

https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.029



# 咸化湖盆优质烃源岩发育机制与页岩油富集过程： 以柴达木盆地地下干柴沟组上段为例

尹嘉<sup>1,2</sup>, 邹才能<sup>2</sup>, 吴松涛<sup>2</sup>, 伍坤宇<sup>3</sup>, 邢浩婷<sup>3</sup>, 魏琳<sup>1</sup>, 赵正福<sup>2</sup>,  
路冠文<sup>2</sup>, 袁铭<sup>2</sup>, 符芳亮<sup>1,2</sup>, 华柑霖<sup>2</sup>, 荆振华<sup>2\*</sup>

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083
2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
3. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院, 甘肃敦煌 736200

**摘要:** 为深入研究咸化湖盆细粒沉积过程中基础地质理论, 助力我国页岩油勘探开发, 以柴达木盆地始新世咸化湖相沉积(下干柴沟组上段)为研究对象, 总结了前人关于优质烃源岩发育机制与页岩油富集过程的研究认识, 探讨了目前研究中存在的不足和亟需关注的重点。柴达木盆地为高原山间咸化湖盆, 生烃母质类型复杂, 包括藻类、细菌、高等植物三大类, 其中葡萄藻在间歇性温暖湿润的气候条件、富营养且淡化的水体环境中勃发, 与优质烃源岩的发育密切相关。“相对富营养”、“中等盐度”、“适当缺氧”的水体环境有助于形成较高的初级生产力和较好的保存条件, 共同促进了咸化湖盆有机质的富集。咸化湖相烃源岩存在典型的“二段式”生烃, 可溶有机质与干酪根分别在未成熟和成熟阶段生油, 从“源”的角度为页岩油富集奠定物质基础。物性良好的层状灰云岩广泛发育, 从“储”的角度保障了页岩油的规模富集。多样化的源储组合类型导致了页岩油差异性聚集, 其中源储一体型页岩油以自生自储的方式聚集, 烃类富集程度高; 源储分异型页岩油以微运移的方式富集, 烃类富集程度相对较低, 但其轻质组分含量高、可动性较好。下干柴沟组上段中的盐下带是优质烃源岩发育的主要层段, 也是当前页岩油勘探开发的目标层位, 但是其厚度超过 1 200 m, 进一步聚焦页岩油“甜点段”是研究的重点。柴达木盆地特殊的形成背景是研究极端水体条件下烃源岩发育机制和页岩油富集过程的典型案例, 还存在诸多问题亟需系统性研究, 如高盐度水介质条件下湖泊营养元素循环模式、不同咸化阶段有机质的差异富集机制、生物-环境协同变化规律及对烃源岩品质的控制作用, 巨厚页岩层系生烃、成储模式及其差异性, 不同源储组合页岩油的赋存、富集机制等。相关研究对进一步明确柴达木盆地页岩层系发育机制、实现页岩油增储上产具有重要意义。

**关键词:** 咸化湖盆; 优质烃源岩; 页岩油; 柴达木盆地; 石油地质学。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2025)07-2875-24

收稿日期: 2024-12-10

## Development Mechanism of High-Quality Source Rock and Enrichment Processes of Shale Oil in Saline Lacustrine Basin: A Case Study of Upper Member of Lower Ganchaigou Formation, Qaidam Basin

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos.U23B20155, 42102167, 42172180); 中国石油科学研究与技术开发项目(No.2024DJ8702); 国家博士后研究人员计划项目(No.GZC20233111)。

**作者简介:** 尹嘉(1997-), 男, 博士研究生, 研究方向为非常规油气地质。ORCID: 0000-0003-0705-4629. E-mail: yin640jj@163.com

\* **通讯作者:** 荆振华, E-mail: zhenhua.jing@uqconnect.edu.au

**引用格式:** 尹嘉, 邹才能, 吴松涛, 伍坤宇, 邢浩婷, 魏琳, 赵正福, 路冠文, 袁铭, 符芳亮, 华柑霖, 荆振华, 2025. 咸化湖盆优质烃源岩发育机制与页岩油富集过程: 以柴达木盆地地下干柴沟组上段为例. 地球科学, 50(7): 2875-2898.

**Citation:** Yin Jia, Zou Caineng, Wu Songtao, Wu Kunyu, Xing Haoting, Wei Lin, Zhao Zhengfu, Lu Guanwen, Yuan Ming, Fu Fangliang, Hua Ganlin, Jing Zhenhua, 2025. Development Mechanism of High-Quality Source Rock and Enrichment Processes of Shale Oil in Saline Lacustrine Basin: A Case Study of Upper Member of Lower Ganchaigou Formation, Qaidam Basin. *Earth Science*, 50(7): 2875-2898.

Yin Jia<sup>1,2</sup>, Zou Caineng<sup>2</sup>, Wu Songtao<sup>2</sup>, Wu Kunyu<sup>3</sup>, Xing Haoting<sup>3</sup>, Wei Lin<sup>1</sup>, Zhao Zhengfu<sup>2</sup>,  
Lu Guanwen<sup>2</sup>, Yuan Ming<sup>2</sup>, Fu Fangliang<sup>1,2</sup>, Hua Ganlin<sup>2</sup>, Jing Zhenhua<sup>2\*</sup>

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company,  
Dunhuang 736200, China

**Abstract:** To enhance the fundamental scientific understanding of fine-grained sedimentation in saline lacustrine basins and to expedite shale oil exploration in China, this study focuses on the Eocene saline lacustrine sediments (the upper member of the Lower Ganchaigou Formation) within the Qaidam Basin, summarizing previous research insights regarding the development mechanism of high-quality source rock and the enrichment process of shale oil and discussing existing deficiencies that require urgent attention. The Qaidam Basin is a saline lacustrine basin situated within a mountainous plateau, characterized by a complex hydrocarbon-generating organism composition that includes three primary categories: algae, bacteria, and higher plants. Notably, *Botryococcus braunii* blooms under conditions marked by intermittent warm-humid climates and nutrient-rich diluted water column, demonstrating a clear responsive relationship with high-quality source rock development. The “relatively eutrophic”, “moderate salinity”, and “appropriately anoxic” environments promote elevated primary productivity alongside suitable preservation conditions that collectively enhance organic matter accumulation within the saline lacustrine basin. Saline lacustrine source rocks exhibit a characteristic “two-stage” hydrocarbon generation process; soluble organic matter generates oil during immature stages while kerogen produces oil during mature stages, thereby establishing a material foundation for shale oil enrichment from a sourcing perspective. Well-developed layered calcareous dolomite with favorable physical properties ensures large-scale shale oil accumulation from a reservoir standpoint. Diverse source-reservoir combinations dictate differential enrichment patterns of shale oil; specifically, integrated-type shale oils accumulate through self-generation and self-storage processes exhibiting high hydrocarbon contents, whereas differentiated-type shale oils rely on micro-migration for accumulation but display lower overall hydrocarbon contents despite possessing higher light component content. The sub-salt zone within the upper member of the Lower Ganchaigou Formation represents an essential stratum for developing high-quality source rock and serves as a critical layer for contemporary shale oil exploration and production. However, its thickness exceeds 1 200 meters, and it has become a focus of research to further pinpoint the sweet spot of shale oil. The distinctive formation background of the Qaidam Basin serves as a paradigmatic case for researching the development mechanism of source rocks and the enrichment process of shale oil under extreme water body circumstances. Numerous scientific challenges necessitate comprehensive investigation, including cycling pattern of lake nutrient elements under the condition of high-salinity water medium, the differential enrichment mechanism of organic matter in diverse salinization stages, the synergistic variation patterns between biological systems and environment and their influence on the quality of source rocks, the hydrocarbon generation process and reservoir formation model within extremely thick shale sequences and their dissimilarities, as well as the occurrence and enrichment mechanisms of shale oil associated with diverse source-reservoir combinations, etc. All these are of significant importance for further clarifying the development mechanism of shale sequences in the Qaidam Basin and facilitating the increase of reserves and production of shale oil.

**Key words:** saline lacustrine basin; high-quality source rock; shale oil; Qaidam Basin; petroleum geology.

## 0 引言

中国陆相页岩油资源丰富,主要赋存在松辽、鄂尔多斯、准噶尔、渤海湾、柴达木等盆地的 16 套重要页岩层系中,是推动我国原油增储上产的重要接替领域(邹才能等,2020;赵文智等,2023)。中国陆相页岩油勘探盆地根据水体环境可分为淡水湖盆和咸化湖盆(包括咸水湖盆和碱性湖盆)(杜金虎等,2019;朱筱敏等,2024)。咸化湖盆富含盐类物

质,在一般咸化环境下发育陆源碎屑岩和碳酸盐岩的混合沉积,在极端咸化环境中可规模发育膏岩、岩盐与碱性矿物。咸化湖盆可为富有机质页岩的形成、优质储集层的发育提供有效场所,具备形成“自生自储”页岩油藏的地质基础(胡素云等,2020;Liang *et al.*,2024)。柴达木盆地是我国典型的咸化湖相含油气盆地,其页岩油勘探开发突破、原油规模上产,对保障青藏高原周缘地区经济社会发展,促进咸化湖盆相关科学问题研究意义重大。

当前,咸化湖盆页岩油勘探开发取得了显著进展,包括准噶尔、渤海湾和柴达木等盆地,实践证实了咸化湖盆可以形成丰富的页岩油资源、具备广阔的勘探前景(李国欣等,2022,2023a;刘惠民等,2022;唐勇等,2023)。其中,柴达木盆地发育的始新统下干柴沟组上段咸化湖相页岩,纵向沉积厚度达1 200 m以上,局部达到2 000 m,是中国目前已商业开发、厚度最大的页岩油产层(李国欣等,2023a)。2021年以来,中石油青海油田在这套页岩层系中取得了勘探开发战略性突破,提交页岩油预测地质储量1.38亿吨,累计产油9.6万吨。然而,极端咸化的沉积环境和多样的混积岩岩相类型(Wang *et al.*, 2020a),低有机质丰度烃源岩未熟-成熟二段式的特殊生烃过程(李国欣等,2023b),白云石化、有机酸/TSR溶蚀等复杂的成岩作用(宋光永等,2022;赵思思等,2022),早期的沉积凹陷后期隆升为山地等构造因素(李国欣等,2023a),共同导致了柴达木盆地页岩油差异性富集,为页岩油规模、高效勘探开发带来了挑战。加强基础地质理论研究是解决这一问题的关键,其中优质烃源岩的发育机制与页岩油富集过程是两个重要方面。

我国陆相含油气盆地勘探实践表明,优质烃源岩是源外常规油气和源内页岩油气富集的物质基础,其分布控制了油气有利聚集区段,明确优质烃源岩发育机制意义重大。经典石油地质学将优质烃源岩定义为有机质丰度高、类型好,并对成藏有重要贡献的生烃岩系。前期研究对高有机质丰度形成的环境机制关注较多,对控制烃源岩质量和生烃特征的原始母质类型及其组成关注相对较少,特别是细菌扮演的重要作用尚未有系统性报道。聚焦咸化湖盆体系,水体盐度与低等水生生物发育特征存在明显的协同变化,控制有机质的类型和丰度,进而影响烃源岩的品质,同时高盐度背景下的湖泊营养元素循环对湖盆初级生产力具有重要控制作用,但目前有关研究还相对薄弱。近年来的勘探实践发现,同一盆地不同咸化背景下形成的烃源岩,由于生源构成迥异,在相似的热演化程度下具有显著区别的生烃特征,对油气成藏的贡献截然不同(李红磊等,2020;夏刘文等,2022)。因此,从生物-环境协同变化的视角探讨咸化湖盆优质烃源岩发育机制具有重要的科学意义和实践价值。

咸化湖盆具有岩相组合多种、生烃母质多样、有机-无机相互作用多变的特征,造成页岩油富集

过程十分复杂。与淡水湖盆相比,咸化湖盆在物理和化学沉积作用叠加下形成多种矿物组成(长英、黏土质沉积物与碳酸盐、硫酸盐沉积物混合沉积),进而导致烃源岩极强的非均质性(品质垂向变化快,生烃模式特殊且多样)以及储集空间和源储配置类型的复杂多样(碳酸盐岩晶间孔、溶蚀孔、有机质孔、微裂缝等,源储一体或源储分异)(刘金等,2023;赵文智等,2023;赵喆等,2024)。地质条件的特殊性最终决定了页岩油富集过程的复杂和差异性,页岩油富集程度与烃源岩的质量和规模、生排烃效率、储集孔径下限、天然裂缝分布与充填、源储组合、构造背景、顶底板封堵保存等诸多因素相关,主控因素难以厘定。因而咸化湖盆页岩油富集过程同样也是石油地质学领域长期关注的热点科学问题,对明确页岩油的地质“甜点段”具有重要意义。

近期,咸化湖盆页岩油勘探开发突破引发了学者们对其基础地质理论研究的广泛兴趣,产生了诸多成果。本文以柴达木盆地为对象,以生物-环境协同变化制约下的优质烃源岩发育机制和页岩油富集过程两个关键科学问题为主题,综合概述前期研究已取得的重要认识,提炼未来研究应关注的重点难点,以期为深化咸化湖盆细粒沉积过程研究、推进柴达木盆地页岩油勘探开发提供思考。

## 1 地质背景

柴达木盆地位于青藏高原东北部,呈西宽东窄菱形展布,西北部以阿尔金山为界,南部以昆仑山为界,东北部以祁连山为界,海拔约为3.0 km,沉积岩面积约 $9.6 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,是典型的高原山间内陆盆地。盆地自古生代起经历了海西期台缘裂陷、燕山期断陷-拗陷复合、早喜马拉雅期挤压拗陷、晚喜马拉雅期挤压隆升4期演化,新生代青藏高原隆升控制了现今山间盆地的形成。根据构造变形差异,盆地可划分为柴西拗陷、柴北断陷、三湖拗陷、阿尔金山前带、德令哈隆起5个一级构造单元,柴西拗陷又可分为北昆仑断阶带、英雄岭-茫崖构造和大风山凸起3个二级构造单元(图1a)。盆地的沉积中心在中、新生代经历了多次迁移,古近纪期间主要位于柴西拗陷的英雄岭-茫崖构造带西部地区(图1b;吕宝凤等,2008)。柴西拗陷新生代自下而上较完整地发育了路乐河组、下干柴沟组(下段、上段)、上干柴沟组、下油砂山组、上油砂山组、狮子沟组和七个泉组7套地层。受沉积中心迁移,岩相横向变化和重复

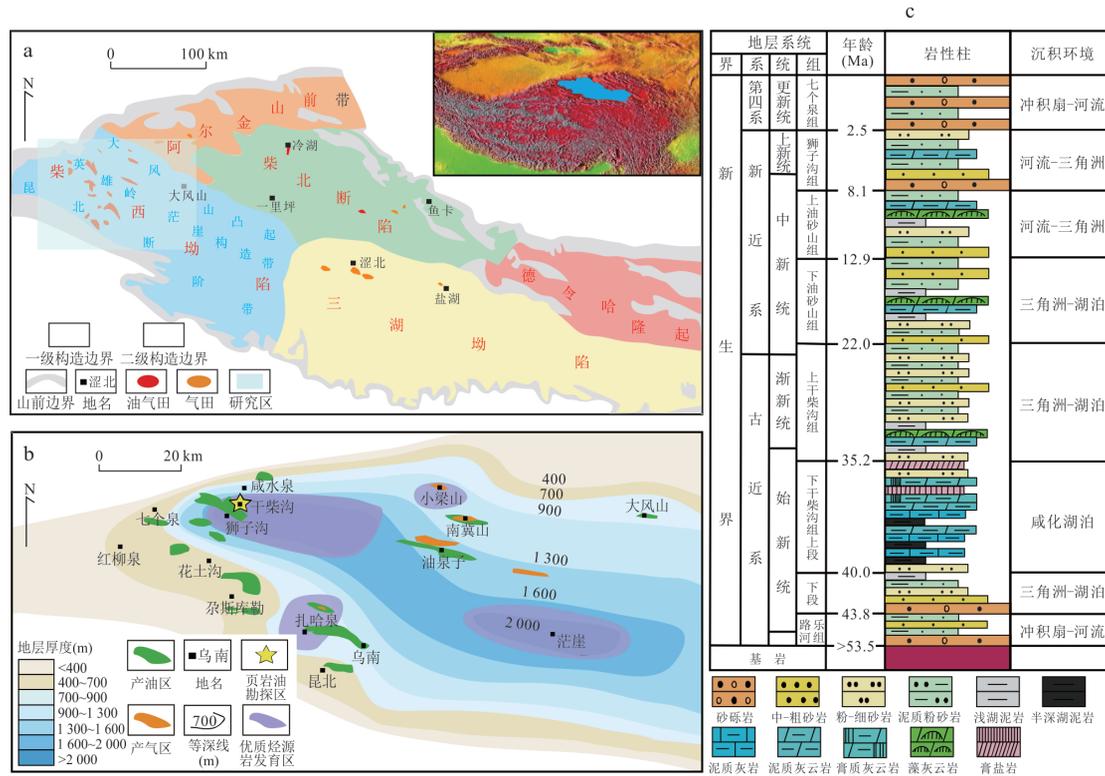


图1 柴达木盆地构造单元与地层分布特征

Fig.1 Structural units and stratigraphic distribution characteristics of the Qaidam Basin

a. 柴达木盆地构造单元划分及油气田分布; b. 柴西坳陷下干柴沟组上段地层厚度及油气分布; c. 柴西坳陷地层综合柱状图. 修改自青海油田内部资料

的影响,生物和磁性地层学约束的新生代沉积起始年龄长期存在争议(Bao *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017),目前绝大多数研究倾向于采用古新世-早始新世年龄模型(图1c).

