

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2020.03.005

## 塔里木盆地东部上寒武统 SPICE 事件检出及其 油气地球化学意义

王浩哲<sup>1,2</sup>, 刘 虎<sup>3</sup>, 韦志伟<sup>1,2</sup>, 邓 倩<sup>1,2</sup>, 李诗达<sup>1,2</sup>, 张海祖<sup>4</sup>, 程 斌<sup>1</sup>, 廖泽文<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640; 2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 成都, 610091; 4. 中国石油塔里木油田分公司石油勘探开发研究院, 库尔勒, 841000)

**摘 要:** 国内外研究发现上寒武统沉积地层中普遍记录了一次碳酸盐岩碳同位素正向漂移, 即 SPICE (Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion) 事件, 在全球区域等时沉积地层中残余有机质(干酪根)也同时富集重的稳定碳同位素, 通过分析这种协同关系以期探讨塔里木盆地台盆区已发现的部分异常富集<sup>13</sup>C 油气藏的成因。前期研究发现塔里木盆地东部地区上寒武统底部存在可全球性对比的 SPICE 事件且具有有机/无机碳同位素组成协同正向漂移的特征。综合分析塔里木盆地台盆区烃源岩发育特征、有机质热演化程度以及生物发育特征等因素, 初步研究结果认为目前发现的台盆区塔东 2 井寒武系、塔中 62 井志留系等原油富集<sup>13</sup>C 同位素的成因可能是由于局部发育以冷生物物种(如蓝细菌等)为主要生物母质的富集重碳同位素的上寒武统烃源岩排烃、聚集、成藏的结果。

**关键词:** 上寒武统, SPICE 事件, 稳定碳同位素, 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## Determination of SPICE event from the upper Cambrian strata and its geochemical significance in the eastern Tarim Basin, NW China

Wang Haozhe<sup>1,2</sup>, Liu Hu<sup>3</sup>, Wei Zhiwei<sup>1,2</sup>, Deng Qian<sup>1,2</sup>, Li Shida<sup>1,2</sup>, Zhang Haizu<sup>4</sup>, Cheng Bin<sup>1</sup>, Liao Zewen<sup>1\*</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Shale Gas Evaluation and Exploitation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, 610091, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, 841000, China)

**Abstract:** As the extensive work of oil and gas exploration in the Tarim Basin, it has been found that the stable carbon isotopic composition of some crude petroleum from the Cambrian-lower Ordovician source rocks in both platform and basin area does not match with the counterpart of residual organic matter in lower Paleozoic marine main hydrocarbon source rocks which has been identified. It is in conflict with the isotope fractionation of traditional hydrocarbon generation theory. The appearance of this abnormal carbon isotope composition is likely to be related to perturbations in the global carbon cycle. It is worth noting that an event named SPICE (Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion) which is one of the biggest perturbations of the global carbon cycle in the Paleozoic has been found at the boundary between Series 3 and Furongian of Cambrian in the marine strata of almost every early Paleozoic paleocontinental margin on the global. Further studies have found that heavier stable carbon isotope composition is also enriched by high residual organic matter in the marine carbonate rocks or kerogen in the isochronous organic-rich strata in some regions at the bottom of the upper Cambrian. In the eastern

基金项目:“十三五”油气专项(2017ZX05008002), 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA14010103)

收稿日期:2020-03-03

\* 通讯联系人, E-mail: liaozw@gig.ac.cn

Tarim Basin, there was the SPICE event in the late Cambrian which could be compared globally and had the characteristic of co-positive drift of organic/inorganic carbon isotope composition. Based on the comprehensive analysis of the genetic mechanism of the co-positive drift, it is preliminarily believed that the origin of the crude oil (e.g. TD2(€), TZ62(S) herein) enriched in  $^{13}\text{C}$  isotope may be the result of hydrocarbon expulsion and accumulation of the locally developed upper Cambrian source rocks enriched with heavy stable carbon isotope.

**Key words:** upper Cambrian, SPICE event, stable carbon isotope, Tarim Basin

塔里木盆地是由古生界克拉通盆地为中-新生界前陆盆地所覆盖并经历多期重大构造改动而形成的现今为造山带所环绕的内陆多旋回叠合盆地<sup>[1]</sup>,也是中国西北地区最重要的含油气盆地之一。近年来发现,塔里木盆地台盆区一些来自寒武系烃源岩的部分原油具有富集  $^{13}\text{C}$  的特征,比如塔东 2 井寒武系、塔中 62 井志留系、和田河地区等原油,其稳定碳同位素  $\delta$  值分布在  $-28\%$  左右,比一般原油重  $3\% \sim 6\%$ ,此类富集重碳同位素原油的成因机理一度存在很大争议,并在一定程度上阻碍油气勘探开发的进程。

同位素组成是地球演化历史的重要记录之一。碳同位素组成的正负漂移是与生物爆发/灭绝相关的全球性事件<sup>[2]</sup>,从已报道的寒武系碳同位素演化曲线与构造运动、气候变化、全球海平面变化及海洋碳循环扰动导致的生物繁盛/集群灭绝的关系中可以识别出 10 次明显的  $\delta^{13}\text{C}$  值漂移记录<sup>[3-4]</sup>。早古生代全球几乎每一个古大陆边缘海相地层中都相继发现在寒武系第三统-芙蓉统界限处均记录一次明显的碳酸盐岩碳同位素正向漂移事件,最大幅度可达  $+5\%$ ,这是古生代全球碳循环最大扰动之一,被命名为 SPICE (Step-toean Positive Carbon Isotope Excursion) 事件<sup>[5-7]</sup>。SPICE 事件最初是针对中-上寒武统界线处的碳酸盐岩碳同位素正向漂移所提出的,而后随着对该事件研究的广泛开展,近些年发现在上寒武统底部沉积地层中残余有机质(干酪根)也同时富集重的稳定碳同位素<sup>[8-10]</sup>,而这种协同正漂的记录与上述提到的已发现的部分异常富集  $^{13}\text{C}$  原油的现象之间是否存在一些关联?这种关联能否有助于解释这些重质原油?能否有助于给塔里木盆地海相烃源岩带了新的认识?对这些问题的研究和探讨可为塔里木盆地海相原油的勘探提供新的地球化学依据。

本文通过收集整理前人对塔里木盆地台盆区油气地球化学研究成果及对比分析华南地区 SPICE 事件响应特征与塔里木盆地东部上寒武统 SPICE 事件检出的特点,探讨台盆区已发现的异常富集  $^{13}\text{C}$  原油与 SPICE 事件之间的联系,分析塔里木盆地 SPICE 事件的油气地球化学意义。

