西北大学学报(自然科学版)
2026 年 10 月,第 56 卷第 5 期,Oct. ,2026,Vol. 56,No. 5
Journal of Northwest University (Natural Science Edition)

·地球科学·

陆相优质烃源岩发育期沉积速率及其形成的动力环境

杜　楠[1],张晓磊[2],刘池洋[1],杨伟伟[2],王建强[1],黄　雷[1],秦　阳[1],蒋　赟[1]

1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室/含油气盆地研究所,陕西 西安　710127;
2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院/低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,陕西 西安　710018

摘要　以裂陷型和坳陷型陆相典型盆地为研究对象,对不同类型盆地和富烃、贫烃凹陷的沉积及沉降速率进行研究,探讨陆相优质烃源岩形成的沉积条件和动力环境。研究发现:陆相优质烃源岩发育期的沉积速率普遍较高,裂陷型盆地一般大于 200 m/Ma,最大可达 400 m/Ma,坳陷型盆地多数达 90 m/Ma,最大可达 200 m/Ma 或更高,明显高于其上、下相邻非烃源岩的沉积速率;唯鄂尔多斯盆地长 7 段优质烃源岩发育期沉积速率较慢,为 18. 3 ~ 35. 9 m/Ma,略低于上、下相邻非烃源岩。无论裂陷型或坳陷型盆地,在优质烃源岩发育期均处于深水 - 较深水环境,表明该期沉降速率大于沉积速率。该时期盆地较快速的沉降,有效地维持了盆地较长期处于有利于烃源岩形成所需的较广阔深水环境,盆地进入了鼎盛演化时段,可容空间扩大;同时,伴有较高地热场、较强构造活动和活跃的岩浆热液等深部作用,促使生物繁盛和超常勃发,导致初级生产力极大提升,为优质烃源岩的规模形成提供了物质基础。

关键词　陆相烃源岩;沉积速率;沉降速率;富烃凹陷;深部作用;动力环境

中图分类号:P618. 12　　**DOI**:10. 16152/j. cnki. xdxbzr. 2026-05-018

Sedimentary rate of continental high quality hydrocarbon source rock and its dynamic environment

Du Nan[1], Zhang Xiaolei[2], Liu Chiyang[1], Yang Weiwei[2], Wang Jianqiang[1], Huang Lei[1], Qin Yang[1], Jiang Yun[1]

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics/Institute of Oil and Gas Basin, Northwest University, Xi'an 710127, China;
2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-permeability Oil and Gas Fields, Research Instiute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China

Abstract　The sedimentation rate during a certain period is the comprehensive result of exogenic geological processes such as basin source-to-sink systems and endogenic geological processes including subsidence, containing significant and abundant geological information. This study focuses on typical continental rift-type and depression-type basins, starting from the analysis of sedimentation and subsidence rates in different basin types and hydrocarbon-rich or hydrocarbon-poor sags, to explore the sedimentary conditions and dynamic environ-

收稿日期:2025-03-14　　修回日期:2025-06-19

基金项目:国家自然科学基金(42230815,42272148,41330315);西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项经费资助项目(201210142)。

第一作者:杜楠,男,从事沉积盆地动力学研究,202221657@ stumail. nwu. edu. cn。

通信作者:刘池洋,男,教授,博士生导师,从事沉积盆地动力学与能源地质学研究,cy@ nwu. edu. cn。

ments for the formation of high-quality continental hydrocarbon source rocks. Comparative studies reveal that sedimentation rates during the development periods of high-quality continental hydrocarbon source rocks are generally high. In rift-type hydrocarbon-rich sags, rates typically exceed 200 meters per million years, with a maximum of 400 meters per million years; in depression-type basins, most reach 90 meters per million years, with a maximum of 200 meters per million years or higher, significantly exceeding the sedimentation rates of adjacent non-source rock layers above and below. Only the Chang 7 Member of the Ordos Basin exhibited slower sedimentation rates, ranging from 18.3 to 35.9 meters per million years during the high-quality source rock development period, slightly lower than those of adjacent non-source rock layers. Both rift-type and depression-type basins were in deep to semi-deep water environments during high-quality source rock development, indicating that subsidence rates surpassed sedimentation rates during these periods. The relatively rapid subsidence during these periods not only effectively maintained the basin's long-term preservation of extensive deep-water environments favorable for source rock formation, marking the basin's peak evolutionary stage with expanded accommodation space, but also coincided with high geothermal gradients, intense tectonic activity, and active magma-hydrothermal deep processes. These factors collectively promoted biological prosperity and exceptional productivity surges, greatly enhancing primary productivity and providing the material foundation for large-scale formation of high-quality hydrocarbon source rocks.

Keywords continental hydrocarbon source rock; deposition rate; sedimentation rate; hydrocarbon-rich depression; deep action; dynamic environment

关于烃源岩,特别是陆相烃源岩的有机地球化学特征及其优劣判识标准和评价分类体系,多年以来,学者已展开了系统而深入的研究,论著颇丰,认识较为一致[1-3]。但是,对烃源岩如何形成以及其形成的动力环境的研究相对薄弱。优质烃源岩的发育需要丰富的有机质和良好的保存埋藏条件。这与盆地或富烃坳陷的动力环境和沉降、沉积速率及二者的耦合关系联系密切,且海、陆相盆地差异明显,目前对其研究尚少[4]。陆相烃源岩通常形成于深水 - 较深水湖相还原环境中,一般正是盆地演化的鼎盛时期,其发育总体受以沉降作用为代表的深部内动力地质作用所控制。

对盆地演化过程中某一时期或阶段的沉降幅度和速率进行准确获取困难较多。首先需剔去地层沉积之后压实和剥蚀等改造的影响,恢复地层的初始沉积厚度。其次是求取沉积时期的古水深。与海盆的水体规模相比,湖盆要小几个数量级,其水深和规模受气候、季节和降水等环境短期变化的影响明显;加之等深和不同深度地层水的流动和交换较易发生且频繁出现,致使用海洋不同深度生物的遗体来确定古水深的方法难以有效应用[5-6]。第三,需要求得沉积期间较精确的时限。沉积岩的精准定年难度较大,这由沉积岩可用于定年的同生矿物缺少所决定。目前,应用于沉积岩定年研究较多的自生矿物包括海绿石、伊利石、钾长石以及方解石[7]。但是,由于自生矿物的生长特征与环境,适用于定年研究的沉积岩自生矿物的识别与挑选仍十分困难,这是沉积岩本身的天然缺陷,因而只能通过有限的其他方法予以约束。如通过对地层中火山岩或凝灰岩夹层的矿物(如锆石)进行测年以及天文旋回分析法和相关地球化学方法等技术的应用,并与地质、古生物等依据综合印证对比,可使沉积时限的精度有所提高[8-9]。

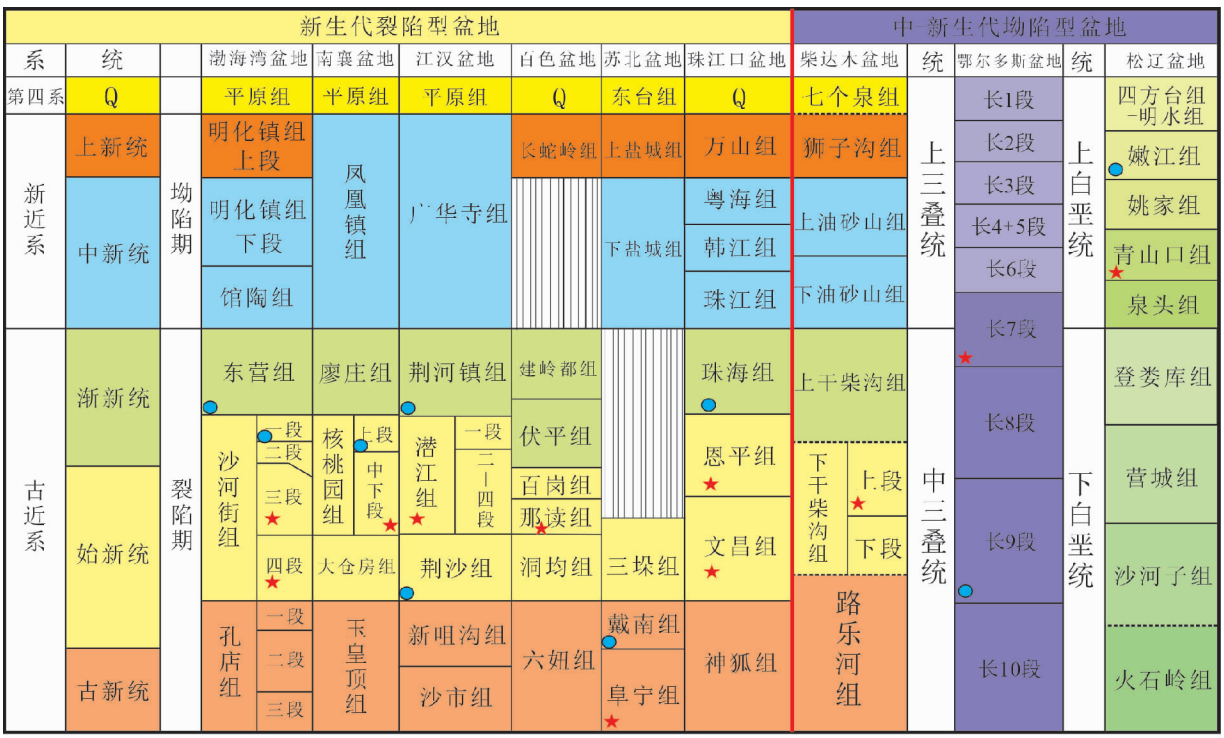
相对而言,沉积环境和地层厚度较易确定。地层沉积速率可根据沉积物(地层)的厚度和顶底时限较准确地定量求取,其形成的主控因素除水动力和物源充足程度及远近条件外,总体上仍受沉降作用的控制。烃源岩的形成又与有机质的丰度和埋藏方式关联密切。烃源岩和其赋存的富烃凹陷在形成过程中整体处于欠补偿环境,这就要求沉降速率总体大于沉积速率。盆地较长时期地持续沉降主要受地球内动力地质作用所控制。由此可见,对某一时期地层沉积速率 + 沉积环境的综合分析,可在宏观上了解和总体反映该时期的沉降强度或态势。

盆地沉降和沉积作用是盆地发展演化过程中内外动力总体活动的宏观代表和外在表现,直接影响着盆地的沉积、构造特征和油气等沉积矿产的贫富。本研究主要从沉积速率入手,通过将有

代表性的新生代裂陷型盆地和中－新生代大型坳陷型盆地典型优质陆相烃源岩层及其相关非烃源岩层系沉积速率及沉积环境的对比研究,综合已有沉降速率和沉积环境的相关成果,探讨中国陆相含油气盆地烃源岩发育的动力环境及其响应关系,以深化油气地质理论。

