

文章编号: 1000-0747(2017)06-0997-08 DOI: 10.11698/PED.2017.06.19

塔里木盆地台盆区古生界原油碳同位素组成及油源探讨

朱心健¹, 陈践发¹, 伍建军^{1,2}, 王艺繁¹, 张宝收², 张科², 贺礼文¹

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000)

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05007-003); 国家自然科学基金(41572108)

摘要: 基于塔里木盆地台盆区寒武系—奥陶系烃源岩干酪根样品以及古生界原油样品的碳同位素组成特征, 探讨台盆区古生界原油的成因和来源。台盆区寒武系至少发育下寒武统以及中—上寒武统 2 套碳同位素组成具有明显差异的烃源岩, 其中, 下寒武统烃源岩干酪根碳同位素组成明显偏轻, 中—上寒武统烃源岩干酪根碳同位素组成相对偏重, 而奥陶系烃源岩则介于两者之间。台盆区古生界原油的碳同位素组成分布范围较大, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -35.2‰ ~ -28.1‰ , 其中 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -34.0‰ 左右相对富集轻碳同位素的原油应主要来源于下寒武统烃源岩, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -29.0‰ 左右相对富集重碳同位素的原油应主要来源于中—上寒武统烃源岩, 碳同位素组成居中的原油不能排除寒武系烃源岩的贡献。分析认为, 寒武系烃源岩具有主力烃源岩的条件, 台盆区深层油气勘探潜力巨大。图 6 表 2 参 47

关键词: 塔里木盆地; 寒武系; 奥陶系; 海相油气; 油源; 碳同位素组成

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Carbon isotopic compositions and origin of Paleozoic crude oil in the platform region of Tarim Basin, NW China

ZHU Xinjian¹, CHEN Jianfa¹, WU Jianjun^{1,2}, WANG Yifan¹, ZHANG Baoshou², ZHANG Ke², HE Liwen¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 841000, China)

Abstract: Based on the carbon isotopic compositions of Cambrian-Ordovician source rocks Kerogen Samples and Paleozoic crude oil in the platform region of Tarim Basin, the origin and source of Paleozoic crude oil were investigated. There are at least two sets of source rocks with different carbon isotope compositions in the Cambrian, the Lower Cambrian source rock with lighter carbon isotope composition and Middle-Upper Cambrian source rock with heavier carbon isotope composition, while the Ordovician source rock is somewhere in between. The $\delta^{13}\text{C}$ values of Paleozoic crude oil samples are wide in distribution range, from -35.2‰ to -28.1‰ . The crude oil with lighter carbon isotopic compositions ($\delta^{13}\text{C} < -34.0\text{‰}$) was mainly derived from Lower Cambrian source rock, and the crude oil with heavier carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C} > -29.0\text{‰}$) was mainly derived from the Middle-Upper Cambrian source rocks, and the crude oil with $\delta^{13}\text{C}$ value in between may be derived from Cambrian source rocks. It is concluded through analysis that the Cambrian source rock could become the major source rock in the Tarim Basin and the platform region has huge potential oil and gas resources in the deep formations.

Key words: Tarim Basin; Cambrian; Ordovician; marine hydrocarbon; oil source; carbon isotope composition

引用: 朱心健, 陈践发, 伍建军, 等. 塔里木盆地台盆区古生界原油碳同位素组成及油源探讨[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 997-1004.

ZHU Xinjian, CHEN Jianfa, WU Jianjun, et al. Carbon isotopic compositions and origin of Paleozoic crude oil in the platform region of Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 997-1004.

0 引言

塔里木盆地台盆区(简称台盆区)古生界海相油气的成因和来源一直是一个颇有争议的问题, 制约着台盆区深层油气勘探^[1-4]。前人通过分析原油及烃源岩的生物标志物组成特征, 认为来源于寒武系的原油生

物标志物具有 6 高 1 低的特征(即 C_{28} 甾烷、伽马蜡烷、三芳甲藻甾烷、4-甲基甾烷、24-降胆甾烷、三环萜烷含量相对较高, 重排甾烷含量相对较低), 而来源于奥陶系的原油生物标志物具有相反的特征, 以此来确定油源是寒武系还是奥陶系^[5-8]。通过研究原油碳同位素组成特征发现, 来源于寒武系的原油碳同位素比来源

于奥陶系的原油碳同位素偏重，由此认为塔里木盆地寒武系烃源岩生成的原油应该富集重碳同位素，而奥陶系烃源岩生成的原油应该富集轻碳同位素^[9-12]。

2013年，中深1井在寒武系膏盐岩层以下（简称盐下）白云岩储集层获得工业油气流，对台盆区海相烃源岩的认识提出了新的挑战^[13-20]。根据地质背景判断，中深1井寒武系盐下白云岩储集的油气应来自于寒武系烃源岩^[17]；另外，该井寒武系油气的地球化学特征与目前对寒武系原油的认识存在很大差异，而与奥陶系原油相似^[9]。从地质条件分析，中深1井寒武系原油不会来自奥陶系，由此表明，目前对寒武系原油地球化学特征的认识可能不全面。

台盆区古生界油气藏埋藏深，热演化程度相对较高，一些指示母质来源、沉积环境的生物标志化合物受到热演化的影响而发生变化。随着成熟度增高，原油以及烃源岩生物标志化合物中热稳定性相对较差的组分逐渐减少，因此其常规生物标志化合物特征表现出一定的趋同性。此外，热演化程度较高的原油中生物标志化合物的总体浓度也会明显降低，因此当不同成熟度的原油发生混合时，其生物标志化合物的特征会发生明显变化^[21]。由于台盆区古生界油气藏热演化程度相对较高并存在多套烃源岩，从而使得生物标志化合物用于台盆区油源研究易出现多解性。