始新世下干柴沟组上段沉积时期,柴西坳陷的湖盆扩张和水体咸化相继达到顶峰,在狮子沟及其周缘大面积发育1 000~2 000 m厚的深灰、暗灰色细粒沉积.其岩矿组成以碳酸盐矿物为主,包含陆源碎屑(粉-细砂级的石英、长石)、黏土及各类蒸发盐矿物(石膏、钙芒硝和石盐等),根据经典的混积岩三端元分类方案判断其为含陆源碎屑/陆源碎屑质-碳酸盐混积岩(张世铭等,2022).对于湖盆的咸化机制和膏盐岩成因,学者们长期持有不同观点.一种观点根据膏盐岩与深大断裂平面展布的一致性推断其与深部热液输入有关(金强和查明,2000;张津宁等,2016;张金明等,2021),但反映热液事件的地球化学证据相对匮乏.目前主流观点认为湖盆咸化受干旱气候强蒸发作用控制,膏盐岩为水下浓缩结晶沉积成因,证据包括:(1)石膏硫同位素正偏、碳酸盐岩碳氧同位素正偏、连续沉积石盐的氯同位

素正偏,指示干旱闭塞、蒸发作用强烈的气候-水文条件;(2)盐岩中纯液相包裹体岩石学特征指示其在低温的水下环境结晶而成(Guo *et al.*, 2017;黄成刚等,2017a;夏志远等,2017;Xiong *et al.*, 2021).

柴西坳陷古近系-新近系油气资源十分丰富,石油地质资源量超过20亿吨,探明石油储量丰度超过 $170 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ,下干柴沟组上段烃源岩被认为是最主要的供烃源岩(张斌等,2017;李国欣等,2023a).这套烃源岩的总有机碳含量(TOC)介于0.4%~4.0%之间(均值为1.0%),生烃潜力( $S_1 + S_2$ )介于0.2~40 mg/g(均值为6.0 mg/g),氢指数(HI)介于124~617 mg/g(均值大于300 mg/g),有机质类型为I-II<sub>1</sub>型, $T_{\text{max}}$ 介于408~437 °C之间(均值428 °C), $R_0$ 主体介于0.5%~1.3%,热演化程度达到低熟-成熟阶段.高原山间咸化湖泊的沉积背景使这套烃源岩有机质丰度整体有别于一般的淡水湖相烃源岩或海相烃源岩,也与同时期渤海湾盆地、江汉盆地咸化湖相烃源岩存在差异,套用经典的评价体系存在不适应性.基于对大量样品的生烃潜力和排烃能力分析,相关研究将TOC=0.4%定

为烃源岩下限(金强,2001;李洪波等,2008),并以0.4%、0.6%、0.8%、1.0%为界限划分出非、较差、较好、好、优质5个丰度评价等级,建立了独特的烃源岩品质评价标准,目前已得到广泛认可与应用.最新一轮烃源岩预测工作显示,柴西坳陷存在英雄岭、扎哈泉、茫崖和小梁山4个优质烃源岩( $\text{TOC}>1.0\%$ )发育区,厚度均达到100 m以上(图1b;龙国徽等,2021).

柴达木盆地页岩油勘探和研究工作起步较晚,2021年以来,中石油青海油田首次明确柴西坳陷干柴沟地区下干柴沟组上段发育以富有机质纹层状页岩与层状灰云岩高频间互为特征的页岩油(李国欣等,2022).截至2025年1月,勘探开发工作落实了效益勘探区800 km<sup>2</sup>,识别了3个甜点段,提交页岩油预测地质储量1.38亿吨,估算页岩油储量规模达10亿吨,当前日产油110~120 t,累计产油9.6万吨.

## 2 咸化湖盆生物-环境协同变化过程及其机理

### 2.1 咸化湖盆水体盐度对生物发育和水体环境的影响

适宜的水体环境和充足的营养物质是水生生物发育的必要条件,水体盐度的时空变化是控制咸水湖泊生物活动的重要驱动力,通过调节水体理化性质和营养物质供给直接或间接影响生物发育.首先,水体盐类物质富集可以直接作用于生物体,导致不同适盐性生物勃发或灭亡.盐度升高形成的渗透压对具有不同渗透调节能力的生物种群表现出选择性,渗透调节能力强的生物种群能在高盐度环境中正常进行代谢活动,而渗透调节能力弱的生物种群可能出现细胞质壁分离、代谢失调造成死亡(Redden and Rukminasari, 2008; 张亚丽等, 2011).高盐度环境会使藻类叶绿素a和叶绿素b含量下降、光合速率下降,限制大部分藻类生长(Jiménez and Niell, 2003; 郭赣林等, 2010).前人基于现代不同盐度水体环境的对比研究,揭示了一系列生物种群的协同变化规律. Whitfield *et al.* (2012)研究发现,水体盐度由0增长到10‰,淡水生物的丰富度(物种数量)逐渐降低,海洋和河口泛盐生物的丰富度逐渐增加;盐度由10‰变化到35‰时,海洋生物的丰富度持续增加并达到峰值;当盐度高于35‰时,各类生物的丰富度均减少.

具体到一些典型的微生物, Barbe *et al.* (1990)研究提出在盐度介于67‰~133‰、以碳酸盐析出为主的水体环境中,绿藻、硅藻和蓝细菌十分繁盛(图2a);当盐度达到133‰~276‰,逐渐进入以硫酸盐析出为主的环境时,硅藻和绝大部分绿藻消失,蓝细菌和杜氏藻(一种隶属于绿藻门绿藻纲的特殊耐盐藻类)持续繁盛,同时还发育卤虫、丰年虾、光合硫细菌等生物;随着盐度进一步升高至276‰以上,进入以氯化物析出为主的环境中,蓝细菌和光合硫细菌完全消失,杜氏藻和丰年虾仍有部分发育,而嗜盐古菌和细菌占据生物组合的主导地位.尽管盐度增加抑制了生物多样性,但是否会降低生物总量仍存在争议.传统观点认为高盐度环境是生物生存的禁区,生物总量随盐度的增加而减少,而当前研究认为在适当盐度(盐度100‰左右)的环境中,由于竞争者减少、捕食者缺乏,一些耐盐生物在营养盐补给充分的情况下反而大量发育,生物总量不会明显减少,甚至可能更高(图2b; Warren, 2011).

其次,盐类物质富集能够加剧水体垂向分层效应和水体理化环境的空间差异性,影响生物的空间发育分布.深水湖泊中,不同深度水体的温度差异会造成水体密度不同,导致水体产生垂向分层现象.在咸水湖泊的深水区,盐类物质在重力作用下向水体底部汇聚,也会导致不同深度水体出现密度差异,造成水体分层,形成由表层水体、中部盐跃层水体和底层水体组成的三层式结构(图3;金强等, 2008).现代湖泊研究表明,稳定的分层结构可以对水体混合起到“屏障”作用,阻碍表层和底层水体的物质交换和能量循环,使水体的理化性质在垂向上产生较大差别,表层水一般表现为高溶解氧、低盐度、偏碱性、温度高、透光性强,底层水表现为缺氧、高盐度、弱碱性、温度低、透光性弱等特征(Warren, 2011; 周天旭等, 2022).这些差异进一步导致不同适应性的生物群落呈层分布(图3),表层水体上部主要发育能够进行有氧光合作用的藻类,下部主要分布可以进行分解消耗作用的动物和细菌;底层水上部发育可进行厌氧光合作用的硫细菌和古菌,下部则主要分布具有缺氧分解作用的发酵细菌或古菌、硫酸盐还原菌和甲烷细菌等(夏刘文等, 2017).需要注意的是,上述现象一般发生在咸化湖盆的深水区,浅水区受陆源淡水稀释的影响,能否形成稳定的盐度分层并影响生物的分层发育,认识尚不一致.

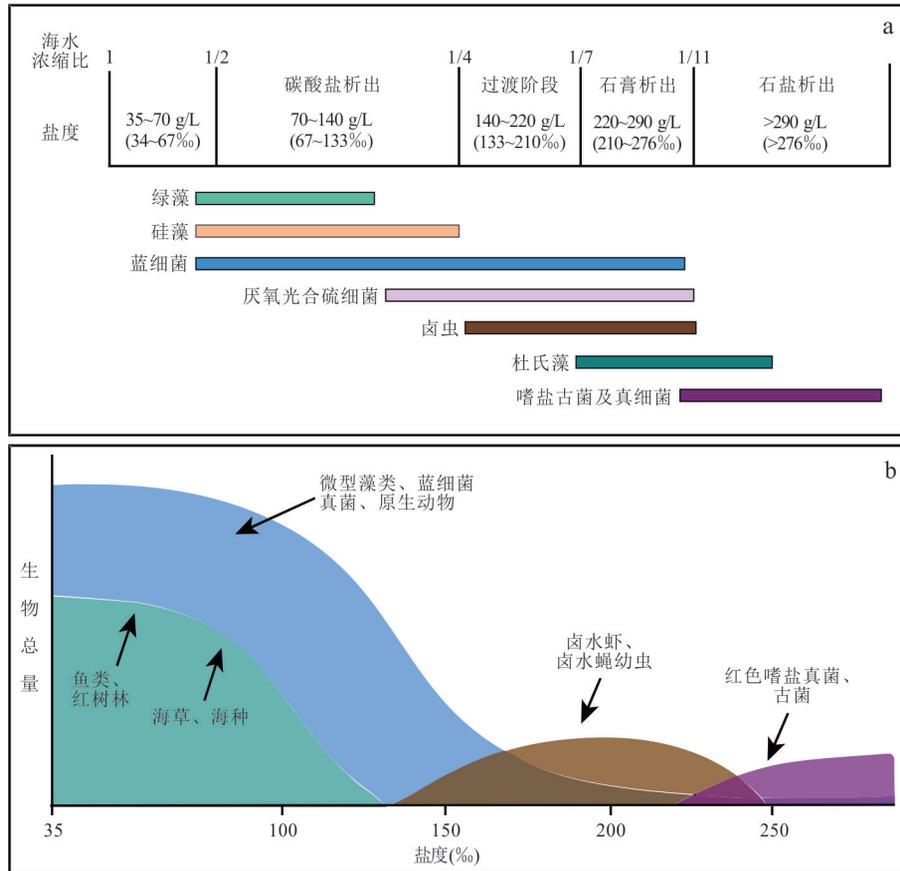


图 2 现代高盐度水体(海洋、咸水湖泊)盐度与生物发育特征的协同变化规律示意图

Fig.2 Synergistic variation patterns diagram of water salinity and biological development characteristics in modern high-salinity aquatic environments (oceans, brackish lakes)

a. 典型微生物的盐度耐受范围,海水浓缩比为盆地的流入量与盆地内包括蒸发和退潮在内的流出量之比, g/L 与 psu 盐度的换算假定海水密度为 1.05 g/cm<sup>3</sup>, 修改自 Barbe *et al.*(1990); b. 现代海洋不同盐度范围水体对应的生物种类与总量, 修改自 Warren(2011)

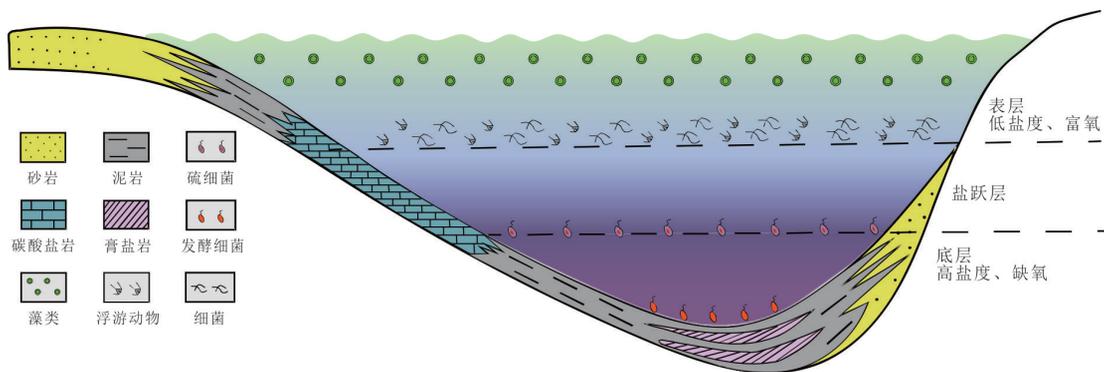


图 3 咸化湖泊水体盐度分层、生物分层与沉积分异模式图

Fig.3 The schematic diagram of salinity stratification of water column, biological stratification, and sedimentary differentiation in saline lake

修改自 Guo *et al.*(2020)和 Liang *et al.*(2024)

盐度变化还能影响水体营养物质循环,引发生物丰度和群落特征的协同变化.氮、磷等营养物质的循环与水体的氧化还原条件密切相关,高盐度、水体稳定分层条件形成的缺氧水体可以引发反硝

化作用,造成水体硝酸盐的丢失,同时导致铁锰氧化物溶解,释放吸附的磷酸盐进入水体,提高水体的磷元素含量(范成新和相崎守弘,1997;王建军等,2010),而水体分层的屏障作用抑制了营养物质

