

中国大陆相富有机质页岩沉积速率研究及其页岩油勘探意义

张瑞^{1,2,3}, 金之钧^{1,2,3}, 朱如凯⁴, 李明松^{2,3}, 惠潇⁵, 魏韧^{1,2}, 贺翔武^{1,2}, 张谦^{1,2,3}

(1. 北京大学能源研究院, 北京 100871; 2. 北京大学地球与空间科学学院造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 3. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 5. 中国石油长庆油田分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:页岩的有机质丰度和纹层类型是页岩油勘探研究的重点内容。中国大陆相富有机质页岩层系的沉积相变复杂且非均质性强, 沉积速率的准确判识面临许多挑战。中国典型陆相盆地富有机质页岩的沉积速率多在 5 cm/kyr 以上, 咸化湖盆富有机质页岩层系沉积速率最高可达 40 cm/kyr。高精度年代学框架结合旋回地层学统计调谐可以追踪沉积速率随地层深度的变化, 而页岩的相对沉积速率可以通过稀土元素配分模式、晶体粒径分布理论和星际尘埃特征元素丰度等方法判识。不同类型或不同时代的地层序列沉积速率比较, 需要考虑地层完整性和差异压实等干扰因素。沉积速率是页岩有机质富集的重要影响因素, 其对有机质稀释的临界值通常低于 5 cm/kyr。水动力条件和水体盐度影响碎屑颗粒的絮凝作用, 不同类型细粒沉积物的沉积速率差异有利于纹层结构的形成。页岩沉积速率研究需要融合包括地质年代学、岩石学、旋回地层学、地球化学和沉积物理模拟在内的先进理论和方法, 以深入了解页岩沉积演化机理。揭示陆相页岩沉积速率与页岩油富集之间的内在联系, 对页岩油勘探具有一定的指导意义。

关键词:米兰科维奇旋回; 旋回地层学; 沉积速率; 有机质富集; 页岩纹层; 淡水湖盆; 咸化湖盆; 页岩油勘探

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Investigation of deposition rate of terrestrial organic-rich shales in China and its implications for shale oil exploration

ZHANG Rui^{1,2,3}, JIN Zhijun^{1,2,3}, ZHU Rukai⁴, LI Mingsong^{2,3}, HUI Xiao⁵, WEI Ren^{1,2}, HE Xiangwu^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2,3}

(1. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 5. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: The abundance of organic matter and the types of shale laminae are the key in shale oil exploration. The sedimentary facies of terrestrial shales features complex variation and strong heterogeneity, making accurate identification of deposition rate facing more challenges. The deposition rates of organic-rich shales in typical terrestrial basins of China are mostly above 5 cm/kyr, and those of the organic-rich shales in saline lacustrine basins may reach up to 40 cm/kyr. The high-precision chronostratigraphic framework combined with the statistical tuning of cyclostratigraphy can trace the variation of deposition rate with burial depth. The relative deposition rate of shales can be determined by the rare earth element (REE) assemblage pattern, crystal size distribution, and the abundance of typical interstellar dust elements, etc. Comparison of deposition rates of different types or ages of stratigraphic sequences has to take perturbations such as stratigraphic integrity and differential compaction into consideration. Deposition rate is an important factor influencing the enrichment of organic matter in shale, and the critical threshold for organic matter dilution by deposition rate is usually less than 5 cm/kyr. The flocculation of sediment particles is usually under the effect of hydrodynamic conditions and water salinity, and the various deposition rates for different types of fine-grained

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-05-30。

第一作者简介: 张瑞(1990—), 男, 博士、助理研究员, 页岩油气富集机理、旋回地层学。E-mail: ruizhangxu@pku.edu.cn。

通信作者简介: 金之钧(1957—), 男, 教授、中国科学院院士, 石油地质理论和能源战略研究。E-mail: jinzhj1957@pku.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42090025, 42102166)。

sediment are conducive to the formation of shale laminae. The study of deposition rate requires an integration of advanced theories and methods, including geochronology, petrology, cyclostratigraphy, geochemistry, and physical simulation of sedimentation, to gain a deeper understanding of the mechanisms of shale deposition and evolution. Revealing the interrelationship between terrestrial shale deposition rate and shale oil accumulation is of certain guiding significance to shale oil exploration.

Key words: Milankovitch cycle, cyclostratigraphy, deposition rate, organic matter enrichment, shale lamina, freshwater lacustrine basin, saline lacustrine basin, shale oil exploration

引用格式: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. DOI: 10. 11743/ogg20230403.

ZHANG Rui, JIN Zhijun, ZHU Rukai, 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. DOI: 10. 11743/ogg20230403.

沉积速率主要指沉积物的堆积速率,是盆地沉积充填快慢程度的反映,通常以 cm/kyr 单位表示^[1-3]。研究沉积速率在地质历史时期的变化,对于分析页岩发育机理、有机质富集规律、纹层结构成因及组合类型等具有重要意义^[4-7]。

陆相盆地富有机质页岩层系蕴含丰富的页岩油资源^[8-12]。中国陆相富有机质页岩层系主要分布在多个淡水湖盆或咸化湖盆内(图1),形成于二叠纪、三叠纪、侏罗纪、白垩纪、古近纪和新近纪等多个地质年代,具有多旋回发育的特点^[13-16]。其层位主要包括渤海湾盆地古近系沙河街组与孔店组、江汉盆地古近系潜江组、南襄盆地古近系核桃园组、柴达木盆地古近系下干柴沟组、松辽盆地白垩系嫩江组与青山口组、酒泉盆地白垩系下沟组、四川盆地侏罗系自流井组大安寨段、四

川盆地三叠系须家河组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段(长7段)、准噶尔盆地二叠系芦草沟组与风城组等。由于湖盆演化过程中不可避免地受到基底升降、湖平面变化以及气候旋回变化等环境因素影响,页岩层系广泛发育陆源碎屑岩夹碳酸盐岩、混积岩等,沉积相变复杂,非均质性强,导致沉积速率的准确判别面临许多挑战。

近年来,随着旋回地层学与天文年代学的广泛应用,为富有机质页岩层系的沉积速率提供了定量估算和可视化研究手段^[17-21]。尽管已有很多文献报道了中国不同地质年代的页岩层系沉积速率,但多数是针对单一盆地(或凹陷)开展的研究,尚缺乏系统化的总结和层系间差异的定量化比较。本文旨在总结不同类型陆相盆地富有机质页岩层系沉积速率变化规律,以及

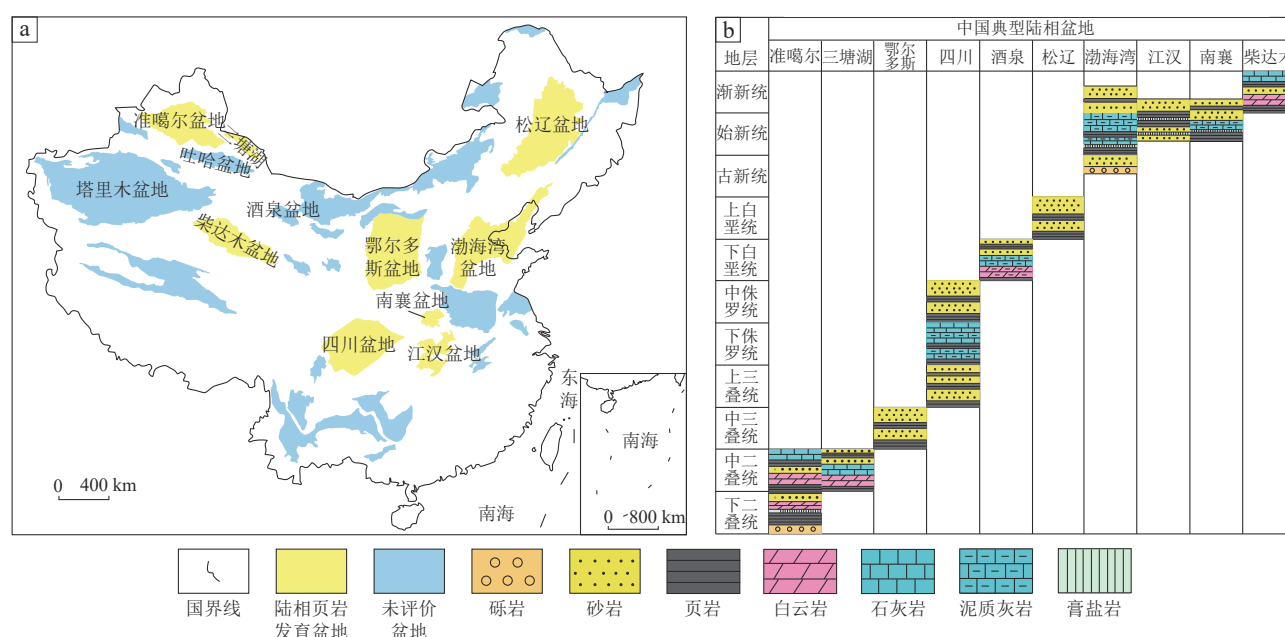


图1 中国陆相页岩油发育的典型盆地(a)及其地层序列(b)^[10,14,16]

Fig. 1 Typical basins (a) and stratigraphic sequences (b) of terrestrial shale oil in China^[10, 14, 16]

沉积速率的研究方法和存在问题。同时探讨沉积速率对有机质丰度和页岩纹层类型发育的影响,展望沉积速率研究的发展方向及对陆相页岩油勘探的指导意义。

1 中国富有机质页岩层系沉积速率

1.1 重点页岩层系沉积速率及其特征

本文对中国14套陆相富有机质页岩层系的沉积速率进行了深入调研(表1),同时对比了至少6套海相富有机质页岩层系的沉积速率(表2)。沉积速率数据主要由旋回地层学与天文年代学方法获得,区间范围越大表明沉积速率的波动越大。统计结果总体呈现3个规律。

1) 随着地质年代由老到新,沉积速率大致呈现升高的趋势(图2)。新生代以来发育的渤海湾盆地沙河街组^[22-24]、南襄盆地核桃园组^[25]等沉积速率多在10.0~20.0 cm/kyr。古生代—中生代发育的准噶尔盆地二叠系芦草沟组^[26]、四川盆地三叠系须家河组^[27]、四川盆地侏罗系自流井组大安寨段^[28]、松辽盆地白垩系嫩江组^[29]与青山口组^[30]沉积速率多在7.0~15.0 cm/kyr。而鄂尔多斯盆地三叠系长7段沉积速率最低,通常在4.0~5.0 cm/kyr^[31-32]。

2) 中国海相页岩沉积速率多在3.0 cm/kyr以下,比陆相页岩沉积缓慢。四川盆地五峰组—龙马溪组^[33]、鄂尔多斯盆地平凉组^[34]、塔里木盆地萨尔干组^[35]、扬子地台大塘坡组^[36]、华北地台下马岭组^[37]与洪水庄组^[38]等黑色页岩广泛发育的层位,对应海相层序的凝缩段,沉积速率非常缓慢。

