

doi:10.3799/dqkx.2015.167

辽河盆地西部凹陷稠油分布区地层水化学特征

朱芳冰^{1,2}, 周 红^{1,2}, 刘 睿^{1,2}

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 地层水特征是研究盆地演化及稠油分布的重要因素。稠油在辽河盆地已探明的石油储量中占有重要比例, 地层水化学场研究是预测稠油分布的基础, 利用地层水地球化学特征和同位素资料研究地层水来源, 分析水介质条件对原油降解稠化的影响。研究表明: 西部凹陷地层水的矿化度和离子构成受深度控制, 具有“垂向流”特征; 其化学组成及变化规律的差异反映了不同地区地表水注入强度及局部地下水运动特征的变化, 地表水注入强度及运动特征的差异是原油生物降解程度不同的主要原因, 地下水的循环特征决定了其化学条件和原油生物降解程度, 地表水淋滤作用是降解型稠油发育的必要条件。

关键词: 辽河盆地; 地层水; 稠油; 同位素; 水文地质学。

中图分类号: P345 **文章编号:** 1000-2383(2015)11-1870-06 **收稿日期:** 2015-05-05

Geochemical Characteristics and Origin of Formation Water in Western Depression, Liaohe Basin

Zhu Fangbing^{1,2}, Zhou Hong^{1,2}, Liu Rui^{1,2}

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The characteristics of formation water are important factors to study the basin evolution and heavy oil distribution. Geochemical studies can facilitate the exploration of heavy oil which dominates the oil reserves in Liaohe basin. Based on the test of formation water and isotope analyses of western depression, the geochemistry and origin of formation water are discussed in this paper. The total dissolved solid (TDS) and chemical compositions are controlled by the buried depth. The formations water shows vertical flow. The differences of chemical compositions of formation water and characters are related to intensity of surface water injection in different areas and local formation water flowing characters which are main reasons of crude oil bio-degradation. The isotope analyses also show that surface water injection is much stronger in Jinzhou, Huanxiling and Lenji areas. The different cycle characters of formation water lead to chemical conditions and crude oil bio-degradation. Surface water leaching is the necessary condition of degradation heavy oil development.

Key words: Liaohe basin; formation water; heavy oil; isotope; hydrological geology.

1 地质背景

辽河盆地西部凹陷是渤海湾裂谷盆地中的一个多旋回箕状断陷, 具有沉积厚度大、沉降快和沉积旋回多的特点(梁明亮等, 2014), 其前第三纪基底结构较为复杂, 呈东北向展布的主控断裂构成隆凹相

间的构造格局。研究区主要发育7个次级构造单元: 沈北凹陷、大民屯凹陷、西部凸起、西部凹陷、中央凸起、东部凹陷和东部凸起, 新生代沉积的地层为房身泡组、沙河街组、东营组和上第三纪的馆陶组及明化镇组。

稠油在辽河盆地已探明的石油储量中占有重要

基金项目: 国家科技支撑计划(125 计划)项目(No. 2011021043)。
作者简介: 朱芳冰(1966—), 女, 副教授, 博士, 从事石油地质与油藏工程的教学与科研工作。E-mail: zhufb66@163.com

引用格式: 朱芳冰, 周红, 刘睿, 2015. 辽河盆地西部凹陷稠油分布区地层水化学特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1870-1875.

的比例,稠油油藏的形成和演化经历了漫长的地质过程. 生物降解是研究区稠油发育的主要原因(Braun and Burnham, 1990; Wenger and Isaksen, 2002; 胡守志等, 2009). 生物降解是在一定的盆地水化学条件下发生的,因此地层水化学场研究及特征分析是预测稠油分布的基础.

笔者收集、整理了辽河盆地西部凹陷所有探井和部分开发井的水化学分析资料,从西部凹陷水化学场分析入手,比较不同稠油分布区地层水的化学特征,并通过同位素分析探讨地层水的来源,研究地层水化学场对原油降解稠化的影响.

2 地层水地球化学特征

沉积盆地流体的化学组成及其分布(即流体化学场)是盆地发育、演化及由此决定的流体运动的结果. 在油气运聚成藏的过程中,地层水与周围介质发生物质与能量的交换,因而可通过地层水化学特征分析,获取油气聚集成藏的重要信息(Bachu, 1995; 李梅等, 2010; 林晓英等, 2012).

