

陆相页岩成因与优质储集层形成机制^{*}闫瑞升¹ 张建国² 钟 骑² 姜在兴² 李品谐²
李军亮³ 白云风⁴ 王智忠⁵

1 中国石油辽河油田分公司欢喜岭采油厂, 辽宁盘锦 124114

2 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

3 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015

4 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712

5 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000

摘 要 中国页岩油主要赋存于陆相盆地, 已在数个陆相盆地取得了页岩油勘探开发突破。勘探实践表明, 不同湖盆页岩矿物组分、沉积构造、岩石类型差异巨大, 说明其成因机制具有多样性, 但目前对其多样化成因还缺乏系统研究。本研究通过系统梳理中国主要盆地陆相页岩成因机制, 发现页岩中的硅质、钙质、云质、“蒸发”矿物等均具有多种成因机制。其中, 陆相页岩的重要硅质来源包括陆源输入、湖盆生物、黏土矿物转化、火山物质蚀变等; 方解石矿物的形成机制包括化学沉淀、生物诱导沉淀、钙质生物残骸、陆源输入、重结晶作用等; 微生物沉淀、热液驱动和埋藏转化是陆相页岩层系内白云石的最主要形成机制; 大量页岩层系内的“蒸发”矿物常缺乏蒸发序列, 且与深水富有机质页岩共生, 指示其非蒸发成因。陆相页岩成因机制多样性驱动形成十余类优质储集层, 按其储集层质量形成的主控因素, 可归类为沉积主控型、成岩改造型、沉积—成岩复合型。盆地内不同部位和层位的沉积—成岩作用差异性导致优质储集层类型时空多变, 使一个湖盆内表现为多类型优质储集层共生的特征。

关键词 陆相页岩 形成机制 多样性 页岩油 储集层

第一作者简介 闫瑞升, 男, 1972 年生, 高级工程师, 主要从事油气勘探开发科研与管理工, E-mail: yanruisheng@petroChina.com.cn。

通讯作者简介 张建国, 男, 1989 年生, 博士、副教授、博士生导师, 主要从事含油气细粒沉积学及页岩储集层的研究工作。E-mail: zhjianguo@cugb.edu.cn。

中图分类号: TE121; P618.130.2 **文献标志码**: A

Genesis of continental shales and formation
mechanisms of high-quality reservoirsYAN Ruisheng¹ ZHANG Jianguo² ZHONG Qi² JIANG Zaixing²
LI Pinxie² LI Junliang³ BAI Yunfeng⁴ WANG Zhizhong⁵

1 Huanxiling Oil Production Plant, CNPC Liaohe Oilfield Company, Liaoning Panjin 124114, China

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

3 Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257015, China

^{*} 国家重点研发计划项目(编号: 2023YFF0804302)资助。[Financially supported by the National Key R & D Program of China (Grant No. 2023YFF0804302)]

收稿日期: 2025-10-04 改回日期: 2025-11-11

4 Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company, Heilongjiang Daqing 163712, China

5 Exploration and Development Research Institute, CNPC Xinjiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834000, China

Abstract Shale oil resources in China are predominantly hosted in continental sedimentary basins, where recent exploration and development efforts have yielded substantial breakthroughs. Field-based observations reveal pronounced heterogeneity in mineralogical composition, sedimentary architecture, and lithofacies distribution across continental shale successions—reflecting fundamentally diverse genetic origins. Nevertheless, a comprehensive, basin-scale synthesis of these genetic mechanisms remains limited. This study presents a systematic review and integration of the provenance and formation processes governing continental shales in China’s major petroliferous basins. Our analysis demonstrates that key authigenic minerals—including siliceous, calcareous, dolomitic, and so-called “evaporitic” phases—exhibit polygenetic origins. Silica is supplied through multiple pathways: detrital input from source terrains, biogenic precipitation (e.g., diatomaceous and radiolarian opal), clay mineral diagenesis (e.g., smectite-to-illite transformation), and volcanic ash alteration. Calcite precipitates via diverse mechanisms: inorganic chemical precipitation from supersaturated pore waters, microbially mediated or biologically induced crystallization, incorporation of bioclastic debris (e.g., ostracod and charophyte fragments), detrital carbonate influx, and post-depositional recrystallization. Dolomite formation is primarily controlled by microbial mediation (e.g., sulfate-reducing bacteria), hydrothermal fluid interaction, and burial-related solid-state transformation. Notably, many minerals historically labeled “evaporitic” (e.g., gypsum, anhydrite, halite pseudomorphs) occur in the absence of diagnostic evaporite stratigraphy and commonly co-occur with deep-lake, organic-rich shale intervals—strongly indicating non-evaporitic, often diagenetically driven, origins. This multiplicity of mineral-forming processes underpins the development of over ten distinct high-quality reservoir types, which are systematically classified into three end-member categories based on dominant quality-controlling processes: (1) sedimentation-dominated reservoirs, (2) diagenesis-modified reservoirs, and (3) mixed sedimentation-diagenesis reservoirs. Furthermore, spatial and temporal variations in depositional systems (e.g., lake level fluctuations, provenance shifts) and diagenetic histories (e.g., timing and intensity of silica/carbonate cementation, organic acid leaching) lead to pronounced spatiotemporal heterogeneity in reservoir type distribution—even within individual lacustrine basins—frequently resulting in vertical and lateral coexistence of multiple reservoir types.