大量研究结果表明，原油的碳同位素组成主要受控于烃源岩有机碳同位素组成^[11-12,22-25]。热演化作用对

原油碳同位素组成的影响程度相对较小，在热演化过程中原油的碳同位素组成变化一般不会超过2‰^[22-23]。因此原油碳同位素组成可作为探讨台盆区深层油气成因及来源的有效手段。

中深1井、中深5井寒武系的原油碳同位素组成相对偏轻，与全球寒武系原油的碳同位素组成偏轻的特征较为一致， $\delta^{13}\text{C}$ 值一般小于-34‰^[26-30]。原油碳同位素组成特征显示台盆区寒武系原油可能不是只有碳同位素组成较重的一类，也不能简单认为台盆区相对富集轻碳同位素的原油就是来自奥陶系烃源岩。为了进一步明确台盆区海相原油的成因和来源，本文重点研究台盆区古生界原油碳同位素组成特征，并结合寒武系—奥陶系不同层位烃源岩干酪根碳同位素组成，探讨台盆区主力烃源层，为下一步油气勘探提供依据。

1 研究区地质概况

塔里木盆地是在前震旦系陆壳基底上发育起来的大型叠合盆地，台盆区主要包括塔北隆起、塔中隆起、巴楚隆起、塔东隆起以及北部坳陷等，为发育古生界海相沉积的构造单元（见图1）。目前台盆区的主要勘探目标为古生界油气藏，主要烃源层为奥陶系及中—上寒武统突尔沙克塔格组、莫合尔山组烃源岩以及下寒武统玉尔吐斯组、西大山组烃源岩等^[4-8,31]。现有认识表明奥陶系烃源岩主要分布在塔中、塔北等台地斜坡地带；中—上寒武统烃源岩主要分布在塔东地区；

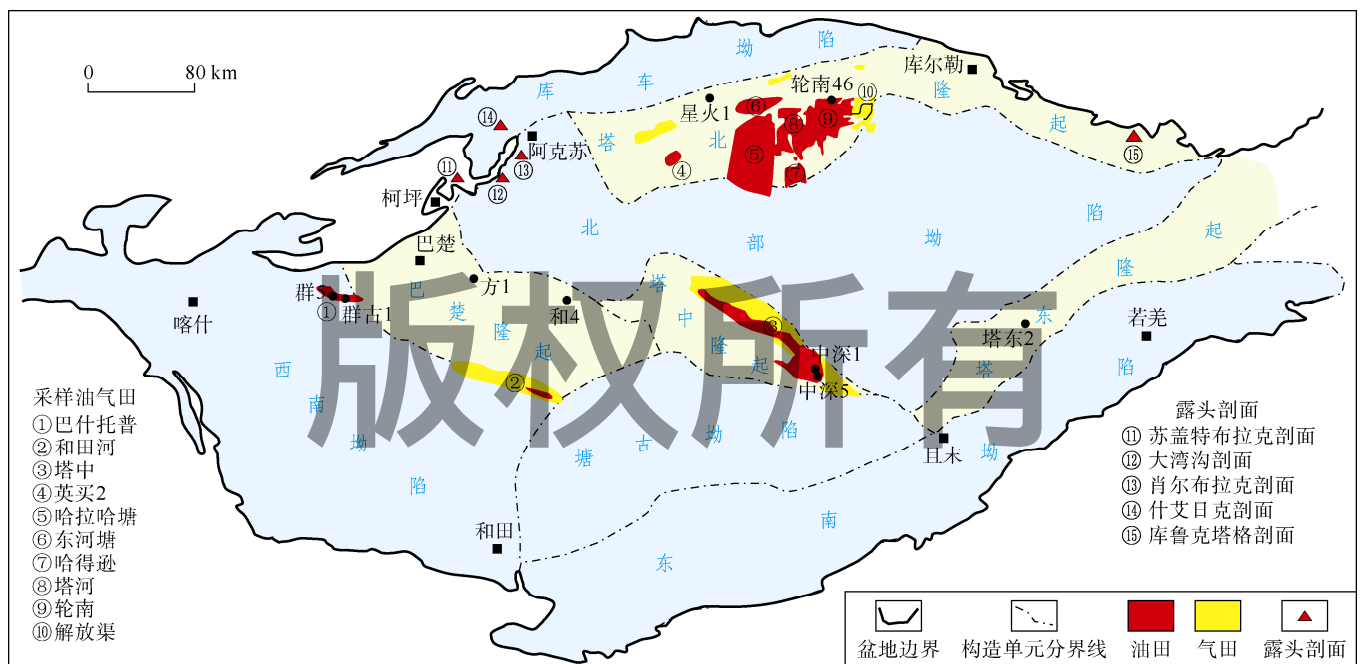


图1 塔里木盆地构造划分、露头剖面及主要采样油气田分布图

下寒武统烃源岩主要分布于巴楚隆起北段柯坪—巴楚地区以及塔东环满加尔地区^[8]。目前台盆区古生界储集层分布于寒武系、奥陶系、志留系、石炭系等，主力储集层为奥陶系、石炭系，不同地区的储集层时代存在一定的差异（见图2）。

