3. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China
4. Lanzhou Research Center for Oil and Gas Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730070, China

Abstract: The structural fissure and pore brine in western Qaidam Basin is the most important deep brine resources in China, and its causes have been debated over many years. In this paper, it discusses its geochemical causes by studying its major, trace element characteristics and He, Ne, Ar isotopes of the brine samples from the Jianshishan, Hongsanhan IV, Eboliang II and Yahu areas in western Qaidam basin. It is shown that the sodium-chloride coefficients of structural fissure and pore brine in western

基金项目: 青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”高层次人才培养项目(No.2021-25); 青海省海西州科技局科技支撑计划项目(No.2019-Q05).

作者简介: 李洪普(1968—), 男, 教授级高工, 博士, 主要从事盐湖矿床勘查与成因研究. ORCID: 0000-0002-3837-6447. E-mail: 745430898@qq.com

引用格式: 李洪普, 潘彤, 李永寿, 靳芳, 韩光, 王国仓, 2022. 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙卤水地球化学组成及来源示踪. 地球科学, 47(1): 36-44.

Citation: Li Hongpu, Pan Tong, Li Yongshou, Jin Fang, Han Guang, Wang Guocang, 2022. Geochemical Composition and Origin Tracing of Structural Fissure and Pore Brine in Western Qaidam Basin. *Earth Science*, 47(1): 36-44.

Qaidam Basin range from 0.84 to 0.91, the potassium coefficients range from 3.19 to 12.35, the potassium-chlorine coefficients range from 5.26 to 20.61 and the desulfurization coefficients range from 0.33 to 2.00. The brine type is shown as the Cl-Na type on the Piper plot. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios range in 0.01–0.16 Ra, the $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios range from 318 to 352, the $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios range from 0.182 to 0.193, the $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ ratios range from 9.8 to 10.6 and the $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ ratios range from 0.025 to 0.032. Therefore, it is believed that the salt components formed by rock weathering were migrated to the basin by groundwater at first, and then evaporated into salt deposits, after being buried, the water-rock interaction occurred between these salt deposits and deep groundwater and then were enriched to form the structural fissure and pore brine with a high mineralization.

Key words: structural fissure and pore brine; $^3\text{He}/^4\text{He}$; $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$; $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$; ion characteristic coefficient; western Qaidam Basin; geochemistry.

柴达木盆地的深部卤水分为构造裂隙孔隙卤水、砂砾孔隙卤水和盐类晶间卤水三类(李洪普和郑绵平, 2014). 其中构造裂隙孔隙卤水(又称油田水)赋存于盆地的背斜构造区断层裂隙与地层孔隙之中, 水温 68~85 °C, 矿化度一般大于 50 g/L, 通常富含钾、硼、锂、溴、碘、铷、铯、稀有气体及重金属元素等(樊启顺等, 2007; 卢鋈等, 2021). 国内外学者对卤水的来源和演化做了大量研究, 取得了一系列成果, 陆相地下卤水物质来源比较复杂(Cai *et al.*, 2001), 盐分的来源包括古海水、大陆地表岩石和古盐壳、火山喷发物质和热水(McArthur *et al.*, 1989), 而水的主要来源包括大气降水、盆地封存水、壳源水或幔源水(Thompson, 1992; Plank, 1996; 毛景文和李荫清, 2001; 毛景文和李晓峰, 2004). 柴达木盆地构造裂隙孔隙卤水来源有大气降水(张彭熹, 1987; 谭红兵等, 2007)、中酸性火山岩的水、火山-地热水及地层中的蒸发盐(李廷伟等, 2006)等. 稀有气体(He、Ne、Ar)系指化学元素周期表中的零族元素, 化学性质不活泼, 在地球中含量稀少, 又称惰性气体; 由于它的化学惰性和低含量, 稀有气体被发现、研究和应用均较晚. 随着分析测试技术水平的提高, 研究者对稀有气体的物理化学性质有了较深的认识, 将其应用于矿物流体包裹体物源追踪, 也有大量学者将其应用于油气田成因研究(张宏福等, 2007; 朱祥坤等, 2013; 王立成等, 2014; 王淑丽等, 2019; 李延河, 2020). 本文使用此方法对柴达木盆地碱石山、红三早四号、鸭湖和俄博梁 II 号四个未开发地区构造裂隙孔隙卤水的成矿物质来源进行了探讨.

1 地质背景

柴达木盆地构造裂隙孔隙卤水地处塔里木-中朝板块的柴达木地块西部, 位于青藏高原隆升

带前缘的低凹处. 其北东以赛什腾山-宗务隆山断裂与南祁连褶皱系相连, 北西以阿尔金走滑断裂与塔里木盆地毗邻, 南部以昆北断裂与东昆仑造山带相接. 柴达木盆地中部为元古代柴中断裂, 是柴南古陆核和柴北增生体之间的地壳缝合带, 断裂以北为古近纪、新近纪背斜构造, 如冷湖 I-VII 号、俄博梁 I-III 号、红三早 I-IV 号、南翼山、大风山、碱石山、鸭湖等背斜构造, 其间分布昆特依、察汗斯拉图、大浪滩、三湖等凹地; 以南河流、湖泊发育, 相对低洼(图 1). 这种独特的地貌特征为柴达木盆地西部背斜构造区构造裂隙孔隙卤水的形成奠定了基础(汤良杰等, 2002; 李洪普等, 2015).