3) 咸化湖盆页岩层系沉积速率普遍比淡水湖盆页岩层系沉积速率高,特别是富含蒸发岩矿物的碱湖地层的沉积速率会更高(图3)。例如,柴达木盆地干柴沟组^[39]、渤海湾盆地孔店组^[40]、江汉盆地潜江组^[41]、酒泉盆地青西凹陷下沟组^[42]、准噶尔盆地玛湖凹陷风城组^[43-44]等沉积厚度巨大,沉积速率波动剧烈且显著升高(最高可达40.8 cm/kyr)^[40,45]。

1.2 页岩沉积速率的控制因素

中国不同地质年代的陆相富有机质页岩层系的沉积速率具有一定差异,这取决于多种因素,如盆地的构造属性、水文地质条件、气候变化和物源输入等。大型淡水湖盆普遍具有相对稳定的构造背景,地层平缓,并形成深湖背景下的三角洲前缘—前三角洲—浊积扇细粒

沉积体系,物源供给充分,沉积速率平稳,富有机质页岩呈广覆式沉积^[12,15]。例如,鄂尔多斯盆地长9段半深湖相到长7段深湖相的演化过程中,半深湖—深湖面积达到 $10\times 10^4\text{ km}^2$,最大古水深接近150 m,为页岩油的大规模富集提供了优越的地质背景^[13]。咸化湖盆通常为构造活动强烈的小型富生烃凹陷,以内源沉积为主,胶结成岩作用迅速,导致地层序列平均沉积速率增加且波动剧烈,富有机质页岩层系的沉积厚度巨大。例如,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩层系累积厚度超过350 m,玛湖凹陷风城组则发育了一套厚达千米的碱湖背景下碳酸盐型混积岩沉积体系^[43-44]。

地球轨道周期主要通过日照量变化驱动温室期—冰室期的气候旋回^[30,46-48]。相对温暖、湿润的气候条件下,陆表径流增加,控制陆源碎屑物质的搬运速率。三叠纪温室期,鄂尔多斯盆地深湖—半深湖环境中发育了长7段烃源岩,其沉积过程缓慢^[31-32],甚至接近海相页岩的沉积速率。极热气候环境降水量较少,而强烈的蒸发作用形成了高盐度水体。例如渤海湾盆地济阳坳陷孔店组的烃源岩沉积可能是古新世—始新世极热事件(PETM; 约56 Ma)的陆相响应^[49],沉积速率高达23.6~40.8 cm/kyr^[40,45]。这一时期全球范围的沉积岩系普遍具有较高的沉积速率^[50-52]。

2 沉积速率研究方法

2.1 绝对年龄框架约束平均沉积速率

根据地层厚度资料和高精度年代地层格架,可以准确厘定平均沉积速率。确定绝对年龄常使用生物地层学、磁性地层学及放射性同位素年代学方法,宇宙射线成因核素定年和光释光测年等也是重要补充^[32,53-54]。对于深时地层剖面,凝灰岩中的锆石是尤为难得的U—Pb定年样品。目前主要发展了3种锆石U—Pb定年方法:激光剥蚀—等离子体质谱法(LA-ICPMS)、二次离子质谱法(SIMS)以及同位素稀释—热电离质谱法(ID-TIMS)等^[53,55]。

在缺少凝灰岩夹层的沉积岩系中开展直接定年已有很多探索。低温沉积成岩环境下,沉积岩中发育的伊利石、钾长石、方解石和海绿石等自生矿物是重要的地质年代学计,可尝试采用K—Ar法、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法和Rb—Sr法直接定年。海相生物的软组织在早期成岩作用过程中会被亲U的磷酸盐交代,对磷酸盐化石(如牙形石、双壳模)开展LA-ICPMS原位U—Pb定年,国际上已有较成功的范例^[58]。新发展起来的黑色页岩Re—Os同

表1 中国典型陆相富有机质页岩层系地质特征与沉积速率

Table 1 Geological characteristics and deposition rates of typical continental organic-rich shale sequences in China

盆地/地区	地层	地质年代	参考年龄/Ma	盆地环境	岩性组合	累积厚度/m	TOC/%	井位或剖面	沉积速率/(cm/kyr)	文献来源
柴达木盆地英雄岭凹陷	下干柴沟组上段	渐新世	33.9~30.1	咸水-盐湖	泥页岩、碳酸盐岩、混积岩	1 000~1 500	0.6~2.7	C2-4井、S62井	17.0~34.0	[39]
渤海湾盆地饶阳凹陷	沙河街组一段	渐新世	31.9~28.9	半咸水-咸水	灰质泥页岩夹砂岩、混积岩	10~240	0.4~6.2	N62井	9.1~22.2	[24]
渤海湾盆地东营凹陷	沙河街组三段	始新世	42.5~42.0	半咸水-咸水	灰质泥页岩夹砂岩、混积岩	300~1 000	1.5~10.0	FY1井	7.0~13.1	[22]
渤海湾盆地东濮凹陷	沙河街组三段至一段	始新世-渐新世	42.5~28.9	半咸水-咸水	灰质泥页岩夹砂岩、混积岩	1 000~2 000	0.5~7.8	P140井	10.0~15.0	[23]
渤海湾盆地东营凹陷	孔店组	古新世-始新世	65.6~50.8	咸水-盐湖	灰质泥页岩、砂岩、膏盐岩	200~800	0.3~7.0	SK-1井、W46井	23.6~40.8	[40, 45]
江汉盆地潜江凹陷	潜江组	始新世-渐新世	43.1~29.4	咸水-盐湖	泥质灰岩与泥质白云岩、膏盐岩	50~650	0.5~12.0	Yan 5井、Yan 6井	10.8~34.0	[41]
南襄盆地泌阳凹陷	核桃园组	始新世-渐新世	49.6~28.9	咸水-盐湖	灰质泥页岩夹砂岩、混积岩	1 000~2 000	0.5~5.9	B270井、BS1井	14.0~18.0	[25]
松辽盆地古龙凹陷	嫩江组一+二段	晚白垩世	84.7~82.4	淡水-微咸水	泥页岩夹粉砂岩	<120	2.0~10.0	SK-2井东孔	6.6~8.4	[29]
松辽盆地古龙凹陷	青山口组	晚白垩世	91.3~86.0	淡水-微咸水	泥页岩夹粉砂岩	100~150	0.9~9.0	SK-1井南孔	8.0~10.0	[30]
酒泉盆地青西凹陷	下沟组	早白垩世	125.9~115.6	咸水-盐湖	白云质泥岩夹粉砂岩	>1 000	1.0~2.5	L 8井、L14井	8.5~19.8	[42]
四川盆地中北部	自流井组大安寨段	早侏罗世	<201.3	淡水-微咸水	泥页岩夹灰岩	40~180	0.1~5.0	G61井、G105X井	12.5~16.9	[28]
四川盆地东北部	须家河组	晚三叠世	207.2~201.3	淡水-微咸水	泥页岩夹砂岩	100~200	0.5~9.9	须家河剖面、七里峡剖面	10.4~14.6	[27]
鄂尔多斯盆地伊陕斜坡	延长组7段	中三叠世	241.6~241.1	淡水-微咸水	泥页岩夹粉砂岩	10~100	2.0~20.0	YY1井、瑶曲剖面	4.0~5.0	[31-32]
准噶尔盆地吉木萨尔凹陷	芦草沟组	早二叠世	290.4~286.2	半咸水-咸水	泥页岩夹白云岩、混积岩	30~50	1.2~8.9	J174井、J251井	8.0~10.0	[26]
准噶尔盆地玛湖凹陷	风城组	早二叠世	301.9~297.0	咸水-碱湖	泥页岩夹白云岩、膏盐岩、混积岩	200~1 400	1.2~2.0	MY1井、FN14井	9.0~19.0	[43-44]

注:页岩的厚度统计与总有机碳含量(TOC)数据主要来自文献[13-14,56-57]。

位素高精度定年也是约束地层年龄的重要手段^[59]。由于Re-Os具有亲有机物的属性,在海相富有机质黑色页岩及其生成的原油和沥青中相对富集,因此,可以利用Re-Os放射性同位素体系确定富有机质沉积岩的绝对年龄^[60]。

2.2 旋回地层学方法刻画高分辨率沉积速率

厘定连续沉积记录的持续时间主要依靠旋回地层学与天文年代学手段。这是目前唯一可提供连续的、

高分辨率时间标尺的方法。米兰科维奇旋回理论认为,地球轨道参数(偏心率、斜率和岁差)的周期变化使地球表层接收的日照量分布发生变化,进而引起地球气候的周期性波动,这种周期变化的气候信息被记录在全球沉积序列中(图4)^[46-47,61]。例如,北半球高纬度地区夏季太阳辐射变化是驱动第四纪冰期旋回的主要控制因素^[61]。

地球轨道周期具有相对稳定性,成为地层精细定年的“沉积物时钟”^[62]。地质历史时期,由于月-地间

表 2 中国典型海相富含有机质页岩层系地质特征与沉积速率

Table 2 Geological characteristics and deposition rates of typical marine organic-rich shale sequences in China

盆地/地区	地层	地质年代	参考年龄/Ma	岩性组合	累积厚度/m	TOC/%	井位或剖面	沉积速率/(cm/kyr)	文献来源
四川盆地	五峰组-龙马	晚奥陶世—	445.2 ~ 440.8	泥页岩、硅质岩	200 ~ 300	1.6 ~ 5.7	双河剖面	0.7 ~ 3.1	[33]
长宁地区	溪组一段	早志留世							
鄂尔多斯盆地西南缘	平凉组	晚奥陶世	458.4 ~ 453.0	泥页岩、灰岩	< 700	0.3 ~ 0.6	官庄剖面	0.9 ~ 1.3	[34]
塔里木盆地柯坪地区	萨尔干组	中-晚奥陶世	464.0 ~ 458.0	泥页岩、灰岩	0 ~ 120	0.6 ~ 5.7	大湾沟-羊吉坎剖面	0.2 ~ 0.7	[35]
扬子地台贵州地区	大塘坡组	新元古代	663.0 ~ 654.0	泥页岩、粉砂岩	180 ~ 550	0.1 ~ 6.3	ZK1909井	2.6 ~ 3.5	[36]
华北地台燕辽拗陷	下马岭组	中元古代	<1 400.0	泥页岩、硅质岩	175 ~ 335	3.7 ~ 23.0	下花园剖面	0.5 ~ 0.8	[37]
华北地台燕辽拗陷	洪水庄组	中元古代	<1 450.0	泥页岩、灰岩	37 ~ 57	3.4 ~ 7.9	YJ2井	3.0 ~ 5.0	[38]

