

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.223



层序地层格架下烃源岩地球化学研究： 以尼日尔 Termit 盆地为例

李美俊^{1,2}, 赖洪飞², 毛凤军³, 刘计国³, 肖洪², 唐友军¹

1. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 长江大学资源与环境学院, 湖北武汉 430100

2. 油气资源与探测国家重点实验室, 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要:如何利用有限的烃源岩样品的实验分析数据和地质资料尽可能地提高烃源岩评价和预测的精度,是当今烃源岩地球化学研究亟需解决的问题。采用层序地层学与油气地球化学相结合的方法,研究了非洲尼日尔 Termit 盆地基于层序地层格架下,上白垩统 Yogou 组烃源岩空间分布特征及有机质地球化学性质,初步展示了层序地层格架下烃源岩地球化学研究的方法、应用效果及优势。Termit 盆地上白垩统 Yogou 组海相泥页岩是该盆地主要的烃源层,自下而上可划分为 YSQ1、YSQ2 和 YSQ3 共 3 个三级层序。根据层序/体系域发育特征、岩性录井和测井曲线响应特征,识别出外陆棚、内陆棚、三角洲、滨岸相泥岩及煤/炭质泥岩共 5 种不同沉积类型的烃源岩,不同层序与体系域具有不同的烃源岩纵向叠置关系和横向分布特征。不同类型的烃源岩有机质具有明显不同的地球化学性质;外陆棚和内陆棚泥岩有机质丰度中等—好,有机质生物来源中,低等水生生物贡献高,沉积于偏还原的沉积环境。滨岸和三角洲相泥岩有机质丰度高,具有低等水生生物和高等植物来源的双重贡献,沉积于偏氧化的沉积环境。三级层序或其体系域控制下的沉积相分布和演化导致不同类型烃源岩的发育和横向分布特征,同一沉积相类型的烃源岩具有相似的地球化学性质。与传统的以组、段为单元的烃源岩地球化学研究相比,层序地层格架下的烃源岩评价可以刻画不同层序、不同体系域和沉积相带烃源岩有机质地球化学性质的差异,提高资源评价和油—源对比的精度。
关键词:烃源岩评价;层序地层格架;地球化学性质;Termit 盆地;中西非裂谷系;石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2018)10-3603-13

收稿日期: 2018-04-02

Geochemical Assessment of Source Rock within a Stratigraphic Geochemical Framework: Taking Termit Basin (Niger) as an Example

Li Meijun^{1,2}, Lai Hongfei², Mao Fengjun³, Liu Jiguo³, Xiao Hong², Tang Youjun¹

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract: How to improve the accuracy of source rock evaluation and prediction based on limited source rock samples data and geological data is a key problem that needs to be solved in the study of source rock geochemistry. By using sequence stratigraphy and petroleum organic geochemistry, this paper studies the spatial distribution and geochemical nature of source rocks of Upper Cretaceous Yogou Formation in the Termit Basin, Niger. This case study preliminarily exhibits the method, application and advantages of geochemical sequence stratigraphy. The main source beds in the Termit Basin are the marine mudstones of the Upper Cretaceous Yogou Formation, which can be divided into three third-order sequences, namely, YSQ1, YSQ2 and YSQ3 from the bottom to the top. Five types of source rocks with different sedimentary facies were subdivided on the basis of se-

基金项目:国家自然科学基金项目(No.4187030080);油气资源与探测国家重点实验室自主研究课题(No.PRP/indep-2-1402).

作者简介:李美俊(1972—),男,教授,博士,主要从事有机地球化学、油气地球化学研究。ORCID: 0000-0002-7141-6068. E-mail: meijunli@cup.edu.cn

引用格式:李美俊,赖洪飞,毛凤军,等,2018.层序地层格架下烃源岩地球化学研究:以尼日尔 Termit 盆地为例.地球科学,43(10):3603-3615.

quence/systems tracts, lithology and loggings, which include the lower offshore, upper offshore mudstones, delta and shoreface mudstones, coal seams/carbonaceous mudstones. Different sequences and systems tracts have different vertical and areal distribution patterns of these five source rock types. The organic matters from different source rocks have distinctly different geochemical characteristics. Lower and upper offshore mudstones have fair to good hydrocarbon generative potential with more contribution of lower aquatic organisms, depositing in relatively reducing environment. While delta and shoreface mudstones have good to excellent organic carbon abundances with organic matter input of both lower aquatic organisms and terrestrial organic matter, which deposited in oxidizing environment. The occurrence and lateral distribution of different types of source rocks are evidently controlled by the sedimentary facies distribution and evolution within the third-order sequences or systems tracts, and the same type of source rocks has similar geochemical characteristics. Compared with conventional source rock geochemical assessment, geochemical sequence stratigraphy can provide a practical framework to describe the detailed geochemical characteristics of different sequences, systems tracts and depositional facies within a formation or a member, and subsequently improve the accuracy of hydrocarbon resources assessment and oil-source correlation.

Key words: source rock assessment; sequence stratigraphic framework; geochemical characteristics; Termit Basin; Central-West Africa Rift System; petroleum geology.

传统的烃源岩地球化学研究大都以统、组或段为地层单元,基于一定数量地质样品地球化学实验数据的统计结果,来评价有机质丰度、类型、成熟度,描述可溶有机质的分子地球化学特征(Hunt, 1979; Tissot and Welte, 1984; 李浩等, 2017; 刘一茗等, 2017; 候庆杰等, 2018)。烃源岩评价精度明显受限于取样井分布、代表性地质样品数量、地层横向相变、剖面分布的非均质性等因素。对于海外和海域含油气盆地取样成本高、地质样品少、代表性样品缺乏的情况,如何根据有限的烃源岩样品的实验分析数据和地质资料来尽可能地提高烃源岩评价和预测的精度,是当今烃源岩地球化学研究亟需解决的关键问题。20 世纪 90 年代以来,随着层序地层学在油气勘探工作中的广泛应用,国内外众多地球化学和沉积学专家学者,开始进行层序地层格架下烃源岩地球化学方面的研究(Creaney and Passey, 1993; Robinson *et al.*, 1996; Bombardiere and Gorin, 2000; Peters *et al.*, 2000; 李思田, 2000; 刘洛夫等, 2002; 李美俊和周东升, 2003; 李美俊等, 2005; 赵彦德等, 2008; Jin *et al.*, 2015; 赖洪飞等, 2018)。基于层序地层格架的烃源岩地球化学研究,充分结合了层序地层学在烃源岩空间分布预测和油气地球化学研究在烃源岩有机质性质表征方面的优势,能更准确地评价和预测烃源岩的空间分布及其有机地球化学性质、开展基于层序地层格架的成藏要素分析和含油气系统研究。此外,烃源岩的形成与层序地层的沉积与演化密切相关,层序地层格架下烃源岩地球化学研究不仅能提高烃源岩评价的精度,还能恢复烃源岩发育和有机质沉积的古地理条件(Bohacs *et al.*, 2000; Peters *et al.*, 2000; Fleck *et al.*, 2002; Frim-

mel *et al.*, 2004; Lai *et al.*, 2018),在烃源岩沉积过程和有机质聚集研究方面具有广阔的应用前景。在实际地质工作中,层序地层格架下的烃源岩预测和地球化学评价的工作思路和步骤如图 1 所示。

研究区 Termit 盆地位于尼日尔共和国东南部,是中西非裂谷系西北分支中最大的中—新生代富油气沉积盆地(Genik, 1992, 1993)(图 2),目前在该盆地发现的油气主要来自上白垩统 Yogou 组海相泥质烃源岩(Harouna and Philp, 2012; Wan *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015)。而晚白垩世时期(100 ~ 72 Ma),Termit 盆地经历了一期完整的大规模海侵—海退地质事件(Genik, 1992, 1993; Guiraud *et al.*, 2005),全球海平面的升降变化和盆地的层序