碱石 1 井、早 ZK01 孔、鄂 II 井和鸭 ZK01 孔为 4 个背斜构造区实施的油井(钻孔), 钻遇地层为古近系渐新统-第四系中更新统. 渐新统由下干柴沟组组成, 中新统由上干柴沟组和下油砂山组组成, 上新统由上油砂山组和狮子沟组组成. 不同地区沉积相变较大, 下干柴沟组为一套较深湖相沉积的灰紫色-灰色泥岩、棕色-灰色粉砂岩和泥质粉砂岩及深灰色泥灰岩; 上干柴沟组为一套半深湖相沉积的棕红色-灰紫色-灰色泥岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩为主夹灰色泥灰岩, 偶见炭质泥岩; 下油砂山组为一套浅湖-半深湖相沉积的黄色-棕红色-灰色泥岩、砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥质灰岩等; 上油砂山组以浅湖相灰色泥岩、砂质泥岩为主, 夹灰色泥质砂岩、泥质粉砂岩、灰黄色泥灰岩及少量灰色砂质灰岩、薄层灰质砂岩和白云质砂岩, 局部见石膏; 狮子沟组为浅湖-滨湖相沉积的以灰色泥岩、砂质泥岩为主, 夹少量灰色泥质粉砂岩; 第四系中下更新统为一套浅湖相灰白色粘土夹灰色粉砂质粘土、粘土粉砂, 局部见石盐层、石膏. 构造裂隙孔隙卤水赋存于以上地层的构造裂隙和地层孔隙之中, 多产于 3 000 m 以上中新统至上新统, 卤水水量较大的部位岩心相对破碎或较松散, 固结程度低(图 2).

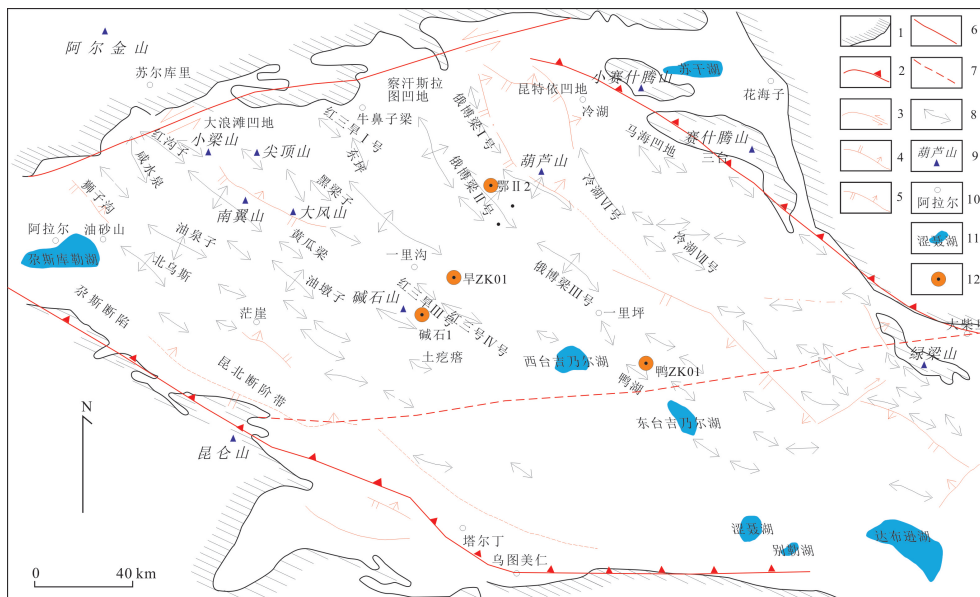


图 1 柴达木盆地西部地质构造图与采样位置

Fig. 1 Geological structure map and sampling location of western Qaidam Basin

- 1. 山区基岩; 2. 拟冲断裂; 3. 走滑断裂; 4. 正断层; 5. 逆断层; 6. 性质不明断层; 7. 推测断层(裂); 8. 背斜构造; 9. 山峰; 10. 地名; 11. 湖泊;
- 12. 采样钻孔位置

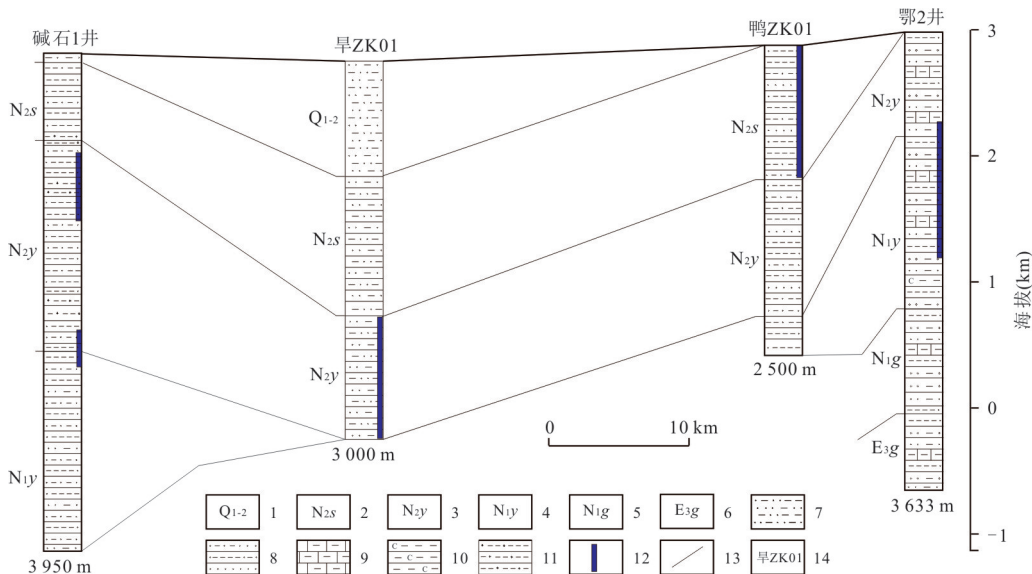


图 2 柴达木盆地西部地层对比与样品采集垂向位置

Fig. 2 Stratigraphic correlation and vertical location of sample collection in western Qaidam Basin

