**Mine Engineering** 矿山工程, 2026, 14(6), 1541-1554
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146153

Hans汉斯

# 湖相细粒沉积岩有机质富集机理研究进展及其对页岩油勘探的启示

**丁敏聪**

长江大学资源与环境学院，湖北 武汉

收稿日期：2026年10月6日；录用日期：2026年11月3日；发布日期：2026年11月10日

## 摘　要

**湖相烃源岩是中国陆相含油气盆地非常重要的油气母岩，有机质富集机理是油气有机地球化学与细粒沉积学交叉领域的前沿命题。本文基于近半个世纪以来国内外研究，系统梳理了湖相细粒沉积岩有机质富集的研究进展：湖泊类型与湖盆充填方式通过控制可容纳空间与沉积物供给，决定烃源岩发育的宏观格架；有机质富集受古生产力、氧化还原保存条件、沉积速率与稀释效应等主控因素的联合制约，并受古气候、天文轨道旋回以及构造－火山－热液事件的显著调制。元素地球化学、生物标志化合物与稳定同位素指标体系为恢复古环境、判识有机质来源与富集机制提供了有效手段。围绕“生产力论”与“保存论”的经典之争，越来越多的研究强调二者在不同湖盆、不同层段中的相对贡献差异，并逐步走向“生产力－保存－稀释”多元耦合的定量评价框架。本文以鄂尔多斯、松辽、渤海湾、准噶尔等盆地典型湖相层系为例进行对比，进而讨论了有机质富集研究对陆相页岩油“甜点”评价的启示，并展望了多指标解耦、深时天文驱动与数据驱动评价等未来方向。**

## 关键词

**湖相烃源岩，有机质富集，古生产力，氧化还原条件，生物标志化合物，页岩油**

# Research Progress on Organic Matter Enrichment Mechanisms in Lacustrine Fine-Grained Sedimentary Rocks and Its Implications for Shale Oil Exploration

**Mincong Ding**

College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan Hubei

Received: October 6, 2026; accepted: November 3, 2026; published: November 10, 2026

文章引用: 丁敏聪. 湖相细粒沉积岩有机质富集机理研究进展及其对页岩油勘探的启示[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1541-1554. DOI: 10.12677/me.2026.146153

## Abstract

**Lacustrine source rocks constitute the very important hydrocarbon mother rocks in non-marine petroliferous basins of China, and the mechanism of organic matter (OM) enrichment is a frontier topic at the interface of petroleum organic geochemistry and fine-grained sedimentology. Based on domestic and international studies over the past half century, this review systematically summarizes the progress on OM enrichment in lacustrine fine-grained sedimentary rocks. Lake type and basin-fill style control the macroscopic framework of source rock development through accommodation and sediment supply. OM enrichment is jointly governed by paleoproductivity, redox preservation conditions, sedimentation rate and dilution effects, and is significantly modulated by paleoclimate, astronomical orbital cycles, and tectonic-volcanic-hydrothermal events. Elemental geochemical, biomarker compound and stable isotope indicator systems provide effective tools for reconstructing paleoenvironments and identifying OM sources and enrichment mechanisms. With respect to the classical controversy between the "productivity model" and the "preservation model", increasing evidence emphasizes the variable relative contributions of the two factors in different lake basins and intervals, and the framework of "productivity-preservation-dilution" coupling is being established. Typical lacustrine successions in the Ordos, Songliao, Bohai Bay and Junggar basins are compared, and the implications of OM enrichment studies for shale oil "sweet spot" evaluation are discussed. Future directions including multi-proxy decoupling, deep-time astronomical forcing and data-driven evaluation are proposed.**

## Keywords

**Lacustrine Source Rocks, Organic Matter Enrichment, Paleoproductivity, Redox Conditions, Biomarkers, Shale Oil**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

## 1. 引言

页岩油气已成为全球非常规油气勘探开发的主体领域之一。中国陆相页岩油资源丰富，截至 2022 年底已在鄂尔多斯、松辽、渤海湾、准噶尔等盆地多个层系取得勘探突破，探明、控制、预测三级地质储量达 44 亿吨，2022 年产量达 318 万吨[1]。页岩油以“源内滞留”为基本特征，富有机质泥页岩既是生油岩又是储集岩，其有机质丰度、类型与分布直接决定了页岩油的资源基础与富集程度[2] [3]。因此，查明湖相细粒沉积岩中有机质“如何富集、为何富集、富集何处”，既是烃源岩地球化学的核心命题，也是陆相页岩油选区评价与“甜点”刻画的前提[3] [4]。

有机质富集的成因研究可追溯至 20 世纪 70 至 80 年代。Demaison 和 Moore [5]基于对全球富有机质沉积的总结，提出缺氧环境是优质烃源岩形成的关键控制因素，即“保存论”；而 Pedersen 和 Calvert [6]通过对现代海洋上涌区的观测，强调表层水体的高初级生产力才是富有机质沉积形成的必要条件，缺氧并非必需，即“生产力论”。这场持续数十年的争论深刻影响了烃源岩有机质富集研究的理论框架，也推动了沉积学、地球化学与古海洋学多学科的交叉融合。进入 21 世纪，随着非常规油气勘探的推进，湖相烃源岩有机质富集机理研究在细粒沉积学、旋回地层学与分子有机地球化学的支撑下取得显著进展，研究视角从“单因素主导”走向“多因素耦合”，研究尺度从盆地尺度拓展至天文轨道尺度。

本文以湖相烃源岩有机质富集机理为主线，综合国内外代表性文献，围绕湖相细粒沉积岩有机质富集的沉积背景、主控因素、地球化学表征、典型层系对比、理论模式及其页岩油勘探意义展开综述，以期为相关研究与勘探实践提供参考。

## 2. 湖相有机质富集的沉积背景与物质基础

### 2.1. 湖泊类型与烃源岩发育

湖泊是大陆上最有效的有机碳埋藏场所之一，湖相烃源岩的发育与湖泊的类型、演化和充填方式密切相关[7] [8]。Kelts [7]较早系统总结了湖相烃源岩的沉积环境类型，强调湖泊水体的物理分层(温度分层与盐度分层)对底层水缺氧环境和有机质保存的重要控制作用。Carroll 和 Bohacs [8]在层序地层学框架下提出湖泊“过充溢、平衡充溢、欠充溢”三分方案，认为湖盆类型控制了可容纳空间与沉积物/水供给的平衡关系，进而决定烃源岩的厚度、连续性及其与储层、盖层的配置；Bohacs 等[9]进一步将湖盆类型与源岩潜力、烃类性质联系起来，指出欠充溢型盐湖虽可形成优质烃源岩，但常与蒸发岩共生，烃类性质复杂。Eugster [10]则从化学沉积角度揭示了油页岩、蒸发岩与金属矿床的共生关系，为咸化湖盆有机质富集研究提供了水化学背景。

