https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.177



深层油气相态多样性成因与次生地球化学作用强度 评价:以塔里木盆地海相油气为例

朱光有1,李婧菲2,张志遥3

1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心,内蒙古呼和浩特 010013

3. 中国地质大学(武汉)资源学院,湖北武汉 430074

摘 要:塔里木盆地海相油气的地球化学性质与相态类型复杂多样,从一张油藏剖面上可以看到稠油、黑油、凝析油、天然气等共存.综合运用多种地球化学分析方法,获取了塔里木盆地深层海相油气的相态类型、次生作用过程等信息,通过对不同相态类型油气地球化学特征的对比研究,论证了海相油气遭受生物降解、气侵分馏、硫酸盐热化学还原反应(thermochemical sulfate reduction,TSR)、热裂解等次生地球化学作用的改造机制与过程;建立了基于硫代金刚烷、乙基降金刚烷等次生地球化学作用的产物对次生改造强度定量的评价参数公式,应用于油气性质与相态的定性预测,对于深层油气相态钻前预测具有一定的指导意义.

关键词: 生物降解; 气侵分馏; TSR; 热裂解; 超深层油藏; 塔里木盆地; 石油地质.
中图分类号: P618 文章编号: 1000-2383(2025)06-2163-16 收稿日期: 2022-10-14

Origin of Deep Oil and Gas Phase State Diversity and Evaluation of Secondary Geochemical Intensity: A Case Study of Marine Oil and Gas in Tarim Basin

Zhu Guangyou¹, Li Jingfei², Zhang Zhiyao³

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010013, China

3. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: The geochemical properties and phase types of marine oil and gas in Tarim basin are complex and diverse. Heavy oil, normal oil, condensate and natural gas coexist from a reservoir profile. By comprehensively applying various geochemical analysis methods, the information of phase types, components and stable isotopes of deep-seated Marine oil and gas in Tarim basin is obtained, and the geochemical characteristics of different phase types of oil and gas are compared, and demonstrate a variety of secondary geochemical mechanisms and processes such as biodegradation, gas invasion and fractionation, thermochemical sulfate reduction (TSR), and thermal cracking of marine oil and gas; And further the quantitative evaluation parameters formulae for the strength of secondary transformation based on the products of secondary geochemistry such as thiadiamondoids and ethanodiamondoids were established respectively, can be effectively used in the qualitative prediction of the spatial distribution of

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(Nos.2019B-04,2018A-0102).

作者简介:朱光有(1973-),男,教授,主要从事深层油气成藏与地球化学研究.ORCID:0000-0002-7282-6990.E-mail:zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

引用格式:朱光有,李婧菲,张志遥,2025.深层油气相态多样性成因与次生地球化学作用强度评价:以塔里木盆地海相油气为例.地球科学,50 (6):2163-2178.

Citation: Zhu Guangyou, Li Jingfei, Zhang Zhiyao, 2025. Origin of Deep Oil and Gas Phase State Diversity and Evaluation of Secondary Geochemical Intensity: A Case Study of Marine Oil and Gas in Tarim Basin. *Earth Science*, 50(6): 2163-2178.

oil and gas properties and phase behavior, the diversity of deep oil and gas phase formation mechanism and distribution of prediction before drilling and has certain theory and guiding significance.

Key words: biodegradation; gas invasion fractionation; TSR(sulfate thermochemical reduction); thermal cracking; ultra-deep oil reservoir; Tarim basin; petroleum geology.

0 引言

塔里木盆地台盆区海相碳酸盐岩地层富含油 气资源,其中以塔北和塔中隆起奥陶系为最主要的 勘探开发阵地.随着近年来勘探的纵向展开,发现 的油气藏相态类型越来越多,干气、凝析气、挥发 油、黑油和稠油等多种油气相态共存.油气成藏的 多期性与次生地球化学作用对油气性质与相态的 改造是造成油气相态多样性的主要原因(黄海平 等,2001),这些次生地球化学作用包括:生物降解、 气侵分馏、热化学硫酸盐还原作用(thermochemical sulfate reduction, TSR)和热裂解等(赵孟军等, 2001; Wang et al., 2006; 张水昌等, 2011; Zhang et al., 2024a; Zhu et al., 2019a; 马安来等, 2020). 其中,生物降解主要是细菌等厌氧生物对原油的降 解破坏作用(Jones et al., 2007),由于厌氧生物一般 在80℃以上就失去了活性,因此生物降解往往发生 在油藏埋藏较浅、温度较低的环境中(Larter et al., 2003). 气侵分馏主要发生在多期充注和天然气大量 生成和(或)运移的地区,包括蒸发分馏(Thompson, 1988)、气侵作用(Losh et al., 2002)及运移分馏 (Dzou and Hughes, 1993)在内的多种定义虽有所差 异,但均描述了油藏受外来天然气侵入后,油气性 质和相态的变化.TSR是烃类与地层中硫酸盐在高 温条件下发生的复杂反应,一般认为原油和天然气 发生 TSR 所需温度分别高于 120 ℃和 140 ℃. TSR 可产生大量的硫化氢和二氧化碳等酸性气体,同时 还形成硫代金刚烷等一系列指示性的含硫化合物 (Wei et al., 2011; Zhu et al., 2019a). 原油在深层高 温条件下受热应力作用改造,重组分逐渐裂解成轻 组分,最终形成大量甲烷和干沥青.在原油裂解过 程中,气油比超过临界值时将造成油相的逐渐消 失,引起相态的转变(Claypool and Mancini, 1989). 原油裂解气可形成大型天然气聚集(Zhou et al., 2019),也可向浅层油藏侵入造成油气性质与相态 的变化(Zhang et al., 2018).

全球勘探实践表明,在不同盆地或同一盆地的 不同地区往往以发生某一种或两种作用为主,而在

一个地区或一个油气藏剖面中存在上述所有次生 作用的情况则十分少见.塔里木盆地塔北一塔中地 区一张油气藏剖面中,既有生物降解的稠油油藏、 也有气侵分馏形成的次生凝析气藏,还有TSR形成 的高含硫化氢气藏、热裂解形成的干气气藏以及未 遭受次生改造、保存完好的超深层古油藏,油气性 质与相态之丰富,为油气相态多样性成因及次生地 球化学改造研究提供了绝佳的天然样本.前期研究 对于超深层油气成藏成因的多样性与复杂性已有 一定探讨(张钰等,2023;张泽等,2024; Zhang et al., 2024b; 朱光有等, 2025), 特别是万米深层石 油地质理论的提出(Zhu et al., 2023a),开辟了万米 深层勘探空间,引起高度关注.尤其在超深层油气 复杂成藏过程等方面取得了新突破,发现了超深层 超古老烃源岩并运用同位素揭示了优质烃源岩发 育机理(Zhu et al., 2021a, 2021b, 2022)、揭示了白云 岩化机理(Zhu et al., 2023b)并查明了万米深层优质 储层发育机制(Zhu et al., 2024)、超深层油气成藏机 理(Zhu et al., 2025)等,从生储盖等基本条件论证了 万米深层油气资源潜力和勘探领域,推动了万米深 井上钻,钻后证实了钻前的一系列预测.