- 1. 第四系中下更新统; 2. 狮子沟组; 3. 上油砂山组; 4. 下油砂山组; 5. 上干柴沟组; 6. 下干柴沟组; 7. 粉砂粘土; 8. 粘土粉砂与粉砂、粉砂粘土互层;
- 9. 泥质灰岩; 10. 炭质泥岩; 11. 含石膏的泥岩; 12. 卤水样品采集位置; 13. 地质界限; 14. 钻孔位置

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

卤水化学分析样品和同位素样品分别采集于水文地质钻孔或油井施工揭露的构造裂隙孔隙卤水, 样品在各钻孔中的位置见图 2. 碱石 1 井采于上

油砂山组和下油砂山组的顶部(790~1 329 m 和 2 194~2 495 m), 旱 ZK01 井采于上油砂山组(2 000~3 000 m), 鸭 ZK01 采集于狮子沟组(1 000 m 以浅), 鄂 II2 井采于上油砂山组底部和下油砂山组(790~1 854.94 m). 碱石 1 井、鄂 2 井和鸭 ZK01 样品直接在自流(喷)井中罐取, 旱 ZK01 井

样品用泵抽取.为了对比,同位素样品采集容器为双阀钢化玻璃瓶,采样前在实验室将钢化玻璃瓶抽真空至系统内压力小于0.13 Pa,以便消除系统残留气对样品的干扰.采样时先将采样瓶放置在卤水中,依次打开上阀、下阀,采样瓶灌满后先后关闭上阀、下阀,保证空气污染小于 10^{-4} 量级.

2.2 样品测试

用一次性塑料滴管吸取缓缓滴入小烧杯中,准确量取20.0 mL样品,移入250 mL容量瓶中定容, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Li^+ 用电感耦合等离子体发射光谱法检测, Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 B_2O_3 用容量法检测,密度用比重瓶法检测.样品分析由青海省柴达木综合地质矿产勘查院测试中心完成,检测质量满足《地质矿产实验室测试质量管理规范DZ/T 0130-2006》的相关要求.

卤水样的氦、氖同位素由中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心测试完成.稀有气体测试仪器为英国Micromass公司生产的MM5400质谱计,标准样为兰州市皋兰山顶的空气(AIRLZ2007).实验条件为高压9.0 kV,测量氦和氖时Trap电流为800 μA . 4He 、 ^{20}Ne 用法拉第杯检测, 3He 用电子倍增器检测. 4He 、 ^{20}Ne 的本底分别为 1.10×10^{-14} mol、 1.82×10^{-1} mol.天然Ar同位素测定采用VG5400MS软件层序中的“峰跃迁法”,实测 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值为仪器接收到的信号电压比值,

等于天然气中 ^{40}Ar 原子和 ^{36}Ar 原子的摩尔比值. He 、 Ne 、 Ar 同位素的测量误差达到测定要求.

3 样品分析结果

3.1 卤水常、微量元素

研究区采集样品中矿化度为66.19~164.26 g/L; K^+ 含量为293.32~1 697.69 mg/L, Na^+ 含量为22 436.10~54 630.29 mg/L, Ca^{2+} 含量为2 024.58~7 125.17 mg/L, Mg^{2+} 含量为399.15~869.52 mg/L, Cl^- 含量为38 538.12~98 435.25 mg/L, SO_4^{2-} 含量为652.50~1 538.03 mg/L, CO_3^{2-} 含量为0, HCO_3^- 含量为19.60~84.08 mg/L, Li^+ 含量为31.65~102.00 mg/L, B_2O_3 含量为402.73~1 497.26 mg/L,密度为1.05~1.11 g/cm³.除 SO_4^{2-} 外,多数离子含量由盆地南西向北东递减(表1), K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 和 B_2O_3 含量达到盐湖和盐类矿产综合评价指标,具有较好的综合开发利用价值.

3.2 He、Ne、Ar同位素

研究区同位素样品中He含量为 41.0×10^{-6} ~ $1 168.1 \times 10^{-6}$,R/Ra值为0.01~0.16, $^3He/^4He$ 值为 1.95×10^{-8} ~ 2.27×10^{-7} , $^4He/^{20}Ne$ 值为3~904,Ne含量为 1.292×10^{-6} ~ 13.623×10^{-6} , $^{20}Ne/^{22}Ne$ 值为9.8~10.6, $^{21}Ne/^{22}Ne$ 值为0.025~0.032, $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值为318~352, $^{38}Ar/^{36}Ar$ 值为0.182~0.193(表2).