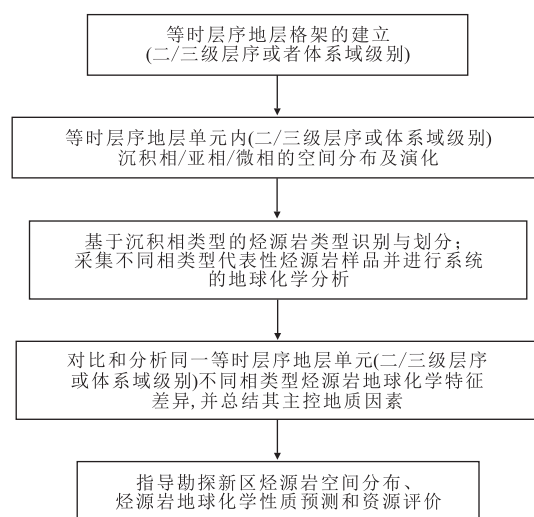


图 1 层序地层格架下烃源岩地球化学研究流程

Fig. 1 Workflow of geochemical studies of source rocks within a sequence stratigraphic framework

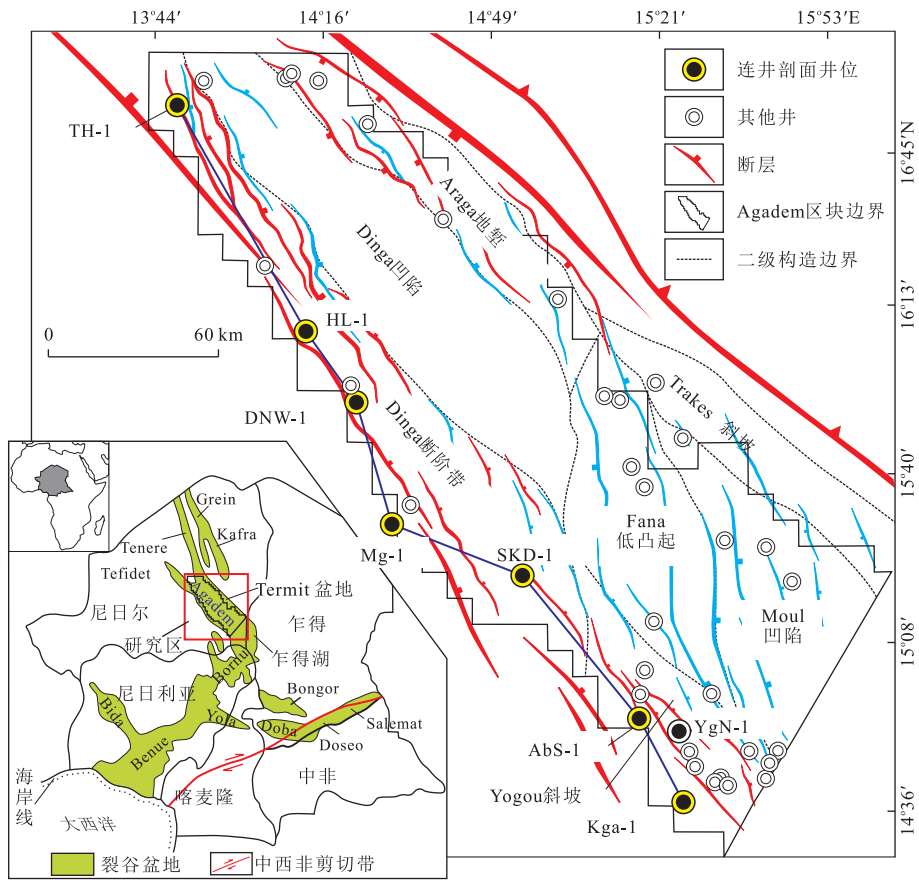


图 2 Termit 盆地地理位置及断层分布

Fig.2 Geographical location and faults distribution of the Termit Basin, Niger
据赖洪飞等(2018)修改

充填方式明显控制了有机质的沉积环境和聚集方式 (Lai *et al.*, 2018), 使得潜在烃源岩的空间分布及其地球化学性质在垂向和横向上均表现出较强烈的非均质性 (Liu *et al.*, 2015; 汤望新等, 2017; 赖洪飞等, 2018). Termit 盆地主力烃源层 (Yogou 组) 内部强烈的非均质性、地质样品数量有限等问题同样是制约该区烃源层空间分布和地球化学特征研究的主要因素. 本文以尼日尔 Termit 盆地上白垩统 Yogou 组为例, 分析层序地层格架下烃源岩的发育、分布及其地球化学特征, 以论述层序地层格架下烃源岩地球化学研究在烃源岩评价等油气勘探研究工作中的具体应用及前景.

1 地质背景

尼日尔 Termit 盆地隶属于中西非裂谷系统, 形成于早白垩世大西洋张开的构造背景下, 是在前寒武系—侏罗系浅变质岩基底之上发育的, 沿北西—南东向呈狭长条带状展布的中、新生代裂谷盆地

(Genik, 1992; 刘邦等, 2012). Termit 盆地北接 Tefidet、Tenere 盆地, 南邻 Beneue 海槽北端的 Bornu 盆地, 短轴方向 (NE-SW 向) 宽为 60~100 km, 长轴方向 (NW-SE 向) 长约为 300 km, 总面积约为 $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 2) (Genik, 1992; 刘邦等, 2012; 赖洪飞等, 2018). 该盆地的沉积地层厚度可达 10 000 m, 从老到新可划分为: 下白垩统、上白垩统、古近系、新近系和第四系 (赖洪飞等, 2018).

早白垩世时期盆地发生初始裂陷, 形成一系列 NW-SE 向的断裂体系, 充填了下白垩统数千米厚的陆相沉积物 (Genik, 1992, 1993; 吕明胜等, 2012). 晚白垩世时期, Termit 盆地在区域性热沉降的背景下发生了大规模海侵—海退地质事件, 大西洋和特提斯洋的海水分别沿着西南部的 Benue 海槽和北部的阿尔及利亚方向侵入和退出 Termit 盆地及周边地区, 沉积了巨厚层状的上白垩统海相碎屑岩 (Genik, 1992, 1993; Guiraud *et al.*, 2005). 上白垩统自下而上可划分为 Donga 组、Yogou 组和 Madama 组, 其中 Donga 组和 Yogou 组以巨厚的海相泥页岩

为主,是盆地最重要的潜在烃源层;Madama 组主要为海水退出盆地时沉积的厚层状辫状河三角洲相粗粒砂岩.古近纪—新近纪时期,Termit 盆地进入了叠加裂谷发育阶段,以陆相沉积为主.古近系由老到新又可划分为 Sokor-1 组和 Sokor-2 组,其中 Sokor-1 组的三角洲砂体是该盆地已发现油气的主要储集体,而 Sokor-2 组区域性分布的厚层泥岩则是主要的盖层(刘邦等,2012;吕明胜等,2015;王振升等,2016;刘若涵等,2017).

Termit 盆地已经证实的含油气系统有两套,分别是 Sokor-Yogou(!)含油气系统和 Sokor-Sokor(!)含油气系统(Genik,1993).上白垩统 Yogou 组

中、下部以厚层海相泥页岩为主,上部则主要为薄—中厚层海陆过渡相砂泥岩间互沉积(Liu *et al.*, 2015;王振升等,2016;赖洪飞等,2018),是 Sokor-Yogou(!)含油气系统的主力烃源层,目前在该盆地发现的绝大部分原油均来自该套含油气系统(Genik,1993;Wan *et al.*,2014;吕明胜等,2015;Liu *et al.*,2017;周立宏等,2017),显示了上白垩统 Yogou 组具有较大的生烃潜力.