1　新生代裂陷型盆地

新生代裂陷盆地在中国东部和近海分布广泛,在华北中部和南方亦有发育。多数盆地具有相似的沉积及构造演化特征,总体都经历了古近纪裂陷、差异沉降－沉积,古近纪末整体抬升、沉积间断和新近纪—第四纪整体沉降－沉积的演化过程。大多数盆地的地层发育基本完整,在区域上具有较好的可对比性(见图 1)。其中,苏北盆地和百色盆地与其他盆地的演化过程稍有不同。百色盆地在新近纪早期抬升,沉积间断,前期沉积地层遭受不同程度的剥蚀;苏北盆地表现为多旋回、多期次的盆地演化特征,在始新世末期就结束了沉积,盆地整体抬升,出现了约 18 Ma 的沉积间断,剥蚀时间和剥蚀量在东部诸裂陷盆地中可能最大[10]。



注:● 烃源岩,★ 主力烃源岩层。

图 1　研究盆地沉积地层和烃源岩分布对比图

Fig. 1　The comparative map of the sedimentary strata in the basin

1.1　沉降速率

中国近海及东部新生代裂陷盆地的沉降速率,中国海洋石油系统先后进行过专门的研究[11-12]。如较早对中国近海新生代裂陷盆地中 51 个断陷用回剥法进行压实校正,求取了沉积速率(见图 2)。考虑到沉积基面起伏不大,除深湖区外,认为此沉积速率可近似代表沉降速率[11]。沉降(沉积)速率与沉积相之间的趋势关系为(见图 2):半深－深湖相集中在 200 ~ 250 m/Ma 以上,滨－浅湖相大多在 100 ~ 250 m/Ma;沼泽相小于 200 m/Ma,一般为 100 ~ 150 m/Ma;河流平原相－冲积扇相一般小于 100 m/Ma。据此建立了中国近海裂陷盆地箕状断陷 4 个裂陷充填期的模型,认为在盆地演化的扩张期,沉降速率高达 200 ~ 400 m/Ma,甚或更高,断陷扩大,湖盆发育达到鼎盛期,也正是优质烃源岩形成的主要时期。随后盆地裂陷减弱,进入衰退期,沉降速率降至 200 m/Ma,可形成偏气型源岩和次要油源岩。在盆地初始期和萎缩期,沉降速率低到 100 m/Ma,或更低,储层发育[11]。

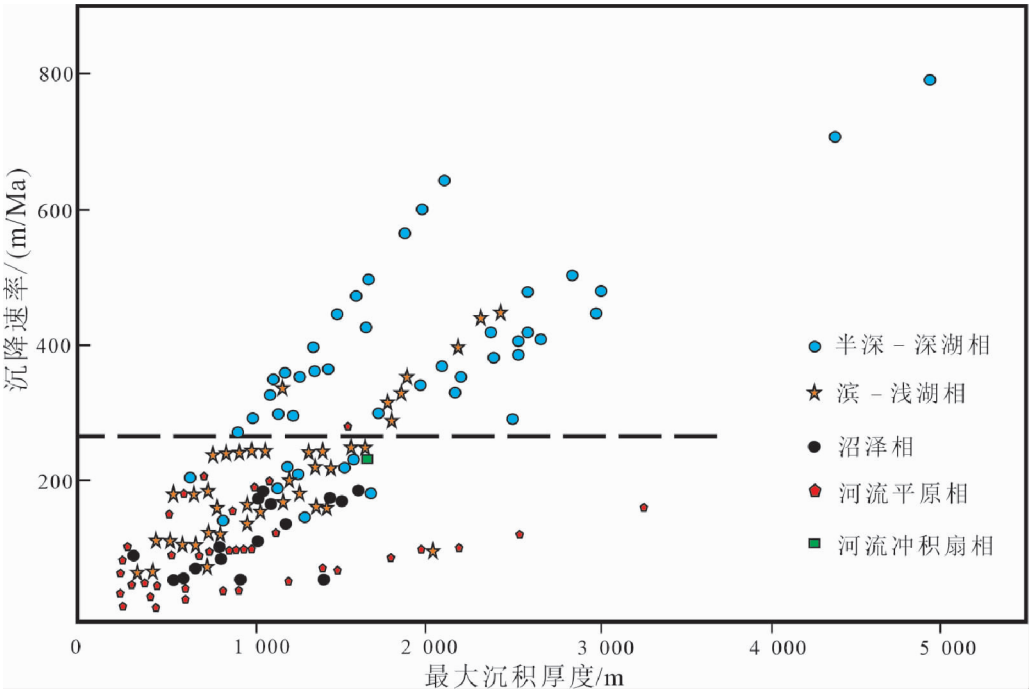


图 2 中国近海裂陷沉降速率与沉积相关系图(据文献[11]修改)

Fig. 2 Coastal fissure sedimentation rate and deposition phase relationship diagram in China

由此可见,在中国新生代裂陷型盆地中,烃源岩与非烃源岩地层的沉降速率和沉积环境特征有明显区别,在主力烃源岩发育期,即盆地演化过程中的鼎盛期,沉降速率最大,主体处于欠补偿环境,形成了有利于烃源岩发育的较深 - 深水湖盆和较广阔的水域。

米立军等通过盆地模拟系统计算[(构造沉降 + 负载沉降 + 压实沉降)/沉降时间],求得了中国东部和近海陆相烃源岩发育时期富烃凹陷和贫烃凹陷的基底沉降速率(见图 3)[12],揭示富烃凹陷的沉降速率均大于 200 m/Ma,明显高于贫烃凹陷。这与上述研究结果和所得沉降速率总体一致[11],即裂陷盆地富烃凹陷烃源岩形成期的沉降速率快,且一般明显高于贫烃凹陷和非烃源岩发育期(见图 2、3)。

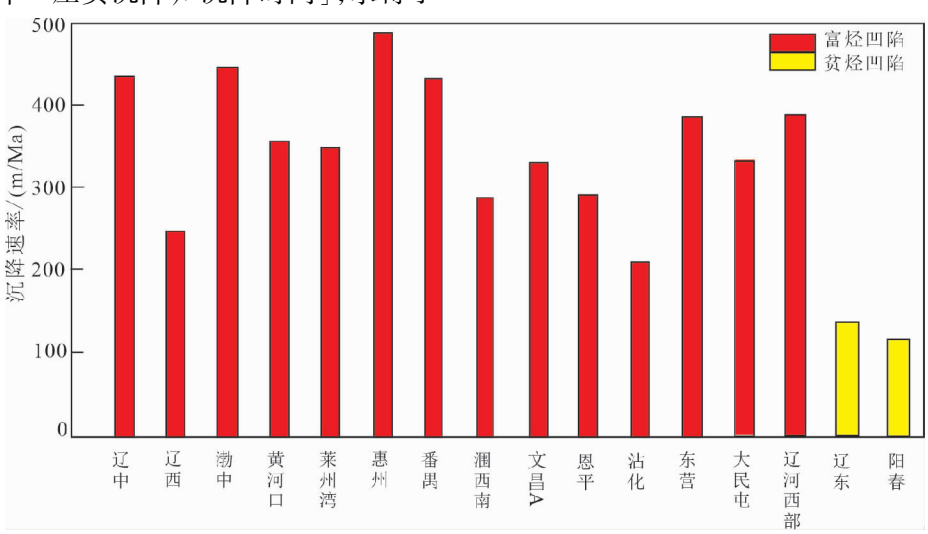


图 3 中国近海及东部陆相富烃、贫烃凹陷基底沉降速率对比图(据文献[12]修改)

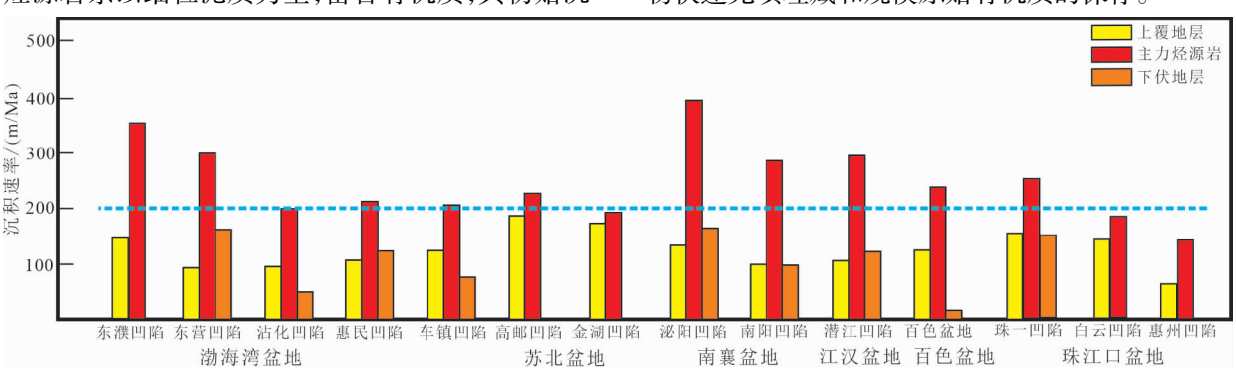
Fig. 3 Comparison of basement sedimentation rate of continental hydrocarbon rich and lean depression in offshore and eastern China

1.2　沉积速率

为了更全面地了解中国东部大陆和近海裂陷盆地主力烃源岩发育期间的沉积状况,本研究对 6 个有代表性的新生代裂陷盆地(见图 1)的相关研究进行了对比和综合。这 6 个盆地沉积速率的确定,不同研究者采用的方法不尽相同。刘彬等使用地球物理勘探手段获取了地层厚度,结合地层年代框架,求取了渤海湾、苏北、南襄、江汉、百色盆地内主要凹陷烃源岩及其上下层位地层的沉积速率[13];杜威等[14]、李琪琪[15]基于米兰科维奇旋回理论求得了渤海湾盆地东营、饶阳凹陷地层的沉积速率,二者研究结果相近。方竞男[16]、潘冬[17]通过井震资料对珠江口盆地各凹陷层序界面进行识别,建立了等时地层格架,本研究据此求取了各层段的沉积速率(见图 4)。需说明的是,因未进行地层压实厚度恢复,这几种方法求取的沉积速率均不能完全代表原始的沉积速率。用成岩地层现今厚度求取的沉积速率,比地层的初始沉积速率要小。在同一坳陷或断陷,上下相邻地层所经历的埋藏 - 压实 - 成岩过程和初始沉积厚度的减小比值大同小异,一定厚度的非烃源岩地层某层段与另一层段因岩性差异所造成的初始厚度减小的比值较小。此系统偏差对本研究和各盆地或凹陷之间的对比分析不会产生明显的影响。烃源岩系以细粒泥质为主,富含有机质,其初始沉积厚度在成岩后减小幅度较大;若求取和应用初始沉积厚度,只能增强而不会减弱或改变其沉积快、沉积速率大于上下相邻非烃源岩的结论。本研究旨在通过沉积速率及其对比,探讨烃源岩发育时的沉积构造环境,而不是沉积速率形成的具体细节。故在本研究中,沉积速率均用今成岩后地层求得。