表1 背斜构造区构造裂隙孔隙卤水含量(mg/L)分析结果

Table 1 Analysis results of brine content (mg/L) from structural fissure pores in anticline

采样位置	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Li^+	B_2O_3	密度(g/cm ³)	矿化度(g/L)
碱石1井	1 697.69	48 416.40	3 743.53	399.15	82 377.88	831.40	0.00	84.08	102.00	1 497.26	1.10	139.07
旱ZK01	1 093.49	54 630.29	7 125.17	869.52	98 435.25	652.50	0.00	19.60	49.59	829.91	1.11	164.26
鸭ZK01	357.57	36 820.83	5 339.40	774.82	68 035.67	681.59	0.00	50.02	34.96	402.73	1.07	112.47
鄂II2井	293.32	22 436.10	2 024.58	601.31	38 538.12	1 538.03	0.00	63.65	31.65	694.20	1.05	66.19

表2 背斜构造区构造裂隙孔隙卤水同位素分析结果

Table 2 Isotopic analysis results of brine from structural fissure pores in anticline

采样位置	He(10^{-6})	R/Ra	$^3He/^4He$	$^4He/^{20}Ne$	Ne(10^{-6})	$^{20}Ne/^{22}Ne$	$^{21}Ne/^{22}Ne$	$^{40}Ar/^{36}Ar$	$^{38}Ar/^{36}Ar$
碱石1井	507.3	0.03	4.21×10^{-8}	55	9.297	10.4	0.028	-	-
旱ZK01	144.5	0.05	6.59×10^{-8}	11	13.623	9.8	0.032	332	0.182
鸭ZK01	41.0	0.16	2.27×10^{-7}	3	12.109	10.6	0.025	318	0.184
鄂II2井	1 168.1	0.01	1.95×10^{-8}	904	1.292	9.8	-	352	0.193

表 3 背斜构造区构造裂隙孔隙卤水特征系数

Table 3 Characteristic coefficients of brine from structural fissure pores in anticline

采样位置	Σ 盐	$K \times 10^3 / \Sigma$ 盐	$K \times 10^3 / Cl$	$Mg \times 10^2 / Cl$	$Cl \times 10^2 / \Sigma$ 盐	$\gamma Na / \gamma Cl$	$SO_4 \times 10^2 / 2Cl$
碱石 1 井	137 466.05	12.35	20.61	0.48	59.93	0.91	0.50
旱 ZK01	162 806.22	6.72	11.11	0.88	60.46	0.86	0.33
鸭 ZK01	112 009.89	3.19	5.26	1.14	60.74	0.84	0.50
鄂 II 2 井	65 431.46	4.48	7.61	1.56	58.90	0.90	2.00

4 讨论

4.1 特征系数与地质环境

在地下水水化学成分中,不同来源或者不同条件下形成的地下水,其某些离子比值存在明显的差别.因此,离子比值常被用来判断地下水的起源或成因.钠氯系数($\gamma Na / \gamma Cl$)是海水中具有最大稳定性的离子比值, $\gamma Na / \gamma Cl$ 系数反映了卤水中钠盐的富集程度(李廷伟等,2006).标准海水的 $\gamma Na / \gamma Cl$ 比值为 0.85,当地下水溶解地层时该值不断增加,一般大于 0.85 或接近 1;当其溶解钾盐或石盐时该值反而降低(周训等,2015).研究区地下水钠氯系数为 0.84~0.91(表 3),说明地下水溶解径流区不同盐度的地层(王大纯等,1980;李巧等,2015).

钾系数($K \times 10^3 / \Sigma$ 盐)和钾氯系数($K \times 10^3 / Cl$)反映卤水的富钾性.地下水溶滤石盐时钾系数小于 5,钾氯系数小于 10;溶滤含钾石盐时钾系数为 5~10,钾氯系数为 10~20(云南省地质局第十六地质队,1978).研究区地下水钾系数介于 3.19~12.35,钾氯系数介于 5.26~20.61;可能地下水溶滤地层盐度不同,含量较低的东部鸭湖和鄂 II 构造中地下水溶解了岩盐层,而含量较高的西南部碱石山和红三旱背斜构造中地下水溶解了含钾石盐层.镁氯系数($Mg \times 10^2 / Cl$)反映卤水的浓缩程度,石盐和钾盐层溶滤卤水的镁氯系数一般小于 0.16,只有在溶解光卤石岩和其他含镁硫酸盐型钾盐时才可能大于 0.16(云南省地质局第十六地质队,1978).研究区 4 个地区地下水镁氯系数为 0.48~1.56(表 3),可能与溶解地层中石膏(硫酸盐)有关.脱硫系数($SO_4 \times 10^2 / 2Cl$)反映地下水所处的封闭程度,该值越小,封闭程度越好,还原条件越好(周训等,2015;卢鋈等,2021).研究区脱硫系数为 0.33~2.00,说明地下卤水在运移过程中封闭程度比较好,还原条件比较强.

从主离子 piper 图上可以看出,研究区采样点阳离子落在($Na^+ + K^+$)端(C区),阴离子落在偏向 Cl^- 端(F区),最终落在 2 区(图 3),表明卤水的水化学

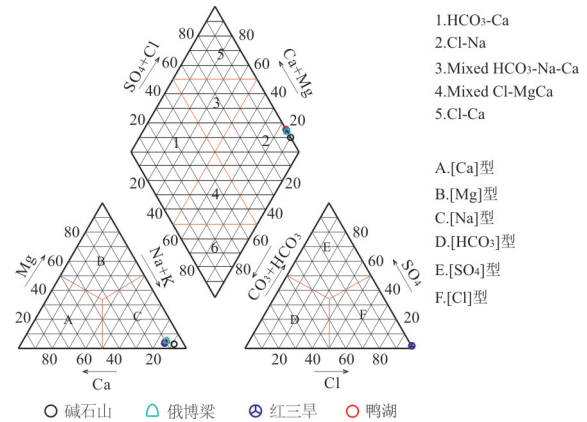


图 3 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙卤水 piper 三线图

Fig. 3 Piper diagram of brines in structural fissure in western Qaidam Basin

类型为 Cl-Na 型,一般认为其形成过程与地下水溶解岩盐层有关(周训等,2015;刘重芃等,2020;朱喜等,2021;孙英等,2021).