中国中新生代含油气盆地以陆相为主，断陷湖盆与坳陷湖盆两类构造背景的差异性深刻影响了烃源岩的发育样式：断陷湖盆沉降快、分割性强，深洼带易形成欠补偿缺氧环境，发育厚层优质烃源岩；坳陷湖盆沉积范围广、相带分异相对简单，最大湖泛期可形成区域分布的富有机质页岩[3] [8]。不同湖泊类型下有机质富集的控制因素组合存在系统差异，这是理解湖相烃源岩非均质性的基础。

### 2.2. 有机质类型与母质来源

湖相沉积有机质的来源包括湖泊自生的浮游藻类、细菌以及陆源高等植物输入，不同来源在化学组成、生烃潜力与环境指示意义上差异显著[11] [12]。Meyers 和 Ishiwatari [11]系统总结了湖相沉积有机质来源与成岩作用的指示指标体系，指出总有机碳(TOC)与总氮(TN)比值(C/N)、氢指数(HI)以及正构烷烃分布等参数可有效判别有机质来源：浮游藻类为主的有机质具有较低 C/N 比(通常小于 10)与较高 HI，而陆源高等植物贡献增大时 C/N 比升高、HI 降低[11] [12]。Tissot 和 Welte [13]建立的干酪根 I-II-III 型分类体系仍是评价湖相烃源岩生烃潜力的基本框架，湖相烃源岩以 I 型和 II1 型干酪根为主，生烃潜力高，是优质油源岩的物质基础[3] [13]。

湖泊水体的盐度与分层状态显著影响有机质的来源构成与保存效率。金强等[14]系统研究了我国咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布，指出湖水在重力作用下易形成盐度分层，表层水体盐度低，适宜广盐/嗜盐型浮游生物繁盛，底层水体盐度高、缺乏游离氧，有利于有机质保存；表层生物高产率区与底层缺氧区的叠合部位即优质烃源岩发育区。这一认识将“生产力”与“保存”两大因素统一于水体分层框架之内，是湖相有机质富集模式的代表性成果。同时，湖相有机质的碳同位素组成受湖泊碳循环与湖面变化影响显著，Talbot 和 Lærdal [15]对东非维多利亚湖的研究表明，湖相有机质氢指数与碳同位素组成可灵敏响应湖面升降与水体混合状态，为利用有机地球化学指标恢复古湖泊水文提供了范例。

## 3. 有机质富集的主控因素

### 3.1. 古生产力

初级生产力是湖相有机质富集的物质前提。Demaison 和 Moore [5]提出的“缺氧带”模型强调保存条件的控制作用，而 Pedersen 和 Calvert [6]基于现代海洋证据提出，表层水体的高生产力通过增大有机碳沉降通量并消耗底层水体溶解氧，即使在水体未长期缺氧的条件下也能形成富有机质沉积。这一“生

产力论”得到了多学科证据的支持：Calvert 等[16]通过地中海腐泥层的氮同位素研究证明，腐泥层形成期生产力显著升高；Ganeshram 等[17]对墨西哥西北部大陆坡沉积的研究表明，有机碳埋藏同时受生产力与底栖生物扰动(氧化)程度的控制，高生产力区的富有机质沉积即使在氧化底质中也可形成。

湖相研究同样支持生产力在有机质富集中的关键作用。冯子辉等[18]对松辽盆地青山口组优质烃源岩的研究表明，大规模湖侵背景下浮游藻类勃发形成的高生产力，配合水体分层形成的缺氧环境，共同造就了湖相优质烃源岩的大面积发育。马瑜等[19]对鄂尔多斯盆地长 7 页岩的研究发现，TOC 与磷元素含量呈良好正相关，指示古生产力对有机质丰度的直接控制，并将其富集模式概括为“生产力模式”。刘翰林等[20]对长 7 段 3 亚段异常高有机质沉积的研究进一步提出，该层段发育于温暖潮湿气候下的淡水–微咸水湖盆，沉积期湖盆处于超富营养状态，营养元素富集与微体生物化石埋藏特征均指示高初级生产力是异常高有机质(TOC ≥ 6%)富集的重要基础。

需要指出的是，湖相盆地的生产力水平受气候、水文、营养盐供给等多种因素控制，其时空变化远较海洋系统剧烈，生产力指标(如生物钡、磷、铜、镍等)的可靠性需要结合沉积环境进行多指标交叉验证[19] [20]。

### 3.2. 氧化还原条件与保存

底层水体的氧化还原条件直接控制沉积有机质在埋藏初期的降解程度，是“保存论”的核心论据[5]。在缺氧条件下，好氧微生物降解作用被抑制，有机质保存效率显著提高；而氧化水体中底栖生物扰动与好氧降解可导致有机质大量损耗[5] [21]。Calvert 和 Pedersen [21]通过现代沉积对比指出，缺氧环境并非有机质保存的绝对必要条件，高沉降通量条件下氧化沉积物同样可以保存大量有机质，从而将争论焦点引向生产力与保存条件的相对贡献。

需要指出的是，缺氧环境与高生产力之间存在正反馈机制：缺氧条件下沉积磷的再生增强，可进一步提高水体生产力，形成“生产力–缺氧”的自我放大[22]。湖相环境下，水体分层是形成底层缺氧的关键机制[7] [14]。温度分层与盐度分层可共同抑制湖底水体的垂直混合，形成长期稳定的缺氧环境。咸化湖盆中，盐度分层尤为显著：表层低盐度水体适合藻类勃发，底层高盐度水体缺氧且缺乏底栖生物，有机质得以高效保存[14]。Sinninghe Damsté 等[23]提出伽马蜡烷可作为水体分层的分子标志，其前身物(四膜虫醇)源于化跃层附近的纤毛虫，伽马蜡烷的富集指示了水体盐度分层与化跃层发育，为利用生物标志物恢复古水体分层状态提供了分子证据。

在层系尺度上，保存条件与有机质富集常表现为明显的相关性。松辽盆地青山口组优质烃源岩的发育与间歇性海侵导致的湖水咸化分层和缺氧环境密切相关[24]；鄂尔多斯盆地长 7 段沉积期水体整体为还原–强还原环境，草莓状黄铁矿粒径分布指示底水以“贫氧”为主，为异常高有机质富集提供了保存条件[20]。这一机制对于理解湖相富有机质层段的多期叠加富集具有重要意义。

### 3.3. 沉积速率与稀释效应

沉积速率对有机质富集具有双重影响。一方面，适中的沉积速率有利于有机质快速埋藏、缩短在氧化环境中的暴露时间，从而提高保存效率；另一方面，过高的沉积速率(特别是陆源碎屑输入)会稀释沉积物中的有机质浓度，降低 TOC 含量[25] [26]。Ibach [25]基于古代海相沉积的统计分析提出了沉积速率与 TOC 关系的经典模式，指出在低沉积速率区间，TOC 随沉积速率增大而增大(保存效应)，在高速率区间则随速率增大而减小(稀释效应)。Arthur 和 Sageman [26]将生产力、保存与稀释并列为控制有机质富集的三大因素，奠定了“三元框架”的基础；Sageman 等[27]通过对阿巴拉契亚盆地泥盆纪黑色页岩的定量研究，实现了三因素相对贡献的定量分解；Katz [28]则从烃源岩发育的角度系统评述了三因素的综合控制作用。