注:页岩的厚度统计与 TOC 数据主要来自文献[13-14,56-57]。

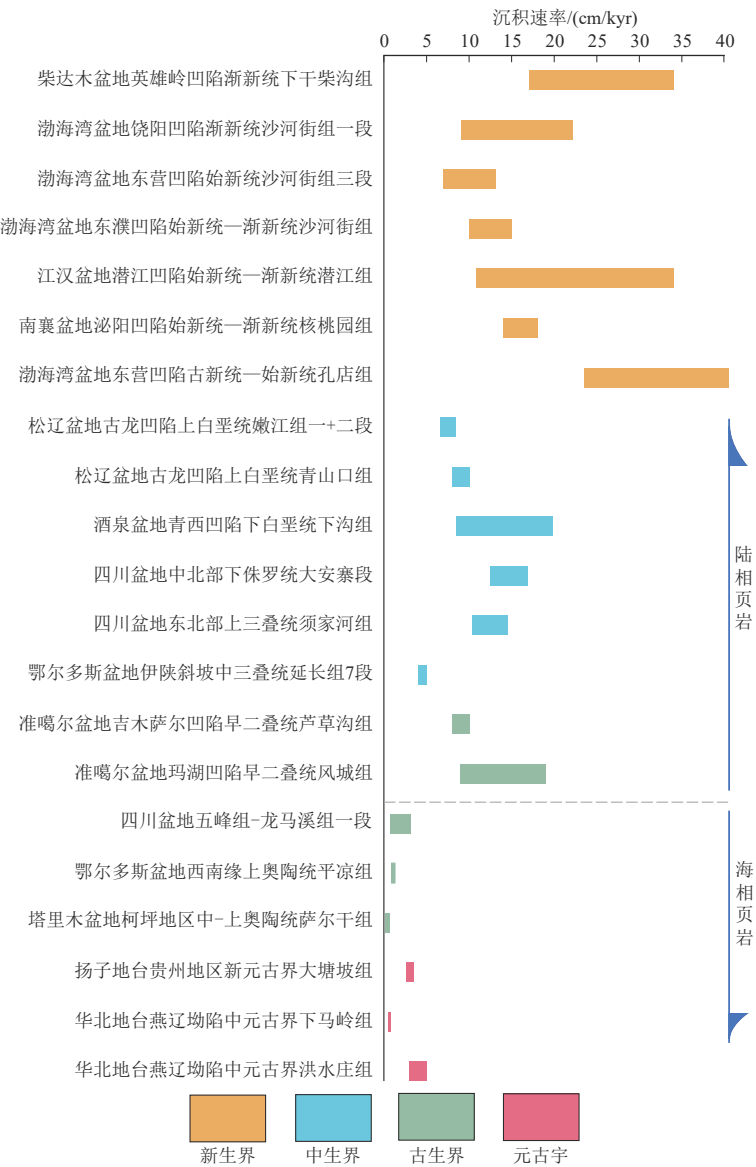


图 2 不同地质年代陆相页岩层系与海相页岩层系沉积速率对比

Fig. 2 Comparison of deposition rates between continental and marine shale sequences of different geological ages

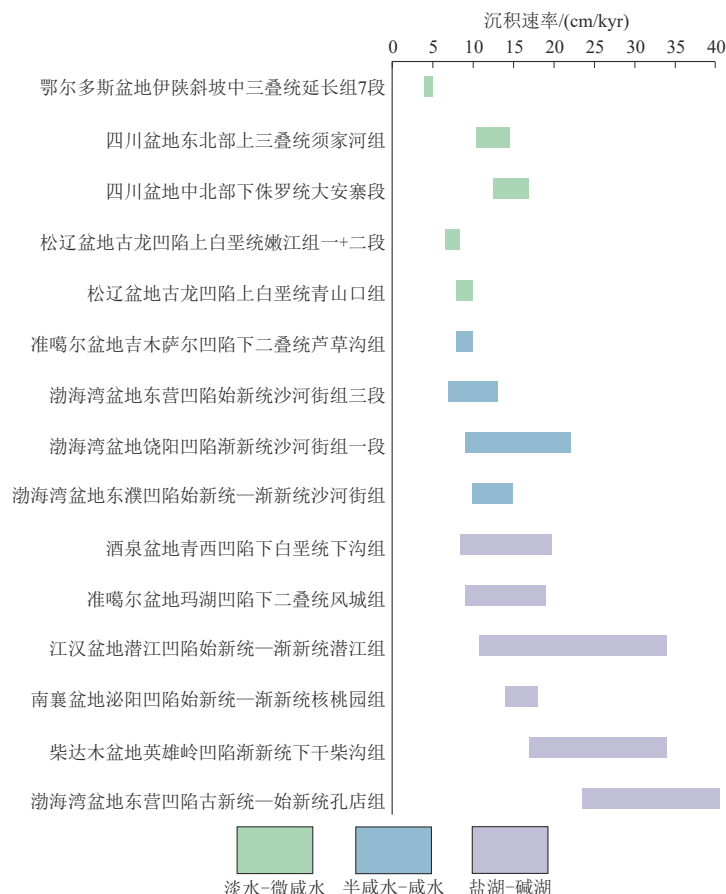


图3 淡水湖盆与咸化湖盆页岩层系沉积速率对比

Fig. 3 Comparison of deposition rates in shale sequences of freshwater and saline lacustrine basins

的引力作用产生力矩,对地球的自转起到减速刹车的作用,导致地球轨道斜率周期和岁差周期逐渐增大^[46]。地球轨道长偏心率源于金星与木星的轨道近地点之间的相互作用,得益于木星巨大的质量,长偏心率旋回具有稳定的405 kyr周期,被誉为地质计时的最佳“计时器”^[47,63]。Hilgen等进一步提出天文时间带(astrochronozones)的概念,将地层中受天文轨道作用力控制的沉积旋回校准至周期稳定的天文理论曲线后形成具有全球对比潜力的地层时间单元^[21,64-65]。根据特定天文旋回控制下的高分辨率时间标尺,可以计算不同深度层段的高分辨率沉积速率。中生代以来的地层序列通常以稳定的405 kyr长偏心率周期为基准建立天文年代标尺,对地层沉积速率刻画的分辨率即为405 kyr偏心率级别。而新近纪以来天文地质年表已经可以精确到20 kyr岁差尺度^[48,63,65]。

近年来,旋回地层学方法结合数理统计学与计算机技术,可以在缺乏精确年龄约束的情况下估算地层序列沉积速率及其变化趋势,并给出可视化图形。当前流行的统计调谐手段主要有以下几种。

1) 平均频谱误差分析(average spectral misfit, ASM),计算不同沉积速率下古气候序列主要周期与天文周期的误差,并利用蒙特卡洛模拟给出零假设(不存在天文信号)检验的显著水平^[17]。

2) 时间标尺优化法(time scale optimization, TimeOpt),根据轨道信号的振幅调制属性,评估不同沉积速率条件下岁差(或短偏心率)振幅包络线与偏心率(或长偏心率)模型曲线的拟合程度,同时评估通过最小二乘法拟合实际数据获得的岁差与偏心率的信号与原始数据的拟合程度,利用两次拟合的乘积,通过寻找乘积的最高值来确定最优沉积速率^[19]。同时使用蒙特卡洛模拟方法给出零假设检验的置信水平。

3) 相关系数分析(correlation coefficient, COCO),通过评估不同沉积速率下的地层响应指标的功率谱与天文理论曲线中全部偏心率、斜率和岁差的功率谱之间的相关系数来实现沉积速率定量检验,同时利用蒙特卡洛模拟的方式评估零假设置信水平,并综合考虑能匹配的地球轨道周期数量来检测地层的沉积速率^[20]。

ASM, TimeOpt 和 COCO 方法都是利用零假设检验

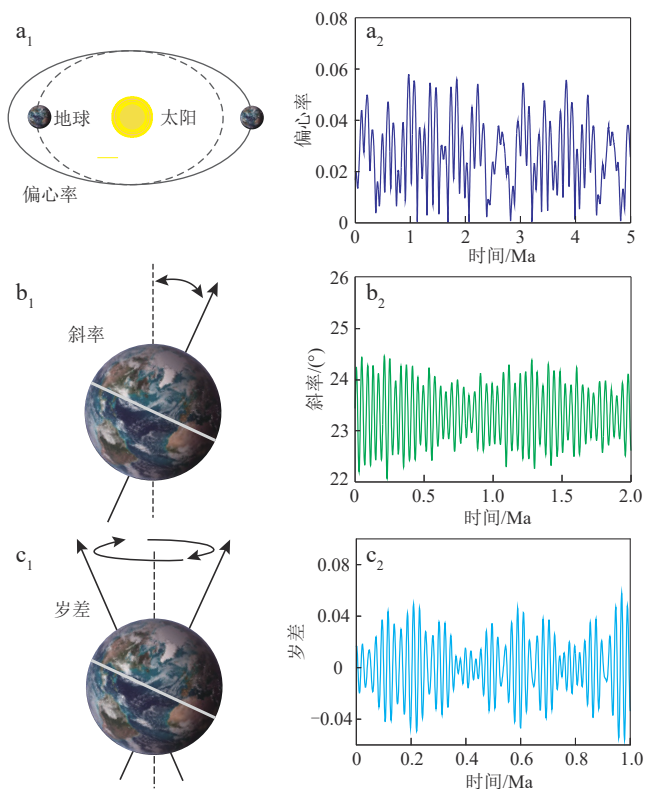
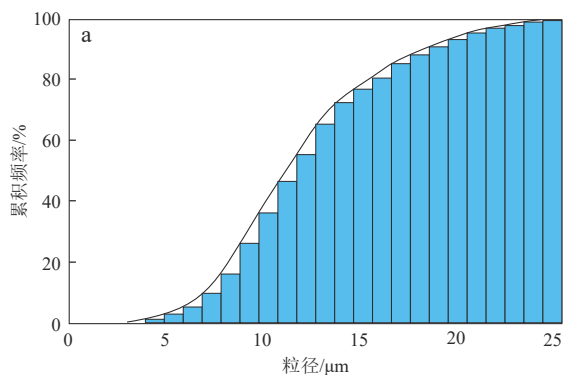


图4 地球5 Ma以来轨道参数模型及其时间序列^[47,63]

Fig. 4 The Earth orbit parametric model and the time series for the past 5 Ma^[47, 63]

a_1 — c_1 分别为地球轨道偏心率、斜率和岁差的运行示意图; a_2 , 0~5 Ma的偏心率时间序列; b_2 , 0~2 Ma的斜率时间序列; c_2 , 0~1 Ma的岁差时间序列

