

塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水化学特征、成因及矿物溶解-沉淀模拟

桂亚倩¹, 朱光有², 阮 壮¹, 曹颖辉², 沈臻欢¹, 常秋红¹, 陈郭平¹, 于炳松¹

[1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083]

摘要:通过对塔里木盆地塔北隆起英买-牙哈地区14口井以及轮探1井寒武系地层水的化学成分和离子比例系数的分析,以及水文地球化学模拟,明确了研究区塔北隆起寒武系地层水化学特征和成因与演化。结果表明:塔北隆起寒武系地层水是以 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Cl^- 为主的高矿化度 CaCl_2 型地层水。地层水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Cl^- 浓度与矿化度的相关性好, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度随埋深的增加呈先减小后增大的趋势,与矿化度随埋深的变化趋势一致,由此将地层水划分为越流泄水浓缩带和深部渗滤浓缩带。钠氯系数为0.39~0.55,平均值为0.51;脱硫酸系数为0.07~1.91,平均值为0.35。Phreeqc软件模拟矿物饱和指数得出:白云石的饱和指数为-3.43~1.95,平均值为-0.10,50.91%的白云石沉淀;石膏的饱和指数为-1.77~0.12,平均值为-0.80,94.64%的石膏溶解;方解石的饱和指数为-0.88~1.62,平均值为0.55,18.18%的方解石溶解。研究区塔北隆起方解石的白云石化和石膏溶解导致现今地层水中 Ca^{2+} 富集, Mg^{2+} 亏损。塔北隆起寒武系地层水变质程度小,是由海水经历蒸发浓缩、离子吸附和水-岩相互作用演变形成的。

关键词:地球化学特征;水-岩相互作用;Phreeqc软件;地层水;寒武系;塔北隆起;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical features and origin of the Cambrian formation water in Tabei Uplift, Tarim Basin and its mineral dissolution-precipitation simulation

Gui Yaqian¹, Zhu Guangyou², Ruan Zhuang¹, Cao Yinghui², Shen Zhenhuan¹,
Chang Qiuhong¹, Chen Guoping¹, Yu Bingsong¹

[1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

Abstract: The chemical compositions and ion ratio coefficient of the Cambrian formation water taken from 14 wells in Yingmai and Yaha areas and Well Luntan 1 in the Tabei Uplift, Tarim Basin, are analyzed and applied to carry out hydrogeochemical simulation, with the geochemical characteristics, origin and evolution of formation water therein clarified. The results show that the Cambrian formation water in the study area is of CaCl_2 type, high in total dissolved solids (TDS), and dominated by $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ and Cl^- . The concentration of $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ and Cl^- is well correlated with TDS of the formation water. Concentration of ions like $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} tends to decrease first and then increase with the increase of burial depth, consistent with the trend of TDS change with burial depth. Vertically, two hydrochemical zones can be identified in the study area: an overflow-discharge concentration zone and a deep percolation concentration zone. Its sodium-chloride coefficient ranges from 0.39 to 0.55, averaging 0.51; de-sulfuric acid coefficient varies from 0.07 to 1.91 with an average value of 0.35. The results of mineral saturation index simulation by Phreeqc software suggest that saturation index of dolomite ranges from -3.43 to 1.95 with an average of -0.10, and 50.91% of the dolomite is precipitated; the saturation index of gypsum ranges from -1.77 to 0.12 with an average of -0.80, and 94.64% of the gypsum is dissolved; the saturation index of calcite ranges from -0.88 to 1.62 with an average of 0.55, and 18.18% of the calcite is dissolved. A combination of calcite dolomitization and gypsum dissolution in the study area leads to enrichment of Ca^{2+} and deficit of Mg^{2+} in the current formation water. The Cambrian

收稿日期:2020-11-04;修订日期:2021-11-22。

第一作者简介:桂亚倩(1996—),女,硕士研究生,储层地质学。E-mail: guiyaqian@cugb@gmail.com。

通讯作者简介:于炳松(1962—),男,博士、教授,含油气盆地沉积学、层序地层学和储层地质学。E-mail: yubs@cugb.edu.cn。

基金项目:中国石油天然气集团公司重大科技项目(2019B-04);国家自然科学基金项目(2652014036)。

formation water low in metamorphic degree in the study area, can be attributed to seawater evaporation and concentration, ion adsorption and water-rock interactions.

Key words: geochemical characteristics, water-rock interaction, Phreeqc software, formation water, Cambrian, Tabei Uplift, Tarim Basin

引用格式: 桂亚倩, 朱光有, 阮壮, 等. 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水化学特征、成因及矿物溶解-沉淀模拟[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 196-206. DOI: 10. 11743/ogg20220116.

Gui Yaqian, Zhu Guangyou, Ruan Zhuang, et al. Geochemical features and origin of the Cambrian formation water in Tabei Uplift, Tarim Basin and its mineral dissolution-precipitation simulation[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 196-206. DOI: 10. 11743/ogg20220116.

地层水是沉积盆地同生沉积水的蒸发残余^[1], 存在于岩石多孔介质的孔隙中, 常在储层中与油气共生^[2]。沉积盆地的形成与演化主要是在流体参与背景下进行的, 地层水与围岩长期复杂的化学反应注定了彼此间紧密的物质能量运动与交换^[3-5]。地层水来源广泛, 可以是海水、大气降水、沉积水、深成水或几种水的混合物^[6]。地层水矿化度受蒸发浓缩、盐岩矿物溶解和泥页岩的薄膜过滤等作用控制^[2,6]。此外, 水岩相互作用, 如方解石的白云石化、斜长石的钠长石化和离子交换, 也是改变地层水原始化学组成的重要过程。可以说, 现今沉积盆地中的地层水是储层与流体不断相互作用的结果, 是储层成岩演化历史的良好记录^[7]。因此, 了解地层水的化学特征和来源, 模拟矿物溶解-沉淀的过程和结果是研究成岩演化历史和储层物性的重要方式。

塔里木盆地寒武系-奥陶系发育大量岩溶成因的碳酸盐岩储层。这些岩溶储层有些与表生岩溶作用相关, 部分则是在埋藏背景中的地层水条件下逐渐形成的。近些年, 地层水条件与储层形成的相关性逐渐受到重视, 前人针对塔里木盆地奥陶系地层水做了不少研究, 例如, 李鹏春等^[8]通过对地层水化学特征的研究, 讨论了地层水成因与演化; 杨春龙等^[9]分析了地层水矿化度、离子组成、离子比例系数与现今海水的差异, 总结了英买2地区储层类型与地层水化学特征之间的关系; 王祥等^[10]通过对地层水化学组成和化学指数的分析研究, 讨论了塔中北斜坡地层水的成因以及油气保存条件; 刘大永等^[11]认为不同类型油气藏是导致地层水特征变化的影响因素。与此同时, 受到塔里木盆地寒武系钻井资料不足的限制, 目前对寒武系地层水的研究还很少。塔北轮台凸起的英买-牙哈地区寒武系是重要的含油气层位, 并且轮南低凸起的轮探1井在8 200 m之下的超深层油气勘探中也获得重大突破^[12]。因此, 塔里木盆地深层-超深层油气勘探和研究正引起广泛的关注。本文通过对塔北隆起寒武系地层水资料的分析, 结合矿物溶解-沉淀的软件模拟, 明

