

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020122101

东海盆地西湖凹陷天台反转带花港组地层水地球化学特征及其成因

徐波

中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司上海实验中心, 上海 200941

摘要:通过对西湖凹陷天台反转带花港组20口井地层水地球化学特征进行研究,进一步揭示地层水成因、来源以及保存条件。研究表明,花港组地层水离子组成以 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 以及 HCO_3^- 为主,其中 Na^+ 和 Cl^- 浓度与矿化度(TDS)之间呈现较好的线性关系,具有高浓缩地层水的特征。水型以氯化钙Ⅳ型和Ⅴ型为主;钠氯系数和脱硫酸系数均较小,远低于海水;钙镁系数高于深层水,均指示花港组地层封闭性好,处于交替停滞带,有利于油气的聚集与保存。 Na^+ 轻微亏损主要受钠长石化作用影响; Ca^{2+} 富集除了钠长石化作用外,有机质成熟过程中伴生的有机酸,对长石和含钙矿物的溶蚀作用,也促进地层水中 Ca^{2+} 的富集; Mg^{2+} 亏损可能与高岭石、绿泥石以及白云岩化紧密相关。花港组地层水来源于陆相沉积水,受沉积环境、水-岩反应、蒸发浓缩作用以及流体混合作用共同控制,表现出富 Ca^{2+} ,贫 Mg^{2+} ,略微贫 Na^+ 的特点。

关键词:地层水;地球化学特征;保存条件;水-岩作用;氢、氧同位素;西湖凹陷;花港组

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

Geochemistry and genesis of the formation water in Huagang Formation of the Tiantai Inversion Zone, the Xihu Depression of the East China Sea Basin

XU Bo

CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co. CNOOC Central Laboratory (shanghai), Shanghai 200941, China

Abstract: Based on the geochemical features of the formation water in Huagang Formation collected from 20 wells on the Tiantai structure of Xihu Depression, the genesis, source and preservation conditions of the formation water are discussed in this paper. The water is dominated by Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} and HCO_3^- . And the concentrations of Na^+ and Cl^- show an obvious linear relationship with TDS which suggests a kind of highly concentrated formation water. The water is mainly of types CaCl_2 IV and V. $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ and $100 \times (r\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$ are lower than those in seawater; while $r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$ are higher in deep water. All of these features indicate that the Huagang Formation has effective sealing capability and is deposited in an alternative stagnation zone, which is conducive as well to oil and gas accumulation and preservation. The slight loss of Na^+ is mainly caused by albitization. In addition to the formation of sodium feldspar, organic acids associated with the maturation of organic matter and the dissolution of feldspar and calcium-bearing minerals, also promoted the enrichment of Ca^{2+} in the formation water. The deficiency of Mg^{2+} may be closely related to the formation of kaolinite and chlorite in addition to dolomitization. The formation water of Huagang Formation originally came from land water and therefore is controlled by sedimentary environment, water-rock reaction, evaporation and concentration and fluid mixing characterized by rich Ca^{2+} , poor Mg^{2+} and slightly poor Na^+ .

Key words: formation water; geochemical characteristics; preservation condition; water-rock interaction; deuterium and oxygen isotopes; Xihu Depression; Huagang Formation

在沉积体系中,地层水总是与烃源岩和油气相伴生,因此地层水是油气生成、运移以及聚集的动力源及载体,并直接参与地质演化过程,影响和制约着油气成藏和保存^[1-7]。通过对地层水地球化学特征的深入研究,可以掌握油气藏形成和保存的条

件,为油气的勘探提供有力的技术支持。目前,国内外学者利用地层水地球化学特征指示油气藏形成和保存条件的成果较多,其中窦伟坦等^[5,8]通过对鄂尔多斯盆地的地层水地球化学特征开展详细分析,对研究区地层水的成因及油气藏聚集关系进

资助项目:“十三五”国家科技重大专项“东海深层低渗-致密天然气勘探开发技术”(2016ZX05027-001)

作者简介:徐波(1988—),男,硕士,工程师,主要从事石油地质与油藏地球化学实验及研究工作, E-mail: xubo10@cnooc.com.cn

收稿日期:2020-12-21; 改回日期:2021-01-21. 蔡秋蓉编辑

行了较为深入的研究。徐国盛^[3]、林耀庭^[9]、李建森^[10]等在水化学特征系数的基础上,进一步结合氢、氧同位素以及岩石镜下鉴定的特征,深入探讨了四川盆地和柴达木盆地的油气生成、运移以及聚集的条件。这些前人的研究成果为本次研究提供了丰富的参考和对比依据。

西湖凹陷是东海盆地主要的勘探区域,也是我国海上非常重要的含油气盆地之一。截至目前,针对西湖凹陷地层水的研究成果非常之少,其中汪蕴璞^[11-12]从水文地质学的方面,对西湖凹陷地层水的含水系统和水文地质期进行了研究和划分,初步探讨了地层水的形成演化和油气运移成藏特征和模式,但没有针对地层水的地球化学特征和油气保存条件开展相关研究。杨丽杰^[13]利用地层水矿化度、水型、离子组成及特征系数对西湖凹陷中部地区地层水的地球化学特征以及其与天然气藏分布关系进行了初步探讨。由于地层水的来源及成因机制非常复杂,仅通过对特征离子的含量以及离子之间的关系开展研究,难以充分解释其成因与来源。本文在地层水离子组成数据的基础上,首次系统结合氢氧同位素、岩石薄片鉴定以及扫描电镜分析结果,进一步探讨西湖凹陷天台反转带花港组地层水的来源及油气藏的保存条件,为西湖凹陷天台构造

带的油气勘探提供更充足的依据。

1 区域地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地的东北部,是东海盆地最有油气勘探潜力的凹陷之一。西湖凹陷整体呈 NNE 向展布,面积约为 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,是前古近系基底上发育起来的断陷盆地。西湖凹陷构造特征较为复杂,总体上表现为“东西分带、南北分块”的特点,自西向东依次可划分为西湖斜坡带、西次凹、中央反转带、东次凹及东部断阶带等次级构造单元,再根据凹陷的横向调节断裂的变化以及构造样式和走向,又可划分为若干个二级构造单元,包括杭州斜坡带、平湖斜坡带、天台斜坡带、嘉兴构造带、宁波反转带和天台反转带等二级构造单元(图 1)^[13-17]。本次研究区域为西湖凹陷中央反转构造带的天台反转带,其中 T 和 C 油气田均位于该构造带。

研究区地层自下而上由古新统、下始新统、中—上始新统平湖组、渐新统花港组、中新统龙井组、玉泉组和柳浪组、上新统三潭组及第四系东海群组成(图 2),其中平湖组、花港组为含气层段。平湖组的岩性以砂岩、泥岩互层为主,夹数层薄的沥青

