

不同沉积环境下原油氮同位素的地球化学特征

陈践发¹, 徐学敏^{1,2}, 师生宝¹

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要:氮是原油中的重要组成元素,但是由于原油含氮量较低,碳氮比高,造成氮同位素样品制备困难。为揭示不同沉积环境原油的氮同位素分布特征及其主要影响因素,依据杜马斯燃烧法原理,利用EA-IRMS连用技术测定几个典型沉积盆地原油的氮、碳同位素组成。结果表明:不同沉积环境原油氮同位素组成具有明显的差异,海相沉积环境原油氮同位素明显轻于陆相沉积环境的原油;陆相沉积环境中原油氮同位素组成特征受沉积环境的盐度及氧化还原程度的影响,源于弱氧化-弱还原环境的原油氮同位素组成明显偏重,这是该沉积环境有利于反硝化作用的进行所致;原油的氮同位素组成可以有效用于原油的油源分析和对比,原油的氮同位素组成可能是油气地球化学中一项重要指标。

关键词:原油; 氮同位素; 杜马斯燃烧法; 沉积环境

中图分类号:TE 19 **文献标志码:**A

引用格式:陈践发,徐学敏,师生宝. 不同沉积环境下原油氮同位素的地球化学特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(5):1-6.

CHEN Jianfa, XU Xuemin, SHI Shengbao. Geochemical characteristics of nitrogen isotope of crude oils in different depositional environments[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 1-6.

Geochemical characteristics of nitrogen isotope of crude oils in different depositional environments

CHEN Jianfa¹, XU Xuemin^{1,2}, SHI Shengbao¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: Nitrogen is an important element in crude oil. Due to the low nitrogen content and high C/N ratio of crude oils, the isotope samples are difficult to be prepared, resulting in the few studies and applications using the isotope. In this work, a series of crude oil samples from several typical sedimentary basins in China were determined to reveal the distribution characteristics and the main influence factors of nitrogen isotope in different sedimentary environments. To measure the carbon and nitrogen isotope values of crude oil samples, the research uses an elemental analyzer (EA) coupled directly to an isotope ratio mass spectrometer (IRMS), based on Dumas combustion method. The results show that there are obvious differences between nitrogen isotopes of crude oil in different sedimentary environments. The values of the marine sedimentary environment are significantly lighter than the continental sedimentary environment. In the continental sedimentary environment, the composition characteristics of nitrogen isotope in crude oil are related to the salinity and redox condition of the sedimentary environment. The higher nitrogen isotope values appeared in suboxic/dysoxic and slightly saltish water column conditions, which is beneficial to denitrification and thus resulting in heavy nitrogen isotope values in oil.

Keywords: crude oil; nitrogen isotope; Dumas combustion method; sedimentary environments

收稿日期:2015-05-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2011CB201102);国家科技重大专项(2011ZX05007-002);中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室2011-2014年度自主课题

作者简介:陈践发(1961-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为油气成藏、油气地球化学。E-mail:jfchen@cup.edu.cn。

原油含氮量较低(通常低于2%),而碳/氮比非常高,造成氮同位素样品制备困难,制约氮同位素的研究^[1-5]。不同沉积环境的生油母质具有不同的氮同位素组成,虽然后期的成岩、成藏作用会对原油氮同位素组成产生影响,但烃源岩的氮同位素组成是控制原油氮同位素组成的主要因素^[6-7],因此沉积物氮同位素的分布与有机质来源及沉积环境等影响因素有密切关系。笔者选择几个不同沉积环境含油气盆地原油,进行氮、碳同位素组成及相关的地球化学

分析,以揭示不同沉积环境原油氮同位素组成特征及其主要控因素。

1 采样信息和实验方法

1.1 采样信息

采集松辽、辽河、济阳拗陷、江汉、塔里木等6个盆地和地区的原油样品,原油样品包括海相、淡水湖泊、咸水湖泊等不同沉积环境。各盆地的沉积环境及烃源岩地球化学特征见表1。

表1 研究区烃源岩地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of source rocks in study areas