辽河盆地西部凹陷下第三系水化学组成以 Cl^- 、 HCO_3^- 和 Na^+ 为主(表 1),根据苏林分类,其属于 NaHCO_3 型.

沙四段的平均总矿化度(total dissolved solid, 简称 TDS)、 HCO_3^- 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Cl^- 含量分别为 4 886. 6 mg/L、1 686. 0 mg/L、1 482. 6 mg/L 和 1 326. 0 mg/L(表 1). 各层位的平均总矿化度均小于 5 000 mg/L, pH 值一般大于 7,属于低矿化的碱性水.

阳离子中,各层位 Ca^{+} 和 Mg^{+} 的平均浓度接近且均保持低值($<50 \text{ mg/L}$),其中沙四段、沙三段和沙一段地层水的平均 Ca^{2+} 浓度高于 Mg^{2+} ,而沙二段和东营组恰恰相反.

大部分样品的阴离子以 HCO_3^- 为主,但部分样品 Cl^- 在 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ 中的相对含量超过 50%(图 1),几乎所有样品的 SO_4^{2-} 相对含量小于 25%,与海相盆地相对较高的 SO_4^{2-} 浓度明显不同.

值得注意的是,沙四段和沙三段地下水各种化学组分的分布形式与上覆地层有所不同(沙四段和沙三段为 $\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$,而沙二段、沙一段和东营组的地下水化学组成分布形式为 $\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$,除此之外,下第三系各层位地下水的总矿化度和主要离子含量未表现出明显而有规律的变化,这与国内外一些盆地如济阳坳陷不同层位地下水化学组成的较大差异明显不同(赵艳军等, 2014),沉积盆地中不同层位地下水化学组成的明显差异反映地下水的“层状”流动,而垂向上不同层位地下水化学成分的相对均一性反映了地下水的“垂向”流动.

为了分析研究区地层水的总体运动规律,笔者统计了不同深度段地下水平均化学组成(图 2). 从图 2 中可看出,地层水的阳离子($\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)总含量、各种阴离子特别是 HCO_3^- 及总矿化度均随深度增大而增大,埋藏深度对地层水矿化度和离子构成的控制明显强于层位的控制作用,同时,反映地层水变质程度的钠氯系数($\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$,亦称变质系数)在各层段变化不大(曾溅辉等,

表1 西部凹陷下第三系各层位地层水化学组成

Table 1 Formation water chemical composition of Eogene members in western depression

项目	沙四段	沙三段	沙二段	沙一段	东营组
$\text{Ca}^{2+}(\text{mg/L})$	38.30	47.38	13.00	28.70	27.00
$\text{Mg}^{2+}(\text{mg/L})$	33.9	43.3	28.8	11.7	40.0
$\text{Na}^+ + \text{K}^+(\text{mg/L})$	1 482.6	1 598.9	1 392.0	1 351.8	1 117.5
$\text{HCO}_3^-(\text{mg/L})$	1 686.0	2 102.8	2 307.0	2 170.8	1 416.6
$\text{CO}_3^{2-}(\text{mg/L})$	108.8	132.6	146.0	163.8	105.3
$\text{Cl}^-(\text{mg/L})$	1 326.00	986.00	579.60	621.60	868.97
$\text{SO}_4^{2-}(\text{mg/L})$	113.6	146.8	93.6	68.8	85.9
分布形式	$\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$
TDS(mg/L)	4 886.6	4 886.1	4 513.6	4 396.0	3 928.0
$\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 钠氯系数	1.18	1.66	2.60	2.16	1.28
$\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ 脱硫系数	8.86	15.60	15.96	12.16	9.86

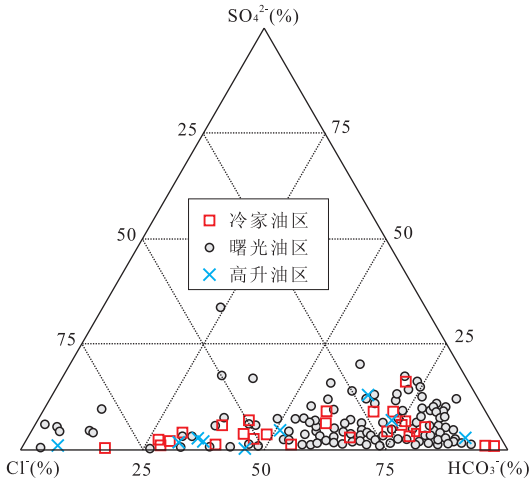


图 1 辽河盆地西部凹陷地层水阴离子构成三角图
Fig. 1 Triangular diagram of formation water negative ion composition in western depression, Liaohe basin