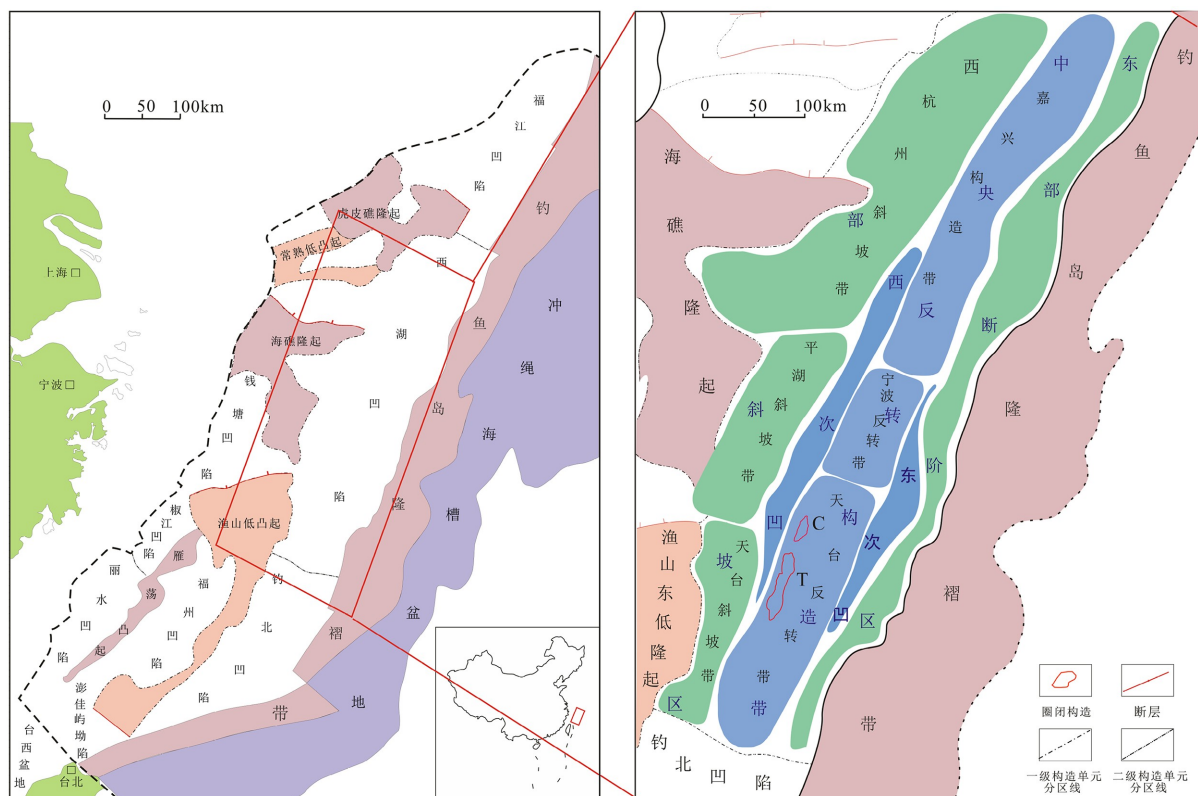


图 1 研究区概况图

Fig.1 The tectonic map of the study area

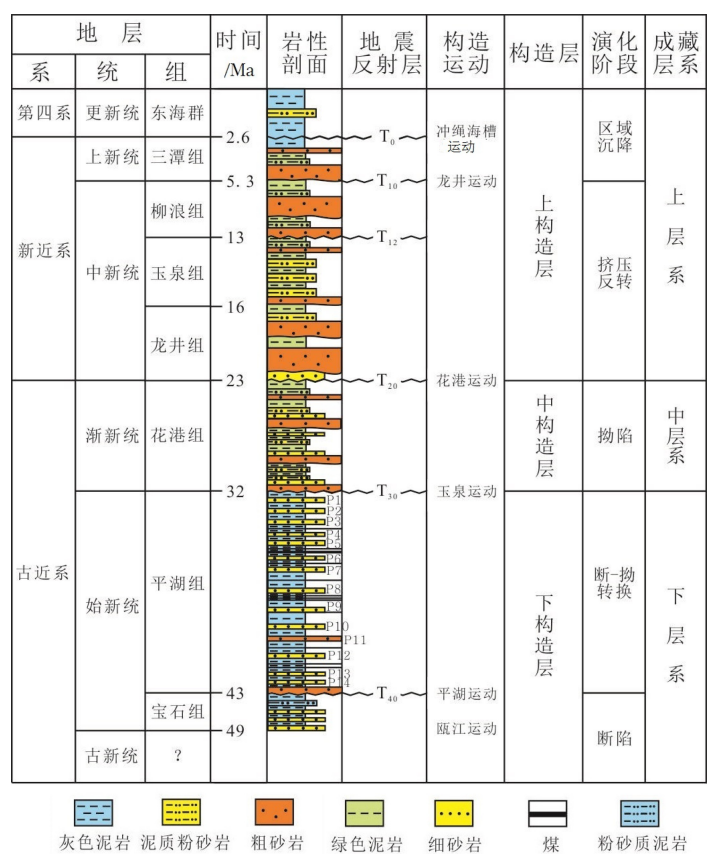


图 2 研究区地层柱状特征
Fig.2 Stratigraphic column of the study area

质煤层,且平面上岩性、厚度分布不均一,其沉积环境主要为半封闭海湾沉积环境;花港组的岩性主要由砂岩、泥岩组成,平面上岩性、厚度变化显著,其沉积环境主要为河流-湖泊沉积环境为主^[13]。

2 样品采集及实验条件

本次采集到天台反转带花港组 20 口井地层水样品,其中 T 油气田 16 口井, C 油气田 4 口井。地层水中常规阴阳离子测试由中海油实验中心上海实验中心完成,阳离子测试使用赛默飞世尔生产的 ICP-OES(型号为 iCAP7400)进行测试,分析精度为 0.001 mg/L;阴离子分析使用瑞士万通生产的离子色谱仪(型号为 930T)进行测试,分析精度为 0.01 mg/L;HCO₃⁻和 CO₃²⁻采用电位滴定法进行测试,使用梅特勒生产的 T90 电位滴定仪,分析精度为 0.1 mg/L;阴阳离子分析每 5 个样品设置平行样,各离子重复性均小于 3%,满足参考标准的质控要求。地层水中氢氧同位素分析由中国地质大学(武汉)完成,使用 MAT-253 型同位素质谱仪,以 V-SMOW 为标准物质。δD 参考 DZ/T 0184.19-1997,采用水中氢同位素锌还原法进行测定;δ¹⁸O 参考 DZ/T 0184.21-1997,采