盆地名称	采样地区	烃源岩沉积环境	烃源岩有机质类型	成熟度	采样数
松辽	朝阳沟油田	微咸-半咸水湖泊 ^[8-9]	I、II ₁ 型为主	成熟阶段	7
江汉	潭口、王场油田	盐湖环境 ^[10-11]	I、II ₁ 型为主	低熟-成熟	6
济阳	临盘油田	淡水湖泊 ^[12]	I、II ₁ 型为主	成熟阶段	7
奈曼	奈1区块	咸水半咸水湖泊 ^[13-14]	I、II ₁ 型为主	低熟-中等	17
辽河	曙光、杜家台	淡水湖泊 ^[15-18]	I、II ₁ 型为主	成熟-高熟	9
塔里木	塔北(奥陶系)	海相沉积 ^[19-23]	腐泥型-混合型	高过成熟	10

1.2 实验方法

氮同位素的测定方法主要有凯氏硫酸法和杜马斯燃烧法^[24],杜氏法的结果更接近真实值^[25]。实验中依据杜马斯燃烧原理,利用MAT253同位素质谱仪与Flash EA2000联用技术测定碳氮同位素。

实验条件为:燃烧管温度980℃;炉温50℃;载气流量100 mL/min;参考气流量250 mL/min;氧气流量250 mL/min。测定标样:国际标样(NH₄)₂SO₄

($\delta^{15}\text{N} = +20.3\text{‰}$), Caffeine ($\delta^{15}\text{N} = +1.2\text{‰}$); 工作标样 Urea ($\delta^{15}\text{N} = -0.49\text{‰}$)。用 δ 值表示同位素值,参考标准为大气氮。原油的 $\delta^{15}\text{N}$ 值分析误差 $\leq 0.3\text{‰}$ 。

2 实验结果

表2为不同沉积环境原油样品的地化测试结果。

表2 不同沉积环境原油样品的地化测试结果

Table 2 Geochemical test results of crude oil in different sedimentary environments

采样地区	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	N/%	C/%	伽马蜡烷/C ₃₀ 藿烷	Pr/Ph
济阳	5.7~9.0	-27.4~-26.3	0.22~0.57	55.58~86.81	0.05~0.06	0.87~1.24
	6.8(7)	-26.8(7)	0.44(7)	75.81(7)	0.05(2)	1.06(2)
松辽	16.8~20.8	-31.5~-30.2	0.12~0.22	84.31~87.33	0.28~0.35	1.06~1.29
	18.1(7)	-31.5(7)	0.16(7)	85.90(7)	0.32(3)	1.18(7)
奈曼	16.4~20.3	-31.6~-30.9	0.52~1.06	47.56~85.04	0.05~0.06	0.42~0.64
	18.8(17)	-31.3(17)	0.72(17)	78.62(17)	0.05(2)	0.53(17)
江汉	11.7~15.4	-28.4~-25.4	0.21~0.89	80.48~84.56	0.85~1.49	0.26~1.48
	13.6(6)	-26.8(6)	0.56(6)	82.47(6)	1.17(5)	0.55(5)
辽河	7.0~12.1	-30.6~-28.1	0.39~0.86	56.62~92.75	0.22~0.27	
	8.9(9)	-28.9(9)	0.65(9)	79.66(9)	0.24(3)	
塔里木	-0.9~1.4	-32.7~-29.3	0.08~0.51	59.24~87.28		
	0.58(10)	-31.9(10)	0.25(10)	82.36(10)		

2.1 碳和氮同位素的分布特征

原油样品中氮、碳同位素分布见图1。可以看出,原油氮同位素值的分布范围较大,为-0.4‰~20.8‰,峰值为15.0‰~20.0‰;碳同位素分布范围为-32.7‰~-25.4‰,主峰值为-31.0‰~

-33.0‰,分布较集中。

图2为不同沉积环境原油氮、碳同位素的分布特征。可以看出,不同沉积环境的原油氮同位素组成具有明显的差异,沉积环境相似的地区原油氮同位素分布范围较接近。其中塔里木油田海相沉积环