对于超深层油气次生改造作用,已基本明确其 发生条件、作用过程及产物特征(Zhu et al.,2019a), 特别是在超深层资料达到一定丰富程度的前提下, 建立次生作用强度的评价方法有望实现.本文在前 期研究的基础上(Zhu et al.,2019a),基于大量油气 地球化学测试资料,深度解剖油气相态多样性的成 因机制,提出数种定量评价不同类型次生地球化学 作用强度的参数公式,为深层油气性质与相态预测 提供重要参考,为深层一超深层油气勘探提供可靠 依据.

1 石油地质概况与油气相态

塔里木盆地是中国面积最大的内陆含油气盆 地,面积为56×10⁴ km²,是古生界海相克拉通及中、 新生界陆相前陆盆地组成的典型叠合盆地,油气资 源丰富(Li et al.,2012).截至2019年底,已经发现油 气田44个,探明石油地质储量30亿吨,天然气2.2 万亿方,建成年产原油1300万吨、年产天然气250 亿方,是中国第三大油气生产基地.塔里木盆地周 边构造活动期次多、活动性强,使得塔里木板块构 造稳定性较差,造成相互叠合的不同时期盆地间发 生一系列重大的构造变革,早期的原型盆地面貌及 结构普遍受到后期构造运动的叠加改造,台盆区油 气藏具有多期成藏、多期调整以及同位聚集的特点 (赵靖舟等,2003;张水昌等,2004).

目前,在台盆区已发现了哈拉哈塘、轮古、塔 河、塔中、古城、顺南等30多个油气田,这些油气田 主要分布在塔北一塔中聚集带上(图1),这是目前 台盆区最主要的产油气区.其中,发现海相油气储 量最多的产层是奥陶系储层.奥陶系储层以碳酸盐 岩台地相沉积为主,包括台内滩亚相砂屑灰岩和云 质粒屑灰岩,台地边缘礁滩复合体;储集空间以次 生的溶蚀孔洞、裂缝为主,储集类型主要有缝洞型、 洞穴型、裂缝型;裂缝与溶蚀孔洞在三维空间相互 配置形成大型网络缝洞系统;碳酸盐岩储层沿潜山 面或层间不整合面大规模集中分布(孙崇浩等, 2016),纵向多层系、横向大连片,有效厚度150~ 200 m,有利区带面积超过20×10⁴ km²;储层之上的 泥岩、泥灰岩、致密灰岩或膏岩为有效盖层,与碳酸 盐岩缝洞系统构成良好的储盖组合(闫磊等,2020).

近年来,台盆区深层多种相态的油气藏不断被 发现,超稠油、稠油、黑油、挥发油、凝析油、天然气 等多类型共存,不同构造部位油气相态类型差异明 显(图1).其中更不乏一些有别于传统石油地质认 识的实例,例如在埋深近7000m处发现了大量生 物降解成因的稠油,在8000m深处发现了完好保 存的黑油等,其重要原因之一即是不同地区次生地 球化学作用类型与改造强度的明显差异.

2 样品与实验

本研究采集了塔里木盆地台盆区奥陶系不同



图 1 塔里木盆地塔中一塔北油气藏剖面图与相态图 Fig.1 Oil and gas reservoir profile and phase diagram of the Tazhong-Tabei area in the Tarim basin 图据Zhu *et al.*(2019a)

相态类型的油气藏的88件原油和46件天然气样品,样品主要来自中国石油探区,原油包括哈拉哈塘地区的稠油和黑油,轮古和塔中地区的黑油、挥发油、凝析油;天然气包括轮古和塔中地区的原油伴生气、挥发油伴生气和凝析气等.

全油色谱分析采用配备了 HP PONA 色谱柱的 Agilent 7890A 气 相 色 谱 仪,色 谱 柱 规 格 为 50.00 m×0.20 mm×0.50 μ m;色谱 - 质谱分析采 用连接有 Agilent 5975C 质量选择监测器的 Agilent 7890A 气相色谱仪,对于饱和烃和芳烃组分在分析 时分别采用 DB-1MS 和 HP-5MS 色谱柱,其规格均 为 60.00 m×0.32 mm×0.25 μ m;全二维色谱 - 飞 行时间质谱分析中双色谱分别采用 Petro 柱和 DB-17HT 柱作为一维和二维色谱柱,其规格分别为 50.00 m×0.20 mm×0.50 μ m和 3.00 m×0.10 mm× 0.10 μ m,质谱选用了 Leco 公司的 Pegasus 4D,通过 ChromaTOF软件极性化合物解译.天然气组分分 析采用Agilent 7890气相色谱仪,天然气单体碳同 位素分析采用Thermo Delta V Advantage同位素质 谱仪,测试精度小于±0.3‰.样品前处理及实验步 骤见文献(Zhu *et al.*,2019b, 2019c).

3 生物降解作用

3.1 塔北地区生物降解稠油地球化学特征与成因

哈拉哈塘北部及轮南低凸起西部地区原油密 度范围在0.8~1.0 g/cm³, 黏度多高于100 mm²/s, 胶 质+沥青质的含量大于15%, 原油密度与黏度(图 2a)、含硫量(图 2b)、胶质+沥青质含量(图 2c)呈现 正相关关系, 且与深度存在一定的正相关关系(图 2d). 流体包裹体与埋藏史分析认为, 哈拉哈塘北部 及轮南低凸起西部奥陶系储层在二叠纪晚期处于 低温浅埋阶段, 局部盖层受剥蚀作用影响, 封盖条



Fig.2 Physical properties of oil in Halahatang and Lunnan areas of the Tarim basin

件差,微生物活动活跃,原油遭受不同程度的生物 降解,导致密度、黏度、硫量、胶质和沥青质含量增 高;自三叠系沉积以来,该地区进入稳定沉降阶段, 埋深持续加大,在较低地温梯度下稠油未再叠加其 他类型地球化学改造作用,得以保存并逐渐形成了 现今的超深层稠油;同时有部分地区稠油接受了新 鲜原油的充注混入,形成兼具UCM (unresolved complex mixture)与完整正构烷烃序列的复杂原油.

3.2 生物降解作用及其强度评价

原油中不同族分化合物抵抗生物降解的能力 有所差异,在降解过程中依次序损耗,遭受严重生 物降解会造成规则甾烷含量降低、重排甾烷含量相 对富集,而藿烷系列转化为25-降藿烷系列(Seifert and Moldowan,1979),据此可将生物降解程度划分 为不同等级:轻微、中度、严重和剧烈(Connan, 1984).金刚烷类化合物比大多数石油中的碳氢化合 物具有更强的抗降解能力(尚培,2020),微生物降 解石油时金刚烷会发生相对富集,导致降解残余油 中金刚烷相对含量增高,利用金刚烷的比值也可以 很好地指示生物降解程度(Williams *et al.*,1986).