用天然水中氧同位素二氧化碳-水平衡法进行测定,分析精度均为 0.1‰。

3 地层水地球化学特征及油气保存条件

3.1 矿化度

一般而言,当地层水中的各离子组成浓度变化不大时,其地层水的矿化度越高,地层的封闭保存条件越好^[18-22]。由表 1 数据可得,天台反转带花港组的矿化度(TDS)为 9476.4~30 649.3 mg/L,平均值为 22 944.9 mg/L。研究区花港组地层水的矿化度均低于海水的矿化度(35 000 mg/L),但整体矿化度相对比较高,指示天台反转带地层整体保存条件较好。

3.2 水型

通过离子组成关系进行水型划分,水型是研究地层封闭性,指示地层油气运聚以及保存条件的重要参数^[20-23]。参照苏林分类模型^[24-25]:Na₂SO₄型多表现为裸露的地质构造中的地层水;CaCl₂型表现为与地表大气降水隔绝较好的封闭构造中的地层水;过渡性构造带的地层水则多为 MgCl₂型和 NaHCO₃

表 1 研究区地层水地化参数
Table 1 Geochemical parameters of formation water in study area

油气田	井号	层位	TDS/ (mg/L)	水型	钠氯系数[r(Na ⁺)/ r(Cl ⁻)]	脱硫酸系数 [100×(rSO ₄ ²⁻)/ r(Cl ⁻)]	钙镁系[r(Ca ²⁺)/ r(Mg ²⁺)]	阳离子交换系数 (IBE)	δ ¹⁸ O‰ (VSMOW)	δD‰ (VSMOW)
T 油气田	A1S	花港组	21 761.3	NaHCO ₃	0.87	0.17	12.02	0.08	-3.0	-30.6
	A2		23 743.6	CaCl ₂	0.55	0.05	14.25	0.43	-3.4	-31.7
	A4		27 058.0	CaCl ₂	0.44	0.26	86.53	0.55	-2.9	-30.2
	A6		15 181.0	NaHCO ₃	0.71	0.24	591.87	0.19	-1.7	-27.8
	A7S		14 437.6	NaHCO ₃	0.68	0.34	4.87	0.25	-3.2	-29.3
	A9		25 492.0	CaCl ₂	0.46	0.31	154.46	0.53	-3.1	-31.4
	A10		17 481.8	NaHCO ₃	0.72	0.50	17.19	0.20	-3.7	-28.5
	C1		25 409.0	CaCl ₂	0.53	0.10	12.22	0.46	-3.9	-28.8
	C2		9 476.4	CaCl ₂	0.56	0.16	29.38	0.42	-3.9	-39.0
	C3		27 682.6	CaCl ₂	0.52	0.04	15.46	0.46	-2.6	-28.1
	C4		29 182.2	CaCl ₂	0.51	0.05	13.08	0.47	-5.0	-30.5
	C7		20 833.0	CaCl ₂	0.51	0.08	13.87	0.47	-4.1	-32.8
C 油气田	C9	花港组	25 310.9	CaCl ₂	0.44	0.07	22.29	0.54	-2.8	-30.7
	C10		26 538.5	CaCl ₂	0.43	0.05	36.89	0.55	-3.0	-29.2
	C11		25 972.7	CaCl ₂	0.47	0.13	16.70	0.51	-3.1	-30.2
	C12		26 556.5	CaCl ₂	0.52	0.05	8.19	0.46	-2.8	-28.0
	A4H		30 649.3	CaCl ₂	0.52	0.05	5.35	0.45	-4.5	-40.1
	A6		23 810.7	CaCl ₂	0.56	0.30	9.61	0.42	-5.1	-42.6
	A7		13 151.3	NaHCO ₃	0.78	0.56	16.37	0.16	-4.0	-42.3
	A8		29 482.7	CaCl ₂	0.53	0.05	4.98	0.45	-4.2	-38.0

型。由表 1 可以看出,天台反转带花港组地层水以 CaCl₂ 型为主(占 75%),少量样品表现为 NaHCO₃ 型。对比不同水型地层水的矿化度,发现 CaCl₂ 型地层水矿化度普遍高于 NaHCO₃ 型(图 3)。此外,参照博雅尔斯基^[26]的分类规则,将 CaCl₂ 水型进一步划分为 5 类(表 2),研究区花港组地层水 CaCl₂ 水型集中表现为Ⅳ型和Ⅴ型,说明天台反转带花港组地层整体封闭性好,处于相对封闭的环境,是理想的烃类聚集地,有利天然气的聚集和保存。

3.3 离子组成

天台反转带花港组地层水中各离子浓度总体表现为 Cl⁻ 浓度最高,Na⁺ 浓度次之,HCO₃⁻ 浓度含量相对较高,主要离子浓度组合为 Cl⁻>Na⁺>HCO₃⁻>Ca²⁺>K⁺>Mg²⁺>CO₃²⁻。其中阳离子组成中,以 Na⁺、Ca²⁺、K⁺ 的含量占绝对优势,Mg²⁺ 含量很低;阴离子组成中,以 Cl⁻ 为主,HCO₃⁻ 次之,CO₃²⁻ 和 SO₄²⁻

含量很低。此外,天台反转带花港组地层水中 Na⁺ 和 Cl⁻ 浓度与矿化度(TDS)之间呈现良好的线性关系(图 4),指示地层水矿化度变化与蒸发浓缩或盐类矿物溶解有密切的关系^[19-24]。

3.4 地球化学特征系数及油气保存条件

地层水各种地球化学参数的组合特征能够有效指示油气聚集与保存的相关特性^[18-33]。与地层水关系密切的地球化学特征系数主要包括:钠氯系数、脱硫系数、钙镁系数、阳离子交换系数等。

钠氯系数 [r(Na⁺)/r(Cl⁻)] 是反映地层封闭性好坏和地层水变质程度的重要参数。研究表明,现代海水的钠氯系数大约为 0.85,钠氯系数越小,地层水所处环境的还原性越强,越有利于油气的保存^[18-25]。天台反转带花港组地层水的钠氯系数为 0.43~0.87,平均值为 0.57,仅有一个样品的钠氯系数大于 0.85,指示花港组处于还原性较强的水体环

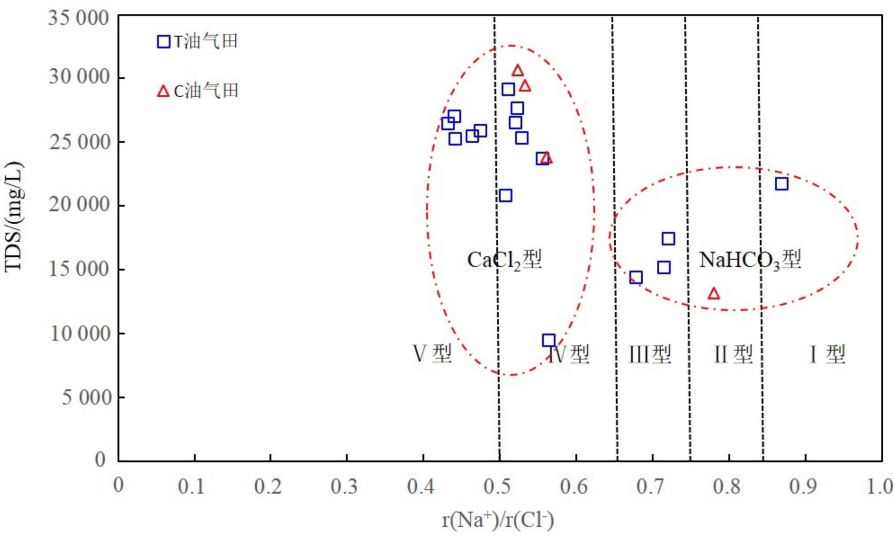


图 3 研究区地层水钠氯系数与矿化度关系图

Fig.3 Relationship between $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ and TDS of formation water in study area