2 层序地层格架

区域不整合是进行层序地层识别和划分的重要

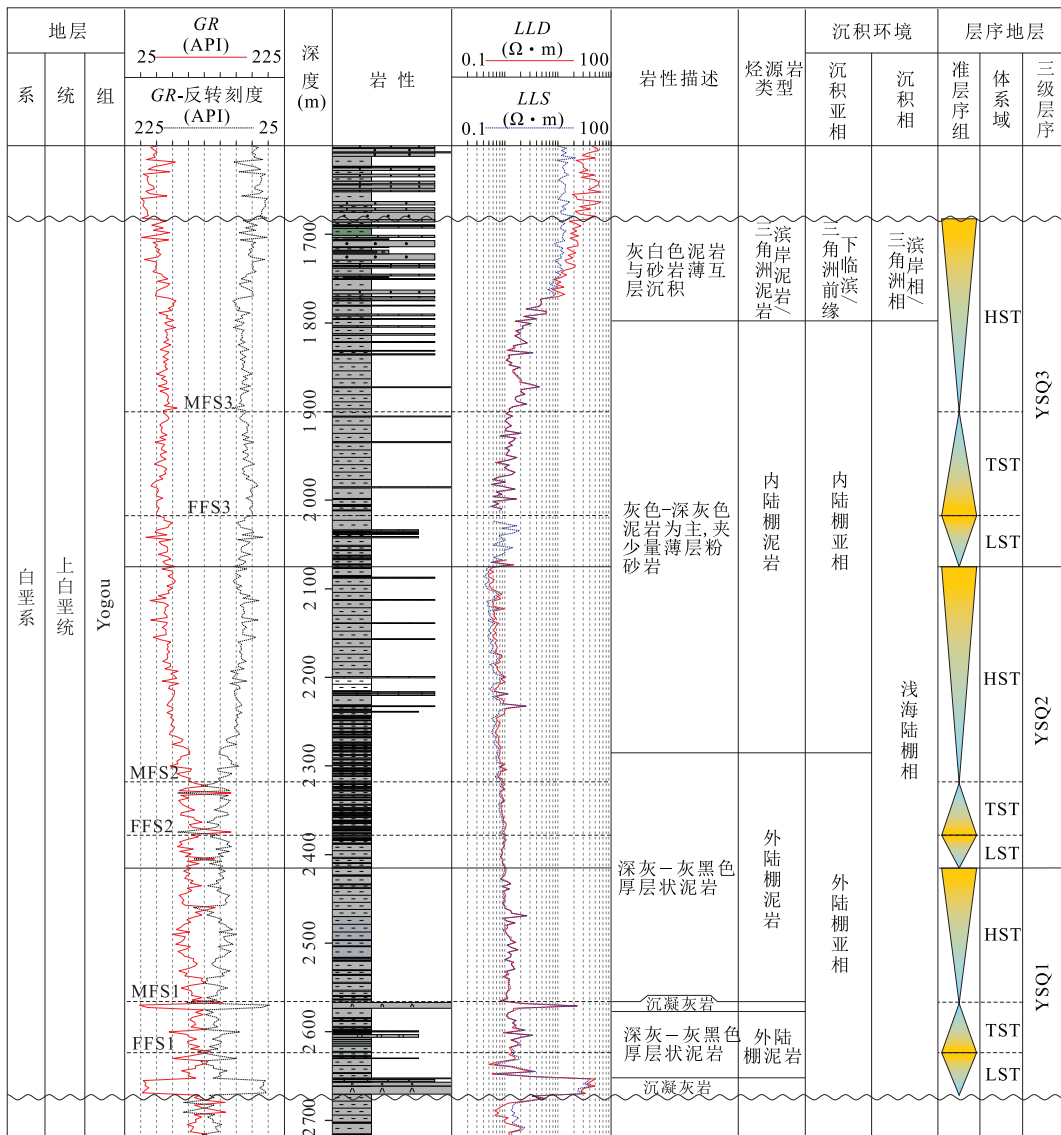


图 3 Termit 盆地 Yogou 组层序及体系域的岩性岩相组成及其测井响应特征(Mg-1 井)

Fig.3 Characteristics of lithology, sedimentary facies and their logging responses of the third-order sequences and systems tracts therein of the Yogou Formation in the Termit Basin (Well Mg-1)

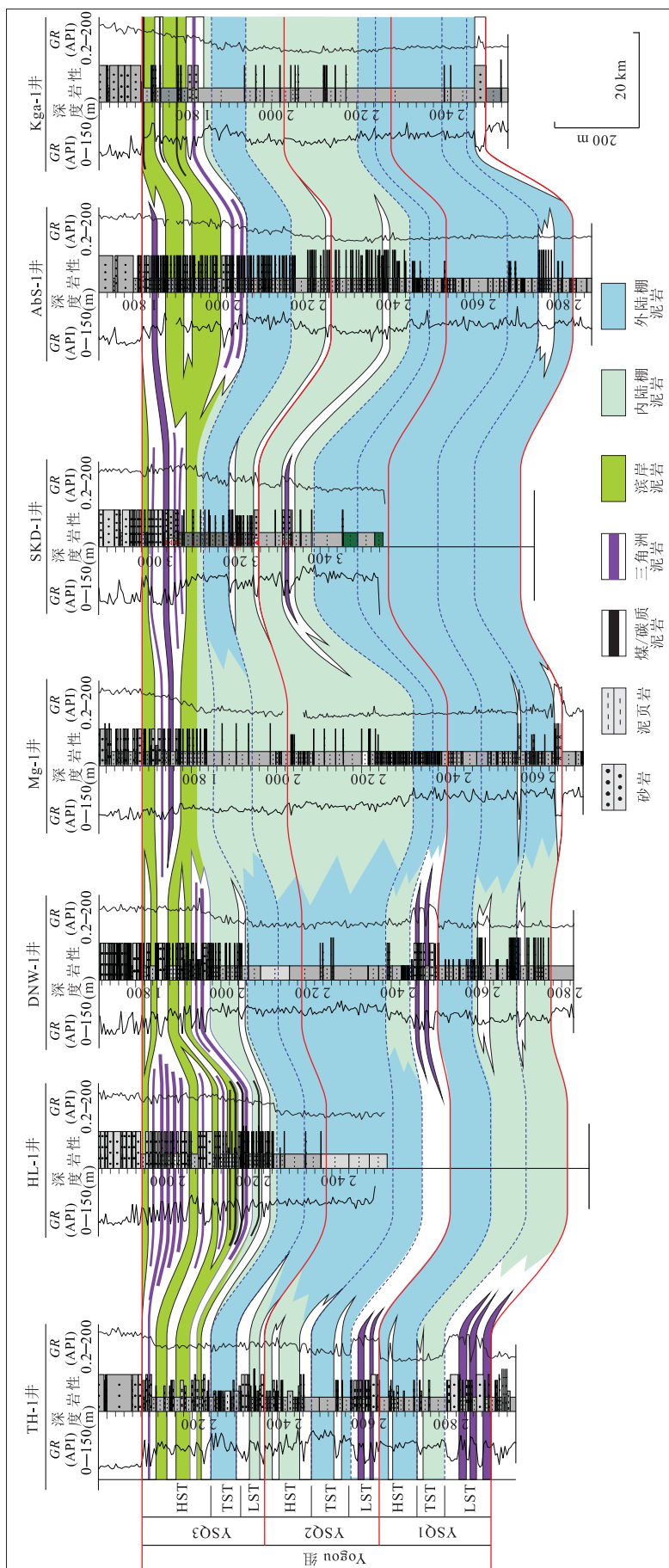


图4 Termit盆地西侧斜坡Yogou组层序地层格架下不同类型烃源岩分布

Fig.4 Distribution of different sets of source rocks within the sequence stratigraphic framework of the Yogou Formation in the western slope area of Termit Basin

依据之一 (Van Wagoner *et al.*, 1990; 李绍虎等, 2017). 前人的研究成果表明 Termit 盆地共发育 4 套重要的区域性不整合, 即白垩系/前侏罗系—寒武系(基底)、上白垩统/下白垩统、古近系/上白垩统和古近系/新近系不整合, 并可以此为依据划分为 4 个二级层序: TS1、TS2、TS3 和 TS4, 分别对应于下白垩统、上白垩统、古新—渐新统和新近—第四系 (Lai *et al.*, 2018). 上白垩统 Yogou 组隶属于 TS2 二级层序, 根据地震、钻测井资料又可在 Yogou 组内部划分出 3 个三级层序, 自下而上分别命名为 YSQ1、YSQ2 和 YSQ3 (汤戈等, 2015; 王振升等, 2016; Lai *et al.*, 2018).