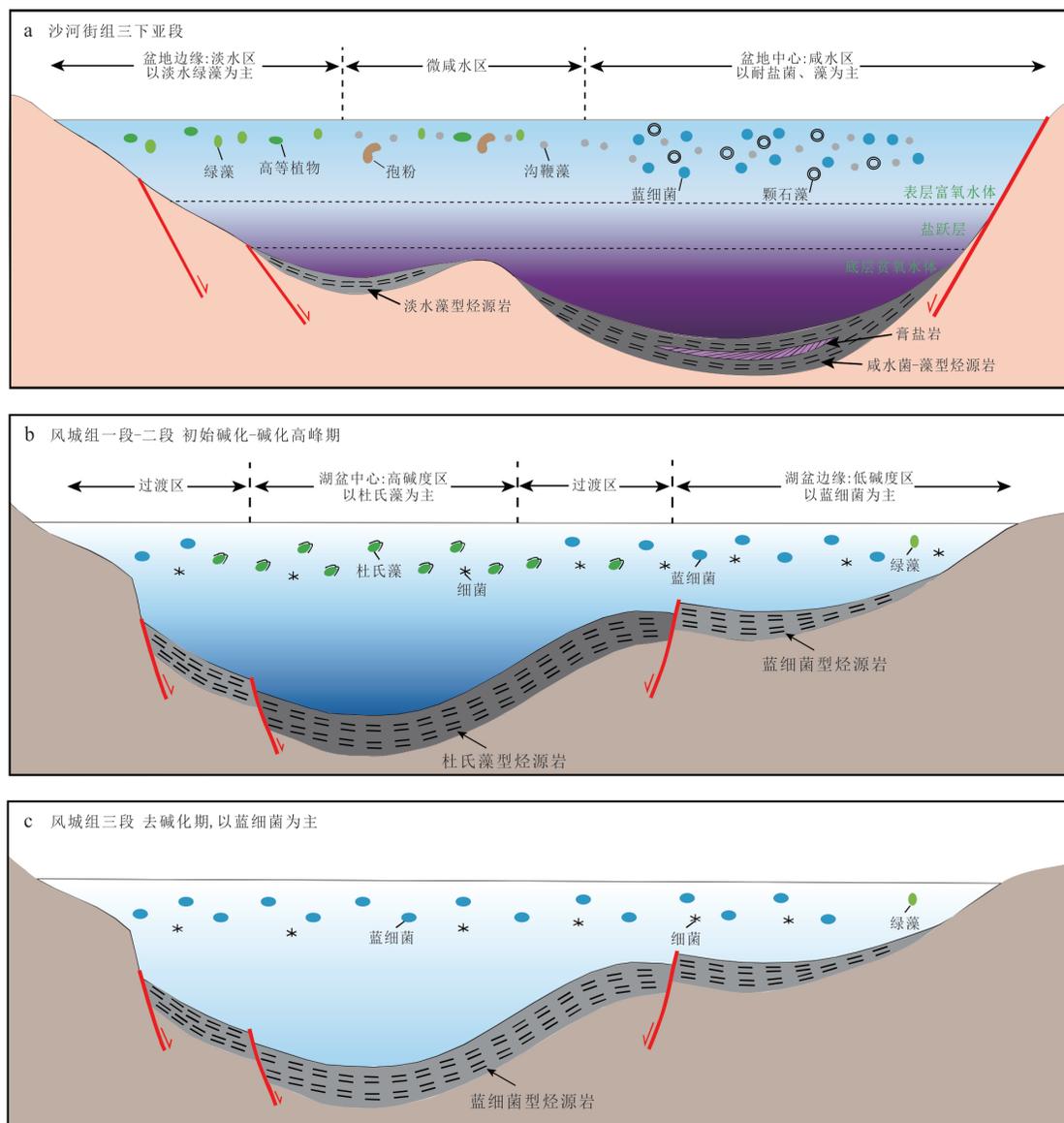


图 4 中国典型深时咸(碱)湖生物-环境协同变化模式图

Fig.4 Synergistic change patterns diagram of biology and environment in typical deep-time saline (alkaline) lakes in China  
 a. 渤海湾盆地东濮凹陷沙河街组三下亚段沉积时期,修改自李红磊等(2020); b、c. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组沉积时期,修改自夏刘文等(2022)

向表层输送,导致其更多富集于底层水中(周天旭等,2022).当水体分层弱化甚至消失后,水体的对流混合将更多的营养物质送达表层水(Chen *et al.*, 2009; Sastri *et al.*, 2014).因此,水体盐度和分层状态的变化很大程度上控制了表层水的营养物质含量,进而影响浮游生物的丰度和群落结构.以青藏高原东北部的 20 个现代湖泊系统为例,研究发现盐湖水体中总氮和氨氮的浓度明显高于咸水湖和淡水湖,并与浮游植物及其优势种群的丰度存在明显正相关性(Li *et al.*, 2021).在我国山东周村水库中,水体因温差发生分层时,浮游藻类组成中绿藻

(46%) 占比最高,其次是硅藻(37%)和蓝细菌(15%),优势属种包括硅藻门的小环藻属和绿藻门的绿球藻属.当分层消失后,硅藻的比例上升(59%),绿藻(37%)和蓝细菌(4%)的比例明显下降,小环藻属成为绝对优势属种(黄廷林等,2016).

## 2.2 中国典型深时咸化湖盆生物-环境协同变化规律及其烃源意义

深时咸化湖盆的生物-环境协同变化,通过改变沉积水体生物总量影响烃源岩的有机质丰度,通过调节生物的种类及组合影响烃源岩的有机质类型及其生烃特征,共同造成烃源

岩品质和成烃作用的非均质性,该过程在我国典型的咸水湖盆(渤海湾盆地)和碱性湖盆(准噶尔盆地)的沉积记录中得到了一定揭示.

渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组三下亚段发育大套黑色页岩,形成于典型的咸化水体中,水体盐度与生物组成在空间上存在明显的协同变化特征.有机岩石学分析表明在湖盆边缘淡水-微咸水环境中,主要发育绿藻(大部分不耐盐),并伴随着大量的陆源高等植物碎屑和孢粉;而湖盆中心咸水环境中,绿藻含量明显下降,更具耐盐性的蓝细菌、甲藻和颗石藻大量发育(图 4a;李红磊等, 2020).淡水-微咸水环境仅绿藻勃发,尽管有陆源有机质的补充,形成的烃源岩有机质丰度相对一般( $\text{TOC}=0.55\% \sim 1.81\%$ 、 $\text{II}_2$ 型);而咸水环境下,多种耐盐菌藻类勃发有效改善了烃源岩品质,形成的烃源岩有机质丰度更高( $0.70\% \sim 4.19\%$ )、类型更好( $\text{I}-\text{II}_1$ 型;Wang *et al.*, 2020b).此外,通过热模拟发现淡水藻-陆源植物型烃源岩仅在成熟阶段存在一个生油高峰,而某些耐盐藻,如颗石藻,在低温下即可产油的特征使咸水菌-藻型烃源岩在未熟-成熟阶段存在多个生油高峰(Liu *et al.*, 2023).综上所述,富含耐盐菌-藻的泥页岩是东濮凹陷优质的烃源岩,对源内、源外油气成藏作出了重要贡献.

准噶尔盆地玛湖凹陷二叠纪风城组沉积时期,湖水碱度的变化控制了生物组成的时空差异性特征.平面上,从湖泊边缘到湖盆中心,随着水体碱度上升,蓝细菌的丰度逐渐降低,而更耐盐的杜氏藻的丰度逐渐增加;纵向上,风一段到风三段水体碱化程度逐渐降低,杜氏藻的丰度相应降低而蓝细菌的丰度明显增加(夏刘文等, 2022;图 4b、4c).以上协同变化导致玛湖凹陷风城组内发育以杜氏藻为主和以蓝细菌为主的两类烃源岩,前者的有机质丰度通常低于  $1.0\%$ ,  $HI$  指数低于  $200 \text{ mg/g}$ ;后者有机质丰度介于  $1.0\% \sim 2.0\%$ ,  $HI$  指数介于  $200 \sim 400 \text{ mg/g}$ .

尽管前人已经开展了一定研究,但是从生物-环境协同变化的正演视角认识深时咸化湖盆优质烃源岩发育机制还比较薄弱.不同咸化湖盆的形成背景、咸化机制和局部环境不尽相同,导致其生物组成各具特点,典型咸化湖盆生物-环境协同变化规律是否具有普适性还需更多的实例研究验证.目前仍存在多个科学问题有待深入探索,例如深时气候、水体理化性质和营养物质供给条件对生物组成变化的耦合控制作用,以及不同咸化湖盆中

决定优质烃源岩发育的关键生物组合及其差异性.

### 3 柴西咸化湖盆优质烃源岩发育机制

#### 3.1 生物组合特征与烃源岩响应关系

**3.1.1 生物种类与相对丰度** 柴西咸化湖盆前期的研究以描述生物的种类及组成为主,初步分析了典型生物对环境变化的响应,但是系统探讨生物-环境协同变化对优质烃源岩形成的影响研究仍比较匮乏.研究表明,柴西咸化湖盆的主要生物种类包括藻类、细菌和高等植物三大类,藻类化石中葡萄藻最为常见,其他藻类例如颗石藻、底栖宏观藻类、光面球藻、盘星藻和疑源类偶有发现(图 5;周凤英等, 2002;彭德华, 2004;邢蓝田, 2022;郝万鑫等, 2023;Zhang *et al.*, 2023),特定生标化合物的检出表明沟鞭藻和硅藻也是咸化湖盆生态系统的重要组成部分(张永东等, 2011;郝万鑫等, 2023).细菌类化石的观测未见报道,目前根据生标化合物推测可能包含绿硫细菌和紫硫细菌(张斌等, 2018;郝万鑫等, 2023),而高等植物类中较常见的是具气囊花粉、*Ephedra* 和 *Quercus* 等类型的花粉(Zhang *et al.*, 2023).

柴西咸化湖盆生物组成总体表现为菌藻类丰度远大于高等植物,真核藻类丰度大于原核细菌,葡萄藻在藻类属种中占据绝对主导地位.菌藻类丰度远大于高等植物的判识依据源自有机岩石学统计中菌藻类演化产物腐泥组和无定形有机质的总含量最高可达  $97\%$ ,平均为  $60\%$  以上(邢蓝田, 2022),生标化合物分析中正构烷烃表现出低碳数优势,主峰碳数为  $\text{C}_{18}$  或  $\text{C}_{22}$  且  $\text{C}_{27}$  规则甾烷优势明显也佐证了这种判断(图 5o;郝万鑫等, 2023).藻类丰度大于细菌的判断源自生标化合物中甾烷类化合物含量丰富,而藿烷类化合物含量却很低,反映藻类是主要的初级生产者.但是由于细菌类细胞结构比较简单,更易发生分解,不易保存在沉积记录中,因此细菌在生物组合中的占比仍需进一步深入研究,目前尚未有成熟的方法进行定量评价.有机岩石学发现了丰富的葡萄藻化石,其分布密度最高可达  $150 \text{ 粒}/\text{mm}^2$ ,平均含量占总有机显微组分的  $1\% \sim 43\%$ (Zhang *et al.*, 2023),而其他藻类种属的生物化石无定量统计结果,在以往的研究中常被忽略不计,因此当前研究认为葡萄藻在柴西咸化湖盆藻类属种中占据绝对主导地位.

针对柴西咸化湖盆生物组合,前人开展了一定

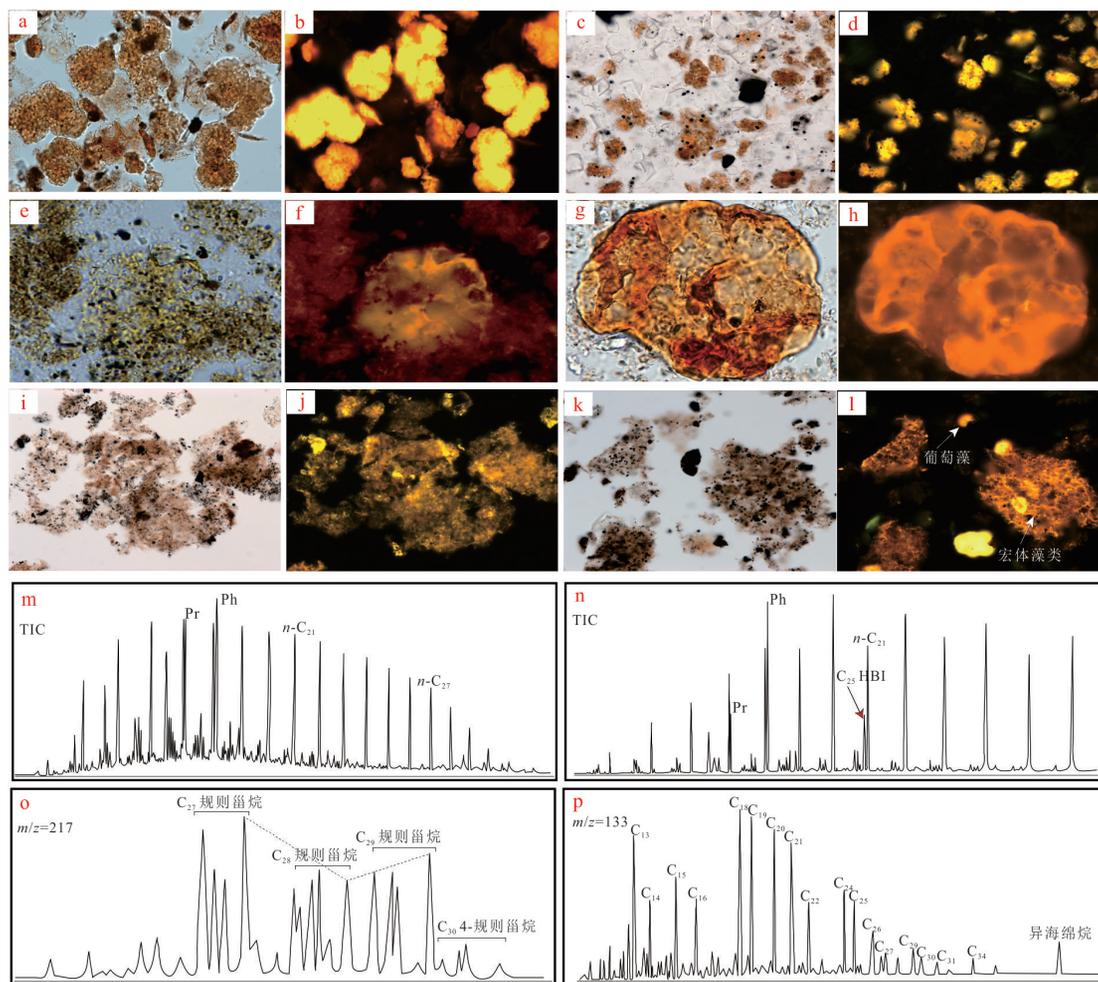


图5 下干柴沟组上段沉积期间的生物种群特征,来自有机岩石学和生物标志化化合物的指示

Fig.5 Biological community characteristics during the sedimentary period of the upper member of the Lower Ganchaigou Formation, inferred from organic petrology and biomarker compounds

显微照片拍摄于透射光和蓝光激发的荧光条件下。a~d. 葡萄藻,据 Zhang *et al.* (2023); e~f. 疑源类,据邢蓝田(2022); g~h. 双气囊花粉,据 Zhang *et al.* (2023); i~l. 柴908井宏体藻类; m. 跃灰10X井烃源岩饱和烃总离子流图,据 Zhang *et al.* (2023); n. 跃灰103井烃源岩饱和烃总离子流图(部分),高丰度的高支链类异戊二烯烃( $C_{25}$ HBI)指示了硅藻的贡献,据张永东等(2011); o. 柴906井烃源岩饱和烃甾烷类化合物谱图,据郝万鑫等(2023); p. 柴10井烃源岩芳烃类化合物谱图,高丰度芳基类异戊二烯烃和异海绵烷的检出指示了绿、紫硫细菌对有机质的改造作用,据郝万鑫等(2023)

的研究,但有关菌藻类相对比例和藻类组成的认识仍值得商榷.咸化湖盆发育泥页岩、灰云岩、石膏和石盐沉积,表明湖泊水介质条件变化较大,既有适合藻类生长的微-半咸水环境,也发育仅适合耐盐细菌类发育的极端咸化环境.前期研究普遍强调藻类的主导地位,尤其是仅在淡水-微咸水环境发育的葡萄藻报道广泛,这种相对单一的生物组成特征与复杂多样的岩性组合存在一定矛盾,也与相近时代其他水介质条件类似的咸化湖盆截然不同.本文认为造成上述差异的可能原因主要来自3个方面:首先与取样位置有关,受限于勘探程度,前期研究通常从平面上位于坳陷边缘的构造高点以及纵向

上处于中低盐度沉积环境的沉积层段进行取样,所得结论具有一定局限性;其次与分析方法有关,常规的全岩光片分析无法用透射光观察有机质内部结构,干酪根镜检分析前的样品酸处理过程可能会破坏部分生物形态,难以准确判识生物来源;再者可能与生物的选择性保存有关,葡萄藻具有不溶解、不水解以及高抗分解的细胞壁物质,有利于在埋藏过程中的保存,而其他生物种类可能由于细胞结构不同,难以保存.