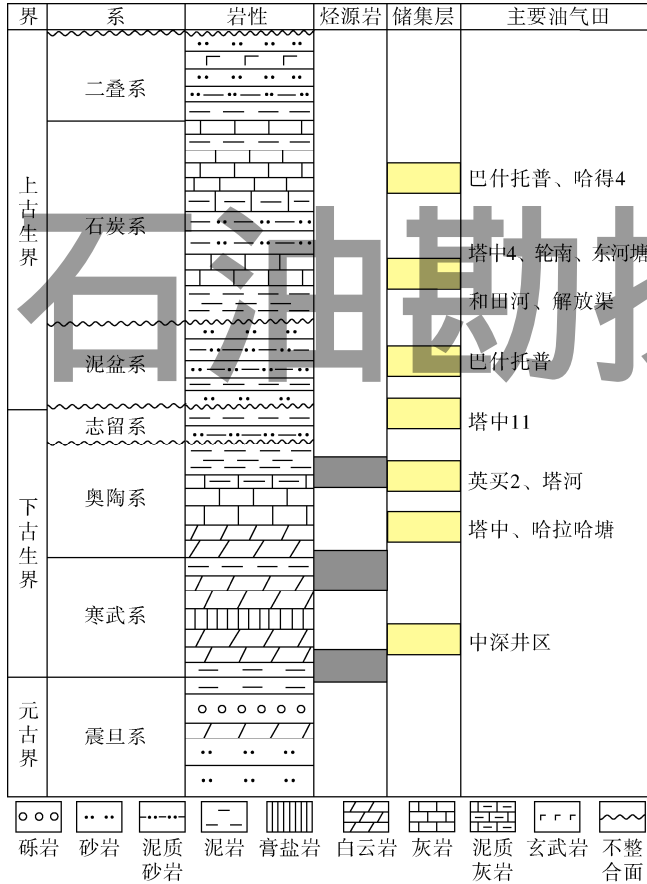


图2 塔里木盆地台盆区古生界综合柱状图

2 样品与实验

在台盆区10个油气田的寒武系、奥陶系、志留系、石炭系等层位采集了133个原油样品（见图1），进行全油稳定碳同位素组成研究。烃源岩样品主要采自寒武系—奥陶系，其中寒武系烃源岩样品采自巴楚隆起的和4井、塔北隆起的星火1井、塔东隆起的塔东2井、盆地西部柯坪—阿克苏地区的露头剖面（苏盖特布拉克、肖尔布拉克、什艾日克）、盆地东部库鲁克塔格露头剖面等；奥陶系烃源岩样品采自塔北隆起的轮南46井及柯坪地区大湾沟露头剖面等（见图1）。按照标准GB/T 19144—2010《沉积岩中干酪根分离方法》，将烃源岩样品进行抽提、分离获得干酪根，并分析、测定干酪根的碳同位素组成。

样品的稳定碳同位素组成检测在中国石油大学

（北京）油气资源与探测国家重点实验室完成。实验方法均按照标准GB/T 18340.2—2010《有机质稳定碳同位素组成测定》进行。数据按碳同位素组成国际标准（PDB标准）计算。实验数据的分析误差小于0.1‰。

3 实验结果与讨论

3.1 原油及烃源岩碳同位素组成特征

133个原油样品碳同位素组成分析结果显示（见表1），台盆区古生界原油的 $\delta^{13}C$ 值为 -35.2‰ ~ -28.1‰ ，不同地区的碳同位素组成具有一定的规律。位于台盆区西部巴楚隆起麦盖提斜坡带的巴什托普地区原油碳同位素组成相对较轻（ $\delta^{13}C$ 值为 -35.2‰ ~ -33.1‰ ），和田河地区原油碳同位素组成相对偏重（ $\delta^{13}C$ 值为 -29.7‰ ~ -28.1‰ ）。位于台盆区北部的塔北隆起西段英买2井区原油的 $\delta^{13}C$ 值为 -33.8‰ ~ -32.5‰ ，塔北隆起东段轮南、哈得逊、解放渠地区的原油 $\delta^{13}C$ 值为 -32.5‰ ~ -30.8‰ 。位于台盆区中部的塔中地区除中深井区外古生界原油的 $\delta^{13}C$ 值为 -33.2‰ ~ -29.8‰ ，变化幅度相对较大。

表1 台盆区古生界原油碳同位素组成特征

地区或油田	取样层位	样品个数	碳同位素组成/‰	碳同位素组成平均值/‰
巴什托普	C	5	-35.2~-33.1	-34.2
和田河	C、O	5	-29.7~-28.1	-29.0
英买2	O	14	-33.8~-32.5	-33.1
哈拉哈塘	O	24	-32.8~-31.6	-32.3
塔河	C、O	5	-33.2~-31.9	-32.6
东河塘	C	4	-32.3~-32.1	-32.2
哈得逊	C、O	8	-32.5~-31.1	-32.1
轮南	C、O	17	-32.2~-30.8	-31.7
解放渠	C	6	-31.9~-31.2	-31.6
塔中	C、O、S	45	-33.2~-29.8	-31.7

塔北地区的原油碳同位素组成在平面上显示出由西向东逐渐变重的规律（见图3），如从西部英买2井区向哈拉哈塘、轮南至东部的解放渠地区碳同位素组成平均值从 -33.1‰ 变化到 -31.6‰ 。塔中地区的原油碳同位素组成在纵向上表现为产自石炭系以及志留系等地层的原油碳同位素组成相对偏轻（ $\delta^{13}C$ 值为 -33.2‰ ~ -32.1‰ ），而来自奥陶系的原油碳同位素组成相对偏重（其 $\delta^{13}C$ 值主要为 -31.5‰ ~ -30.5‰ ）（见图4）。