Key words continental shales, formation mechanism, diversity, shale oil, reservoir

About the first author YAN Ruisheng, born in 1972, a senior engineer, is mainly engaged in scientific research and management of oil and gas exploration and development. E-mail: yanruisheng@petroChina.com.cn.

About the corresponding author ZHANG Jianguo, born in 1989, Ph.D., an associate professor, is mainly engaged in research on oil and gas-bearing fine-grained sedimentology and shale reservoirs. E-mail: zhjianguo@cugb.edu.cn.

0 引言

近年来,页岩油气已成为中国油气增储上产的重点领域。页岩气勘探开发集中于中国西南部四川盆地及周缘地区的海相地层(胡宗全等, 2025),

2024 年产量超过 250 亿方。页岩油主要赋存于陆相地层,且分布于中国各地的多个盆地(图 1),已在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷(惠克来等, 2023; 支东明等, 2025)和玛湖凹陷二叠系(支东明等,

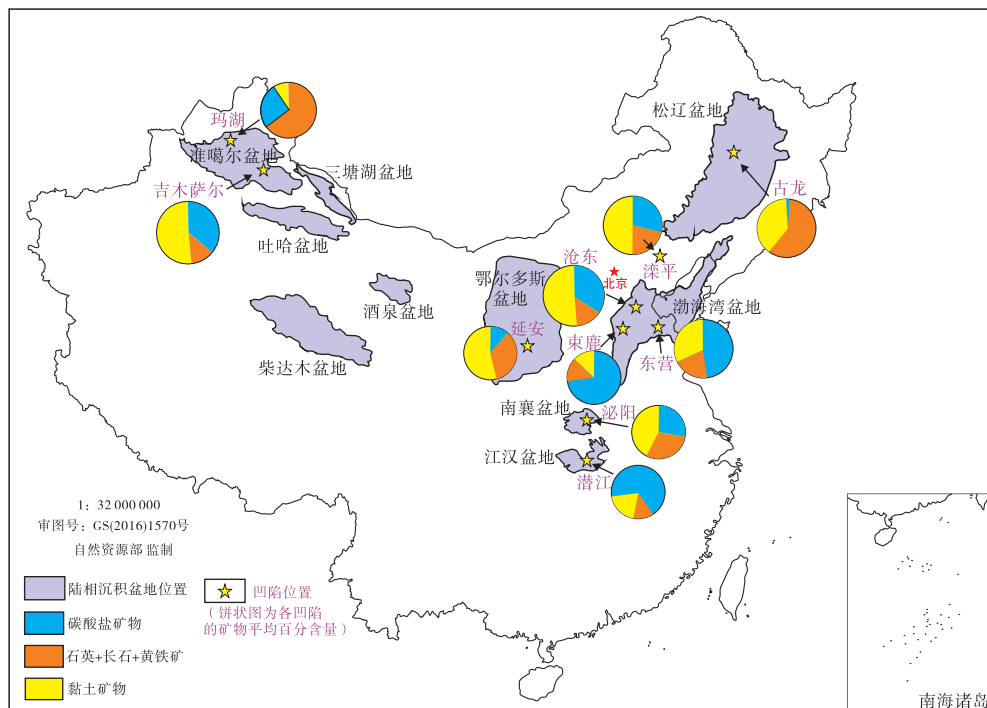


图 1 中国主要陆相页岩油盆地位置及矿物组分含量 (据姜在兴等, 2021; 有修改)

Fig. 1 Locations and mineral composition contents of major continental shale oil basins in China
(modified from Jiang *et al.*, 2021)