通过对上述 6 个新生代裂陷盆地内 14 个富烃断陷的主力烃源岩及其上、下非烃源岩地层的沉积速率进行统计和对比表明:各断陷主力烃源岩的沉积速率普遍在 200 ~ 400 m/Ma(见图 4),总体上比对应的裂陷盆地的沉降速率(见图 3、4)略小;且均明显大于其上覆或下伏非烃源岩地层的沉积速率。对比同一盆地或同一拗陷中不同断陷的沉积速率(见图 4)发现,油气资源最丰富的断(凹)陷,在烃源岩沉积时的沉积速率均比同一盆地或坳陷的其他断陷的烃源岩沉积速率要大。如渤海湾盆地济阳坳陷中的东营断(凹)陷、苏北盆地的高邮凹陷、南襄盆地的泌阳凹陷、珠江口盆地的珠一凹陷(见图 4)。

上述新生代裂陷型盆地在烃源岩发育期均处于深水 - 较深水环境,表明该期沉降速率均大于同期沉积速率,从而确保了盆地或坳陷一直处于欠补偿的较深水环境和较广的可容纳空间,有利于沉积物快速充填埋藏和规模原始有机质的保存。



数据来源:渤海湾盆地据文献[13,15];苏北、南襄、江汉、百色盆地据文献[13];珠江口盆地据文献[16-17]。

图 4　中国东部及近海新生代裂陷型盆地沉积速率对比图

Fig. 4　Comparison of Cenozoic fissure basins in eastern and offshore China

2　中新生代大型坳陷型盆地

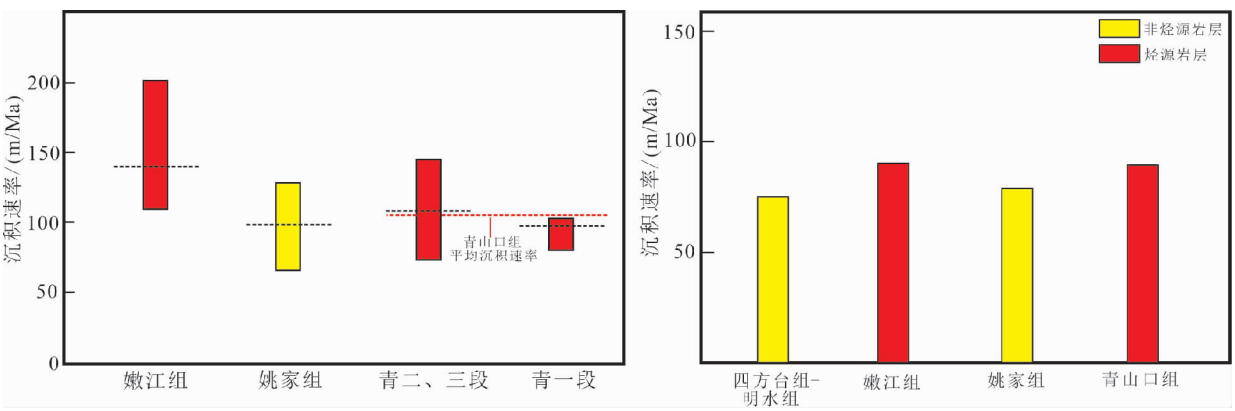
陆相坳陷型盆地一般发育在相对稳定的克拉通或地块基底之上[18],沉积范围较广,其沉积建造及厚度平面变化受断裂控制不明显,主要受气候、湖平面升降和沉降作用控制。本研究选取柴达木盆地、松辽盆地和鄂尔多斯盆地作为剖析案例,从烃源岩发育期的沉积速率入手,探讨其形成的动力环境。

2.1　松辽盆地

松辽盆地地跨中国东北三省,是中国最大的白垩系含油气盆地。盆地具有下断、上坳的叠合结构。本研究主要讨论盆地石油资源丰富的晚白

垩世坳陷阶段,该阶段发育了盆地两套重要的烃源岩。青山口组烃源岩是一套典型的深湖相黑色泥、页岩夹油页岩、泥灰岩的薄层,沉积时经历了深湖 - 半深湖(青一时段)到滨浅湖和水退型三角洲(青二、三时段)的环境变化,整体上是一水退过程[19-20]。嫩江组一、二段为深湖相灰黑色泥岩、泥灰岩、油页岩,夹杂灰色粉砂岩,嫩三、四、五段为灰绿、黑色泥岩、粉砂岩、砂岩,为湖相和三角洲相[21]。

松辽盆地白垩纪,大陆科学钻探计划通过多种方法综合研究对比,建立了完整的盆地白垩纪地层年代框架[22]。前人基于米兰科维奇旋回方法求得了松科 1 井上白垩统各段地层的沉积速率[23](见图 5):主力烃源岩嫩江组和青山口组沉积速率分别为 135 m/Ma 和 106 m/Ma,均大于相邻非烃源岩姚家组的 97 m/Ma。结合前人对松辽盆地白垩系各组地层时代及厚度的划分[22,24-25],本研究求得了松辽盆地上白垩统各组地层的沉积速率(见图 5),也显示出相同的趋势。



注:据文献[25]数据编图。

(a)松科 1 井上白垩统地层沉积速率对比图 (b)松辽盆地上白垩统各组地层沉积速率对比图

图 5 松辽盆地上白垩统沉积速率对比图

Fig. 5 Comparison of sedimentation rates of the Upper Cretaceous in the Songliao Basin

对松辽盆地的热演化史研究揭示,在晚白垩世,盆地具有较高的地热场背景,大地热流值和地温梯度均为最高;该时期也是烃源岩的主要发育时期。这表明,松辽盆地晚白垩世热力作用活跃,较高的热背景有利于烃源岩的发育和转化。

2.2 柴达木盆地

新生代柴达木盆地位于青藏高原的北部,主力烃源岩段为古近系下干柴沟组上段。本研究系统对比了近些年柴达木盆地多个新生代地层剖面的古地磁定年结果[26-29],综合分析了盆地西部富烃凹陷及邻近区诸剖面和钻孔所揭示的地层厚度[30-34]。所选用的剖面分别为柴西地区西岔沟、红沟子和七个泉剖面、柴北缘路乐河剖面、柴南缘长尾台剖面、盆地中部鸭湖剖面;钻孔位于柴西富烃凹陷地区。在此基础上,求取了盆地新生代主要地层的沉积速率(见表 1)。柴达木盆地新生代地层厚度变化大,沉积速率范围宽,可通过沉积速率范围和平均值来分析其沉积速率的变化趋势。其中,古近系下干柴沟组上段主力烃源岩的平均沉积速率为 270 m/Ma,明显大于其上下层段的沉积速率(见表 1)。其他研究者采取不同的方法所求得的沉积速率分别为 200 m/Ma[34] 和 207.5 m/Ma[35]。由此可见,下干柴沟组上段主力烃源岩沉积充填快,沉积速率大于 200 m/Ma。该盆地为典型的咸化湖盆,故其较高沉积速率是构造 - 气候 - 物源 - 咸化协同作用的结果。柴达木盆地新生代地层的沉积速率因地有别,这是对盆地构造、沉积环境和源汇系统在空间上变化较大、沉积中心随时间发展发生多次较大迁移的反映[34,36],也是不同文献、同一套地层沉积速率不同的主要原因。因此,采用各层组的平均沉积速率进行对比应更具代表性。

2.3 鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,为中生代—古生代多重叠合盆地[37];中上三叠统延长组长 7 段为主力油源岩(见图 1),富烃坳陷位于盆地西南部[38]。盆地中晚三叠世延长期为大型内陆湖泊,先后经历了长 10 ~ 长 8 期湖盆发育、长 7 期湖盆鼎盛、长 6 期萎缩、长 4 + 5 期短暂扩展、长 3 ~ 长 1 期湖盆萎缩到消亡的演变过程;盆地

沉积了厚达千米的河流 - 三角洲 - 湖相沉积组　　合。

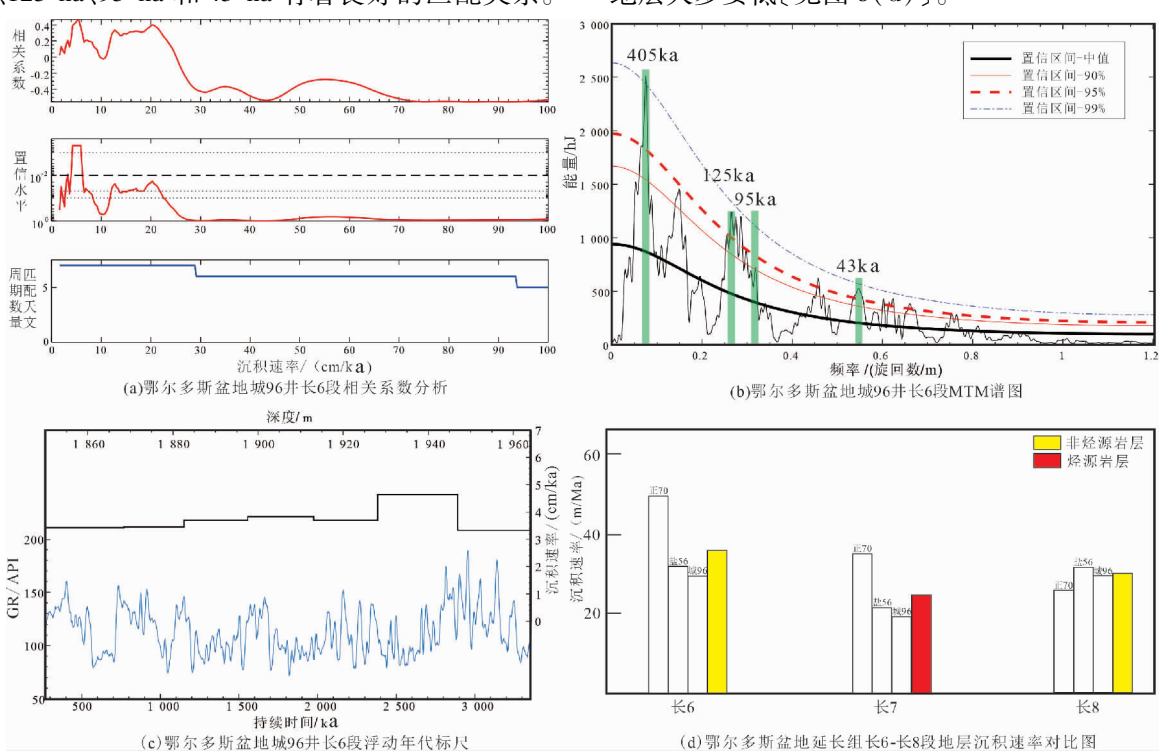
表 1　新生代柴达木盆地地层沉积速率表

Tab. 1　Formation sedimentation rate in Cenozoic Qaidam Basin

地层	年龄/Ma	厚度/m	沈积速率/(m/Ma)	平均沉积速率/(m/Ma)
上油砂山组	8.1 ~ 15.3	396 ~ 2 100	55 ~ 291.67	173.34
下油砂册山组	15.3 ~ 22	200 ~ 2 500	29.85 ~ 373.13	201.49
上干柴沟组	22 ~ 35.5	400 ~ 1 467	29.62 ~ 108	68.81
下干柴沟组上段	35.5 ~ 40.5	500 ~ 2 200	100 ~ 440	270
下干柴沟组下段	40.5 ~ 43.8	300 ~ 1 000	90.9 ~ 303.03	196.965