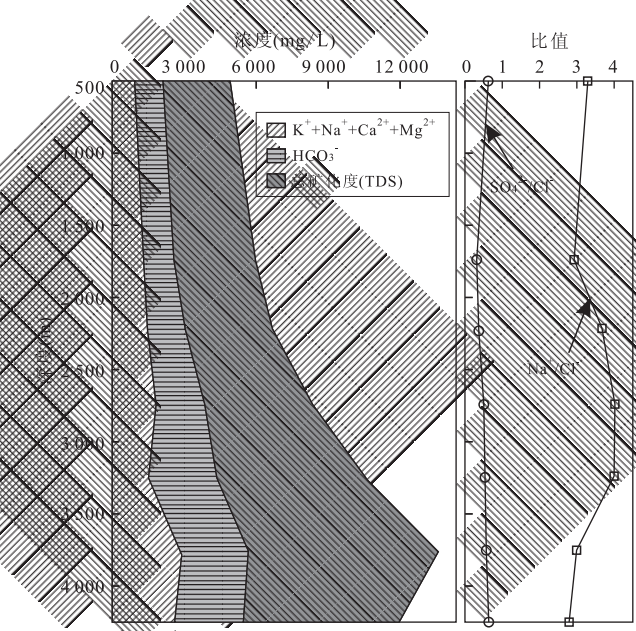


图 2 辽河盆地西部凹陷地层水平均化学组成随深度的变化
Fig. 2 Variations of formation water average chemical composition with depth in western depression, Liaohe basin

2008;张宗峰等, 2009),进一步证明了研究区地层水的“垂向”运动特征。

尽管研究区地层水矿化度及主要离子的浓度纵向上表现出随深度增大而增大的趋势,但不同地区地层水化学剖面亦有一定差异,反映了地下水来源和运动形式的变化。沉积盆地中的地层水来源主要有 2 种:压实沉积水和地表注入水。在地表水注入区,地层水矿化度低且总矿化度及各种主要离子的含量随深度增大而增大,而在排泄区、滞缓区或深源压实水与地表注入水的交汇区,地层水矿化度及各

主要离子的浓度明显增大,径流区地层水的矿化度介于排泄区和滞缓区之间。

研究区西部斜坡带是地表水注入最强的地区,其浅部地层水矿化度低,随深度增大,地表注入水的影响逐渐减弱,地层水矿化度随深度增大而增大,且地层水氧化性较强,因此 SO_4^{2-} 浓度较高,锦州、欢喜岭上台阶及曙光稠油区总体反映了这一特点(图 3)。高升油区地表水的直接注入量较小,特别是该区 1 500~2 000 m 层段可能是深源压实水与浅层水的交汇区,与锦州、欢喜岭上台阶及曙光稠油区相比,浅层水经过了较长距离的运移,由于运移过程中的水-岩相互作用,地层水的矿化度明显增大、氧化性明显减弱,因此高升油区 1 500~2 000 m 地层水具有较高的矿化度,但 SO_4^{2-} 浓度较低,冷家油区则介于高升与曙光油区之间,在一定程度上反映了径流水与深源压实水相互作用的特点。

3 同位素分析及地层水来源

来源不同的地下水氢、碳同位素组成明显不同。地下水在长期的演化过程中,因与围岩矿物及地层水溶解物质的相互作用,其同位素组成亦会发生相应的变化,因此氢氧同位素分析是研究地层水来源和演化的重要手段(Kloppmann *et al.*, 2001)。

地下水与围岩特别是碳酸盐和硅酸盐矿物发生同位素交换,从而使地层逐渐富集 ^{18}O ,导致埋藏变质作用较强的地层水在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图上以降解线为起点向右平移,即发生所谓的 ^{18}O 漂移,地下水与 CO_2 、 HCO_3^- 、烃类及含水矿物之间的同位素交换反应亦可导致地层水富集氢的重同位素(δD 增大)。

对油田水样进行同位素分析,研究地层水的演化及其对稠油形成和分布的影响。图 4 是西部凹陷地层水的 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 相关图,并给出了 Graigh 降水线及正常海水的同位素组成。