以盆地西侧的 Mg-1 井为例, 根据上述的三级层序划分方案以及该井实际的岩性录井和测井曲线响应特征, 可以很容易地在 Yogou 组内部识别出 YSQ1、YSQ2 和 YSQ3 三级层序, 并在每个三级层序内部识别出低位体系域 (LST)、海侵体系域 (TST) 和高位体系域 (HST) (图 3), 实现了体系域和三级层序界面识别与划分的相互佐证. YSQ3 层序顶界面为可对比的区域不整合面, 界面之上为 Madama 组厚层辫状河三角洲砂体, 测井曲线呈箱状分布; 界面之下为海相三角洲或滨岸相砂泥岩间互沉积, 自然伽马 (GR) 和侧向电阻率 (LLD/LLS) 曲线呈漏斗状分布. YSQ3 层序底界面处 GR 和 LLD/LLS 测井曲线同样存在明显的突变响应特征, 易于识别 (图 3). Mg-1 井 YSQ3 层序的 LST、TST 和 HST 下部以内陆棚亚相为主, 岩性主要为暗色泥岩夹薄层状粉砂岩; HST 上部为三角洲前缘或下临滨亚相砂泥岩薄互层沉积. YSQ2 层序 LST 和 TST 的 GR 测井曲线值相对较高, 主要为层厚质纯的外陆棚泥岩; 而 HST 则以内陆棚泥岩夹薄层粉砂岩为主, GR 值向上逐渐减小, GR 曲线呈明显的漏斗状分布特征. YSQ1 层序底界面附近发育一套约 20 m 的沉凝灰岩层, 表现为明显的低 GR 和高电阻率的特征; YSQ1 层序主要由外陆棚亚相层厚质纯的深灰色—灰黑色泥岩组成 (图 3).

根据不同三级层序界面在测井曲线、岩相岩性组合特征上的响应特征, 开展连井层序地层对比, 建立等时地层格架. 以盆地西侧垂物源方向的连井地质剖面为例 (图 4), Yogou 组内部三级层序和体系域界面均表现出明显的可对比特征 (与上述 Mg-1 井中各级层序界面特征类似), 易于识别和追踪. 在此连井剖面中, Yogou 组不同的三级层序之间表现出相似的特征: 各层序在横向和纵向上均稳定分布, YSQ1 和

YSQ2 层序地层厚度相差不大, 平均厚度约为 250 m, 而 YSQ3 层序地层厚度较大, 平均约为 350 m. YSQ2 和 YSQ3 层序均以高位体系域非常发育、海侵和低位体系域欠发育为特征, GR 曲线值表现出明显的由最大海泛面向上逐渐减小的反旋回特征 (图 3).

3 层序地层格架下的烃源岩分布特征

Termit 盆地上白垩统海相地层是在远源海侵和继承性内陆裂谷古地貌背景下沉积的浅海沉积体系, 缺乏陆棚坡折带和半深海—深海沉积 (Lai *et al.*, 2018). 根据沉积古地理背景 (Genik, 1992, 1993; Guiraud *et al.*, 2005) 及测井相等特征, 可以在上白垩统 Yogou 组识别出浅海陆棚相 (包括外陆棚亚相和内陆棚亚相)、滨岸相 (以下临滨亚相为主) 和三角洲相 (以三角洲前缘亚相为主), 相应地可以区分出外陆棚泥岩、内陆棚泥岩、滨岸泥岩、三角洲泥岩和煤/炭质泥岩 5 种烃源岩类型 (图 3, 4) (Lai *et al.*, 2018). 同一等时地层单元内 (如三级层序或体系域) 不同类型烃源岩的分布特征主要受控于沉积亚相的发育和更替变化, 本文仍以盆地西侧垂物源方向的连井地质剖面为例 (图 4), 总结 Yogou 组层序格架下烃源岩的分布特征.

Termit 盆地上白垩统 Yogou 组的沉积相分布具有垂向上沉积相序叠置清晰、分异明显的特征, 垂向上整体呈现出“外陆棚亚相→内陆棚亚相→滨岸相 (下临滨亚相)/三角洲相”典型的海退型沉积相序列 (图 3, 4). YSQ1 层序以发育层厚质纯的外陆棚泥岩为主, 但在 Dinga 断阶带 DNW-1 井以北区域, YSQ1 的 LST 和 TST 主要以内陆棚为主, 在 TH-1 井 LST 中可见薄层状 (15~20 m) 三角洲泥岩发育. YSQ2 层序 LST 和 TST 沉积时期, Dinga 断阶带 Mg-1 井以南和 Yogou 斜坡区域仍继承性地沉积外陆棚泥岩; 而在 Dinga 断阶带 DNW-1 井以北区域, YSQ2 层序 LST 时期主要为三角洲相沉积, 以厚层砂岩夹薄层三角洲泥岩为特征, 在 TST 时期过渡为内陆棚泥岩或外陆棚泥岩沉积. YSQ2 层序 HST 时期至 YSQ3 层序 LST 时期, Termit 盆地斜坡区绝大部分区域均只发育内陆棚泥岩, 但在 Dinga 断阶带 DNW-1 井至 HL-1 井区域则发育层厚质纯的外陆棚泥岩. YSQ3 层序 TST 主要由层厚质纯的外陆棚泥岩组成, 盆地西侧斜坡仅 Mg-1 井区域发育内陆棚泥岩, 表明盆地在 YSQ3 层序 TST 时期经历了一期相对短暂的海侵事件. 至 YSQ3 层序 HST 时

期,在全球海平面下降且逐渐退出 Termit 盆地的背景下(Lai *et al.*, 2018),盆地西侧斜坡区出现了滨岸相和三角洲相沉积,发育的烃源岩类型主要为层数多、厚度较大的滨岸泥岩,以及薄层状(10 m 左右)的三角洲泥岩;在靠近盆地边缘的井中(如 Kga-1 井和 HL-1 井)见 2~3 层薄层状(2~4 m)煤及碳质泥岩。

由于 Termit 盆地在 Yogou 组沉积时期的沉积古地貌仍为继承性半对称型古裂谷地貌(Lai *et al.*, 2018),可以推断盆地东侧斜坡区(即 Araga 地堑和 Trakes 斜坡)不同层序或体系域内烃源岩的分布特征应与盆地西侧斜坡区相似;而由盆地斜坡区向盆地凹陷中心方向,同一层序或体系域内的烃源岩可能发生产由相对浅水型向相对深水型过渡渐变,如由内陆棚泥岩→外陆棚泥岩过渡,或由滨岸泥岩/三角洲泥岩→内陆棚泥岩→外陆棚泥岩过渡。总的来说,同一等时地层单元内部沉积相的分布和演化控制了不同类型烃源岩的发育和空间分布。因此,基于层序地层学和沉积学评价和预测研究区不同三级层序或体系域控制下的沉积相分布(侧向或平面),就能预测不同类型烃源岩可能的发育方位、空间分布。