## 1 塔里木台盆区异常富集 $^{13}\text{C}$ 油气藏地球化学特征

近年来勘探发现塔里木盆地台盆区部分产自寒武系烃源岩的原油具有异常富集  $^{13}\text{C}$  的特征,其  $\delta^{13}\text{C}$  值基本上分布在  $-28\%$  左右。其中,塔东 2 井寒武系储层中的原油具有来自寒武系烃源岩的生物标记化合物分布特征(相对较高的  $\text{C}_{28}$  甾烷、伽马蜡烷等分布),因此被认为是寒武系自生自储的一个古油藏<sup>[11-12]</sup>,其原油  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-28.283\%$ ;塔中 62 井志留系储层中的原油被认为是典型来自寒武系烃源岩的透镜体油藏<sup>[13]</sup>,其原油  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-28.606\%$ ;英南 2 井的凝析油通过对其伴生的凝析油分子标志物可以断定是来自寒武系的烃源岩<sup>[14]</sup>,其原油  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-27.679\%$ ;近年来在与塔中 I 号坡折带紧邻的顺托果勒区块上发现明确是来自寒武系烃源岩的顺 7 井原油,其  $\delta^{13}\text{C}$  值在  $-29\%$  左右<sup>[15]</sup>;此外,和田河地区来自中-上寒武统烃源岩的原油碳同位素组成也相对偏重( $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-29.7\% \sim -28.1\%$ )<sup>[16-17]</sup>。图 1 示意了目前塔里木盆地台盆区发现的富集重碳同位素油气藏的分布情况。

TD2(€)原油表现为高粘度的稠油、富含稠环芳烃化合物并具有富集  $^{13}\text{C}$  的特征,被认为是曾经历  $200\text{ }^\circ\text{C}$  以上高温热蚀变作用导致同位素分馏的结果<sup>[11,18]</sup>;但是, TZ62(S)原油流动性好,属于正常的黑油范围,高温热蚀变作用不能解释该原油

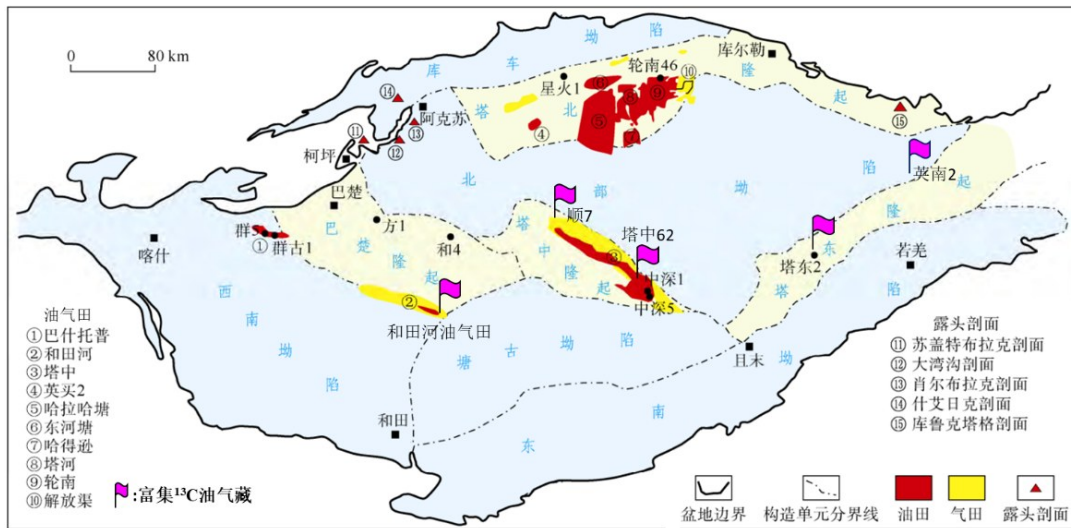


图 1 塔里木盆地海相油气藏分布示意图(据文献[17]修改)

Fig. 1 The distribution diagram of marine oil and gas reservoirs in the Tarim Basin (modified after ref. [17])

稳定碳同位素组成特征<sup>[13]</sup>;此外,英南2井中凝析油的同位素比值特征也不能通过热蚀变作用得到合理解释<sup>[14]</sup>,因为沉积有机质热演化过程中裂解得到的轻组分包括凝析油较裂解重质组分应该相对亏损<sup>13</sup>C而具有更轻的稳定碳同位素组成,但是其稳定碳同位素 $\delta$ 值却高于 $-28\%$ 。朱心健等<sup>[17]</sup>研究统计表明下寒武统烃源岩干酪根稳定碳同位素组成明显偏轻,中-上寒武统烃源岩稳定碳同位素组成相对偏重,而奥陶系烃源岩稳定碳同位素

组成则介于两者之间(图2)。前文提到的富集重碳同位素的原油曾经甚至被用作寒武系烃源岩原油的端元值以探讨塔里木盆地海相油藏的混合定量评价<sup>[19]</sup>。但这类油藏并未广泛发现,目前针对塔里木盆地台盆区海相油藏主力烃源岩研究方面仍然存在很大争论,这些原油富集<sup>13</sup>C同位素的成因机制也不清楚,能否将该类原油视为来自寒武系烃源岩贡献的端元组分值得怀疑。因此,厘清这类原油富集<sup>13</sup>C同位素的成因就非常重要。

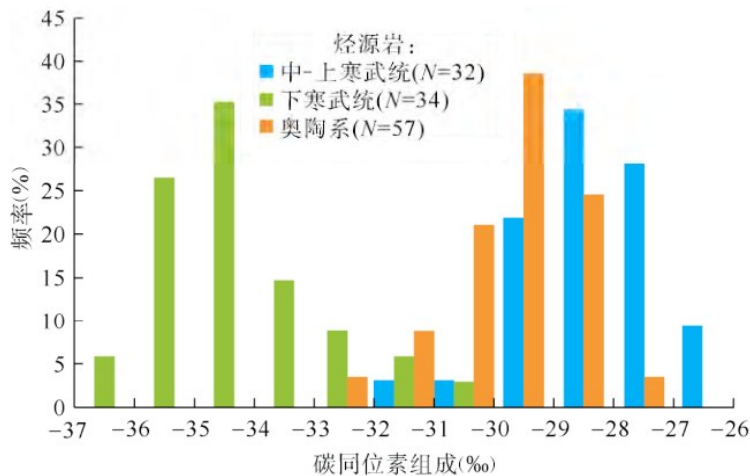


图 2 塔里木盆地台盆区不同烃源岩碳同位素组成分布统计<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Distribution statistics for carbon isotope composition of different source rocks in platform and basin facies of the Tarim Basin <sup>[17]</sup>

近年来在塔中地区钻获深层下寒武统轻质油藏<sup>[20]</sup>。其中,在中深1井中寒武统阿瓦塔格组( $\epsilon_{2a}$ )、中深5井下寒武统肖尔布拉克组( $\epsilon_{1x}$ )分别钻获烃类流体。结合地质背景分析,油田上认为这两个油藏来自下寒武统玉尔吐斯组( $\epsilon_{1y}$ )烃源岩,并认为其代表了台盆区来自寒武系烃源岩的端元油藏。ZS1( $\epsilon_{2a}$ )和ZS5( $\epsilon_{1x}$ )原油稳定碳同位素组成分别为 $-32.939\%$ 和 $-34.581\%$ 。此外,由于其没有相对含量较高的 $C_{28}$ 甾烷及明显的伽玛蜡烷分布<sup>[20]</sup>,这在生物标记化合物方面与上面提到的TD2( $\epsilon$ )和TZ62(S)原油也体现出很大的不同。因此,以TD2( $\epsilon$ )和TZ62(S)为代表的重质