2024)、渤海湾盆地济阳拗陷 (刘惠民等, 2023a; 李军亮等, 2025) 和沧东凹陷古近系 (赵贤正等, 2022; 蒲秀刚等, 2024)、鄂尔多斯盆地三叠系 (胡宗全等, 2023; 赵文智等, 2023)、松辽盆地古龙凹陷白垩系 (庞小娇等, 2023; 孙龙德等, 2024) 等实现工业化突破, 并建成页岩油产能。2024 年中国页岩油产量首次突破 600 万吨 (贾承造等, 2024), 呈现良好的增长态势。

海相页岩气的优质储集层类型相对单一, 富有机质—高硅层段是主要的优质储集层类型, 其在盆地内的分布也相对稳定。美国二叠盆地 (Scanlon *et al.*, 2017)、福特沃兹盆地 Barnett 页岩 (Jarvie *et al.*, 2007) 及中国四川盆地五峰—龙马溪组页岩 (李勇等, 2026) 等的主力产层均表现为上述规律。近年针对中国不同陆相盆地页岩油的勘探开发实践表明, 不同湖盆甚至相同湖盆不同部位的页岩矿物组分、沉积构造、岩石类型差异巨大 (图 1), 说明陆相页岩的优质储集层成因具有多样性。

在上述成因多样性背景下, 目前针对陆相页岩多类型矿物组分形成机制的系统梳理还十分匮

乏, 导致不同盆地优质储集层差异形成机制认识薄弱, 进而制约了全面揭示陆相页岩油甜点形成机制。本研究利用中国主要陆相页岩储集层资料, 系统梳理陆相页岩的多样性成因, 并归纳优质储集层形成机制, 助力陆相页岩油勘探开发进一步突破。

1 陆相页岩矿物来源多样性

中国陆相页岩矿物组分多样, 不同湖盆矿物组分差异极大 (图 1)。例如, 渤海湾盆地古近系沙河街组富含方解石及白云石 (平均 ~50%); 松辽盆地青山口组及鄂尔多斯盆地延长组页岩富含黏土 (平均 ~40%) 及长英质 (平均 ~40%); 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩的长英质矿物含量极高 (平均 ~80%), 并在部分层段集中发育碱性矿物; 江汉盆地潜江凹陷古近系页岩的盐类矿物十分发育, 垂向上形成了 193 个盐韵律层 (李乐等, 2019)。

各盆地陆相页岩不仅表现为矿物组分多样性, 各矿物也具有多种来源和成因机制 (操应长等,

2023)。下面对不同矿物的来源和成因机制进行详细阐述。

1.1 硅质矿物

硅质矿物是陆相页岩最主要的矿物类型之一,各陆相盆地的硅质矿物平均含量分布于 30% 至 80% 之间(白斌等, 2022)。硅质矿物类型多样,包括陆源硅(碎屑石英)、生物硅(硅藻)、黏土矿物成岩硅、火山石英及其蚀变硅等多种类型(梁兴等, 2025; 杜安业等, 2026)。

1.1.1 陆源硅

陆源石英是陆相页岩内最为熟知的石英类型,为母岩物质经物理—化学风化形成(魏晓亮等, 2025)。由于各类型母岩在风化后都能产生大量石英颗粒(梅俊芳等, 2024),因此在中国多数陆相页岩内,陆源石英均是重要的石英类型,占总石英含量的一半以上。页岩内的陆源石英具有鲜明的鉴别特征,在薄片及电镜下一般呈棱角一次棱角状,在阴极发光下显示出高温石英的紫色或褐色荧光(图 2-A, 2-B, 2-C)。

1.1.2 生物硅

页岩内的生物硅是硅藻死亡沉淀后的硅质骨骼残骸(梁兴等, 2025)。硅藻勃发一般与水体富营养化有关;水体富营养化导致有机藻勃发,为生物硅提供了充足的食物,进而导致生物硅勃发。例如,云南昆明滇池的富营养化即诱导了生物硅勃发,导致滇池淤泥的生物硅含量达 30% 以上(吴峰伟等, 2009)。因此,富硅藻页岩一般富含有机质。