本研究在延长组富烃坳陷深湖相区内的不同地域,选取了 3 口有代表性的钻测井资料,采用米兰科维奇旋回理论方法,求取盆地延长组长 6 ~ 长 8 段的沉积速率。本研究利用 Acycle 软件包,对 3 口钻井的延长组 GR 曲线分层进行频谱分析及相关系数研究,综合识别米兰科维奇旋回,并计算沉积速率。分析和研究过程以城 96 井长 6 段为例介绍。通过频谱分析发现,在长 6 段(1 850 ~ 1 964 m)检测到了优势频率所对应的地层厚度为 11.742 7 m、3.634 6 m、2.544 3 m 和 1.780 2 m〔见图 6(b)〕,与晚三叠世标准天文周期 405 ka、125 ka、95 ka 和 43 ka 有着良好的匹配关系。经过天文年代调谐,约束长 6 段、长 7 段和长 8 段的平均沉积时限分别为 1.82 ~ 3.13 Ma、3.20 ~ 6.39 Ma 和 1.89 ~ 3.31 Ma。

结合相关系数(Coco)分析的结果〔见图 6(a)〕,综合确定城 96 井长 6 段的最佳沉积速率为 29 m/Ma,并建立了城 96 井长 6 段浮动天文年代标尺〔见图 6(c)〕。基于上述分析过程,获得 3 口井长 6 组、长 7 段和长 8 段的沉积速率分别为 29 ~ 49 m/Ma、18.3 ~ 35.9 m/Ma 和 26 ~ 32.6 m/Ma,平均速率分别为 36.9 m/Ma、25.7 m/Ma 和 29.3 m/Ma。长 7 段的沉积速率比上下相邻地层大多要低〔见图 6(d)〕。



(a)鄂尔多斯盆地城96井长6段相关系数分析　(b)鄂尔多斯盆地城96井长6段MTM谱图

(c)鄂尔多斯盆地城96井长6段浮动年代标尺　(d)鄂尔多斯盆地延长组长6-长8段地层沉积速率对比图

图 6　鄂尔多斯盆地延长组地层沉积速率计算与对比示意图

Fig. 6　Schematic diagram illustrating the calculation and comparison of sedimentation rates of the Yanchang Formation in the Ordos Basin

所研究地层的时代和发育时限是求取沉积速率两个关键参数。因此,对盆地延长组长 7 段凝灰岩及同期碎屑砂岩锆石年代学数据进行了统计整理和分析。测试的方法有 LA-MC-ICP-MS 方法[39-44],SHRIMP 定年方法[45-46]和较高精度的 TIMS 法[47-50]。结合沉积、地层等研究综合分析认

为,长 7 段持续沉积的时间约为 7. 5 Ma,与上述天文旋回分析的结果较接近。

鄂尔多斯盆地延长组长 7 段的沉积速率较低,与其所在的富烃坳陷的形成环境密切相关。该坳陷属后陆盆地类型,发育在华北扬子板块汇聚碰撞的仰冲板块后陆。后陆地区深部积聚了巨量俯冲物质,物能转换产生的超量动能向上拱涌耗散,浅部沉降形成该坳陷[51]。此时期富烃坳陷南邻秦岭地区,尚处于秦岭洋消减关闭、碰撞造山带初显阶段,整体范围较广、较高的山岭地貌尚未出现;长 7 期,盆地和湖盆沉积范围大,距盆地周邻边缘主蚀源区甚远。总之,对盆地南部延长期富烃坳陷而言,沉积物源供给不充足,是延长组,特别是长 6 ~ 长 8 段沉积速率较小的主要原因。这可从该套地层鲜有粗粒沉积,岩性以泥页岩和粉细砂岩为主得到佐证[52-53]。

3 陆相烃源岩形成的沉积速率及其主控因素

3.1 陆相烃源岩的沉积速率及其主控因素

陆相裂陷型和大型坳陷型盆地主力烃源岩发育期的沉积速率大多较快,一般大于其上下相邻和同期非烃源岩地层的沉积速率。其中,新生代裂陷盆地的沉积速率一般大于 200 m/Ma,最大可达 400 m/Ma(见图 2、4);坳陷型盆地一般在 90 ~ 200 m/Ma,或更大(见图 5、6,表 1),远大于海相烃源岩发育所需的 20 ~ 80 m/Ma 的理想沉积速率。唯鄂尔多斯盆地沉积速率小,在 18 ~ 36 m/Ma,平均 26 m/Ma(见图 6),这与该期坳陷改造属性和距物源区较远密切相关。

张瑞等对中国陆相与海相页岩层系沉积速率的统计研究[54],也得出陆相含油气盆地的沉积速率远大于海相的结果;且显示出随着地层时代变老,沉积速率大体呈减小的趋势。

影响沉积速率的因素复杂多样,主要受物源、水动力、沉积环境和沉降关系等因素控制。其中,物源供给量的影响最为直观,物源区的远近、岩石类型及地形、风化方式和强度等共同决定了沉积物的供给量,充足的物源供给会直接引起沉积速率的增大。例如,新生代柴达木盆地油砂山组在邻近一里坪地区的沉积速率可达 300 m/Ma 以上,显著大于其他区域,与该区处于距物源区较近的盆地多期堆积中心叠合的位置有关。水动力是盆地沉积物搬运的主要动力,水动力的强弱和搬运路径及主卸载地域分布,对沉积速率有直接的影响。如处于较大型江河入湖口和其流经途中及附近,沉积速率较快,且较粗粒沉积居多。不同的沉积环境,特别是气候、降雨量、湖盆规模及其内部分化程度、蚀源区及周邻植被发育状况等等,也会对沉积速率造成明显的影响。再如优质烃源岩常夹有膏盐层、沉凝灰层,或与之互层。对比分析揭示,咸化湖盆烃源岩地层的沉积速率明显大于半咸化湖盆;而后者又大于微(非)咸化湖盆的沉积地层,有时差值甚至能达到一个数量级(见图 7)。沉积地层中膏盐类物质的参与和膏盐夹层的形成,应为较快沉积速率做出了一定贡献。但这仅是一个表象或信号,膏盐的来源和其形成环境对快速沉积的影响可能更为重要。此外,盆地尺度的构造变动、隆降变化、事件沉积及其对前期沉积地层的改造和气候环境的变化等也会对沉积速率产生影响。如滑塌、滑坡和各类重力流沉积,会使局部沉积速率陡增,在求取正常沉积速率时应予剔除。事实上,地层沉积速率是地球内外动力系统耦合作用的结果。构造变动设定时空框架,物源供给提供物质基础,沉积环境决定了分配方式和特殊沉积类型,气候和海平面变化施加周期性调制,沉降速率及其与沉积速率的关系,总体控制水体规模及适度等沉积环境。在研究沉积速率对优质烃源岩发育的影响时,应甄别分析以上各种因素对烃源岩发育可能产生的影响,不能简单地对比沉积速率数值的大小。

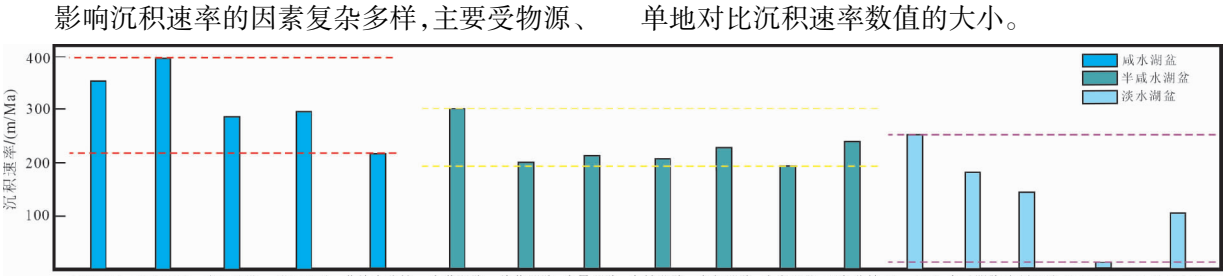


图 7 中国陆相典型含油气盆地咸水、半咸水、淡水湖盆烃源岩发育期沉积速率对比图

Fig. 7 Comparison of sedimentation rate of brackish and freshwater basin in continental basin in China

3.2　沉积速率与烃源岩有机质富集的关系

关于沉积速率与烃源岩发育或地层中有机质(TOC)富集的关系,目前研究尚少且认识不一,在海、陆相盆地也存在明显的差异[4]。有学者认为,低沉积速率可使地层中的有机质“浓缩”[55-58],但会延长有机质遭氧化而其中富氢组分被降解的时间[59-60];也有学者认为,高沉积速率一般有利于有机质的快速埋藏和保存,但却易于稀释地层中的有机质丰度[59-61]。海相沉积地层的有机碳含量随沉积速率的增大,呈先增加后减少的趋势,增减变化拐点的沉积速率约为 32 m/Ma,因岩石类型不同有所差异[62];现代海洋沉积物中有机碳增减变化的拐点约为 50 m/Ma[63]。最有利于海相优质烃源层形成的沉积速率为 20 ~80 m/Ma[59]。

对中国一些陆相盆地烃源岩的研究,也发现地层中有机碳含量随沉积速率的增大存在先增加后减少的现象。如有机碳增减变化拐点的沉积速率,在酒泉盆地青西凹陷下白垩统下沟组约为 120 m/Ma[64];二连盆地 8 个凹陷下白垩统腾格尔组约为 50 m/Ma,但不同凹陷过拐点后有机碳含量减少的快慢差别较大。在二连盆地,有机碳含量高的阿尔、乌里雅斯太、巴音都兰 3 个凹陷,沉积速率在 50 ~ 160 m/Ma,有机碳含量减少甚微[65];且在相对高沉积速率阶段(>50 m/Ma),古生产力较大的凹陷受沉积速率变化影响很小(见图 8)。