**3.1.2 葡萄藻的发育与分布** 葡萄藻是当前柴西咸化湖盆最广泛报道的生物种类,具有生物量大,易于识别,富含烃、烯及脂肪酸等化合物,产烃量极

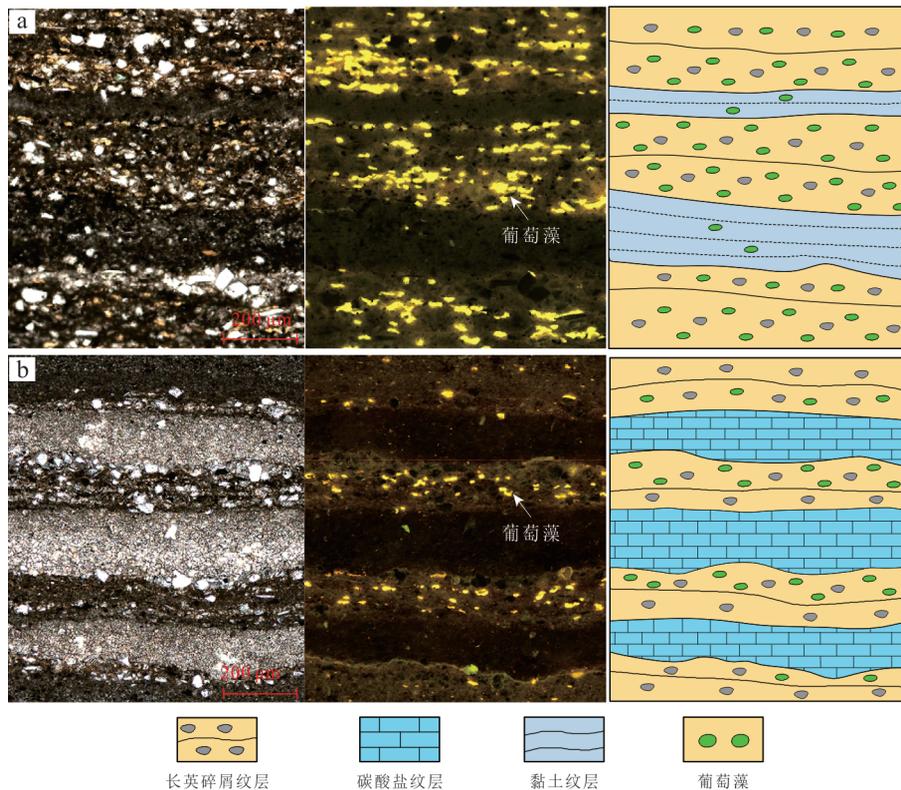


图 6 下干柴沟组上段纹层型页岩的岩石学特征与葡萄藻分布示意图

Fig.6 Schematic diagram of petrological characteristics and *Botryococcus* distribution of laminated shale in the upper member of Lower Ganchaigou Formation

显微照片拍摄于反射光和蓝光激发的荧光条件下,修改自 Zhang *et al.* (2023)

高等特征,对优质烃源岩中有机质的富集和油气资源的形成具有重要影响.生物培养实验表明,葡萄藻勃发所需的环境条件比较严格,包括适宜的光照、25℃左右的水温、淡水、较高的硝酸盐含量,当环境条件发生较大变化尤其是水体盐度增加,将导致其生长速率下降50%~300%(Li and Qin, 2005).Zhang *et al.* (2023)针对赋存在柴西咸化湖盆纹层状页岩中的葡萄藻开展研究,提出了相似的观点,认为气候和降雨量驱动的水体盐度和营养盐含量变化是影响葡萄藻发育的主控因素.研究发现葡萄藻在长英碎屑纹层中丰度最高(图6a),高长英碎屑含量反映了沉积时期气候温暖湿润、降雨量增加、地表径流增强,这一过程向湖泊输入大量淡水和营养盐,可以促进葡萄藻勃发;从长英碎屑纹层到黏土纹层,葡萄藻丰度显著降低,反映了气候由温暖向寒冷转变,降雨量减少使地表径流减弱、营养盐供给不足,造成葡萄藻数量大幅度衰减;从长英碎屑纹层到碳酸盐纹层,葡萄藻几乎完全消失(图6b),指示了气候由湿润向干旱转变,强蒸发作用促进了湖水咸

化,盐度超过了葡萄藻的耐盐临界点,阻碍了其发育.

葡萄藻勃发可以形成较高的初级生产力,为优质烃源岩的发育奠定物质基础.在柴西咸化湖盆烃源岩中,富含葡萄藻及其演化产物的纹层型页岩有机质相对富集,TOC介于0.14%~3.31%,平均为1.11%,是目前柴西咸化湖盆已知有机质丰度最高的烃源岩(Zhang *et al.*, 2023).此外,在原油样品中检出了丰富的可反映葡萄藻生源的两环萜烷,证明了葡萄藻对生烃的重要贡献(Xing *et al.*, 2022).尽管葡萄藻作为柴西坳陷有机质前驱物的证据十分明确,但是其他生物种类的重要性不容忽视,其定量化认识亟需加强.笔者近日在临近沉积中心的干柴沟地区柴908井高TOC页岩样品中发现了大量的宏体藻类化石(图5e~5h),说明其同样对优质烃源岩的发育具有重要贡献.

### 3.2 柴西咸化湖相页岩有机质富集机制

有机质富集机制研究表明,与海洋环境的“高生产力模式”和“保存模式”相比,湖泊环境因水体相对局限、湖平面频繁变化,更易受构造和古气候影响,有机质富集过程更加复杂.从根本上来说,有

机质含量取决于有机质与无机矿物的输入平衡以及缺氧保存与氧化分解的平衡.因此湖泊沉积物中有机质的富集程度实际上是有机质“生产-保存-稀释”三者共同作用的结果.

**3.2.1 初级生产力** 初级生产力是湖相有机质富集的物质基础,与水生生物丰度和陆源有机质输入有关,水生生物的发育取决于水体理化环境和营养盐供给.在咸化湖盆中,水体盐度变化是水生生物活动的一级驱动机制,控制生物勃发和消亡,影响初级生产力水平(Warren, 2016).研究发现具有一定耐盐性的藻类可以在低-中盐度( $< 100\text{‰}$ )的水体环境勃发,这些生物随盐度的进一步升高而迅速死亡,形成脉冲式的极高初级生产力(Warren, 2011; 夏刘文等, 2017).营养盐供给受湖盆外源输入和内源释放控制,在温暖湿润气候条件下,陆源化学风化作用加强,更多的营养物质,特别是生命必须的磷元素随地表径流进入湖盆,促进了浮游藻类的生长.同时火山活动、热液事件和海水侵入等地质事件的发生也可以向湖盆提供大量的营养物质,对于湖泊初级生产力的提高起到关键促进作用(Liang *et al.*, 2018).营养物质也可以通过沉积物的释放和有机质再矿化返回水体,在水体持续性或季节性的混合作用下进入透光带,可能会引发藻华,进而维持了表层的高初级生产力(Katz, 2001).

针对柴西坳陷咸化湖盆,前期研究利用元素地球化学指标(P/Al、K/Al、Fe/Al)表征了湖盆初级生产力水平,通过其与TOC含量之间较好的正相

关性,揭示了高初级生产力对沉积有机质富集十分必要(图7a).研究进一步显示高初级生产力水平与相对富营养且淡化的水体环境有关.在湖盆近岸区域,地表径流输入了丰富的营养盐和淡水,进而形成了较高水平的初级生产力;而在远岸的沉积中心,由于受地表径流影响有限,水体营养相对匮乏且盐度较高,生产力水平相对较低(张斌等, 2018).然而这一认识还有待商榷,前期对湖盆时空格架下的生产力变化尚未开展过定量评估,盐度对初级生产力的促进或抑制作用也缺乏量化的认识,在富营养过程的分析中未考虑内源释放的影响.因此,高初级生产力的形成机制及分布区间还需进一步研究.

**3.2.2 保存条件** 湖盆表生有机质在沉降和早成岩阶段还需经历一系列生物-化学作用,最终决定了有机质的保存效率(埋藏有机质/表生有机质).大部分表生有机质在经历了有氧氧化和异养微生物降解后,以 $\text{CO}_2$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 的形式返回水圈和大气圈,或以惰性的可溶有机质形式存在于深部缺氧水体中,或被异养捕食生物消耗后循环再生,仅有极少部分初始有机质得以保存,进入沉积物并成为岩石圈中的埋藏有机碳.水体的含氧量和氧化性离子的浓度是驱动上述作用过程并影响埋藏有机碳含量的关键因素.现代海洋研究显示,有机质的保存效率在开阔富含氧的浅海环境中仅为0.1%,在相对封闭、缺氧的海洋环境中可达到4%(Menzel and Ryther, 1970; Warren, 2016).咸化湖盆中,高盐度水介质条件更有利于有机质保存,因为水体盐度升高可以降低氧气的总溶

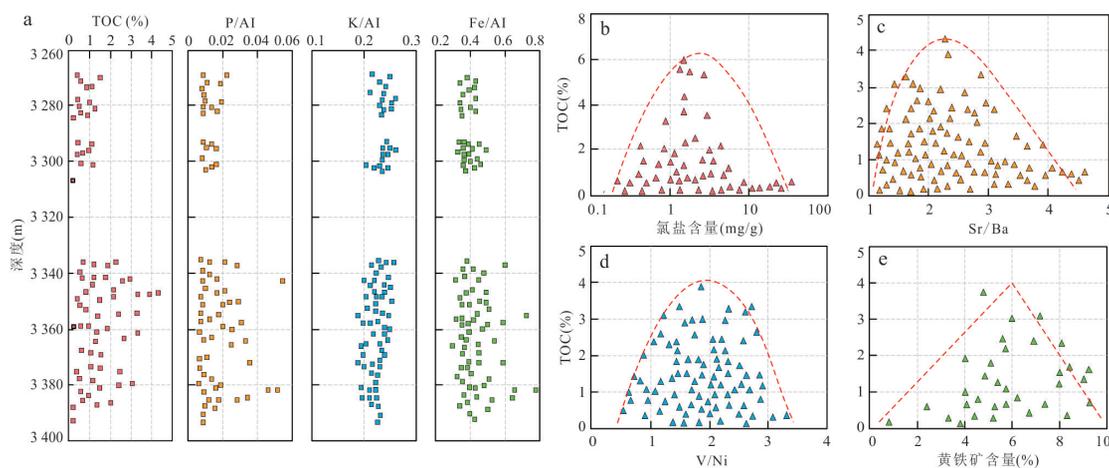


图7 下干柴沟组上段烃源岩总有机碳含量与地球化学指标相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of TOC content and geochemical indicators in the upper member of Lower Ganchaigou Formation source rock

修改自 Liu *et al.* (2016)和张斌等(2018).a. 总有机碳与生产力指标;b, c. 总有机碳与盐度指标;d, e. 总有机碳与氧化还原指标

解量,并且造成水体稳定分层、水体交换作用有限,形成停滞、缺氧的底层水环境(Warren, 1986)。

柴西咸化湖盆的前期研究通过岩石学、地球化学证据证实良好的保存条件对有机质富集至关重要,但对其控制机制存在两种不同看法。第一种观点认为极端咸化环境缺氧程度最高,可最大限度保存有机质,而中-低盐度底水缺氧程度不足,有机质的保存效率相对较低,前人认为柴西拗陷咸化中心石膏、石盐和暗色泥页岩互层发育的现象支撑了这种观点(金强和朱光有, 2006; 金强等, 2008)。然而随着研究深入,大量地化数据相关性分析显示 TOC 含量与指示水体盐度的  $Cl^-$  含量、以及指示氧化还原的黄铁矿含量和 V/Ni 比值的曲线均表现出先正相关、后负相关的变化趋势(图 7b~7e; Liu *et al.*, 2016; 张斌等, 2018), 因此第二种观点认为中等盐度、适当缺氧的环境更有利于有机质富集,极端咸化且缺氧的环境可能存在抑制有机质富集的作用。例如,细菌硫酸盐还原作用降解有机质,蒸发盐矿物快速析出沉淀稀释有机质,盐跃层上移抑制表层湖水生物的生长及高生产力的形成,但这些作用机制目前尚处于理论假设阶段,亟需实际数据进一步研究证实。

**3.2.3 沉积速率** 沉积速率指沉积物的堆积速率,是盆地沉积充填快慢的反映,决定了有机质被稀释的程度。沉积速率对有机质的稀释作用存在转折点,临界速度可能为 5.0~12.0 cm/ka(Chen *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2015),在低于临界速率的环境中,沉积速率的增加促使有机质快速沉降、暴露于水体中氧化环境的时间减短,有利于提高有机质的保存效率及丰度;而在高于临界速率的环境中,如果有有机碳的供给通量恒定,沉积速率增加意味着单位时间内更多的无机矿物沉积,将对有机质产生明显的稀释作用,降低有机质丰度。沉积速率的变化取决于盆地的构造属性、水文地质条件、气候变化和物源输入等多种因素,其中水体盐度的增加具有重要影响。研究表明咸化湖盆以内源沉积为主,胶结成岩作用迅速,沉积速率普遍高于淡水湖盆(张瑞等, 2023)。

在柴西咸化湖盆,利用天文旋回方法估算下干柴沟组上段沉积时间为 4.45~4.86 Ma,结合沉积时间与沉积厚度估算全层段的平均沉积速率介于 24.3~38.8 cm/ka,最大沉积速率达 58.5 cm/ka(盛军等, 2025)。学者们对于沉积速率和有机质富集的内在联系持有不同观点,部分学者认为过快的沉积

速率是导致柴达木盆地烃源岩有机质丰度整体较低的原因之一,沉积速率与有机质丰度之间存在完全负相关的变化趋势,沉积速率越低、有机质丰度越高(李国欣等, 2023b)。也有学者提出沉积速率介于 33~45 cm/ka 更有利于柴西咸化湖盆有机质的相对富集(盛军等, 2025)。总的来说,目前对沉积速率及其影响的研究比较薄弱,受构造位置和沉积环境演变的影响,不同井的表征结果与指示意义存在差异,更系统的研究有待开展。

总体而言,目前针对柴西咸化湖盆有机质富集机制的研究处于初期阶段,当下的认识提出了“相对富营养”、“中等盐度”、“适当缺氧”等宏观环境条件促进有机质富集,很多机理性问题有待深入研究。同时,前期研究主要采用岩石学、元素地球化学等常用方法,表征手段的准确性受多种因素影响,数据的多解性较强。由于湖相沉积频繁的变化,非均质性强,元素地球化学的实用性可能会被降低;而且元素循环受多种因素相互影响,精度不高,未来可以尝试利用金属稳定同位素进行评价。

### 3.3 柴西咸化湖盆优质烃源岩分布模式

**3.3.1 水体盐度控制优质烃源岩平面分布** 较高初级生产力和良好的保存条件被初步认为是柴西咸化湖盆有机质富集的关键因素,二者的叠合部位成为优质烃源岩发育区的潜力较大。平面上具有中等盐度的半深湖环境是初级生产力和保存条件匹配的最佳区域,其盐度和营养物质供给较沉积(咸化)中心更有利于生物生长,水体分层的稳定性和底水的缺氧程度较低盐度的滨浅湖更优,有望规模发育优质烃源岩(张斌等, 2018; Guo *et al.*, 2020)。该观点在实地勘探中得到了印证,在柴达木盆地盐度适中的半深湖区(绿参 1 井、跃灰 106X 井等,古盐度为 15‰~17‰)烃源岩的 TOC 平均约为 1.5%;而咸化中心(狮 41-2 井,古盐度约为 25‰)发育的烃源岩 TOC 多数低于 1.0%,低盐度滨浅湖环境的烃源岩品质进一步变差,TOC 含量介于 0.2%~0.8%,主体低于 0.4%。