和蒙特卡洛模拟估算沉积速率的统计学方法^[66]。还有一类基于贝叶斯公式的沉积序列反演方法,使用马尔可夫链蒙特卡罗算法对沉积速率模型的后验分布进行采样,寻找匹配轨道周期的沉积速率最优解,并定量描述反演结果的不确定性^[18]。这几类算法在实际应用中,都存在参数调整的不确定性,同时理论天文周期模型的选择等也限制着这些方法的普适性。



2.3 稀土元素配分模式判别相对沉积速率

页岩的稀土元素配分模式是其经历的搬运和沉积过程的综合反映^[67]。碎屑矿物悬浮颗粒中的稀土元素在缓慢沉积过程中被黏土吸附并与有机物发生络合反应。轻稀土元素通常会先被吸附在有机质和黏土矿物中并沉积下来,重稀土元素则形成稳定络合物留在水体中,从而导致稀土元素强烈分异。La和Yb分别为轻稀土元素和重稀土元素的指示元素。因此,根据稀土元素的 $(La/Yb)_N$ 值(N代表北美页岩标准化)可以判断沉积速率的相对大小^[68-69]。沉积速率较快的页岩,稀土分异作用不显著,稀土元素的配分模式相对平缓, $(La/Yb)_N$ 值约为1。沉积速率较慢的页岩,稀土分异作用强烈,轻、重稀土元素出现亏损或富集, $(La/Yb)_N$ 值明显大于或小于1。由于稀土元素的富集和亏损受多种因素的影响,因此需要在分析结果中考虑其他因素的干扰。

2.4 晶体粒径分布理论判别相对沉积速率

晶体粒径分布理论(crystal size distribution theory, CSDT)用保留时间和系统内晶体增减作为参数来描述晶体数量与粒径变化规律。Wilkin等将晶体粒径分布理论应用到沉积型莓状黄铁矿上,计算出莓状黄铁矿在沉积物表面的相对保留时间,进而获得相对沉积速率变化^[70]。Chen等发现鄂尔多斯盆地长7段黑色页岩样品中莓状黄铁矿粒径与其数量密度的对数呈线性关系,这种线性关系的斜率与黄铁矿晶体的生长时间有关,即与沉积速率相关(图5)^[71]。晶体粒径分布模式的应用需要黄铁矿在沉积过程中具有明显的富集特征,如果页岩中黄铁矿的数量较少,则粒径分布模式的统计结果可能会受到抽样误差的影响。

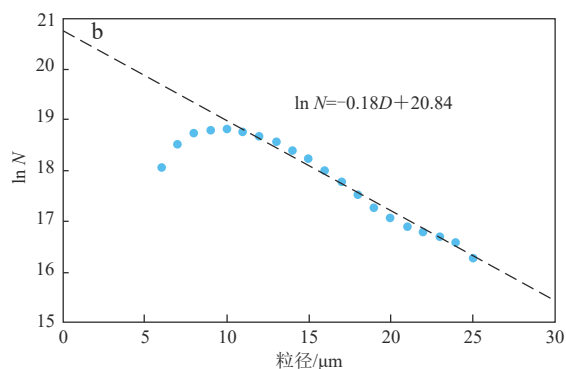


图5 鄂尔多斯盆地盐56井长7段莓状黄铁矿粒径分布^[71]

Fig. 5 Characteristics of pyrite framboid diameters of the Chang 7 Member in well Yan 56, Ordos Basin^[71]

a. 粒径分布累积频率曲线(样品埋深2 973.7 m); b. 粒径(N)与其数量密度(D, 个/cm²)的对数呈线性关系

2.5 星际尘埃特征元素丰度判识相对沉积速率

这种方法利用沉积物中星际尘埃特征元素 ^3He 、Ir和Co的丰度值间接反映沉积速率^[72-74]。星际尘埃在地球表面的沉降量相对稳定,约为 $0.16\text{ mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{yr})$ 。在不考虑火山活动和生物富集作用的情况下,陆源物质输入对星际尘埃特征元素含量产生稀释效应^[75]。Alvarez等建立了一个利用星际尘埃特征元素Ir的丰度值计算海相地层沉积速率的经验公式^[72]。周瑶琪等修正了经验参数利用星际尘埃特征元素Co的丰度计算得到湖相页岩的沉积速率为 $6\sim 8\text{ cm/kyr}$ ^[73]。

^3He 是地球对星际尘埃对吸积速率的示踪剂。对白垩纪—古近纪之交发育的海相碳酸盐岩实例分析表明,宇宙来源的 ^3He 通量几乎是恒定的^[76]。Murphy等根据 ^3He 通量恒定假设^[76]约束了南大西洋沃尔维斯岭在整个PETM期间沉积速率的相对变化,并为该事件构建了一个新的年龄模型^[74]。因此,建立星际尘埃特征元素的同位素记录,是深海相和深湖相泥页岩年代学研究的重要补充。

以上沉积速率的研究方法各具特色,对于陆相页岩层系野外剖面或系统取心段,可以通过高精度年代学框架的应用,约束地层序列的沉积时限,并准确地计算平均沉积速率。对于缺乏绝对年龄数据的连续沉积剖面,通常基于旋回地层学与天文年代学获得“浮动”天文年代标尺,利用统计调谐方法追踪沉积速率在不同深度层段内的变化。对于黑色页岩样品的相对沉积速率判识,稀土元素配分模式和莓状黄铁矿

晶体粒径分布能够提供有价值的参考,星际尘埃特征元素丰度也是获取沉积速率的有效补充。然而这些方法都依赖于一些假设和前提条件,难免会出现系统误差和偶然误差,需要结合其他方法和数据进行综合校正(表3)。

3 沉积速率研究中需要注意的问题

3.1 地层剖面的完整性

沉积作用本质上是一个不连续的过程。沉积地层剖面将地质时间的流逝记录为沉积与剥蚀的交替,必然包含一定尺度的沉积间断^[1,77-78]。在地质历史中,气候环境变化及构造运动等对原始沉积序列造成干扰破坏,在陆相地层中这种影响比海相地层更为明显^[2,7]。Sadler对地质历史时期25 000个沉积速率值的汇编表明,沉积速率的波动范围可以跨越11个数量级^[1]。对于同一套研究层位,当选择的时间尺度不同时,地层完整性评价结果也存在差异^[3]。随着时间跨度的增加,地层剖面中的间断越来越长,沉积速率具有系统性下降趋势(图6a)^[1]。由于地壳不稳定以及不连续的沉降,导致沉积物堆积的累积厚度是一个复杂的时间序列。

沉积和剥蚀增量的累积效应可以通过波函数的形式进行模拟(图6b),即用正弦波模拟短期的侵蚀和沉积交替,用长期趋势模拟地壳的长期沉降^[1]。结果显示,即使侵蚀和沉积增量的厚度相等,净厚度也会产生

表3 沉积速率研究方法对比

Table 3 Comparison of different methods for studying deposition rate

方法分类	方法举例	适用条件	主要优势	存在问题
地质年代学与统计学方法	绝对年龄 框架约束法	锆石 LA-ICPMS, SIMS 和 ID-TIMS 定年	含有凝灰岩夹层的页岩层系剖面	准确计算出平均沉积速率 难以获得合适的锆石样品
		自生矿物 K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Rb-Sr 和 Re-Os 同位素定年	不含凝灰岩夹层的黑色页岩剖面	直接利用沉积岩自生矿物定年且具有较高的年代学精度 对样品类型要求较高,分析和处理过程较为复杂
		平均频谱误差分析法(ASM)		
	旋回地层学	时间标尺优化法(TimeOpt)	连续沉积的页岩	高分辨率刻画页岩剖面的沉积速率或追踪沉积速率的变化 需要人为选择目标天文曲线、调整滑动窗口等参数
	统计调谐法	相关系数分析法(COCO)	层系剖面	
地球化学方法		贝叶斯反演法		
	稀土元素配分模式法	$(\text{La/Yb})_N$ 值	深海相和深湖相页岩样品	获取相对沉积速率 稀土元素的富集和亏损受多种因素影响
	晶体粒径分布模式法	莓状黄铁矿粒径分布	深海相和深湖相页岩样品	获取相对沉积速率 莓状黄铁矿的数量少导致抽样误差且影响统计结果
	星际尘埃特征元素丰度法	特征元素 ^3He 、Ir 和 Co 丰度值	深海相和深湖相页岩样品	获取相对沉积速率 火山活动、生物富集作用、陆源物质稀释效应均影响实验结果

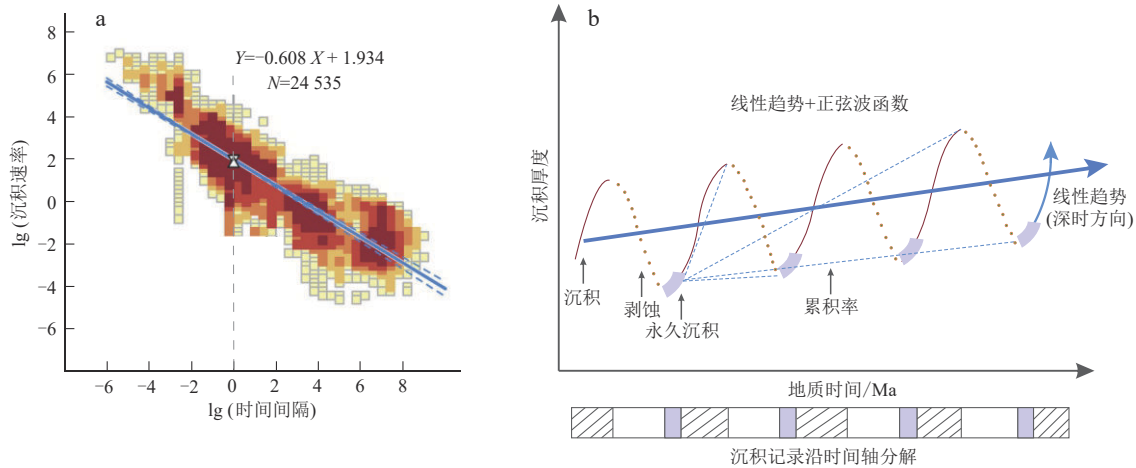


图6 沉积速率与地层剖面完整性的关系

Fig. 6 Correlation of the deposition rate and integrity of stratigraphic sections

a. 沉积速率(mm/kyr)与不同时间尺度(yr)的对数关系^[1,3],蓝色曲线为稳健线性拟合模型,截距按年的时间尺度计算;b. 非稳定沉积过程的时间序列模型,沉积剖面沿其时间轴分解^[1]

长期波动。图6b显示的不同时间尺度的间断面,实际上代表了不同级次的层序界面。更长时间的沉积过程则产生更长时间的沉积间断。总之,沉积速率取决于观测的时间尺度。不同类型或不同时代岩层的沉积速率比较,必须在同一时间尺度上进行。