确了地层水的地球化学特征、水岩作用类型以及成因与演化, 为深入研究该区寒武系成岩作用和孔隙演化提供理论依据。

1 地质背景

塔里木盆地位于中国西北部、新疆南部, 是中国典型的叠合盆地和最大的内陆盆地, 具有“四隆六坳”的构造格局(塔北隆起、塔中隆起、巴楚隆起、塔东隆起, 库车坳陷、阿瓦提坳陷、西南坳陷、塘古坳陷、东南坳陷和满加尔坳陷)。塔里木盆地被北面的天山、西南面的昆仑山和东南面的阿尔金山围绕, 东西长约1 500 km, 南北宽约600 km, 总面积约 $560 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[13-15](图1a)。塔里木盆地经历了多期构造演化, 不同的演化阶段发育不同类型的盆地, 在前震旦纪克拉通结晶基底之上震旦纪-泥盆纪发育海相地层, 石炭纪-二叠纪发育海相-陆相过渡地层, 三叠纪-第四纪发育陆相沉积岩^[14]。

研究区塔北隆起位于塔里木盆地北部。受古生界大断裂的控制, 塔北隆起由西向东可以分为6个次级构造单元, 呈现“两凹四凸”的格局: 英买力低凸起、轮台低凸起、哈拉哈塘凹陷、轮南低凸起、草湖凹陷以及库尔勒鼻状凸起^[16](图1b)。研究区寒武系被细分为6个组: 下寒武统玉尔吐斯组、肖尔布拉克组和吾松格尔组, 中寒武统沙依里克组和阿瓦塔格组, 以及上寒武统丘里塔格组(图1c)。从岩性特征看, 玉尔吐斯组由一套深水盆地相的泥岩和白云岩构成; 肖尔布拉克组由一套台地相、台缘礁相和浅滩相的礁云岩和泥岩组成, 局部夹鲕粒白云岩; 吾松格尔组由一套萨布哈或其他蒸发环境的白云岩和膏岩组成; 沙依里克组由一套萨布哈或其他蒸发环境的粉细晶、细晶白云岩和膏岩组成; 阿瓦塔格组由一套台地浅滩相的膏岩、膏质云岩和泥质云岩构成; 丘里塔格组由一套限制性碳酸盐台地相的粉-细晶、细晶白云岩组成, 局部夹藻云岩、鲕粒白云岩和泥质云岩^[13,17-18]。



图1 塔里木盆地构造纲要及地层综合柱状图(据文献[12],[13]和[16]修改)

Fig. 1 Outline map of structure and stratigraphic column of the Cambrian in the Tarim Basin (modified from references[12,13,16])

a. 塔里木盆地构造纲要图;b. 塔北隆起构造纲要图和井位;c. 塔北隆起寒武系地层综合柱状图

2 地层水化学特征及岩性特征

本研究的地层水数据和岩心样品采自于轮台凸起中西段的英买-牙哈地区14口井和轮探1井(图1b),相关数据和样品来自中国石油勘探开发研究院。

2.1 地层水化学特征

通过对地层水的常规无机化学离子成分与现今海水离子成分进行对比和分析,将地层水分为4类:深成环境的 CaCl_2 型、海洋环境的 MgCl_2 型、大陆环境的 Na_2SO_4 型和大陆环境的 NaHCO_3 型^[19-20]。地层水矿化度(TDS)是岩石多孔介质孔隙中的地下水动力场和水

化学场长期复杂演化的结果,与地层水来源、古沉积环境、埋深和蒸发浓缩程度等地质因素有关^[21]。塔北隆起寒武系地层水均为 CaCl_2 型,矿化度为93 900~242 000 mg/L,平均值为156 795 mg/L,都远高于海水35 000 mg/L,最大矿化度可达正常海水的7倍(35 000 mg/L)。塔北隆起寒武系地层水中主要离子有7种:钠离子(Na^+)、钾离子(K^+)、钙离子(Ca^{2+})、镁离子(Mg^{2+})、氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})和重碳酸根离子(HCO_3^-)。地层水中阳离子以 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量为主, Ca^{2+} 含量次之, Mg^{2+} 含量最低,阳离子之间依次相差1~2个数量级, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量主要在30 000~70 000 mg/L,部分水样超过70 000 mg/L;阴离子以 Cl^- 含量为主, SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 含量很低且相差不大,但跟 Cl^- 相比均差3个

数量级, Cl^- 含量主要在 56 000 ~ 130 000 mg/L, 部分水样达 140 000 mg/L。地层水 pH 值为 4.26 ~ 7.10, 为酸性-偏酸性水样(表 1)。

从塔北隆起寒武系地层水的阴-阳离子浓度与矿化度的相关性(图 2)可以看出: $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 Cl^- 浓度与矿化度总体相关性好, 为富集性离子, 含量高, 且随矿化度的增加, 富集程度增高; Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度随矿化度的增加也有增加的趋势, 但相关性差; HCO_3^- 浓度随矿化度的增加有减少的趋势, 与矿化度之间没有明显的相关性。

2.2 地层水分布特征

通常地层水矿化度并非随埋深的增加而简单的增大或减小, 根据总矿化度和各离子浓度垂向分布特征将地层水化学剖面从浅到深可划分为大气水下渗淡化带、近地表蒸发浓缩带、越流泄水浓缩带、泥岩压实排水淡化带和深部渗滤浓缩带 5 个典型剖面^[22]。本研究收集的塔北隆起寒武系地层水数据点分布于埋深 5 000 ~ 8 500 m, 地层水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度均随埋深的增加呈先减小后增大的趋势, 而 HCO_3^-

表 1 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水化学成分统计

Table 1 Chemical composition statistics of the Cambrian formation water in the Tabei Uplift, Tarim Basin

pH	矿化度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	离子浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)					
		$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
4.26~7.10	93 900 ~ 242 000	28 600 ~ 73 000	3 810 ~ 21 610	267 ~ 5 542	55 700 ~ 140 000	36.3 ~ 2 670	0 ~ 723
6.26(56)	156 795(56)	47 710(56)	9 701(56)	1 190(56)	94 546(56)	381(56)	244(56)