西部凹陷地表水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -111.0‰ 和 -17.6‰ ,与地层水的同位素组成明显不同。从图 4 可以看出:(1)西部凹陷地层水的同位素组成与正常海水的同位素组成明显不同,所有资料点均分布于海水平均值的下方,反映地层水的非海水来源。(2)地层水的同位素组成明显受样品深度的控制,深度小于 1 500 m 的地层水分布于 H. Graigh 降水线的上方或附近,表明浅部地层水受地表水的强烈影响;深度较大的地层水的同位素组成发生了较明显的 ^{18}O 漂移,漂移程度总体上主要受

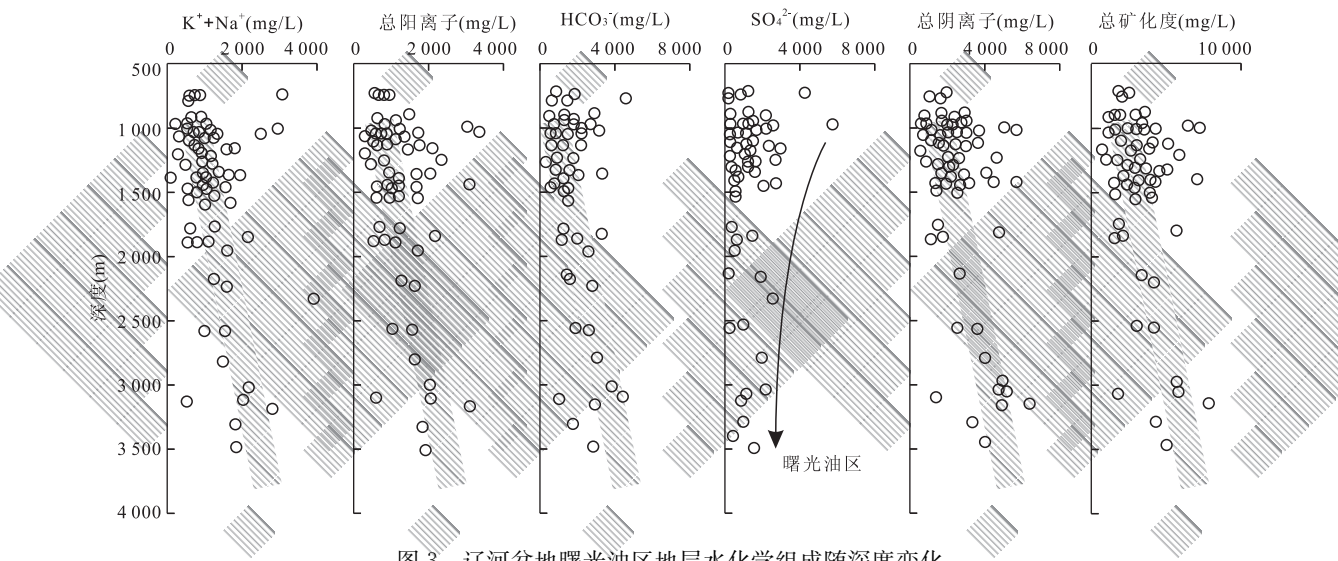


图 3 辽河盆地曙光油区地层水化学组成随深度变化

Fig. 3 Variations of formation water chemical composition with depth in Shuguang area, Liaohe basin

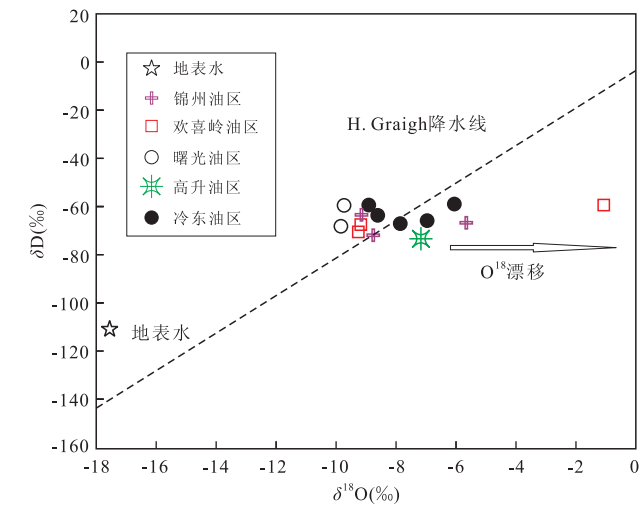


图 4 西部凹陷地层水氢氧同位素关系

Fig. 4 Relationship between formation water hydrogen isotope and oxygen isotope in Western depression