3.2 陆源碎屑输入对沉积速率的影响

沉积速率研究要考虑沉积物供应量的影响,陆源碎屑输入量增加会导致沉积速率增大。例如PETM期间,由于全球水文循环的加剧,中纬度地区沉积物供应的显著增加,近海陆架、深海扇频繁发育下切水道等^[50-52],导致陆源碎屑的输入量大大增加。地层序列混杂重力流沉积等事件沉积物造成沉积速率异常升高,也增加了沉积环境解译的复杂性。风成沉积可以形成快速堆积,如中新世中国黄土高原秦南的风成黄土堆积速率达到20 cm/kyr^[79]。新生代以来,受青藏高原隆升的影响,柴达木盆地巨厚地层堆积反映了风-河-湖源-汇机制下的快速陆源输入的影响。

3.3 压实成岩作用对沉积速率的影响

使用旋回地层学方法研究沉积记录的古气候响应面临3个基本挑战:信号污染、地层扭曲和时间校准^[48]。沉积系统内的自生变异性,如沉积速率变化、成岩作用、差异压实、生物扰动和沉积间断等因素可能导致地层结构发生变形,干扰天文周期信号的检测。这些地层形变可能是随机的,可能与盆地长期演化有关,也可能是由沉积环境的非线性气候反馈所驱动的。页岩的成岩作用较慢,而碳酸盐岩和蒸发岩类可以快

速堆积成岩,在某种程度上造成地层序列快速堆积。目前所观察到的岩层厚度是经过压实的厚度,若根据不同岩类的压实系数恢复到原始厚度,则可以获得地质历史时期真实的沉积速率^[2]。不同物质组分的差异压实对沉积速率判定也有显著影响^[78]。例如,黏土质页岩的压实程度可达80%以上,而贫黏土页岩的压实程度仅20%~30%。认识这些差异对于恢复真实沉积速率具有指导意义。

压实成岩作用还可能导致纹层结构形变,干扰纹层的沉积速率判别。中国东北龙岗山脉发育的玛珥湖现代沉积物中肉眼可识别的纹层为年纹层,平均沉积速率为1.10 mm/yr^[80];芬兰东部雷米兰皮湖(Lehmilampi)现代沉积物纹层的平均沉积速率为0.76~1.22 mm/yr^[81]。然而对于深时沉积且经受长期压实的页岩,对纹层沉积速率的判定可以产生数量级的变化。例如,燕辽拗陷元古宙发育的下马岭组镜下观察到碎屑矿物纹层与富有机质纹层互层结构,对沉积速率的计算仅为(0.66±0.14) cm/kyr^[37]。

4 沉积速率研究对陆相页岩油勘探的指导意义

研究有机质丰度和纹层类型对于深入理解页岩油勘探的地质条件和富集机理具有重要意义。古气候、大陆风化、水动力条件和沉积速率等因素控制湖相沉积物成分与沉积组构等特征,成为页岩油储层宏观和微观非均质性的诱因。低沉积速率控制纹层发育与富硅质沉积,易于形成微裂缝,而湖相纹层既有较好的生

烃潜力又有较好的孔、渗条件^[57,82],这是页岩油气甜点段形成的基本地质条件之一。因此,沉积速率作为其中一个关键因素,对于页岩有机质富集和纹层类型发育有着重要影响,尤其是在陆相页岩油勘探中显得尤为重要。

4.1 沉积速率影响页岩有机质富集

通常认为有机质富集主要受初级生产力、底水含氧量、沉积速率和有机质来源等因素控制^[5-6]。关于沉积速率对陆相页岩有机质富集的影响研究相对较少^[83-84],最初的研究案例是来自海相页岩。Ibach对地质历史时期海相页岩沉积速率与总有机碳含量(*TOC*)的关系进行统计发现,钙质泥岩对有机质的稀释作用所需的临界值最低,硅质泥岩次之,而黑色页岩所需的临界值最高^[85](约为3.2 cm/kyr;图7a)。Tyson对现代海相沉积物沉积速率与*TOC*关系的统计表明:在氧化水体环境中,当沉积速率小于5 cm/kyr时,沉积速率的增加可以提高有机质埋藏效率^[4]。当沉积速率大于

5 cm/kyr时,如果有机碳的供给通量恒定,且向盆地中输入的有机质通量低于碎屑矿物或碳酸盐矿物的输入通量,则会导致单位质量沉积物中有机质含量下降。若沉积速率持续增加超过35 cm/kyr,无论水体是否缺氧,*TOC*都没有明显的差别(图7b)^[4]。

对于陆相页岩,沉积速率对有机质的稀释作用也存在临界值。二连盆地地下白垩统腾格尔组(咸水沉积体系)沉积速率的临界值约为5 cm/kyr(图7c)^[83];酒泉盆地青西凹陷下白垩统下沟组(咸化湖-盐湖沉积体系)沉积速率的临界值约为12 cm/kyr(图7d)^[42]。鄂尔多斯盆地中三叠统长7段(淡水-微咸水沉积体系)沉积速率的临界值普遍低于5 cm/kyr^[31]。长7段页岩低黏土矿物含量(<40%)、低 Al_2O_3 含量(平均14%)和稀土元素含量(平均168 $\mu g/g$)均与*TOC*呈负相关,表明陆源碎屑对长7段有机碳通量的稀释作用较弱,保持了较高的初级生产力水平^[84]。因此,适当的沉积速率是页岩有机质富集和保存的重要因素。低沉积速率状态下,低陆源碎屑补偿降低了对有机质的稀释作用,底

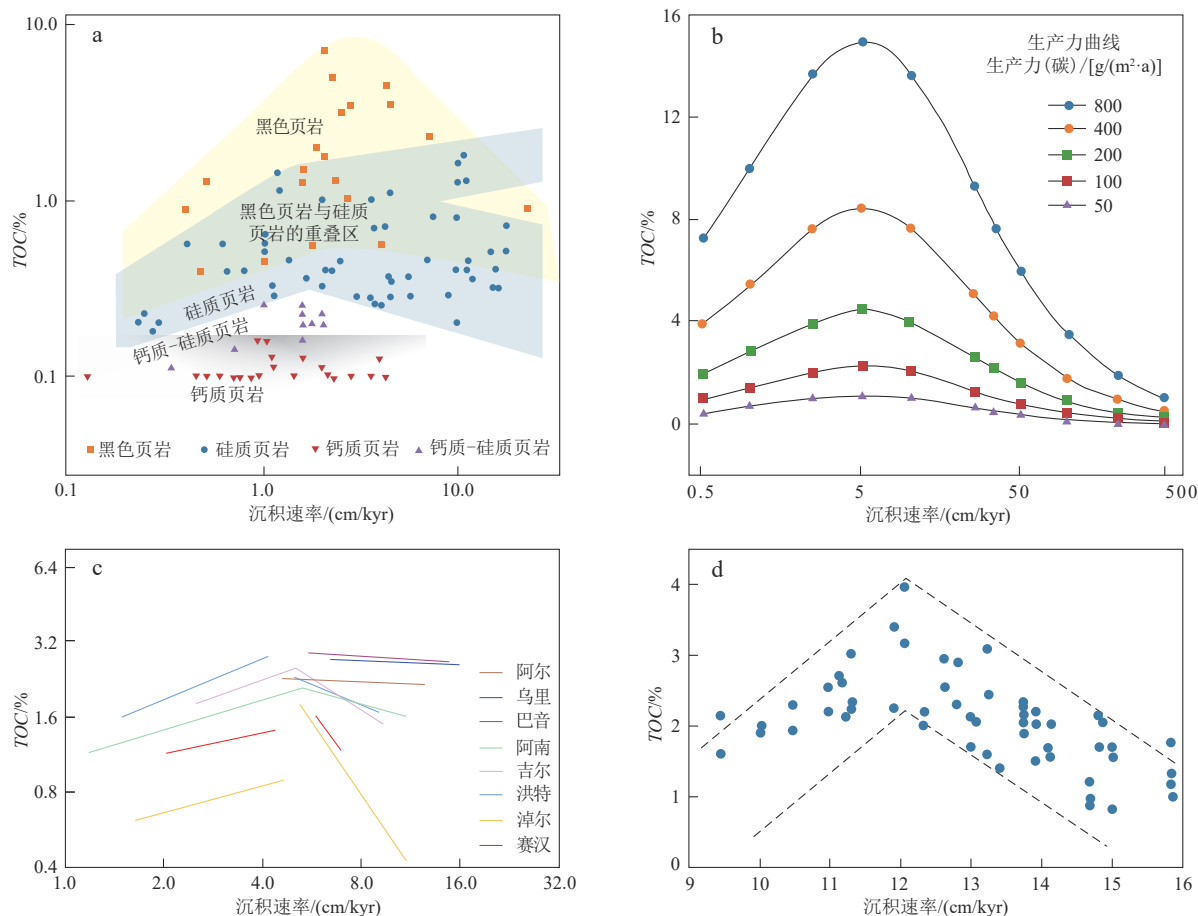


图7 不同沉积环境中沉积速率与*TOC*的关系

Fig. 7 Correlations between the deposition rate and *TOC* of shale sequences in different depositional environments
a. 海相页岩^[85]; b. 现代海相沉积物(采样深度为800 m)^[4]; c. 二连盆地8个凹陷下白垩统腾格尔组^[83]; d. 酒泉盆地青西凹陷下沟组^[42]

水氧化还原条件是影响有机质富集的主要因素;高沉积速率状态下,沉积水体古生产力条件是影响有机质富集的主要因素^[4-5,85]。

有机质沉积埋藏后的保存状态与氧化-还原环境关系密切^[42,83-84]。一方面,与陆相粗粒碎屑岩相比,陆相页岩的沉积速率相对缓慢,导致有机质在沉积过程中容易被微生物分解矿化,可能导致有机质的保存比例较低^[86]。另一方面,低沉积速率意味着有充分时间通过硫酸盐菌还原反应促进有机质的消耗^[87],形成有利于有机质保存的还原环境。

考虑到中国陆相盆地构造活动期次多、沉积相带变化快、页岩沉积非均质性强的特点,以上认识可能并不适用于所有区域。在沉积速率高的环境中,有机质经历短暂的早期成岩作用期就被埋藏,沉积过程中快速通过降解作用较强的地带,有机质降解程度弱,可能导致有机质的保存比例较高。以渤海湾盆地东营凹陷北部陡坡带为例,沙四上亚段(沉积速率8.5~14.6 cm/kyr)^[88]和孔店组(沉积速率23.6~40.8 cm/kyr)^[45]页岩的沉积速率较大,仍然具有较高的有机碳含量(>4%)。因此,沉积速率对页岩有机质富集的影响不能一概而论,需要兼顾盆地构造背景建立更普适性的模式图版。

4.2 沉积速率影响页岩纹层类型发育

富有机质页岩中可肉眼识别的基本沉积单元结构是纹层。根据矿物组成与有机质丰度可将页岩纹层划分为黏土质纹层、长英质纹层、碳酸盐纹层和有机质纹层等类型^[9-10,12]。页岩纹层密度和组合类型存在差异,