4 层序地层格架下烃源岩有机质丰度对比

总有机碳(TOC)含量是评价烃源岩有机质丰度最重要的地球化学参数之一(Hunt, 1979; Tissot and Welte, 1984)。传统的烃源岩评价主要以实测 TOC 的平均值评价不同层段的有机质丰度,实际上此方法极易受泥岩样品数量、代表性以及目的层段内部泥岩地球化学性质非均质性等因素的影响,导致高估或者低估目的层段烃源岩的有机质丰度水平。本文以 Termit 盆地 YgN-1 井为例,对比 Yogou 组不同三级层序中泥岩的实测 TOC 平均值和基于测井曲线预测的 TOC 平均值,以说明传统的烃源岩评价和层序格架下的烃源岩评价在评价精度上的优劣势。

基于测井资料进行 TOC 预测很早就被广泛应用于烃源岩评价,其中 Passey *et al.* (1990) 提出的 $\Delta\log R$ 方法最具代表性。针对 $\Delta\log R$ 方法在实际应用上的一些局限性,不少学者对其进行了改进,本文选择霍秋立等(2011)和赖洪飞等(2018)提出的改进 $\Delta\log R$ 方法计算 $\Delta\log R$ 值,并通过 3 次多项式拟合

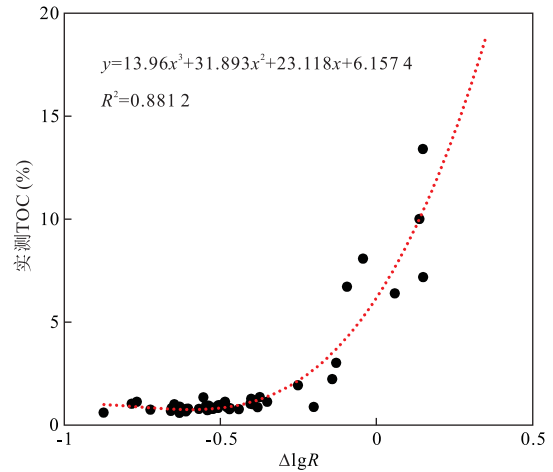


图 5 Termit 盆地 YgN-1 井 Yogou 组烃源岩 $\Delta\lg R$ 与实测 TOC 关系

Fig.5 Relationship between the $\Delta\lg R$ and measured TOC content of source rocks in the Yogou Formation of Well YgN-1 in the Termit Basin

的方法建立 YgN-1 井的 TOC 预测模型(图 5),即:

$$TOC = 13.96 \times (\Delta\lg R)^3 + 31.893 \times (\Delta\lg R)^2 + 23.118 \times (\Delta\lg R) + 6.1574$$

拟合系数 R^2 为 0.8812,利用该 TOC 预测模型计算 YgN-1 井 TOC 预测曲线时,应注意 $\Delta\log R$ 的应用范围为 $-1 \sim 0.5$,扣除砂体后的预测 TOC 曲线如图 6 所示。

图 7 展示了 Termit 盆地 YgN-1 井 Yogou 组不同三级层序中泥岩的实测 TOC 平均值和基于测井曲线预测的 TOC 平均值,以及相应的实测样品数量。Yogou 组地层厚度为 1 218 m,泥岩累计厚度为 1 096.7 m,泥地比为 0.90。50 件 Yogou 组泥岩样品实测 TOC 的平均值为 1.65%,而根据 TOC 预测曲线统计 Yogou 组泥岩的 TOC 平均值为 2.06%,二者表现出一定的偏差,低估了约 20%(图 7)。YgN-1 井 YSQ3 层序泥岩实测 TOC 平均值(3.03%, 19 件样品)和测井模型预测 TOC 平均值(4.46%)相差很大,差值达 1.43%(图 7),可能的原因是 YSQ3 层序主要为滨岸相/三角洲相砂泥频繁互层沉积(图 6),岩性上表现出较强的垂向非均质性(泥地比为 0.78),19 件泥岩样品的实测 TOC 数据尚不足以代表 YSQ3 层序泥岩的整体特征,相比之下垂向上连续的测井模型预测 TOC 曲线的平均值能更可靠地反映这套泥岩的有机质丰度特征。YSQ2 和 YSQ1 层序均由层厚质纯的浅海陆棚泥岩组成,泥地比达到 0.97 以上,这两个层序的实测 TOC 平均值与测井模型预测 TOC 平均值非常接近,均为 0.80% 左

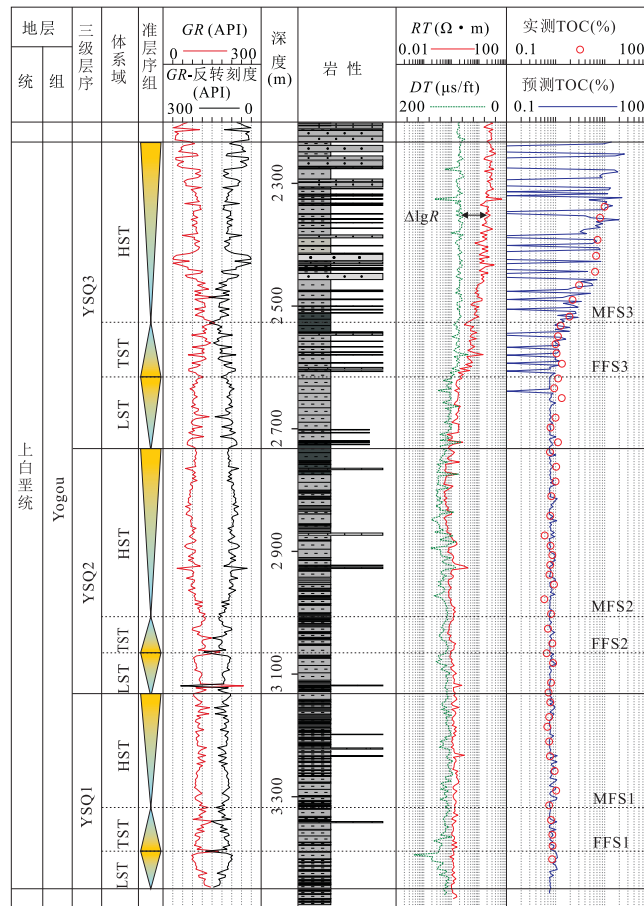


图 6 Termit 盆地 YgN-1 井 Yogou 组烃源岩实测 TOC 与 TOC 预测曲线对比

Fig.6 Comparison of the measured TOC with TOC prediction curve of source rocks of the Yogou Formation of Well YgN-1 in the Termit Basin

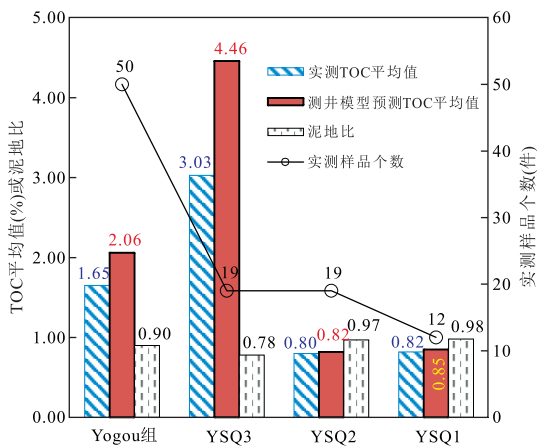


图 7 Termit 盆地 YgN-1 井 Yogou 组及其不同三级层序烃源岩实测 TOC 平均值和基于测井模型预测的 TOC 平均值对比

Fig.7 Comparison between the average value of measured TOC and predictive TOC of source rocks of the Yogou Formation and the third-order sequences therein of Well YgN-1 in the Termit Basin