原油的碳同位素组成主要受控于其生烃母质，受热演化以及运移等影响较小。台盆区不同地区和探井寒武系—奥陶系烃源岩干酪根碳同位素组成的统计结

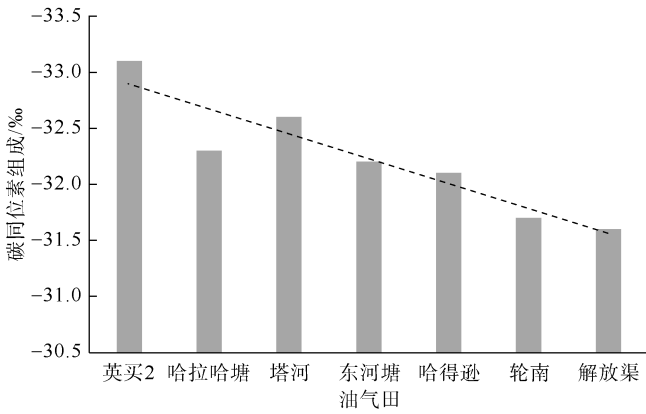


图3 塔北地区原油碳同位素组成平面分布直方图

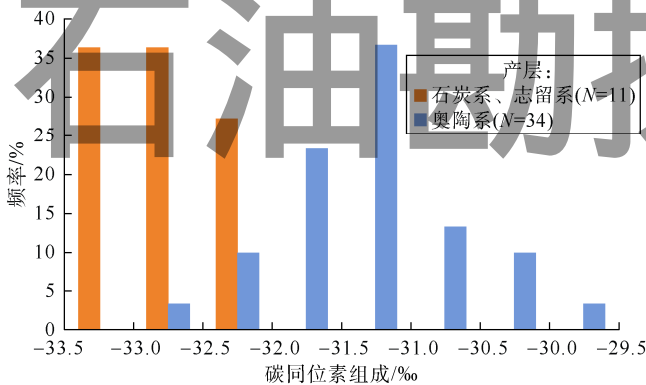


图4 塔中地区原油碳同位素组成纵向分布直方图 (N—样品数)

果表明, 寒武系烃源岩干酪根碳同位素组成具有明显的双峰特征(见图5), 其中下寒武统烃源岩干酪根的碳同位素组成相对偏轻 ($\delta^{13}C$ 值主要为 $-36.0‰ \sim -34.0‰$), 中—上寒武统烃源岩干酪根的碳同位素组成相对偏重 ($\delta^{13}C$ 值主要为 $-30.0‰ \sim -27.0‰$); 奥陶系烃源岩与中—上寒武统烃源岩的干酪根碳同位素组成总体相近、略偏轻 ($\delta^{13}C$ 值主要为 $-31.0‰ \sim -28.0‰$),

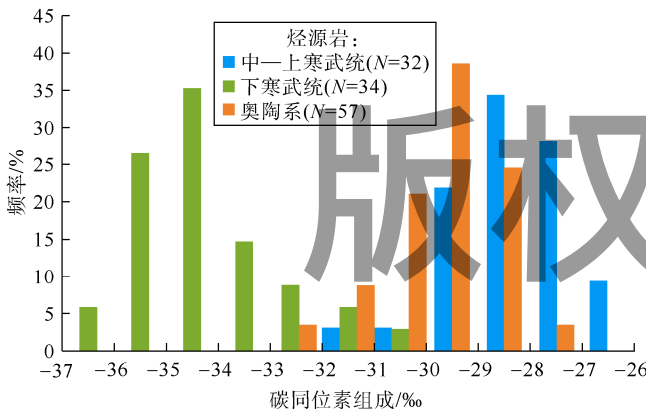


图5 台盆区不同烃源岩碳同位素组成分布特征

烃源岩有机质碳同位素组成主要受到母质来源以及沉积环境的影响。早寒武世, 全球发生了广泛的海

平面上升及大洋缺氧事件, 全球 CO_2 含量较高, O_2 含量较低, 处于偏还原环境, 在较高的 CO_2 环境中生物本身相对富集轻碳同位素; 另一方面, 在相对还原的沉积环境下有机质消耗较少, 有机质中 ^{12}C 组分消耗较少, 因此, 早寒武世形成的烃源岩中有机质相对富集轻碳同位素。台盆区在早寒武世以强还原沉积环境为主^[32-33], 下寒武统玉尔吐斯组烃源岩中富集芳基类异戊二烯烃等生物标志化合物, 表明该套烃源岩形成于厌氧、强还原的沉积环境。研究表明缺氧条件下厌氧细菌等生物先质的碳同位素组成偏轻, 该时期这类相对富集轻碳同位素的厌氧细菌较为发育^[34-36]。而芳基类异戊二烯烃等化合物的富集也表明台盆区早寒武世硫细菌等微生物发育^[37]。刘文汇等^[38]研究表明台盆区寒武系烃源岩中不同生物先质的碳同位素组成存在一定差异, 其中以浮游藻类为主的烃源岩碳同位素组成明显偏重, 以底栖类生物为主的烃源岩碳同位素组成明显偏轻, 推测塔里木盆地在早寒武世底栖生物相对较为发育。因此, 寒武纪早期特殊的厌氧细菌和缺氧、强还原环境是造成台盆区下寒武统烃源岩有机质碳同位素组成偏轻的主要原因。在中—晚寒武世, 随着 O_2 含量逐渐升高, 沉积环境相对偏氧化, 促使浮游生物等大量繁殖, 导致中—上寒武统及奥陶系烃源岩有机质碳同位素相对于下寒武统偏重^[39-40]。不同层位烃源岩中有机质碳同位素组成的差异与台盆区早古生代生源-环境的系统变化密切相关。