间接反映了沉积速率的变化。在较强的水动力环境中,水体流速和沉积速率会影响纹层类型;同时沉积速率影响有机质的絮凝作用,促进有机质纹层发育。

在水深1 m的等温、静水条件下,黏土颗粒的沉积速率仅为细砂颗粒沉积速率的1/1000或更低^[89-90]。在较弱的水动力环境中,黏土颗粒的沉积速率为0.003 mm/s^[91]。然而,黏土颗粒在水流中趋向于与其他碎屑物质结合形成絮凝体团。沉积速率小的絮凝体团会随低速水团的漩涡上升至主流区并以冲泻质输运,最终沉积于静水区。当沉积速率达到0.01~2.00 mm/s甚至更高,则趋向于以悬移质输运并随着低速水团的漩涡上升。沉积速率更大的絮凝体团倾向于以跃移质输运并快速下落堆积^[92-93]。因此,当沉积速率较低时,迁移的黏土质絮状波纹可能只会留下薄薄的层状沉积物拖曳面,而当沉积速率较高时,沉积物拖曳面在垂向上不断爬升堆积,形成波状黏土质-粉砂质互层模式(图8)。

在较强的水动力环境中,水体流速和沉积速率通过控制碎屑颗粒的絮凝作用,间接控制纹层结构类型^[94-96]。Yawar和Schieber指出,页岩中交替出现的黏土质与粉砂质纹层是长期底流搬运作用的结果^[96]。水槽实验结果表明,沉积速率相对较低且水体流速低于25 cm/s时,沉积形成黏土质-粉砂质互层,高于25 cm/s临界流速则形成层状粉砂质层。沉积速率相对较高时,随着流速的增加,波状黏土层逐渐转变为波状粉砂质层(图8)^[96]。高能水体环境中的细粒碳酸盐物质同样可以像黏土一样在水体中发生凝絮作用^[95]。流动的碳酸盐泥浆流速低于25 cm/s时,悬移质就会形成絮状波纹进而沉积形成碳酸盐纹层^[94-95]。

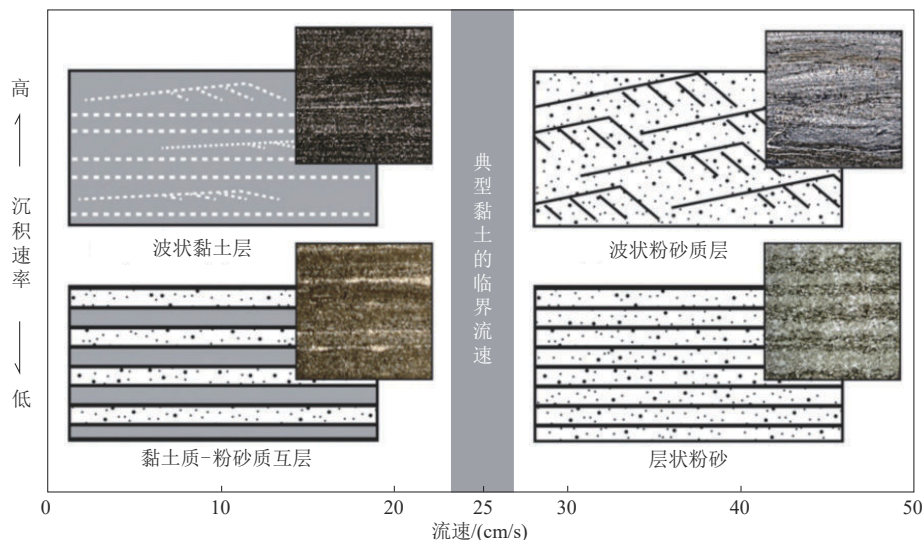


图8 不同流速和沉积速率影响下长英质纹层结构变化^[96]

Fig. 8 Changes in the architecture of felsic laminae under the effect of different flow velocities and deposition rates^[96]

沉积速率影响有机质的絮凝作用,促进有机质纹层发育。由于有机质(初级生产力)的密度普遍偏低,在水体中缓慢沉降过程中会遭受微生物降解和氧化分解^[86]。然而,富有机质黏土的絮凝实验分析表明,有机质易与细粒物质相互黏结形成絮团,远离水溶氧气和微生物,从而加快沉降过程并有利于有机质保存^[92-93]。

长试管静置沉降实验结果表明,水体盐度是影响细粒沉积物的沉积速率的重要因素。富含有机质的泥质沉积物在淡水、微咸水和咸水3种湖盆环境中的絮凝作用和受到的浮力作用有一定差异^[90]。当盐度从1%增至3%时,可以大幅促进有机质絮凝,沉积速率显著增加,同时使得有机质捕获效率提高到300%^[97]。这也从微观机理上解释了咸化湖盆发育的富有机质页岩的沉积速率比淡水湖盆发育的富有机质页岩的沉积速率相对较高的原因。

上述分析表明,水动力条件和水体盐度影响碎屑颗粒的絮凝作用,不同类型碎屑颗粒的沉积速率差异有利于细粒沉积纹层结构的形成。对于形成黏土质纹层、长英质纹层、碳酸盐纹层和有机质纹层等所需沉积速率的定量判断是值得深入研究的科学问题。

5 页岩沉积速率研究发展方向

5.1 加强纹层年代学研究,整合新方法客观估算沉积速率

陆相页岩油勘探实践表明,无论是淡水湖盆还是咸化湖盆,纹层状页岩相都是最有利岩相^[8-10,12]。如果没有精确的时间作为纹层沉积演化的对比标尺,容易造成页岩纹层与其沉积要素之间响应的偏差。近年来针对现代湖泊发育的连续纹层序列发展了高分辨率纹层年代学技术。根据常规¹⁴C测年、加速器质谱仪(AMS)¹⁴C测年、¹⁰Be测年、¹³⁷Cs测年、²¹⁰Pb测年、火山灰测年和古地磁曲线测年等可以精确计算纹层的发育时间与速率^[81,98-99]。现代湖泊的细粒沉积学研究进展^[94-95]可以为深时陆相页岩沉积环境和形成机理研究提供对比思路和方法。对于沉积速率低、纹层厚度非常薄的页岩,开展高分辨率的磁化率、灰度、矿物和元素的原位成像扫描非常必要^[93,99-100]。同时需要明确不同尺度的气候旋回周期(如半岁差周期、太阳黑子活动周期、厄尔尼诺周期等)对陆源碎屑物供给、纹层旋回发育与有机质富集的控制作用。总之,陆相盆地富有机质页岩层系沉积速率的研究需要积极融合包括地质年代学、岩石学、旋回地层学、地球化学和沉积物理模

拟在内的先进理论和方法,以更好地了解页岩沉积演化过程及其沉积环境响应。

5.2 积极探索沉积速率与陆相页岩油富集之间的联系

陆相页岩油富集主控因素研究突出强调淡水湖盆与咸化湖盆富有机质页岩层系发育机制的差异^[9,11,15],这种差异在页岩沉积速率上有直观的反映。在进行细粒沉积物形成机理研究时,需要充分考虑水体盐度、沉积速率、絮凝作用和浮力作用等因素对纹层结构的影响。通过旋回地层学的时间序列分析获取高分辨率的沉积速率,有助于客观分析沉积速率对有机质丰度影响的平衡点^[6,101]。同时需要深入探究沉积速率变化引起的古生产力水平和氧化-还原环境变化,进一步揭示页岩有机质富集机理。良好的源-储配置是页岩油形成与富集的控制因素之一^[12,15,97],而天文周期叠加调控下的优质烃源岩发育机制、页岩油源-储配置关系尚不明确。需要在等时地层格架下,系统研究全球气候事件对淡水湖盆与咸化湖盆富有机质页岩层系发育的影响。在准确厘定页岩层系沉积速率的基础上,结合旋回地层学和层序地层学分析,有助于揭示地球轨道参数变化和各级层序间的关系,指导陆相页岩沉积旋回高分辨率对比。重新审视沉积速率对页岩有机质富集和纹层类型发育的影响,可以预测和评估不同区域、不同层系的页岩油勘探前景,为陆相页岩油勘探提供科学依据。

6 结论

1) 随着地质年代由老到新,中国陆相页岩层系的沉积速率大致呈现降低的趋势,但普遍在5 cm/kyr以上,咸化湖盆沉积速率较淡水湖盆沉积速率高,特别是富含蒸发岩矿物的层位沉积速率可高达40 cm/kyr。

2) 高精度年代学框架可以约束页岩层系的沉积时限,准确厘定平均沉积速率。基于旋回地层学统计调谐方法可以估算不同深度的高分辨率沉积速率或追踪沉积速率的变化。根据稀土元素配分模式、晶体粒径分布理论和星际尘埃特征元素丰度等特殊方法可以判识页岩的相对沉积速率。不同类型或不同时代的岩层的沉积速率比较,需要注意地层完整性、陆源碎屑输入、成岩作用和差异压实作用等复杂因素的影响。

3) 沉积速率是页岩有机质富集的重要影响因素。沉积速率对有机质稀释的临界值通常低于5 cm/kyr,沉积速率低于临界值,低陆源碎屑补偿降低对有机质

的稀释作用,底水氧化-还原条件是影响有机质富集的主要因素;当沉积速率高于临界值,沉积水体的古生产力条件影响有机质富集。沉积速率影响纹层结构类型发育,受水动力条件、水体流速、盐度和碎屑颗粒性质等影响,定量判断满足不同类型纹层形成所需的沉积速率仍需进一步研究。

4) 中国陆相富有机质页岩沉积速率研究需要重视纹层年代学研究,结合岩石学、旋回地层学、地球化学和沉积物理模拟等先进理论方法,揭示陆相页岩沉积速率与页岩油富集之间的内在联系。