境原油的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最轻,分布范围为 $-0.4\text{‰} \sim 1.4\text{‰}$ 。而在陆相环境中,来源于微咸水-半咸水环境的松辽和奈曼盆地原油的氮同位素值较接近,其中大庆油田为 $16.8\text{‰} \sim 20.8\text{‰}$,奈曼盆地原油的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $18.3\text{‰} \sim 20.3\text{‰}$;来源于淡水湖相沉积环境的济阳拗陷和辽河盆地原油的氮同位素分布较接近,胜利油田为 $5.7\text{‰} \sim 9.0\text{‰}$,辽河油田为 $7.0\text{‰} \sim 12.1\text{‰}$;来自咸水-盐湖环境的江汉盆地原油的氮同位素值分布在 $11.7\text{‰} \sim 15.4\text{‰}$ 。

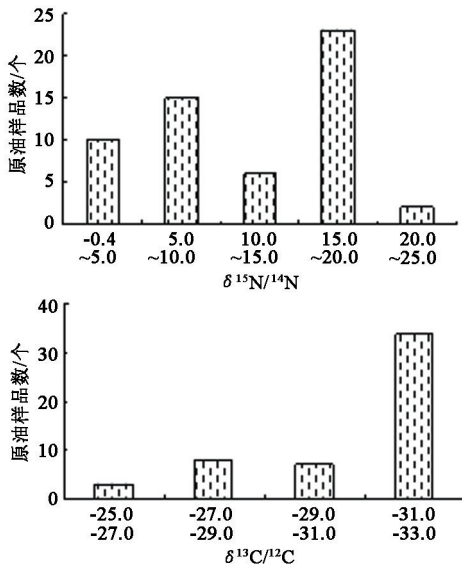


图1 原油样品碳氮同位素统计直方图

Fig.1 Statistical histogram of carbon and nitrogen isotope in crude oil samples

不同沉积环境原油的碳同位素组成不如氮同位素组成变化明显。塔里木盆地海相沉积环境原油的碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 $-32.7\text{‰} \sim -29.3\text{‰}$,其中大部分值落在 $-32.7\text{‰} \sim -32.2\text{‰}$,来源于陆相微咸水-半咸水沉积环境中的松辽和奈曼盆地的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 $-31.5\text{‰} \sim -30.2\text{‰}$ (主峰值为 $-31.5\text{‰} \sim -31.4\text{‰}$) 和 $-31.6\text{‰} \sim -30.9\text{‰}$ (主峰值为 $-31.6\text{‰} \sim -31.1\text{‰}$),分布范围与塔里木盆地原油的碳同位素组成没有明显的差别。辽河盆地原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 $-30.6\text{‰} \sim -28.1\text{‰}$ 。济阳拗陷和江汉盆地的碳同位素较重,济阳拗陷原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 $-27.4\text{‰} \sim -26.3\text{‰}$,江汉盆地 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-28.4\text{‰} \sim -25.4\text{‰}$,分布跨度较大。

图3为不同沉积盆地原油的碳-氮同位素分布关系。可以看出,海相与陆相原油氮、碳同位素分布存在明显差异。而陆相盆地中,沉积环境较相近的大庆油田和奈曼油田样品的氮-碳同位素组成相

近,其他油田样品均可以利用碳-氮同位素结合的方法明显区分。

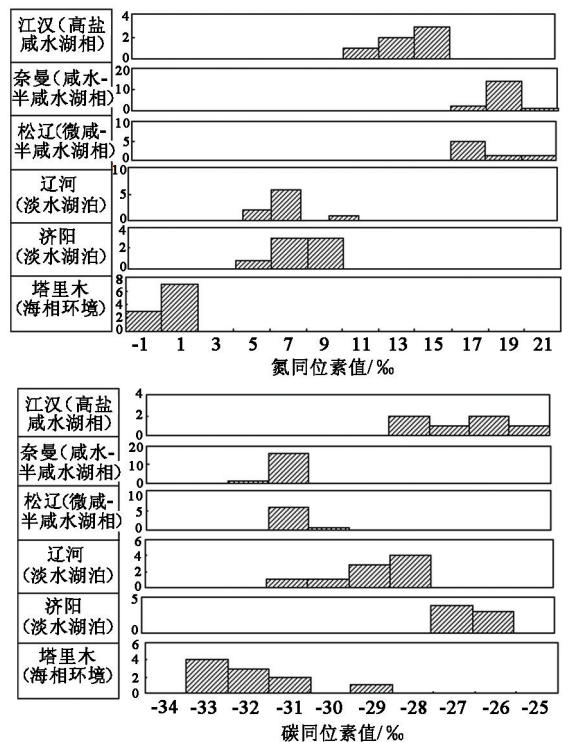


图2 不同沉积环境原油碳氮同位素分布范围

Fig.2 Distribution range of carbon and nitrogen isotope of crude oil in different sedimentary environments