4.2 同位素与物源示踪

自然界产生稀有气体部分溶于水,溶解度随分子量的增大而增高;天然核过程可以归结为元素形成阶段核聚变反应产生的太阳系原始稀有气体组分(原始成因)、放射性衰变及其过程中诱发的核反应(放射性成因)和宇宙射线作用下产生的核反应(宇宙射线成因),这 3 种过程中形成的稀有气体同位素组成差异明显.而且稀有气体同位素在地幔、地壳和大气中变化较大(王先彬等,1993), $^3He / ^4He$ 、 $^{40}Ar / ^{36}Ar$ 、 $^{20}Ne / ^{22}Ne$ 和 $^{21}Ne / ^{22}Ne$ 在地幔、地壳和大气中有确定的值(徐胜等,1996a),因此可用稀有气体同位素比值追踪卤水及其储层的物源.

岩石和矿物中的 4He 可以由铀、钍衰变产生,有 $^{232}Th \rightarrow ^{208}Pb + ^4He + 4\beta^-$ 、 $^{238}U \rightarrow ^{206}Pb + 8^4He + 6\beta^-$ 和 $^{235}U \rightarrow ^{207}Pb + 7^4He + 4\beta^-$ 三种方式,天然 3He 可能为 $^6Li(n, \alpha)^3H \rightarrow ^3He + \beta^-$ 反应的结果; $^3He / ^4He$ 值变化很大,含锂矿物中 $^3He / ^4He$ 高达 1.2×10^{-5} ,而铀钍矿物中极低($< 10^{-8}$)(王先彬等,1993).表 2 显示 $^3He / ^4He$ 值为 $1.95 \times 10^{-8} \sim 2.59 \times 10^{-8}$,和铀钍矿物

接近,推断卤水储层可能来源于周缘山区的花岗岩。

地壳中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征值一般为 0.01~0.05 Ra,地幔流体中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征值一般为 6~9 Ra(Stuart *et al.*, 1995)。从表 2 可以看出,研究区卤水中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 0.01~0.16 Ra,除鸭 ZK01 孔卤水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(0.16 Ra)略高于地壳的特征值、远低于地幔流体中的特征值外,其他 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征值一般在 0.01~0.05 Ra 之间。流体中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 >0.1 Ra 意味着成矿流体中含幔源流体(Ballentine *et al.*, 2002),这表明鸭 ZK01 孔卤水很可能存在幔源 He。但是,根据壳-幔二元混合模式,卤水 He 比例可以根据以下公式计算得出(Kendrick *et al.*, 2001):

$$\Omega(\text{幔源氦})=$$

$$(R-R_c)/(R_m-R_c)\times 100\% \quad (\text{卢映钰等, 2014}), (1)$$

式中: R 为样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$, R_c 为地壳 $^3\text{He}/^4\text{He}$, R_m 为地幔 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 。地壳 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值下限为 2×10^{-8} ,地幔 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值下限为 1.1×10^{-5} (Stuart *et al.*, 1995)。计算得到鸭湖构造鸭 ZK01 孔卤水中地幔端元的比例约为 0.018%,显示卤水主要还是来源于地壳,地幔流体的参与量微不足道。

表 1 显示早 ZK01、鸭 ZK01 和鄂 II2 井卤水的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 318~352,均(略)高于大气降水 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的特征值 295.5,和地壳 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的特征值较一致,远低于地幔 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 特征值(4 000~12 000;Staudacher and Allègre, 1988;王先彬, 1989),反映卤水存在地壳放射性成因氩($^{40}\text{Ar}^*$)。卤水中放射性成因的 $^{40}\text{Ar}^*$ 可由下列公式计算(Kendrick *et al.*, 2001):

$$^{40}\text{Ar}^* = \frac{[^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}]_{\text{样品}} - 295.5}{(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{样品}} \times 100\%}. \quad (2)$$

计算结果显示,样品中放射性成因 $^{40}\text{Ar}^*$ 的含量为 7.07%~16.05%,平均为 11.37%,大气 Ar 的贡献为 83.95%~92.03%,平均为 87.99%,说明卤水储层形成中确实有大气降水的参与。

$R/R_a - ^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解(图 4)显示,鄂 II2 和早 ZK01 数据主要位于地壳端元,而鸭 ZK01 数据落在地壳端元附近,且与大气单元较接近、与幔源区较远(庞雅庆等, 2019),表明卤水中有很少的地幔流体的加入; $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 特征值则表明其也受到大气降水的影响,推断基岩山区的沉积岩受风化、剥蚀,搬运至盆地。

图 5 绘出了本研究中所测的同位素组成数据,

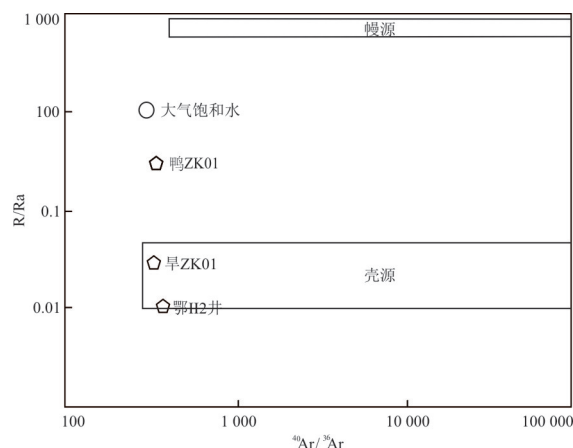


图 4 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙水 $R/R_a - ^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解
Fig. 4 $R/R_a - ^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ diagram of pore brine in structural fissure in western Qaidam Basin