表 2 博雅尔斯基^[26]对氯化钙型水的分类

Table 2 Classification of calcium chloride type water by Burson Marsteller Chhabra

水型	$r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$	石油地质意义
I 型	>0.85	水速度大, 水动力活跃; 油气保存条件差, 几乎不存在油气藏
II 型	$0.75\sim0.85$	沉积盆地水动力带与较稳定的静水带之间的过渡带; 保存油气能力较差
III 型	$0.65\sim0.75$	水动力条件平缓, 有利于保存油气; 保存烃类较好的有利环境
IV 型	$0.50\sim0.65$	有利于烃类聚集, 封闭条件良好; 烃类保存的有利地带
V 型	<0.50	水流慢或静止, 封存的古代残余海水; 烃类聚集最有希望的区域

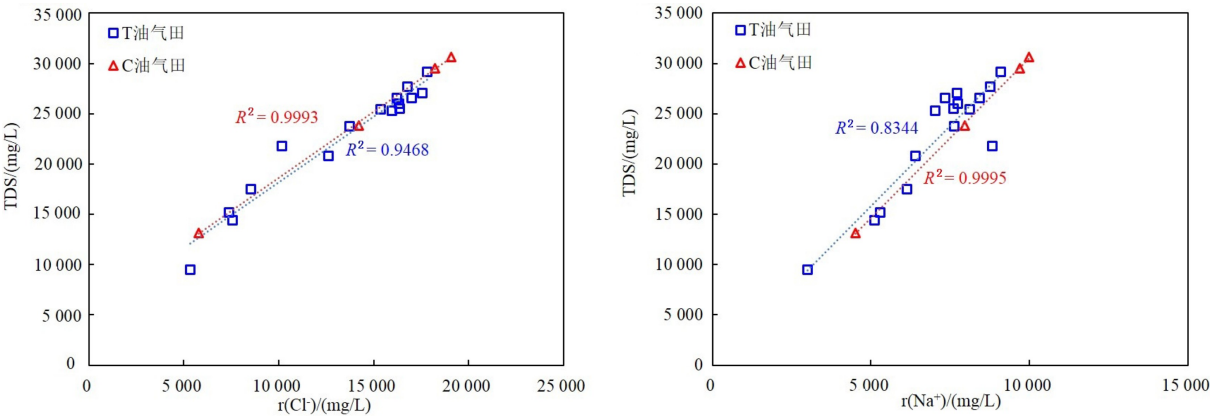


图 4 研究区地层水 $r(\text{Cl}^-)$ -TDS 和 $r(\text{Na}^+)$ -TDS 关系图

Fig.4 $r(\text{Cl}^-)$ -TDS and $r(\text{Na}^+)$ -TDS diagrams of formation water in study area

境, 有利于油气的保存。

脱硫系数 $[100 \times (r\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)]$ 是指示地层水氧化还原环境的重要指标, 主要用于表征脱硫作用的程度^[23-27]。通常情况下, 脱硫系数值越小, 指示地层水脱硫作用越强, 环境越偏还原, 越有利于油气保存; 反之, 指示环境越偏氧化, 油气保存条件越

差。天台反转带花港组地层水的脱硫系数为 0.04~0.56, 平均值为 0.18; 指示花港组地层水脱硫作用强, 环境偏还原, 油气保存条件越好。

钙镁系数 $[r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})]$ 是指示油田水的变质程度的重要指标, 钙镁系数越高, 说明地层封闭性越好, 油田水变质程度越高, 深层水的钙镁系数

一般大于 3^[27-30]。天台反转带花港组地层水的钙镁系数为 4.87~591.87, 平均值为 54.82; 地层水样品的钙镁系数值均大于 3.0, 指示天台反转带地层的总体封闭性很好, 变质程度较高。

阳离子交换系数(IBE)($[\text{Cl}^--(\text{Na}^++\text{K}^+)]/\text{Cl}^-$)用于反映地层水的来源以及水中的阳离子与岩石表面阳离子相互交换程度^[30-33]。研究发现, 当 $\text{IBE} > 0.129$ 时, 地层水主要为来自原始沉积的地层水, 处于交替停滞带, 当 $\text{IBE} < 0.129$ 时, 认为地层水中有地表及其他渗入水的影响, 处于交替活跃带。天台反转带花港组地层水的 IBE 值为 0.08~0.55, 平均值为 0.40, 仅有一个样品的 IBE 值小于 0.129, 指示研究区地层水阳离子交换程度较小, 整体处于交替停滞带, 是油气保存的有利场所。

鄂尔多斯盆地和四川盆地是目前国内油气勘探的重要盆地。前人研究发现, 鄂尔多斯盆地的石盒子组水化学特征参数表现为钠氯系数较小(0.01~0.61)、脱硫系数较大(0.34~12.53)、钙镁系数高(1.64~100.1)的特征, 地层水具有油气伴生水特点, 属于天然气充注时留下的残余地层水, 形成于封闭、还原的水文地球化学环境^[5, 34]。四川盆地须家河组垂向上差异较大^[21, 32-33], 其中须二段、须四段具有钠氯系数和脱硫系数较小、钙镁系数较高的特征, 指示其封闭条件较好, 有利于油气的保存; 而须五段钠氯系数、脱硫系数以及阳离子交换系数均较大, 指示地层水较活跃, 保存条件差。通过对比研究认为西湖凹陷天台反转带花港组地层整体封闭良好, 水体还原性较强, 有利于油气的聚集和保存。

4 地层水的成因及来源分析

地层水的化学特征能够传递其地质演化过程的相关信息, 如: 成因及来源、蒸发浓缩作用以及水-岩反应强度等。本文通过剖析离子浓度之间的关系, 进一步探讨研究区地层水的演化过程。西湖凹陷天台反转带花港组主要为河流-湖泊的沉积环境, 以三角洲相和滨浅湖相为主, 本文采用海-河水混合线和海水蒸发线的结合线(下文简称结合线)来分析和探讨地层水的演化过程。