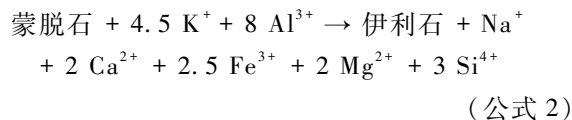
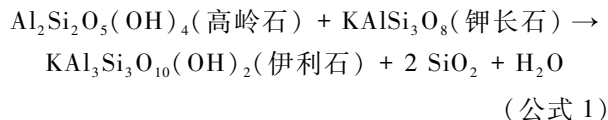
生物硅在显微镜及电镜下可呈现多种形态(与硅藻种属有关),以圆形居多,薄片下为多晶形态,在薄片或电镜下可见生物结构,阴极发光呈不发光或发微弱荧光(图 2-D, 2-E)。生物硅内部具有多孔结构,且生物硅为刚性颗粒、抗压能力强,导致硅藻页岩相对疏松多孔(姜广明等, 2025)。硅藻页岩的孔隙度理论上可达 20% ~ 30% 以上,岩石密度低至 2000 kg/m^3 (姜广明等, 2021)。生物体腔微孔与硅藻间的粒间孔共同构成了网格状油气储集空间和运移通道。

由于含生物硅的页岩通常富含有机质,且具有高孔渗性、高脆性的特点,是潜在的优质页岩油气储集层。例如,古龙凹陷青山口组页岩产油层段内,发现含有一定量的生物硅,有效提升了储集层

质量(张建国等, 2022)。

1.1.3 黏土矿物成岩硅

黏土矿物成岩转化也是形成硅质矿物的重要途径(梅俊芳等, 2024)。黏土矿物包括高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石及相应的混层矿物(宋金民等, 2024)。其中,蒙脱石和高岭石在成岩作用阶段均会逐渐转化成伊利石,并在转化过程中析出 SiO_2 或 Si^{4+} (公式 1、2)(姜在兴和陈代钊, 2022),进而在孔隙空间内重结晶形成成岩硅。黏土矿物成岩硅的粒径一般数微米、自形晶,电镜下集中或分散分布(图 2-G, 2-H, 2-I),阴极发光观察不发光或显示微弱荧光。