3.2.1 生物标志化合物评价参数 甾烷对生物降 解的敏感性随着碳数的增加而降低(敏感性排序: C₂₇>C₂₈>C₂₉>C₃₀)(Lin et al., 1989),因此被广泛 用于生物降解程度的分级(Zhang et al., 1988)和降 解原油的油源对比(Seifert et al., 1984). 重排甾烷具 有良好的抗生物降解性质,C27-C29甾烷会在重排 甾烷之前被完全破坏,甚至在甾烷和藿烷完全消失 的高度降解原油中,仍然存在重排甾烷的部分异构 体(Seifert and Moldowan, 1978). 根据原油密度将哈 拉哈塘北部及轮南低凸起西部地区原油划分为轻 质油、中质油、稠油和特稠油,从饱和烃气相色谱图 中可以看出原油中正构烷烃和类异戊二烯烷烃分 布具有规律性的变化:轮古15-2C特稠油的色谱基 线发生强烈隆起,可识别的峰消减,检测出含量较 高的25-降藿烷;轮古9稠油同样发生严重降解,不 可分辨的复杂混合物(UCM)明显,发现高含量的 25-降藿烷;而由热普4到富源1和跃满1,UCM越 来越不明显,色谱基线仅发生轻微隆起,25-降藿烷 含量也逐渐降低(图3).由此表明原油中检测出25-降藿烷通常意味着原油已经发生较严重的生物降 解,其含量越高代表生物降解程度越高,这一点同 样在世界范围的多个盆地已经被证实(Brooks and Welte, 1984).

3.2.2 金刚烷类评价参数 在大多数的生物降解 油中,金刚烷类化合物是在饱和烃中较为丰富的组 分之一, 金刚烷的分布在生物降解油中没有大的变 化,但其部分同系物由于抗生物降解能力的不同而 发生相对含量的变化,如甲基金刚烷(MA)比金刚 烷(A)的相对含量和甲基双金刚烷(MDA)比双金 刚烷(DA)的相对含量随生物降解程度的增加而逐 步增大,因此可以利用其进行生物降解程度评价 (Grice et al., 2000). 基于大量不同生物降解改造后 原油的分子化合物分析,结果表明,MA/A的值<6 指示没有发生生物降解:6<MA/A<9,相对应的降 解程度为轻微到中等:9<MA/A<15且正构烷烃 缺失,指示发生严重的生物降解;当MA/A>15时, 指示生物降解程度剧烈(Grice et al., 2000)(图 4). 选取哈拉哈塘地区原油进行研究,可以看出样品遭 受了不同程度的生物降解,其中MA/A的值变化比 较明显,而MDA/DA的值仅在剧烈生物降解的油 中发生明显变化.深层以及细菌作用强烈的环境 中,原油中生物标志物往往可能消耗较多,生标参 数使用受限,在这种情况下,MA/A可以很好的评 估原油生物降解程度(图4).

因此,原油中25-降藿烷的检出指示其发生了 严重的生物降解,其降解程度与25-降藿烷含量成 正比;在生物标志化合物失效的情况下,可以利用 甲基单金刚烷和金刚烷的比值进行评估,比值越 大,生物降解程度越高.

4 气侵分馏及强度评价

4.1 塔中及轮古东地区复杂相态油气的气侵成因

外来干气过量向油藏充注后引起的相分馏将 导致原油中轻质甚至中组分发生分馏损失,通常被 定义为气侵作用.正构烷烃损失量(Q值)是一种可 有效指示气侵强弱和方向的参数(Losh et al., 2002).塔中地区和塔北东部地区(轮古东)断裂体系 与不整合面发育程度较高,往往构成油气流体输导 的良好通道,前期研究已表明"早油晚气"的多期充 注特征导致该地区油气相变的发生(Zhang et al., 2018),而气侵的差异改造则加剧了油气相态分布 的复杂性,继而形成复杂相态油气藏.

4.2 气侵强度定量评价参数

国内外学者利用气侵过程中原油的正构烷烃 损失量、原油成熟度与碳同位素的变化等,对气侵 强度进行定量评价分析,获得了较好的评价效果.



图 3 哈拉哈塘北部及轮南低凸起西部地区原油样品的 TIC、m/z191 和 m/z177 质量色谱图

Fig.3 Mass chromatograms of TIC, m/z191 and m/z177 of oil samples in the northern part of Halahatang and the western part of Lunnan Low Uplift

随着研究的深入,金刚烷等分子化合物在气侵评价 中的作用也初见端倪.

4.2.1 正构烷烃损失量参数 在未遭受气侵分馏 改造的原油中,其正构烷烃摩尔浓度与碳数满足一定的指数关系,大量干气入侵会将原油中的轻质组 分溶解并带走,但对高碳数正构烷烃则影响较小 (Kissin, 1987).根据气侵后的高碳数正构烷烃摩尔 质量百分数可以建立气侵前原油正构烷烃百分浓 度的拟合直线,进而推算出气侵前原油的低碳数正

构烷烃质量百分数(Losh et al., 2002),已获得很广 泛的应用(杨楚鹏等, 2009; Miao et al., 2024).

 $Q=1-(\Sigma M_{nCi}(分析的原油)/\Sigma M_{nCi}(还原油样)),$ (1) 式(1)中:Q值为原油样品在遭受气侵分馏后的正构 烷烃损失量,nCi为摩尔数, M_{nCi} 是碳数为n的正构 烷烃质量百分数.

轮古东地区原油正构烷烃组成特征较好的体 现了干气气侵对原油组分组成的影响,由此方法计



算出强气侵区折点碳数为24~28,正构烷烃损失量 值为80%~95%;弱气侵区折点碳数为20~21,正 构烷烃损失量值为70%~80%;未气侵区折点碳数 为11~13,正构烷烃损失量值极低(图5).

4.2.2 碳同位素参数 当高成熟的干气侵入油藏时,油藏伴生气中的甲烷会受到较强的影响,造成甲烷碳同位素的增重,同时气油比和气体干燥系数也会增高(图 6a、6b).气体组分间的碳同位素的分异受热演化作用的影响较大,随着热演化程度的逐渐提高,天然气中各组分的碳同位素值逐渐增大.从图 6 中可以看出,凝析油的天然气甲烷碳同位素大于乙烷碳同位素,发生明显逆转,说明可能是接受了甲烷碳同位素偏重的外来干气的混入.同样,当外来干气入侵时也会导致甲一乙烷间单体碳同位素间的分异程度降低,甚至可能发生甲、乙碳同位素的反转.可以定义碳同位素间的分异参数进行气侵强度的判定:

$$\delta^{13}C_{C2-C1} = \delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1 \quad . \tag{2}$$

该参数值越高,代表油藏的气侵程度越高.轮 古东地区气侵强度自东向西逐渐减弱,可以观察 到,δ¹³ C_{C2-C1}的值由东向西逐渐增高、气油比自东向 西逐渐减弱(图 6c),反映了该地区气侵强度减弱的 方向.