原油的成因值得进一步探讨。

由上面的讨论可知,富集 $^{13}C$ 的TD2( $\epsilon$ )和TZ62(S)等原油与其他来自寒武系玉尔吐斯组烃源岩的原油在碳同位素和生标上差异明显,故其与玉尔吐斯组烃源岩没有成因上的联系,而与台盆区广泛分布的油气藏相比其成因机制具有特殊性。被认为是寒武系自生自储的TD2( $\epsilon$ )油藏与TZ62(S)原油在同位素组成、生物标记化合物分布等地球化学特征上高度相似(图3),这说明虽然二者平面上相距很远,但其生烃母质应该具有相似的地球化学特征并且后期经历了相似的地球化学演化过程。

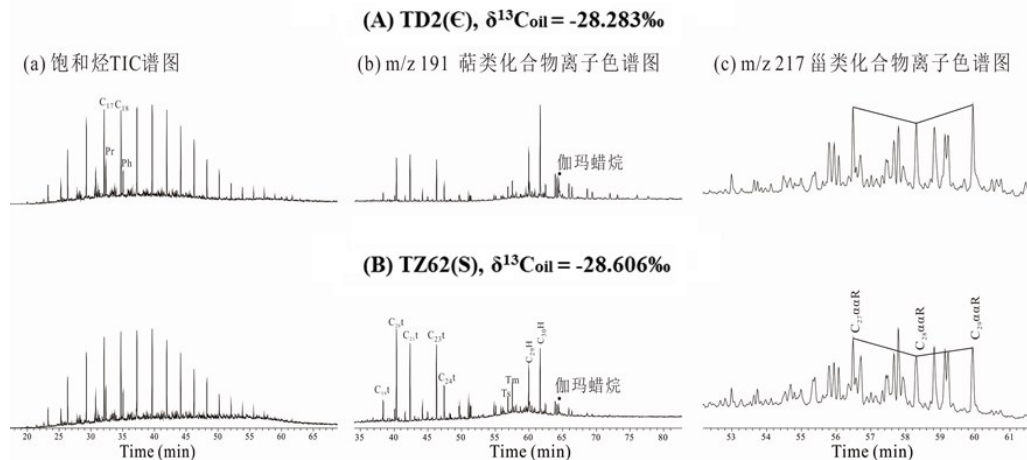


图3 TD2( $\epsilon$ )和TZ62(S)原油饱和烃、生物标记化合物分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of saturated hydrocarbons and biomarkers in crude oil of TD2 ( $\epsilon$ ) and TZ62(S)

塔里木盆地台盆区目前发现的海相油气藏与已经查明的寒武-奥陶系烃源岩不匹配,仍有一些对油气藏有贡献的烃源岩未被发现,这也是目前塔里木盆地针对烃源岩研究仍然存在很大争论的一个主要原因。台盆区富集 $^{13}C$ 的TD2( $\epsilon$ )和TZ62(S)等油藏具有特殊的地球化学特征,其成因机制值得深入探讨。值得注意的是,在调研这些重质原油时发现,在晚寒武世沉积地球化学记录中存在一次全球范围内可对比的碳酸盐岩碳同位素正向漂移,即SPICE事件,而近些年发现在上寒武统底部沉积地层中残余有机质(干酪根)也同时富集重的稳定碳同位素,那么塔里木盆地上寒武统是否有可能局部发育含有这种富集重碳同

位素的沉积地层(烃源岩)从而生排出具有富集重碳同位素特征的原油?这仍需更进一步的证实。

## 2 塔里木盆地东部地区上寒武统 SPICE 事件记录

研究表明,海相碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值的变化可较好地反映当时海水中稳定碳同位素值的波动<sup>[21]</sup>,重要地质事件或者地层界线处常常伴随着 $\delta^{13}C$ 值的正向或负向漂移<sup>[22]</sup>。其中,对于寒武系第三统-芙蓉统界线处的这次碳同位素组成正向漂移,国内外其他地区已有相关报道<sup>[3,5-6,8,23-26]</sup>(图4),这表明其为一次全球性海洋事件。

图4显示在全球晚寒武世几乎每一个古大陆



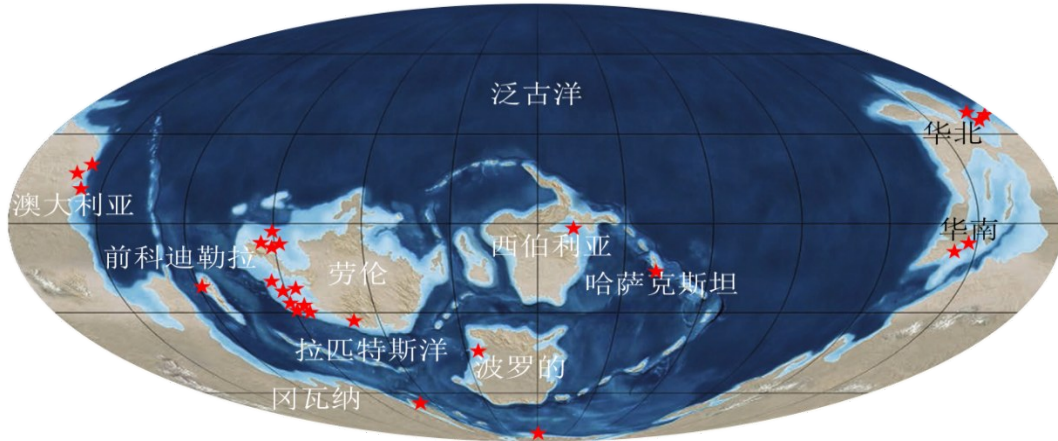


图 4 全球范围内上寒武统 SPICE 事件检出分布示意图(据文献[27-28]修改)

Fig. 4 Schematic diagram of the distribution of SPICE event determined worldwide in late Cambrian (modified from ref. [27-28])

边缘、斜坡相沉积地层中均检测出 SPICE 事件。中国古陆主体由华南、华北及塔里木三大古老克拉通组成。无论是与塔里木板块最近的华南板块还是与其相距较远的华北板块上寒武统沉积记录中均有 SPICE 事件相关报道<sup>[8,29]</sup>。从最近的报道<sup>[8]</sup>中发现华南地区无论是典型浅水瓦尔岗剖面还是深水礁边剖面沉积物中均显示出有机/无机碳同位素组成协同正向漂移现象(图 5)。

在早古生代,塔里木板块和华南板块是处于相近的纬度上,并且是相邻的<sup>[30-31]</sup>,那么在塔里木板块上寒武统沉积地球化学记录中是否也应有

该事件的记录?从近年来对塔里木盆地台盆区的研究工作<sup>[9,32]</sup>中可以发现,尽管雅尔当山剖面与 TD2 井沉积序列分别代表塔东地区的碳酸盐岩浅水陆棚相及欠补偿盆地相,但是海平面及气候的波动同时控制着两个沉积相的演化,因而其总有机碳组成(TOC)随时代的分布趋势及无机碳酸盐岩稳定碳同位素组成地层曲线均具有可对比性。值得注意的是,雅尔当山剖面与 TD2 井的碳酸盐岩稳定碳同位素组成地层曲线均检出了 SPICE 事件<sup>[9]</sup>(图 6),该事件具有全球可对比性(图 7),对应于海退及缺氧引起的三叶虫绝灭事件。