湖相盆地中，沉积速率与有机质富集的关系受湖盆类型与物源供给的强烈调制[8] [28]。欠充溢型湖盆沉积速率低，易形成高 TOC 烃源岩，但烃源岩厚度有限；过充溢型湖盆沉积速率高，烃源岩分布广但 TOC 相对较低；平衡充溢型湖盆则在二者之间取得平衡，常形成厚度与丰度俱佳的烃源岩[8] [9]。鄂尔多斯盆地长 7 段沉积速率的研究表明，异常高有机质层段往往对应适当的陆源碎屑输入，过多的陆源物质输入反而稀释有机质[20]。沉积速率的精细厘定与有机质富集的关系，已成为湖相层系非均质性评价的重要切入点。

### 3.4. 古气候、古水文与天文旋回

古气候通过控制降水、蒸发、风化和营养盐输入，直接调制湖泊生产力与水体分层状态，是湖相有机质富集的深层驱动因素[12] [29]。湿润气候期降水增强、湖水淡化、湖面上升，陆源营养盐输入增大，有利于藻类勃发与有机质富集；干旱气候期蒸发强烈、湖水咸化，虽有利于水体分层与保存，但生产力可能受抑制[12] [14]。Meyers 和 Lallier-Vergès [12]对晚第四纪湖泊沉积的研究表明，湖相有机质记录可灵敏响应千年–轨道尺度的气候变化，为解读地质历史时期有机质富集的古气候背景提供了依据。

天文轨道驱动的气候变化是湖相有机质富集研究的新兴方向。地球轨道参数(偏心率、斜率、岁差)的周期性变化引起太阳辐射分布与季风强度的周期性波动，进而调控湖泊生产力与有机质保存[29]。Zhang 等[30]在 14 亿年前的沉积记录中识别出天文轨道信号，证明轨道驱动对地球碳循环与有机质埋藏的调控具有深时普遍性；Li 等[31]系统比较了 16 种古气候代用指标对天文强迫的响应灵敏度，建立了多指标聚类分析与功率分解的评价框架，为包括湖相层系在内的旋回地层分析提供了多指标甄别方法。张瑞等[29]对鄂尔多斯盆地长 7 段的研究识别出稳定的 405 ka 长偏心率旋回，天文调谐确定长 7 段沉积持续约 1.29 Ma，并揭示出古生产力与有机质保存条件的响应周期均为 405 ka：长偏心率高值期，高生产力与保存条件的耦合有利于页岩有机质富集。这一工作标志着湖相有机质富集研究已从定性描述走向天文年代学约束的定量解析。

### 3.5. 构造、火山与热液事件

构造事件通过控制湖盆的沉降、水系重组与火山活动，间接影响有机质富集。火山活动对湖相有机质富集的促进机制主要包括：火山灰释放营养元素(磷、铁等)促进藻类勃发，提高湖泊生产力；火山灰沉降形成凝灰质纹层，改善有机质的保存与富集介质；火山活动相关的热液喷流可为湖盆带来营养盐与还原性物质[20] [32]。刘翰林等[20]指出，鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段异常高有机质富集与沉积期频繁的火山活动存在时间耦合，凝灰质纹层与富有机质纹层频繁互层，指示火山–沉积事件对有机质富集的叠加促进。付金华等[33]在总结鄂尔多斯盆地长 7 段页岩油勘探实践时指出，长 7 段半深湖–深湖区多种深水重力流沉积多期发育，火山物质蚀变为生物勃发提供营养元素，是优质烃源岩形成的重要背景。

准噶尔盆地芦草沟组碱性湖相油页岩的研究进一步揭示了火山–热液作用的复杂性。Qiao 等[32]的综合地球化学与有机岩石学研究表明，芦草沟组沉积期水体为亚氧化环境、生产力中等，有机质富集主要受保存条件而非生产力控制，并讨论了构造背景(大陆岛弧)与弱化学风化对湖泊水化学的调制作用。与海洋环境类似，湖相热液活动可以通过提供营养盐、促进水体分层等方式影响有机质富集，但热液输入在湖盆中的时空分布及其对有机质富集的定量贡献，仍有待深入研究[20] [32]。

## 4. 有机质富集的地球化学表征

### 4.1. 元素地球化学指标

微量元素(特别是氧化还原敏感元素与营养元素)在沉积物中的富集行为受水体氧化还原状态、生产

力水平和沉积速率等的系统控制，是恢复古环境的有效指标[34]。钼、铀、钒、镍、铜、锌等元素的含量与比值(如 V/Cr、Ni/Co、U/Th、V/(V+Ni))已被广泛用于判别底水氧化还原条件[19] [34]；其中钼的行为尤为复杂，Algeo 和 Lyons [35]系统研究了现代缺氧盆地的 Mo-TOC 协变关系，提出 Mo/TOC 斜率可反映水体滞留程度与古水文条件，Algeo 等[36]进一步将该方法应用于古代克拉通盆地，建立了利用 Mo-TOC 斜率重建古盆地水文格局的框架。Brumsack [37]对现代富有机质沉积的微量元素组成进行了系统对比，为黑色页岩的微量元素解释提供了现代类比。

在湖相应用中，元素指标需要谨慎解释。马瑜等[19]利用 U/Th、δU 与 V/(V + Ni)等指标判别了鄂尔多斯长 7 段沉积期的还原－强还原环境，并以磷元素丰度指示高古生产力；刘翰林等[20]结合草莓状黄铁矿粒径与元素地球化学特征，提出长 7 段 3 亚段底水以“贫氧”为主的判断，避免了单一指标的多解性。总体而言，湖相水体的快速变化与陆源碎屑输入使得元素指标的解释必须结合矿物学、岩相与多指标交叉验证[20] [34]。

### 4.2. 生物标志化合物

生物标志化合物是连接有机质来源、沉积环境与烃类成因的分子纽带[38]。甾烷的 C27-C28-C29 相对组成可判别浮游藻类与陆源高等植物的相对贡献[39]；甲藻甾烷(4α,23,24-三甲基胆甾烷)作为沟鞭藻来源的分子化石，其富集通常与沟鞭藻勃发相关[40]，但在湖相体系中与水体咸化或海侵的关联需结合其他指标综合判断；伽马蜡烷指示水体分层(常见于咸化分层水体) [23]；姥鲛烷/植烷(Pr/Ph)比值则可粗略反映沉积环境的氧化还原与咸化程度[38] [39]。Peters 和 Fowler [38]系统总结了生物标志物与稳定同位素在油源对比、成熟度评价与充注史研究中的应用，指出多参数联合是降低分子指标多解性的有效途径。