注: 表中数据为最小值~最大值
平均值(样品数)。

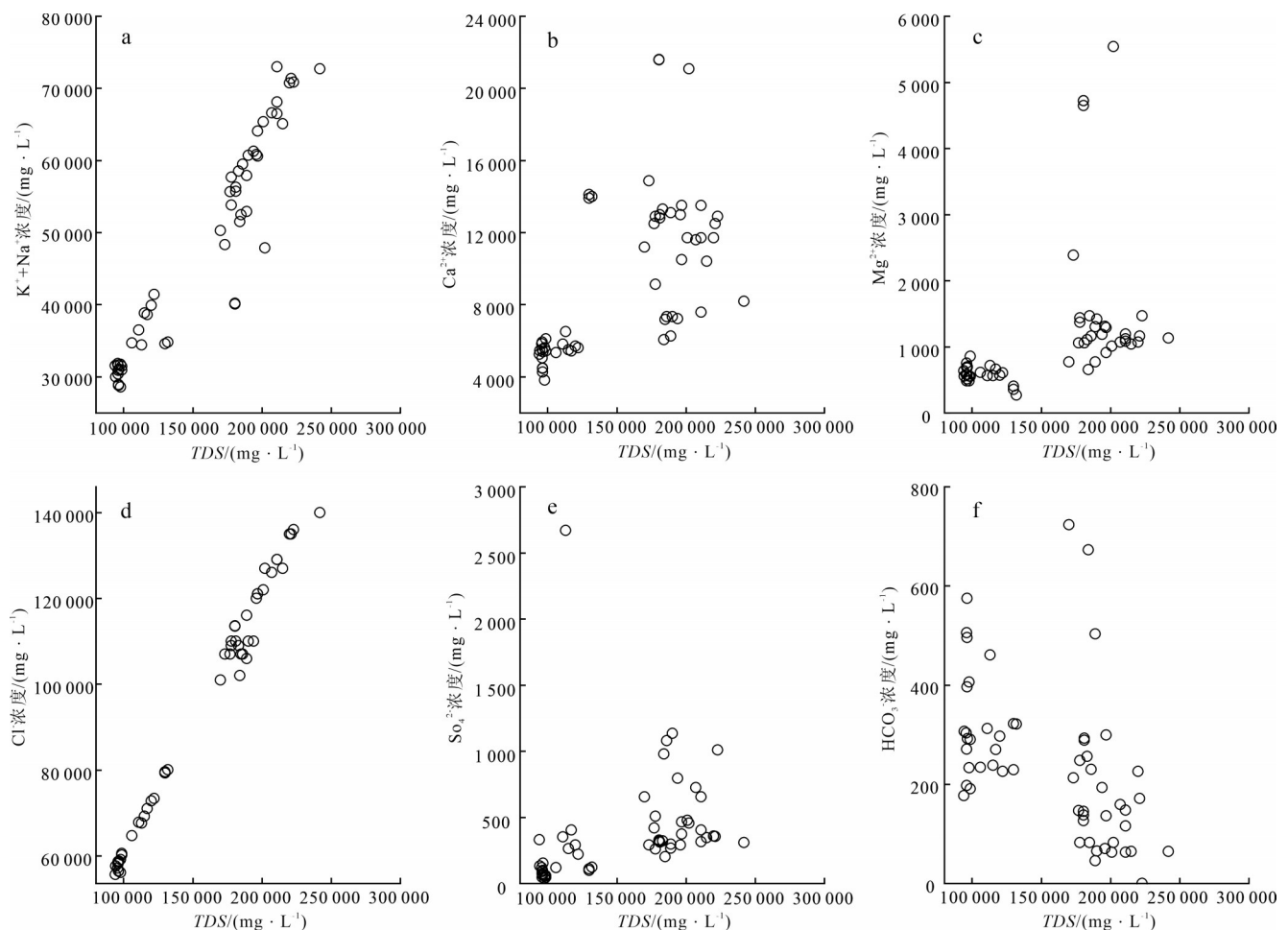


图 2 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水中各离子浓度与矿化度(TDS)的相关性

Fig. 2 Correlation of ion concentration with TDS of the Cambrian formation water in the Tabei Uplift, Tarim Basin

a. $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 与 TDS; b. Ca^{2+} 与 TDS; c. Mg^{2+} 与 TDS; d. Cl^- 与 TDS; e. SO_4^{2-} 与 TDS; f. HCO_3^- 与 TDS

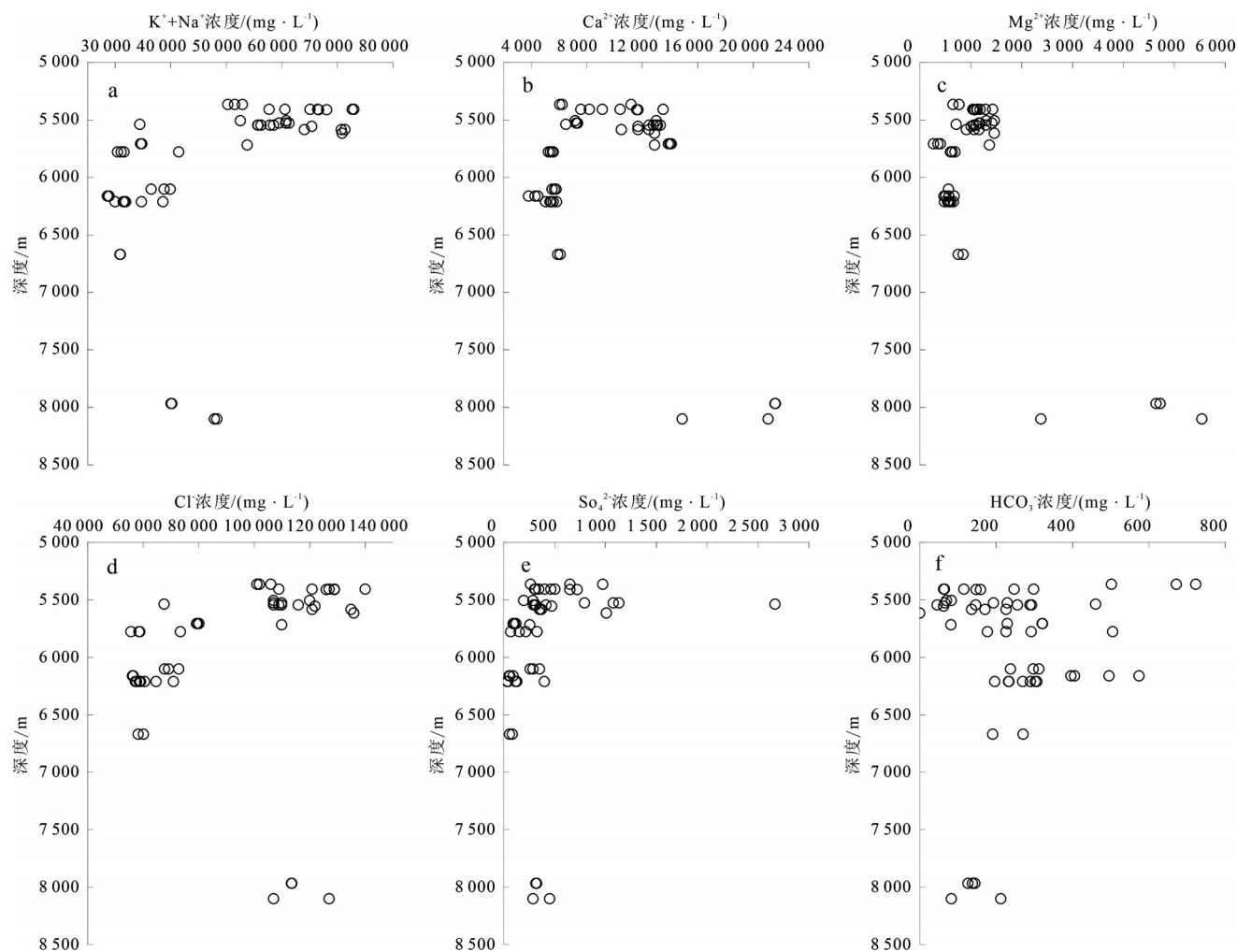


图3 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水中各离子浓度垂向变化趋势

Fig. 3 Vertical concentration variation of ions in the Cambrian formation water in the Tabei Uplift, Tarim Basin

a. $K^+ + Na^+$; b. Ca^{2+} ; c. Mg^{2+} ; d. Cl^- ; e. SO_4^{2-} ; f. HCO_3^-

浓度总体上呈波动式减小(图3)。在5 500~6 750 m的埋深范围,矿化度随着埋深变浅快速增大,即越流泄水浓缩带(A),主要集中在英买地区,地层水向上越流的过程中发生压滤浓缩,导致矿化度和主要离子浓度升高。随着埋深逐渐增加(>6 500 m),地层温度和压力增加,水岩反应强烈,地层水进入深部渗滤浓缩带(B)。根据地层水化学性质和离子分布特征将其划分为越流泄水浓缩带(A)和深部渗滤浓缩带(B)(图4)。