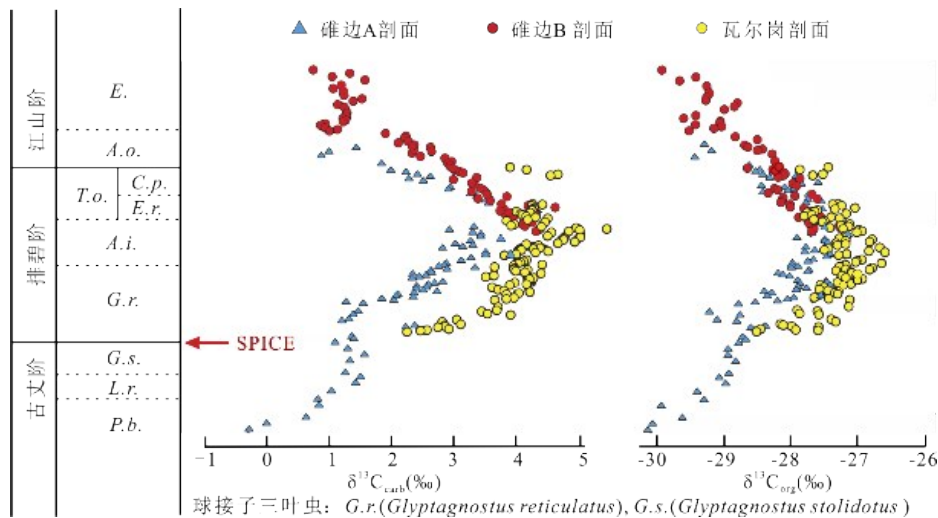


图 5 华南板块三个典型剖面上寒武统 SPICE 事件记录<sup>[8]</sup>

Fig. 5 The SPICE event records of Late Cambrian in three typical sections of South China<sup>[8]</sup>

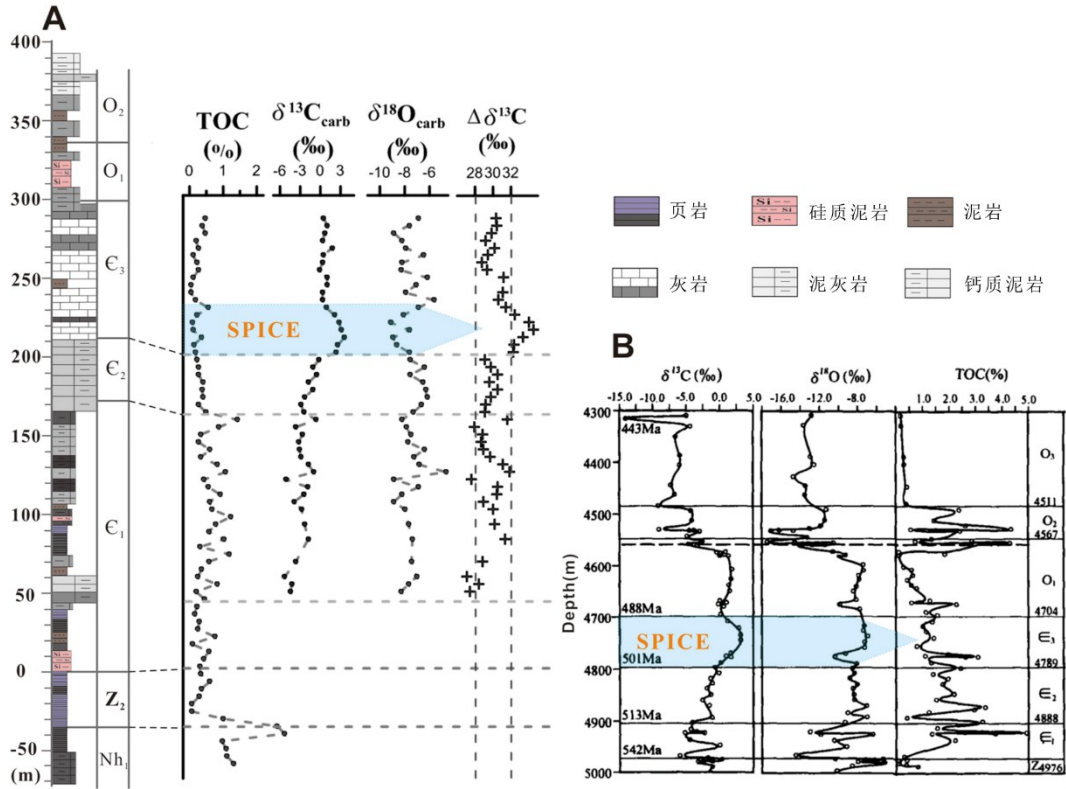


图6 同位素地层曲线对比:(A)雅尔当山剖面;(B)TD2井碳酸盐岩碳(同位素数据引自文献[32], 箭头指示中/上寒武统界限的“SPICE”事件<sup>[9]</sup>)

Fig. 6 Stable isotope strata curves from the Yaerdang Mountain profile (A) and well TD2 (B) (carbon isotope data of carbonate rocks are quoted from ref. [32], arrow to the right corresponds to the SPICE event<sup>[9]</sup>)

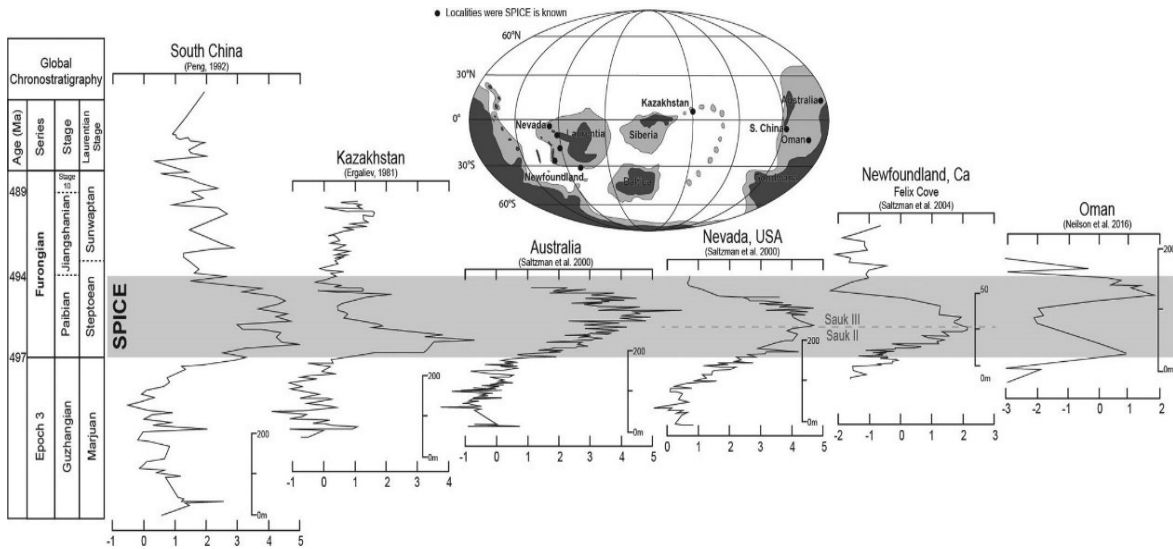


图7 全球年代地层格架及部分区域 SPICE 事件对比<sup>[33-34]</sup>

Fig. 7 The contrast of partial regional SPICE event and global chronostratigraphic framework<sup>[33-34]</sup>