**3.3.2 湖泊环境演化影响优质烃源岩纵向发育** 始新世中-晚期,柴西拗陷的古地貌和区域气候发生了显著变化,控制了湖盆水体环境的演变,并影响了沉积充填序列和优质烃源岩在纵向上的分布模式。首先,区域构造活动使古地貌由一个 NW-SE 向贯穿英雄岭的连通凹陷演变为多个次级相对闭塞凹陷(英西地区)和一个次级相对开阔凹陷(英东

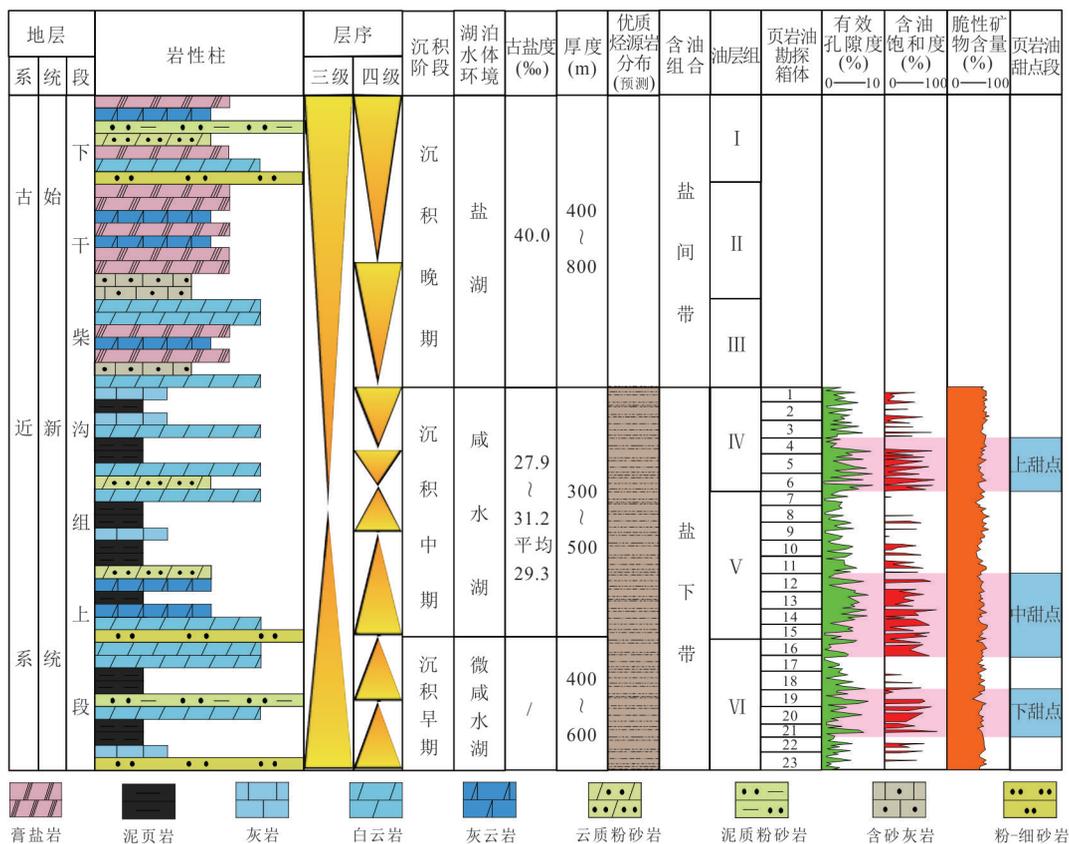


图 8 下干柴沟组上段沉积环境演变与页岩油甜点段分布示意图(修改自 Wang *et al.*, 2020a)

Fig.8 Schematic diagram of sedimentary environment evolution and shale oil sweet spot distribution in the upper member of Lower Ganchaigou Formation (modified from Wang *et al.*, 2020a)

地区)的组合(黄成刚等, 2017b; 朱超等, 2022); 全球气温震荡降低和副特提斯海退影响了水汽沿西风带向柴西坳陷的输送, 使区域气候在长时间尺度内由温暖湿润向干旱寒冷转变, 风化强度逐渐减弱 (Fang *et al.*, 2019). 古地貌和古气候的联合作用使英西地区湖水的蒸发量逐渐大于注入量、水体变浅、盐度上升, 沉积充填相应表现出阶段性 (Guo *et al.*, 2017; Xiong *et al.*, 2021). Wang *et al.* (2020a) 根据湖泊咸化环境和沉积物岩性差异, 将英西地区下干柴沟组上段沉积划分为早、中、晚 3 个阶段. 早期为微-半咸水湖环境, 主要发育碳酸盐岩和钙质砂岩; 中期为咸水湖环境、平均盐度达到 29.3%, 主要发育泥岩和碳酸盐岩; 晚期为盐湖环境、平均盐度超过 40.0%, 形成厚层石盐、薄层碳酸盐岩和泥质粉砂岩互层的岩性组合 (图 8). 根据有机质富集和葡萄藻勃发的环境条件推断沉积早期、中期是优质烃源岩的发育层段, 而沉积晚期极端咸化环境抑制了生物生长, 因此几乎不发育优质烃源岩 (Guo *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023). 柴达木盆地的前期实际勘探发现沉积早-中期烃源

岩 TOC 含量在 0.24%~2.56% 之间, 半数样品大于 1.0%, 达到优质烃源岩标准, 与上述研究结论一致.

柴西咸化湖盆优质烃源岩分布区、段的预测源自对有机质富集机制和关键生物勃发环境条件的理解, 以上认识仍有待深化. 目前优质烃源岩分布预测平面过大、纵向过厚, 预测精度有待提高. 另外, 在极端咸化区段, 含膏盐细粒沉积岩是否仍有勘探开发潜力也需要进一步验证.

#### 4 柴西咸化湖盆页岩油富集过程

##### 4.1 未熟-成熟二段式生烃为页岩油富集奠定物质基础

咸化湖相烃源岩通常具有多阶段生油的特征, 有别于经典的干酪根晚期热生烃模式, 其原因在于特定的沉积环境下特殊的生烃母质组成. 以渤海湾盆地为例, 咸化环境以富含脂类化合物的颗石藻、蓝细菌和沟鞭藻为主要生烃母质的烃源岩从未成熟到成熟过程中存在数个生油高峰; 相反, 当水体淡化以后, 形成以淡水绿藻和陆源高等植物为主要

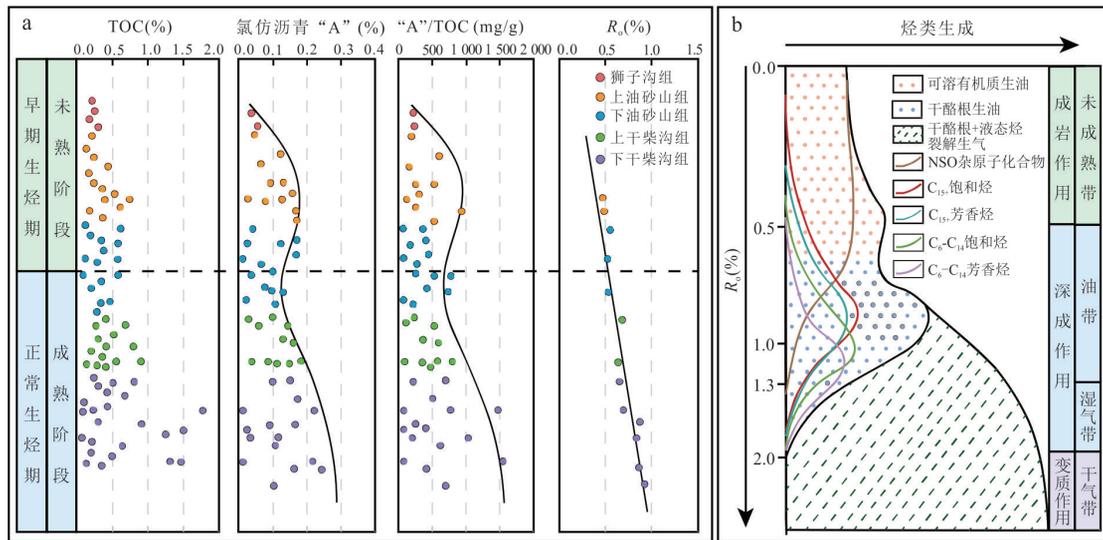


图9 柴西坳陷咸化湖相烃源岩生烃模式

Fig.9 Schematic diagram of hydrocarbon generation model of saline lacustrine source rock in the West Qaidam Depression

a. 咸8井自然生烃演化剖面, 修改自彭德华(2004); b. 未熟-成熟二段式生烃模式图, 修改自李国欣等(2023b)

生烃母质的烃源岩, 仅在成熟阶段发生一期生油(张林晔等, 2005; 李国山等, 2014). 王铁冠等(1996)对咸化湖盆未熟-成熟多阶生油机理进行过相关阐述: 菌藻类死亡后, 其细胞有机质和细胞内的类脂物聚合成藻类体, 成为干酪根的重要成分, 在成熟阶段生油; 而生物组织中额外存在的一些游离油状物质, 作为生物储备类脂物演化为可溶性的非烃-沥青质混合物, 这些大分子的极性化合物由于未键合在干酪根中, 不需要太多的能量即可向烃类转化, 是未熟-低熟阶段生油的物质来源.

柴西咸化湖相烃源岩也具有多阶生油特征, 多口钻井岩心(咸8井和梁3井)的有机地球化学剖面提供了直接证据. 剖面上氯仿沥青“A”转化率(“A”/TOC)演化曲线呈“双峰型”分布模式(图9a), 前峰峰值出现在 $R_o \approx 0.4\%$ 处, 转化率达到500 mg/g, 后峰峰值出现在 $R_o \approx 1.0\%$ 处, 转化率达到1500 mg/g, 表明烃源岩在未熟、成熟阶段两次达到生油高峰, 即未熟-成熟二段式生烃(彭德华, 2004). 柴西坳陷内部以成熟原油为主的油藏和坳陷边缘以未熟-低熟原油为主的油藏大量发现(李洪波等, 2010), 也佐证了二段式生烃的存在.

当前研究人员将柴西未熟-低熟油的产生归结于葡萄藻, 主要有以下三方面依据: (1) 葡萄藻化石在柴西烃源岩中大量出现, 可能是最主要的生烃母质(周凤英等, 2002). (2) 葡萄藻生烃潜力卓越, 现代葡萄藻脂质含量和产烃量异常丰富, 分别占生物细胞干重的50%~83%和20%~76%(Aaronson *et*

*al.*, 1983). (3) 葡萄藻可以在未熟-低熟阶段大量生烃, 生烃热模拟实验揭示了现代葡萄藻加热前已含有大量原生可溶有机质, 主要是非烃和沥青质; 随热解温度增加至 $170\text{ }^\circ\text{C}$  ( $R_o \approx 0.4\%$ ), 可溶有机质总量上升, 总烃(饱和烃和芳烃组分)的比例也显著增加; 当热解温度升高至 $250\text{ }^\circ\text{C}$  ( $R_o \approx 0.5\%$ )时, 总烃的比例仍有较高的增值(陈致林等, 1992). 成熟油的生成则被认为与早期生成的可溶有机质二次裂解和干酪根热降解有关. 封闭体系热模拟实验表明, 温度从 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $490\text{ }^\circ\text{C}$  ( $R_o$ 由0.5%增加至1.8%), 早期生成的可溶有机质, 由富含杂原子的非烃化合物和 $C_{15}$ 以上的重质组分逐步裂解为 $C_6 \sim C_{14}$ 的饱和烃和芳烃. 而干酪根的生烃演化则符合经典的“Tissot模式”, 生油窗位于 $R_o$ 值为0.7%~1.3%的区间, 生油高峰对应 $R_o$ 值为1.0%处, 与有机地化剖面中后峰出现的区间一致(图9b; 李国欣等, 2023b). 二段式生烃为柴西页岩油富集奠定了物质基础. 尽管下干柴沟组上段页岩TOC含量整体不高(平均为0.98%), 但以菌藻类为主要生烃母质的特点使有机质富氢, 单位有机碳成烃潜力大, 有机碳转化率高达80%(匡立春等, 2021). 在二段式生烃模式驱动下, 无论是浅埋藏还是深埋藏的烃源岩均具有极高的生烃转化率和生烃强度, 使页岩层系富含滞留烃,  $S_1$ 值最高超过10 mg/g,  $S_1$ /TOC值总体在200~400 mg/g(李国欣等, 2023b).

综上所述, 柴西咸化湖相烃源岩存在二段式生烃且对页岩油富集具有积极意义, 笔者总结了3个

亟需关注的问题.首先,未熟-成熟两阶段生烃过程已初步明确,但有关生烃母质的认识依然模糊.前期研究突出葡萄藻的主要贡献,而其他生物在二段式生烃过程中的作用尚不清楚.由此引发了第二个问题,全层段烃源岩均为二段式生烃还是存在不同的生烃机制值得探讨.下干柴沟组上段的沉积水体环境经历了由微咸水湖向咸水湖、盐湖的演变,而生烃母质组成的协同变化尚不清楚,生烃演化规律在复杂地质条件下是否存在多样性需要明确.最后,葡萄藻根据合成烃类的明显差异可分为 A、B、L 三个化学种,化学种 A 主要合成无分枝、直链、奇数碳链 C<sub>23</sub>-C<sub>33</sub> 的 n-二烯烃、三烯烃;化学种 B 以产出 C<sub>30</sub>-C<sub>37</sub> 的葡萄烯和 C<sub>31</sub>-C<sub>34</sub> 的甲基鲨烯为特征,产烃量相对较高;化学种 L 以合成一种分枝上存在苯环或杂环的四萜类烯烃(C<sub>40</sub>H<sub>78</sub>)为特征,产烃量相对较低(Metzger and Largeau, 2005; 马丽芳等, 2015).前期热模拟生烃实验采用的葡萄藻是现代的 A 种和 B 种,是否真实反映了柴西古葡萄藻的生烃特征仍有待验证.

#### 4.2 层状灰云岩储层的广泛发育保障了页岩油规模富集

根据储层岩石成因特征,中国陆相页岩油储层可分为陆源供给为主和内源供给为主两类,后者多发育在咸化湖盆的半深湖-深湖

区,岩性多样,包括碳酸盐岩、混积岩和浊积岩等(胡素云等, 2022).内源供给型储层的储集空间类型复杂(包括粒(晶)间孔、溶蚀孔、有机质孔和微裂缝),尺寸变化较大(纳米级-毫米级),物性的非均质性较强(孔隙度介于 2%~15%,渗透率为 0.01~1.00 mD),储集性能存在明显差异,具备良好储渗能力和一定规模的优质储层是页岩油规模富集的重要保障.

柴西咸化湖相页岩沉积厚度巨大、混积特征明显,发育多类型的页岩油储层,有关优质储层的识别与评价是前期研究的重点.青海油田依据岩相特征,划分出纹层状灰云质页岩、纹层状云灰质页岩、纹层状黏土质页岩、层状灰云岩、层状云灰岩 5 类储层(图 10a; 邢浩婷等, 2024).扫描电镜分析表明以白云石为主要基质矿物的沉积单元密集发育微米级白云石晶间孔,孔隙发育程度优于长英质单元和黏土单元,而方解石单元孔隙发育程度最低,因此判定层状灰云岩的储集空间最为发育(李国欣, 2023).物性表征也显示层状灰云岩具有最高的孔隙度(高于 5% 的占比达 40% 以上)和较好的渗透率(图 10b~10e).综合高孔隙度、高地层占比(26% 以上),以微米级孔隙为主等特征,层状灰云岩被认为是最优储层,其广泛发育为页岩油规模富集提供了充足的储集空间.