湖相烃源岩的生物标志物组合具有鲜明的环境烙印。咸化湖盆烃源岩常以高伽马蜡烷丰度、低 Pr/Ph 比值和较高的 β-胡萝卜烷含量为特征，反映盐度分层与强还原环境[14] [23]；淡水－微咸水湖盆则以藻类来源的甾烷为主，陆源标志物(如奥利烷、双杜松烷)含量较低[38] [40]。松辽盆地青山口组的研究表明，经微生物改造的浮游菌藻类生源有机质对高生油能力优质烃源岩的形成具有重要作用，分子标志物记录了微生物改造与生物勃发事件的耦合过程[24]。生物标志物指标不仅服务于古环境重建，也是油源对比、页岩油富集机理研究的基本工具[24] [38]。

### 4.3. 稳定同位素指标

稳定同位素(碳、氮)为有机质来源与古环境重建提供了独立的约束。有机碳同位素组成(δ13C-org)受母质来源、生产力水平、水体碳循环与湖面变化等因素影响[15] [16] [41]。Calvert 等[16]利用沉积物氮同位素证明了地中海腐泥层形成期生产力的升高，展示了稳定同位素示踪古生产力的潜力；Talbot 和 Lærdal [15]的研究表明，湖相有机质 δ13C-org 与氢指数(HI)的组合可有效判别有机质来源并指示湖面变化：湖泊自生有机质 δ13C-org 偏负、HI 偏高，陆源输入增加则反之。Meyers [41]对北美五大湖的综述进一步表明，碳、氮同位素与元素、分子指标联合使用，可系统重建湖泊生产力、营养状态与氧化还原条件的演化。

值得注意的是，湖相有机质的碳同位素解释存在特殊性：封闭型湖泊因碳库效应可导致 δ13C-org 整体偏正，干旱化与高盐度也可使自生有机质 δ13C-org 增重[15] [41]。因此，湖相层系中同位素指标需与生物标志物、元素指标交叉验证，避免单一指标误导环境解释。

## 5. 典型湖相层系有机质富集特征对比

比较地质学通过跨盆地、跨时代的系统对比，从地质背景差异中提炼控制性因素。本节以鄂尔多斯盆地长 7 段、松辽盆地青山口组、渤海湾盆地古近系与准噶尔盆地芦草沟组为对象，围绕构造背景、气

候条件、物源供给、湖盆类型与水体化学等维度设立对比框架(见表 1)，系统分析不同地质背景下有机质富集主控因素的分异及其成因。

### 5.1. 鄂尔多斯盆地长 7 段(坳陷湖盆)

鄂尔多斯盆地长 7 段(时代归属存在晚三叠世与中三叠世拉丁期两种划分，本文沿用上三叠统传统方案)沉积于湖盆最大湖泛期，是典型的坳陷湖盆富有机质层系[19] [20] [29] [33]。长 7 段 3 亚段异常高有机质层 TOC 最高可达 35.8%，发育于温暖潮湿气候条件下的淡水–微咸水湖盆，超富营养状态与“贫氧”底水共同控制了异常高有机质的富集[20]；长 7 段沉积期水体整体还原，TOC 与磷含量正相关指示生产力控制[19]；旋回地层学研究进一步揭示 405 ka 长偏心率旋回对生产力与保存条件的耦合调控[29]。长 7 段页岩油已实现规模开发，成为我国陆相页岩油勘探的标杆层系[33]。定量评价显示，长 7 段 3 亚段页岩有机质平均转化率约 45%、累计排烃效率约 27.5%，未转化有机质与滞留烃占比大于 70%，中低熟页岩油资源潜力巨大[42]。

### 5.2. 松辽盆地青山口组(断陷–坳陷湖盆)

松辽盆地上白垩统青山口组一段–二段发育巨厚湖相黑色页岩，是古龙页岩油的物质基础[18] [24] [43]。青山口组沉积期陆地水文循环强烈、湖平面上升，大量营养物输入使浮游菌藻类生物繁盛，间歇性海侵促进水体咸化分层和缺氧环境形成，有利于有机质富集[24]；生物标志物分析表明，经微生物改造的浮游菌藻类生源有机质对优质烃源岩形成具有重要作用[24]。古龙页岩油为典型的原生源储原位油藏，页岩中与黏土矿物共生的层状藻类体生烃后形成以有机孔为主的孔缝体系[43]。

### 5.3. 渤海湾盆地古近系(断陷湖盆)

渤海湾盆地古近系沙河街组与孔店组发育典型的断陷咸化湖盆烃源岩[14] [44] [45]。咸化湖盆水体盐度分层，表层高生产力与底层缺氧的叠合控制优质烃源岩发育[14]。黄骅坳陷页岩油勘探实践表明，适中有机质丰度(TOC 为 2%~4%)、适中成熟度(Ro 为 0.7%~1.0%)与高密度微米–纳米纹层、良好保存条件共同控制页岩油富集[44] [45]；沧东凹陷孔二段页岩油已实现工业化开发[44]。

### 5.4. 准噶尔盆地芦草沟组(咸化–碱性湖盆)

准噶尔盆地中二叠统芦草沟组为近海咸化–碱性湖盆混积细粒沉积，是世界范围内湖相油页岩/烃源岩发育的典型层系之一[32]。综合地球化学与有机岩石学研究表明，芦草沟组沉积期水体亚氧化、生产力中等，有机质富集主要受保存条件控制，指示了与鄂尔多斯长 7 段“生产力主导”模式不同的“保存主导”模式[32]，体现了不同湖盆类型间富集机制的差异性。典型湖相烃源岩层系有机质富集特征对比(见表 1)。

### 5.5. 比较地质学视角：地质背景对主控因素分异的控制

构造背景首先决定了湖盆的类型、可容纳空间与沉降速率，进而塑造了有机质富集的基本格架[3] [8]。鄂尔多斯盆地长 7 段发育于稳定坳陷湖盆最大湖泛期，沉降缓慢、湖盆范围广、相带分异相对简单，为高生产力与保存条件在区域尺度上的耦合提供了开阔水体环境[19] [20] [29]；松辽盆地青山口组处于断陷向坳陷转化的过渡阶段，沉降速率高、湖盆分割性减弱，大规模的湖侵与间歇性海侵共同作用，形成了巨厚的高生产力富有机质页岩[18] [24]；渤海湾盆地古近系为典型断陷湖盆，沉降快、分割性强、水体盐度分异显著，深洼带易形成盐度分层缺氧环境，保存条件对有机质富集的贡献突出[14] [44] [45]；准噶尔盆地芦草沟组形成于与海沟通的近海断陷湖盆背景，受大陆岛弧构造背景控制，弱化学风化与碱性水体

条件使湖泊水化学具有特殊性[32]。

气候条件通过降水、蒸发与风化强度调控湖泊生产力、水体盐度与陆源物质输入，是造成主控因素分异的深层驱动[12] [29]。长 7 段沉积期温暖潮湿、湖盆超富营养，陆源营养盐输入适中，高生产力成为有机质富集的主导因素，过多的陆源碎屑输入则产生稀释效应[19] [20]；青山口组沉积期陆地水文循环强烈、营养物输入充沛，浮游菌藻类勃发，配合间歇海侵引起的咸化分层，形成“生产力 + 保存”协同控制的格局[24]；渤海湾古近系与芦草沟组沉积期总体偏干旱、蒸发作用强，湖水咸化，生产力受盐度抑制而保存条件增强，有机质富集转向保存主导或“生产力 × 保存”叠合[14] [32] [44] [45]。物源性质同样关键：芦草沟组混积细粒沉积中火山－热液物质的输入为湖泊带来了营养盐与还原性组分，强化了保存与事件性增碳效应[32]；而长 7 段凝灰质纹层与富有机质纹层的频繁互层，指示火山事件在生产力与保存条件上的双重叠加[20] [33]。