3.2 原油分类及油源分析

在前人研究的基础上, 结合台盆区地质背景、原油及烃源岩干酪根碳同位素组成特征, 将台盆区古生界原油划分为3类(见表2)。

表2 台盆区古生界原油碳同位素组成及分类

原油类型	碳同位素组成/‰	碳同位素组成平均值/‰	主要分布地区	主要层位
I	-35.2~ -33.1	-34.3	巴什托普	C、€
II	-29.7~ -28.5	-28.9	和田河	C、O、€
III	-33.8~ -29.8	-32.1	英买2、哈拉哈塘、塔河、东河塘、哈得逊、轮南、解放渠、塔中	C、O、S

I类原油的碳同位素组成为 $-35.2‰ \sim -33.1‰$, 平均为 $-34.3‰$, 包括巴楚隆起麦盖提斜坡带的巴什托普油田群5井、群古1井的原油以及塔中地区中深5井的下寒武统吾松格尔组原油等。这类原油的碳同位素组成与下寒武统烃源岩的碳同位素组成具有较好可比性。其中, 巴什托普油田位于巴楚隆起麦盖提斜坡带

北段的巴什托普断裂北侧，巴什托普断裂向南倾斜，向下断至寒武系，可有效沟通寒武系油源^[41-42]，该断裂的存在提供了良好的油气垂向运移通道（见图6），且巴楚隆起北段发育有下寒武统玉尔吐斯组优质烃源岩，而奥陶系烃源岩在该区不发育，据此判识该地区原油应来自下寒武统烃源岩。中深5井寒武系白云岩储集层上覆巨厚膏盐岩层，油气很难从上部奥陶系通过膏盐岩层向下发生运移，其原油碳同位素组成与下寒武统烃源岩干酪根的碳同位素组成具有良好的可比性，故推测中深5井的油气也来自下寒武统烃源岩。

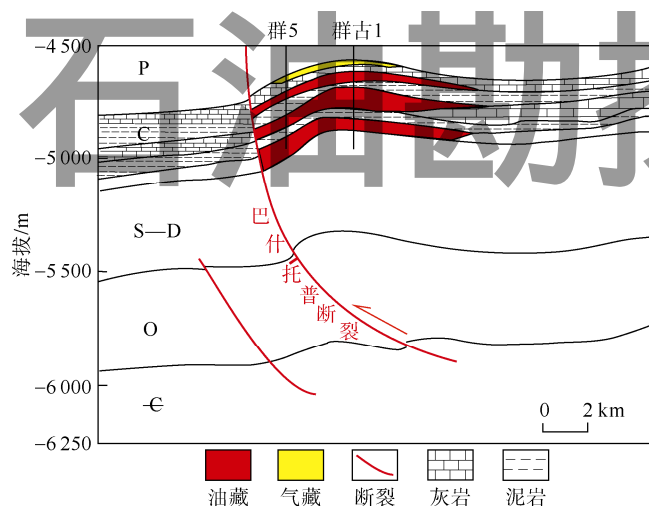


图6 巴什托普油田油藏剖面示意图

全球典型寒武系原油碳同位素组成的统计结果表明，寒武系底部原油具有轻碳同位素组成的特征，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般小于 -34‰ 。例如阿曼盆地寒武系原油 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -34.5‰ 左右^[29]，东西伯利亚盆地寒武系底部原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -35.1‰ 左右^[30]。前已述及，在早寒武世，全球较特殊的沉积环境以及生源是造成碳同位素组成明显偏轻的主要因素，台盆区这类具有轻碳同位素组成特征的原油与世界其他盆地典型寒武系底部原油的碳同位素组成具有较好的可比性。由此可以认为，台盆区相对富集轻碳同位素的原油（ $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -34‰ 左右）应来自于强还原沉积环境中形成的下寒武统烃源岩。

II类原油以塔东2井及和田河地区原油为代表，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-29.7\text{‰} \sim -28.5\text{‰}$ ，平均为 -28.9‰ 。其中，塔东2井的原油形成于盆地相，和田河地区的原油形成于台地相，这类原油的碳同位素组成与中—上寒武统烃源岩具有较好的可比性。前人通过研究生物标志化合物等地球化学特征发现这类原油的生物标志化合物具有6高1低的特征，碳同位素组成明显偏重，

多数学者认为它们应来源于台盆区发育的寒武系烃源岩^[9-12,43-44]。如前所述，台盆区下寒武统烃源岩具有相对较轻的碳同位素组成，这些相对富集重碳同位素的原油不可能来自下寒武统烃源岩，但其与台盆区相对富集重碳同位素的中—上寒武统烃源岩具有较好可比性。在前人研究基础上，结合地质背景及碳同位素组成特征，可以判断这类相对富集重碳同位素的原油主要应来自中—上寒武统烃源岩。

III类原油的碳同位素组成为 $-33.8\text{‰} \sim -29.8\text{‰}$ ，平均为 -32.1‰ 。这类原油在台盆区广泛分布，主要储集于奥陶系，在石炭系及志留系等地层也有发现。油气成藏以及地球化学研究结果表明这些原油主要为混源油^[11-12]。如前所述，由于台盆区奥陶系烃源岩干酪根的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要分布于 $-31\text{‰} \sim -28\text{‰}$ ，其生成原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可能分布于 $-32\text{‰} \sim -30\text{‰}$ ；依据下寒武统烃源岩与中—上寒武统烃源岩干酪根碳同位素组成特征判断，由这2套烃源岩所生原油形成的混源油，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值也可能分布于 $-33\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 。在这种情况下，单独依据原油的碳同位素组成很难确定这类原油的烃源岩。