塔里木盆地塔东地区也显示出有机/无机碳同位素组成协同正向漂移现象(图 8),但与华南地区相比其响应特征没那么明显.从图 8 中可知,除前文已经论述的塔里木盆地东部地区雅尔当山剖面与 TD2 井上寒武统地层中存在可全球性对比的无机碳同位素组成正向漂移记录外,雅尔当山剖面干酪根碳同位素组成也同时出现可对比的正向漂移特征.图 8 中展示出的几组 TD2 井残余有机质稳定碳同位素组成集中分布在  $-27\%$ ~ $-26\%$  之间,有研究认为 TD2 井岩心样品中残余有机质很可能是经高温热蚀变作用后形成的碳化沥青<sup>[11]</sup>,但由于上、下寒武统岩芯样品的同位素差异依然没有发生改变,且华南地区上寒武统沉积有机质稳定碳同位素组成也达到  $-27\%$  以上,故笔者仍然认为 TD2 井原始沉积有机质也同样存在与雅尔当山剖面相对应的  $\delta^{13}C_{org}$  正向漂移事件.因此,塔里木盆地东部地区上寒武统的确存在可全球性对比的 SPICE 事件,且具有有机/无机碳同位素组成协同正向漂移的特征.该事件位于全球大气二氧化碳迅速降低的阶段,可能与“冷事件”有关.此外,研究表明晚寒武世大气中  $O_2$  有一次明显的增加,这导致与 SPICE 事件接踵而至的是浮游生物多样性增加<sup>[10]</sup>,即 GOBE (the Great Ordovician Biodiversification Event).因此,这次全球性气候环境的剧烈波动很可能是造成上、下寒武统烃源岩非均质性及生烃的初级生物母质转变的根本原因<sup>[12]</sup>.

综上可知,不同时空内存在相变,在 SPICE 事件期间亦或在其之后一段时期内,沉积环境发生变化有可能在局部沉积稳定碳同位素组成偏重的生物母质,从而决定了沉积残余有机质(干酪根)的碳同位素组成,这种有机质继而产生富集  $^{13}C$  的原油.然而,这些都是基本的推测,SPICE 事件与台盆区富集  $^{13}C$  油气藏之间的相关性尚需进一步的探讨.

### 3 SPICE 事件与台盆区富集 $^{13}C$ 油气藏之间的相关性讨论

塔里木盆地台盆区下古生界识别出寒武系-下奥陶统及中-上奥陶统两套海相油气单元<sup>[35]</sup>,现

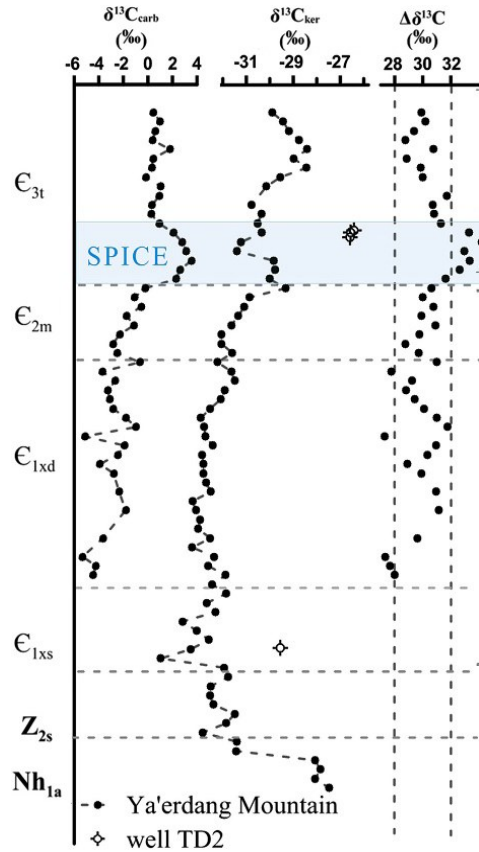


图 8 塔里木盆地雅尔当山剖面与 TD2 井 SPICE 事件记录<sup>[9]</sup>  
 Fig. 8 The SPICE event records of the Yaerdang Mountain profile and well TD2 in the Tarim Basin<sup>[9]</sup>

有研究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<sup>[36]</sup>.塔里木盆地上寒武统沉积时台盆区处于收缩阶段<sup>[37]</sup>,此时海洋正经历海退、全球变冷的时期,其中 SPICE 事件就发育在中-上寒武统界线处<sup>[38]</sup>,台盆区晚寒武世没有大规模烃源岩发育的报道.但是,根据地震相和沉积相的综合分析,认为塔里木盆地上寒武统局部区块可能发育烃源岩<sup>[39-40]</sup>.

**3.1 台盆区中-上寒武统沉积分布特征** 塔里木盆地台盆区寒武纪总体经历了海进、盆地伸展,稳定沉降到海退、盆地收缩一个完整的开合过程<sup>[37,41]</sup>.海进、盆地伸展阶段最有利于烃源岩大面积发育;而海退、盆地收缩阶段只能在台内凹陷、



高能沉积相带等局部闭塞环境中发育烃源岩<sup>[41]</sup>, 这是塔里木盆地台盆区上寒武统不发育大规模烃源岩的根本原因。

图9示意了塔里木盆地中-上寒武统沉积时的古沉积模式和沉积相图,可以看到目前发现的富

集<sup>13</sup>C的油气藏除TD2井分布在盆地相,其他油气藏基本上分布在中-上寒武统沉积时的台缘-斜坡相附近、台内洼地等沉积环境,这些高能沉积相带将有可能局部发育富集重碳同位素的烃源岩<sup>[41]</sup>,从而有可能对这些油气藏的形成做出贡献。