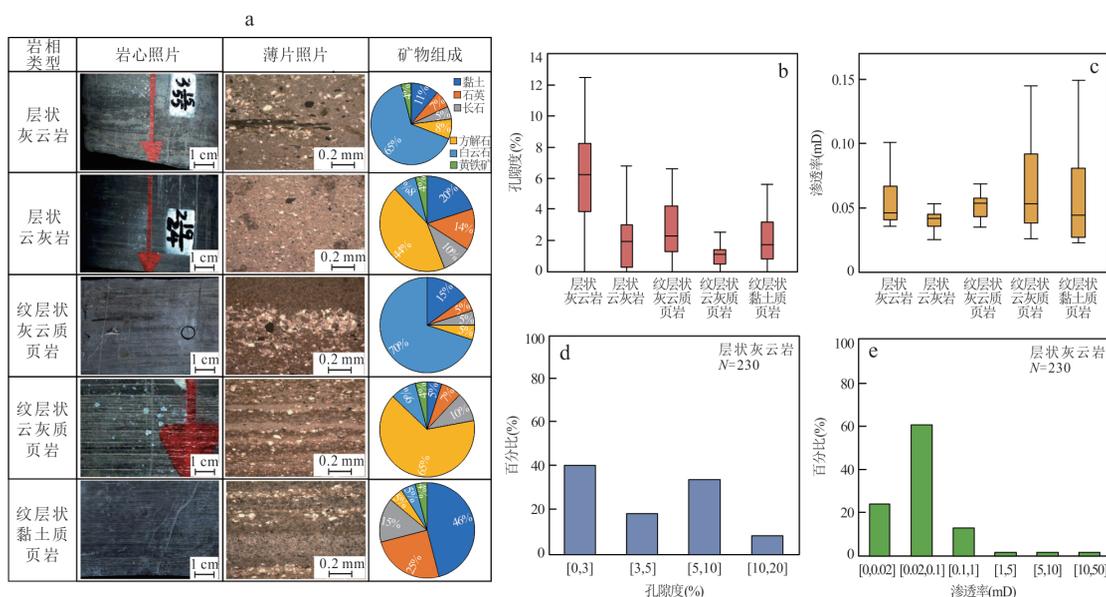


图 10 下干柴沟组上段不同岩相储层岩石学特征及物性特征差异示意图

Fig.10 Schematic diagram of petrological characteristics and physical property differences of different lithofacies reservoirs in the upper member of Lower Ganchaigou Formation

物性评价参数为页岩柱塞样测定的氮气孔隙度和空气渗透率,修改自邢浩婷等(2024)

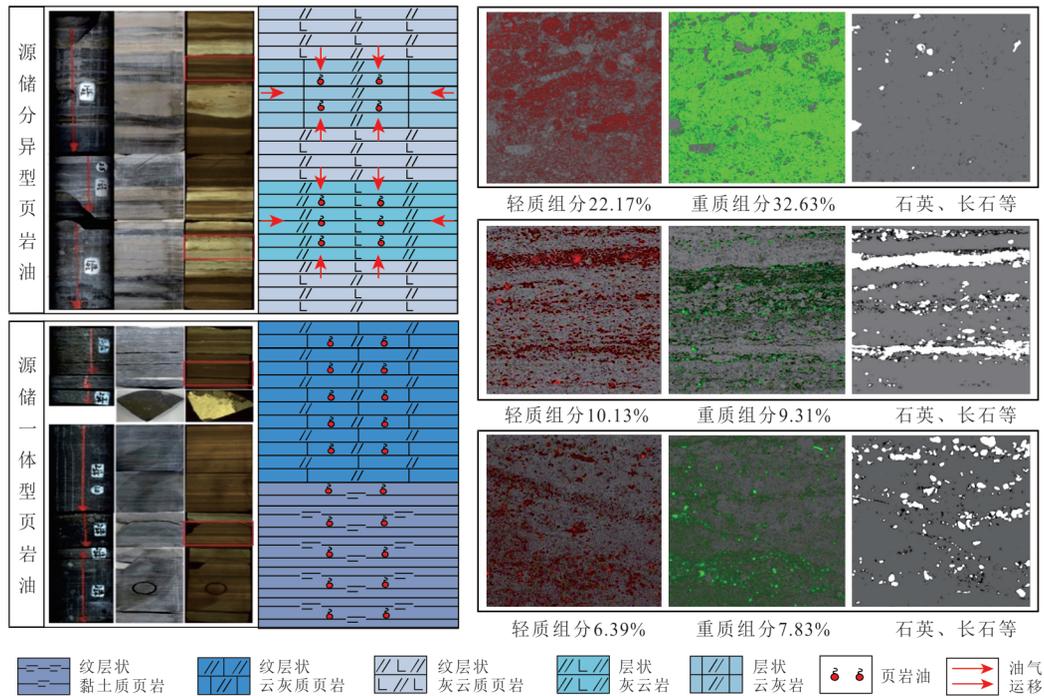


图 11 下干柴沟组上段源储组合类型及其含油性示意图

Fig.11 Schematic diagram of source-reservoir combination types and their oil content variations in the upper member of Lower Ganchaigou Formation

右图为激光共聚焦显微镜照片,揭示了页岩油差异分布特征,修改自李国欣(2023)

目前,柴西页岩油优质储层的评价尽管取得了很大进展,但研究思路基本以储层特征的静态表征为主,根据浅部取心层段的规律推断整体情况.本文认为,在巨厚的页岩层系中,成岩作用类型、强度对孔隙发育的影响值得重视.以溶蚀作用为例,有机质热成熟过程中生成的有机酸会溶蚀岩石矿物,形成更多的储集空间,改善了储集性能,而有机酸生成量受控于埋藏深度和热演化程度,不同埋深处有机酸溶蚀作用存在差异,势必导致相同岩相储层的储集性能存在非均质性,不同岩相储层之间储集性能的优劣关系发生变化.为了对巨厚页岩油储层有更清晰全面的了解,亟需从有机-无机成岩演化的动态视角分析孔隙发育机理和优质储层形成机制.

#### 4.3 多样化的源储组合控制页岩油差异富集

源储组合是对页岩油分类、评价的重要标准,组合类型划分有宏观、微观两个尺度,宏观尺度侧重于描述源岩与储层的空间匹配关系,有纯页岩型、源储一体型和源储分异型3类(杜金虎等,2019;胡素云等,2020,2022).微观尺度针对源储分异型组合,进一步描述了源岩与储层在岩相、厚度和品质方面的匹配关系,类型细化尚没有一致标准.准噶尔盆地芦苇沟组咸化湖相页岩油研究表明,咸化湖

盆混合沉积特征显著,细粒沉积层系中既有生烃与成储能力兼备的岩性单元(例如黏土质页岩、钙质页岩等),也有储烃能力优越但无生烃能力的岩性单元(如粉-细砂岩、碳酸盐岩等),不同岩性单元在垂向上重复叠置,在宏观尺度形成了源储一体型和源储分异型两类组合,后者根据微观尺度差异又可细分为多个亚类,而生烃潜力、生烃特征、储集能力和疏导体系等多个关键因素不同程度的控制作用使页岩油富集特征(含量、组分)在不同源储组合表现出差异性(张宸嘉等,2022;刘诗局,2023).

柴西咸化湖相页岩层系同样发育多种源储组合,控制了页岩油的差异富集特征.宏观尺度上,源储一体型和源储分异型组合均有发育(李国欣等,2022;郭泽清等,2023),前者的岩相主要是纹层状页岩,纹层结构为厚约200 μm的泥质纹层和钙质纹层互层,泥质纹层富含有机质且发育黏土矿物晶间孔,兼具生烃和储烃能力,纹层缝和钙质纹层中的矿物晶间孔隙也可以有效储烃,页岩油生成后以原地滞留的方式富集;后者以层状碳酸盐岩与纹层状页岩的岩相组合为代表,碳酸盐岩晶间孔隙更加发育,储集性能优越,可高效捕获纹层状页岩排出的多余烃类,页岩油以近源微运移的方式富集(图11).含

油饱和度和激光共聚焦显微镜分析揭示了源储一体型组合普遍含油性最佳;源储分异型组合含油性一般,含油饱和度为46%~88%,但轻质组分含量高,理论上可动性更优(图11;李国欣,2023).邢浩婷等(2024)根据微观尺度的差异将源储分异型组合细分出三类,一类为纹层状云灰质页岩和层状灰云岩互层,页岩油富集程度最高( $S_1 > 3$  mg/g,含油饱和度 $> 60\%$ );二类为纹层状云灰质页岩与层状灰云岩互层,同时夹有纹层状灰云质页岩、粉砂岩的组合,富集程度相对一类略有下降( $S_1 = 2 \sim 3$  mg/g,含油饱和度 $= 50\% \sim 60\%$ );三类为纹层状灰云质页岩和层状灰云岩互层,富集程度相对最差( $S_1 = 1 \sim 2$  mg/g,含油饱和度 $= 40\% \sim 50\%$ ).

然而,上述页岩油差异富集只是局部取心层段呈现的特征,在巨厚页岩层系中,不同埋深或不同亚段源岩的生烃潜力和生烃演化可能存在多样性、储层的储集性能可能存在非均质性,当生烃单元产烃量、储层单元储集性能以及微运移过程发生变化,不同源储组合页岩油的富集特征都会随之变化.为了更系统全面地认识页岩油差异富集机制,未来还需针对不同埋深或不同亚段页岩油的富集过程开展综合对比分析.

#### 4.4 页岩油“甜点段”评价

页岩油“甜点段”是指在页岩层系中,当前经济技术条件下可优先勘探开发的页岩油富集高产的目标层段,评价的核心要素包括储集性、含油性、可动性和可压性.其中,含油性主要根据烃源岩品质、含油饱和度和含油量界定,储集性根据储层的岩性、总/净厚度、孔隙度、储集空间类型和孔隙结构界定,可压性通过脆性矿物与塑性矿物的相对比例、脆性矿物中钙质和硅质的相对比例评价,可动性则依据地层超压发育程度、页岩油物理性质和化学组成、以及一些经验参数,如含油饱和度指数OSI(Oil Saturation Index)等评价.

柴西下干柴沟组上段为巨厚页岩层系,精细划分地层单元是甜点段评价的基础.青海油田根据膏盐岩规模发育将全层段分为盐间带(上部)和盐下带(下部),根据层序特征将盐间带和盐下带自上而下细分为6个油层组(图8,编号1~6).盐下带是当前页岩油勘探的目标层位,平均沉积厚度约为1200 m,油田结合沉积韵律特征和储集层改造高度将其自上而下划分为23个箱体(编号1~23),各箱体厚度为42~55 m.柴西页岩油形成的地质条件特

殊,物质组成复杂,套用现行的标准体系判识甜点存在一定的不适应性,前期研究优选出有效孔隙度、含油饱和度、脆性矿物含量、有机碳含量、热演化程度等5项与页岩油富集密切相关参数,并通过多次迭代确定分类界限(李国欣等,2022).页岩油“甜点段”评价主要参考前三项指标,初步判定IV油层组的4~6箱体(上甜点)、V油层组的12~16箱体(中甜点)和VI油层组的19~21箱体(下甜点)共11个箱体约550 m地层为甜点段,其中达到I类甜点段标准(有效孔隙度 $> 5\%$ 、含油饱和度 $\geq 40\%$ 、脆性矿物含量 $> 50\%$ )的厚度为150~280 m,II类甜点段厚度(有效孔隙度 $3\% \sim 5\%$ 、含油饱和度 $\geq 40\%$ 、脆性矿物含量 $40\% \sim 50\%$ )为250~300 m.

对比中国其他页岩油勘探开发较为成熟的盆地,鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>亚段粉砂岩夹层甜点与低TOC页岩甜点的总厚度不足100 m,准噶尔盆地芦草沟组“上甜点”与“下甜点”总厚度不超过80 m,在柴西厚层页岩中识别出550 m的甜点段以及280 m的I类甜点段对于开发层系的选择仍是一个难题.当前的评价参数是否能准确反映甜点段属性值得探讨,例如含油性评价主要依据实验室测定的岩心含油饱和度,然而长期放置的岩心存在烃类逸散,不一定真实反映地下原位的含油情况;储集性评价主要参考有效孔隙度,孔隙结构的控制作用认识不足;而可动性评价则未被纳入当前的评价体系中;以上皆需要开展进一步研究,采用诸如密闭取心等较新取样方法,开展较前沿的有机-无机地球化学手段,精细评价甜点段是柴西页岩油未来的研究目标.

## 5 研究展望

综上所述,目前对于柴西咸化湖盆优质烃源岩发育机制与页岩油富集过程已取得一定认识,但仍有诸多问题需深入探讨,本文认为以下几方面值得重视:

(1)咸化湖盆生物-环境协同变化规律及其对烃源岩品质的控制作用.前期研究明确了柴西咸化湖盆生物组成复杂,但仅阐明了葡萄藻的勃发机制,强调葡萄藻对优质烃源岩发育的主导性作用,而其他水生生物,包括宏体藻类、沟鞭藻、颗石藻、硅藻和绿(紫)硫细菌未受到重视.这些生物的发育特征与水体环境的时空协同变化规律尚不清楚,对高初级生产力和优质烃源岩形成的控制作用有待揭示.