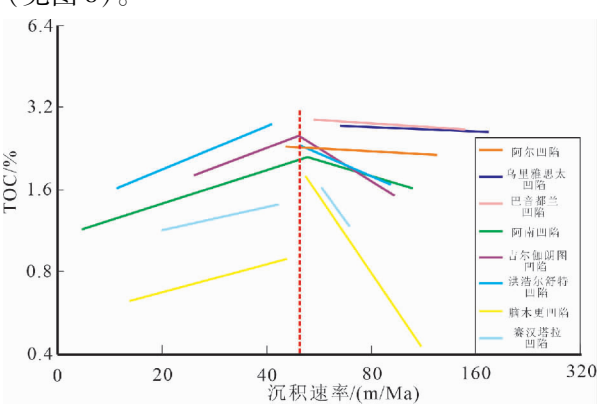


图 8　二连盆地烃源岩有机碳含量与沉积速率关系图(据文献[65]编图)

Fig. 8　Relationship diagram between organic carbon content and deposition rate of hydrocarbon source rocks in Erlian Basin

中国东部及近海等新生代裂陷盆地主力烃源岩形成时的沉积速率高达 200 ~400 m/Ma,甚或更高。如在渤海湾盆地东营凹陷,沙河街组三段和四上亚段的沉积速率为 300 m/Ma,有机碳质量分数在 3% ~5%[66]。鄂尔多斯盆地延长组长 7 段沉积速率为 18. 3 ~35. 9 m/Ma,表现为近似于海相页岩层系缓慢沉积的特点;对长 7 页岩段的研究显示,其有机碳质量分数0.31% ~31. 6%[67-68],平均值为 7. 83%,其有机碳含量分布范围宽,且平面上差异较大。

对松辽盆地松科一井的研究显示,相同或相近的沉积速率,有机碳含量差别颇大(见图 9)。有机碳含量受初级生产力影响显著,生产力较高的嫩江组和青一段主要为半深湖 - 深湖相沉积,水体较深,反映其沉降幅度较大且沉降速率大于沉积速率。本研究从沉积速率出发,旨在通过陆相盆地烃源岩较快沉积速率的结果,反推其发育期沉降速率更快、构造变动 - 深部作用活跃,形成较深水沉积 - 构造环境,致使生物超常勃发,初级生产力得到极大提高,进而揭示不同类型陆相盆地优质烃源岩形成的共性环境。对于陆相烃源岩而言,较深水环境和有机质超常勃发(即初级高生产力)是其形成的两大关键因素,单一的沉积速率(快或慢)与烃源岩发育或有机碳含量之间相关性较弱。

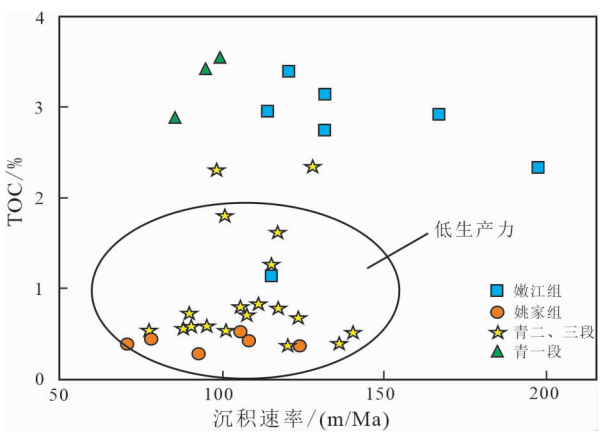


图 9　松辽盆地地层有机碳含量与沉积速率关系图(据文献[23]数据编图)

Fig. 9　Relationship between organic carbon content and deposition rate in Songliao Basin

由此可见,沉积速率对泥页岩地层中有机碳富集,即烃源岩形成的影响是有条件的,高或低沉积速率环境中烃源岩的形成仅是结果或可见的表象,应由表及里,探究其特别的形成动力环境或主控因素。

4 陆相烃源岩和富烃凹陷形成的动力环境——来自不同沉积速率的启示

裂陷和坳陷型陆相盆地的烃源岩均形成于深湖－较深湖相环境,即处于沉降速率普遍大于沉积速率的欠补偿沉积环境(见图 2、3、4)。

盆地或坳(凹)陷持续沉降与否及其沉降速率,取决于区域内动力地质作用。坳(凹)陷的快速沉降不仅促使沉积速率加快和较深水环境的形成,本身即是该区域构造活动增强、深部作用活跃的表现。这可由烃源岩发育时期所伴生的构造变动较强、深部岩浆热力活动频发、热液作用活跃、地热场较高、烃源岩夹有多层火山岩和沉凝灰层等所证实[67]。

4.1 富烃凹陷形成的动力环境

4.1.1 *较强烈的构造变动*

对中国东部陆相烃源岩发育期富烃凹陷和贫烃凹陷断层活动速率和基底沉降速率的统计分析结果显示(见图 10),富烃凹陷的控凹断层和沉降速率均明显大于贫烃凹陷[12],表明较强的构造变动与富烃凹陷的快速沉积、沉降同步发生,是新生代裂陷盆地优质烃源岩发育必不可少的条件。

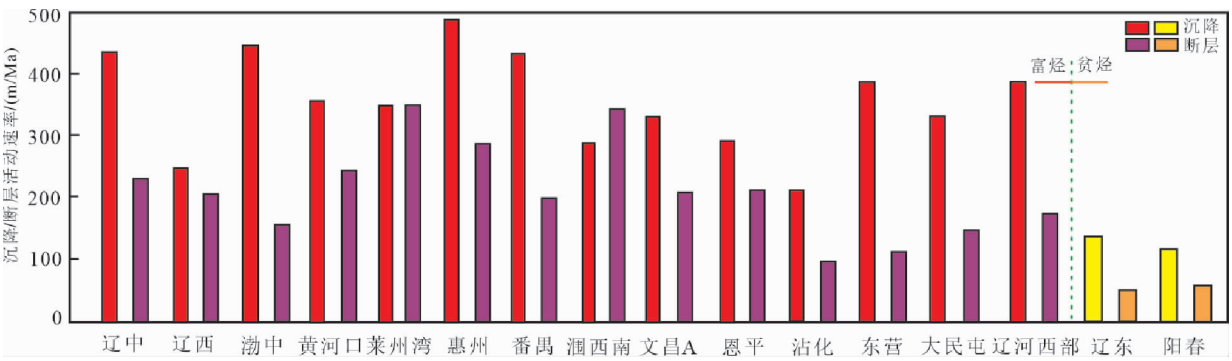


图 10 中国东部及近海陆相富烃、贫烃凹陷断层活动速率和基底沉降速率对比图(据文献[12]修改)

Fig. 10 Comparison of fault activity rate and base sedimentation rate in eastern and offshore China

在大型坳陷型盆地优质烃源岩发育时期,构造变动亦较强烈。前人通过对鄂尔多斯盆地大量地震资料和野外剖面的分析考察,发现了在延长组富烃凹陷发育阶段,有以下多种同期构造活动行迹存在[51,53]:①地震资料和野外剖面观察发现了大量同沉积构造变形,包括挤入构造、褶皱断裂以及延长组内广泛发育的构造裂缝;②湖盆底部古地貌起伏,湖盆整体扩张,水体加深,出现南陡北缓的格局,揭示了南部构造活动强烈;③事件沉积频发,凝灰岩夹层、震积岩和浊积岩在盆地延长组中广泛发育。对新生代柴达木盆地各时期构造沉降速率的模拟结果也显示,下干柴沟沉积时期,沉降速率较大、构造活动较强[69]。松辽盆地松科 1 井的研究揭示,青山口组中发育大量震积岩[70],表明青山口期不仅发生快速稳定的热沉降,同时伴有十分活跃的地震、断裂活动。

4.1.2 *活跃的深部岩浆－热液活动*

在中国新生代裂陷型盆地和部分中－新生代大型坳陷盆地的烃源岩发育期,深部作用活跃,岩浆热液流体上涌,深浅部物质和能量交换频繁,为生物生存繁衍提供了特殊的深部物质和环境。如在渤海湾盆地沙河街组沉积时期,盆地内部各个凹陷和凸起均发生多期幕式火山－热液活动,在地层中除夹有多层火山岩、凝灰岩夹层外,还发育鞍形白云石、硅质结核、热液诱导缝、脉状黄铁矿、岩石热液参数异常等直接证据,证实了该时期深部热液的高度活跃性[12,71]。珠江口盆地的钻井、地震资料也均揭示了文昌组沉积期火山岩广泛发育[12,72-73],表明火山活动在新生代裂陷盆地和富烃凹陷普遍发育。在中－新生代大型坳陷型盆地中,火山－热液活动同样屡见不鲜。鄂尔多斯盆地延长期深部热液作用活跃,烃源岩层系中发现多种与深部热液上涌有关的岩矿和地球化学异常,并发育多段火山灰夹层[51,53,68];地化指标揭示,当热液活动存在时,长 7 段有机质更为富集。事实上,在全球范围来看,三叠纪并非优质烃源岩发育的有利时期,但鄂尔多斯盆地仍产生了优质烃源岩,这应当与该时期高度活跃的深部热液作用密切相关。综合研究认为,延长期富烃凹陷是在华北—扬子陆块汇聚碰撞中,深部俯冲物质熔融、热能上涌形成的热－张性坳陷,构造活动明显,深部作用活跃[51]。此外,对松辽盆地的研究

显示,营城组发育期存在多期水下火山喷发活动,促进了优质烃源岩的形成[74]。对酒西盆地青西凹陷下沟组湖相"白烟型"喷流岩的研究也表明,下沟组巨厚"半深湖 - 深湖"相烃源岩发育受到深部热液活动的积极影响[75]。

4.1.3　较高的热演化背景

盆地较高的热背景对烃源岩形成和生烃转化有重要影响[4,67]。通过对中新生代陆相含油气盆地热史演化的对比分析[76-84],发现盆地主力烃源岩的发育期均经历了比正常盆地和所在盆地其他时期更高的地热背景。较高的热背景和地热场是形成优质烃源岩和富烃凹陷的必要条件[4,67]。这种较高热背景正是烃源岩发育时期活跃的构造背景以及火山活动、深部作用的直观反映。

由以上讨论可以得出,无论是沉积速率较高的裂陷盆地或坳陷盆地,还是沉积速率较低的鄂尔多斯盆地,尽管其沉积沉降速率和动力环境有所差异(见表 2),但总体而言,其富烃凹陷和其中优质烃源岩均是在明显的构造活动和活跃的深部作用动力环境中形成的。