**Table 1.** Organic matter enrichment characteristics of typical lacustrine source rock intervals
**表 1.** 典型湖相烃源岩层系有机质富集特征

| 盆地/层系 | 湖盆类型 | 主要岩相 | TOC 特征 | 母质类型 | 主控因素 | 代表文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 鄂尔多斯长 7 段 | 坳陷湖盆(淡水－微咸水) | 黑色页岩、油页岩、凝灰质纹层 | 最高 35.8% | I 型为主 | 高生产力 + 贫氧保存 + 火山事件 + 天文旋回 | [19] [20] [29] [33] |
| 松辽青山口组 | 断陷－坳陷湖盆(间歇海侵) | 黑色页岩、层状藻类体 | 高(优质烃源岩) | I-II1 型 | 高生产力 + 水体咸化分层缺氧 | [18] [24] [43] |
| 渤海湾孔二段/沙河街 | 断陷咸化湖盆 | 泥页岩、碳酸盐质页岩 | TOC 为 2%~4% | I 型为主 | 盐度分层(生产力 × 保存叠合) + 高密度纹层发育 | [14] [44] [45] |
| 准噶尔芦草沟组 | 断陷咸化－碱性湖盆 | 混积岩、碳酸盐质泥岩、硅质泥岩 | 高(油页岩) | II 型为主 | 保存条件主导(水体分层缺氧) | [32] |

综上，不同盆地有机质富集主控因素的差异并非偶然，而是构造背景－气候条件－物源供给－水体化学“地质背景组合”的系统产物：坳陷湖盆 + 温暖潮湿 + 适中物源造就了鄂尔多斯长 7 段“生产力主导”模式；断陷－坳陷转化 + 强水文循环 + 间歇海侵造就了青山口组“生产力 + 咸化分层”模式；断陷咸化 + 强蒸发造就了渤海湾“生产力 × 保存叠合”模式；近海断陷 + 碱性水体 + 火山－热液事件造就了芦草沟组“保存主导”模式。这一比较地质学视角表明，烃源岩评价不能套用单一模式，而应立足盆地具体的地质背景组合，识别主导因素及其组合方式(见表 1)。

## 6. 争议与模式：从“生产力－保存之争”到多元耦合

有机质富集成因的“生产力论”与“保存论”之争是烃源岩地球化学发展史上的重要学术争论[5] [6] [21] [26] [46]。Demaison 和 Moore [5]以缺氧环境为中心建立烃源岩生成模型；Pedersen 和 Calvert [6]则指出高生产力区即使底水氧化也能富集有机碳。随着研究深入，越来越多的证据表明，两大因素并非互斥，其相对贡献随地质背景而变化：在开阔海相与大型湖盆中，生产力常是主导因素；在封闭、分层的水体环境中，保存条件的作用则更为突出[21] [26] [46]。Tyson [46]系统剖析了这场争论的成因与论证缺陷，指出“生产力”与“保存”之争在很大程度上源于对富有机质沉积形成过程中有机碳通量与降解速率的定量关系认识不足，并主张通过定量化途径调和二者。

在湖相背景下，水体分层机制天然地将生产力与保存条件耦合在一起[7] [14]：分层水体一方面通过

抑制混合促进底层缺氧(利于保存)，另一方面通过营养盐的垂向循环与再分配影响表层生产力。金强等[14]提出的咸化湖盆“表层高生产力–底层缺氧”叠合模式，正是这种耦合的经典表达。近年来，“生产力–保存–稀释”三元耦合框架成为主流认识[26] [28]：古生产力提供物质基础，保存条件决定有机质损耗程度，沉积速率则控制有机质的浓缩与稀释；三者的相对强度随湖盆类型、气候旋回与事件性过程而变化[8] [20] [29] (见图 1)。

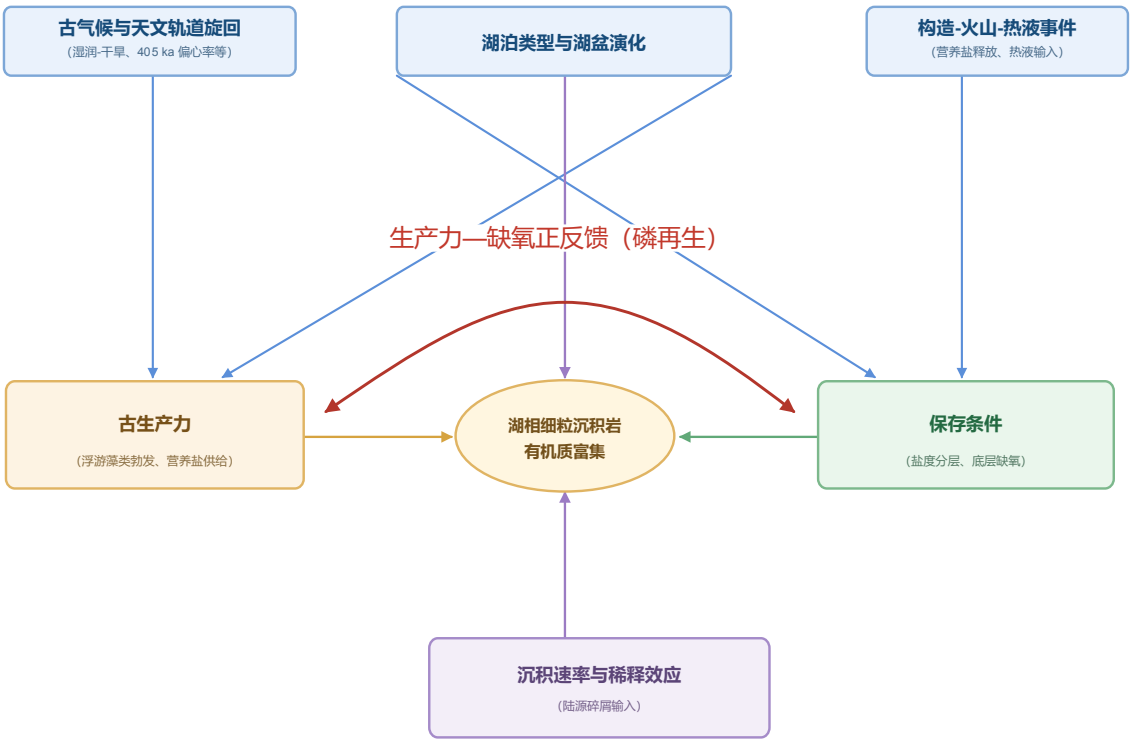



**Figure 1.** Coupling model of main controlling factors of organic matter enrichment in lacustrine fine-grained sedimentary rocks
**图 1.** 湖相细粒沉积岩有机质富集主控因素耦合模式