4.2.3 金刚烷等分子化合物参数 台盆区气侵的 来源主要为深部原油裂解气,深层高温高压条件 下,天然气对原油组分具有较强的携带能力,在裂 解过程中,天然气将携带部分轻质组分以及原油裂 解过程中的次生产物(金刚烷和乙基降金刚烷等) 进入并富集在奥陶系原油中.选取台盆区奥陶系不 同相态油气藏的6个代表性原油样品,鉴别并定量 分析其化合物组成,发现气侵改造程度不同的原油 中所含有的化合物种类及含量也存在明显差异(图 7).3类原油均检测到正构烷烃、环烷烃、芳香烃等系 列化合物,但凝析油中检测到化合物的种类最为丰 富,尤其是金刚烷类等分子化合物最为富集,而随 着气侵强度的减弱,挥发油和黑油中的化合物种类 减少,含量明显降低.因此,金刚烷等分子化合物的 富集可以反映气侵持续改造奥陶系原油的结果.

综上所述,随着气侵增强,正构烷烃损失量和 甲烷、乙烷碳同位素间的分异值逐渐增大,原油中 的金刚烷含量、GOR、成熟度也逐渐增高.

5 热裂解作用及其强度评价

5.1 古城一顺南地区天然气地球化学特征

古城一顺南地区奥陶系气藏中发现大量裂解 成因的储层干沥青层(Zhou *et al.*,2019),此外,天然 气甲烷含量高、干燥系数高,也反映高熟干气的特 点,非烃气体主要是氮气和二氧化碳,天然气不含 硫化氢.整体来看, $\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$ 值随热成熟度的增大 而减小(图 8a), $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2=\delta^{13}C_1$ 呈现较好的负相 关关系(图 8b),天然气属于油裂解气(Zhou *et al.*, 2019),推测古城天然气的生成经历了两个阶段:早









Fig.6 Relationship between gas carbon isotope differentiation and gas invasion intensity parameters in the Lungu area

期古油藏裂解形成重烃气含量较高的油型裂解气; 温度逐步升高的条件下重烃气发生裂解生成甲 烷气。

5.2 原油裂解强度评价

对于原油裂解强度的判定,不同的学者提出了 不同的判识方法:Dahl et al.(1999)提出利用金刚烷 的浓度进行判定,通过4-+3-MD(4-甲基双金刚烷 与3-甲基双金刚烷)含量之和与其他生物标志物浓 度的相关关系进行裂解程度的计算及判定;Claypool and Mancini (1989)提出可以通过油气藏气油 比(GOR)有效地反应原油裂解程度;Hill et al. (2003)利用原油裂解过程中不同族组成及甲烷产 率的变化分析裂解程度.基于台盆区大量实例分 析,本研究采用GOR和金刚烷参数两种方法对原 油裂解程度进行定量评价.

5.2.1 GOR参数定量方法 GOR可用来判识原油 是否发生裂解,随着裂解程度的不断增强,大量原 油裂解成天然气,势必会引起油藏GOR的增高,因 此GOR对原油热裂解具有较好的响应.结合GOR 和金刚烷参数衡量原油裂解程度,1MA+1,3DMA (1甲基单金刚烷+1,3二甲基单金刚烷)、4-+3-MD、EA(乙基降金刚烷)都与GOR存在良好的相 关关系,可以看出塔北地区1MA+1,3DMA、 4-+3-MD和EA含量都随着GOR的增加显示略微 增高的趋势,而顺南地区的1MA+1,3DMA、 4-+3-MD、EA的含量都很高且有较高的GOR(图 9a~9c),指示该地区的原油裂解程度大于塔北地 区.Claypool and Mancini (1989)提出可以通过油气





转化率反应原油裂解程度 $(C_1(\%))$:

$$C_{1}(\%) = \frac{GOR}{GOR + 0.98 \times 10^{3}} \times 100, \qquad (3)$$

式(3)中, $C_1(\%$)代表原油转化为气体的转化率, 0.98为原油平均密度(20℃).从油气相态来看,当油 气转化率 $C_1(\%)$ 大于 62.5%、即GOR高于 1 600 m³/m³时,超过了地下油气混合物系能够保持 单一油相的最高气油比,将导致油相的逐渐消失与 气相的出现(图 9d),即随着裂解程度的增加GOR 增大,从而油气相态发生变化.根据该公式计算结 果,塔北地区的裂解程度相对较低,原油基本以黑 油为主,存在部分挥发油,顺南地区则发生大规模 的原油裂解.

5.2.2 金刚烷类化合物参数定量方法 在原油裂 解过程中,热稳定性较高的金刚烷类化合物不断富 集,是原油裂解的标志性化合物(Wei *et al.*,2007), 乙基降金刚烷(EA)的存在反映原油经历了严重裂 解和较高的热演化作用(Zhu *et al.*,2019b).一般情 况下,金刚烷含量和乙基降金刚烷含量与原油所经 历的热裂解程度成正相关关系,金刚烷含量越多, 原油裂解程度越高(Zhu *et al.*, 2019b).Dahl *et al.* (1999)提出根据4-+3-MD含量评估原油的裂解程 度($C_2(\%)$):

 $C_{2}(\%) = (1 - C_{o}/C_{c}) \times 100, \qquad (4)$

式(4)中,C₂(%)代表液态烃转化率,C₀代表未裂解 原油的4-+3-MD的含量(即:甲基双金刚烷基线 值),C₆代表同一来源的裂解原油中4-+3-MD的含 量.1MA+1,3DMA和4-+3-MD两参数是常用的 反映原油的裂解程度的参数,将之与EA含量做相 关性分析发现,1MA+1,3DMA和4-+3-MD均 和EA呈现正相关关系,指示在原油裂解过程中随 着裂解程度的增强金刚烷和乙基降金刚烷在原油 中富集;利用EAI(乙基单金刚烷指数值=1-乙基单 金刚烷/(1-乙基单金刚烷+2-乙基单金刚烷))和4-+3-MD相关关系反映原油裂解程度,图10c显示台 盆区4-+3-MD和的EAI呈现正相关关系,塔北地 区4-+3-MD值较低,整体变化不大,以保存较好 的正常原油为主;顺南地区4-+3-MD值较高,说







图 9 GOR 和金刚烷类化合物参数及原油裂解程度指数关系 Fig.9 The relationship between GOR and diamondoids parameters and crude oil cracking degree index

明该地区原油已发生大规模裂解.目前研究认为台 盆区奥陶系海相原油的双金刚烷基线在15×10⁻⁶左 右,原油中4-+3-MD含量超过15×10⁻⁶可能代表 原油混入了深部裂解产物,而液态烃转化率 500

400

300

200

100

0

 10^{4}

 10^{3}

 10^{2}

EA (10⁻⁶)





Fig.10 Discriminant diagram of oil cracking threshold

 $(C_2, \%)$ 和4-+3-MD含量呈现良好的趋势(图10d), 塔北地区4-+3-MD含量低,指示液态烃转化率低,裂 解程度较低,相态没有发生转变;顺南地区转化率高, 裂解程度较高,发生大规模原油裂解与相变.