深度控制,而与地层层位无明显的关系.例如,深度不同的沙一段的同位素组成明显不同,深度为 1 358.2~1 385.1 m 的锦 228 井沙一段样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-8.8‰,而深度为 3 313.8~3 437.8 m 的双 91 井沙一段样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值达-1.1‰. (3)与埋深相近的高升油区地层水相比,锦州、欢喜岭和冷家油区地层水的同位素组成更接近 H. Graigh 降水线,表明这些地区的地层水受地表水注入的程度明显高于高升地区,深度为 1 600 m 的高 77 井地层水的同位素组成较深度为 2 348.0~2 383.0 m 的雷 57 井地层水具有更大的 $\delta^{18}\text{O}$ (发生了更明显的 ^{18}O 漂移),表明高升地区受大气降水的影响程度明显低于锦州、欢喜岭和冷家地区.

4 地层水介质条件对原油降解稠化的影响分析

流经油藏的地下水通过选择性溶解作用可改变油气的组成和性质.地下水的化学行为是影响油气组成的重要因素,最常见的过程是油气的生物降解.图 5 给出了西部凹陷原油的密度、胶质和沥青质含量及 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、总矿化度、阴离子、阳离子浓度等主要水文地球化学指标的关系,原油的密度、胶质和沥青质含量随油田水的阴离子、阳离子浓度及总矿化度的增大出现逐渐减小的趋势.

原油的物化性质与地层水矿化度及各种离子浓度的关系反映了水化学条件对原油氧化、降解程度的控制作用.西部凹陷地层水具有“垂向流”的特征,其矿化度及主要离子的浓度取决于压实沉积水的埋藏变质作用程度、地表水和大气降水的影响强度及地表水和大气降水来源的地下水所经历的地下循环过程 (Hanor, 1994; Birkle *et al.*, 2009).随深度减小,油田水的矿化度逐渐降低是地表水注入引起的地层水稀释的结果.地表水的注入越强,地层水的矿化度越低,氧的供应就越充分,原油的氧化一降解程度就越强,导致原油的密度和粘度及胶质、沥青质含量随地层水矿化度的降低而增大. SO_4^{2-} 是重要的氧化剂,随 SO_4^{2-} 浓度的增大,原油的密度和粘度及胶质、沥青质含量增大,反映了水化学条件变化引起的原油氧化降解程度的变化.