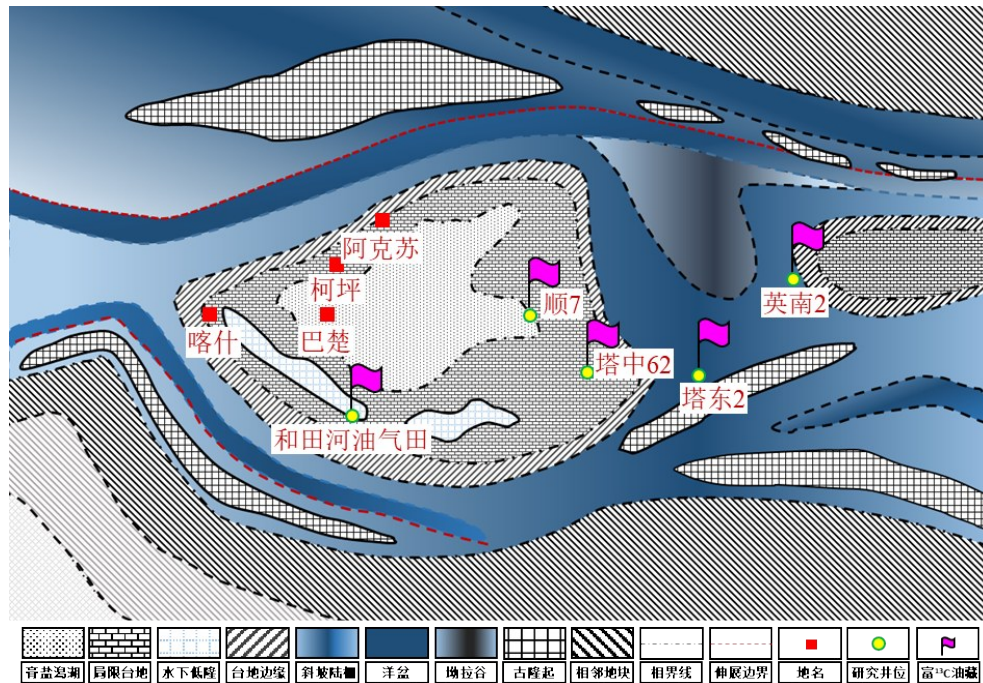


图9 塔里木盆地中-晚寒武世古沉积环境简图(据文献[42-43]修改)

Fig. 9 Schematic diagram of middle-upper Cambrian paleosedimentary environment in the Tarim Basin (modified after ref. [42-43])

**3.2 来自上寒武统白云岩中微生物发育特征研究的启发** 目前普遍认为塔里木盆地上寒武统地层不发育规模性展布的烃源岩,而发育厚层白云岩,故多是探讨其作为储层的地质地球化学演化特征<sup>[44-45]</sup>,其沉积微相、孔隙演化、不同地区的古沉积特征等对于目前塔里木盆地深层-超深层油气勘探至关重要。

近些年有研究报道塔里木盆地上寒武统白云岩中微生物的发育特征及其成因意义<sup>[46-47]</sup>,在柯坪蓬莱坝剖面中-上寒武统的白云岩中发现一系列不同尺度的球状小颗粒集合组成的球形白云石以及硅化后的丝状体具有哑铃状或链状相连的显微结构。通过沉积学、岩石学和地球化学等研究,认为这些显微结构可能分别为白云石成核的最初阶段在微生物作用下形成的纳米球粒、被胞外聚

合物或黏液等包裹而矿化的丝状物及因硅化而保存良好的球形细菌(可能为蓝细菌)<sup>[46]</sup>。这些具有微生物特征的显微结构可能为塔里木盆地中-上寒武统白云岩的微生物成因提供一些直观证据;同时这与微生物培养实验中沉淀的白云石在形态上基本一致,说明微生物调制作用是中-上寒武统白云岩重要的成因模式之一<sup>[47]</sup>。

以上针对白云岩中微生物发育特征的研究工作,不仅显示出其中存在残余有机质,而且揭示出不同发育形态的白云石本身具有与生物大分子分布及浓度相关的荧光发色团<sup>[46]</sup>。由此看来,虽然上述研究中没有给出白云岩的有机质丰度,但可以推测局部区块可能发育富集<sup>13</sup>C有机质的碳酸盐岩,在适当的环境中可能发育一些烃源岩,这与塔里木盆地台盆区上寒武统的地震相、沉积相综



合研究认识是一致的<sup>[39-40]</sup>. 而有关与白云石伴生发育的微生物包括蓝细菌等生物地球化学特征将在下一个部分进行详细讨论.

**3.3 台盆区异常富集<sup>13</sup>C 油气藏的成因机制探讨** 前面已提到塔里木盆地晚寒武世经历了具有全球等时性的冰期 SPICE 事件<sup>[9,38]</sup>, 此时几乎在每一个古大陆边缘等时海相地层中均记录了一次明显的碳酸盐岩稳定碳同位素  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值正向漂移. 与此同时, 王新强等<sup>[48]</sup> 研究发现  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值在时间和空间上均存在巨大变化, 并受母质来源及沉积环境的明显约束, 从前文(图 5 与图 8)中可以看出相应的有机质稳定碳同位素  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值也存在一定程度的正向漂移. 随着全球性的气候变化及海平面变化, 生物发育特征也有相应的变化<sup>[49-50]</sup>. 冰期时期主要有利于冷生物物种发育, 有关蓝细菌等微生物优势发育的报道前已论述<sup>[46-47]</sup>. 此外, 原油中检测出的芳基类异戊二烯烃也证实绿硫/紫硫藻发育<sup>[51]</sup>.

已有研究表明, 在相同条件下原核生物中蓝藻(蓝细菌)比相应的真核生物更加富集<sup>13</sup>C, 其富集程度达 3%~7%; 而绿硫藻类富集程度更大, 甚至比相同条件下发育的真核生物富集<sup>13</sup>C 可达 10% 以上<sup>[52]</sup>. 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(生烃母质)有机碳同位素组成<sup>[53-54]</sup>. 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%<sup>[54]</sup>. 由此看来, 若受控于冰期 SPICE 事件的冷生物物种优势发育, 则会使沉积有机质富集重碳同位素; 如果塔里木盆地台盆区 TD2(€), TZ62(S) 等原油来自上寒武统局部发育富集重碳同位素烃源岩的贡献, 则其富集<sup>13</sup>C 同位素的特征就可以得到合理的解释.

通过以上的讨论, 可以推测富集<sup>13</sup>C 的 TD2(€) 和 TZ62(S) 等原油可能来自塔里木盆地上寒武统局部发育富集重碳同位素烃源岩的贡献, 其受控于冰期 SPICE 事件中作为其生物母质的冷生物物种优势发育的结果.

## 4 结 论

塔里木盆地东部地区晚寒武世存在可全球性

对比的 SPICE 事件且具有有机/无机碳同位素组成协同正向漂移的特征, 该事件位于全球大气二氧化碳迅速降低的阶段, 可能与“冷事件”有关. 烃源岩有机质稳定碳同位素组成主要受到母质来源及沉积环境的影响, 这次全球性气候环境的剧烈波动很可能是造成塔里木盆地上、下寒武统烃源岩非均质性及生烃的初级生物母质转变的根本原因.

综合分析塔里木盆地台盆区烃源岩发育特征、有机质热演化程度以及生物发育特征等因素, 初步研究结果认为目前发现的 TD2(€) 和 TZ62(S) 等原油富集<sup>13</sup>C 同位素的成因可能是由于局部发育的富集重碳同位素的中-上寒武统烃源岩排烃、聚集、成藏的结果; 而成烃生物母质主要来自冷生物物种(比如蓝细菌等)的贡献, 其受控于冰期 SPICE 事件的约束. 目前勘探可能还未全部发现来自寒武系烃源岩的原油, 这些已发现的部分特殊油藏的成因仍亟待解决.