由于塔里木盆地台盆区寒武纪—奥陶纪均为海相沉积环境，且古生界原油热演化程度较高，因此源于下寒武统和源于奥陶系烃源岩的原油在生物标志化合物等特征上也表现出一定相似性，从而制约了对寒武系来源原油特征的认识^[17]。III类原油究竟主要来自奥陶系烃源岩，还是来自寒武系不同层段烃源岩生成原油的混合，需要结合烃源岩的时空分布和相关地区的地质背景，综合其他地球化学指标及油气成藏特征等进一步研究、厘定。

3.3 地质意义

原油碳同位素组成具有明显的继承性，主要受控于烃源岩有机质的碳同位素组成，而热演化程度和运移等因素对其影响相对较小。台盆区存在3类不同碳同位素组成特征的原油，反映了台盆区早古生代生源-环境的复杂性。通过对台盆区古生界原油与下古生界烃源岩的碳同位素组成特征的对比分析，发现巴什托普地区以及中深5井等原油与下寒武统烃源岩的碳同位素组成有良好可比性，而塔东2井等原油与中上寒武统烃源岩的碳同位素组成有较好可比性。

台盆区不仅存在前人已指出的碳同位素组成较重的一类寒武系原油，还存在一类具有轻碳同位素组成特征的寒武系原油。因此将碳同位素组成较重的原油（ $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -29‰ 左右）作为台盆区寒武系烃源岩生成原油的典型代表存在明显的局限性，这可能与当时的

资料相对局限,得出的认识不够全面有关。因此,不能片面地认为塔里木盆地寒武系烃源岩仅能生成相对富集重碳同位素这一类原油。

现有研究成果表明台盆区寒武系烃源岩分布广、厚度大、有机质丰度相对较高,具备了成为主力烃源岩的条件;而奥陶系烃源岩平面上分布较为局限、厚度较薄、有机质丰度相对较低,显示出一定的局限性^[8,45-47]。如前所述,下寒武统烃源岩有机质的碳同位素组成相对较轻($\delta^{13}\text{C}$ 值主要分布于 $-36\text{‰}\sim-34\text{‰}$),中—上寒武统烃源岩有机质的碳同位素组成相对偏重($\delta^{13}\text{C}$ 值主要分布于 $-30\text{‰}\sim-27\text{‰}$)。二者生成的原油混合成藏后其 $\delta^{13}\text{C}$ 值可能分布于 $-33\text{‰}\sim-30\text{‰}$ 。因此,不能排除台盆区第III类原油来自寒武系烃源岩的可能性,但也不能否定奥陶系烃源岩的贡献。由此可见,寒武系烃源岩具备成为台盆区主力烃源岩的地质-地球化学条件,深层寒武系油源条件充足,具有较大勘探潜力,也拓宽了塔里木盆地寒武系乃至古生界的油气勘探领域。

4 结论

碳同位素组成分析表明塔里木盆地台盆区寒武系至少发育下寒武统以及中—上寒武统 2 套碳同位素组成具有明显差异的烃源岩,其中,下寒武统烃源岩有机质碳同位素组成明显偏轻,中—上寒武统烃源岩有机质碳同位素组成相对偏重,其差异主要受到母质来源以及沉积环境的影响。

原油碳同位素组成特征表明,塔里木盆地台盆区寒武系烃源岩所生原油既有 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -29‰ 左右相对富集重碳同位素的,也有 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -34‰ 左右相对富集轻碳同位素的。相对富集轻碳同位素的原油主要来自于下寒武统烃源岩,相对富集重碳同位素的原油主要来自于中—上寒武统烃源岩。不能将 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -29‰ 左右富集重碳同位素的原油确定为台盆区寒武系烃源岩生成的唯一原油类型。

根据台盆区下古生界不同层位烃源岩的地质-地球化学特征,判断寒武系烃源岩满足了成为主力烃源岩的条件,由此揭示出台盆区古生界油气勘探潜力巨大。这一认识对明确塔里木盆地台盆区古生界油气的来源并为拓宽塔里木盆地寒武系乃至古生界的油气勘探领域提供了重要依据。

参考文献:

[1] 梁狄刚,张水昌,张宝民,等.从塔里木盆地看中国海相生油问题[J].地学前缘,2000,7(4):534-547.

- LIANG Digang, ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, et al. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 534-547.
- [2] 赵靖舟.塔里木盆地北部寒武—奥陶系海相烃源岩重新认识[J].沉积学报,2001,19(1):117-124.
- ZHAO Jingzhou. Evaluation on the Cambrian-Ordovician marine source rocks from the North Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 117-124.
- [3] 王招明,肖中尧.塔里木盆地海相原油的油源问题的综合评述[J].科学通报,2004,49(S1):1-8.
- WANG Zhaoming, XIAO Zhongyao. Comprehensive discussion on the source rocks of marine oils in Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(S1): 1-8.
- [4] 杜金虎,潘文庆.塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J].石油勘探与开发,2016,43(3):327-339.
- DU Jinhui, PAN Wenqing. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 327-339.
- [5] 张水昌,王飞宇,张保民,等.塔里木盆地中上奥陶统油源层地球化学研究[J].石油学报,2000,21(6):23-28.
- ZHANG Shuichang, WANG Feiyu, ZHANG Baomin, et al. Middle-upper Ordovician source rock geochemistry of the Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 23-28.
- [6] 张水昌,梁狄刚,黎茂稳,等.分子化石与塔里木盆地油源对比[J].科学通报,2002,47(S1):16-23.
- ZHANG Shuichang, LIANG Digang, LI Maowen, et al. Molecular fossils and oil-source rock correlations in Tarim Basin, NW China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(S1): 16-23.
- [7] ZHANG S C, SU J, WANG X M, et al. Geochemistry of Palaeozoic marine petroleum from the Tarim Basin, NW China: Part 3. Thermal cracking of liquid hydrocarbons and gas washing as the major mechanisms for deep gas condensate accumulations[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42(11): 1394-1410.
- [8] 张水昌,高志勇,李建军,等.塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩识别与分布预测[J].石油勘探与开发,2012,39(3):285-294.
- ZHANG Shuichang, GAO Zhiyong, LI Jianjun, et al. Identification and distribution of marine hydrocarbon source rocks in the Ordovician and Cambrian of the Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 285-294.
- [9] 宋到福,王铁冠,李美俊.塔中地区中深1和中深1C井盐下寒武系油气地球化学特征及其油气源判识[J].中国科学:地球科学,2016,46(1):107-117.
- SONG Daofu, WANG Tieguan, LI Meijun. Geochemistry and possible origin of the hydrocarbons from wells Zhongshen1 and Zhongshen1C, Tazhong Uplift[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2016, 59(4): 840-850.
- [10] 肖中尧,黄光辉,卢玉红,等.塔里木盆地塔东2井原油成因分析[J].沉积学报,2004,22(S1):66-72.