TSR及其定量评价 6

塔中地区富H₂S油气藏地球化学特征 6.1

塔中地区遭受了不同程度的TSR改造,油气经 TSR改造后,原油含硫量增高、饱芳比降低、富集非 烃和沥青质,富集多种含

硫化合物,并产生大量的硫化氢和二氧化碳等 酸性气体.具体表现为:凝析油密度普遍高于 0.80 g/cm³,甚至高达0.88 g/cm³,检测到大量的含 硫化合物(硫醇、烷基四氢噻吩、烷基噻吩、烷基苯 并噻吩、二苯并噻吩与苯并萘并噻吩及多硫取代的 化合物(图11),天然气以干气为主,重烃气含量低, 富含H₂S.

6.2 TSR 的定量评价

TSR 改造的标志包括:较高的启动温度 (140℃)、高浓度的硫代金刚烷等含硫化合物及高 浓度的H₂S等.硫代金刚烷被称作是TSR的分子指 纹(Hanin et al., 2002; Wei, 2011), 具有与金刚烷相 同的结构,只是硫原子取代了金刚烷的桥头碳.常 用特征离子m/z168、182、196、210对塔中不同原油 中硫代单金刚烷进行检测,其分布特征和金刚烷类 似,随着笼数的增高,化合物含量降低.ZS1C样品为 典型的经历过强烈的TSR改造的凝析油(图12a), 在其中检测出多种含硫化合物,包括硫代金刚烷类 化合物、硫醇、烷基四氢噻吩、烷基噻吩、烷基苯并 噻吩、二苯并噻吩与苯并萘并噻吩及多硫取代的化 合物等多种类型(图11);受TSR改造相对较弱的

分类	名称	分子式	结构式	特征	代表井
-11	烷基硫醇	C_2H_6S	ня	稳定性最差,产生于TSR过程	ZS1C
硫醇	环烷硫醇	C ₆ H ₆ S	SH	稳定性最差,产生于TSR过程	ZS1C
噻吩	烷基噻吩	C4H7S	<u>_s</u>	稳定性差,原油中烷基噻吩稳定性优于噻吩	ZS1C
	烷基四氢噻吩	C_4H_8S	$\langle s \rangle$	稳定性低,TSR过程产生,很快被分解, 在H ₂ S存在的条件下可以高含量稳定存在	ZSIC
	苯并噻吩	C ₈ H ₆ S	Ct_st_R	稳定性低,其稳定性随烷基化程度增大而增大	ZS1C、ZG262、TZ62-1
	二苯并噻吩	C ₁₂ H ₈ S	() ^s ()	稳定性较高,可能来源于烃源岩或TSR	ZS1C、ZG262 TZ62-1、ZG12
	苯并萘并噻吩	$C_{16}H_{10}S$	CIS CI	稳定性较低,可能来源于烃源岩或TSR	ZS1C、ZG262
硫代金刚烷	硫代单金刚烷	C ₉ H ₁₆ S	Æ	稳定性很好,主要由TSR产生,随TSR程度增加, 硫代金刚烷含量增加	Z\$1C\ ZG262

图 11 塔中地区原油中含硫化合物种类及特征

Fig.11 Types and Characteristics of the Sulfur Compounds in the Oil samples in the Tazhong area

TZ102-9井和ZG292挥发油中分别检测出烷基苯并 噻吩、二苯并噻吩与硫代单金刚烷等化合物(图 12b、12c),含量少于ZS1C凝析油;而未受TSR改造 的ZG16-7原油仅检测到少量的二苯并噻吩化合物 (图 12d),种类和含量明显少于受过TSR改造过的 凝析油和挥发油.三类油样最明显的特征便是含硫 化合物含量的差异,强TSR改造后原油中硫代金刚 烷、硫醇、四氢噻吩等含硫化合物十分富集,而未受 改造的原油则具有很少的含硫化合物,这一趋势与 油藏伴生气的硫化氢含量一致,TSR改造越强,硫 化氢含量越高.

7 超深层油藏的保存

传统石油地质理论认为当成熟度越过"死亡 线"时,液态油相将不复存在,全部转化为气相,因 此深层油气勘探以找气为主.目前对液态石油的保 存下限虽有不同的认识,但一般认为门限深度在 6000 m(对应160°C)上下,超过该门限则主要为凝 析气藏或气藏或带有油环的凝析气藏,纯油藏相对 较少.最近,在塔里木盆地塔北隆起南坡奥陶系大 于8000 m的超深层储层中获得高产油气流,为未 发生原油裂解的纯油藏,对液态石油的勘探深度突 破传统认识.

塔里木盆地现今地温梯度在 2.0~2.2 °C/ 100 m,自5 Ma以来,盆地进入快速沉降阶段,上覆 地层厚度增加2000m以上,使古油藏达到现今最 大埋深(Zhu et al.,2019c).目前钻遇油层的最大埋 深分布在7500~8000m,对应的温度范围在160~ 170°C,根据高温裂解实验与热力学计算表明,台盆 区深层石油发生大规模裂解的温度要高达190~ 200°C,对应埋深应在9000~9500m(Zhu et al., 2012).当油藏埋深超过该深度后,由于原油持续裂 解成气,当气油比远超油气物系维持液相所需的气 油比时(一般认为在1000m³/m³左右),油气相态将 转变为以气相为主.而在目前的勘探深度段内 (<8000m),原油尚未达裂解温度条件,这也是超 深层原油完好保存的原因所在.因此,低地温梯度 和晚期快速深埋过程中时间与温度的补偿效应不 足,决定了原油裂解及由油相向气相转变所需的埋 深更大.

8 多相态油气的分布及预测

基于塔里木盆地台盆区油气次生地球化学作用的定量研究结果,台盆区不同区块内部油气次生改造作用形式、程度及产物差别很大,因此相对应的评价参数也不同,除了用以往的常规参数、正构烷烃损失量和生物标志化合物之外,一些新的化合物参数可以对次生地球化学作用起到很大的作用(表1).