参考文献

- [1] SADLER P M. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections [J]. *The Journal of Geology*, 1981, 89 (5): 569–584.
- [2] CHEN Shuping, JIN Zhijun, WANG Yi, et al. Sedimentation rate rhythms: Evidence from filling of the tarim basin, northwest China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2015, 89 (4): 1264–1275.
- [3] GINGERICH P D. Rates of geological processes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 220: 103723.
- [4] 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.
- [5] KATZ B J. Controlling factors on source rock development—a review of productivity, preservation, and sedimentation rate [M]// HARRIS N B. *The Deposition of Organic-Carbon-Rich Sediments: Models, Mechanisms, and Consequences*. Broken Arrow: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2005: 7–16.
- [6] 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 等. 细粒沉积学研究进展与发展方向 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 251–264.
ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 251–264.
- [7] 张瑞, 金之钧, GILLMAN M, 等. 太阳系长期旋回在中生代沉积盆地中的记录 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(2): 345–362.
ZHANG Rui, JIN Zhijun, GILLMAN M, et al. Long-term cycles of the Solar System concealed in the Mesozoic sedimentary basin record [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 53(2): 345–362.
- [8] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 451–458.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 451–458.
- [9] 孙焕泉, 蔡勋育, 周德华, 等. 中国石化页岩油勘探实践与展望 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 569–575.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, ZHOU Dehua, et al. Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 569–575.
- [10] 焦方正, 邹才能, 杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6): 1067–1078.
JIAO Fangzheng, ZOU Caineng, YANG Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1067–1078.
- [11] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践 [J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 155–171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 155–171.
- [12] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49 (2): 224–237.
HU Suyun, BAI Bin, TAO Shizhen, et al. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 224–237.
- [13] ZOU Caineng, ZHU Rukai, CHEN Zhongqiang, et al. Organic-matter-rich shales of China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 189: 51–78.
- [14] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题 [J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(2): 1–13.
LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 1–13.
- [15] 宋岩, 罗群, 姜振学, 等. 中国中西部沉积盆地致密油富集机理及其主控因素 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48 (2): 421–433.
SONG Yan, LUO Qun, JIANG Zhenxue, et al. Enrichment of tight oil and its controlling factors in central and western China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 421–433.
- [16] 姜在兴, 张建国, 孔祥鑫, 等. 中国陆相页岩油气沉积储层研究进展及发展方向 [J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 45–71.
JIANG Zaixing, ZHANG Jianguo, KONG Xiangxin, et al. Research progress and development direction of continental shale oil and gas deposition and reservoirs in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 45–71.
- [17] MEYERS S R, SAGEMAN B B. Quantification of deep-time orbital forcing by average spectral misfit [J]. *American Journal of Science*, 2007, 307(5): 773–792.
- [18] MALINVERNO A, ERBA E, HERBERT T D. Orbital tuning as an inverse problem: Chronology of the early Aptian oceanic anoxic event 1a (Selli Level) in the Cismon APTICORE [J]. *Paleoceanography*, 2010, 25(2): 1–16.
- [19] MEYERS S R. The evaluation of eccentricity-related amplitude modulation and bundling in paleoclimate data: An inverse approach for astrochronologic testing and time scale optimization [J]. *Paleoceanography*, 2015, 30(12): 1625–1640.
- [20] LI Mingsong, KUMP L R, HINNOV L A, et al. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic

- paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 501: 165–179.
- [21] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 湖相泥页岩地层米氏旋回测井识别及环境响应特征——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷樊页1井Es^{4scs}为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 957–969.
- PENG Jun, YU Ledan, XU Tianyu, et al. Logging identification of Milankovitch cycle and environmental response characteristics of lacustrine shale—A case study on Es^{4scs} in Well Fanye 1, Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 957–969.
- [22] SHI Juye, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Terrestrial sedimentary responses to astronomically forced climate changes during the Early Paleogene in the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 502: 1–12.
- [23] WANG Meng, CHEN Honghan, HUANG Chunju, et al. Astronomical forcing and sedimentary noise modeling of lake-level changes in the Paleogene Dongpu Depression of North China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 535: 116116.
- [24] 杜威, 纪友亮, 季梦瑶, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷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 Wei, JI Youliang, JI Mengyao, 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.
- [25] XU Ke, CHEN Honghan, HUANG Chunju, et al. Astronomical time scale of the Paleogene lacustrine paleoclimate record from the Nanxiang Basin, Central China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 532: 109253.
- [26] HUANG He, GAO Yuan, JONES M M, et al. Astronomical forcing of Middle Permian terrestrial climate recorded in a large paleolake in northwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 550: 109735.
- [27] LI Mingsong, ZHANG Yang, HUANG Chunju, et al. Astronomical tuning and magnetostratigraphy of the Upper Triassic Xujiahe Formation of South China and Newark Supergroup of North America: Implications for the Late Triassic time scale[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 475: 207–223.
- [28] 李旭杰. 川中地区公39井区大安寨段旋回地层研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- LI Xujie. Study on cyclic stratigraphy of Da'anzhai Member in Gong 39 Well area in Central Sichuan[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [29] YANG Hanfei, HUANG Yongjian, MA Chao, et al. Recognition of milankovitch cycles in XRF core-scanning records of the Late Cretaceous Nenjiang Formation from the Songliao Basin (northeastern China) and their paleoclimate implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 194: 104183.
- [30] WU Huaichun, ZHANG Shihong, JIANG Ganqing, et al. Astrochronology of the early turonian-early campanian terrestrial succession in the Songliao Basin, northeastern China and its implication for long-period behavior of the solar system[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 385: 55–70.
- [31] CHU Runjian, WU Huaichun, ZHU Rukai, et al. Orbital forcing of Triassic megamonsoon activity documented in lacustrine sediments from Ordos Basin, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 541: 109542.
- [32] ZHU Rukai, CUI Jingwei, DENG Shenghui, et al. 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 (English Edition)*, 2019, 93(6): 1823–1834.
- [33] JIN Siding, DENG Hucheng, ZHU Xing, et al. Orbital control on cyclical organic matter accumulation in Early Silurian Longmaxi Formation shales[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11(2): 533–545.
- [34] FANG Qiang, WU Huaichun, HINNOV L A, et al. A record of astronomically forced climate change in a late Ordovician (Sandbian) deep marine sequence, Ordos Basin, North China[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 341: 163–174.
- [35] FANG Qiang, WU Huaichun, WANG Xunlian, et al. An astronomically forced cooling event during the Middle Ordovician[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 173: 96–108.
- [36] BAO Xiujuan, ZHANG Shihong, JIANG Ganqing, et al. Cyclostratigraphic constraints on the duration of the Datangpo Formation and the onset age of the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 483: 52–63.
- [37] ZHANG Shuichang, WANG Xiaomei, HAMMARLUND E U, et al. Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(12): E1406–E1413.
- [38] CHENG Dawei, ZHANG Shuichang, ZHANG Zhijie, et al. An astronomically calibrated stratigraphy of the Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation, North China: Implications for pre-Phanerozoic changes in Milankovitch orbital parameters[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 199: 104408.
- [39] 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(新疆砾岩油藏实验室), 西安石油大学, 陕西省石油学会. 2022油气田勘探与开发国际会议论文集Ⅲ. 西安: 西安石油大学, 2022: 469–478.
- PEI Ziwei, WU Yanxiong, WU Yunzhao, et al. Deposition rate of the Paleogene in Yingxiongling Depression, Qaidam Basin and its significance for oil and gas exploration[C]//PetroChina Xinjiang Oilfield Branch (Xinjiang Conglomerate Reservoir Laboratory), Xi'an Shiyou University, Shaanxi Petroleum Institute. Proceedings III of the International Conference on Exploration and Development of Oil and Gas Fields. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2022:

- 469–478.
- [40] LIU Zhanhong, HUANG Chunju, ALGEO T J, et al. High-resolution astrochronological record for the Paleocene-Oligocene (66–23 Ma) from the rapidly subsiding Bohai Bay Basin, northeastern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 510: 78–92.
- [41] HUANG Chunju, HINNOV L. Astronomically forced climate evolution in a saline lake record of the middle Eocene to Oligocene, Jiangnan Basin, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 528: 115846.
- [42] CHEN Guo, GANG Wenzhe, TANG Haizhong, et al. Astronomical cycles and variations in sediment accumulation rate of the terrestrial Lower Cretaceous Xigou Formation from the Jiuquan Basin, NW China [J]. *Cretaceous Research*, 2020, 109: 104156.
- [43] HUANG He, GAO Yuan, MA Chao, et al. Astronomical constraints on the development of alkaline lake during the Carboniferous-Permian Period in North Pangea [J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 207: 103681.
- [44] TANG Yong, ZHENG Menglin, WANG Xiatian, et al. The floating astronomical time scale for the terrestrial Early Permian Fengcheng Formation from the Junggar Basin and its stratigraphic and palaeoclimate implications [J]. *Geological Journal*, 2022, 57 (11): 4842–4856.
- [45] 年涛, 姜在兴, 刘惠民, 等. 东营凹陷孔一段“红—灰”岩层旋回沉积记录: 以王家岗地区王46井为例 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 32–43.
- NIAN Tao, JIANG Zaixing, LIU Huimin, et al. Cyclic sedimentary record of “red-greyish green” beds in the first Member of Eocene Kongdian Formation (Ek₁), Dongying Sag: An example from the Well Wang 46 in Wangjiagang area [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 32–43.
- [46] BERGER A, LOUTRE M F, LASKAR J. Stability of the astronomical frequencies over the earth’s history for paleoclimate studies [J]. *Science*, 1992, 255(5044): 560–566.
- [47] LASKAR J, ROBUTEL P, JOUTEL F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 428(1): 261–285.
- [48] MEYERS S R. Cyclostratigraphy and the problem of astrochronologic testing [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 190–223.
- [49] 谭先锋, 王佳, 雷丽丹, 等. 早古近纪陆相断陷型湖泊物质分异作用及其对“PETM”事件的响应: 以济阳拗陷孔店组为例 [J]. *地球科学*, 2016, 41(11): 1893–1908.
- TAN Xianfeng, WANG Jia, LEI Lidian, et al. Material differentiation and its response to the “PETM” events in continental fault lake during the Early Paleogene period: A case study of Kongdian Formation in Jiyang Depression [J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1893–1908.
- [50] JIN Simin, KEMP D B, JOLLEY D W, et al. Large-scale, astronomically paced sediment input to the North Sea Basin during the Paleocene Eocene Thermal Maximum [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 579: 117340.
- [51] LI Mingsong, BRALOWER T J, KUMP L R, et al. Astrochronology of the Paleocene-Eocene thermal maximum on the Atlantic coastal plain [J]. *Nature Communications*, 2022, 13 (1): 5618.
- [52] VIMPERE L, SPANGENBERG J E, ROIGE M, et al. Carbon isotope and biostratigraphic evidence for an expanded Paleocene-Eocene Thermal Maximum sedimentary record in the deep Gulf of Mexico [J]. *Geology*, 2023, 51(4): 334–339.
- [53] BOWRING S A, SCHMITZ M D. High-precision U–Pb zircon geochronology and the stratigraphic record [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 305–326.
- [54] 吴怀春, 王成善, 张世红, 等. “地时”(Earthtime) 研究计划: “深时”(Deep Time) 记录的定年精度与时间分辨率 [J]. *现代地质*, 2011, 25(3): 419–428.
- WU Huaichun, WANG Chengshan, ZHANG Shihong, et al. “Earthtime” project: Dating precision and temporal resolution in the “deep time” record [J]. *Geoscience*, 2011, 25(3): 419–428.
- [55] 李献华, 柳小明, 刘勇胜, 等. LA-ICPMS 锆石 U–Pb 定年的准确度: 多实验室对比分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45 (9): 1294–1303.
- LI Xianhua, LIU Xiaoming, LIU Yongsheng, et al. Accuracy of LA-ICPMS zircon U–Pb age determination: An inter-laboratory comparison [J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 45 (9): 1294–1303.
- [56] 邹才能, 杨智, 孙莎莎, 等. “进源找油”: 论四川盆地页岩油气 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(7): 903–920.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, SUN Shasha, et al. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Shale oil and gas in Sichuan Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 50(7): 903–920.
- [57] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 1–25.
- LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 1–25.
- [58] ROCHÍN-BAÑAGA H, DAVIS D W, SCHWENNICK T. First U–Pb dating of fossilized soft tissue using a new approach to paleontological chronometry [J]. *Geology*, 2021, 49(9): 1027–1031.
- [59] 储著银, 许继峰. 铷—钫同位素和铂族元素分析方法及地学应用进展 [J]. *地球科学进展*, 2021, 36(3): 245–264.
- CHU Zhuyin, XU Jifeng. Re–Os and PGE: Analytical methods and their applications in geosciences [J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(3): 245–264.
- [60] SELBY D, CREASER R A. Direct radiometric dating of the Devonian-Mississippian time-scale boundary using the Re–Os black shale geochronometer [J]. *Geology*, 2005, 33(7): 545–548.
- [61] MILANKOVIĆ M. *Kanon der Erdbeistrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem* [M]. Belgrade: Royal Serbian Academy, Section of Mathematical and Natural Sciences, 1941.