右, 差值在 0.2%~0.3%(图 7)。

不难发现, 根据层序地层学的理论和方法细分出更精细的等时地层单元作为烃源岩评价单元, 是提高烃源岩评价精度、降低烃源岩非均质对评价结果影响的有效途径之一。如上述的 YgN-1 井上白垩统 Yogou 组, 不管采用一定数量的实测 TOC 平均值, 还是根据垂向上连续分布的 TOC 测井预测曲线统计的 TOC 平均值, 若以 Yogou 组整个组为评价单元, 会导致低估 YSQ3 层序烃源岩有机质丰度, 而高估 YSQ2 和 YSQ1 层序烃源岩的有机质丰度。此外, 对于难以获得足够代表性样品的强非均质性烃源层(如 YSQ3 层序), 利用测井模型预测的 TOC 平均值比数量有限的实测 TOC 平均值更能接近其真实的平均有机质丰度。

5 代表性烃源岩有机地球化学特征

形成于不同沉积相带的泥岩由于有机质来源和

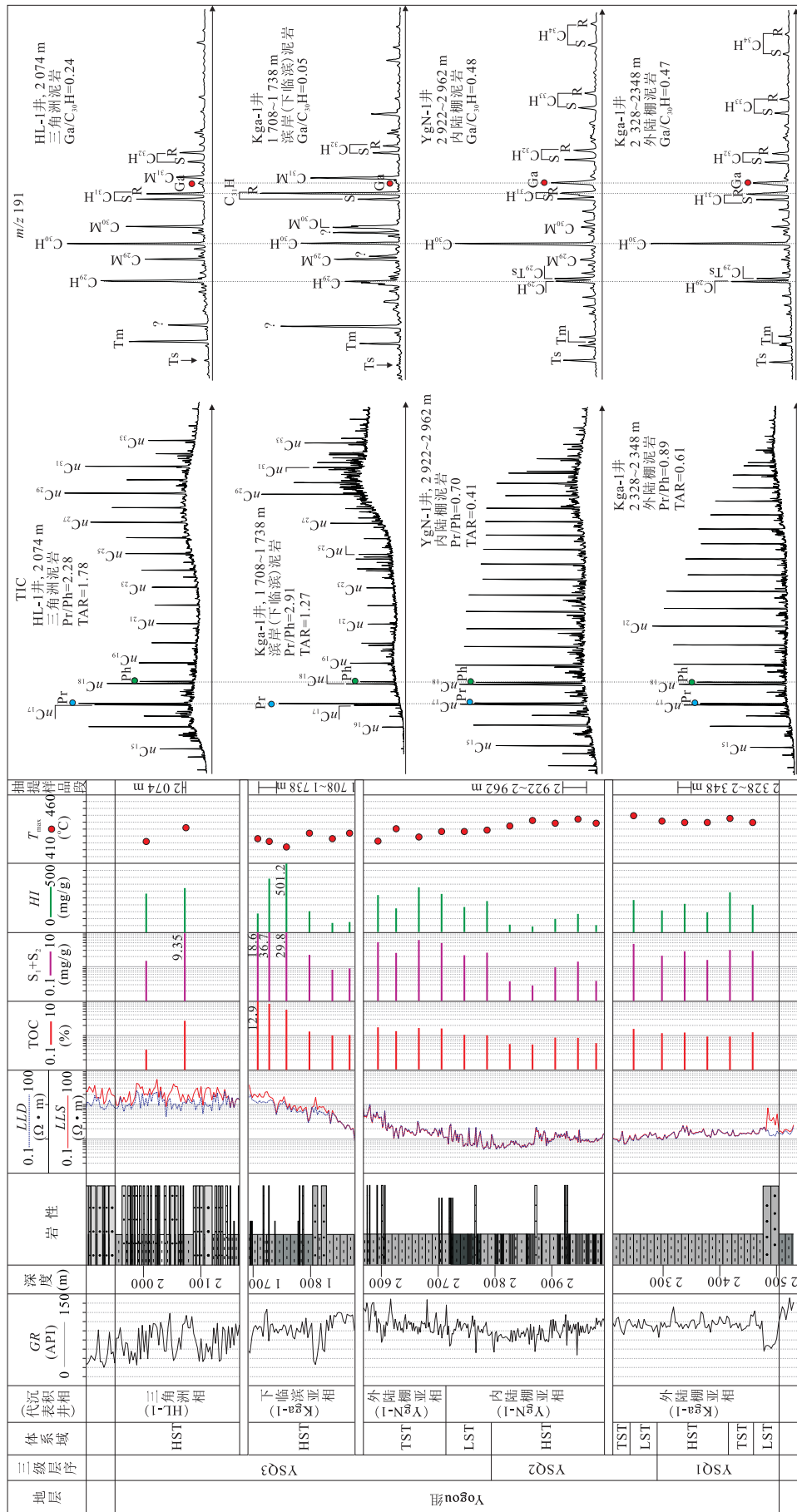


图8 Termit盆地Yogou组不同层序或体系域中代表性烃源岩地球化学特征

Fig.8 Geochemical characteristics of representative source rocks from different third-order sequences of the Yogou Formation in the Termit Basin

保存条件等方面的差异而极易表现出一定的地球化学性质差异。基于不同沉积相带烃源岩在层序地层格架中的分布特征,可依据不同类型代表性烃源岩样品的地球化学特征评价和预测层序格架下烃源岩有机质的地球化学性质。本文选取了 Termit 盆地上白垩统 Yogou 组三级层序中不同沉积相带烃源岩的代表性样品(图 8),从总有机碳(TOC)含量、Rock-Eval 岩石热解参数和代表性生物标志物分布 3 个方面分析其有机地球化学特征。由于煤/碳质泥岩仅呈薄层状(2~3 m)零星分布于 YSQ3 层序 HST 中,相对于其他类型泥岩,其油源贡献非常小甚至可以忽略不计,因此在本文中也不再介绍其地球化学特征。

(1) 外陆棚泥岩。层厚质纯的外陆棚泥岩主要分布在 YSQ1 层序以及 YSQ2 层序的 LST 和 TST,以 Kga-1 井最具代表。其主要的地球化学特征为:中等—好级别的 TOC 含量(0.9%~2.0%)、中等的生烃潜力($S_1 + S_2$)值(1.0~5.0 mg/g)和氢指数 HI (150~300 mg/g),且纵向上参数值变化不大,分布非常稳定;饱和烃色谱正构烷烃系列呈“前峰型”分布,较低的陆生/水生比值($TAR = 0.61$)和姥鲛烷/植烷比值($Pr/Ph = 0.89$),较高的伽马蜡烷指数($Ga/C_{30}H = 0.47$)(图 8)。指示外陆棚泥岩为以中等—好级别的有机质丰度;沉积有机质生物来源中,海洋低等水生生物贡献高,有机母质沉积时水体具有一定的分层现象,沉积环境为还原到弱还原环境。

(2) 内陆棚泥岩。YSQ2 层序 HST 以及 YSQ3 层序 LST 和 TST 中的内陆棚泥岩(以 YgN-1 井为代表)表现出了与外陆棚泥岩类似的地球化学特征,如中等的 TOC 含量(0.6%~2.0%)、较高的($S_1 + S_2$)值(1.0~6.0 mg/g)和 HI 参数值(100~350 mg/g);饱和烃色谱正构烷烃组成呈微弱的“双峰态前峰型”分布特征($TAR = 0.41$),植烷优势($Pr/Ph = 0.73$);较高丰度的伽马蜡烷($Ga/C_{30}H = 0.48$)(图 8)。内陆棚泥岩有机质丰度纵向上同样分布较稳定,但略低于外陆棚泥岩;沉积有机质生物来源中,海洋低等水生生物贡献高,有机母质沉积时水体具有一定的分层现象,沉积环境为还原到弱还原环境。

(3) 滨岸泥岩。以下临滨亚相泥岩为主的滨岸泥岩主要分布在 YSQ3 层序 HST,大部分具有高 TOC 含量(>5.0%)、高($S_1 + S_2$)(>10.0 mg/g)和 HI 变化范围大(100~550 mg/g)的特征,代表性样品抽提物饱和烃色谱具有正构烷烃系列呈“双峰型”分布($TAR = 1.27$)、高姥植比($Pr/Ph = 2.91$)和低伽