表 2　中国典型陆相含油气盆地烃源岩发育期动力环境对比表

Tab. 2　Comparison of dynamic environment during developmental period of typical continental oil-bearing basins in China

盆地/凹陷名称	盆地类型	沉积 - 沉降速率/(m/Ma)	湖泊盐度	烃源岩发育期热背景	深部作用	特殊地质事件	湖盆营养水平
鄂尔多斯盆地	坳陷型	延长组长 7 段:25.7	淡水	稳定上升	有	火山喷发、古地震	超养
松辽盆地	坳陷型	嫩江组:89.3 青山口组:90	淡水 - 微咸水	稳定上升	有	火山喷发、古地震	超养 富养
柴达木盆地	坳陷型	下午柴沟组上段:270	咸水	稳定上升	无直接证据	咸化事件	富养
渤海湾盆地东营凹陷	裂陷型	沙河街组三段:300 沙河街组四段:300	微咸水—半咸水	81 ~ 88 W/m^2	有	火山喷发、古地震	富养 超养
珠江口盆地惠州凹陷	裂陷型	恩平组:199.4	淡水	100 W/m^2	有	火山喷发、古地震	富养

4.2　陆相烃源岩形成的主控因素——初级生产力勃发

陆相优质烃源岩的形成,有机质高生产力起到决定性作用,而生物的超常勃发是形成高生产力的前提条件。就陆相湖盆而言,造成某一时期生物超常勃发需要外部或特殊物质的介入,或特别的生态环境[4]。

古生产力代表着原始有机质的供给速率,通常用单位 g/(m^2 · a)来表示,充足的原始有机质供给是优质烃源岩形成的基础。对于陆相烃源岩而言,古生产力可根据生物类型分为初级和次级:初级生产力主要由浮游植物和边缘水生植物提供,次级生产力包括一些微体动物,如介形虫、腹足类等。目前,针对陆相湖盆古生产力的确定方法主要包括古生物法、同位素法、微量元素法和有机碳法。其中,有机碳法作为唯一定量确定陆相湖盆古生产力的方法被广泛应用。结合前人研究成果[85-90],本研究对中国陆相盆地古生产力和湖泊营养程度进行了统计分析(见表 2)。研究发现,在优质烃源岩发育期,所在湖盆的营养类型均属富养 - 超养型,表明处于高生产力的生物勃发状态。

沉降速率大于沉积速率的饥饿型环境有利于形成深湖 - 较深湖坳(凹)陷,促使藻类等浮游生物繁盛。同时,浮游生物及陆源有机质的快速堆积、分解耗氧作用导致沉积物表层为相对还原环境,形成一定程度的水体分层,利于有机质的保存,从而形成了具有高生烃潜力的烃源岩和富烃凹陷[83]。前已述及,较快沉积速率虽有利于有机质的保存,但会导致地层中有机质丰度的降低。所以,在陆相烃源岩发育时期,伴随高沉积、沉降速率的一定是高的初级生产力。换言之,该时期生物的生存应具有超常勃发繁盛的特点,产生了比平时多数倍甚至数十倍的有机质。

在陆相盆地富烃凹陷中,火山和深部热液活动十分活跃,为优质烃源岩发育提供必要的地质条件。一方面,大量的火山灰沉降和热液流体上涌,带来大量富营养物质,蕴含有诸如氮、磷等生

物营养元素,对促进生物细胞的生长具有重要的作用。现代海洋的调查研究发现,当水体处于缺氧环境时,磷元素的增加促进了海洋初级生产力的显著提高[91]。它们在短时间内注入湖泊水体中,造成了"施肥"般的效应,使得水生生物在短期内勃发疯长。现代环境研究证实,火山灰可促进浮游藻类大量繁盛,叶绿素含量增加的区域范围与火山灰的分布范围一致[91-92]。对现代海洋的调查也发现,深海热液喷口周围存在着丰富的生物群落[93]。这些研究表明,火山活动带来的火山灰和深部热液流体上涌会诱发水体藻类和一些水生生物的勃发生长,从而在短时间形成超富营养的有机质集中分布区,形成较高 - 极高的古生产力条件[94]。酒西盆地青西凹陷下沟组湖相"白烟型"喷流岩的发现就是热液活动促进优质烃源岩发育的直接证据[75]。

另一方面,火山和深部热液流体活动还会带来一些重要的金属(Fe、U、V、Mn 等)和非金属(H、S 等)元素,增强有机质的生烃潜力,提高了烃源岩的品质。如 Fe、Mn 元素能通过促进藻类的生长来为烃源岩提供更多的有机质母质[95]。再如 U 类放射性元素的加入,能够使有机质或无机水溶液中的含氢物质产生氢气[96],为生烃提供了丰富的外源氢。烃源岩加氢实验表明,外源氢的加入能够提高生烃量[97]。鄂尔多斯盆地延长组 7 段优质烃源岩就以富铀为特征。火山和深部热液活动一方面会诱发藻类勃发,同时所释放的大量硫化氢和二氧化硫等有毒气体和物质,会造成生物集群式的大规模死亡,短时间内为地层提供了丰富的有机质;此过程降解消耗了大量的氧气,造成湖盆底水的缺氧环境,有利于有机质的保存。火山喷发释放的大量气体和火山灰有相当一部分会溶于水体中,在重力分异的作用下,湖水分层,也会为有机质的保存提供良好的缺氧还原环境。在鄂尔多斯盆地长 7 段优质烃源岩发育期,湖盆底水间歇性还原的特征可能就与幕式的深部热液活动有关。

在优质烃源岩发育期,活跃的构造背景使得基底深大断裂活动较强,为深部热液的上涌提供了通道;活跃的火山活动和深部热液流体作用,使得盆地普遍具有较高的热背景。较高的热环境有利于生物的繁盛,这已被古今各类湖、海水体和大陆生物生存演化的调查和研究所证实。

综上所述,陆相盆地的优质烃源岩均形成于盆地发育的鼎盛时期,具有活跃的构造背景和深部作用,地温场较高,深部热液活动频发,大量的营养物质输入湖泊,从而促进了该时期生物的超常勃发繁盛,湖盆原始生产力极大提高,丰富的有机质弥补了较快或过慢沉积速率对有机质富集的不利影响,形成了规模优质烃源岩。

5 结论和认识

5.1 结论

1)陆相优质烃源岩发育期的沉积速率大多较快。裂陷型富烃凹陷一般大于 200 m/Ma,最大可达 400 m/Ma;坳陷型盆地多数达 90 ~ 200 m/Ma,或更高;远大于海相优质烃源岩发育所需的 20 ~ 80 m/Ma 的沉积速率;在盆地主力烃源岩发育期,其沉积速率大都比上、下相邻地层要高。

2)鄂尔多斯盆地长 7 段优质烃源岩发育期沉积速率较慢,仅为 18. 3 ~ 35. 9 m/Ma,低于上、下相邻地层,类似于海相地层的沉积速率。

3)陆相优质烃源岩形成于盆地发育的鼎盛时期,该期盆地或富烃坳(凹)陷的沉降速率普遍大于沉积速率,确保了烃源岩发育所需的较广阔深水环境和可容空间。

4)在陆相烃源岩发育期,无论盆地是裂陷型,还是坳陷型,其沉积速率很高还是较低,盆地或富烃坳(凹)陷均具有较活动的构造环境和活跃的深部背景,致使地热场较高,构造变动较强,岩浆和深部热液作用频发,为湖盆中生物繁盛勃发带来了大量的营养物质和热能,促使微生物超常勃发,湖水中原始生产力极大提高,形成了规模优质烃源岩。

5.2 尚需进一步探讨的问题

本研究从沉积速率入手,探讨陆相优质烃源岩形成的动力环境,提出较强的构造变动、深部热液作用、岩浆活动、较高地热场等活跃的深部作用,对陆相烃源岩的发育或高生产力的形成具重要作用。但是,对其过程机理和具体细节仍需通过多方资料论证、模型实验验证和深入探讨。源汇系统和沉降速率的动态平衡与优质烃源岩发育的定量关系目前尚不明确,需结合数值模拟与高分辨率古环境重建,加强多指标定量分析、跨区域对比及多学科整合,进一步揭示不同构造背景下源 - 汇 - 沉降 - 生产力之间的响应耦合关系及其时空演化规律,以期发展和完善陆相优质烃源岩

形成这一重大命题。

参考文献

[1] 黄第藩. 在华北地台下奥陶统地层中发现低成熟的碳酸盐岩烃源岩[J]. 石油勘探与开发,1992,19(4):108.
Huang D F. Low mature carbonate hydrocarbon source rocks were found in the Ordovician strata of North China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1992,19(4): 108.

[2] 张水昌,梁狄刚,张大江. 关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准[J]. 石油勘探与开发,2002,29(2):8-12.
Zhang S C, Liang D G, Zhang D J. Criteria for evaluating the abundance of organic matter in paleozoic hydrocarbons[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 8-12.

[3] 秦建中,钱志浩,曹寅,等. 油气地球化学新技术新方法[J]. 石油实验地质,2005,27(5):99-108.
QIN J Z, Qian Z H, Cao Y, et al. New techniques in oil and gas geochemical exploration[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(5): 99-108.

[4] 刘池洋,赵俊峰,马艳萍,等. 富烃凹陷特征及其形成研究现状与问题[J]. 地学前缘,2014,21(1):75-88.
Liu C Y, Zhao J F, Ma Y P, et al. Research status and problems of characteristics and formation of hydrocarbon rich depressions[J]. Earth Science Frontiers, 2014,21(1):75-88.

[5] 张涛,王琳霖,廖慧鸿,等. 沉积盆地古水深恢复方法与研究进展[J]. 沉积与特提斯地质,2024,44(3):582-599.
Zhang T, Wang L L, Liao H H, et al. Methods and research progress of paleo-water depth reconstruction in sedimentary basins[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024, 44(3): 582-599.

[6] Emmel B, Geiger M, Jacobs J, et al. Detrital apatite fission-track ages in Middle Jurassic strata at the rifted margin of W Madagascar: Indicator for a protracted resedimentation history[J]. Sedimentary Geology, 2006, 186(1): 27-38.

[7] 韩志宇,王非,师文贝. 沉积岩定年及应用:问题与展望[J]. 沉积学报,2022,40(2):360-379.
Han Z Y, Wang F, Shi W B. Dating and application for sedimentary rocks: Problems and prospects[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 360-379.

[8] 黄春菊. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状[J]. 地学前缘,2014,21(2):48-66.
Huang C J. Cytary stratigraphy and astronomical chronology and their current status in the Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 48-66.

[9] Li Y, Yang R. Astronomical calibration of a ten-million-year Triassic lacustrine record in the Ordos Basin, North China[J]. Sedimentology, 2023, 70(2): 407-433.