2.3 地层水离子比例系数

地层水离子比例系数可以反映地下水的变质程度、氧化还原程度、水文地球化学环境和水-岩相互作用强度^[7-8, 23-26]。常用的离子比例系数为:钠氯系数(r_{Na^+}/r_{Cl^-})和脱硫酸系数($100r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$)。通常情况下,标准海水的钠氯系数约为0.85,由于吸附、水-岩相互作用等,使得地层水中的 Na^+ 逐渐减少,而 Cl^- 通常变化

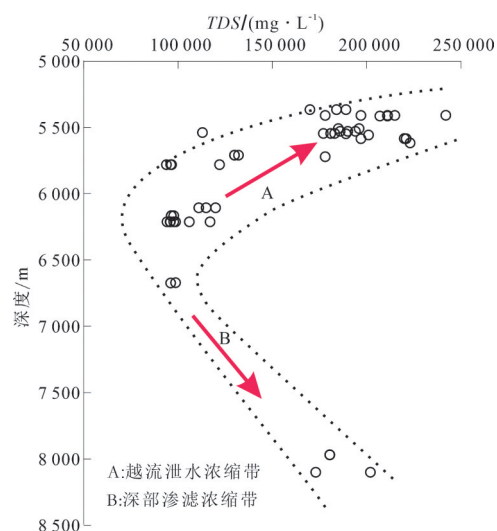


图4 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水矿化度(TDS)随埋深的变化趋势

Fig. 4 Variation of TDS of the Cambrian formation water with depth in the Tabei Uplift, Tarim Basin

不大。因此,在埋藏的过程中该系数通常趋于变小。一般来说,在厌氧硫酸盐还原细菌的作用下, SO_4^{2-} 还原成硫化物,脱硫酸系数小于1,地层水还原较彻底,且越小储存条件越好,反之,则认为还原作用不彻底,可能受大气淡水淋滤氧化作用的影响^[7,9,23,25]。

塔北隆起寒武系地层水的钠氯系数为0.39~0.55,平均值为0.51,低于海水值;脱硫酸系数为0.07~1.91,平均值为0.35,低于海水值(表2)。这说明塔北隆起寒武系封闭性强,阳离子吸附和水-岩相互作用都比较强烈。

表2 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水离子比例系数
Table 2 Ion ratio coefficient of the Cambrian formation water in the Tabei Uplift, Tarim Basin

地区	矿化度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	钠氯系数	脱硫酸系数
塔北隆起	93 900~242 000	0.39~0.55	0.07~1.91
	156 795(56)	0.51(56)	0.35(56)
现今海水	35 000	0.85	10.20

注:表中数据为
最小值~最大值
平均值(样品数)。

2.4 岩性特征

根据岩心观察和薄片鉴定,地层水取样层段储层主要为白云岩,其次为膏岩和灰岩。镜下薄片观察常看到方解石和白云石共生,白云石化的部分被未染色,单偏光下呈灰白色(图5a,b),原岩为灰岩,蒸发海水白云化作用的产物;从岩心可以看出灰白色泥-粉晶白云岩中石膏结核溶空后被白云石充填(图5c)和石膏晶模孔,呈“燕尾”状(图5d)。

3 水文地球化学模拟及结果

运用 Phreeqc 软件对所收集的地层水数据进行了水文地球化学模拟。首先根据地温梯度和地压梯度得出不同埋深地层水的温度和压力,随后将地层水的离子浓度及温压参数输入 Phreeqc 软件,计算获得矿物的饱和指数(saturation index)(图6),为水-岩作用类型的判断提供理论依据。

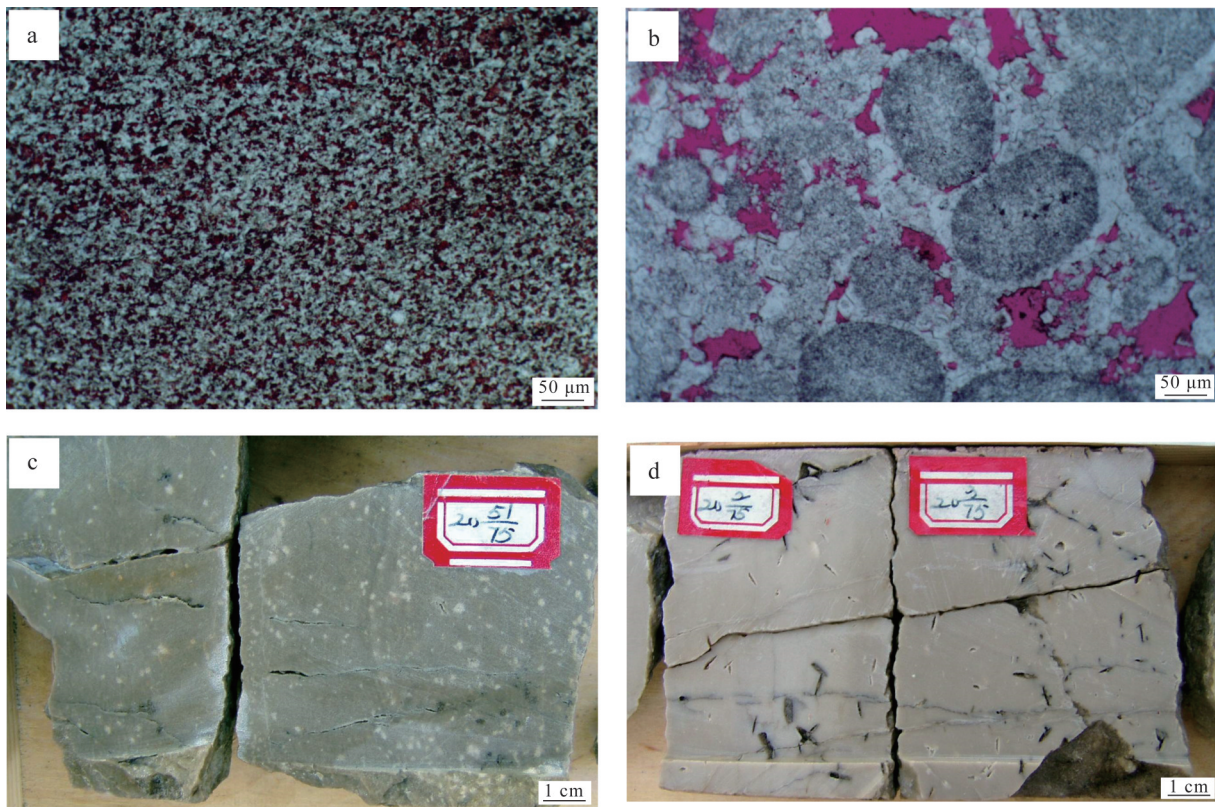


图5 塔里木盆地塔北隆起寒武系储层岩性特征

Fig. 5 Lithology of the Cambrian reservoirs in the Tabei Uplift, Tarim Basin

a. 英买2井,埋深5 812.0 m,单偏光,钙质白云岩,泥-粉晶结构,方解石为粉红色,白云石未被染色,探针片;b. 牙哈7X-1井,埋深5 833.0 m,单偏光,原岩为亮晶鲕粒灰岩,鲕粒发生选择性白云化,混合水白云化作用的产物,亮晶方解石胶结物被溶解形成粒间孔,探针片;c. 牙哈7X-1井,埋深5 882.5 m,岩心,灰色粉晶白云岩,石膏结核溶空后被白云石充填;d. 牙哈7X-1井,埋深5 878.4 m,岩心,黄灰色粉晶白云岩,石膏晶模孔,呈“燕尾”状