- [62] 金之钧, 范国章, 刘国臣. 一种地层精细定年的新方法[J]. 地球科学, 1999, 24(4): 379-382.
JIN Zhijun, FAN Guozhang, LIU Guochen. A new method for accurate dating of strata [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(4): 379-382.
- [63] HINNOV L A. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences [J]. GSA Bulletin, 2013, 125 (11/12): 1703-1734.
- [64] HILGEN F, LOURENS L, PÄLIKE H, et al. Should unit-stratotypes and astrochronozones be formally defined? A dual proposal (including postscriptum) [J]. Newsletters on Stratigraphy, 2020, 53(1): 19-39.
- [65] 吴怀春, 房强. 旋回地层学和天文时间带[J]. 地层学杂志, 2020, 44(3): 227-238.
WU Huachun, FANG Qiang. Cyclostratigraphy and astrochronozones [J]. Journal of Stratigraphy, 2020, 44(3): 227-238.
- [66] 宋翠玉, 吕大伟. 米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 380-395.
SONG Cuiyu, LYU Dawei. Advances in time series analysis methods for Milankovitch cycles [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 380-395.
- [67] MCLENNAN S M, Anonymous. Weathering and global denudation [J]. The Journal of Geology, 1993, 101(2): 295-303.
- [68] 陈孟晋, 宁宁, 胡国艺, 等. 鄂尔多斯盆地西部平凉组烃源岩特征及其影响因素[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 78-85.
CHEN Mengjin, NING Ning, HU Guoyi, et al. Characteristics of hydrocarbon sources and controlling factors of Pingliang Formation, western Ordos Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (S1): 78-85.
- [69] CHEN Yuhang, ZHU Zengwu, ZHANG Long. Control actions of sedimentary environments and sedimentation rates on lacustrine oil shale distribution, an example of the oil shale in the Upper Triassic Yanchang Formation, southeastern Ordos Basin (NW China) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 508-520.
- [70] WILKIN R T, BARNES H L, BRANTLEY S L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(20): 3897-3912.
- [71] CHEN Guo, GANG Wenzhe, LIU Yazhou, et al. Organic matter enrichment of the Late Triassic Yanchang Formation (Ordos Basin, China) under dysoxic to oxic conditions: Insights from pyrite framboid size distributions [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 170: 106-117.
- [72] ALVAREZ L W, ALVAREZ W, ASARO F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction [J]. Science, 1980, 208(4448): 1095-1108.
- [73] 周瑶琪, 陆永潮, 李思田, 等. 间断面缺失时间的计算问题——以贵州紫云上二叠统台地边缘礁剖面为例[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 7-17.
ZHOU Yaoqi, LU Yongchao, LI Sitian, et al. The missing time calculation of the hiatus surface——A case study of the Upper Permian reefs section at the platform margin, Ziyun, Guizhou [J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(1): 7-17.
- [74] MURPHY B H, FARLEY K A, ZACHOS J C. An extraterrestrial ^3He -based timescale for the Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM) from Walvis Ridge, IODP Site 1266 [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(17): 5098-5108.
- [75] 吴智平, 周瑶琪. 一种计算沉积速率的新方法——宇宙尘埃特征元素法[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 395-399.
WU Zhiping, ZHOU Yaoqi. Using the characteristic elements from meteoritic dust in strata to calculate sedimentation rate [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 395-399.
- [76] MUKHOPADHYAY S, FARLEY K A, MONTANARI A. A short duration of the Cretaceous-Tertiary boundary event: Evidence from extraterrestrial helium-3 [J]. Science, 2001, 291(5510): 1952-1955.
- [77] BARRELL J. Rhythms and the measurements of geologic time [J]. GSA Bulletin, 1917, 28(1): 745-904.
- [78] ANDERS M H, KRUEGER S W, SADLER P M. A new look at sedimentation rates and the completeness of the stratigraphic record [J]. The Journal of Geology, 1987, 95(1): 1-14.
- [79] GUO Z T, RUDDIMAN W F, HAO Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. Nature, 2002, 416(6877): 159-163.
- [80] 储国强, 顾兆炎, 许冰, 等. 东北四海龙湾玛珥湖沉积物纹层计年与 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 测年[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 202-207.
CHU Guoqiang, GU Zhaoyan, XU Bing, et al. Varvechronology and radiometric dating (^{137}Cs , ^{210}Pb) from the Sihailongwan Maar, northeastern China [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(2): 202-207.
- [81] BERGGREN A M, ALDAHAN A, POSSNERT G, et al. ^{10}Be and solar activity cycles in varved lake sediments, AD 1900-2006 [J]. Journal of Paleolimnology, 2010, 44(2): 559-569.
- [82] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 489-505.
LI Maowen, JIN Zhijun, DONG Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 489-505.
- [83] DING Xiujuan, LIU Guangdi, ZHA Ming, et al. Relationship between total organic carbon content and sedimentation rate in ancient lacustrine sediments, a case study of Erlan Basin, northern China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 149: 22-29.
- [84] ZHANG Wenzheng, YANG Weiwei, XIE Liqin. 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.
- [85] IBACH L E J. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(2): 170-188.
- [86] 张慧芳, 吴欣松, 王斌, 等. 陆相湖盆沉积有机质富集机理研究进展[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 463-477.
ZHANG Huifang, WU Xinsong, WANG Bin, et al. Research progress of the enrichment mechanism of sedimentary organics in

- lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 463-477.
- [87] 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 Quanyou, LI Peng, JIN Zhijun, et al. Organic-rich formation and hydrocarbon enrichment of lacustrine shale strata: A case study of Chang 7 Member [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(2): 270-290.
- [88] 孙善勇, 刘惠民, 操应长, 等. 湖相深水细粒沉积岩米兰科维奇旋回及其页岩油勘探意义——以东营凹陷牛页1井沙四上亚段为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(4): 846-858.
- SUN Shanyong, LIU Huimin, CAO Yingchang, et al. Milankovitch cycle of lacustrine deepwater fine-grained sedimentary rocks and its significance to shale oil: A case study of the upper Es4 member of Well NY1 in Dongying Sag [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(4): 846-858.
- [89] 汶玲娟, 鹿化煜, 强小科. 新近纪黄土高原红黏土粒度和沉积速率的空间变化及其揭示的古大气粉尘传输动力[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2004, 34(8): 739-747.
- WEN Lingjuan, LU Huayu, QIANG Xiaoke. Changes in grain-size and sedimentation rate of the Neogene red clay deposits along the Chinese Loess Plateau and implications for the palaeowind system [J]. *Science China Earth Sciences*, 2004, 34(8): 739-747.
- [90] 李胜利, 李顺利, 付超. 长试管静置沉降实验结果对湖盆细粒沉积纹层成因的启示[J]. *古地理论*, 2022, 24(3): 405-414.
- LI Shengli, LI Shunli, FU Chao. Implication of the large-tube settling experiment results on genesis of fine-grained deposition lamination of lacustrine basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(3): 405-414.
- [91] HAAN C T, BARFIELD B J, HAYES J C. 7-Sediment properties and transport [M]//HAAN C T, BARFIELD B J, HAYES J C. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. San Diego: Academic Press, 1994: 204-237.
- [92] 周川闽, 张志杰, 邱振, 等. 细粒沉积物理模拟研究进展与展望[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 253-267.
- ZHOU Chuanmin, ZHANG Zhijie, QIU Zhen, et al. Laboratory experiments on sedimentation of fine-grained sediment: A prospect review[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 253-267.
- [93] 吴科睿, 闫百泉, 孙雨, 等. 湖盆细粒沉积岩纹层形成机制及影响因素研究进展[J/OL]. *沉积学报*: 1-29 [2023-02-20]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.136>.
- WU Kerui, YAN Baiquan, SUN Yu, et al. Research progress on the formation mechanism and influencing factors of fine-grained sedimentary rock varves in lake basins[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1-29 [2023-02-20]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.136>.
- [94] SCHIEBER J, SOUTHARD J, THAISEN K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples [J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1760-1763.
- [95] SCHIEBER J, SOUTHARD J B, KISSLING P, et al. Experimental deposition of carbonate mud from moving suspensions: Importance of flocculation and implications for modern and ancient carbonate mud deposition [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83(11): 1026-1032.
- [96] YAWAR Z, SCHIEBER J. On the origin of silt laminae in laminated shales[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360: 22-34.
- [97] 赵文智, 朱如凯, 胡素云, 等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6): 1079-1089.
- ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1079-1089.
- [98] JOHNSON T C, BARRY S L, CHAN Y, et al. Decadal record of climate variability spanning the past 700 yr in the southern tropics of East Africa[J]. *Geology*, 2001, 29(1): 83-86.
- [99] OJALA A E K, FRANCUS P, ZOLITSCHKA B, et al. Characteristics of sedimentary varve chronologies-A review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 43: 45-60.
- [100] SHI Juye, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Sunspot cycles recorded in Eocene lacustrine fine-grained sedimentary rocks in the Bohai Bay Basin, eastern China [J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 205: 103614.
- [101] 朱如凯, 张婧雅, 李梦莹, 等. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题[J/OL]. *地质学报*: 1-23 [2023-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20230216.1101.003.html>.
- ZHU Rukai, ZHANG Jingya, LI Mengying, et al. Advances and key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment[J/OL]. *Acta Geologica Sinica*: 1-23 [2023-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20230216.1101.003.html>.

(编辑 梁 慧)