- XIAO Zhongyao, HUANG Guanghui, LU Yuhong, et al. Origin of oils well from Tadong 2 in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(S1): 66-72.
- [11] LI S M, PANG X Q, JIN Z J, et al. Petroleum source in the Tazhong Uplift, Tarim Basin: New insights from geochemical and fluid inclusion data[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(6): 531-553.
- [12] LI S M, AMRANI A, PANG X Q, et al. Origin and quantitative source assessment of deep oils in the Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. *Organic Geochemistry*, 2015, 78(2): 1-22.
- [13] 何登发, 贾承造, 柳少波, 等. 塔里木盆地轮南低凸起油气多期成藏动力学[J]. *科学通报*, 2002, 47(S1): 122-130.
- HE Dengfa, JIA Chengzao, LIU Shaobo, et al. Oil and gas multistage forming dynamics of Lunnan Low Uplift in Tarim Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(S1): 122-130.
- [14] 赵孟军, 王招明, 潘文庆, 等. 塔里木盆地满加尔凹陷下古生界烃源岩的再认识[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(4): 417-423.
- ZHAO Mengjun, WANG Zhaoming, PAN Wenqing, et al. Lower Palaeozoic source rocks in Manjiaer Sag, Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(4): 417-423.
- [15] 孙永革, 肖中尧, 徐世平, 等. 塔里木盆地原油中芳基类异戊二烯烃的检出及其地质意义[J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(2): 215-218.
- SUN Yongge, XIAO Zhongyao, XU Shiping, et al. Aryl-isoprenoids in crude oil and its implication in geological exploration[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(2): 215-218.
- [16] CAI C, ZHANG C, WORDEN R H, et al. Application of sulfur and carbon isotopes to oil-source rock correlation: A case study from the Tazhong area, Tarim Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2015, 83(4): 140-152.
- [17] 王招明, 谢会文, 陈永权, 等. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(2): 1-13.
- WANG Zhaoming, XIE Huiwen, CHEN Yongquan, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 well in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(2): 1-13.
- [18] 吴林, 管树巍, 任荣, 等. 前寒武纪沉积盆地发育特征与深层烃源岩分布: 以塔里木新元古代盆地与下寒武统烃源岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 905-915.
- WU Lin, GUAN Shuwei, REN Rong, et al. The characteristics of Precambrian sedimentary basin and the distribution of deep source rock: A case study of Tarim Basin in Neoproterozoic and source rocks in Early Cambrian, Western China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 905-915.
- [19] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 8-21.
- ZHU Guangyou, CHEN Feiran, CHEN Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 8-21.
- [20] 梁狄刚, 陈建平. 中国南方高、过成熟区海相油源对比问题[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 8-14.
- LIANG Digang, CHEN Jianping. Oil-source correlations for high and over matured marine source rocks in South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(2): 8-14.
- [21] PRICE L, LEFEVER J. Dysfunctionalism in the Williston Basin: The Bakken/mid-Madison petroleum system[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1994, 42(2): 187-218.
- [22] STAHL W J. Source rock-crude oil correlation by isotopic type-curves[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(10): 1573-1577.
- [23] GRATZER R, BECHTEL A, SACHSENHOFER R F, et al. Oil-oil and oil-source rock correlations in the Alpine Foreland Basin of Austria: Insights from biomarker and stable carbon isotope studies[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(6): 1171-1186.
- [24] STAHL W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20(8): 121-149.
- [25] CLAYTON C J. Effect of maturity on carbon isotope ratios of oils and condensates[J]. *Organic Geochemistry*, 1991, 17(6): 887-899.
- [26] GHORI K A R, CRAIG J, THUSU B, et al. Global infracambrian petroleum systems: A review[J]. *Geological Society*, 2009, 326(1): 109-136.
- [27] DUTTA S, BHATTACHARYA S, RAJU S V. Biomarker signatures from Neoproterozoic-Early Cambrian oil, western India[J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 56(5): 68-80.
- [28] GRANTHAM P J, WAKEFIELD L L. Variations in the sterane carbon number distributions of marine source rock derived crude oils through geological time[J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 12(1): 61-73.
- [29] GROSJEAN E, LOVE G D, KELLY A E, et al. Geochemical evidence for an Early Cambrian origin of the 'Q' oils and some condensates from North Oman[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 45(4): 77-90.
- [30] KELLY A E, LOVE G D, ZUMBERGE J E, et al. Hydrocarbon biomarkers of Neoproterozoic to Lower Cambrian oils from Eastern Siberia[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(6): 640-654.
- [31] 杨福林, 王铁冠, 李美俊. 塔里木盆地寒武系烃源岩地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 861-872.
- YANG Fulin, WANG Tieguan, LI Meijun. Geochemical study of Cambrian sourcerocks in the cratonic area of Tarim Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 861-872.
- [32] 赵宗举, 张运波, 潘懋, 等. 塔里木盆地寒武系层序地层格架[J]. *地质论评*, 2010, 56(5): 609-620.
- ZHAO Zongju, ZHANG Yunbo, PAN Mao, et al. Cambrian sequence stratigraphic framework in Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 2010, 56(5): 609-620.
- [33] 陈践发, 孙省利, 刘文汇, 等. 塔里木盆地寒武统底部富有机质层段地球化学特征及成因探讨[J]. *中国科学: 地球科学*, 2004, 34(S1): 107-113.
- CHEN Jianfa, SUN Xingli, LIU Wenhui, et al. Geochemical characteristics and genesis of the organic layer in the bottom of the