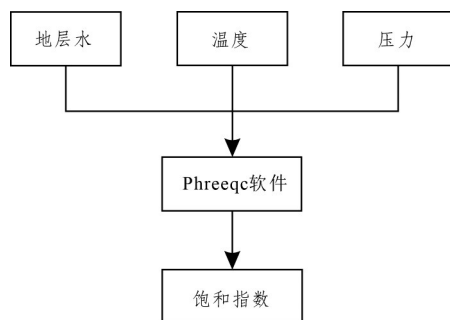


图6 水文地球化学模拟流程图

Fig. 6 Flowchart showing the hydrogeochemical simulation

3.1 饱和度指数

饱和度指数是水-岩相互作用研究的基础,可以判断和确定水与岩石、矿物之间的反应状态^[27]。



当上述反应达到平衡时,有:

$$K = \frac{C^c D^d}{A^a B^b} \quad (2)$$

式中: K 为该反应的平衡常数,无量纲; A, B 为反应物A和B的平衡浓度,mg/L; C, D 为生成物C和D的平衡浓度,mg/L。

公式(2)右边为反应中相关组分的活度积,用 AP 表示;如所有组分均为离子,则称为离子活度积,用 IAP 表示。所以饱和度指数(SI)为:

$$SI = \lg \frac{IAP}{K} \quad (3)$$

根据矿物相对地层水饱和度指数的计算结果,可确定地层水中的反应性矿物及溶液与矿物的平衡状态。有关研究中饱和度指数(SI)的变化范围是 0 ± 0.2 。若某种矿物的 SI 值小于 -0.2 ,则认为矿物在该地层水中未达到饱和状态,不会发生沉淀,当地层水中存在这种矿物时,则会发生溶解并趋于平衡;若某种矿物的 SI 值为 $-0.2 \sim 0.2$,则认为矿物达到了平衡状态,既不溶解也不沉淀或溶解沉淀达到平衡;若某种矿物的 SI 值大于 0.2 ,则认为矿物达到了饱和状态,发生沉淀^[28]。

3.2 矿物饱和度指数

采用塔北隆起寒武系地层水数据,根据朱光有等^[29]的地温梯度和地压梯度,推算出对应埋深的温度和压力,运用Phreeqc软件计算方解石、白云石和石膏的饱和度指数。结果表明:白云石的饱和度指数为 $-3.43 \sim 1.95$,平均值为 -0.10 ,其中43.64%的白云石发生溶解,5.45%达到平衡,50.91%出现沉淀;石膏的饱和

表3 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水中矿物饱和度指数

Table 3 Mineral saturation index of the Cambrian formation water in the Tabei Uplift, Tarim Basin

矿物	白云石	石膏	方解石
饱和度指数	$-3.43 \sim 1.95$ $-0.10(55)$	$-1.77 \sim 0.12$ $-0.80(55)$	$-0.88 \sim 1.62$ $0.55(55)$
溶解率/%	43.64	94.64	18.18
平衡率/%	5.45	5.36	14.55
沉淀率/%	50.91	—	67.27

注:—表示没有发生沉淀。表中数据为 $\frac{\text{最小值}-\text{最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$ 。

指数为 $-1.77 \sim 0.12$,平均值为 -0.80 ,其中94.64%的石膏发生溶解,5.36%达到平衡;方解石的饱和度指数为 $-0.88 \sim 1.62$,平均值为 0.55 ,其中18.18%的方解石发生溶解,14.55%达到平衡,67.27%出现沉淀(表3)。

4 地层水分布与成因

4.1 地层水来源

原始地层沉积水在埋藏过程中经历了蒸发、与地表水或其他地层水混合,以及水-岩相互作用等变化过程,导致地层水的性质发生了改变^[30-31]。从派珀(PIPER)分类图可以看出:塔北隆起寒武系地层水主要为 $Cl^-Na^+K^+-Ca^{2+}$ 型水,与现今地表水点相距较远,而与标准海水点相距较近,具有海水离子组合的特征(图7)。但寒武系地层水离子成分与海水相比, Ca^{2+} 浓度比标准海水浓度高,而 Mg^{2+} , SO_4^{2-} 低于海水浓度,这主要与地层水演化过程中 Ca^{2+} 的富集和 Mg^{2+} , SO_4^{2-} 的消耗有关。前人研究表明具有海水离子组合特征的地层水化学演化趋于海水蒸发浓缩线^[25,31]。根据海水蒸发浓缩的 Cl^- 与阳离子浓度的关系图可以得出:塔北地区寒武系地层水的 Na^+K^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度均随着 Cl^- 浓度的增加而增加; Na^+ 随 Cl^- 浓度的变化趋势与海水蒸发浓缩趋势线基本吻合,而 Ca^{2+} 浓度变化趋势明显高于海水蒸发浓缩趋势线, Mg^{2+} 浓度变化趋势先高于后低于海水蒸发浓缩趋势线(图8)。

总的来说,塔北隆起寒武系地层水 Na^+K^+ 和 Cl^- 含量高, Ca^{2+} 富集, Mg^{2+} 亏损,矿化度高。因此,塔北隆起寒武系地层水不仅受海水蒸发浓缩的影响,可能是寒武系海相碳酸盐岩原始沉积时,岩石孔隙介质中残留大量海水,随着埋深的增加,地层水不断蒸发浓缩、与岩石发生反应,最后形成高矿化度地层水。