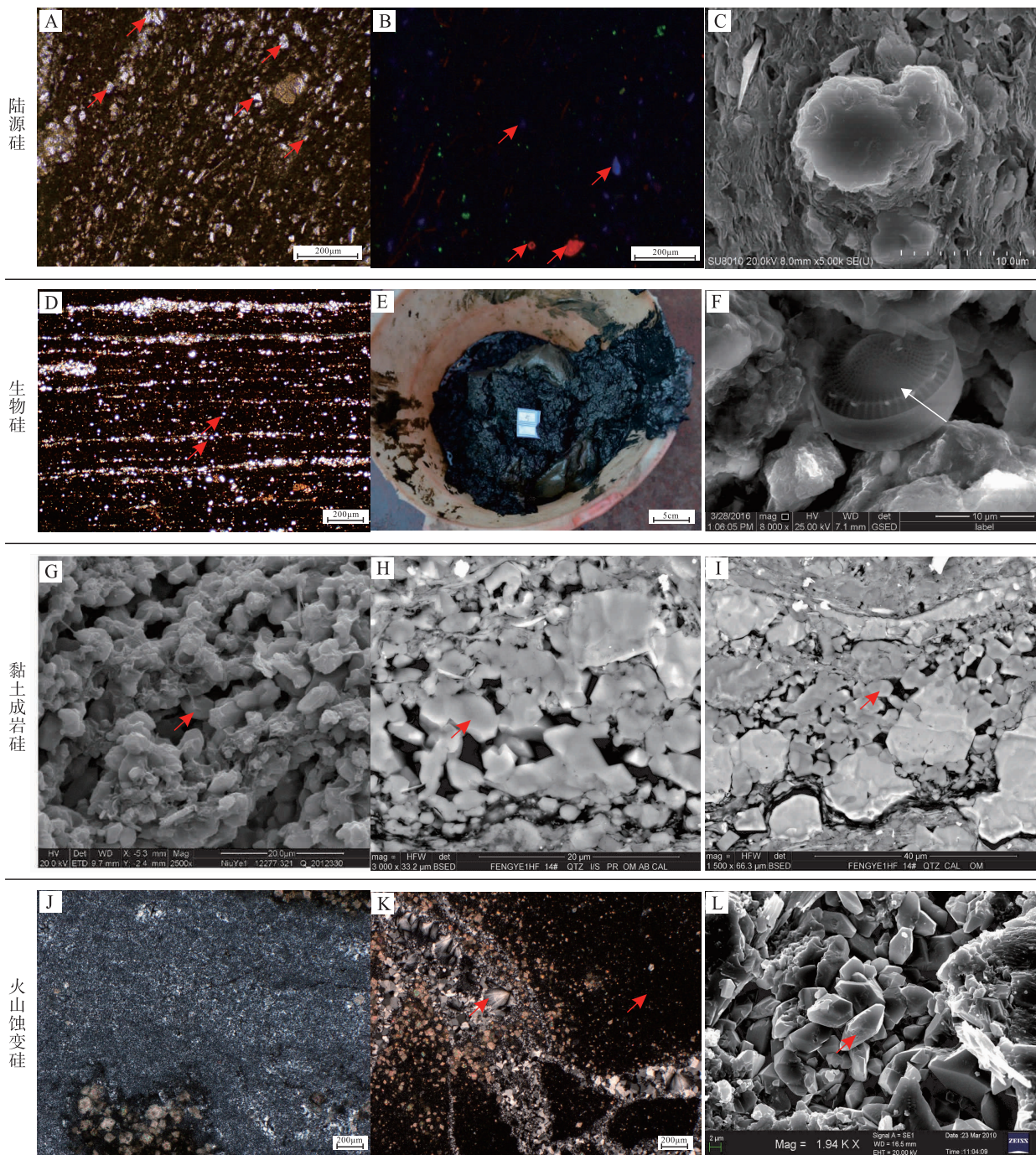


蒙脱石及高岭石在成岩作用过程中向伊利石转化是必然规律,一般在有机质中—高成熟阶段全部转化为伊利石及伴生矿物。例如,古龙凹陷青山口组页岩(何文渊等, 2024)及东营凹陷陡坡带沙四上亚段页岩(表 1)的蒙脱石和高岭石接近零,伊利石占黏土矿物 90% 以上,说明黏土蒙脱石和高岭石已彻底转化,并在扫描电镜下可观察到大量自形的微米级成岩硅(图 2-H, 2-I),在部分层段可占总硅含量的 1/3 左右。

由于蒙脱石是水敏矿物,黏土矿物转化及成岩硅的形成在客观上降低了岩石水敏并提高了脆性,有利于水力压裂(魏晓亮等, 2025)。成岩硅刚性强,在其晶粒间形成大量微米级晶间孔(图 2-H, 2-I),提高了储集性,因此成岩硅的形成有利于提高甜点质量。例如,东营凹陷陡坡带富成岩硅页岩段表现出了优越的生产能力(刘惠民等, 2023b)。

1.1.4 火山石英及其蚀变硅

火山凝灰物质内也含有大量的硅质矿物。硅质矿物是晶屑和玻屑的重要矿物成分,呈不规则裂纹及港湾状,或鸡骨状、月牙形等(徐文强等, 1989)。中国鄂尔多斯盆地延长组、准噶尔盆地风城组等页岩层系内均含大量火山凝灰成因的硅质矿物。



A—松辽盆地古龙凹陷青山口组古页 1 井, 2531.2 m, 单偏光, 棱角状分布陆源碎屑石英偏光显微镜特征 (部分碎屑石英见箭头所示); B—A 图样品的阴极发光照片, 大量石英发褐色或蓝色光; C—A 图样品的电镜照片, 石英表面见明显的碰撞痕迹; D—松辽盆地古龙凹陷青山口组古页 1 井, 2569.90 m, 正交光, 含硅藻页岩, 硅藻大小均匀 ($10\sim 20\ \mu\text{m}$)、磨圆好; E—云南省滇池底部淤泥; F—E 图淤泥中的硅藻, 为星肋小环藻, 扫描电镜; G—渤海湾盆地济阳凹陷牛页 1 井沙四上亚段, 3380.54 m, 黏土成岩作用形成的自形微晶石英, 发育大量微米级晶间孔, 扫描电镜; H—渤海湾盆地济阳凹陷丰页 1 井沙四上亚段, 3575.10 m, 成岩微晶石英 (箭头处), 发育大量微米级晶间孔, 氩离子抛光扫描电镜; I—渤海湾盆地济阳凹陷丰页 1 井沙四上亚段, 3624.33 m, 特征同 H; J—准噶尔盆地玛湖凹陷玛页 1 井风城组, 4593.0 m, 正交光, 隐晶质硅质矿物; K—准噶尔盆地玛湖凹陷玛页 1 井风城组, 4650.0 m, 正交光, 放射状及隐晶质 (箭头处) 的硅质矿物; L—I 图样品对应的扫描电镜照片, 自形石英, 粒径数微米