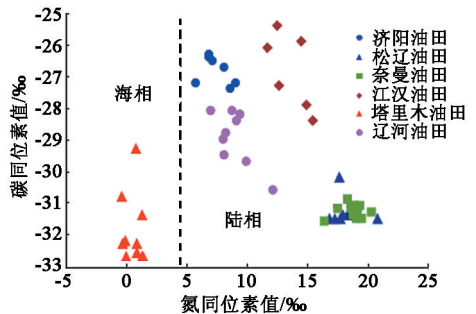


图3 不同沉积环境原油碳氮同位素值关系

Fig.3 Relationship of carbon and nitrogen isotope ratios of crude oil in different sedimentary environments

2.2 氮含量与同位素分布特征

图4为原油样品的氮同位素组成与氮含量关系。可以看出,原油氮同位素组成与氮含量没有明显的相关性。即使同一盆地中,原油氮含量的变化范围也较大,但氮同位素组成变化相对较小,原油中氮的含量不是影响氮同位素组成的主要因素。

3 影响原油氮同位素组成变化的因素

3.1 氮循环化学过程对氮同位素分馏的影响

自然界主要的氮循环包括3个过程^[5],即固氮

作用,硝化作用和反硝化作用。固氮作用是指固氮细菌将大气中的氮转换为可被生物吸收利用的活性氮的过程,这一过程引起的同位素分馏较小。硝化作用是由多级氧化过程组成的,氮同位素分馏系数主要受控于铵盐转换为亚硝酸盐的过程,在氮受限的系统中氮同位素分馏系数较小。反硝化作用是将生物氮(有机氮)转化为无机(大气)氮的过程,在反硝化作用过程氮同位素分馏较大,可能引起的氮分馏达10‰~30‰^[26]。因此,反硝化作用是影响沉积物氮同位素分馏的主要化学过程,对自然界氮同位素分布有重要影响。

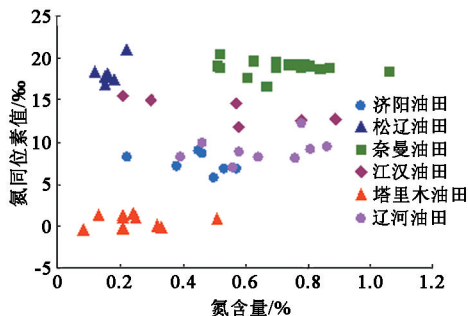


图4 不同沉积环境原油氮含量与氮同位素值关系

Fig. 4 Relationship of nitrogen content and isotope ratios of crude oil in different sedimentary environments

3.2 沉积环境对原油氮同位素组成特征的影响

3.2.1 水体氧化还原条件

在氧化沉积中有机质氮同位素值较低(-6‰),而弱还原水体因为反硝化作用的存在,沉积有机质的氮同位素组成相对偏高(18.8‰)^[26],沉积环境的氧化还原性将明显影响有机质的氮同位素组成。

在油气地球化学研究中发现,在没有明显的次生改造的情况下,原油的 Pr/Ph 可以较好地反映其烃源岩沉积环境的氧化还原特征,图5为原油的 Pr/Ph 与氮同位素分布的关系(由于辽河油田和胜利油田的原油样品经历了生物降解,Pr/Ph 值受到明显的影响,所以不纳入图中)。其中大庆油田样品的 Pr/Ph 值分布范围为1.06~1.29,属于弱还原-弱氧化环境;奈曼油田样品的 Pr/Ph 分布范围为0.50~0.64,属于还原环境;而江汉油田样品的 Pr/Ph 分布范围为0.26~0.38,属于强还原环境。