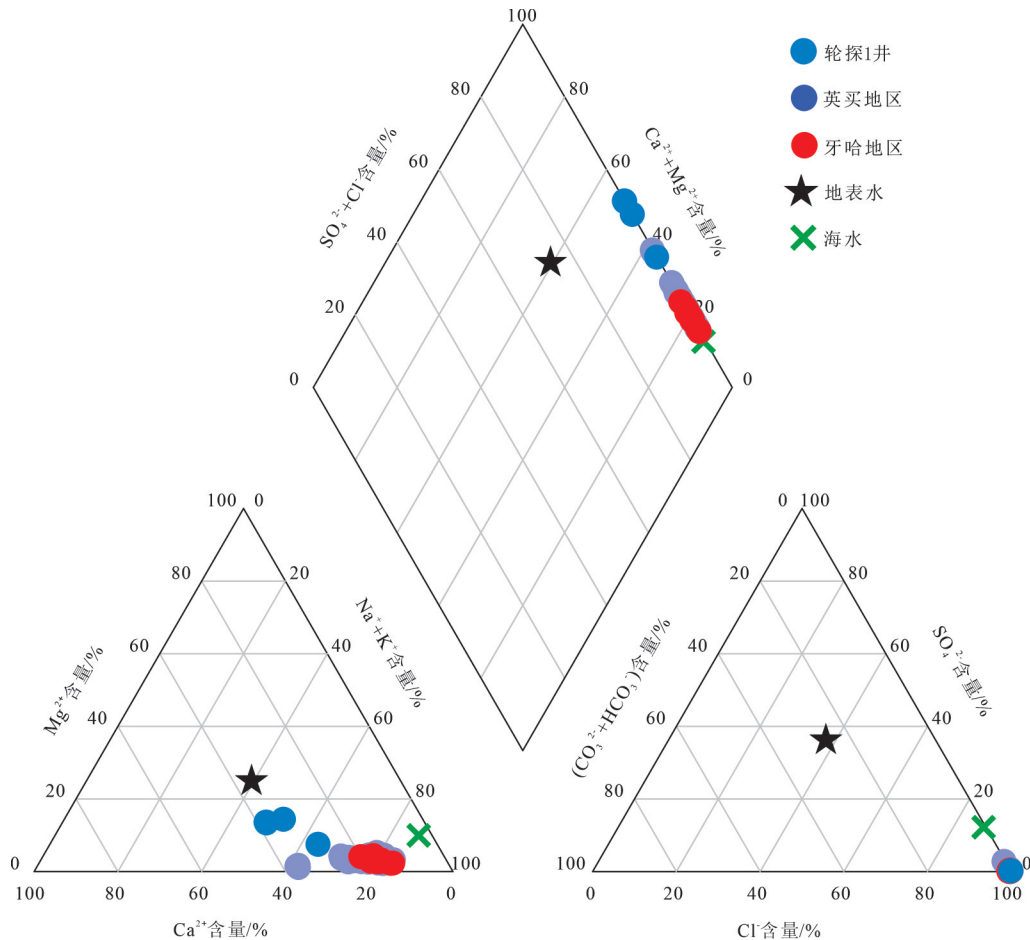


图 7 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水派珀化学分类(地表水数据来自参考文献[32],海水数据来自参考文献[33])

Fig. 7 Piper diagram for the Cambrian formation water in the Tabei Uplift, Tarim Basin (data of surface water from reference [32]; data of seawater from reference [33])

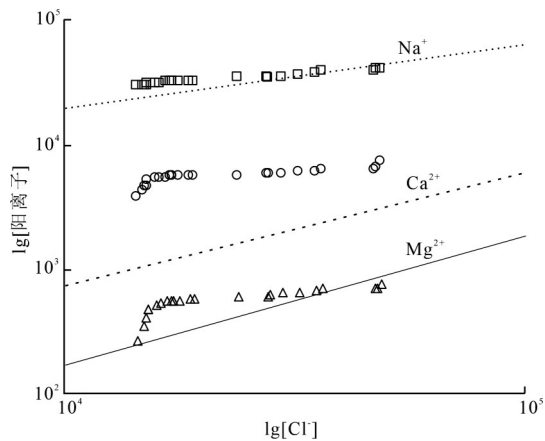


图 8 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水 Cl^- 与主要阳离子浓度关系(与海水蒸发线相比)

Fig. 8 Correlation between concentration of Cl^- and major cation of the Cambrian formation water in the Tabei Uplift, Tarim Basin

(as compared with the evaporation trajectory of seawater)

4.2 水-岩相互作用

沉积盆地地层水中 Na^+ 浓度变化主要与盐岩矿物溶解以及斜长石、钾长石的钠长石化有关, Ca^{2+} 浓度变化主要与碳酸盐岩和石膏的溶解、白云石化和斜长石的钠长石化等有关^[34], Cl^- 富集主要由海水的蒸发浓缩和盐岩矿物溶解引起^[5]。无论盆地中地层水的来源是海水还是大气淡水, Ca^{2+} 富集现象必定与水-岩相互作用有关^[32]。塔里木盆地寒武系以碳酸盐岩和膏岩为主, 所以地层水中离子浓度的变化可能主要与海水的蒸发浓缩、盐岩矿物溶解以及白云石化有关。Davisson 和 Criss^[34] 提出了一种 $\text{Na}_{\text{deficit}}-\text{Ca}_{\text{excess}}$ 图解反映流体离子浓度变化及水-岩相互作用的方法。 $\text{Na}_{\text{deficit}}$ 和 $\text{Ca}_{\text{deficit}}$ 表达式如下:

$$\text{Na}_{\text{deficit}} = [(\text{Na}/\text{Cl})_{\text{sw}} \text{Cl}_{\text{means}} - \text{Na}_{\text{excess}}] / 22.99 \quad (4)$$

$$\text{Ca}_{\text{excess}} = 2[\text{Ca}_{\text{excess}} - (\text{Ca}/\text{Cl})_{\text{sw}} \text{Cl}_{\text{means}}] / 40.08 \quad (5)$$

式中: $\text{Na}_{\text{deficit}}$ 指 Na^+ 相对海水亏损的毫克当量浓度, meq/L; $\text{Ca}_{\text{excess}}$ 指 Ca^{2+} 相对海水富集的毫克当量浓度, meq/L;

Cl_{means} , Na_{means} 和 Ca_{means} 分别代表地层水中 Cl^- , Na^+ 和 Ca^{2+} 离子的毫克当量浓度, meq/L ; $(\text{Na}/\text{Cl})_{\text{sw}}$ 和 $(\text{Ca}/\text{Cl})_{\text{sw}}$ 指海水中离子的毫克当量浓度比, 无量纲。

$\text{Na}_{\text{deficit}}-\text{Ca}_{\text{excess}}$ 图解反映了不同流体性质的演化过程(图9)。原始海水从 $\text{Na}_{\text{deficit}}$ 和 $\text{Ca}_{\text{excess}}$ 都为0时开始蒸发, 随着蒸发的进行 Ca^{2+} 最先发生沉淀, Na^+ 保持稳定, 地层水中 Ca^{2+} 亏损降低至盐岩饱和点, 此时 $\text{Na}_{\text{deficit}}$ 和 $\text{Ca}_{\text{excess}}$ 分别达到0和-200 meq/L ; 继续蒸发, 超过盐岩饱和点, 趋势线将沿水平方向发展, Ca^{2+} 保持稳定, Na^+ 亏损, 盐岩沉淀; 在 Na^+ 保持稳定的条件下, 随着 Ca^{2+} 的富集, 进而发生方解石的白云石化或 CaSO_4 的溶解。 $\text{Na}_{\text{deficit}}-\text{Ca}_{\text{excess}}$ 关系图中斜率 1:1 的线性关系被称为盆地流体线(BFL), 代表了两个钠离子置换一个钙离子的水-岩相互作用(图9)即 $2\text{Na}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+}$ 。自然界中只有斜长石的钠长石化才会发生上述置换比^[35]: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 4\text{SiO}_2 + 2\text{Na}^+ = 2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Ca}^{2+}$ 。图9中虚线a为 Cl^- 浓度为 150 g/L 的盐岩溶解流体, 虚线b为蒸发海水^[36]。

将塔北隆起寒武系 56 个地层水样品数据点投到图9上, 可以看出该区地层水与岩石发生了强烈的反应。地层水中 Ca^{2+} 富集、 Na^+ 亏损, 大部分数据点位于虚线a和b之间, 说明塔北隆起寒武系地层水是海水蒸发的卤水和盐岩矿物溶解的混合物, 可能的成岩作用