[10] 周荔青,刘池洋,陆黄生,等. 苏北盆地阜三段油气成藏规律[J]. 石油实验地质,2004,26(2):187-193.
Zhou L Q, Liu C Y, Lu H S, et al. Hydrocarbon accumulation rule of Fu 3 member in Subei Basin[J]. Experimental Petroleum Geology, 2004, 26(2):187-193.

[11] 龚再升,杨甲明,裴宗城,等. 中国近海大油气田[M]. 北京:石油工业出版社,1997:1-42.

[12] 米立军,张功成,刘志峰,等. 中国近海富油凹陷湖相优质烃源岩发育机制[J]. 石油学报,2023,44(3):405-419.
Mi L J, Zhang G C, Liu Z F, et al. Discussion on the development mechansim of lacustrine high-quality source rocks in oil-rich sags in offshore China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(3): 405-419.

[13] 刘彬,周小进,王果寿. 盆地演化阶段性与油气富集:以东部下第三系盆地为例[J]. 石油实验地质,2005,27(4):346-352.
Liu B, Zhou X J, Wang G S. Basin evolution stages and hydrocarbon enrichment: A case study of the eastern Tertiary basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(4): 346-352.

[14] 杜威,纪友亮,季梦瑶,等. 渤海湾盆地饶阳凹陷早渐新世高精度年代地层格架建立及意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(4):142-151.
Du W, Ji Y L, Ji M Y, et al. Establishment and significance of high-resolution Early Oligocene chronostratigraphic framework in Raoyang Sag Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2020, 44(4): 142-151.

[15] 李琪琪. 渤海湾盆地典型富烃凹陷物源气候协同作用与富有机质页岩发育机理[D]. 北京:中国地质大学,2023.

[16] 方竞男. 珠江口盆地第三系沉积体系演变与生储盖组合[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.

[17] 潘冬. 白云凹陷北坡珠江组沉积体系分析[D]. 武汉:长江大学,2015.

[18] 刘池洋,王建强,赵红格,等. 沉积盆地类型划分及其相关问题讨论[J]. 地学前缘,2015,22(3):1-26.

Liu C Y, Wang J Q, Zhao H G, et al. The classification of sedimentary basins and discussion on relevant issues[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 1-26.

[19] 王东坡,刘立. 大陆裂谷盆地层序地层学的研究[J]. 岩相古地理,1994,14(3):1-9.
Wang D P, Liu L. Study on sequence stratigraphy of continental rift basins[J]. Lithofacies and Paleogeography, 1994, 14(3): 1-9.

[20] 于利民. 松辽盆地大情字井地区青山口组一段夹层型页岩油甜点综合评价[D]. 大庆:东北石油大学,2023.

[21] Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, northeast China[J]. Basin Research, 2010, 22(1): 79-95.

[22] 吴怀春,李山,王成善,等. 松辽盆地白垩纪综合年代地层格架[J]. 地学前缘,2024,31(1):431-445.
Wu H C, Li S, Wang C S, et al. Integrated chronostratigraphic framework for Cretaceous strata in the Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(1): 431-445.

[23] 查宇铭,吴欣松,余达. 松辽盆地松科 1 井上白垩统烃源岩有机碳含量与沉积速率的关系[J]. 古地理学报,2016,18(5):857-864.
Zha Y M, Wu X S, Yu D. Relationship between organic carbon content and deposition rate of upper Cretaceous source rock in Songke 1, Songliao Basin[J]. Journal of Paleogography, 2016, 18(5): 857-864.

[24] 杨丽,林荣达,李向宜. 松辽盆地东部构造带白垩系沉积演化特征研究[J]. 科学技术与工程,2011,11(27):6544-6549.
Yang L, Lin R D, Li X Y. Sedimentary evolution characteristics of Cretaceous in the eastern Songliao Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(27): 6544-6549.

[25] 孟张勇. 松辽盆地西南部上白垩统地层对比及展布特征[J]. 西部探矿工程,2022,34(4):170-173.
Meng Z Y. Stratigraphic correlation and distribution characteristics of Upper Cretaceous in southwestern Songliao Basin[J]. West China Exploration Engineering, 2022, 34(4): 170-173.

[26] Sun Z M, Yang Z, Pei J, et al. Magnetostratigraphy of Paleogene sediments from northern Qaidam Basin, China: Implications for tectonic uplift and block rotation in northern Tibetan Plateau[J]. Earth Planet, 2005, 237(3): 635-646.

[27] 张伟林. 柴达木盆地新生代高精度磁性地层与青藏高原隆升[D]. 兰州: 兰州大学,2006.

[28] Lu H J, Xiong S F. Magnetostratigraphy of the Dahonggou section, northern Qaidam Basin and its bearing on Cenozoic tectonic evolution of Qilianshan and Altyn Tagh fault[J]. Earth Planet, 2009, 288(3): 539-550.

[29] Ji J, Zhang K, Clift P D, et al. High-resolution magnetostratigraphic study of the Paleogene-Neogene strata in the Northern Qaidam Basin: Implications for the growth of the Northeastern Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 2017, 46: 141-155.

[30] Miao Y F, Fang X M, Herrmann M, et al. Miocene pollen record of KC-1 core in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau and implications for evolution of the East Asian monsoon[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 299(1): 30-38.

[31] 夏国清. 柴达木盆地西南缘新生代构造隆升的沉积记录[D]. 成都:成都理工大学,2012.

[32] 鲍晶. 柴达木盆地沉积通量及元素地球化学记录的新生代风化剥蚀[D]. 兰州:兰州大学,2017.

[33] 郭佩. 柴达木新生代湖盆咸化环境演变及其烃源岩发育特征[D]. 西安:西北大学,2018.

[34] 宋世骏. 柴达木盆地新生代咸化湖盆细粒岩差异性发育机理及其地质意义[D]. 西安:西北大学,2022.

[35] 裴梓薇,吴颜雄,武云昭,等. 柴达木盆地英雄岭凹陷古近纪沉积速率研究及其油气勘探意义[C]// 中国石油新疆油田分公司,西安石油大学,陕西省石油学会. 油气田勘探与开发国际会议论文集Ⅲ. 中国石油青海油田分公司勘探开发研究院,2022.

[36] 刘池洋. 盆地动态演化研究的基础:原始盆地恢复——以柴达木盆地为例[C]// 赵重远,刘池洋,姚远. 含油气盆地地质学研究进展. 西安:西北大学出版社,1993:26-32.

[37] 刘池洋,赵红格,桂小军,等. 鄂尔多斯盆地演化改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报,2006,80(5):617-638.
Liu C Y, Zhao H G, Gui X J, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-638.

[38] 刘池洋,黄雷,赵俊峰,等. 改造型盆地油气赋存成藏理论体系纲要[J]. 地学前缘,2022,29(6):84-108.
Liu C Y, Huang L, Zhao J F, et al. Hydrocarbon occurrence and accumulation processes in reformed basins-theories outline[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 84-108.

[39] 邓秀芹,罗安湘,张忠义,等. 秦岭造山带与鄂尔多

斯盆地印支期构造事件年代学对比[J]. 沉积学报,2013,31(6):939-953.
Deng X Q, Luo A X, Zhang Z Y, et al. Comparison of tectonic events in Indo-Chinese period between Qinling orogenic belt and Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 51(3): 501-512.

[40] 张辉,彭平安,张文正. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 段凝灰岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成特征及其地质意义[J]. 岩石学报,2014,30(2):565-575.
Zhang H, Peng P A, Zhang W Z. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characterization and their geological significance of Chang 7 tuff of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 565-575.

[41] 王建强,刘池洋,李行,等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长 7 段凝灰岩形成时代、物质来源及其意义[J]. 沉积学报,2017,35(4):691-704.
Wang J Q, Liu C Y, Li H, et al. Geochronology potential source and regional implications of tuff intervals in Chang 7 Member of Yanchang Formation, South of Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(4): 691-704.

[42] Zhu R K. High-precision dating and geological significance of Chang 7 tuff zircon of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin in Central China [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1823-1834.

[43] 赵向东. 二叠纪末大灭绝后鄂尔多斯湖泊生态系统的恢复[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.

[44] 袁珍,李文厚,杨喜彦,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组事件沉积及其地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版),2019,49(3):406-416.
Yuan Z, Li W H, Yang X Y, et al. Event deposition and geological significance of the Triassic Extension Formation in the Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(3): 406-416.

[45] 王多云,辛补社,杨华,等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国科学(地球科学),2014,44(10):2160-2171.
Wang D Y, Xin B S, Yang H, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age and geological implications of tuff at the bottom of Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 44(10): 2160-2171.

[46] 辛补社,杨华,付金华,等. 甘肃靖远宝积山地区上三叠统南营儿群底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义[J]. 地质论评,2013,59(2):267-273.
Xin B S, Yang H, Fu J H, et al. SHRIMP U-Pb zircon age and its stratigraphic significance of tuff at the bottom of the Upper Triassic Nanying'er Group, Mount Baoji Area, Jingyuan County, Gansu Province[J]. Geological Review, 2013, 59(2): 267-273.

[47] Liu J, Ramezani J, Li L, et al. High-precision temporal calibration of Middle Triassic vertebrate biostratigraphy: U-Pb zircon constraints for the Sinokan-nemeyeria Fauna and Yonghesuchus [J]. Vert PalAsiat, 2017, 55: 1-9.

[48] 邓胜徽,卢远征,罗忠,等. 鄂尔多斯盆地延长组的划分、时代及中上三叠统界线[J]. 中国科学(地球科学),2018,48(10):1293-1311.
Deng S H, Lu Y Z, Luo Z, et al. Subdivision and age of the Yanchang Formation and the Middle-Upper Triassic boundary in Ordos Basin, North China[J]. Science China(Earth Sciences), 2018, 48(10): 1293-1311.

[49] Zou C, Zhu R, Chen Z Q, et al. Organic-matter-rich shales of China [J]. Earth Science Reviews, 2019, 189: 51-78.

[50] Cui J W, Zhu R K, Zhang Z Y, et al. High resolution ID-TIMS redefines the distribution and age of the main mesozoic lacustrine hydrocarbon source rocks in the Ordos Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2023, 97(2): 581-588.

[51] 刘池洋,王建强,邱欣卫,等. 鄂尔多斯盆地延长期富烃坳陷形成的动力学环境与构造属性[J]. 岩石学报,2020,36(6):1913-1930.
Liu C Y, Wang J Q, Qiu X W, et al. Geodynamic environment and tectonic attributes of the hydrocarbon-rich sag in Yanchang Period of Middle-Late Triassic, Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1913-1930.