## 参考文献

- [1] Li D S, Liang D G, Jia C Z, et al. Hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, China. AAPG Bulletin, 1996, 80(10): 1587-1603.
- [2] Anderson T F, Arthur M A. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems// Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, et al. Stable Isotopes in Sedimentary Geology. Dallas, TX, USA: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1983: 1-151
- [3] Zhu M Y, Zhang J M, Li G X, et al. Evolution of C isotopes in the Cambrian of China: implications for Cambrian subdivision and trilobite mass extinctions. Geobios, 2004, 37(2): 287-301.
- [4] Peng S C, Babcock L, Robison R, et al. Global Standard Stratotype-section and Point (GSSP) of the Furongian Series and Paibian Stage (Cambrian). Lethaia, 2004, 37(4): 365-379.
- [5] Gill B C, Lyons T W, Young S A, et al. Geochemical evidence for widespread euxinia in the later Cambrian ocean. Nature, 2011, 469(7328): 80-83.
- [6] Saltzman M R, Runnegar B, Lohmann K C. Carbon

- isotope stratigraphy of Upper Cambrian (Steptoean Stage) sequences of the eastern Great Basin: Record of a global oceanographic event. *GSA Bulletin*, 1998, 110(3):285–297.
- [7] Hammer Ø, Svensen H H. Biostratigraphy and carbon and nitrogen geochemistry of the SPICE event in Cambrian low-grade metamorphic black shale, Southern Norway. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 468: 216–227.
- [8] Li D D, Zhang X L, Hu D P, et al. Evidence of a large  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  depth gradient for deep-water anoxia during the late Cambrian SPICE event. *Geology*, 2018, 46(7):631–634.
- [9] Liu H, Liao Z W, Zhang H Z, et al. Stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{ker}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ) distribution along a Cambrian outcrop section in the eastern Tarim Basin, NW China and its geochemical significance. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(1):163–170.
- [10] Saltzman M R, Young S A, Kump L R, et al. Pulse of atmospheric oxygen during the late Cambrian. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(10): 3876–3881.
- [11] 张水昌,王招明,王飞宇等.塔里木盆地塔东2油藏形成历史——原油稳定性与裂解作用实例研究.石油勘探与开发,2004,31(6):25–31.(Zhang S C, Wang Z M, Wang F Y, et al. Oil accumulation history in Tadong2 oil reservoir in Tarim Basin, NW China: a case study of oil stability and cracking. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(6): 25–31.)
- [12] Liu H, Liao Z W, Zhang H Z, et al. Comprehensive diagnostic review of the  $^{13}\text{C}$ -enriched crude oils exemplified by TD2E and TZ62S in Tarim Basin, NW China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2015, 34(1):62–68.
- [13] 肖中尧,黄光辉,卢玉红等.一个典型来源于寒武系源岩的古油藏—塔里木盆地塔中62井志留系古油藏成因分析//第十届全国有机地球化学学术会议.无锡,中国,2005:292–293.(Xiao Z Y, Huang G H, Lu Y H, et al. A typical ancient reservoir from Cambrian source rocks—genetic analysis of Silurian ancient reservoir in well TZ62, NW China//The 10<sup>th</sup> National Conference on Organic Geochemistry. Wuxi, China, 2005:292–293.)
- [14] 张水昌,赵文智,王飞宇等.塔里木盆地东部地区古生界原油裂解气成藏历史分析——以英南2气藏为例.天然气地球科学,2004,15(5):441–451.(Zhang S C, Zhao W Z, Wang F Y, et al. Paleozoic oil cracking gas accumulation history from eastern part of the Tarim basin—a case study of the YN2 gas reservoir. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(5):441–451.)
- [15] 马安来,金之钧,李婧婧等.塔中I号坡折带顺西区块顺7井油气地球化学特征及来源.石油与天然气地质,2012,33(6):828–835.(Ma A L, Jin Z J, Li J J, et al. Geochemical characteristics and origin of hydrocarbons in the well Shun-7 of western Shuntuoguole block, Tarim basin. *Oil and Gas Geology*, 2012, 33(6):828–835.)
- [16] 宋到福,王铁冠,李美俊等.和田河气田凝析油油源及油气成因关系判识.中国科学:地球科学,2015,45(7):941–952.(Song D F, Wang T G, Li M J, et al. Source of the condensates from the Hetianhe Field and the genetic relationship between the condensates and their associated gases. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(9):1566–1576.)
- [17] 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.石油勘探与开发,2017,44(6):997–1004.(Zhu X J, Chen J F, Wu J J, et al. Carbon isotopic compositions and origin of Paleozoic crude oil in the platform region of Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(6):997–1004.)
- [18] Huang H P, Zhang S C, Su J. Pyrolytically derived polycyclic aromatic hydrocarbons in marine oils from the Tarim Basin, NW China. *Energy & Fuels*, 2015, 29(9):5578–5586.
- [19] Tian Y K, Yang C P, Liao Z W, et al. Geochemical quantification of mixed marine oils from Tazhong area of Tarim Basin, NW China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 90–91: 96–106.
- [20] 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气藏的发现与勘探意义.中国石油勘探,2014,19(2):1–13.(Wang Z M, Xie H W, Chen Y Q, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 well in Tarim basin. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(2):1–13.)
- [21] Romanek C S, Grossman E L, Morse J W. Carbon isotopic fractionation in synthetic aragonite and