(2) 不同咸化阶段有机质差异富集机制。目前仅根据沉积环境参数与有机质丰度的相关性提出了一些关键控制因素,而不同咸化阶段初级生产力、保存条件和沉积速率对有机质富集的耦合控制作用研究相对薄弱,具体包括:①不同咸化阶段高初级生产力的形成机制与分布区间;②极端咸化条件对有机质含量的影响机制;③沉积速率的定量评估、控制因素及对有机质差异富集的影响。未来还需结合不同咸化阶段的地化剖面开展系统分析。

(3) 巨厚页岩层系生烃、成储模式及其差异性。在巨厚的页岩层系中,不同次级单元的沉积环境和经历的成岩作用存在差异,可能对源岩生烃演化和储层孔隙发育具有不同程度的影响。前期研究针对全层段页岩提出了未熟-成熟二段式生烃模式,判识了白云石晶间孔最为发育、物性最佳的层状灰云岩为优质页岩油储层,但对这种生烃模式存在的基础物质条件认识较为模糊,对成岩演化影响下储层孔隙发育特征和物性变化认识不够深入,总结的规律在巨厚层系中具有普遍性还是仅反映局部特征有待验证。

(4) 不同源储组合页岩油的赋存与富集机制。前期研究初步揭示了柴西咸化湖盆不同源储组合页岩油的差异富集特征,但有关页岩油在不同组合中的赋存状态、赋存空间的系统认识未见报道,对页岩油差异富集背后的多因素耦合控制作用还鲜有研究。对于源储分异型页岩油,目前有关微运移现象的定性判识、定量评价,微运移特征(包括运移方向、距离)、运移烃地层分馏效应的研究报道较少,微运移对页岩油差异富集和可动性的影响是未来研究应当重点关注的问题。

(5) 提高取样方式的准确性和研究手段的先进性。在分析技术与方法层面,前期研究采用的手段相对传统,随着研究方法的进步,新的技术手段和研究范式蓬勃发展,值得积极尝试。例如在研究生物组成特征方面,集成扫描电镜-能谱与共聚焦荧光显微镜技术的应用将有助于对超微成烃生物的有效鉴定,可溶有机质饱和烃、芳烃和非烃中特殊生物标志化合物的识别与(半)定量评价有助于表征成烃生物的种类与相对丰度。在陆相沉积的古环境恢复、初级生产力评价和营养元素循环研究中,非传统金属稳定同位素、氮同位素、铁组分、磷组分等技术方法具有广阔的应用前景。在页岩油的含油

性评价中,随钻烃类分析与保压密闭取心-液氮冷冻样品的实验测试结果,比普通取心的实验结果更能代表地下页岩油含量和分布情况,团队前期应用该技术对干柴沟地区的柴平6井开展含油性评价,实验结果有力支撑了储量评价。此外,傅里叶变换离子回旋共振质谱(FT-ICR MS)的应用可将页岩油组成表征由族组分维度推进至全分子维度(尤其是对于非烃类化合物),可有效指示页岩油生成、微运移、聚集和开采过程中的分子组成变化,总结地质、工程过程的分馏效应,助力页岩油赋存与富集机理研究、可动性评价与主产层判识。

## References

- Aaronson, S., Berner, T., Gold, K., et al., 1983. Some Observations on the Green Planktonic Alga, *Botryococcus braunii* and Its Bloom Form. *Journal of Plankton Research*, 5(5): 693–700. <https://doi.org/10.1093/plankt/5.5.693>
- Bao, J., Wang, Y. D., Song, C. H., et al., 2017. Cenozoic Sediment Flux in the Qaidam Basin, Northern Tibetan Plateau, and Implications with Regional Tectonics and Climate. *Global and Planetary Change*, 155: 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.03.006>
- Barbe, A., Grimalt, J. O., Pueyo, J. J., et al., 1990. Characterization of Model Evaporitic Environments through the Study of Lipid Components. *Organic Geochemistry*, 16(4–6): 815–828. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(90\)90120-O](https://doi.org/10.1016/0146-6380(90)90120-O)
- Chen, S., Wang, H., Wei, J., et al., 2014. Sedimentation of the Lower Cretaceous Xiagou Formation and Its Response to Regional Tectonics in the Qingxi Sag, Jiuquan Basin, NW China. *Cretaceous Research*, 47: 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2013.11.006>
- Chen, X. C., Wang, X. D., Wu, D. Y., et al., 2009. Seasonal Variation of Mixing Depth and Its Influence on Phytoplankton Dynamics in the Zeya Reservoir, China. *Limnology*, 10(3): 159–165. <https://doi.org/10.1007/s10201-009-0292-6>
- Chen, Z. L., Li, S. J., Zhou, G. J., 1992. Characteristics of Oil, Gas and Biomarkers Generated from the Pyrolysis of Modern *Botryococcus braunii*. *Lacustrine Petroleum and Geology*, (1): 48–53 (in Chinese).
- Ding, X. J., Liu, G. D., Zha, M., et al., 2015. Relationship between Total Organic Carbon Content and Sedimentation Rate in Ancient Lacustrine Sediments, a Case Study of Erlan Basin, Northern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 149: 22–29. <https://doi.org/>

- 10.1016/j.gexplo.2014.11.004
- Du, J. H., Hu, S. Y., Pang, Z. L., et al., 2019. The Types, Potentials and Prospects of Continental Shale Oil in China. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 560—568 (in Chinese with English abstract).
- Fan, C. X., Aiziki, M., 1997. Effects of Aerobic and Anaerobic Conditions on Exchange of Nitrogen and Phosphorus across Sediment-Water Interface in Lake Kasumigaura. *Journal of Lake Science*, 9(4): 337—342 (in Chinese with English abstract).
- Fang, X. M., Galy, A., Yang, Y. B., et al., 2019. Paleogene Global Cooling-Induced Temperature Feedback on Chemical Weathering, as Recorded in the Northern Tibetan Plateau. *Geology*, 47(10): 992—996. <https://doi.org/10.1130/G46422.1>
- Guo, G. L., Xu, J., Zhao, Y. J., et al., 2010. Effect of Salt Fluctuation on the Growth and Photosynthesis of *Hydrilla Verticillata*. *Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 19(4): 83—86 (in Chinese with English abstract).
- Guo, P., Liu, C. Y., Gibert, L., et al., 2020. How to Find High-Quality Petroleum Source Rocks in Saline Lacustrine Basins: A Case Study from the Cenozoic Qaidam Basin, NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 603—623. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.050>
- Guo, P., Liu, C. Y., Huang, L., et al., 2017. Genesis of the Late Eocene Bedded Halite in the Qaidam Basin and Its Implication for Paleoclimate in East Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 487: 364—380. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.09.023>
- Guo, P., Liu, C. Y., Wang, L. Q., et al., 2019. Mineralogy and Organic Geochemistry of the Terrestrial Lacustrine Pre-Salt Sediments in the Qaidam Basin: Implications for Good Source Rock Development. *Marine and Petroleum Geology*, 107: 149—162. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.04.029>
- Guo, Z. Q., Long, G. H., Zhou, F., et al., 2023. Geological Characteristics and Resource Evaluation Method for Shale Oil in a Salinized Lake Basin: A Case Study from the Upper Member of the Lower Ganchaigou Formation in Western Qaidam Depression. *Acta Geologica Sinica*, 97(7): 2425—2444 (in Chinese with English abstract).
- Hao, W. X., Zhou, F., Chen, G., et al., 2023. Geochemical Characteristics and Their Differential Responses to Formation Mechanisms of the Paleogene and Neogene Source Rocks in Western Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(10): 1855—1870 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. Y., Bai, B., Tao, S. Z., et al., 2022. Heterogeneous Geological Conditions and Differential Enrichment of Medium and High Maturity Continental Shale Oil in China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 224—237 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. Y., Zhao, W. Z., Hou, L. H., et al., 2020. Development Potential and Technical Strategy of Continental Shale Oil in China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 819—828 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C. G., Li, Z. Y., Ni, X. L., et al., 2017a. Origin of Salt Minerals and Oil-Gas Geological Significance of  $E_3^2$  Reservoirs in Saline Lacustrine Basin of the Yingxi Area, Qaidam Basin. *Geoscience*, 31(4): 779—790 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C. G., Chang, H. Y., Cui, J., et al., 2017b. Oligocene Sedimentary Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Model in the Western Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 38(11): 1230—1243 (in Chinese with English abstract).
- Huang, T. L., Zeng, M. Z., Qiu, X. P., 2016. Response of Water Quality of Zhoucun Reservoir during the Disappearance of Seasonal Thermal Stratification. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 10(10): 5695—5702 (in Chinese with English abstract).
- Jiménez, C., Niell, F. X., 2003. Influence of High Salinity and Nitrogen Limitation on Package Effect and C/N Ratio in *Dunaliella Viridis*. *Hydrobiologia*, 492(1): 201—206. <https://doi.org/10.1023/A:1024859819172>
- Jin, Q., Zha, M., 2000. Co-Sedimentation of Tertiary Evaporites and Oil Source Rocks in the Western Qaidam Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 35(4): 465—473 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q., Zha, M., Zhao, L., 2001. Identification of Effective Source Rocks in the Tertiary Evaporate Facies in the Western Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(1): 125—129, 135 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q., Zhu, G. Y., 2006. Progress in Research of Deposition of Oil Source Rocks in Saline Lakes and Their Hydrocarbon Generation. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 483—492 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q., Zhu, G. Y., Wang, J., 2008. Deposition and Distribution of High-Potential Source Rocks in Saline Lacustrine Environments. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 32(4): 19—23 (in Chinese with English abstract).
- Katz, B. J., 2001. Lacustrine Basin Hydrocarbon Exploration—Current Thoughts. *Journal of Paleolimnology*, 26(2):

- 161–179. <https://doi.org/10.1023/A:1011173805661>
- Kuang, L. C., Hou, L. H., Yang, Z., et al., 2021. Key Parameters and Methods of Lacustrine Shale Oil Reservoir Characterization. *Acta Petrolei Sinica*, 42(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. S., Wang, Y. B., Lu, Z. S., et al., 2014. Geobiological Process of the Formation of Paleogene Lacustrine Source Rocks. *Scientia Sinica Terrae*, 44(6): 1206–1217 (in Chinese).
- Li, G. X., 2023. Accumulation Pattern and Producibility of Yingxiongling Shale Oil, Qaidam Basin (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, G. X., Wu, K. Y., Zhu, R. K., et al., 2023a. Enrichment Model and High-Efficiency Production of Thick Plateau Mountainous Shale Oil Reservoir: A Case Study of the Yingxiongling Shale Oil Reservoir in Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 144–157 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. X., Zhang, B., Wu, K. Y., et al., 2023b. Low Organic Matter Abundance and Highly Efficient Hydrocarbon Generation of Saline Source Rock in the Qaidam Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5): 898–910 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. X., Zhu, R. K., Zhang, Y. S., et al., 2022. Geological Characteristics, Evaluation Criteria and Discovery Significance of Paleogene Yingxiongling Shale Oil in Qaidam Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(1): 18–31 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B., Zhang, M., Zhang, C. M., et al., 2008. Geochemical Characteristics of Tertiary Source Rocks in the South Area of Western Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 19(4): 519–523 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B., Zhang, M., Zhang, C. M., et al., 2010. The Characteristics of Thermal Maturity of Crude Oils from Tertiary System in the Southwestern Part of Qaidam Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 32(1): 27–32, 12 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. L., Zhang, Y. X., Zhou, Y. S., et al., 2020. Hydrocarbon Evolution Mechanism of High Quality Source Rock in Dongpu Sag. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 27(2): 143–148 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Qin, J., 2005. Comparison of Growth and Lipid Content in Three *Botryococcus Braunii* Strains. *Journal of Applied Phycology*, 17(6): 551–556. <https://doi.org/10.1007/s10811-005-9005-7>
- Li, Z. X., Gao, Y., Wang, S. Y., et al., 2021. Phytoplankton Community Response to Nutrients along Lake Salinity and Altitude Gradients on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Indicators*, 128: 107848. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107848>
- Liang, C., Jiang, Z. X., Cao, Y. C., et al., 2018. Sedimentary Characteristics and Origin of Lacustrine Organic-Rich Shales in the Salinized Eocene Dongying Depression. *GSA Bulletin*, 130(1–2): 154–174. <https://doi.org/10.1130/B31584.1>
- Liang, C., Yang, B., Cao, Y. C., et al., 2024. Salinization Mechanism of Lakes and Controls on Organic Matter Enrichment: From Present to Deep-Time Records. *Earth-Science Reviews*, 251: 104720. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104720>
- Liu, C. L., Li, H. H., Zhang, X., et al., 2016. Geochemical Characteristics of the Paleogene and Neogene Saline Lacustrine Source Rocks in the Western Qaidam Basin, Northwestern China. *Energy & Fuels*, 30(6): 4537–4549. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00269>
- Liu, H. M., Li, J. L., Liu, P., et al., 2022. Enrichment Conditions and Strategic Exploration Direction of Paleogene Shale Oil in Jiyang Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 43(12): 1717–1729 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Wang, J., Ma, X., et al., 2023. Pore Characteristics and Genesis of Shale Oil Sweet Spots in Saline Lacustrine Basins: A Case Study from the Lucaogou Formation in the Junggar Basin. *Acta Geologica Sinica*, 97(3): 864–878 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. J., 2023. A Study on Differential Enrichment of Shale Oil in Lucaogou Formation, Jimsaer Sag (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Yao, S. P., Cao, J., et al., 2023. Bio-Environmental Interactions and Associated Hydrocarbon Generation in a Saline Lake Basin: A Case Study of the Palaeogene Interval in the Dongpu Sag, Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 241: 105465. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2022.105465>
- Long, G. H., Wang, Y. Q., Zhu, C., et al., 2021. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Favorable Exploration Plays in Yingxiongling Structural Belt, Qaidam Basin. *Lithologic Reservoirs*, 33(1): 145–160 (in Chinese with English abstract).
- Lyu, B. F., Zhao, X. H., Zhou, L., et al., 2008. Cenozoic Sedimentary Migration in Qaidam Basin and Its Significance on the Dynamic Mechanism. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(4): 552–558 (in Chinese with English abstract).
- Ma, L. F., Liu, J. Z., Liu, X. Y., et al., 2015. Advances in Molecular Ecology of the Oil-Rich Microalga *Botryococcus*

- cus Braunii*. *Acta Ecologica Sinica*, 35(10): 3165—3171 (in Chinese with English abstract).
- Menzel, D. W., Ryther, J. H., 1970. Distribution and Cycling of Organic Matter in the Oceans. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, 31—53.
- Metzger, P., Largeau, C., 2005. *Botryococcus Braunii*: A Rich Source for Hydrocarbons and Related Ether Lipids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66(5): 486—496. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1779-z>
- Peng, D. H., 2004. Geology, Geochemical Characteristics and Mechanism of Hydrocarbon-Generating for Source Rocks from the Tertiary Salty Lacustrine Facies in the West Region of the Qaidam Basin (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Redden, A. M., Rukminasari, N., 2008. Effects of Increases in Salinity on Phytoplankton in the Broadwater of the Myall Lakes, NSW, Australia. *Hydrobiologia*, 608(1): 87—97. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9376-2>
- Sastri, A. R., Gauthier, J., Juneau, P., et al., 2014. Biomass and Productivity Responses of Zooplankton Communities to Experimental Thermocline Deepening. *Limnology and Oceanography*, 59(1): 1—16. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.1.0001>
- Sheng, J., Xue, S. T., Lyu, S. J., et al., 2025. Astrocycle Identification and High Sedimentation Rates Sedimentary Filling Response Characteristics in the Yingxiongling Shale of Western Qaidam Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(1): 48—63 (in Chinese with English abstract).
- Song, G. Y., Zhu, C., Li, S. M., et al., 2022. Genetic Mechanism and Development Model of Lacustrine Hybrid Carbonate Reservoirs in the Western Yingxiongling Structural Belt, Qaidam Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 46(3): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y., He, W. J., Jiang, Y. Y., et al., 2023. Enrichment Conditions and Exploration Direction of Permian Saline Lacustrine Shale Oil and Gas in Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 125—143 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. G., Zhang, D. W., Yang, S. Y., et al., 2020a. Sedimentary Characteristics and Genesis of the Salt Lake with the Upper Member of the Lower Ganchaigou Formation from Yingxi Sag, Qaidam Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 135—155. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.006>
- Wang, Q. F., Jiang, F. J., Ji, H. C., et al., 2020b. Effects of Paleosedimentary Environment on Organic Matter Enrichment in a Saline Lacustrine Rift Basin—A Case Study of Paleogene Source Rock in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195: 107658. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107658>
- Wang, J. J., Shen, J., Zhang, L., et al., 2010. Sediment-Water Nutrient Fluxes and the Effects of Oxygen in Lake Dianchi and Lake Fuxian, Yunnan Province. *Journal of Lake Sciences*, 22(5): 640—648 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. G., Zhong, N. N., Hou, D. J., et al., 1996. Study on Early Hydrocarbon Generation Mechanism of Biological Lipids in Continental Lake Basin. *Scientia Sinica Terrae*, 26(6): 518—524 (in Chinese).
- Wang, W. T., Zheng, W. J., Zhang, P. Z., et al., 2017. Expansion of the Tibetan Plateau during the Neogene. *Nature Communications*, 8: 15887. <https://doi.org/10.1038/ncomms15887>
- Warren, J. K., 1986. Shallow - Water Evaporitic Environments and Their Source Rock Potential. *Journal of Sedimentary Research*, 56(3): 442—454. <https://doi.org/10.1306/212F8940-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Warren, J. K., 2011. Evaporitic Source Rocks: Mesohaline Responses to Cycles of “Famine or Feast” in Layered Brines. *International Association of Sedimentologists Special Publication*, 43: 315—392.
- Warren, J. K., 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*. Springer, Switzerland.
- Whitfield, A. K., Elliott, M., Basset, A., et al., 2012. Paradigms in Estuarine Ecology—A Review of the Remane Diagram with a Suggested Revised Model for Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 97: 78—90. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.11.026>
- Xia, L. W., Cao, J., Xu, T. W., et al., 2017. Development Characteristics of Biologies in Saline Lake Environments and Their Implications for Hydrocarbon Source. *Geological Review*, 63(6): 1549—1562 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. W., Cao, J., Bian, L. Z., et al., 2022. Co-Evolution of Paleo-Environment and Bio-Precursors in a Permian Alkaline Lake, Mahu Mega-Oil Province, Junggar Basin: Implications for Oil Sources. *Scientia Sinica Terrae*, 52(4): 732—746 (in Chinese).
- Xia, Z. Y., Liu, Z. G., Li, S. M., et al., 2017. Origin and Developing Model of Rock Salt: A Case Study of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in the West of Yingxiong Ridge, Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*,