通过对塔里木盆地次生地球化学作用程度的



图 12 塔中地区原油中含硫化合物种类与分布图 Fig.12 Types and distribution of sulfur compounds in oil in Tazhong area

- 农工 人工地场化于正用及工术计、正用机压、 初及厅川多	表1	次生地球化学作用发生条件。	、作用机理、	产物及评价参
-------------------------------	----	---------------	--------	--------

Table 1 The onset conditions, mechanism, products, and evaluation parameters of secondary geochemical process

次生作用类型	发生条件	作用机理	特征产物	最终产物	评价参数
生物降解作用	浅层、温度<80℃	细菌等生物对原油的降解 改造	沥青质	稠油、沥青质	25-降藿烷、MA/A>6
气侵作用	多期充注地区、大量 天然气生成	外来天然气侵入古油藏后 导致油气性质和油藏相态 发生变化	金刚烷、乙基降 金刚烷	天然气、轻质油	$Q > 40\% \delta^{13}Cc_2 c_1 < 0$
热裂解作用	深层高温	油藏受热力作用发生裂 解,导致原油的重组分裂 解成轻组分	甲烷、干沥青	干气、干沥青、焦 沥青-气田	4-+3-甲基双金刚烷含量 $C_1(\%)$ = $\frac{GOR}{GOR + 0.98 \times 10^3} \times 100\%$ $C_2(\%) = (1 - C_0/C_D) \times 100\%$
硫酸盐热化学还 原反应	含碳酸岩、温度> 140℃	烃类与地层中硫酸盐在温 度大于140℃时发生的复 杂反应	硫代金刚烷、含 硫化合物	硫化氢、二氧化 碳等酸性气体	高浓度的硫化氢、硫代金刚烷 $>30 \times 10^{-6}$

定量分析和分布范围研究,认为轮古东地区受侧向 气侵的影响,油藏相态复杂;在塔北隆起哈拉哈塘 地区由于埋藏较浅及低地温梯度,发生生物降解作 用,形成大量稠油,加上晚期快速埋的影响,深液态 石油的保存下限扩展至9500m,在南部斜坡区超深 层仍存在大量液态石油;塔中隆起晚期气侵过程充 分,说明深大断裂沟通了寒武系盐下的油气资源, 主要为经历了热裂解与TSR改造的凝析气藏与干 气藏;古城一顺南地区由于热液活动和高地温梯度 导致该地区发生了高温裂解作用,因此造就了在一 张油藏剖面上具有多种油气相态类型的特色.

9 结论

塔里木盆地下古生界油气性质与相态多样.油 气成藏后遭受了不同程度的生物降解、气侵分馏、 TSR、热裂解等次生地球化学作用的改造,复杂相 态油气与成藏后经历的抬升浅埋和后期深埋高温 高压过程有关,明确了油气相态多样性的成因机制.

建立了不同类型油气次生地球化学作用强度 的定量评价方法,利用原油中特殊化合物(金刚烷、 硫代金刚烷、乙基降金刚烷等)浓度等参数、同位素 等,建立生物降解、气侵分馏、热裂解及TSR作用强 度的定量分析方法和评价图版.明确了台盆区深层 油气相态类型及其分布特征.

致谢:感谢中国石油塔里木油田公司和中国石 化西北油田分公司提供的样品和生产测试资料.

References

- Brooks, J., Welte, D., 1984. Advances in Petroleum Geochemistry:Vol.1. Academic Press, London.
- Claypool, G., Mancini, E., 1989. Geochemical Relationships of Petroleum in Mesozoic Reservoirs to Carbonate Source Rocks of Jurassic Smackover Formation, South West Alabama. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 73:904-924.
- Connan, J.1984.Biodegradation of Crude Oils in Reservoirs.In: Brooks, J., Welte, D. H., eds., Advances in Petroleum Geochemistry.Academic Press, London, 298-335.
- Dahl, J. E., Moldowan, J. M., Peters, K. E., et al., 1999. Diamondoid Hydrocarbons as Indicators of Natural Oil Cracking. Nature, 399:54-57. https://doi.org/10.1038/ 19953
- Dzou, L.I.P., Hughes, W.B., 1993.Geochemistry of Oils and Condensates, K Field, Offshore Taiwan: A Case Study in Migration Fractionation. Organic Geochemistry, 20 (4): 437-462. https://doi.org/10.1016/0146 - 6380(93) 90092-p
- Grice, K., Alexander, R., Kagi, R.I., 2000.Diamondoid Hydrocarbon Ratios as Indicators of Biodegradation in Australian Crude Oils. Organic Geochemistry, 31(1): 67–73. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(99)00137-0
- Hanin, S., Adam, P., Kowalewski, I., et al., 2002. Bridgehead Alkylated 2-Thia-Adamantanes: Novel Markers for Sulfurisation Processes Occurring under High Thermal Stress in Deep Petroleum Reservoirs. *Chemical Communications*, (16): 1750–1751. https://doi. org/10.1039/ b203551k
- Hill, R. J., Tang, Y. C., Kaplan, I. R., 2003. Insights into Oil Cracking Based on Laboratory Experiments. Organic Geochemistry, 34(12): 1651-1672. https://doi. org/ 10.1016/S0146-6380(03)00173-6
- Huang, H.P., Zhang, S.C., Su, A.G., 2001.Geochemical Processes in Petroleum Migration and Accumulation.*Experimental Petroleum Geology*, 23(3): 278-284(in Chinese with English abstract).
- Jones, D.M., Head, I.M., Gray, N.D., et al., 2007.Crude-Oil Biodegradation via Methanogenesis in Subsurface Petroleum Reservoirs.Nature, 451:176-180.https://doi.org/ 10.1038/nature06484
- Kissin, Y. V., 1987. Catagenesis and Composition of Petroleum: Origin of n-Alkanes and Isoalkanes in Petroleum Crudes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51(9):2445– 2457.https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90296-1