- calcite: effects of temperature and precipitation rate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(1): 419–430.
- [22] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 1999, 161(1–3): 59–88.
- [23] Hurtgen M T, Pruss S B, Knoll A H. Evaluating the relationship between the carbon and sulfur cycles in the later Cambrian ocean: an example from the Port au Port Group, western Newfoundland, Canada. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 281(3–4): 288–297.
- [24] Schmid S, Smith P M, Woltering M. A basin-wide record of the Late Cambrian Steptoean positive carbon isotope excursion (SPICE) in the Amadeus Basin, Australia. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2018, 508: 116–128.
- [25] LeRoy M A, Gill B C. Evidence for the development of local anoxia during the Cambrian SPICE event in eastern North America. *Geobiology*, 2019, 17(4): 381–400.
- [26] Pruss S B, Jones D S, Fike D A, et al. Marine anoxia and sedimentary mercury enrichments during the Late Cambrian SPICE event in northern Scotland. *Geology*, 2019, 47(5): 475–478.
- [27] Blakey R C. Gondwana paleogeography from assembly to breakup: a 500 m. y. odyssey. *Special Paper of the Geological Society of America*, 2008, 441: 1–28.
- [28] Gerhardt A M, Gill B C. Elucidating the relationship between the later Cambrian end: Marjuman extinctions and SPICE Event. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 461: 362–373.
- [29] Ng T W, Yuan J L, Lin J P. The North China Steptoean positive carbon isotope excursion and its global correlation with the base of the Paibian Stage (early Furongian Series), Cambrian. *Lethaia*, 2014, 47(2): 153–164.
- [30] Li Z X, Powell C M. An outline of the palaeogeographic evolution of the Australasian region since the beginning of the Neoproterozoic. *Earth - Science Reviews*, 2001, 53(3–4): 237–277.
- [31] Zhao P, Chen Y, Zhan S, et al. The Apparent Polar Wander Path of the Tarim block (NW China) since the Neoproterozoic and its implications for a long-term Tarim - Australia connection. *Precambrian Research*, 2014, 242: 39–57.
- [32] 张水昌, Wang R L, 金之钧等. 塔里木盆地寒武纪-奥陶纪优质烃源岩沉积与古环境变化的关系: 碳氧同位素新证据. *地质学报*, 2006, 80(3): 459–466. (Zhang S C, Wang R L, Jin Z J, et al. The relationship between the Cambrian-Ordovician high-TOC source rock development and paleoenvironment variations in the Tarim basin, western China: carbon and oxygen isotope evidence. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 459–466.)
- [33] Barili R, Neilson J E, Brasier A T, et al. Carbon isotopes, stratigraphy, and environmental change: the Middle - Upper Cambrian Positive Excursion (SPICE) in Port au Port Group, western Newfoundland, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2018, 55(11): 1209–1222.
- [34] Saltzman M R, Cowan C A, Runkel A C, et al. The Late Cambrian SPICE ( $\delta^{13}\text{C}$ ) event and the Sauk II-Sauk III regression: new evidence from Laurentian basins in Utah, Iowa, and Newfoundland. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74(3): 366–377.
- [35] Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M, et al. Paleozoic oil - source rock correlations in the Tarim basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(4): 273–286.
- [36] Huang H P, Zhang S C, Su J. Palaeozoic oil - source correlation in the Tarim Basin, NW China: A review. *Organic Geochemistry*, 2016, 94: 32–46.
- [37] 刘雁婷, 傅恒, 陈骥等. 塔里木盆地巴楚-塔中地区寒武系层序地层特征. *岩性油气藏*, 2010, 22(2): 48–53. (Liu Y T, Fu H, Chen J, et al. Sequence stratigraphy of Cambrian in Bachu - Tazhong area, Tarim Basin. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(2): 48–53.)
- [38] 樊茹, 邓胜徽, 张学磊. 寒武系碳同位素漂移事件的全局对比性分析. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(12): 1829–1839. (Fan R, Deng S H, Zhang X L. Significant carbon isotope excursions in the Cambrian and their implications for global correlations. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(11): 1686–1695.)
- [39] 高志前, 樊太亮, 李岩等. 塔里木盆地寒武系-奥陶系烃源岩发育模式及分布规律. *现代地质*, 2006, 20(1): 69–76. (Gao Z Q, Fan T L, Li Y, et al. Development pattern and distribution rule of source rock of Cambrian - Ordovician in Tarim Basin.



- Geoscience, 2006, 20(1): 69–76.)
- [40] 周瑞琦, 廖柯锦, 曲炳昌. 塔里木盆地上寒武统地震相及沉积相分析. 中国西部科技, 2011, 10(30): 12–13, 25. (Zhou R Q, Liao K J, Qu B C. Analysis of upper Cambrian seismic facies and sedimentary facies in Tarim Basin. Science and Technology of West China, 2011, 10(30): 12–13, 25.)
- [41] 云金表, 金之钧, 解国军. 塔里木盆地古生界主力烃源岩分布. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 827–838. (Yun J B, Jin Z J, Xie G J. Distribution of major hydrocarbon source rocks in the Lower Palaeozoic, Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 827–838.)
- [42] 张光亚, 刘伟, 张磊等. 塔里木克拉通寒武纪-奥陶纪原型盆地、岩相古地理与油气. 地学前缘, 2015, 22(3): 269–276. (Zhang G Y, Liu W, Zhang L, et al. Cambrian - Ordovician prototypic basin, paleo-geography and petroleum of Tarim Craton. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 269–276.)
- [43] 赵宗举, 罗家洪, 张运波等. 塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理. 石油学报, 2011, 32(6): 937–948. (Zhao Z J, Luo J H, Zhang Y B, et al. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 937–948.)
- [44] 刘玲, 朱井泉, 由雪莲等. 塔里木盆地柯坪地区中上寒武统白云岩沉积微相. 古地理学报, 2012, 14(1): 33–43. (Liu L, Zhu J Q, You X L, et al. Sedimentary microfacies of the Middle - Upper Cambrian dolostone in Keping area, Tarim Basin. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 33–43.)
- [45] 钱一雄, 陈代钊, 尤东华等. 塔东北库鲁克塔格地区中上寒武统白云岩类型与孔隙演化. 古地理学报, 2012, 14(4): 461–476. (Qian Y X, Chen D Z, You D H, et al. Types of dolostones and pore evolution of the Middle and Upper Cambrian in Kuruk Tag area of northeastern Tarim Basin. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(4): 461–476.)
- [46] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉. 塔里木盆地中上寒武统叠层石白云岩中微生物矿化组构特征及其成因意义. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1777–1790. (You X L, Sun S, Zhu J Q. Significance of fossilized microbes from the Cambrian stromatolites in the Tarim Basin, Northwest China. Science China Earth Sciences, 2014, 57(12): 2901–2913.)
- [47] 胡文瑄, 朱井泉, 王小林等. 塔里木盆地柯坪地区寒武系微生物白云岩特征、成因及意义. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 860–869. (Hu W X, Zhu J Q, Wang X L, et al. Characteristics, origin and geological implications of the Cambrian microbial dolomite in Keping area, Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 860–869.)
- [48] 王新强, 史晓颖, Jiang G Q 等. 华南埃迪卡拉纪-寒武纪过渡期的有机碳同位素梯度和海洋分层. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(6): 1142–1154. (Wang X Q, Shi X Y, Jiang G Q, et al. Organic carbon isotope gradient and ocean stratification across the late Ediacaran - Early Cambrian Yangtze Platform. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(5): 919–929.)
- [49] Stanley S M. Relation of Phanerozoic stable isotope excursions to climate, bacterial metabolism, and major extinctions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(45): 19185–19189.
- [50] Babcock L E, Peng S C, Brett C E, et al. Global climate, sea level cycles, and biotic events in the Cambrian Period. Palaeoworld, 2015, 24(1–2): 5–15.
- [51] 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. 新疆石油地质, 2004, 25(2): 215–218. (Sun Y G, Xiao Z Y, Xu S P, et al. Aryl - Isoprenoids in crude oil and its implication in geological exploration. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(2): 215–218.)
- [52] Close H G, Bovee R, Pearson A. Inverse carbon isotope patterns of lipids and kerogen record heterogeneous primary biomass. Geobiology, 2011, 9(3): 250–265.
- [53] Li S M, Amrani A, Pang X Q, et al. Origin and quantitative source assessment of deep oils in the Tazhong Uplift, Tarim Basin. Organic Geochemistry, 2015, 78: 1–22.
- [54] Gratzner 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. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(6): 1171–1186.

(责任编辑 吴劲薇)