马蜡烷指数($Ga/C_{30}H = 0.05$)的特征。表明滨岸泥岩的有机质母质来源可能来自低等水生生物和高等植物的双重贡献;沉积水体分层现象不明显,有机质埋藏和保存的底水界面呈弱氧化—氧化的环境。

(4) 三角洲泥岩。三角洲泥岩主要呈多层薄层状分布于 YSQ3 层序 HST 的三角洲综合体中(图 4),表现为 TOC 含量和($S_1 + S_2$)值变化大(0.4% < TOC < 3.0%, 1.0 < ($S_1 + S_2$) < 10.0 mg/g)、中等 HI 值(250~350 mg/g)的特点;其代表性样品抽提物饱和烃色谱正构烷烃系列呈“后峰双峰型”分布($TAR = 1.78$)并具明显的奇碳优势,同时具有姥鲛烷优势($Pr/Ph = 2.28$),伽马蜡烷指数低(0.07)。表明三角洲泥岩有机质的母质来源中陆源有机质贡献较高,有机质沉积环境呈弱氧化—氧化的特征。

研究区 Yogou 组整体为以泥质为主的浅海沉积,相同三级层序或其体系域内部沉积相横向相变并不明显(图 4),而相同或相近沉积相类型的烃源岩表现出相似的地球化学性质(图 8)。因此,在研究区后续勘探新区的烃源岩评价和预测工作中,可以根据沉积相模式预测不同三级层序或体系域内部沉积相展布情况,进而合理预测可能发育的烃源岩类型及其空间展布情况;结合上述不同类型代表性烃源岩样品的地球化学特征,可以推测等时地层格架内烃源岩的地球化学性质及其变化规律。

6 结论

层序地层格架下的烃源岩研究,细化了油气地球化学评价地层单元,可以描述不同层序/体系域、不同沉积相类型烃源岩的空间分布和有机质地球化学特征。

(1) 在 Termit 盆地上白垩统 Yogou 组共划分出 3 个三级层序,描述了层序格架中烃源层的空间分布特征。

(2) 识别出外陆棚、内陆棚、滨岸、三角洲相和煤/炭质泥岩 5 种不同沉积类型的烃源岩,不同类型烃源岩有机质丰度和分子地球化学组成特征存在明显差异。

(3) 基于层序、体系域和沉积相带的烃源岩地球化学评价,可以更准确地刻画烃源岩空间分布特征、有机质地球化学性质横向及剖面上的差异,从而提高烃源岩地球化学研究的精度。

References

Bohacs, K. M., Carroll, A. R., Neal, J. E., et al., 2000. Ab-

- stract: Lake-Basin Type, Source Potential, and Hydrocarbon Character: An Integrated Sequence-Stratigraphic-Geochemical Framework. In: Gierlowski-Kordesch, E.H., Kelts, K.R., eds., Lake Basins through Space and Time. *AAPG Studies in Geology*, 46: 3–34.
- Bombardiere, L., Gorin, G.E., 2000. Stratigraphical and Lateral Distribution of Sedimentary Organic Matter in Upper Jurassic Carbonates of SE France. *Sedimentary Geology*, 132 (3/4): 177–203. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00006-3)
- Creaney, S., Passey, Q.R., 1993. Recurring Patterns of Total Organic Carbon and Source Rock Quality within a Sequence Stratigraphy Framework. *AAPG Bulletin*, 77 (3): 386–401. <https://doi.org/10.1306/2FBDF8C18-1718-11D7-8645000102C1865D>
- Fleck, S., Michels, R., Ferry, S., et al., 2002. Organic Geochemistry in a Sequence Stratigraphic Framework, the Siliciclastic Shelf Environment of Cretaceous Series, SE France. *Organic Geochemistry*, 33 (12): 1533–1557. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00174-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00174-2)
- Frimmel, A., Oschmann, W., Schwark, L., 2004. Chemos-tratigraphy of the Posidonia Black Shale, SW Germany. *Chemical Geology*, 206 (3–4): 199–230. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.007>
- Genik, G.J., 1992. Regional Framework, Structural and Petroleum Aspects of Rift Basins in Niger, Chad and the Central African Republic (C.A.R.). *Tectonophysics*, 213 (1–2): 169–185. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90257-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90257-7)
- Genik, G.J., 1993. Petroleum Geology of Cretaceous-Tertiary Rift Basins in Niger, Chad, and Central African Republic. *AAPG Bulletin*, 77 (8): 1405–1434. <https://doi.org/10.1306/bdff8eac-1718-11d7-8645000102c1865d>
- Guiraud, R., Bosworth, W., Thierry, J., et al., 2005. Phanerozoic Geological Evolution of Northern and Central Africa: An Overview. *Journal of African Earth Sciences*, 43 (1–3): 83–143. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.017>
- Harouna, M., Philp, R.P., 2012. Potential Petroleum Source Rocks in the Termit Basin, Niger. *Journal of Petroleum Geology*, 35 (2): 165–185. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2012.00524.x>
- Hou, Q.J., Jin, Q., Niu, C.M., et al., 2018. Distribution Characteristics and Main Controlling Factors of Main Hydrocarbon Source Rocks in Liaodong Bay Area. *Earth Science*, 43 (6): 2160–2171 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.568>
- Hunt, J.M., 1979. Petroleum Geochemistry and Geology (The First Edition). W.H. Freeman and Company, New York, 261–350.
- Huo, Q.L., Zeng, H.S., Fu, L., et al., 2011. The Advance of ΔlgR Method and Its Application in Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41 (2): 586–591 (in Chinese with English abstract).
- Jin, H., Sonnenberg, S., Sarg, R., 2015. Source Rock Potential and Sequence Stratigraphy of Bakken Shales in the Williston Basin. *Unconventional Resources Technology Conference*, 213 (1): 7–9. <https://doi.org/10.15530/urtec-2015-2169797>
- Lai, H.F., Li, M.J., Liu, J.G., et al., 2018. Organic Geochemical Characteristics and Depositional Models of Upper Cretaceous Marine Source Rocks in the Termit Basin, Niger. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 495: 292–308.
- Lai, H.F., Li, M.J., Liu, J.G., et al., 2018. Source Rocks Types and Logging Evaluation in Forced Regressive Systems Tract: Taking the Termit Basin (Niger) as an Example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36 (2): 390–398 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Lu, J.L., Li, R.L., et al., 2017. Generation Paleoenvironment and Its Controlling Factors of Lower Cretaceous Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Changling Depression, South Songliao Basin. *Earth Science*, 42 (10): 1774–1786 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.539>
- Li, M.J., Li, S.T., Yang, L., et al., 2005. Sequence Stratigraphic Geochemistry and Its Application to Hydrocarbon Exploration. *Earth Science Frontiers*, 12 (3): 219–226 (in Chinese with English abstract).
- Li, M.J., Zhou, D.S., 2003. Sequence Stratigraphic Geochemistry—A New Process of Geochemistry. *Petroleum Geology & Experiment*, 25 (5): 487–491 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.H., Li, S.P., Hu, Y.Y., et al., 2017. Sequence Stratigraphy: Problems and Discussion. *Earth Science*, 42 (12): 2312–2326 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.144>
- Li, S.T., 2000. The Dynamics of Sedimentary Basins and Energy Resources—Retrospective and Prospects at the Turn of the Century. *Earth Science Frontiers*, 7 (3): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Zhang, G.Y., Mao, F.J., et al., 2017. Geochemistry and Origin of Upper Cretaceous Oils from the Termit Basin, Niger. *Journal of Petroleum Geology*, 40 (2): 195–207. <https://doi.org/10.1111/jpg.12672>
- Liu, B., Pan, J.H., Wan, L.K., et al., 2012. Structural Evolu-