4.1 分析方法

前人研究表明, 通过对比地层水中 Br^- 与不同离子之间以及与海水蒸发线的关系, 判断不同离子的富集与亏损状态, 为探讨研究区地层水的演化、矿物溶解以及油气运移及聚集提供证据^[34-35]。本次主

要研究的地层是渐新统的花港组, 其下覆地层为平湖组, 发育数层薄的沥青质煤层, 一般情况下, 煤岩中 Br^- 含量较高, 会持续释放, 造成研究区地层水中 Br^- 的富集, 从而影响结果的评价。因此, 笔者认为不能利用该方法来探讨地层水的成因及演化特征。

因为 Cl^- 化学性质稳定, 同时也不发生与其他矿物的成岩反应; 当 $r(\text{Cl}^-) < 100 \text{ g/L}$ 时, $\lg r(\text{Cl}^-)$ 与 $\lg r(\text{Br}^-)$ 呈斜率为 1 的线性关系^[36], 并且在该浓度范围内也不产生相应的沉淀, 所以可以选取化学性质相对稳定的 Cl^- 来探讨地层水的成因及演化特征。本次研究发现天台反转带花港组地层水中 Cl^- 浓度均小于 20 g/L, Cl^- 浓度与总矿化度(TDS)具有良好的正相关性; 并且东海盆地西湖凹陷新、古近系并未发现盐层, 由此推断地层水演化过程中 Cl^- 没有发生沉淀, 地层水的蒸发浓缩作用是影响 Cl^- 浓度变化主要因素。因此, 通过对比地层水中 Cl^- 与不同离子浓度以及海水蒸发线的差异, 判断地层水中不同离子的富集与亏损, 能有效地指示地层水的演化过程。

4.2 离子间关系特征

分析天台反转带花港组地层水中 $\lg r(\text{Cl}^-)$ - $\lg r(\text{Ca}^{2+})$ 、 $\lg r(\text{Cl}^-)$ - $\lg r(\text{Mg}^{2+})$ 、 $\lg r(\text{Cl}^-)$ - $\lg r(\text{Na}^+)$ 关系(图 5), 发现 Cl^- 与不同离子之间表现以下特征:

(1) $\lg r(\text{Cl}^-)$ - $\lg r(\text{Ca}^{2+})$ 关系图(图 5a), 样品点位于结合线的右侧, 指示 Ca^{2+} 呈现富集状态;

(2) $\lg r(\text{Cl}^-)$ - $\lg r(\text{Mg}^{2+})$ 关系图(图 5b), 样品点位于结合线的左侧, 指示 Mg^{2+} 呈现亏损状态;

(3) $\lg r(\text{Cl}^-)$ - $\lg r(\text{Na}^+)$ 关系图(图 5c), 大部分样品点位于结合线上方, 部分数据贴合结合线, 指示 Na^+ 呈略亏损状态;

(4) 研究区地层水 Cl^- 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 在对数坐标上均表现良好的线性关系, 并且与结合线基本平行。

4.3 Ca^{2+} 富集及 Na^+ 亏损成因

地层水中 Na^+ 浓度变化与盐岩溶解作用以及钠长石化密切相关; Ca^{2+} 浓度变化主要受到方解石、石膏等溶解和沉淀影响。Dvission^[39] 研究表明: 可以用 Na^+ 、 Ca^{2+} 相对海水亏损或富集情况探讨 Ca^{2+} 、 Na^+ 在地层水中的相互关系。天台反转带花港组地层水表现出 Ca^{2+} 富集和 Na^+ 轻微亏损, 表明研究区发生了 Dvission^[39] 提出的 2 个 Na^+ 交换 1 个 Ca^{2+} 的钠长石化。结合研究区花港组砂岩岩石薄片和扫描电镜鉴定结果分析(图 6), 花港组的砂岩中长石

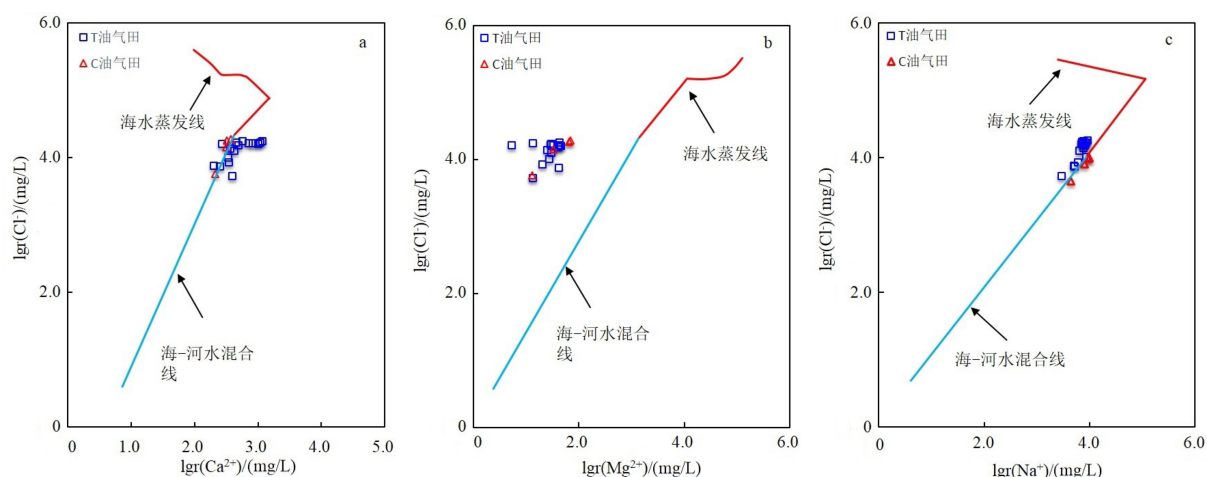


图5 地层水 Cl^- 与各种离子浓度关系图

海水蒸发线据文献 [36], 海水数据据文献 [37], 河水数据据文献 [38]。

a. $\lg(\text{Cl}^-)-\lg(\text{Ca}^{2+})$, b. $\lg(\text{Cl}^-)-\lg(\text{Mg}^{2+})$, c. $\lg(\text{Cl}^-)-\lg(\text{Na}^+)$ 。

Fig.5 The relations of Cl^- with Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ in formation water

Seawater evaporation line according to literature [36], seawater data from literature [37], river water data from literature [38].