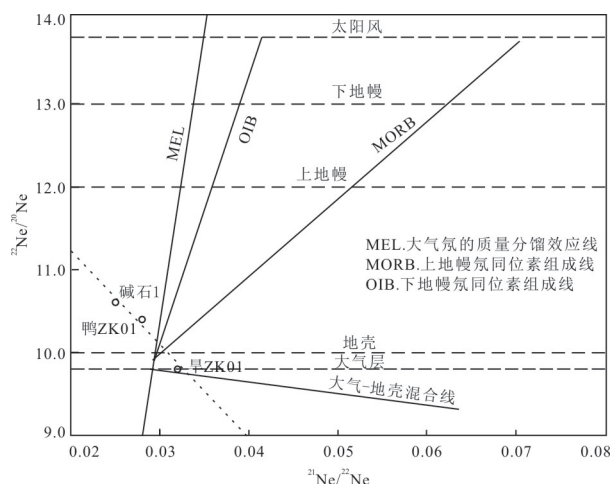


图 5 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙水氩同位素组成
Fig. 5 Ne isotopic composition of brines in structural fissure in western Qaidam Basin

同时也列出了塔里木盆地天然气的氩同位素组成为代表的大气-地壳混合线、大气氩的质量分馏效应线(MEL)、以 MORB 为代表的上地幔氩同位素组成线和以夏威夷 Loihi-Kilauea 的 OIB 为代表的下地幔氩同位素组成线(徐胜等, 1996a)以及 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比值在大气、地壳、上地幔和下地幔区中分布。图 5 显示,研究区的 3 个样品既有别于大气氩的质量分馏效应,也与大洋中脊和洋岛玄武岩代表的上、下地幔氩同位素组成不同。上述稀有气体丰度类型的讨论将氩的来源归因于与地下水中的溶解大气成分有关。因此,如果将 3 个样品与大气成分一起考虑, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 之间呈负相关直线关系,其回归方程为:

$$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}=(11.2\pm 0.01)-(0.04\pm 0.01)^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}, \quad (3)$$

延长回归线至 $^{20}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}=0$, 可得到 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}=0.4\pm 0.01$, 与平均地壳值 (0.47) 近似 (徐胜等, 1996b)。

4.3 构造裂隙孔隙卤水形成过程

综上所述,从古近纪至第四纪,柴达木盆地陆相沉积经历了河流相沉积和湖相→盐湖相多旋回沉积。自渐新世以来,盆地周缘基岩山区的各种岩石长期受自然界的风化、剥蚀,大多数破碎物质受流水、风和自身重力等作用,搬运到盆地内沉积,沉积方式有机械(河流相和湖相)沉积和化学(盐湖相)沉积,此时盐类物质向盆地迁移。盐湖相沉积发生在干旱的古气候条件下,地表蒸发作用使大量的原始地表水不断浓缩,结晶成盐。沉积过程中,最初沉积的松散物质被后继沉积物覆盖,在上覆厚达 3 000 m 以上的地层静压力和矿物结晶作用下,地层孔隙逐渐减小,产生原始地层水(地下水)。上新世晚期,在印度板块持续向北俯冲作用下,柴达木盆地新生界地层收缩,产生褶皱、断层和断层裂隙构造,形成地下水的运移通道和容水空间。在高承压和封闭的还原环境下,地下水在地层孔隙、断层裂隙等部位不断运移和循环,和围岩发生水-岩作用,产生物质交换,富集形成高矿化度卤水,即构造裂隙孔隙卤水。

5 结论

(1) 研究区构造裂隙孔隙卤水钠在 Piper 图上显示水化学类型为 Cl-Na 型,氯系数为 0.84~0.91,钾系数介于 3.19~12.35,钾氯系数介于 5.26~20.61,脱硫系数介于 0.33~2.00,构造裂隙孔隙卤水为溶滤水,经历了比较强的还原环境。

(2) 研究区同位素中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 0.01~0.16 Ra,与地壳特征值基本一致, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 318~352, $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 0.182~0.193,与大气降水参与有关; $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 值为 9.8~10.6, $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 值为 0.025~0.032,与地壳平均值近似,说明卤水最初来源于大气降水。