各地区地下水的循环特征不同,导致了地层水化学条件和原油生物降解程度的差异.西部斜坡特

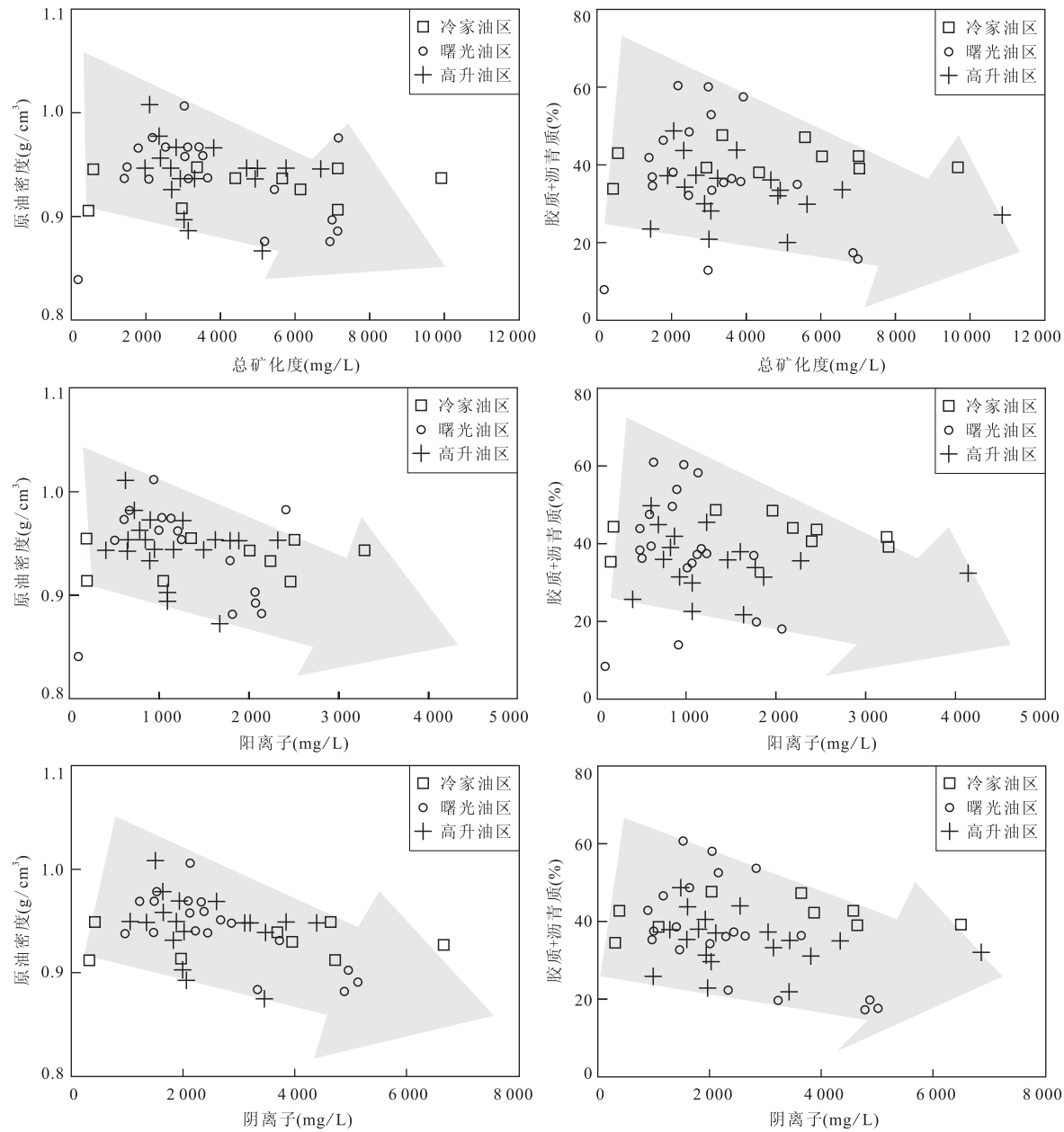


图 5 西部凹陷原油的密度及胶质和沥青质含量与油田水矿化度及离子含量的关系

Fig. 5 Relationship between crude oil density, colloid, asphalt and formation water salinity, ion in western depression

别是锦州、欢喜岭和曙光地区地表水注入强烈,其原油的生物降解程度较高(原油的密度和粘度较大)。高升地区地表水的注入相对较弱,在 1 500~2 000 m 层段可能是深源压实水与浅层水的交汇区,浅层水经过了较长时间的运移,含氧量大大降低,因此原油的生物降解程度较低,其密度和粘度相对较小。因此,各稠油分布区浅部储层曾发生的地表水淋滤作用是降解型稠油发育的必要条件,地表水注入强度及地下水的局部循环和运动控制了氧及其他氧化剂的供应,决定了原油的生物降解程度。

5 结论

地层水的现今地球化学特征是盆地演化过程中地下水的运动状态、有机—无机反应及水—岩相互作用等一系列物理—化学过程共同作用的结果。本文通过对研究区水化学特征分析,利用同位素资料探讨地层水的来源,总结地层水化学场对原油降解稠化的影响,研究表明:(1)西部凹陷地层水总体具有“垂向流”特征,地层水的矿化度和离子构成总体上受深度控制;(2)地层水化学组成及变化规律的差异反映了不同地区地表水注入强度及局部地下水运

动特征的变化。地表水注入强度及运动特征的差异是原油生物降解程度不同的主要原因;同位素分析亦表明锦州、欢喜岭和冷家油区地层水受地表水注入的程度明显高于高升地区;(3)地下水不同的循环特征,决定了其化学条件和原油生物降解程度的差异,地表水淋滤作用是降解型稠油发育的必要条件。