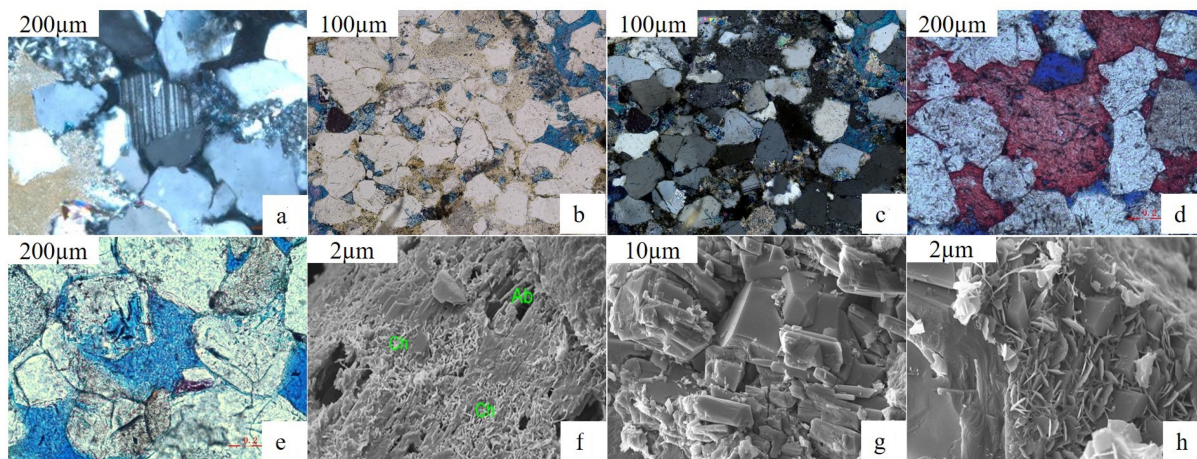


图6 研究区花港组砂岩铸体薄片及扫描电镜照片

a. 3 554.0 m, 岩石中发育丰富斜长石; b-c. 3 884.2 m, 铁白云石充填粒间孔隙, 并胶结交代碎屑颗粒; d. 4 065.0 m, 铁方解石充填孔隙, 使粒间孔缩小甚至消失, 并见铁方解石完全交代碎屑颗粒; e. 3 970.0 m, 自生高岭石充填粒间孔, 使粒间孔微孔化, 可见长石粒内溶孔; f. 3 943.3 m, 见块状钠长石表面剧烈溶蚀, 并见针叶状绿泥石分布在钠长石颗粒表面产出; g. 3 860.0 m, 钠长石沿解理溶蚀, 粒内孔隙发育; h. 3 860.0 m, 针叶状绿泥石充填钠长石粒内孔隙。

Fig.6 Casting slice and SEM images of Huagang Formation sandstone

a. 3 554.0 m, plagioclases are abundant in rocks; b-c. 3 884.2 m, ankerite fills intergranular pores, and replaced particles are cemented; d. 4 065.0 m, ferrocalcite fills pores and makes the intergranular pores shrink or even disappear, ferrocalcite completely replaced detrital particles; e. 3 970.0 m, authigenic kaolinite fills intergranular pores to make intergranular pores smaller by microporization, feldspar intergranular dissolution pores are observed; f. 3 943.3 m, the surface of lump albite was severely dissolved, and the coniferous chlorite was distributed on the surface of albite particles; g. 3 860.0 m, albite dissolves along cleavage, intragranular pores are developed; h. 3 860.0 m, the coniferous chlorite fills the intergranular pores of albite.

含量很高, 主要以斜长石为主, 钾长石含量较低, 指示花港组 Na^+ 相对海水轻微亏损主要受钠长石化作用影响。 Ca^{2+} 浓度的变化主要受到水-岩反应的控制和影响, 其富集的程度和含钙矿物的溶蚀紧密相关。前文已提及花港组地层水中 Ca^{2+} 的富集可能与

钠长石化有关, Na^+ 产生亏损同时造成 Ca^{2+} 相对富集。此外, 研究区花港组和下伏平湖组均发育有厚层碳质泥岩, 在砂岩储层填隙物中可以观察到大量的方解石及白云石充填(图6 b-d), 碳酸盐胶结物含量相对较高, 其在沉淀过程中必然需要消耗一定量 Ca^{2+} 。

Ca^{2+} 富集仅依靠钙长石溶解是远远不够的^[33], 必然还有其他来源。笔者认为研究区花港组在天然气充注过程中, 有机质成熟过程会伴生有机酸的产生, 其会对长石和含钙矿物的溶蚀程度增强, 促进地层水中 Ca^{2+} 的富集。

4.4 Mg^{2+} 亏损成因

水-岩反应的强弱程度直接控制地层水中阳离子的含量。研究区花港组砂岩填隙物中, 高岭石、绿泥石等黏土矿物含量相对较高(图 6e-f), 岩石铸体薄片能观察到白云石胶结物(图 6b-c), 以上矿物均相对富含镁。由此认为花港组地层水中 Mg^{2+} 亏损可能与高岭石和绿泥石紧密相关, 白云岩化也是造成 Mg^{2+} 亏损的重要原因。

4.5 地层水氢、氧同位素特征

研究表明, 雨水的氢、氧同位素变化规律遵循全球大气降水方程, 可以利用 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值落点位置, 判断地层水的来源^[9-10, 40-42]。地层水受大气降水影响程度越大, 氢、氧同位素值离大气降水线越近。岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比水大, 由于水-岩反应会使地层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值增大, 因此, $\delta^{18}\text{O}$ 值可以指示水-岩反应的强弱^[9-10, 40-42]。

目前, 地层水按其形成环境以及成因可分为 4 类^[9], 分别为: 大气成因溶滤水、海相或陆相成因沉积水、变质成因再生水以及岩浆成因初生水。

西湖凹陷天台反转带花港组地层水的氢、氧同位素值 (δD 、 $\delta^{18}\text{O}$) 分别为 $-42.3\text{‰} \sim -27.8\text{‰}$ 和 $-5.0\text{‰} \sim -1.7\text{‰}$ 。其中, T 油气田氢、氧同位素值

分别为 $-32.8\text{‰} \sim -27.8\text{‰}$ 和 $-5.0\text{‰} \sim -1.7\text{‰}$, 平均值为 -30.4‰ 和 -3.3‰ ; C 油气田氢、氧同位素值分别为 $-42.6\text{‰} \sim -38.0\text{‰}$ 和 $-5.1\text{‰} \sim -4.2\text{‰}$, 平均值为 -40.8‰ 和 -4.5‰ 。由 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图 7)可以看出, 数据点均落于全球大气降水线($\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$)右侧, 偏离标准海水值, 但离大气降水线相对较近, 指示地层水为陆相成因沉积水, 局部受到轻微变质作用的影响, 存在一定程度的水-岩反应。综合认为, 天台反转带花港组地层整体受大气降水影响较弱, 地层封闭条件相对较好, 有利于油气保存。相较于 C 油气田, T 油气田的地层封闭性更好, 水-岩反应更强烈, 更有利于油气的保存。