- Lower Cambrian in Tarim Basin[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2004, 47(S2): 125-132.
- [34] LOGAN G A, HAYES J M, HIESHIMA G B, et al. Terminal Proterozoic reorganization of biogeochemical cycles[J]. Nature, 1995, 376(6535): 53-56.
- [35] GOLYSHEV S I, VERKHOVSKAYA N A, BURKOVA V N, et al. Stable carbon isotopes in source-bed organic matter of west and east Siberia[J]. Organic Geochemistry, 1991, 14(3): 277-291.
- [36] 王杰, 陈践发, 王大锐, 等. 华北北部中、上元古界生烃潜力及有机质碳同位素组成特征研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 13-15.
- WANG Jie, CHEN Jianfa, WANG Darui, et al. Study on the characteristics of carbon isotopic composition and hydrocarbon generation potential of organic matter of Middle-Upper Proterozoic in northern part of North China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 13-15.
- [37] 张纪智, 王招明, 杨海军, 等. 塔里木盆地中深地区寒武系盐下白云岩油气来源及差异聚集[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 40-47.
- ZHANG Jizhi, WANG Zhaoming, YANG Haijun, et al. Origin and differential accumulation of hydrocarbons in Cambrian sub-salt dolomite reservoirs in Zhongshen Area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 40-47.
- [38] 刘文汇, 腾格尔, 王晓锋, 等. 中国海相碳酸盐岩层系有机质生烃理论新解[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 155-164.
- LIU Wenhui, BORJIGIN Tenger, WANG Xiaofeng, et al. New knowledge of hydrocarbon generating theory of organic matter in Chinese marine carbonates[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 41(1): 155-164.
- [39] ZHU M Y, BABCOCK L E, PENG S C. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction[J]. Palaeoworld, 2006, 15(3): 217-222.
- [40] 樊茹, 邓胜徽, 张学磊. 寒武系碳同位素漂移事件的全球对比性分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1829-1839.
- FAN Ru, DENG Shenghui, ZHANG Xuelei. Significant carbon isotope excursions in the Cambrian and their implications for global correlations[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2011, 54(11): 1686-1695.
- [41] 张仲培, 刘士林, 杨子玉, 等. 塔里木盆地麦盖提斜坡构造演化及油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 909-919.
- ZHANG Zhongpei, LIU Shilin, YANG Ziyu, et al. Tectonic evolution and its petroleum geological significances of the Maigaiti Slope, Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2011, 32(6): 909-919.
- [42] 丁勇, 贾存善, 邵志兵. 巴楚—麦盖提地区主要油气藏原油地球化学特征及油源探讨[J]. 石油实验地质, 2013, 35(6): 683-688.
- DING Yong, JIA Cunshan, SHAO Zhibing. Geochemical features and sources of crude oils in Bachu-Maigaiti area[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(6): 683-688.
- [43] 崔景伟, 王铁冠, 胡健, 等. 塔里木盆地和田河气田轻质油成熟度判定及其油源意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 27-36.
- CUI Jingwei, WANG Tieguan, HU Jian, et al. Maturity of light oil and its significance in indicating oil source in Hetianhe gas field, Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(1): 27-36.
- [44] 胡健, 王铁冠, 陈建平, 等. 塔西南坳陷周缘原油地球化学特征与成因类型[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1221-1233.
- HU Jian, WANG Tieguan, CHEN Jianping, et al. Geochemical characteristics and origin patterns of oils in periphery of southwestern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1221-1233.
- [45] HUANG H, ZHANG S, SU J. Palaeozoic oil-source correlation in the Tarim Basin, NW China: A review[J]. Organic Geochemistry, 2016, 94(4): 32-46.
- [46] 金之钧, 刘全有, 云金表, 等. 塔里木盆地环满加尔凹陷油气来源与勘探方向[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(3): 310-320.
- JIN Zhijun, LIU Quanyou, YUN Jinbiao, et al. Potential petroleum sources and exploration directions around the Manjar Sag in the Tarim Basin[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2017, 60(2): 235-245.
- [47] 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 340-349.
- SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, CHEN Yongquan, et al. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in Lower-Middle Cambrian, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 340-349.
- 第一作者简介: 朱心健(1991-), 男, 湖北广水人, 现为中国石油大学(北京)在读博士研究生, 主要从事地球化学方面的研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 中国石油大学(北京)地球科学学院, 邮政编码: 102249。E-mail: xjzhus@163.com
- 联系作者简介: 陈践发(1961-), 男, 湖南耒阳人, 博士, 中国石油大学(北京)教授, 主要从事地球化学、油气成藏方面的研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 中国石油大学(北京)地球科学学院, 邮政编码: 102249。E-mail: jfchen@cup.edu.cn
- 收稿日期: 2017-03-23 修回日期: 2017-10-23

(编辑 王晖)