[52] 邓秀芹,楚美娟,王龙,等. 中晚三叠世鄂尔多斯盆地两期沉降及其形成机制[J]. 石油勘探与开发,2024,51(3):501-512.
Deng X Q, Chu M J, Wang L, et al. Two stages of subsidence and its formation mechanisms in Mid-Late Triassic Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 501-512.

[53] 邱欣卫,刘池洋,毛光周,等 鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物岩石地球化学特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2011,36(1):139-150.
Qiu X W, Liu C Y, Mao G Z, et al. Geochemical characteristics of volcanic ash deposits in the Yanchang Formation of Ordos Basin[J]. Earth Sciences (Journal

of China University of Geosciences), 2011, 36 (1): 139-150.

[54] 张瑞,金之钧,朱如凯,等. 中国陆相富有机质页岩沉积速率研究及其页岩油勘探意义[J]. 石油与天然气地质,2023,44(4):829-845.
Zhang R, Jin Z J, Zhu R K, et al. Investigation of deposition rate of terrestrial organic-rich shales in China and its implications for shale oil exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 829-845.

[55] Rullkotter J Z. Organic matter: The driving force for early diagenesis[C]//Schulz H D, Zabel M. Marine Geochemistry. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999: 129-172.

[56] Schulte S, Kai M, Rullkötter J. Organic matter preservation on the Pakistan continental margin as revealed by biomarker geochemistry[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(10): 1005-1022.

[57] 腾格尔,刘文汇,徐永昌,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相沉积有效烃源岩的判识[J]. 自然科学进展,2004,14(11):42-49.
Teng G E, Liu W H, Xu Y C, et al. Identification of effective Marine hydrocarbon source rocks in Ordovician system in Ordos Basin [J]. Advances in Natural Science, 2004, 14(11): 42-49.

[58] 张水昌,张宝民,边立曾,等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地学前缘,2005,12(3):39-48.
Zhang S C, Zhang B M, Bian L Z, et al. Control factors of Marine hydrocarbon source rock development in China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 39-48.

[59] 秦建中,腾格尔,付小东. 海相优质烃源岩评价与形成条件研究[J]. 石油实验地质,2009,31(4):366-378.
Qin J Z, Teng G E, Fu X D. Research on the evaluation and formation conditions of marine high-quality hydrocarbon source rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 366-378.

[60] 蔡进功,徐金鲤,杨守业,等. 泥质沉积物颗粒分级及其有机质富集的差异性[J]. 高校地质学报,2006,12(2):234-241.
Cai J G, Xu J L, Yang S Y, et al. The fractionation of an argillaceous sediment and difference in organic matter enrichment in different fractions[J]. Geological Journal of China University, 2006, 12(2): 234-241.

[61] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1986.

[62] Lynne E, Ibach J. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments[J]. AAPG Bulletin, 1980, 66(2): 170-188.

[63] Tyson R V. Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: Some results of a modelling study[J]. Organic Geochemistry, 2001, 32(2): 333-339.

[64] Chen G, Gang W Z, Tang H Z, et al. Astronomical cycles and variations in sediment accumulation rate of the terrestrial Lower Cretaceous Xiagou Formation from the Jiuquan Basin, NW China[J]. Cretaceous Research, 2019, 109: 104156.

[65] Ding X J, Liu G D, Zha M, et al. Relationship between total organic carbon content and sedimentation rate in ancient lacustrine sediments: A case study of Erlian Basin, northern China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 149: 22-29.

[66] 赵文. 东营凹陷沙河街组超压与油气成藏作用研究[D]. 武汉:中国地质大学,2022.

[67] 刘池洋,黄雷,张东东,等. 石油贫富悬殊的成因:来自华北克拉通东部南北新生代盆地的启示[J]. 中国科学(地球科学),2018,48(11):1506-1526.
Liu C Y, Huang L, Zhang D D, et al. Genetic causes of oil-rich and poor reservoirs: Implications from two Cenozoic basins in the eastern North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(11): 1506-1526.

[68] Zhang W Z, Yang W W, Xi L Q. Controls on organic matter accumulation in the Triassic Chang 7 lacustrine shale of the Ordos Basin, central China[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 183: 38-51.

[69] 胡晓燚. 柴达木盆地新生代构造沉降与机制模拟[D]. 杭州:浙江大学,2022.

[70] 王国栋. 松辽盆地上白垩统旋回地层与坳陷盆地的沉积演化[D]. 长春:吉林大学,2010.

[71] Yin J, Xu C, Hao F, et al. Controls on organic matter enrichment in source rocks of the Shahejie Formation in the southwestern Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2020, 560: 110026.

[72] 庞雄,郑金云,梅廉夫,等. 先存俯冲陆缘背景下南海北部陆缘断陷特征及成因[J]. 石油勘探与开发,2021,48(5):1069-1080.
Pang X, Zheng J Y, Mei L F, et al. Characteristics and origin of continental marginal fault depressions under the background of preexisting subduction continental margin, northern South China Sea, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 1069-1080.

[73] 田立新. 珠江口盆地惠州凹陷转换体控沉控储特性及其油气地质意义[J]. 地球科学,2021,46(11):4043-4056.
Tian L X. Sedimentary-reservoir characteristics under control of transfer model and implications for hydrocarbon exploration in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2021, 46(11): 4043-4056.

[74] 单玄龙,李吉焱,陈树民,等. 陆相水下火山喷发作用及其对优质烃源岩形成的影响:以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例[J]. 中国科学(地球科学),2014,44(12):2637-2644.
Shan X L, Li J Y, Chen S M, et al. Subaquatic volcanic eruptions in continental facies and their influence on high quality source rocks shown by the volcanic rocks of a faulted depression in Northeast China[J]. Science China (Earth Sciences), 2013, 56: 1926-1933.

[75] 文华国. 酒西盆地青西凹陷下沟组湖相"白烟型"喷流岩研究[D]. 成都:成都理工大学,2005.

[76] 许威. 渤海湾盆地中—新生代热体制与岩石圈减薄研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2017.

[77] 袁玉松,朱传庆,胡圣标. 江汉盆地热流史、沉积构造演化与热事件[J]. 地球物理学进展,2007,49(3):934-939.
Yuan Y S,Zhu C Q,Hu S B. Heat flow history tectono-sedimentary evolutionand thermal events of the Jianghan Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2007,22(3): 406-416.

[78] 江兴歌,廖宗廷,陈跃昆,等. 百色盆地田东坳陷热演化研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(3):332-336.
Jiang X G,Liao Z T,Chen Y K,et al. Thermal evolutionin Tiandong depression Baise Basin[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(3): 332-336.

[79] 李志强,杨波,王军,等. 南黄海盆地中新生界湖相烃源岩地球化学特征及生烃史[J]. 石油与天然气地质,2022,43(2):419-431.
Li Z Q, Yang B, Wang J, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation history of Mesozoic-Cenozoic lacustrine source rocks in the South Yellow Sea Basin,off shore eastern China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 419-431.

[80] 胡杰,龙祖烈,黄玉平,等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造热演化模拟[J]. 地球物理学报,2021,64(5):1654-1665.
Hu J, Long Z L, Huang Y P, et al. Cenozoic tectonic-thermal evolution simulation of Baiyun Sag in the Pearl River Estuary Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(5): 1654-1665.

[81] 祁凯. 华北克拉通中西部中新生代岩石圈热流变结构及深部岩浆热力作用过程[D]. 西安:西北大学,2021.

[82] 付健,李思其,贾小江,等. 松辽盆地中央坳陷区中—新生代岩石圈厚度演化[J]. 地质科学,2023,58(3):798-809.
Fu J, Li S Q, Jia X J, et al. Mesozoic-Cenozoic lithospheric thickness evolution in the central depression of Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica), 2023, 58(3): 798-809.

[83] 李宗星,邱楠生,马寅生,等. 柴达木盆地东部古生代以来构造热演化[J]. 地学前缘,2017,24(3):157-167.
Li Z X, Qiu N S, Ma Y S, et al. Tectonic-thermal evolution since the Palaeozoic period in the eastern Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 157-167.

[84] 陈梅涛,汤良杰,杨宁,等. 四川盆地北部热史波动模型的建立和应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005,20(6):24-27,7.
Chen M T, Tang L J, Yang N, et al. Establishment and application of the thermal wave model of the deposition in the northern Sichuan Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2005, 20(6): 24-27, 7.

[85] Qiu Z, Zou C N, Benjamin J W, et al. A nutrient control on expanded anoxia and global cooling during the Late Ordovician mass extinction[J]. Communications Earth & Environment, 2022, 3(1): 1-9.

[86] 查宇铭. 松辽盆地松科 1 井上白垩统优质烃源岩分布及主控因素[D]. 北京:中国石油大学(北京),2016.

[87] 徐思渊. 柴达木盆地一里坪地区新近纪咸化湖相烃源岩有机质富集模式研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2018.

[88] 赵牛斌. 中国近海湖相烃源岩正反演综合评价及发育模式[D]. 北京:中国地质大学,2022.

[89] 刘传联,徐金鲤. 生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例[J]. 沉积学报,2002, 20(1):144-150.
Liu C L, Xu J L. Estimation method on productivity of oil producing lake and a case study[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 144-150.

[90] Katz B J. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks: An update[J]. AAPG Studuies in Geology, 1995, 40: 61-79.

[91] 赵岩. 火山物质特征化合物对烃源岩生烃演化的影响[D]. 西安:西北大学,2018.

[92] Hamme R C, Webley P W, Crawford W R, et al. Volcanic ash fuels anomalous planktonbloom in subarctic northeast Pacific[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(19): L19604.

[93] Monika B,Sabine G, Andre L O, et al. Animal life in the shallow subseafloor crust at deep-sea hydrothermal vents[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 8466.

[94] 刘全有,李鹏,金之钧,等. 湖相泥页岩层系富有机质形成与烃类富集:以长 7 为例[J]. 中国科学(地球科学),2022,52(2):270-290.
Liu Q Y, Li P, Jin Z J, et al. Organic-rich formation and hydrocarbon enrichment of lacustrineshale strata: A case study of Chang 7 Member[J]. Science China (Earth Sciences), 2022, 65(1): 118-138.

[95] 刘全有,朱东亚,孟庆强,等. 深部流体及有机无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. 中国科学(地球科学),2019,49(3):499-520.
Liu Q Y, Zhu D Y, Meng Q Q, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction[J]. Science China (Earth Sciences), 2019, 62: 507-528.

[96] 王文青. 烃源岩系辐射生氢模拟实验及其油气地质意义[D]. 西安:西北大学,2019.

[97] 金之钧,蔡立国. 中国海相层系油气地质理论的继承与创新[J]. 地质学报,2007,81(8):1017-1024.
Jin Z J, Cai L G. Inheritance and innovation of marine petroleum geological theory in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1017-1024.

(编 辑 雷雁林)