5 结论

(1) 西湖凹陷天台反转带花港组主要发育 CaCl_2 的 IV 型和 V 型地层水, 离子浓度表现为 $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{CO}_3^{2-}$ 。地层水钠氯系数为 $0.43 \sim 0.87$ (均值为 0.57), 远低于海水的 0.85 ; 脱硫系数较小, 为 $0.04 \sim 0.56$ (均值为 0.18); 钙镁系数为 $4.87 \sim 591.87$ (均值为 54.82), 高于深层水的 3.0 ; 阳离子交换系数 (IBE) 为 $0.08 \sim 0.55$ (均值为 0.40), 均指示研究区花港组地层封闭性较好, 处于交替停滞带, 有利于油气的聚集与保存。

(2) 花港组地层水来源于陆相沉积水, 受沉积环境、水-岩反应、蒸发浓缩作用以及流体混合作用共同控制, 表现出富 Ca^{2+} , 贫 Mg^{2+} , 略微贫 Na^+ 的特点。

(3) Na^+ 轻微亏损主要受钠长石化作用影响; Ca^{2+} 富集除了钠长石化作用外, 有机质成熟过程中伴生的有机酸, 对长石和含钙矿物的溶蚀作用, 也促进地层水中 Ca^{2+} 的富集; Mg^{2+} 亏损可能与高岭石、绿泥石以及白云岩化紧密相关。

参考文献 (References)

- [1] Land L S, Macpherson G L. Geochemistry of formation water, Pliocene-Pleistocene reservoirs, offshore Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 1989, 39: 421-430.
- [2] 孙向阳, 刘方槐. 沉积盆地中地层水化学特征及其地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2001, 24(4): 47-53. [SUN Xiangyang, LIU Fanghui. Geochemical characteristics of formation water and its geological significance in sedimentary basins [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2001, 24(4): 47-53.]
- [3] 徐国盛, 刘树根, 李仲东, 等. 四川盆地天然气成藏动力学[M]. 北京: 地质出版社, 2005. [XU Guosheng, LIU Shugen, LI Zhongdong, et al. Dynamics of Natural Gas Accumulations in Sichuan Basin, China[M]. Beijing: Geological Press, 2005.]

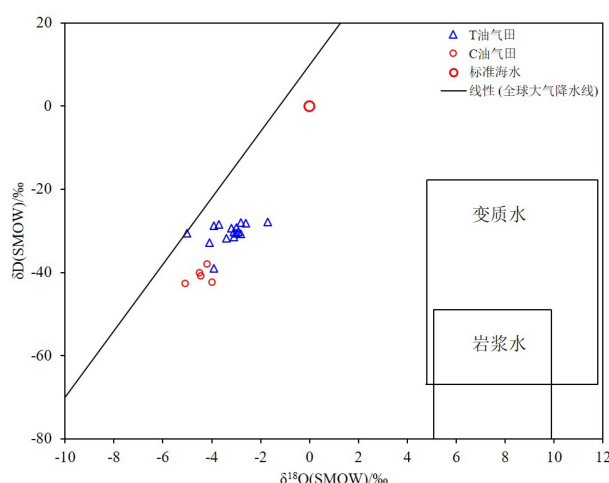


图 7 研究区地层水 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图^[10]

Fig.7 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of the formation water in study area^[10]

- [4] 钱诗友, 曾溅辉. 东营凹陷沙河街组地层水化学特征及其石油地质意义[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 603-609. [QIAN Shiyu, ZENG Jianhui. Chemical characteristics of Shahejie Formation formation water and their petroleum geological significance, Dongying sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 603-609.]
- [5] 窦伟坦, 刘新社, 王华, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因及气水分布规律[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 767-773. [DOU Weitai, LIU Xinshe, WANG Tao. The origin of formation water and the regularity of gas and water distribution for the Sulige gas field, Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 767-773.]
- [6] 徐德英, 周江羽, 王华, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷东营组地层水化学特征的成藏指示意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 285-289. [XU Deying, ZHOU Jiangyu, WANG Hua, et al. Chemical characteristics of formation water significant to oil reservoir in Dongying Formation, Nanpu sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2010, 32(3): 285-289.]
- [7] 陈中红, 王书南, 王黎, 等. 山东东营凹陷新近系地层水化学场特征及油气意义[J]. 古地理学报, 2012, 14(5): 685-693. [CHEN Zhonghong, WANG Shu'nan, WANG Li, et al. Characteristics of formation water chemical fields and its petroleum significance of the Neogene in Dongying Sag, Shandong Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(5): 685-693.]
- [8] 李贤庆, 侯读杰, 柳常青, 等. 鄂尔多斯中部气田下古生界水化学特征及天然气藏富集区判别[J]. 天然气工业, 2002, 22(4): 10-14. [LI Xianqing, HOU Dujie, LIU Changqing, et al. Hydrochemical characteristics of Lower Paleozoic formation water and identification of natural gas enrichment area in central gas fields in E'Erduosi [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(4): 10-14.]
- [9] 林耀庭, 熊淑君. 氢氧同位素在四川气田地层水中的分布特征及其成因分类[J]. 海相油气地质, 1999, 4(4): 39-45. [LIN Yaoting, XIONG Shujun. The distribution characteristics and genetic classification of hydrogen and oxygen isotope of formation water in Sichuan gas field [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1999, 4(4): 39-45.]
- [10] 李建森, 李廷伟, 彭喜明, 等. 柴达木盆地西部第三系油田水水文地质化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 50-55. [LI Jiansen, LI Tingwei, PENG Ximing, et al. Hydrogeochemical behaviors of oilfield water in the Tertiary in western Qaidam Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 50-55.]
- [11] 汪蕴璞, 林锦璇, 王翠霞, 等. 西湖含油气凹陷第三系地下水化学及其形成演化模式[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1998, 23(3): 294-298. [WANG Yunpu, LIN Jinxuan, WANG Cuixia, et al. Chemical evolution of groundwater in the Tertiary sedimentary system of the Xihu oil-gas bearing depression [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(3): 294-298.]
- [12] 汪蕴璞, 王珊, 林锦璇, 等. 西湖凹陷油气运聚成藏的水文地质论证[J]. 中国海上油气(地质), 1997, 11(5): 305-312. [WANG Yunpu, WANG Shan, LIN Jinxuan, et al. Hydrogeological demonstration of oil/gas migration and accumulation in Xihu Sag [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1997, 11(5): 305-312.]
- [13] 杨丽杰, 侯读杰, 陈晓东, 等. 东海盆地西湖凹陷中部古近系地层水化学特征及地质意义[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(4): 559-571, 596. [YANG Lijie, HOU Dujie, CHEN Xiaodong, et al. Chemical characteristics and geological significance of Palaeogene formation water in central Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(4): 559-571, 596.]
- [14] 翟玉兰. 东海陆架盆地西湖凹陷古近系层序地层与沉积体系研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. [ZHAI Yulan. The study on the sequence stratigraphy and sedimentary system in Paleogen of Xihu Sag in the East China Sea Shelf Basin [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.]
- [15] 钱门辉. 西湖凹陷煤系烃源岩生烃特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010: 11-19. [QIAN Menhui. Model research of generation of hydrocarbon coal source rock in Xihu Depression [D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2010: 11-19.]
- [16] 宋小勇, 储呈林, 芮志峰. 东海盆地西湖凹陷构造样式及其演化[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1): 86-93. [SONG Xiaoyong, CHU Chenglin, RUI Zhifeng. Structural framework and evolution of Xihu Sag in East China Sea Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(1): 86-93.]
- [17] 姜文斌. 东海西湖凹陷中央反转构造带成藏特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 9-16. [JIANG Wenbin. Study on characteristics of accumulation in central inversion structural belt Xihu Depression, East China Sea [D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2012: 9-16.]
- [18] 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.]
- [19] 徐振平, 梅廉夫. 川东北地区不同构造带地层水化学特征与油气保存的关系[J]. 海相油气地质, 2006, 11(4): 29-33. [XU Zhenping, MEI Lianfu. Relationship between chemical features of formation water and hydrocarbon preservation in different structural areas in Northeast part of Sichuan basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(4): 29-33.]
- [20] 曾溅辉, 吴琼, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 223-229. [ZENG Jianhui, WU Qiong, YANG Haijun, et al. Chemical characteristics of formation water in Tazhong area of the Tarim Basin and their petroleum geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 223-229.]
- [21] 宫亚军, 沈忠民, 刘四兵, 等. 川西拗陷新场地区须家河组地层水的地化特征研究[J]. 四川地质学报, 2010, 30(1): 72-74. [GONG Yajun, SHEN Zhongmin, LIU Sibing, et al. Geochemical characteristics of formation water in the Xujiahe Formation in the Xinchang Area, West Sichuan depression [J]. Acta Geologica Sichuan, 2010, 30(1): 72-74.]
- [22] 楼章华, 尚长健, 姚根顺, 等. 桂中坳陷及周缘海相地层油气保存条件[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 432-441. [LOU Zhanghua, SHANG Changjian, YAO Genshun, et al. Hydrocarbon preservation conditions in marine strata of the Guizhong Depression and its margin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 432-441.]
- [23] 吴浩, 郑丽, 慈建发. 新场气田须二段地层水地球化学特征及其石油地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(4): 41-44. [WU Hao, ZHENG Li, CI Jianfa. Geochemical characteristics of formation water