(3) 构造裂隙孔隙卤水是与大气降水有关的地下水通过溶解径流区岩石成分,迁移至盆地,在强还原环境下溶解岩盐层中盐分,逐步富集成高矿化度卤水。

References

- Ballentine, C. J., Burgess, R., Marty, B., 2002. Tracing Fluid Origin, Transport and Interaction in the Crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47(1): 539–614. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.13>
- Cai, C.F., Franks, S.G., Aagaard, P., 2001. Origin and Migration of Brines from Paleozoic Strata in Central Tarim, China: Constraints from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$ and Water Chemistry. *Applied Geochemistry*, 16(9–10): 1269–1284. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00006-3)
- Fan, Q.S., Ma, H.Z., Tan, H.B., et al., 2007. Characteristics and Origin of Brines in Western Qaidam Basin. *Geochimica*, 36(6): 601–611 (in Chinese with English abstract).
- Kendrick, M. A., Burgess, R., Patrick, R. A. D., et al., 2001. Fluid Inclusion Noble Gas and Halogen Evidence on the Origin of Cu-Porphyry Mineralising Fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(16): 2651–2668. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00618-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00618-4)
- Li, H.P., Zheng, M.P., 2014. Ore-Forming Geological Characteristics of Deep Brine Potassic Deposit in Western Qaidam Basin. *Mineral Deposits*, 33(S1): 935–936 (in Chinese).
- Li, H.P., Zheng, M.P., Hou, X.H., et al., 2015. Control Factors and Water Chemical Characteristics of Potassium-Rich Deep Brine in Nanyishan Structure of Western Qaidam Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(1): 41–50 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Zhou, J.L., Gao, Y.X., et al., 2015. Groundwater Hydro-Geochemistry in Plain of Manasi River Basin, Xinjiang. *Geoscience*, 29(2): 238–244 (in Chinese with English abstract).
- Li, T.W., Tan, H.B., Fan, Q.S., 2006. Hydrochemical Characteristics and Origin Analysis of the Underground Brines in West Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 14(4): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.H., 2020. Guest Editor's Preface to the "New Technologies of Isotope Analysis and Its Applications in Geology". *Acta Geoscientica Sinica*, 41(5): 583–589 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C.P., Zhang, H.X., He, J., et al., 2020. Study on Hydrochemical and Isotope Geochemical Characteristics of Shallow Groundwater. *Resources Environment & Engineering*, 34(2): 251–255 (in Chinese with English abstract).
- Lu, J., Pan, T., Li, Y.S., et al., 2021. A Preliminary Investigation of Hydrochemical Characteristics and Gene-

- sis of Deep Brine in the Central Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2129–2137 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. Y., Han, X. Q., Wang, Y. J., et al., 2014. The Hydrothermal Plumes over the Southwest Indian Ridge from 49° E to 56° E: Evidence from Helium Isotope Anomalies of Deep Seawater. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(6): 42–49 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Li, X. F., 2004. Mantle-Derived Fluids in Relation to Ore-Forming and Oil-Forming Processes. *Mineral Deposits*, 23(4): 520–532 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Li, Y. Q., 2001. Fluid Inclusions of the Dongping Gold Telluride Deposit in Hebei Province, China: Involvement of Mantle Fluid in Metallogenesis. *Mineral Deposits*, 20(1): 23–36 (in Chinese with English abstract).
- McArthur, J. M., Turner, J., Lyons, W. B., et al., 1989. Salt Sources and Water-Rock Interaction on the Yilgarn Block, Australia: Isotopic and Major Element Tracers. *Applied Geochemistry*, 4(1): 79–92. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(89\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0883-2927(89)90060-7)
- Pang, Y. Q., Fan, H. H., Gao, F., et al., 2019. Helium and Argon Isotopic Compositions of Fluid Inclusions and Tracing to the Source of Ore-Forming Fluids for the Southern Zhuguang Uranium Ore Field in Northern Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2765–2773 (in Chinese with English abstract).
- Plank, T., 1996. The Brine of the Earth. *Nature*, 380(6571): 202–203. <https://doi.org/10.1038/380202a0>
- Staudacher, T., Allègre, C. J., 1988. Recycling of Oceanic Crust and Sediments: The Noble Gas Subduction Barrier. *Earth and Planetary Science Letters*, 89(2): 173–183. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(88\)90170-7](https://doi.org/10.1016/0012-821x(88)90170-7)
- Stuart, F. M., Burnard, P. G., Taylor, R. P., et al., 1995. Resolving Mantle and Crustal Contributions to Ancient Hydrothermal Fluids: He-Ar Isotopes in Fluid Inclusions from Dae Hwa W - Mo Mineralisation, South Korea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(22): 4663–4673. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00300-2)
- Sun, Y., Zhou, J. L., Liang, X., et al., 2021. Distribution and Genesis of Shallow High-Iodine Groundwater in Southern Margin of Tarim Basin: A Case Study of Plain Area in Minfeng County, Xinjiang. *Earth Science*, 46(8): 2999–3011 (in Chinese with English abstract).
- Tan, H. B., Cao, C. D., Li, T. W., et al., 2007. Hydrochemistry Characteristics and Chemical Evolution of Oilfield Brines of the Paleogene and Neogene in Western Qaidam Basin. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 313–320 (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*, 27(6): 676–682 (in Chinese with English abstract).
- The 16th Geological Team of Yunnan Geological Bureau. How to Find Potassium. Geological Publishing House, Beijing, 106–123 (in Chinese).
- Thompson, A. B., 1992. Water in the Earth's Upper Mantle. *Nature*, 358(6384): 295–302. <https://doi.org/10.1038/358295a0>
- Wang, D. C., Zhang, R. Q., Shi, Y. H., 1980. Basic of Hydrogeology. Geological Publishing House, Beijing, 42–46 (in Chinese).
- Wang, L. C., Liu, C. L., Cao, K., et al., 2014. Progress in Applying Non-Traditional Isotopes to Tracing Origin of Brines in Sedimentary Basins. *Mineral Deposits*, 33(5): 909–920 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. L., Zheng, M. P., Wang, Y. M., et al., 2019. Advances and Development History of Geochemistry on Salt Lakes in China. *Science Technology and Engineering*, 19(9): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. B., 1989. Rare Gas Isotope Geochemistry and Cosmochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, X. B., Xu, S., Chen, J. F., et al., 1993. Gas Composition and Nitrogen Isoatlas Composition of Hot Springs in Tengchong Volcanic Area. *Chinese Science Bulletin*, 38(9): 814–817 (in Chinese).
- Xu, S., Xu, Y. C., Shen, P., et al., 1996a. Isotopic Composition of Rare Gases in Some Natural Gases in the Basins of Central and Western China. *Chinese Science Bulletin*, 41(12): 1115–1118 (in Chinese).
- Xu, S., Xu, Y. C., Shen, P., et al., 1996b. Isotopic Composition of Neon in Natural Gas in Eastern China Basin and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 41(21): 1970–1972 (in Chinese).
- Zhang, H. F., Tang, Y. J., Zhao, X. M., et al., 2007. Significance and Prospective of Non-Traditional Isotopic Systems in Mantle Geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 37–57 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. X., 1987. Salt Lake in the Qaidam Basin. Science Press, Beijing, 172–179 (in Chinese).
- Zhou, X., Cao, Q., Yin, F., et al., 2015. Characteristics of the Brines and Hot Springs in the Triassic Carbonates in the High and Steep Fold Zone of the Eastern Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1908–1920 (in Chinese).

nese with English abstract).