图 2 中国陆相页岩的硅质矿物典型特征

Fig. 2 Typical characteristics of siliceous minerals in continental shale, China

表 1 渤海湾盆地东营凹陷义页 1-1 井沙四上亚段黏土矿物 X 衍射数据

Table 1 X-ray diffraction data of clay minerals from Well Y1-1 in the Upper Submember of Member 4 of Shahejie Formation in Dongying sag, Bohai Bay Basin

编号	深度/m	黏土矿物组分相对含量/%					白云石/%
		伊/蒙间层	伊利石	高岭石	绿泥石	绿/蒙间层	
1	4604.90	5	94	0	1	0	4
2	4606.15	0	100	0	0	0	10
3	4607.25	0	100	0	0	0	5
4	4608.15	17	83	0	0	0	21
5	4609.30	0	100	0	0	0	9
6	4610.25	6	94	0	0	0	12
7	4611.30	7	93	0	0	0	11
8	4611.95	4	96	0	0	0	8
9	4613.30	5	100	0	0	0	12
10	4614.25	0	100	0	0	0	6

此外，火山凝灰物质在成岩蚀变过程中也会形成成岩硅，进而新生成石英矿物或导致石英晶形、晶格变化（王俊怀等，2014）。例如，火山玻璃在地温 40℃ 左右会部分成岩演化形成石英；斜发沸石内的硅离子在地温 70~80℃ 阶段析出形成石英；片沸石在高成熟阶段也可析出硅离子形成石英（朱世发等，2014）。中国西部中生界陆相盆地的火山蚀变硅较发育。例如，玛湖凹陷风城组页岩的硅质矿物含量可达 80%，黏土矿物含量极低（平均~5%），镜下以玻璃质为主、少量呈放射状，并在电镜下呈现自形特征（图 2-J 至 2-L），指示其为火山凝灰物质蚀变形成的成岩硅。

1.2 方解石

1.2.1 化学沉淀方解石

化学沉淀方解石是较早被学界注意到的方解石成因类型（王建功等，2023），水介质的离子浓度和温度会影响方解石溶解—沉淀（杜佰松等，2023）。由于日照量、降水等环境因素的变化，会导致水介质温度及钙离子、碳酸根离子浓度的变化，进而影响方解石的溶解和沉淀（马诚佑等，2023）。咸化湖盆水体的离子浓度高，更利于形成化学沉淀方解石。

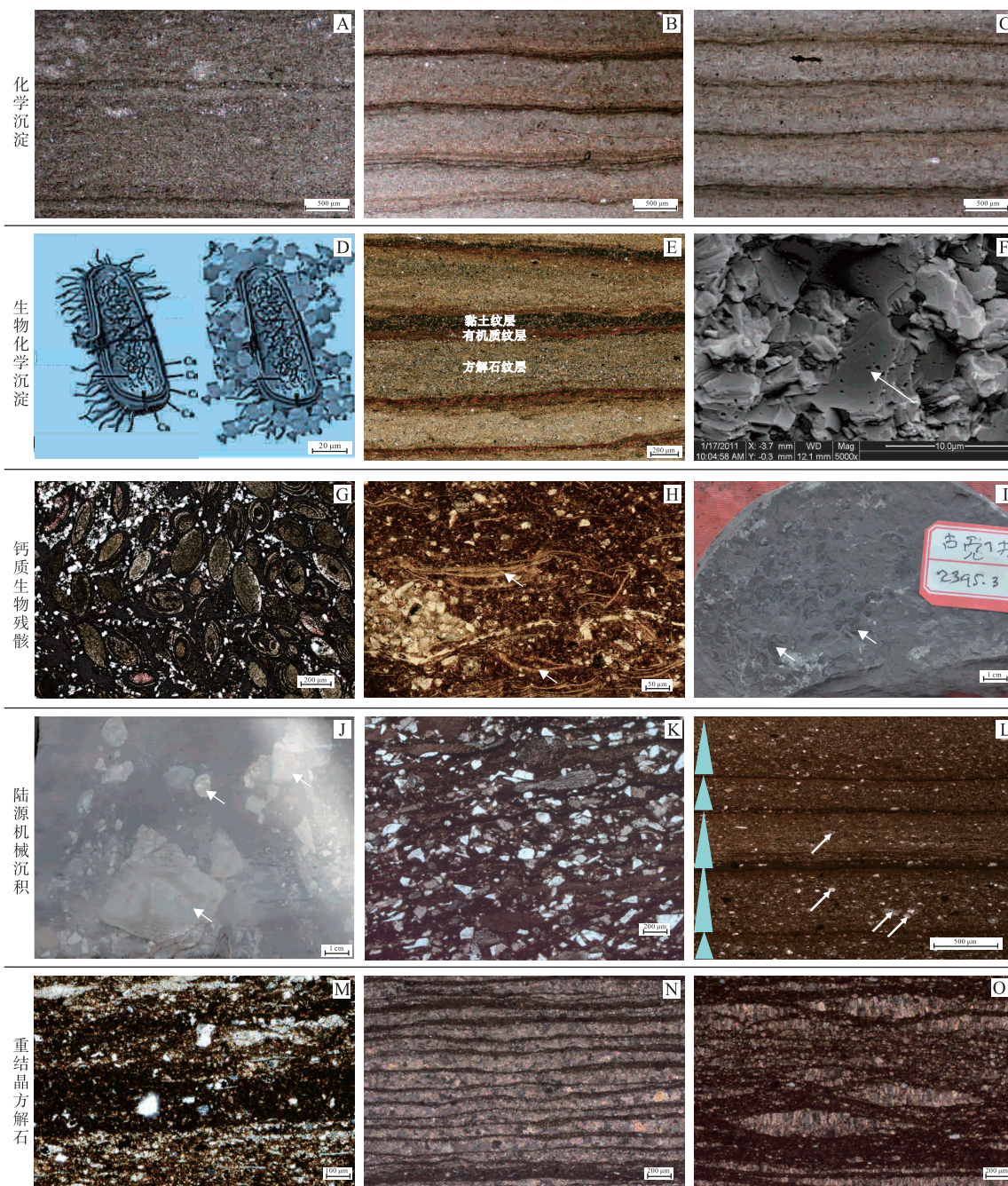
化学沉淀方解石的晶粒大小均匀，一般为数微米，晶体自形程度高，且晶体间少见其他杂质（图 3-A，3-B，3-C）。由于水介质的年际变化会影响方解石的化学沉淀—溶解，因此化学沉淀方解