- Larter, S., Wilhelms, A., Head, I., et al., 2003. The Controls on the Composition of Biodegraded Oils in the Deep Subsurface: Part 1: biodegradation Rates in Petroleum Reservoirs. *Organic Geochemistry*, 34(4):601-613. https: //doi.org/10.1016/s0146-6380(02)00240-1
- Li, S.M., Shi, Q., Pang, X.Q., et al., 2012. Origin of the Unusually High Dibenzothiophene Oils in Tazhong-4 Oilfield of Tarim Basin and Its Implication in Deep Petroleum Exploration. Organic Geochemistry, 48: 56-80. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.04.008
- Li, X., Zhu, G.Y., Zhang, Z.Y., 2024. Genesis of Ultra-Deep Dolostone and Controlling Factors of Large-Scale Reservoir: A Case Study of the Sinian Dengying Formation and the Cambrian Longwangmiao Formation in the Sichuan Basin. *Science China: Earth Sciences*, 67(7): 2352–2382. https://doi.org/10.1007/s11430-023-1301-x
- Lin, L.H., Michael, G.E., Kovachev, G., et al., 1989.Biodegradation of TarSand Bitumens from the Ardmore and Anadarko Basins, Carter County, Oklahoma. Organic Geochemistry, 14(5):511-523.https://doi.org/10.1016/ 0146-6380(89)90031-4
- Losh, S., Cathles, L., Meulbroek, P., 2002. Gas Washing of Oil along a Regional Transect, Offshore Louisiana. Organic Geochemistry, 33(6): 655-663. https://doi.org/ 10.1016/S0146-6380(02)00025-6
- Ma, A.L., Jin, Z.J., Li, H.L., et al., 2020. Secondary Alteration and Preservation of Ultra-Deep Ordovician Oil Reservoirs of North Shuntuoguole Area of Tarim Basin, NW China. *Earth Science*, 45(5): 1737-1753(in Chinese with English abstract).
- Miao, Q. Y., Xu, C. G., Hao, F., et al., 2024. Hydrocarbon Charging and Accumulation Process of the Large Bozhong19-6 Condensate Gas Reservoirs in the Southwestern Bozhong Sub-Basin, Bohai Bay Basin, China. Journal of Earth Science, 35(2): 613-630. https://doi.org/ 10.1007/s12583-021-1457-4
- Seifert, W. K., Moldowan, M. J., 1978. Applications of Steranes, Terpanes and Monoaromatics to the Maturation, Migration and Source of Crude Oils. *Geochimica et Cos*mochimica Acta, 42(1):77-95.https://doi.org/10.1016/ 0016-7037(78)90219-3
- Seifert, W.K., Michael Moldowan, J., 1979. The Effect of Biodegradation on Steranes and Terpanes in Crude Oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(1): 111-126. https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90051-6
- Seifert, W.K., Michael Moldowan, J., Demaison, G.J., 1984. Source Correlation of Biodegraded Oils. Organic Geochemistry, 6: 633-643. https://doi.org/10.1016/0146-6380(84)90085-8
- Shang, P., Chen, H. H., Hu, S.Z., et al., 2020. Geochemical Characteristics of Crude Oil and Hydrocarbon Accumula-

tion in the Ordovician of Yuqixi Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 45(3): 1013-1026(in Chinese with English abstract).

- Sun, C.H., Zhu, G.Y., Zheng, D.M., et al., 2016. Characteristics and Controlling Factors of Fracture-Cavity Carbonate Reservoirs in the Halahatang Area, Tarim Basin. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 35(5): 1028-1036 (in Chinese with English abstract).
- Thompson, K.F.M., 1988.Gas-Condensate Migration and Oil Fractionation in Deltaic Systems.*Marine and Petroleum Geology*, 5(3):237-246.https://doi.org/10.1016/0264-8172(88)90004-9
- Wang, Y.P., Zhang, S.C., Wang, F.Y., et al., 2006. Thermal Cracking History by Laboratory Kinetic Simulation of Paleozoic Oil in Eastern Tarim Basin, NW China, Implications for the Occurrence of Residual Oil Reservoirs. Organic Geochemistry, 37(12):1803–1815. https://doi.org/ 10.1016/j.orggeochem.2006.07.010
- Wei, Z. B., Mankiewicz, P., Walters, C., et al., 2011. Natural Occurrence of Higher Thiadiamondoids and Diamondoidthiols in a Deep Petroleum Reservoir in the Mobile Bay Gas Field. Organic Geochemistry, 42(2): 121-133. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2010.12.002
- Wei, Z.B., Moldowan, J.M., Zhang, S.C., et al., 2007.Diamondoid Hydrocarbons as a Molecular Proxy for Thermal Maturity and Oil cracking:Geochemical Models from Hydrous Pyrolysis. Organic Geochemistry, 38(2):227-249. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.09.011
- Williams, J.A., Bjorøy, M., Dolcater, D.L., et al., 1986.Biodegradation in South Texas Eocene Oils—Effects on Aromatics and Biomarkers. Organic Geochemistry, 10(1– 3): 451-461. https://doi. org/10.1016/0146 - 6380(86) 90045-8
- Yan, L., Yang, M., Zhang, J. L., et al., 2020. Distribution of Cambrian Source Rocks and Evaluation and Optimization of Favorable Zones in East Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(5):667-674(in Chinese with English abstract).
- Yang, C.P., Geng, A.S., Liao, Z.W., et al., 2009. Quantitative Evaluation of Gas Invasion in Tazhong Area of Tarim Basin. Science in China (Series D), 39(1): 51-60(in Chinese).
- Zhang, D. J., Huang, D. F., Li, J. C., 1988. Biodegraded Sequence of Karamay Oils and Semi-Quantitative Estimation of Their Biodegraded Degrees in Junggar Basin, China. Organic Geochemistry, 13(1-3): 295-302. https:// doi.org/10.1016/0146-6380(88)90048-4
- Zhang, S.C., Liang, D.G., Zhang, B.M., et al., 2004. Formation of Marine Oil and Gas in Tarim Basin.In:Jia, C.Z., ed., Tarim Basin Petroleum Geology and Exploration Series 7. Petroleum Industry Publishing House, Beijing,

299-344 (in Chinese).

- Zhang, S.C., Zhu, G.Y., He, K., 2011. The Effects of Thermochemical Sulfate Reduction on Occurrence of Oil-Cracking Gas and Reformation of Deep Carbonate Reservoir and the Interaction Mechanisms. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3):809-826(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Cao, Z.C., Chen, H.H., et al., 2023. Difference of Hydrocarbon Charging Events and Their Contribution Percentages to Ordovician Reservoirs among Strike-Slip Fault Belts in Shunbei Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 48(6): 2168-2188(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Yang, X.Z., Hao, F., et al., 2024. Fluid Inclusion Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Process in Lungu Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 49(7): 2407-2419(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Zhang, Y., Zhu, G., et al., 2024a. Multiphase Pools Caused by Gas Invasion in Deep Ordovician Carbonates from the Tazhong Area, Tarim Basin, China. AAPG Bulletin, 108(5): 817-848.. https://doi. org/10.1306/ 12212318282
- Zhang, Z., Zhu, G., Chen, W., et al., 2024b. Cryogenia -Cambrian Tectono-Sedimentary Evolution, Paleoclimate and Environment Effects, and Formation of Petroleum Resources in the Tarim Block. *Earth-Science Reviews*, 248: 104632. https://doi. org/10.1016/j. earscirev.2023.104632
- Zhang, Z.Y., Zhu, G.Y., Zhang, Y.J., et al., 2018. The Origin and Accumulation of Multi-Phase Reservoirs in the East Tabei Uplift, Tarim Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 98: 533-553. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.08.036
- Zhao, J.Z., Li, Q.M., 2003. Formation and Distribution of Oil and Gas Reservoirs in Tarim Basin. In: Jia, C.Z., ed., Tarim Basin petroleum Geology and exploration Series 8. Petroleum Industry Publishing House, Beijing, 191– 219 (in Chinese).
- Zhao, M.J., Zhang, S.C., Liao, Z.Q., 2001. The Cracking Gas from Crude Oil and Its Significance in Gas Exploration. *Petroleum Exploration and Development*, 28(4):47-49 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.X., Lü, X.X., Zhu, G.Y., et al., 2019.Origin and Formation of Deep and Superdeep Strata Gas from Gucheng-Shunnan Block of the Tarim Basin, NW China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 177: 361-373. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.02.059
- Zhu, G.Y., Hou, J.K., Ren, R., et al., 2025. Tectonic-Sedimentary Responses to Major Geological Events, Source Rock Formation Mechanisms, and Resource Potential at Depths Greater than 10 000 m in the Cratonic Basins of China. APG Bulletin, 109(4): 497-544.https://doi.org/ 10.1306/03182523116