Zhu, X., Wang, G.L., Ma, F., et al., 2021. Hydrogeochemistry of Geothermal Waters from Taihang Mountain-Xiongan New Area and Its Indicating Significance. *Earth Science*, 46(7): 2594–2608 (in Chinese with English abstract).

Zhu, X.K., Wang, Y., Yan, B., et al., 2013. Developments of Non-Traditional Stable Isotope Geochemistry. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(6): 651–688 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

樊启顺, 马海州, 谭红兵, 等, 2007. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨. *地球化学*, 36(6): 601–611.

李洪普, 郑绵平, 2014. 柴达木盆地西部深层卤水钾盐矿成矿地质特征. *矿床地质*, 33(S1): 935–936.

李洪普, 郑绵平, 侯献华, 等, 2015. 柴达木西部南翼山构造富钾深层卤水矿的控制因素及水化学特征. *地球学报*, 36(1): 41–50.

李巧, 周金龙, 高业新, 等, 2015. 新疆玛纳斯河流域平原区地下水水文地球化学特征研究. *现代地质*, 29(2): 238–244.

李廷伟, 谭红兵, 樊启顺, 2006. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析. *盐湖研究*, 14(4): 26–32.

李延河, 2020. “同位素分析新技术与地质应用研究新进展” 专辑特邀主编寄语. *地球学报*, 41(5): 583–589.

刘重芑, 张宏鑫, 何军, 等, 2020. 浅层地下水水化学和同位素地球化学特征研究——以江汉平原西部为例. *资源环境与工程*, 34(2): 251–255.

卢望, 潘彤, 李永寿, 等, 2021. 柴达木盆地中部-里坪-西台吉乃尔地区深层卤水水化学特征及成因初探. *地质学报*, 95(7): 2129–2137.

卢映钰, 韩喜球, 王叶剑, 等, 2014. 西南印度洋 49°~56°E 洋脊段的热液羽状流: 来自深水中的氦同位素异常证据. *海洋学报(中文版)*, 36(6): 42–49.

毛景文, 李晓峰, 2004. 深部流体及其与成矿成藏关系研究现状. *矿床地质*, 23(4): 520–532.

毛景文, 李荫清, 2001. 河北省东坪碲化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系. *矿床地质*, 20(1): 23–36.

庞雅庆, 范洪海, 高飞, 等, 2019. 粤北诸广南部铀矿田流体包裹体的氦氩同位素组成及成矿流体来源示踪. *岩石*

学报, 35(9): 2765–2773.

孙英, 周金龙, 梁杏, 等, 2021. 塔里木盆地南缘浅层高碘地下水的分布及成因: 以新疆民丰县平原区为例. *地球科学*, 46(8): 2999–3011.

谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 等, 2007. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水资源水化学特征及化学演化. *古地理学报*, 9(3): 313–320.

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*, 27(6): 676–682.

王大纯, 张人权, 史毅虹, 1980. *水文地质学基础*. 北京: 地质出版社, 42–46.

王立成, 刘成林, 曹珂, 等, 2014. 沉积盆地卤水来源的非传统同位素示踪研究进展. *矿床地质*, 33(5): 909–920.

王淑丽, 郑绵平, 王永明, 等, 2019. 中国盐湖地球化学发展历程与研究进展. *科学技术与工程*, 19(9): 1–9.

王先彬, 1989. *稀有气体同位素地球化学和宇宙化学*. 北京: 科学出版社.

王先彬, 徐胜, 陈践发, 等, 1993. 腾冲火山区温泉气体组分和氦同位素组成特征. *科学通报*, 38(9): 814–817.

徐胜, 徐永昌, 沈平, 等, 1996a. 中国中西部盆地若干天然气藏中稀有气候同位素组成. *科学通报*, 41(12): 1115–1118.

徐胜, 徐永昌, 沈平, 等, 1996b. 中国东部盆地天然气中氦同位素组成及其地质意义. *科学通报*, 41(21): 1970–1972.

云南省地质局第十六地质队, 1978. *怎样找钾*. 北京: 地质出版社, 106–123.

张宏福, 汤艳杰, 赵新苗, 等, 2007. 非传统同位素体系在地幔地球化学研究中的重要性及其前景. *地学前缘*, 14(2): 37–57.

张彭熹, 1987. *柴达木盆地盐湖*. 北京: 科学出版社, 172–179.

周训, 曹琴, 尹菲, 等, 2015. 四川盆地东部高褶带三叠系地层卤水和温泉的地球化学特征及成因. *地质学报*, 89(11): 1908–1920.

朱喜, 王贵玲, 马峰, 等, 2021. 太行山-雄安新区蓟县系含水层水文地球化学特征及意义. *地球科学*, 46(7): 2594–2608.

朱祥坤, 王跃, 闫斌, 等, 2013. 非传统稳定同位素地球化学的创建与发展. *矿物岩石地球化学通报*, 32(6): 651–688.