- tion and Main Controlling Factors of the Paleogene Hydrocarbon Accumulation in Termit Basin, Eastern Niger. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3): 394–403 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Wan, L. K., Mao, F. J., et al., 2015. Hydrocarbon Potential of Upper Cretaceous Marine Source Rocks in the Termit Basin, Niger. *Journal of Petroleum Geology*, 38(2): 157–175. <https://doi.org/10.1111/jpg.12604>
- Liu, L. F., Kang, Y. S., Qi, X. F., et al., 2002. Evaluation on Source Rocks in the Jurassic Sequence Stratigraphic Frameworks of the Junggar Basin, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 687–694 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R. H., Jiang, Z. X., Wang, X. Y., et al., 2017. Seismic Facies Identification and Sedimentary Facies Analysis in Upper Cretaceous Madama Formation, Termit Basin, Niger. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(2): 59–66 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. M., Ye, J. R., Cao, Q., et al., 2017. Preliminary Prediction and Evaluation of Source Rocks in the Lunpola Basin, Tibet, China. *Earth Science*, 42(4): 601–612 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.047>
- Lü, M. S., Xue, L. Q., Su, Y. D., et al., 2012. Rifting Controls on Sequence Stratigraphic Architecture: A Case Study in the Lower Cretaceous of Termit Basin, West African Rift System. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(3): 647–656 (in Chinese with English abstract).
- Lü, M. S., Xue, L. Q., Wan, L. K., et al., 2015. Main Controlling Factors of Paleogene Hydrocarbon Accumulation of Termit Basin, West African Rift System. *Earth Science Frontiers*, 22(6): 207–216 (in Chinese with English abstract).
- Passey, Q., Creaney, S., Kulla, J., et al., 1990. A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs. *AAPG Bulletin*, 74(12): 1777–1794. <https://doi.org/10.1306/0c9b25c9-1710-11d7-8645000102c1865d>
- Peters, K. E., Snedden, J. W., Sulaeman, A., et al., 2000. A New Geochemical-Sequence Stratigraphic Model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan Indonesia. *AAPG Bulletin*, 84(1): 12–44. <https://doi.org/10.1306/e4fd3a09-1732-11d7-8645000102c1865d>
- Robison, V. D., Liro, L. M., Robison, C. R., et al., 1996. Integrated Geochemistry, Organic Petrology, and Sequence Stratigraphy of the Triassic Shublik Formation, Teneco Phoenix #1 Well, North Slope, Alaska, U.S.A.. *Organic Geochemistry*, 24(2): 257–272. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(96\)00023-x](https://doi.org/10.1016/0146-6380(96)00023-x)
- Tang, G., Sun, Z. H., Su, J. Q., et al., 2015. Study of Cretaceous Sequential Stratigraphy and Sedimentary System in Termit Basin of West Africa. *China Petroleum Exploration*, 20(4): 81–88 (in Chinese with English abstract).
- Tang, W. X., Jiang, Z. X., Liu, R. H., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Depositional Environment of the Yogou Formation Mudstone in the Termit Basin, Niger. *Oil & Gas Geology*, 38(3): 592–601 (in Chinese with English abstract).
- Tissot, B., Welte, D., 1984. Petroleum Formation and Occurrence (Second Revised and Enlarged Edition). Springer-Verlag, Berlin, 495–546. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>
- Van Wagoner, J. C., Mitchum, R. M., Campion, K. M., et al., 1990. Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts for High-resolution Correlation of Time and Facies. *AAPG Methods in Exploration Series*, 7: 3–51.
- Wan, L. K., Liu, J. G., Mao, F. J., et al., 2014. The Petroleum Geochemistry of the Termit Basin, Eastern Niger. *Marine and Petroleum Geology*, 51(2): 167–183. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.11.006>
- Wang, Z. S., Tang, G., Su, J. Q., et al., 2016. Marine-Continental Transitional Sedimentation and Hydrocarbon Accumulation Condition of Cretaceous Yogou Formation in Moul Sag, Niger. *Natural Gas Geoscience*, 27(7): 1153–1163 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. D., Liu, L. F., Zhang, Z. H., et al., 2008. Distribution and Hydrocarbon Generation of the Eogene Source Rocks in a Sequence Stratigraphic Framework in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(6): 1077–1085 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Su, J. Q., Dong, X. W., et al., 2017. Controlling Factors of Hydrocarbon Accumulation in Termit Rift Superimposed Basin, Niger. *Petroleum Exploration and Development*, 44(3): 330–339. (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 侯庆杰, 金强, 牛成民, 等, 2018. 辽东湾地区主力烃源岩分布特征与主控因素. *地球科学*, 43(6): 2160–2171. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.568>
- 霍秋立, 曾花森, 付丽, 等, 2011. $\Delta\lg R$ 测井源岩评价方法的改进及其在松辽盆地的应用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(2): 586–591.
- 赖洪飞, 李美俊, 刘计国, 等, 2018. 强制海退体系域中烃源岩的类型与测井评价——以尼日尔 Termit 盆地为例. *沉积学报*, 36(2): 390–398.

- 李浩,陆建林,李瑞磊,等,2017.长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素.地球科学,42(10):1774—1786. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.539>
- 李美俊,李思田,杨龙,等,2005.层序地层地球化学及其在油气勘探中的作用.地学前缘,12(3):219—226.
- 李美俊,周东升,2003.层序地层地球化学—地球化学研究的新进展.石油实验地质,25(5):487—491.
- 李绍虎,李树鹏,胡言焯,等,2017.层序地层学:问题与讨论.地球科学,42(12):2312—2326. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.144>
- 李思田,2000.盆地动力学与能源资源—世纪之交的回顾与展望.地学前缘,7(3):1—9.
- 刘邦,潘校华,万仑坤,等,2012.东尼日尔 Termit 盆地构造演化及古近系油气成藏主控因素.石油学报,33(3):394—403.
- 刘洛夫,康永尚,齐雪峰,等,2002.准噶尔盆地侏罗系层序地层格架中的烃源岩评价.沉积学报,20(4):687—694.
- 刘若涵,姜在兴,王旭影,等,2017.尼日尔 Termit 盆地上白垩统 Madama 组地震相识别与沉积相演化分析.海相油气地质,22(2):59—66.
- 刘一茗,叶加仁,曹强,等,2017.西藏伦坡拉盆地古近系牛堡组烃源岩预测与评价.地球科学,42(4):601—612. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.047>
- 吕明胜,薛良清,苏永地,等,2012.裂谷作用对层序地层充填样式的控制——以西非裂谷系 Termit 盆地下白垩统为例.吉林大学学报(地球科学版),42(3):647—656.
- 吕明胜,薛良清,万仑坤,等,2015.西非裂谷系 Termit 盆地古近系油气成藏主控因素分析.地学前缘,22(6):207—216.
- 汤戈,孙志华,苏俊青,等,2015.西非 Termit 盆地白垩系层序地层与沉积体系研究.中国石油勘探,20(4):81—88.
- 汤望新,姜在兴,刘若涵,等,2017.尼日尔 Termit 盆地 Yogou 组泥岩地球化学特征及沉积背景.石油与天然气地质,38(3):592—601.
- 王振升,汤戈,苏俊青,等,2016.尼日尔 Moul 凹陷白垩系 Yogou 组海陆过渡相沉积与成藏条件.天然气地球科学,27(7):1153—1163.
- 赵彦德,刘洛夫,张枝焕,等,2008.南堡凹陷古近系层序地层格架中烃源岩分布与生烃特征研究.沉积学报,26(6):1077—1085.
- 周立宏,苏俊青,董晓伟,等,2017.尼日尔 Termit 裂谷型叠合盆地油气成藏特征与主控因素.石油勘探与开发,44(3):330—339.