图5表明,原油氮同位素分布与 Pr/Ph 之间存在着明显的关系,沉积环境为弱还原-弱氧化的松辽和奈曼盆地的原油具有相对较高的氮同位素值,而较强还原环境的江汉盆地的原油相对明显富集轻氮同位素。这一结果与 Tracy 等^[27]研究 Caney 和 Woodford 页岩氮同位素所获认识一致。

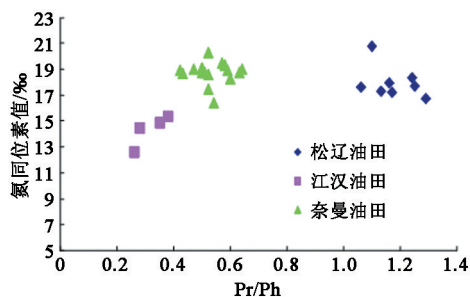


图5 Pr/Ph 与氮同位素值关系

Fig. 5 Relationship of Pr/Ph and nitrogen isotope ratios

在沉积物中,对沉积有机质氮同位素组成起主导作用的是反硝化作用的程度,在弱氧化-弱还原条件下,由于沉积物主要发生反硝化作用,反硝化作用优先消耗沉积有机质中的轻氮同位素(¹⁴N),造成沉积物中有机质的氮同位素组成偏重,因而具有较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值;而在还原-强还原环境或者氧化条件下主要为固氮作用和硝化作用,这时沉积物有机质的氮同位素组成将不会发生明显的同位素分馏,因而氮同位素组成相对较轻。

3.2.2 水体盐度

盐度可能是影响氮同位素分布的主要因素^[1-2]。原油伽马蜡烷是一种可有效指示水体盐度的生物标志物参数,可指示烃源岩形成时水体盐度特征。

图6为不同沉积环境原油的伽马蜡烷指数与氮同位素分布关系。可以看出,原油的伽马蜡烷指数与氮同位素之间存在一定的相关性。在伽马蜡烷指数小于0.6时,原油的氮同位素值随伽马蜡烷指数的增加而变重,但是当伽马蜡烷指数大于0.6后,原油的 $\delta^{15}\text{N}$ 值不再随盐度的增加而升高,甚至有所降低。

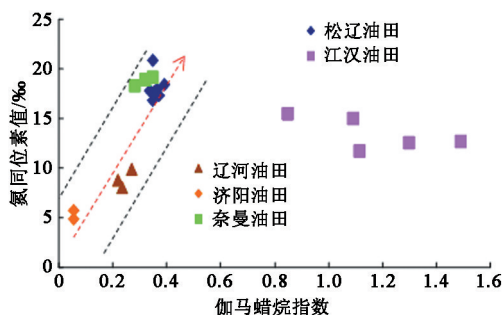


图6 伽马蜡烷指数与氮同位素值关系

Fig. 6 Relationship of gammacerane index and nitrogen isotope ratios

盐度对沉积物有机质氮同位素的影响可能也是通过影响反硝化作用的效率来实现的^[1-2],微咸水的环境更适宜反硝化作用的进行,因而有机质的氮同

位素值偏高。但是若盐度过高,则将抑制反硝化作用的进行^[37],氮同位素值不会随盐度增加继续升高,反而可能会有所降低。

综上所述,不同沉积环境原油中氮同位素的具有明显的差异主要是由于沉积环境氧化还原条件和水体盐度差异所致。在陆相沉积环境中一定的微咸水-半咸水条件下,弱氧化-弱还原环境有利于反硝化作用的进行,使沉积有机质中的氮同位素值偏高,因而生成的原油其氮同位素较重;在高盐、强还原环境中,反硝化作用受到抑制,沉积有机质的氮同位素组成不随盐度的增加而变重,具有变轻的趋势,其生成的原油氮同位素组成随盐度的增加也具有变轻的趋势;原油的氮同位素值可以反映其烃源岩的沉积水体的氧化还原性和盐度情况,同时利用原油的氮同位素组成可以有效地进行油源分析和判识。

4 结论与认识

(1)原油的氮同位素组成与烃源岩的沉积环境有明显的关系,陆相原油氮同位素较海相原油明显富集重氮同位素。

(2)在陆相沉积环境中,水体的氧化还原程度是影响原油的氮同位素组成的关键因素,弱氧化-弱还原环境生成的原油明显富集重氮同位素,强还原的环境中生成的原油具有相对较轻的氮同位素值。