## 三元耦合框架的适用边界、内在挑战与学界修正

需要指出的是，“生产力–保存–稀释”三元耦合框架最初主要基于海相层序建立[26] [27]，将其应用于湖相体系时存在明确的适用边界。其一，该框架适用于相对稳定的深水–半深水细粒沉积环境，在此类环境中生产力、保存条件与沉积速率可在较长时间尺度上保持相对稳定的竞争关系；而对于受重力流、火山–热液喷流等事件性过程控制的层段，三因素的稳态平衡被打破，事件性沉积对有机质富集的贡献难以在框架内获得完整刻画[8] [20] [32]。其二，湖盆的封闭性与波动性使三因素的时空变率远大于海相体系，欠充溢型与过充溢型湖盆在可容纳空间与沉积物供给上的系统差异，会显著改变三因素的相对权重[8] [9] [28]。

三元框架在应用中的内在挑战主要来自三个方面。首先，三因素难以完全独立量化：生产力指标(如磷、生物钡)与氧化还原敏感元素指标在富有机质层段常呈协同变化，单一指标往往同时受多种因素控制，指标的解耦需要元素、分子与同位素多方法联合[19] [34]。其次，稀释效应与保存效应在中等沉积速率区间存在边界模糊，Ibach [25]的沉积速率–TOC 分段模式表明，二者并非在某速率处截然分开，而是渐变过渡，定量界定两者的相对贡献依赖高精度年代学约束。再次，生产力与保存条件之间存在正反馈耦合

——缺氧环境促进沉积磷再生，进而提高水体生产力，使两因素在机制上难以截然分离[22]。这些挑战使得三因素的独立定量分解在多数盆地中仍难以实现。

针对上述局限，学界提出了多种修正与调和方案。Tyson [46]系统剖析了“生产力论”与“保存论”之争的成因，指出争论在很大程度上源于对有机碳通量与降解速率定量关系认识不足，主张以定量化途径调和二者。Sageman 等[27]通过质量平衡模型实现了泥盆纪黑色页岩中生产力、分解与稀释三因素相对贡献的定量分解，为框架的定量化提供了方法范例。Katz [28]在系统评述基础上强调，三因素的相对重要性随沉积体系与时间尺度而变化，不宜将其视为静态权重。在湖相研究中，金强等[14]提出的“表层高生产力–底层缺氧”叠合模式将生产力与保存在水体分层框架内统一，实际上是对三元框架的湖相化修正；刘翰林等[20]对长 7 段异常高有机质沉积的研究则表明，事件性火山活动可以在三元框架之上叠加“事件性增碳”效应，提示框架需要向“稳态三元 + 事件调制”的方向扩展。总体而言，学界已普遍接受三因素耦合的基本认识，但在量化路径、指标解耦与事件性过程的处理方式上仍存在分歧，这些分歧正是未来研究的重要生长点。

## 7. 对陆相页岩油勘探的启示

有机质富集机理研究直接服务于陆相页岩油的选区评价与“甜点”刻画。

其一，富有机质层段是页岩油富集的物质基础。页岩油富集对烃源岩有机质丰度有明确要求，TOC 大于 2%通常视为良好–极好烃源岩、以 I 型和 II1 型母质为佳，中高熟页岩油的最优丰度区间为 3%~4% [47]-[49]。长 7 段、青山口组等优质烃源岩层段的勘探突破表明，有机质富集机理研究确定的“超富营养 + 缺氧保存”富集模式，为优选页岩油规模富集区提供了直接依据[20] [24] [33]。

其二，有机质类型与演化程度控制页岩油的品质与可动性。湖相 I 型有机质生烃早、生烃潜力大，但中低熟阶段生成的烃类偏重，可动性差；适宜的热演化程度(如 Ro 为 0.7%~1.0%)是滞留可动烃富集的有利区间[44] [45] [47]。黄骅坳陷与古龙凹陷的实践表明，中等有机质丰度、高滞留可动烃含量与优良保存条件的匹配，是页岩油效益开发的有效组合[24] [43] [45]。

其三，有机质富集的非均质性决定了页岩油“甜点”的非均质性。湖相有机质富集受生产力、保存、稀释及事件性过程的联合控制，导致 TOC 在垂向上呈旋回性、在平面上呈分带性分布[20] [29]。烃源岩品质的精细评价(如 Peters 和 Cassa [49]建立的丰度–类型–成熟度评价体系)需要与沉积微相、旋回地层与地球化学指标紧密结合，才能实现页岩油“甜点”的精准刻画[38] [47] [49]。此外，生物标志物与同位素指标在页岩油油源对比、含油性与富集机理研究中已发挥不可替代的作用[24] [38]。长 7 段“甜点”识别实践进一步表明，甜点段不限于高 TOC 泥页岩段(页岩型甜点)，TOC 仅约 1%~2%的低有机质丰度粉砂岩夹层同样可成为富集甜点(粉砂岩型甜点)，改变了以往参照页岩气仅在高 TOC 段寻找甜点的思路[50]。

### 富集机制与甜点岩石物理、地球化学特征的联系

有机质富集机制不仅控制烃源岩的有机质丰度与类型，还通过决定显微组分构成、孔隙发育样式与岩石力学性质，深刻影响页岩油甜点的品质与可改造性，由此形成“富集机制→有机质类型与显微组分→孔隙类型与分布→含油性与可动性→岩石力学性质→甜点评价”的完整逻辑链[43]-[45] [50]。

在高生产力主导的富集模式(如鄂尔多斯长 7 段、松辽青山口组)中，浮游藻类勃发使有机质以腐泥组与层状藻类体等富氢显微组分为主，生烃潜力高[19] [20] [24]。这类组分在生烃演化过程中易于转化为有机质孔，古龙页岩油的实践表明，与黏土矿物共生的层状藻类体生烃后可形成以有机孔为主的孔缝体系，有机孔为页岩油提供主要储集空间[43]。高 TOC、纹层发育与有机孔富集使这类甜点具有“高含油性 +

高可动性”的潜力，但有机质含量高也会降低岩石脆性、增加压裂改造难度，需要在甜点评价中统筹含油性与可压性[44] [45] [49]。

在保存条件主导的富集模式(如准噶尔盆地芦草沟组)中，水体分层缺氧使有机质保存效率高，显微组分中无定形体、沥青质体比例相对升高，并常伴有草莓状黄铁矿等还原性自生矿物[20] [32]。此类烃源岩的孔隙除有机孔外，还包含黄铁矿晶间孔、黏土矿物层间孔等无机孔组分，孔隙组合更为多样；沥青质体的富集可能增加滞留可动烃含量，但也会影响孔隙连通性与渗流能力[32] [43]。同时，强还原条件下形成的碳酸盐、硅质等自生矿物组合可增强岩石脆性，改善压裂可改造性，为“较低有机质丰度、较高可改造性”甜点的形成提供岩石力学基础[32] [44] [45]。