- 38(1): 55—66 (in Chinese with English abstract).
- Xing, H. T., Kuang, L. C., Wu, K. Y., et al., 2024. Lithofacies Characteristics and Favorable Source Rock - Reservoir Combination of Yingxiongling Shale in Qaidam Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(2): 70—82 (in Chinese with English abstract).
- Xing, L. T., 2022. Hydrocarbon Generation and Accumulation Characteristics of Tertiary Saline Lacustrine Source Rocks in the Western Qaidam Basin (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Xing, L. T., Xu, L., Zhang, P. Z., et al., 2022. Organic Geochemical Characteristics of Saline Lacustrine Source Rocks: A Case Study from the Yingxi Area, Qaidam Basin, China. *Geochemistry International*, 60(1): 92—108. <https://doi.org/10.1134/S0016702921150015>
- Xiong, Y., Tan, X. C., Wu, K. Y., et al., 2021. Petrogenesis of the Eocene Lacustrine Evaporites in the Western Qaidam Basin: Implications for Regional Tectonic and Climate Changes. *Sedimentary Geology*, 416: 105867. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2021.105867>
- Zhang, B., He, Y. Y., Chen, Y., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Oil Accumulation Significance of the High Quality Saline Lacustrine Source Rocks in the Western Qaidam Basin, NW China. *Acta Petrolei Sinica*, 38(10): 1158—1167 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., He, Y. Y., Chen, Y., et al., 2018. Formation Mechanism of Excellent Saline Lacustrine Source Rocks in Western Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 39(6): 674—685 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. J., Cao, J., Wang, Y. C., et al., 2022. Enrichment Law of Shale Oil of Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 43(9): 1253—1268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. M., Fu, Y. W., Tian, C. X., et al., 2021. Lithofacies Paleogeography and Genesis of Salt Rock in the Late Eocene of Western Qaidam Basin. *Journal of Stratigraphy*, 45(4): 545—553 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. N., Zhang, J. G., Yang, Q. Z., et al., 2016. Characteristics and Genesis of Gypsum-Salt Rocks in Western Qaidam Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 46(6): 866—876 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. Y., Song, Y. T., Wang, G. L., et al., 2005. Chemical Composition Characteristics of Organic Matter in Lacustrine Source Rocks in Jiyang Depression and Its Petroleum Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 50(21): 2392—2402 (in Chinese).
- Zhang, M. Z., Dai, S., Pan, S. Q., et al., 2023. Deciphering the Laminated Botryococcus - Dominated Shales in Saline Lacustrine Basin, Western Qaidam Basin, NW China: Implications for Shale Oil Potential. *Marine and Petroleum Geology*, 155: 106397. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106397>
- Zhang, R., Jin, Z. J., Zhu, R. K., et al., 2023. Investigation of Deposition Rate of Terrestrial Organic-Rich Shales in China and Its Implications for Shale Oil Exploration. *Oil & Gas Geology*, 44(4): 829—845 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. M., Zhang, X. J., Wang, J. G., et al., 2022. Characteristics and Their Controlling Factors of Mixed Sediments in Saline Lakes: A Case Study of Lower Ganchaigou Formation in the Western Qaidam Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(1): 160—173 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. D., Sun, Y. G., Xie, L. J., et al., 2011. Detection of High-Branched Isoprenoid Hydrocarbon (C<sub>25</sub>HBI) in Cenozoic Salt Lake Facies Source Rocks in Western Qaidam Basin and Its Geological and Geochemical Significance. *Chinese Science Bulletin*, 56(13): 1032—1041 (in Chinese).
- Zhang, Y. L., Xi, B. D., Xu, Q. J., 2011. Research on the Possibility of Using Salinity as Entrophication Criteria Indicator of Saline Lakes. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 1(3): 260—263 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. S., Li, J. M., Liu, J. C., et al., 2022. Thermochemical Sulfate Reduction(TSR) and Reservoir Reformation of the Upper Paleogene Xiaganchaigou Formation in Yingxi Area, Qaidam Basin. *Lithologic Reservoirs*, 34(3): 66—74 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. Z., Bian, C. S., Pu, X. G., et al., 2023. Enrichment and Flow Characteristics of Shale Oil in Typical Salinized Lake Basins in China and Its Significance for “Sweet Spot” Evaluation. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 47(5): 25—37 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Bai, B., Liu, C., et al., 2024. Current Status, Advances, and Prospects of CNPC’ S Exploration of Onshore Moderately to Highly Mature Shale Oil Reservoirs. *Oil & Gas Geology*, 45(2): 327—340 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, F. Y., Peng, D. H., Bian, L. Z., et al., 2002. Progress in the Organic Matter Study of Immature Oils in the Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 107—113, 147 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. X., Luo, W. L., Da, J., et al., 2022. Spatial Dis-

- tribution of Bacterioplankton Community Composition and Their Diversity in Lake Fuxian during Thermal Stratification Period. *Journal of Lake Sciences*, 34(5): 1642—1655 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, C., Liu, Z. G., Song, G. Y., et al., 2022. Sedimentary Model, Evolution and Distribution of Paleogene Lacustrine Carbonate Rocks in Yingxiogling Structural Belt, Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 43(11): 1558—1567 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Wang, X. L., Zhang, M. Z., et al., 2024. Sedimentary Environments and Lithofacies Characteristics of Fine-Grained Sediments in Typical Continental Basins in China. *Oil & Gas Geology*, 45(4): 873—892 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Pan, S. Q., Jing, Z. H., et al., 2020. Shale Oil and Gas Revolution and Its Impact. *Acta Petrolei Sinica*, 41(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 陈致林, 李素娟, 周光甲, 1992. 现代葡萄藻热解生成的油气和生物标志物特征. *陆相石油地质*, (1): 48—53.
- 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等, 2019. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景. *中国石油勘探*, 24(5): 560—568.
- 范成新, 相崎守弘, 1997. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物—水界面氮磷交换的影响. *湖泊科学*, 9(4): 337—342.
- 郭赣林, 徐静, 赵艳景, 等, 2010. 盐度变化对黑藻生长和光合作用的影响. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 19(4): 83—86.
- 郭泽清, 龙国徽, 周飞, 等, 2023. 咸化湖盆页岩油地质特征及资源潜力评价方法——以柴西坳陷下干柴沟组上段为例. *地质学报*, 97(7): 2425—2444.
- 郝万鑫, 周飞, 陈果, 等, 2023. 柴达木盆地西部地区古近系——新近系烃源岩地球化学特征及其对形成机制的差异性响应. *天然气地球科学*, 34(10): 1855—1870.
- 胡素云, 白斌, 陶士振, 等, 2022. 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. *石油勘探与开发*, 49(2): 224—237.
- 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等, 2020. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策. *石油勘探与开发*, 47(4): 819—828.
- 黄成刚, 李智勇, 倪祥龙, 等, 2017a. 柴达木盆地英西地区 E<sub>3</sub><sup>2</sup> 盐类矿物成因及油气地质意义. *现代地质*, 31(4): 779—790.
- 黄成刚, 常海燕, 崔俊, 等, 2017b. 柴达木盆地西部地区渐新世沉积特征与油气成藏模式. *石油学报*, 38(11): 1230—1243.
- 黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏, 2016. 周村水库季节性热分层消亡期水质响应特性. *环境工程学报*, 10(10): 5695—5702.
- 金强, 查明, 2000. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩与生油岩共生沉积作用研究. *地质科学*, 35(4): 465—473.
- 金强, 查明, 赵磊, 2001. 柴达木盆地西部第三系盐湖相有效生油岩的识别. *沉积学报*, 19(1): 125—129, 135.
- 金强, 朱光有, 2006. 中国中生代咸化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展. *高校地质学报*, 12(4): 483—492.
- 金强, 朱光有, 王娟, 2008. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 32(4): 19—23.
- 匡立春, 侯连华, 杨智, 等, 2021. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法. *石油学报*, 42(1): 1—14.
- 李国山, 王永标, 卢宗盛, 等, 2014. 古近纪湖相烃源岩形成的地球生物学过程. *中国科学:地球科学*, 44(6): 1206—1217.
- 李国欣, 2023. 柴达木盆地英雄岭页岩油富集机制与可动性研究(博士学位论文). 北京: 中国石油大学.
- 李国欣, 伍坤宇, 朱如凯, 等, 2023a. 巨厚高原山地式页岩油藏的富集模式与高效动用方式——以柴达木盆地英雄岭页岩油藏为例. *石油学报*, 44(1): 144—157.
- 李国欣, 张斌, 伍坤宇, 等, 2023b. 柴达木盆地咸化湖盆低有机质丰度烃源岩高效生烃模式. *石油勘探与开发*, 50(5): 898—910.
- 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等, 2022. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义. *石油勘探与开发*, 49(1): 18—31.
- 李洪波, 张敏, 张春明, 等, 2008. 柴达木盆地西部南区第三系烃源岩地球化学特征. *天然气地球科学*, 19(4): 519—523.
- 李洪波, 张敏, 张春明, 等, 2010. 柴达木盆地西部南区第三系原油成熟度特征. *石油天然气学报*, 32(1): 27—32, 12.
- 李红磊, 张云献, 周勇水, 等, 2020. 东濮凹陷优质烃源岩生烃演化机理. *断块油气田*, 27(2): 143—148.
- 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 等, 2022. 济阳坳陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向. *石油学报*, 43(12): 1717—1729.
- 刘金, 王剑, 马啸, 等, 2023. 陆相咸化湖盆页岩油甜点孔隙特征与成因——以准噶尔盆地芦苇沟组为例. *地质学报*, 97(3): 864—878.
- 刘诗局, 2023. 吉木萨尔凹陷芦苇沟组页岩油差异性富集机理(博士学位论文). 北京: 中国石油大学.
- 龙国徽, 王艳清, 朱超, 等, 2021. 柴达木盆地英雄岭构造带油气成藏条件与有利勘探区带. *岩性油气藏*, 33(1): 145—160.
- 吕宝凤, 赵小花, 周莉, 等, 2008. 柴达木盆地新生代沉积转移及其动力学意义. *沉积学报*, 26(4): 552—558.
- 马丽芳, 刘俊稚, 刘新颖, 等, 2015. 富油微藻布朗葡萄藻分子生态学研究进展. *生态学报*, 35(10): 3165—3171.
- 彭德华, 2004. 柴达木盆地西部第三系咸化湖泊烃源岩地质地球化学特征与生烃机理(博士学位论文). 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 盛军, 薛世团, 吕思锦, 等, 2025. 柴达木盆地西部英雄岭页岩天文旋回识别与高沉积速率下的沉积充填响应特

- 征. 地质科技通报, 44(1): 48—63.
- 宋光永, 朱超, 李森明, 等, 2022. 柴达木盆地英西地区湖相混积型碳酸盐岩储层成因及发育模式. 中国石油大学学报(自然科学版), 46(3): 1—12.
- 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 等, 2023. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相页岩油气富集条件与勘探方向. 石油学报, 44(1): 125—143.
- 王建军, 沈吉, 张路, 等, 2010. 云南滇池和抚仙湖沉积物—水界面营养盐通量及氧气对其的影响. 湖泊科学, 22(5): 640—648.
- 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等, 1996. 陆相湖盆生物类脂物早期生烃机制研究. 中国科学: 地球科学, 26(6): 518—524.
- 夏刘文, 曹剑, 边立曾, 等, 2022. 准噶尔盆地玛湖大油区二叠纪碱湖生物—环境协同演化及油源差异性. 中国科学: 地球科学, 52(4): 732—746.
- 夏刘文, 曹剑, 徐田武, 等, 2017. 盐湖生物发育特征及其烃源意义. 地质论评, 63(6): 1549—1562.
- 夏志远, 刘占国, 李森明, 等, 2017. 岩盐成因与发育模式——以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例. 石油学报, 38(1): 55—66.
- 邢浩婷, 匡立春, 伍坤宇, 等, 2024. 柴达木盆地英雄岭页岩岩相特征及有利源储组合. 中国石油勘探, 29(2): 70—82.
- 邢蓝田, 2022. 柴达木盆地西部第三系咸化湖盆烃源岩的生烃及成藏特征(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 张斌, 何媛媛, 陈琰, 等, 2017. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩地球化学特征及成藏意义. 石油学报, 38(10): 1158—1167.
- 张斌, 何媛媛, 陈琰, 等, 2018. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩形成机理. 石油学报, 39(6): 674—685.
- 张宸嘉, 曹剑, 王俞策, 等, 2022. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油富集规律. 石油学报, 43(9): 1253—1268.
- 张金明, 付彦文, 田成秀, 等, 2021. 柴达木盆地西部始新世晚期岩相古地理特征及盐岩成因. 地层学杂志, 45(4): 545—553.
- 张津宁, 张金功, 杨乾政, 等, 2016. 柴达木盆地西部膏盐岩发育特征与成因分析. 西北大学学报(自然科学版), 46(6): 866—876.
- 张林晔, 宋一涛, 王广利, 等, 2005. 济阳坳陷湖相烃源岩有机质化学组成特征及其石油地质意义. 科学通报, 50(21): 2392—2402.
- 张瑞, 金之钧, 朱如凯, 等, 2023. 中国陆相富含有机质页岩沉积速率研究及其页岩油勘探意义. 石油与天然气地质, 44(4): 829—845.
- 张世铭, 张小军, 王建功, 等, 2022. 咸化湖盆混合沉积特征及控制因素分析——以柴达木盆地西部地区古近系下干柴沟组为例. 中国矿业大学学报, 51(1): 160—173.
- 张永东, 孙永革, 谢柳娟, 等, 2011. 柴达木盆地西部新生代盐湖相烃源岩中高支链类异戊二烯烃( $C_{25}$ HBI)的检出及其地质地球化学意义. 科学通报, 56(13): 1032—1041.
- 张亚丽, 席北斗, 许秋瑾, 2011. 盐度作为咸水湖富营养化基准指标的可能性初探. 环境工程技术学报, 1(3): 260—263.
- 赵思思, 李建明, 柳金城, 等, 2022. 柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组上段 TSR 与储层改造. 岩性油气藏, 34(3): 66—74.
- 赵文智, 卞从胜, 蒲秀刚, 等, 2023. 中国典型咸化湖盆页岩油富集与流动特征及在“甜点”评价中的意义. 中国石油大学学报(自然科学版), 47(5): 25—37.
- 赵喆, 白斌, 刘畅, 等, 2024. 中国石油陆上中—高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考. 石油与天然气地质, 45(2): 327—340.
- 周凤英, 彭德华, 边立增, 等, 2002. 柴达木盆地未熟—低熟石油的生烃母质研究新进展. 地质学报, 76(1): 107—113, 147.
- 周天旭, 罗文磊, 笪俊, 等, 2022. 抚仙湖垂直分层期间水体细菌群落结构组成及多样性的空间分布. 湖泊科学, 34(5): 1642—1655.
- 朱超, 刘占国, 宋光永, 等, 2022. 柴达木盆地英雄岭构造带古近系湖相碳酸盐岩沉积模式、演化与分布. 石油学报, 43(11): 1558—1567.
- 朱筱敏, 王晓琳, 张美洲, 等, 2024. 中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征. 石油与天然气地质, 45(4): 873—892.
- 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等, 2020. 页岩油气革命及影响. 石油学报, 41(1): 1—12.