(3)水体的盐度对原油氮同位素组成具有明显的影响,在淡水-半咸水范围中,沉积环境的盐度与原油氮同位素值呈正相关关系,但是超过这个范围,原油的氮同位素值不再随盐度升高而增加。

(4)利用原油的氮同位素组成可以有效进行油源分析和对比,原油的氮同位素组成可能是油气地球化学中一项非常有用的新指标。

参考文献:

- [1] 陈传平,梅博文,曹亚澄. 中国部分盆地原油氮同位素地球化学特征[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2004,34(8):721-727.
CHEN Chuanping, MEI Bowen, CAO Yacheng. Geochemical characteristics of nitrogen isotopes in crude oil of part basins in China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004,34(8):721-727.
- [2] 陈传平,梅博文. 塔里木盆地原油氮同位素地球化学初步研究[J]. 天然气地球科学,2004,16(2):178-181.
CHEN Chuanping, MEI Bowen. Elementary research on oil nitrogen isotopic geochemistry in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004,16(2):178-181.
- [3] 陈传平,梅博文. 油藏原油微生物降解的氮同位素分馏效应[J]. 沉积学报,2004,22(4):707-710.
CHEN Chuanping, MEI Bowen. Nitrogen isotopic fractionation of crude oil during biodegradation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004,22(4):707-710.
- [4] 陈传平,梅博文,曹亚澄. 原油氮同位素样品制备及其比值分析[J]. 分析化学,2002,30(5):640.
CHEN Chuanping, MEI Bowen, CAO Yacheng. Preparation and ratio analysis of nitrogen isotopes in crude oil[J]. Analytical Chemistry, 2002,30(5):640.
- [5] BEAUMONT V, ROBERT F. Nitrogen isotope ratios of kerogens in Precambrian cherts a record of the evolution of atmosphere chemistry? [J]. Precambrian Research, 1999,96:63-82.
- [6] OLDENBURG T B P, LARTER S R, HUANG H. Nitrogen isotope systematics of petroleum fractions of differing polarity-neutral versus basic compounds[J]. Organic Geochemistry, 2007,38:1789-1794.
- [7] HOERING T C, MOORE H E. The isotope composition of the nitrogen in natural gases and associated crude oils [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1958,13:225-232.
- [8] 赵荣,祁树玖. 朝阳沟油田扶余油层油源及运移路径模拟[J]. 科学技术与工程,2011,11(8):1776-1779.
ZHAO Rong, QI Shujiu. Oil source and migration pathway simulation of Fuyu oil layer in Chaoyanggou Oilfield[J]. Science Technology and Engineering, 2011,11(8):1776-1779.
- [9] 侯杰杰,王铁冠,孔庆云,等. 松辽盆地朝长地区原油的地球化学特征[J]. 石油大学学报:自然科学版,1999,23(2):27-34.
HOU Dujie, WANG Tieguan, KONG Qingyun, et al. Geochemical characteristics of crude oils in chaochang region[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1999,23(2):27-34.
- [10] 郭飞飞,张帆,张武,等. 潜江凹陷王场油田油气成藏规律[J]. 岩性油气藏,2012,24(5):22-26.
GUO Feifei, ZHANG Fan, ZHANG Wu, et al. Hydrocarbon accumulation rules of Wangchang Oilfield in Qianjiang sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2012,24(5):22-26.
- [11] 江继纲. 江汉盆地咸水湖相潜江组油、气的生成[J]. 石油学报,1981,2(4):83-92.
JIANG Jigang. Origin of oil and gas in Qianjiang formation of saline lake facies in the Jiangnan Basin[J]. Acta Petrolesnicai, 1981,2(4):83-92.
- [12] 陈庆春. 临南洼陷油藏地球化学研究[M]. 北京:地质出版社,2008.
- [13] 赵兴齐,陈践发,张晨,等. 开鲁盆地奈曼凹陷奈1区