富集机制差异对甜点评价的直接启示在于：甜点类型具有富集机制依赖性。高生产力模式烃源岩中，甜点段多与高 TOC 富有机质页岩段对应(页岩型甜点)；而保存条件良好、物性改善的低 TOC 粉砂岩夹层同样可成为有效甜点(粉砂岩型甜点) [50]。因此，页岩油甜点评价应将富集机制分析(显微组分、孔隙成因、力学性质)纳入选区评价体系，针对不同富集模式建立差异化的甜点评价标准，实现从“寻找高 TOC 段”向“寻找富集机制–甜点特征匹配段”的转变[44] [45] [47] [50]。

## 8. 存在问题与展望

尽管湖相细粒沉积岩有机质富集机理研究取得了显著进展，但仍存在若干关键问题亟待解决：

第一，指标的多解性与解耦问题。元素、分子与同位素指标均受多种因素控制，单一指标难以唯一确定古生产力与氧化还原条件，多指标定量解耦与独立验证(如草莓状黄铁矿、微体化石埋藏学与地球化学指标的联合)仍是未来方向[20] [34]。

第二，深时天文驱动与有机质富集的定量耦合。405 ka 长偏心率旋回对湖相有机质富集的调控已获识别[29]，但岁差、斜率尺度信号的保存与解释、天文驱动与构造–火山事件的叠加效应，以及轨道尺度有机碳埋藏通量的定量估算，尚需更多高分辨率案例[29] [31]。

第三，现代湖泊过程与古代记录的衔接。现代湖泊(特别是分层湖泊、咸化湖泊)中有机质富集的实时观测，可为解释古代记录提供现代类比，但目前此类研究相对有限[8] [15]。

第四，页岩油富集机理的分子–纳米尺度研究。有机质富集机理与页岩油赋存、可动性的关系已深入到分子与纳米孔隙尺度，有机–无机相互作用、纳米尺度有机质分布的非均质性及其对含油性的控制，是未来有机地球化学与储层评价交叉研究的重要方向[24] [43] [45]。

第五，数据驱动与智能评价。随着高分辨率地球化学数据的积累，机器学习等数据驱动方法在有机质富集主控因素识别与页岩油甜点预测中的应用前景广阔，但需以可靠的机理认识与高质量数据为基础。

## 9. 结论

(1) 湖相细粒沉积岩有机质富集受湖泊类型、有机质母质、古生产力、氧化还原保存条件、沉积速率与稀释效应等因素的联合控制，并受古气候、天文轨道旋回以及构造–火山–热液事件的显著调制。

(2) “生产力论”与“保存论”之争推动了有机质富集机理研究的深化，水体分层机制将生产力与保存条件天然耦合；“生产力–保存–稀释”三元耦合框架已成为湖相有机质富集研究的主流范式。

(3) 元素地球化学、生物标志化合物与稳定同位素指标体系为古环境重建与有机质来源判识提供了有效手段，但需多指标交叉验证以克服多解性。

(4) 鄂尔多斯长 7 段、松辽青山口组、渤海湾古近系与准噶尔芦草沟组等典型层系对比表明，不同湖盆类型的有机质富集主控因素存在系统差异，烃源岩评价必须立足具体地质背景。

(5) 有机质富集机理研究为陆相页岩油资源评价与“甜点”刻画提供了理论基础，查明富有机质层

段的分布规律与非均质性，是页岩油规模效益开发的关键。

## 参考文献


[1] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 中国陆相页岩油勘探理论与技术进展[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 373-390.

[2] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.

[3] Zou, C., Zhu, R., Chen, Z.Q., *et al.* (2019) Organic-Matter-Rich Shales of China. *Earth-Science Reviews*, **189**, 51-78. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.002

[4] 黎茂稳, 马晓潇, 蒋启贵, 等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 13-28.

[5] Demaison, G.J. and Moore, G.T. (1980) Anoxic Environments and Oil Source Bed Genesis. *AAPG Bulletin*, **64**, 1179-1209. https://doi.org/10.1306/2f91945e-16ce-11d7-8645000102c1865d

[6] Pedersen, T.F. and Calvert, S.E. (1990) Anoxia vs. Productivity: What Controls the Formation of Organic-Carbon-Rich Sediments and Sedimentary Rocks? *AAPG Bulletin*, **74**, 454-466. https://doi.org/10.1306/0c9b232b-1710-11d7-8645000102c1865d

[7] Kelts, K. (1988) Environments of Deposition of Lacustrine Petroleum Source Rocks: An Introduction. In: Fleet, A.J., Kelts, K. and Talbot, M.R., *Lacustrine Petroleum Source Rocks*, Geological Society Special Publication, 3-26. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1988.040.01.02

[8] Carroll, A.R. and Bohacs, K.M. (2001) Lake-Type Controls on Petroleum Source Rock Potential in Nonmarine Basins. *AAPG Bulletin*, **85**, 1033-1053. https://doi.org/10.1306/8626ca5f-173b-11d7-8645000102c1865d

[9] Bohacs, K.M., Carroll, A.R., Neal, J.E., *et al.* (2000) Lake-Basin Type, Source Potential, and Hydrocarbon Character: An Integrated Sequence-Stratigraphic-Geochemical Framework. In: Gierlowski-Kordesch, E.H. and Kelts, K.R., *Lake Basins through Space and Time*, AAPG, 3-33.

[10] Eugster, H.P. (1985) Oil Shales, Evaporites and Ore Deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **49**, 619-635. https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90158-9

[11] Meyers, P.A. and Ishiwatari, R. (1993) Lacustrine Organic Geochemistry—An Overview of Indicators of Organic Matter Sources and Diagenesis in Lake Sediments. *Organic Geochemistry*, **20**, 867-900. https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90100-p

[12] Meyers, P.A. and Lallier-Vergés, E. (1999) Lacustrine Sedimentary Organic Matter Records of Late Quaternary Paleoclimates. *Journal of Paleolimnology*, **21**, 345-372. https://doi.org/10.1023/a:1008073732192

[13] Tissot, B.P. and Welte, D.H. (1984) Petroleum Formation and Occurrence. 2nd Edition, Springer-Verlag.

[14] 金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 19-23.

[15] Talbot, M.R. and Lærdal, T. (2000) The Late Pleistocene-Holocene Palaeolimnology of Lake Victoria, East Africa, Based upon Elemental and Isotopic Analyses of Sedimentary Organic Matter. *Journal of Paleolimnology*, **23**, 141-164. https://doi.org/10.1023/a:1008029400463

[16] Calvert, S.E., Nielsen, B. and Fontugne, M.R. (1992) Evidence from Nitrogen Isotope Ratios for Enhanced Productivity during Formation of Eastern Mediterranean Sapropels. *Nature*, **359**, 223-225. https://doi.org/10.1038/359223a0

[17] Ganeshram, R.S., Calvert, S.E., Pedersen, T.F. and Cowie, G.L. (1999) Factors Controlling the Burial of Organic Carbon in Laminated and Bioturbated Sediments off NW Mexico: Implications for Hydrocarbon Preservation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **63**, 1723-1734. https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00073-3

[18] 冯子辉, 方伟, 李振广, 等. 松辽盆地陆相大规模优质烃源岩沉积环境的地球化学标志[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(9): 1253-1267.