- in Xujiache 2 member, Xinchang gasfield [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2012, 35 (4): 41-44.]
- [24] 苏林. 天然水系中的油田水[M]. 王成义, 译. 北京: 石油工业出版社, 1956. [SU Lin. *Oilfield Water in Natural Water System*[M]. WANG Chengyi, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1956.]
- [25] 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. [LI Xianqing, HOU Dujie, ZHANG Aiyun. Advancement of the geochemical study of oilfield water [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20 (2): 51-54.]
- [26] 楼章华, 朱蓉. 中国南方海相地层水文地质地球化学特征与油气保存条件[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27 (5): 584-593. [LOU Zhanghua, ZHU Rong. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions in marine strata in southern China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27 (5): 584-593.]
- [27] Connolly C A, Walter L M, Baadsgaard H, et al. Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, western Canada sedimentary basin. I. Chemistry [J]. *Applied Geochemistry*, 1990, 5 (4): 375-413.
- [28] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995. [WANG Dachun, ZHANG Renquan, SHI Yihong, et al. *Hydrogeology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.]
- [29] García G M, Hidalgo M D V, Blesa M A. Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina [J]. *Hydrogeology Journal*, 2001, 9 (6): 597-610.
- [30] 杨娅敏, 赵桂萍, 李良. 杭锦旗地区地层水特征研究及其油气地质意义[J]. 中国科学院大学学报, 2016, 33 (4): 519-527. [YANG Yamin, ZHAO Guiping, LI Liang. Chemical characteristics of the formation water in Hangjinqi area and their petroleum and gas geological significance [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 33 (4): 519-527.]
- [31] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 石油工业出版社, 1991. [LIU Fanghuai, YAN Wansun. *Principles of Hydrogeology of Oil & Gas Fields*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.]
- [32] 康保平, 黄小燕, 郭淑萍, 等. 川西坳陷须二气藏气田水成因、运移及其成藏演化[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39 (2): 309-317. [KANG Baoping, HUANG Xiaoyan, GUO Shuping, et al. Origin, migration, and accumulation evolution of reservoir water in the gas field with Xu 2 gas reservoir, western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39 (2): 309-317.]
- [33] 覃伟, 李仲东, 郑振恒, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田地层水特征及成因分析[J]. 岩性油气藏, 2011, 23 (5): 115-120. [QIN Wei, LI Zhongdong, ZHENG Zhenheng, et al. Characteristics and genesis of formation water in Daniudi Gas Field, Ordos Basin [J]. *Northwest Oil & Gas Exploration*, 2011, 23 (5): 115-120.]
- [34] Stueber A M, Walter L M. Origin and chemical evolution of formation waters from Silurian-Devonian strata in the Illinois basin, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55 (1): 309-325.
- [35] Wilson T P, Long D T. Geochemistry and isotope chemistry of Ca-Na-Cl brines in Silurian strata, Michigan Basin, U. S. A. [J]. *Applied Geochemistry*, 1993, 8 (5): 507-524.
- [36] 周训, 李慈君. 海水蒸发轨迹线及其应用[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1995, 20 (2): 410-414. [ZHOU Xun, LI Cijun. Seawater evaporation trajectories and their application [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20 (2): 410-414.]
- [37] 张正斌, 刘莲生. 海洋化学(上卷)[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004. [ZHANG Zhengbin, LIU Liansheng. *Marine Chemistry* (vol. 1)[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2004.]
- [38] 陈静生. 河流水质原理及中国河流水质[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [CHEN Jingsheng. *Principles of River Water Quality and River Water Quality in China*[M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [39] Davisson M L, Criss R E. Na-Ca-Cl relations in basinal fluids [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60 (15): 2743-2752.
- [40] 尹观. 同位素水文地球化学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988. [YIN Guan. *Isotopic Hydrogeochemistry*[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1988.]
- [41] 陈陆望, 桂和荣, 殷晓曦, 等. 深层地下水 ^{18}O 与D组成特征与水流域[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37 (6): 854-858. [CHEN Luwang, GUI Herong, YIN Xiaoxi, et al. Composing characteristic of ^{18}O and D and current field in deep groundwater [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37 (6): 854-858.]
- [42] 周孝鑫, 楼章华, 朱蓉, 等. 川西坳陷新场气田水文地质地球化学特征及天然气运聚[J]. 地球科学, 2015, 50 (1): 330-339. [ZHOU Xiaoxin, LOU Zhanghua, ZHU Rong, et al. Hydrogeology geochemical characteristics of continental formation water in Xinchang gas field, western Sichuan depression and gas migration and accumulation [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50 (1): 330-339.]