References

- Bachu, S. , 1995. Synthesis and Model of Formation-Water Flow, Alberta Basin, Canada. *AAPG Bulletin*, 79(8): 1159—1178.
- Birkle, P. , Garcia, B. M. , Padrón, C. M. M. , 2009. Origin and Evolution of Formation Water at the Jujo-Tecominoacan Gulf of Mexico, Part 1: Chemical Evolution and Water-Rock Interaction. *Applied Geochemistry*, 24(4): 543—554. doi:10. 1016/j. apgeochem. 2008. 12. 009
- Braun, R. L. , Burnham, A. K. , 1990. Mathematical Model for Oil Generation, Degradation and Expulsion. *Energy Fuels*, 4(2): 132—146. doi:10. 1021/ef00020a002
- Hanor, J. S. , 1994. Physical and Chemical Controls on the Composition of Waters in Sedimentary Basins. *Marine and Petroleum Geology*, 11(1): 31—45. doi:10. 1016/0264—8172(94)90007—8
- Hu, S. Z. , Zhang, D. M. , Tang, J. , et al. , 2009. Review of the Genesis of Heavy Oil. *Geological Science and Technology Information*, 28(2): 94—97 (in Chinese with English abstract).
- Kloppmann, W. , Negrel, P. , Casanova, J. , et al. , 2001. Halite Dissolution Derived Brines in the Vicinity of a Permian Salt Dome (German Basin): Evidence from Boron, Strontium, Oxygen and Hydrogen Isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(22): 4087—4101. doi:10. 1016/S0016—7037(01)00640—8
- Li, M. , Jin, A. M. , Lou, Z. H. , et al. , 2010. Hydrochemical Properties of Formation Water and Its Relationship with Oil and Gas Migration and Accumulation in Zhenwu Area of Southern Gaoyou Sag. *Journal of China University of Petroleum*, 34(5): 50—56 (in Chinese with English abstract).
- Liang, M. L. , Wang, Z. D. , Zheng, J. J. , et al. , 2014. Organic Geochemistry Characteristics of Source Rocks in Liaohe Depression. *Lithologic Reservoirs*, 26(4): 110—116 (in Chinese with English abstract).
- Lin, X. Y. , Zeng, J. H. , Yang, H. J. , et al. , 2012. Geochemical Characteristics and Origin of Formation Water from the Carboniferous in Hadson Oil Field, Tarim Basin. *Geoscience*, 26(2): 377—383 (in Chinese with English abstract).
- Wenger, L. M. , Isaksen, G. H. , 2002. Control of Hydrocarbon Seepage Intensity on Level of Biodegradation in Sea Bottom Sediments. *Organic Geochemistry*, 33(12): 1277—1292. doi:10. 1016/S0146—6380(02)00116—X
- Zeng, J. H. , Wu, Q. , Yang, H. J. , et al. , 2008. Chemical Characteristics of Formation Water in Tazhong Area of the Tarim Basin and Their Petroleum Geological Significance. *Oil & Gas Geology*, 29(2): 223—229 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. F. , Zha, M. , Gao, C. H. , et al. , 2009. Hydrochemical Characteristics and Hydrocarbon Accumulation in the Chengbei Fault Terrace Zone of Dagang Oilfield. *Oil & Gas Geology*, 30(3): 268—274 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. J. , Liu, C. L. , Jin, C. X. , et al. , 2014. Characteristics of the Fourth Member of Shahejie Formation Water and Their Indicative Significance in Salt Formation, Jiyang Depression of Bohai Bay Basin. *Earth Science Frontiers*, 21(4): 323—330 (in Chinese with English abstract). doi:10. 13745/j. esf. 2014. 04. 32

附中文参考文献

- 胡守志, 张冬梅, 唐静, 等, 2009. 稠油成因研究综述. 地质科技情报, 28(2): 94—97.
- 李梅, 金爱民, 娄章华, 等, 2010. 高邮凹陷南部真武地区地层水化学特征及油气运聚的关系. 中国石油大学学报(自然科学版), 34(5): 50—56.
- 梁明亮, 王作栋, 郑建京, 等, 2014. 辽河断陷烃源岩有机地球化学特征. 岩性油气藏, 26(4): 110—116.
- 林晓英, 曾溅辉, 杨海军, 等, 2012. 塔里木盆地哈得逊油田石炭系地层水化学特征及成因. 现代地质, 26(2): 377—383.
- 曾溅辉, 吴琼, 杨海军, 等, 2008. 塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义. 石油与天然气地质, 29(2): 223—229.
- 张宗峰, 查明, 高长海, 等, 2009. 大港油田埕北断阶区地层水化学特征与油气成藏. 石油与天然气地质, 30(3): 268—274.
- 赵艳军, 刘成林, 靳彩霞, 等, 2014. 渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组四段地层水特征及成盐指示. 地学前缘, 21(4): 323—330.