石多组成纹层结构（图 3-A，3-B，3-C）。化学沉淀方解石为典型的无机成因，其有机质含量一般较低。在沾化凹陷沙三下亚段南坡湖盆咸化阶段的页岩层系内，发育以化学沉淀方解石为主（平均矿物含量~75%）的数十米厚页岩（张建国等，2021），其有机质平均含量仅 1%，远低于该凹陷其他非化学成因方解石层段的有机质含量（平均~4%）。

1.2.2 生物化学沉淀方解石

20 世纪 80 年代，学者发现湖泊水体中的 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 在过饱和条件下并不一定导致方解石沉淀，而需要有微生物的参与才会形成方解石沉淀（吴霞等，2024）。微生物的细胞壁和胞外聚合物为方解石晶体附着提供电荷点、降低方解石沉淀所需的能量，进而通过粘结、吸附等方式形成方解石晶体并沉淀（贺海燕等，2025），即“过饱和是前提、微生物是媒介”。此外，湖泊微生物的新陈代谢活动改变水体介质特征，进而导致方解石沉淀，也属于生物化学沉淀方解石的范畴（钱一雄等，2023）。

生物化学方解石晶粒一般数微米、自形程度高。其表面可能具有微孔，为藻丝体粘结、吸附的痕迹。垂向上生物化学方解石纹层与有机质纹层可韵律性互层。以生物化学方解石为主的页岩通常富含有机质，且方解石为脆性矿物，导致岩石脆性较高；该类岩石有可能形成优质页岩甜点（何海龙等，2025）。例如，在东营凹陷沙四上一沙三下生



A~C—渤海湾盆地东营凹陷樊页 1 井沙三下亚段，化学沉淀纹层状方解石，单偏光，A~C 深度分别为 3089.1 m、3168.03 m、3168.99 m；D—微生物吸附，诱导方解石沉淀模式；E—渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井沙三下亚段，3055.20 m，单偏光，三端元纹层，自下而上依次为方解石（亮色）、有机质（棕色）、黏土矿物纹层（黑灰色）；F—渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井，沙三下亚段 3116.6 m，方解石纹层内的晶体形态，方解石表面见小孔，扫描电镜；G—松辽盆地古龙凹陷古页 1 井，青山口组 2519.41 m，微生物残骸；H—松辽盆地古龙凹陷古页 1 井，青山口组 2524.28 m，单偏光，介形虫碎片；I—松辽盆地古龙凹陷古页 1 井，青山口组 2395.30 m，岩心上分布的钙质生物残骸；J—渤海湾盆地束鹿凹陷 ST1 井，沙三下亚段 4086.50 m，灰色杂基支撑的陆源碳酸盐岩砾质砂；K—陆源碎屑方解石呈棱角状—次棱角状，束鹿凹陷 ST1 井，沙三下亚段 4070.10 m；L—渤海湾盆地济阳凹陷罗 69 井，沙三下亚段 3031.30 m，单偏光，方解石与黏土呈纹层状分布，亮层主要为陆源碎屑方解石；M—渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井，沙三下亚段 3027.9 m，正交光，有机酸溶蚀泥晶方解石；N—渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井，沙三下亚段 3062.83 m，单偏光，连续纹层，粒状重结晶方解石；O—渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井沙三下亚段 3068.63 m，单偏光，透镜体状的马牙状重结晶方解石