[19] 马瑜, 周世新, 陶辉飞, 等. 鄂尔多斯盆地南部长 7 页岩沉积特征和有机质富集因素研究[J]. 地质科学, 2017, 52(1): 106-122.

[20] 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段 3 亚段异常高有机质沉积富集因素[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1520-1541.

[21] Calvert, S.E. and Pedersen, T.F. (1993) Geochemistry of Recent Oxic and Anoxic Marine Sediments: Implications for the Geological Record. *Marine Geology*, **113**, 67-88. https://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90150-t

[22] Ingall, E. and Jahnke, R. (1997) Influence of Water-Column Anoxia on the Elemental Fractionation of Carbon and Phosphorus during Sediment Diagenesis. *Marine Geology*, **139**, 219-229. https://doi.org/10.1016/s0025-3227(96)00112-0

[23] Sinninghe Damsté, J.S., Kenig, F., Koopmans, M.P., Köster, J., Schouten, S., Hayes, J.M., *et al.* (1995) Evidence for

Gammacerane as an Indicator of Water Column Stratification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, 1895-1900. https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00073-9

[24] 张水昌, 张斌, 王晓梅, 等. 松辽盆地古龙页岩油富集机制与常规——非常规油有序分布[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 911-923.

[25] Ibach, L.E.J. (1982) Relationship between Sedimentation Rate and Total Organic Carbon Content in Ancient Marine Sediments. *AAPG Bulletin*, **66**, 170-188. https://doi.org/10.1306/03b59a5d-16d1-11d7-8645000102c1865d

[26] Arthur, M.A. and Sageman, B.B. (1994) Marine Black Shales: Depositional Mechanisms and Environments of Ancient Deposits. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **22**, 499-551. https://doi.org/10.1146/annurev.ea.22.050194.002435

[27] Sageman, B.B., Murphy, A.E., Werne, J.P., Ver Straeten, C.A., Hollander, D.J. and Lyons, T.W. (2003) A Tale of Shales: The Relative Roles of Production, Decomposition, and Dilution in the Accumulation of Organic-Rich Strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian Basin. *Chemical Geology*, **195**, 229-273. https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00397-2

[28] Katz, B.J. (2005) Controlling Factors on Source Rock Development—A Review of Productivity, Preservation, and Sedimentation Rate. In: *The Deposition of Organic-Carbon-Rich Sediments*, SEPM Society for Sedimentary Geology, 7-16. https://doi.org/10.2110/pec.05.82.0007

[29] 张瑞, 金之钧, 李明松, 等. 中三叠世鄂尔多斯盆地富有机质页岩发育的天文调控[J]. 第四纪研究, 2023, 43(6): 1547-1561.

[30] Zhang, S.C., Wang, X.M., Hammarlund, E.U., *et al*. (2015) Orbital Forcing of Climate 1.4 Billion Years Ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**, E1406-E1413. https://doi.org/10.1073/pnas.1502239112

[31] Li, M.S., Huang, C.J., Ogg, J., *et al*. (2019) Paleoclimate Proxies for Cyclostratigraphy: Comparative Analysis Using a Lower Triassic Marine Section in South China. *Earth-Science Reviews*, **189**, 125-146. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.01.011

[32] Qiao, J.Q., Luo, Q.Y., Zhang, K.H., *et al*. (2023) Geochemistry and Organic Petrography of the Middle Permian Lucaogou Alkaline Lacustrine Oil Shale in the Southern Junggar Basin, China: Implications for Formation Conditions and Organic Matter Accumulation. *International Journal of Coal Geology*, **268**, Article 104198. https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104198

[33] 付金华, 郭雯, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 段多类型页岩油特征及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(12): 1749-1761.

[34] Tribovillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T. and Riboulleau, A. (2006) Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update. *Chemical Geology*, **232**, 12-32. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012

[35] Algeo, T.J. and Lyons, T.W. (2006) Mo-Total Organic Carbon Covariation in Modern Anoxic Marine Environments: Implications for Analysis of Paleoredox and Paleohydrographic Conditions. *Paleoceanography*, **21**, PA1016. https://doi.org/10.1029/2004pa001112

[36] Algeo, T.J., Lyons, T.W., Blakey, R.C. and Over, D.J. (2007) Hydrographic Conditions of the Devono-Carboniferous North American Seaway Inferred from Sedimentary Mo-TOC Relationships. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, **256**, 204-230. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.035

[37] Brumsack, H.J. (2006) The Trace Metal Content of Recent Organic Carbon-Rich Sediments: Implications for Cretaceous Black Shale Formation. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, **232**, 344-361. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.05.011

[38] Peters, K.E. and Fowler, M.G. (2002) Applications of Petroleum Geochemistry to Exploration and Reservoir Management. *Organic Geochemistry*, **33**, 5-36. https://doi.org/10.1016/s0146-6380(01)00125-5

[39] Moldowan, J.M., Seifert, W.K. and Gallegos, E.J. (1985) Relationship between Petroleum Composition and Depositional Environment of Petroleum Source Rocks. *AAPG Bulletin*, **69**, 1255-1268. https://doi.org/10.1306/ad462bc8-16f7-11d7-8645000102c1865d

[40] Summons, R.E., Volkman, J.K. and Boreham, C.J. (1987) Dinosterane and Other Steroidal Hydrocarbons of Dinoflagellate Origin in Sediments and Petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**, 3075-3082. https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90381-4

[41] Meyers, P.A. (2003) Applications of Organic Geochemistry to Paleolimnological Reconstructions: A Summary of Examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, **34**, 261-289. https://doi.org/10.1016/s0146-6380(02)00168-7

[42] 赵文智, 卞从胜, 李永新, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 73 亚段页岩有机质转化率、排烃效率与页岩油主富集类型[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 12-23.

[43] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 1-14.

[44] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩滞留烃形成条件与富集模式——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 856-869.

[45] 赵贤正, 蒲秀刚, 金凤鸣, 等. 黄骅坳陷页岩型页岩油富集规律及勘探有利区[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 158-175.

[46] Tyson, R.V. (2005) The "Productivity versus Preservation" Controversy: Cause, Flaws, and Resolution. In: *The Deposition of Organic-Carbon-Rich Sediments*: *Models*, *Mechanisms*, *and Consequences*, SEPM Society for Sedimentary Geology, 17-33. https://doi.org/10.2110/pec.05.82.0017

[47] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10.

[48] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 116-127+242-259.

[49] Peters, K.E. and Cassa, M.R. (1994) Applied Source Rock Geochemistry. In: *The Petroleum System—From Source to Trap*, American Association of Petroleum Geologists, 93-120. https://doi.org/10.1306/m60585c5

[50] 潘松圻, 郭秋雷, 邹才能, 等. 页岩型与粉砂岩型"页岩油系统"甜点段判识——以鄂尔多斯盆地长 7 段为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(7): 1663-1678.