- Zhu, G.Y., Jiang, H., Huang, S.P., et al., 2025. New Progress of Marine Hydrocarbon Accumulation Theory and Prediction of Super Large Oil and Gas Areas in Deep Strata Buried at a Depth of about 10 000 Meters in China. Acta Petrolei Sinica, 46(4): 816-842(in Chinese with English abstract).
- Zhu, G.Y., Li, T.T., Zhang, Z.Y., et al., 2022. Nitrogen Isotope Evidence for Oxygenated Upper Ocean during the Cryogenian Interglacial Period. *Chemical Geology*, 604: 120929. https://doi. org/10.1016/j. chemgeo.2022.120929
- Zhu, G.Y., Wang, P.J., Li, T.T., et al., 2021a. Nitrogen Geochemistry and Abnormal Mercury Enrichment of Shales from the Lowermost Cambrian Niutitang Formation in South China: Implications for the Marine Redox Conditions and Hydrothermal Activity. *Global and Planetary Change*, 199: 103449. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103449
- Zhu, G.Y., Li, T.T., Zhao, K., et al., 2021b. Mo Isotope Records from Lower Cambrian Black Shales, Northwestern Tarim Basin (China): Implications for the Early Cambrian Ocean. GSA Bulletin, 134(1-2): 3-14. https://doi. org/10.1130/b35726.1
- Zhu, G.Y., Zhang, Z.Y., Jiang, H., et al., 2023a. Evolution of the Cryogenian Cratonic Basins in China, Paleo-Oceanic Environment and Hydrocarbon Generation Mechanism of Ancient Source Rocks, and Exploration Potential in 1 000 m-Deep Strata. *Earth-Science Reviews*, 244: 104506. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104506
- Zhu, G.Y., Li, X., Li, T.T., et al., 2023b.Genesis Mechanism and Mg Isotope Difference between the Sinian and Cambrian Dolomites in Tarim Basin.Science China *Earth Sciences*, 66(2): 334–357.https://doi.org/10.1007/s11430-021-1010-6
- Zhu, G. Y., Li, X., Zhao, B., et al., 2024. Genesis and Reservoir Preservation Mechanism of 10 000 m Ultradeep Dolomite in Chinese Craton Basin. Deep Underground Science and Engineering,: dug2.12112. https://doi.org/ 10.1002/dug2.12112
- Zhu, G.Y., Zhang, S.C., Su, J., et al., 2012. The Occurrence of Ultra-Deep Heavy Oils in the Tabei Uplift of the Tarim Basin, NW China. Organic Geochemistry, 52:88-102. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.08.012
- Zhu, G.Y., Zhang, Z.Y., Zhou, X.X., et al., 2019a. The Complexity, Secondary Geochemical Process, Genetic Mechanism and Distribution Prediction of Deep Marine Oil and Gas in the Tarim Basin, China. Earth-Science Re-

views, 198: 102930. https://doi. org/10.1016/j. earscirev.2019.102930

- Zhu, G.Y., Zhang, Z.Y., Milkov, A.V., et al., 2019b.Diamondoids as Tracers of Late Gas Charge in Oil Reservoirs: Example from the Tazhong Area, Tarim Basin, China. *Fuel*, 253: 998-1017. https://doi. org/10.1016/j. fuel.2019.05.030
- Zhu, G. Y., Milkov, A. V., Zhang, Z. Y., et al., 2019c. Formation and Preservation of a Giant Petroleum Accumulation in Superdeep Carbonate Reservoirs in the Southern Halahatang Oil Field Area, Tarim Basin, China. AAPG Bulletin, 103(7): 1703-1743. https://doi.org/10.1306/ 11211817132

中文参考文献

- 黄海平,张水昌,苏爱国,2001.油气运移聚集过程中的地球 化学作用.石油实验地质,23(3):278-284.
- 马安来,金之钧,李慧莉,等,2020.塔里木盆地顺北地区奥陶 系超深层油藏蚀变作用及保存.地球科学,45(5): 1737-1753.
- 尚培,陈红汉,胡守志,等,2020.塔里木盆地于奇西地区奥陶 系原油特征及油气充注过程.地球科学,45(3):1013-1026.
- 孙崇浩,朱光有,郑多明,等,2016.塔里木盆地哈拉哈塘地区 超深碳酸盐岩缝洞型储集层特征与控制因素.矿物岩 石地球化学通报,35(5):1028-1036.
- 闫磊,杨敏,张君龙,等,2020.塔里木盆地塔东地区寒武系烃 源岩分布及有利区带评价优选.天然气地球科学,31 (5):667-674.
- 杨楚鹏, 耿安松, 廖泽文, 等, 2009. 塔里木盆地塔中地区油藏 气侵定量评价. 中国科学(D辑:), 39(1): 51-60.
- 张水昌,梁狄刚,张宝民,等,2004.塔里木盆地海相油气的 生成.见:贾承造,主编.塔里木盆地石油地质与勘探丛 书(卷七).北京:石油工业出版社,299-344.
- 张水昌,朱光有,何坤,2011.硫酸盐热化学还原作用对原油 裂解成气和碳酸盐岩储层改造的影响及作用机制.岩 石学报,27(3):809-826.
- 张钰,曹自成,陈红汉,等,2023.顺北地区不同走滑断裂带奥 陶系油气成藏期次及其贡献度差异性.地球科学,48 (6):2168-2188.
- 张泽,杨宪彰,郝芳,等,2024.塔里木盆地轮古地区流体包裹 体特征与油气成藏过程.地球科学,49(7):2407-2419.
- 赵靖舟,李启明,2003.塔里木盆地油气藏形成与分布规律. 见:贾承造,主编.塔里木盆地石油地质与勘探丛书(卷 八).北京:石油工业出版社,191-219.
- 赵孟军,张水昌,廖志勤,2001.原油裂解气在天然气勘探中 的意义.石油勘探与开发,28(4):47-49.
- 朱光有,姜华,黄士鹏,等,2025.中国海相油气成藏理论新进展与万米深层超大型油气区预测.石油学报,46(4): 816-842.