主要为 CaSO_4 溶解和方解石的白云石化; 小部分数据点位于虚线b的右侧, 可能发生斜长石的钠长石化。邢秀娟等^[37]对英买-牙哈地区寒武系白云岩成因研究发现白云岩的碳、氧同位素较轻, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 $-1.2\text{‰} \sim -16.8\text{‰}$ 和 $-4.73\text{‰} \sim -12.0\text{‰}$, 与准同生白云岩碳、氧同位素的正值不同, 明显受流体活动的影响, 具有成岩叠加改造特征。再结合岩心观察、薄片鉴定和水-岩反应模拟结果, 塔北隆起寒武系储层水-岩相互作用主要为石膏溶解和方解石的白云石化。

5 结论

1) 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水为 CaCl_2 型, 阳离子以 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 为主, 阴离子以 Cl^- 为主, 矿化度高, 由浅至深可划分为越流泄水浓缩带(A)和深部渗滤浓缩带(B)。钠氯系数为 0.39~0.55, 平均值为 0.51; 脱硫酸系数为 0.07~1.91, 平均值为 0.35, 说明现今寒武系地层水总体上处于封闭环境。

2) Phreeqc 软件模拟地层水中矿物的饱和指数得出: 94.64% 的石膏溶解; 50.91% 的白云石沉淀; 18.18% 的方解石溶解。

3) 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水离子组合具有海水离子特征, 离子分布点距离海水点较近, 而距

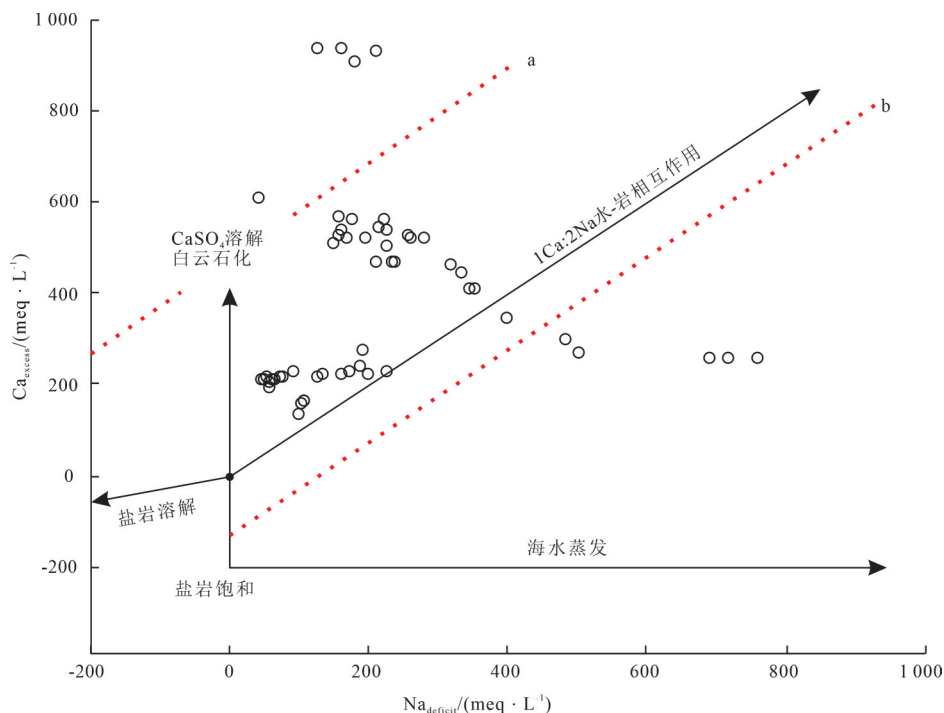


图9 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水 $\text{Na}_{\text{deficit}}-\text{Ca}_{\text{excess}}$ 关系

Fig. 9 Correlation of $\text{Na}_{\text{deficit}}$ and $\text{Ca}_{\text{excess}}$ in the Cambrian formation water in the Tabei Uplift, Tarim Basin

(虚线a为 Cl^- 浓度为 150 g/L 的盐岩溶解流体; 虚线b为蒸发海水。)

离现今地表水点较远。这说明可能是海水经历蒸发浓缩作用之后,发生了强烈的膏岩溶解和方解石的白云石化等水-岩相互作用。

参 考 文 献

- [1] Wilson T P, Long D T. Geochemistry and isotope chemistry of Michigan Basin brines: Devonian formations [J]. *Applied Geochemistry*, 1993, 8(1):81-100.
- [2] Yu H Y, Ma T, Du Y, et al. Genesis of formation water in the northern sedimentary basin of South China Sea: Clues from hydrochemistry and stable isotopes (D , ^{18}O , ^{37}Cl and ^{81}Br) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 196:57-65.
- [3] Hanor J S, McIntosh J C. Diverse origins and timing of formation of basinal brines in the Gulf of Mexico sedimentary basin [J]. *Geofluids*, 2007, 7(2):227-237.
- [4] Worden R H, Manning D A C, Bottrell S H. Multiple generations of high salinity formation water in the Triassic Sherwood Sandstone: Wytch Farm oilfield, onshore UK [J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21(3):455-475.
- [5] Land L S, Macpherson G L. Origin of saline formation waters, Cenozoic Section, Gulf of Mexico sedimentary basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(9):1344-1362.
- [6] Zhou X, Li C J, Ju X M, et al. Origin of subsurface brines in the Sichuan Basin [J]. *Ground Water*, 1997, 35(1):53-58.
- [7] 陈勇,王森,王鑫涛,等. 东营凹陷沙四段地层水化学特征及其指示意义 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(4):42-52.
Chen Yong, Wang Miao, Wang Xintao, et al. Chemical characteristics and implications of formation water of the Es-4 Member in Dongying Sag [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(4):42-52.
- [8] 李鹏春,刘春晓,张渊,等. 塔中奥陶系地层水化学特征及其成因与演化 [J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(6):802-808.
Li Pengchun, Liu Chunxiao, Zhang Yuan, et al. Geochemical behaviors of the Ordovician formation water in the Tazhong area and its origin and evolution [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(6):802-808.
- [9] 杨春龙,谢增业,董才源,等. 塔里木盆地英买2地区奥陶系碳酸盐岩地层水化学特征及储层响应 [J]. *中国海上油气*, 2018, 30(5):55-62.
Yang Chunlong, Xie Zengye, Dong Caiyuan, et al. Chemical characteristics and reservoir response of Ordovician carbonate formation water in YM2 area, Tarim basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(5):55-62.
- [10] 王祥,韩剑发,于红枫,等. 塔中北斜坡奥陶系鹰山组地层水特征与油气保存条件 [J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(5):25-29.
Wang Xiang, Han Jianfa, Yu Hongfeng, et al. Characteristics of formation water of Ordovician Yingshan Formation in the northern slope of Tazhong Palaeouplift and condition of hydrocarbon preservation [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(5):25-29.
- [11] 刘大永,陈键,彭平安,等. 轮南地区碳酸盐岩油气藏类型对地层水特征的控制作用 [J]. *石油学报*, 2012, 33(3):367-371.
Liu Dayong, Chen Jian, Peng Ping'an, et al. The control of reservoir types in Lunnan oilfield on characters of formation water [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3):367-371.
- [12] 张天付,黄理力,倪新锋,等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统吾松格组岩性组合及其成因和勘探意义——亚洲第一深井轮探1井突破的启示 [J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5):928-940.
Zhang Tianfu, Huang Lili, Ni Xinfeng, et al. Lithological combination, genesis and exploration significance of the Lower Cambrian Wusonggeer Formation of Kalpin area in Tarim Basin: Insight through the deepest Asian onshore well-Well Luntan 1 [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5):928-940.
- [13] Jiang L, Cai C T, Worden R H, et al. Multiphase dolomitization of deeply buried Cambrian petroleum reservoirs, Tarim Basin, north-west China [J]. *Sedimentology*, 2016, 63(7):2130-2157.
- [14] Zhu G Y, Zhang Z Y, Zhou X X, et al. The complexity, secondary geochemical process, genetic mechanism and distribution prediction of deep marine oil and gas in the Tarim Basin, China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 198:1-28.
- [15] 金之钧,王清晨. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展——以塔里木盆地为例 [J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2004, 34(S1):1-12.
Jin Zhijun, Wang Qingchen. New progress on typical superposed basins and hydrocarbon accumulation in China: An example of Tarim Basin [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2004, 34(S1):1-12.
- [16] 张德民,鲍志东,郝雁,等. 塔里木盆地牙哈-英买力寒武系潜山区优质储层形成模式 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(10):1797-1807.
Zhang Demin, Bao Zhidong, Hao Yan, et al. Formation model of high-quality reservoirs within Cambrian buried hill in Yaha-Yingmaili area, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(10):1797-1807.
- [17] 刘正文,党青宁,董瑞霞,等. 塔里木盆地寒武系白云岩地震处理技术应用及效果——以塔北英买32地区中下寒武统为例 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7):1334-1343.
Liu Zhengwen, Dang Qingning, Dong Ruixia, et al. Seismic imaging technique and application of cambrian dolomite rock in Tarim Basin: A case of middle-lower cambrian layers of Yingmai 32 area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7):1334-1343.
- [18] 王珊,曹颖辉,杜德道,等. 塔里木盆地柯坪-巴楚地区肖尔布拉克组储层特征与主控因素 [J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(6):784-795.
Wang Shan, Cao Yinghui, Du Dedao, et al. The characteristics and main controlling factors of dolostone reservoir in Lower Cambrian Xiaerbulak Formation in Keping-Bachu area, Tarim Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(6):784-795.
- [19] 斯扬,张文选,罗安湘,等. 姬塬地区长9油层组地层水化学特征及其与油藏的关系 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*: 2019, 43(2):25-36.