- 块原油地球化学特征及油源分析[J]. 中国石油大学学报;自然科学版,2012,36(3):44-53.
- ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, ZHANG Chen, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source analysis in Nai 1 block for Naiman Depression, Kailu Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(3):44-53.
- [14] 张枝焕, 杨藩, 李东明, 等. 中国新生代咸化湖相有机地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(1): 65-70.
- ZHANG Zhihuan, YANG Fan, LI Dongming, et al. The organic geochemistry research progress in cenozoic salinized lake in China [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(1):65-70.
- [15] 杨鑫, 郑建京, 王晓峰, 等. 辽河坳陷西部凹陷天然气成因类型与成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6):1015-1020.
- YANG Xin, ZHENG Jianjing, WANG Xiaofeng, et al. Origin of nature gas and gas filling pattern in west sag, Liaohe Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6):1015-1020.
- [16] 朱芳冰. 辽河盆地西部凹陷源岩热演化及生烃史研究[J]. 地质科技情报, 2000, 19(3):53-56.
- ZHU Fangbing. Research of organic maturation and petroleum generation in the western depression, Liaohe Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(3):53-56.
- [17] 朱芳冰. 辽河盆地西部凹陷源岩特征及低熟油分布规律研究[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(1):25-29.
- ZHU Fangbing. Research on characteristic of source rock and immature oils distribution in western depression, Liaohe Basin [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(1):25-29.
- [18] 中国石油地质志 卷三 辽河油田[M]. 北京:石油工业出版社;2003:124-167.
- [19] 周永昌, 王新维, 杨国龙. 塔里木盆地阿克库勒地区奥陶系碳酸盐岩成藏条件及勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2):104-109.
- ZHOU Yongchang, WANG Xinwei, YANG Guolong. Oil and gas pool forming condition and exploration prospects of ordovician carbonate rocks in Akekule region, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2):104-109.
- [20] 路清华, 邵志兵, 贾存善. 塔里木盆地玉北地区奥陶系原油成因特征分析[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3):320-330.
- LU Qinghua, SHAO Zhibing, JIA Cunshan, et al. Genesis features of crude oil in Ordovician, Yubei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3):320-330.
- [21] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3):177-184.
- JIA Chengzao. Structural characteristics and oil gas accumulative regularity in Tarim Basin. [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3):177-184.
- [22] 朱俊章, 包建平. 塔里木盆地寒武系-奥陶系海相烃源岩地球化学特征[J]. 海相油气地质, 2000, 5(3/4):55-59.
- ZHU Junzhang, BAO Jianping. Geochemical characteristics of marine hydrocarbon source rocks in the Ordovician and Cambrian of the Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(3/4):55-59.
- [23] 旷理雄, 郭建华, 黄太柱. 塔里木盆地阿克库勒凸起于奇地区哈拉哈塘组油气成藏机制[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2008, 38(2):249-254.
- KUANG Lixiong, GUO Jianhua, HUANG Taizhu. Forming mechanism of hydrocarbon reservoirs of Halahatang formation in Yuqi block in Akekule arch, Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(2):249-254.
- [24] 范志影, 周陈维. 杜马斯燃烧定氮法在农产品品质检测中的应用[J]. 现代科学仪器, 2006(1):45-46.
- FAN Zhiying, ZHOU Chenwei. Application of dumas combustion method for nitrogen analysis on agricultural products [J]. Modern Scientific Instruments, 2006(1):45-46.
- [25] RIGBY D, BATTS B D. The isotope composition of nitrogen in Australian coals and oil shales [J]. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), 1986, 58:273-282.
- [26] JOCHEN H. Stable isotope geochemistry [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009:54-57.
- [27] TRACY M Q, EKENEMOLISE N A, NATASCHA R, et al. Evaluating nitrogen isotopes as proxies for depositional environmental conditions in shales: comparing caney and woodford shales in the Arkoma Basin, Oklahoma [J]. Chemical Geology, 2013, 360/361:231-240.
- [28] 胡玲珍, 陈振楼. 河口沉积物反硝化反应影响因子综述[J]. 环境科学动态, 2003(4):41-43.
- HU Lingzhen, CHEN Zhenlou. Summarizing impact factor of denitrification reaction in estuarine sediments [J]. Environmental Science Dynamic, 2003(4):41-43.

(编辑 刘为清)