- Si Yang, Zhang Wenxuan, Luo Anxiang, et al. Hydrochemical characteristics and relationship between formation water and hydrocarbon reservoirs for Chang 9 in Jiuyan area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science): 2019, 43(2):25-36.
- [20] 康永尚,张一伟. 油气成藏流体动力学[M]. 北京:地质出版社, 1999:1-120.
- Kang Yongshang, Zhang Yiwei. Hydrodynamics of hydrocarbon accumulation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-120.
- [21] 雷易璇. 关于地层水特性及其地质意义概述[J]. 化学工程与装备, 2018, (4):129-131.
- Lei Yixuan. An overview of formation water characteristics and its geological significance [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2018, (4):129-131.
- [22] 王君,楼章华,朱蓉,等. 渤海湾盆地东濮凹陷文留地区现今地层水化学与油气运聚[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 449-455.
- Wang Jun, Lou Zhanghua, Zhu Rong, et al. Hydrochemistry of paleogene formation water and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Wenliu Region in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4):449-455.
- [23] 梅啸寒,张琴,王雅芸,等. 松辽盆地扶新隆起带扶杨油层地层水化学特征及其与油气运聚关系[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2):328-338.
- Mei Xiaohan, Zhan Qin, Wang Yayun, et al. Hydrochemical characteristics of formation water and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Fuyang oil layer in Fuxin Uplift, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 328-338.
- [24] 查明,陈中红. 山东东营凹陷前古近系水化学场、水动力场与油气成藏[J]. 现代地质, 2008, 22(4):567-575.
- Zha Ming, Chen Zhonghong. Formation water chemical and hydrodynamic fields and their relations to the hydrocarbon accumulation in the Pre-Tertiary of Dongying Depression, Shandong[J]. Geoscience, 2008, 22(4):567-575.
- [25] 林晓英,曾溅辉,杨海军,等. 塔里木盆地哈得逊油田石炭系地层水化学特征及成因[J]. 现代地质, 2012, 26(2):377-383.
- Lin Xiaoying, Zeng Jianhui, Yang Haijun, et al. Geochemical characteristics and origin of formation water from the carboniferous in Hadson oil field, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(2): 377-383.
- [26] 刘济民. 油田水文地质勘探中水化学及其特性指标的综合应用[J]. 石油勘探与开发, 1982, 9(6):49-55.
- Liu Jimin. The characteristics of underground water chemistry and its application in oilfield hydrology exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 1982, 9(6):49-55.
- [27] 唐辉,陈洁,钱会. 饱和度指数在水-岩作用研究中的应用及其灵敏度分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6):180-183.
- Tang Hui, Chen Jie. Application of saturation index to research of water-rock interaction and its sensitivity analysis [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(6):180-183.
- [28] 李巧,周金龙,纪媛媛,等. 新疆哈密地区三塘湖地下水水-岩作用模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6):29-33.
- Li Qiao, Zhou Jinlong, Ji Yuanyuan, et al. Water-rock interaction simulation of groundwater in north Santang lake of Hami District of Xinjiang[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(6):29-33.
- [29] Zhu G Y, Milkov A V, Zhang Z Y, et al. Formation and preservation of a giant petroleum accumulation in superdeep carbonate reservoirs in the southern Halahatang oil field area, Tarim Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(7):1703-1743.
- [30] Birkle P, García B M, Milland Padrón C M. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecominoacán oil reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical evolution and water-rock interaction [J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(4):543-554.
- [31] 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.
- [32] 王文祥,王瑞久,李文鹏,等. 塔里木盆地河水氢氧同位素与水化学特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4):29-35.
- Wang Wenxiang, Wang Ruijiu, Li Wenpeng, et al. Analysis of stable isotopes and hydrochemistry of rivers in Tarim Basin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(4):29-35.
- [33] Millero F J, Feistel R, Wright D G, et al. The composition of standard seawater and the definition of the reference-composition salinity scale[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2008, 55(1):50-72.
- [34] Davisson M L, Criss R E. Na-Ca-Cl relations in basinal fluids [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(15):2743-2752.
- [35] Lynton S L, Kitty L M. Feldspar diagenesis in the Frio Formation, Brazoria County, Texas gulf coast [J]. Geology, 1981, 9(7): 314-318.
- [36] Chi G, Savard M. Sources of basinal and Mississippi Valley-type mineralizing brines: Mixing of evaporated seawater and halite-dissolution brine[J]. Chemical Geology, 1997, 143(3):121-125.
- [37] 邢秀娟,焦存礼,王毅,等. 塔北地区寒武系白云岩特征与成因研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(2):130-136.
- Xing Xiujian, Jiao Cunli, Wang Yi, et al. Characteristics and origin of cambrian dolomite, northern Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(2):130-136.

(编辑 梁 慧)