图 3 中国陆相页岩油储集层内的方解石矿物典型特征

Fig. 3 Typical characteristics of calcite minerals within continental shale oil reservoirs, China

物化学沉积的方解石主导层段为近期页岩油勘探的重点之一,取得了良好的勘探效果(杜玉山等,2024)。

1.2.3 钙质生物残骸

钙质藻类的“骨骼”多数是通过钙化作用形成的(James and Jones, 2016),该机制需依赖清澈、富营养化的水体环境(Kuznetsov, 2023)。部分陆相页岩含有介形虫、中华叶肢介等钙质生物残骸,钙质生物(介形虫、轮藻等)的繁盛及其死亡后的壳体堆积是湖相方解石的重要来源(钱迈平等,2014)。钙质生物残骸可富集成层(图3-H),但多为碎片状分散于页岩中(图3-I);前者可能是生物死亡后原地埋藏,而后者可能是事件作用下的异地搬运沉积。在中国古龙凹陷青山口组(何文渊等,2024;吴霞等,2024)及渤海湾盆地中始新统页岩(王飞宇等,2023),均发现了一定量的钙质生物残骸。

1.2.4 陆源碎屑方解石

相较于海洋,多数陆相湖盆靠近物源区。碳酸盐岩母岩可在洪水等的作用下进入湖盆。中国中东部新生代断陷湖盆,表现为高山深盆结构,且华北地台中上元古界碳酸盐岩是其主要的母岩类型之一(Li *et al.*, 2020),为陆源机械沉积方解石创造了理想条件。例如,Jiang 等(2007)在束鹿凹陷中始新统深湖页岩中发现了陆源机械搬运沉积的泥灰岩。

1.2.5 重结晶方解石

有机质成熟生烃作用形成的有机酸溶蚀页岩中的泥晶方解石(图3-M),使其重结晶形成亮晶方解石,而有机质生烃作用形成的异常高压诱导形成水平微裂缝,为方解石的形成提供了储集空间(王昕尧等,2021)。重结晶方解石晶粒也可在纹层状方解石中呈集合状(图3-N)和透镜状(图3-O),重结晶方解石晶粒的接触部位可形成大量的晶间孔,其直径可达数十微米,为油气储存和运移提供了优越条件(杜玉山等,2024)。根据已有报道,东营凹陷沙四上亚段在含重结晶方解石的页岩层段勘探取得了良好效果,其樊页平1井日产油峰值达172吨/天,目前累产油超2万吨(刘惠民等,2023c;李军亮等,2025)。

1.3 白云石

白云石成因机制多样,是沉积学界悬而未决的

百年谜题(沈安江等,2025)。白云岩在地质历史时期的碳酸盐岩台地中分布广泛(图4-A),对于陆相深水页岩而言,热液白云石、微生物白云石、埋藏转化白云石是常见的成因类型。

1.3.1 热液白云石

非微生物白云石的成因机制多样。对陆相深水页岩而言,蒸发泵、回流渗透白云岩化等传统机制难以解释其成因,而热液白云石化是其重要成因类型。

热液白云石化作用是指在埋藏环境下,温度和压力比围岩高(至少 $>5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)的流体中发生的白云石化作用,这些热液流体通常是由断裂系统从深部输导上来的(甯濛等,2025)。热液白云石化作用的规模取决于断裂系统样式、规模与镁离子的输入通量,当镁离子供应充分时,在一些大型断裂系统内也可以形成规模化的热液白云岩储集层(赵文智等,2018;沈安江等,2025)。中国西部的准噶尔盆地、三塘湖盆地等地区火山—热液频发,热液白云石化可能是其页岩的一种重要成因机制(王剑等,2024)。例如,准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩的白云石平均含量约25%,大量白云石沿裂缝分布(图4-B, 4-C)。

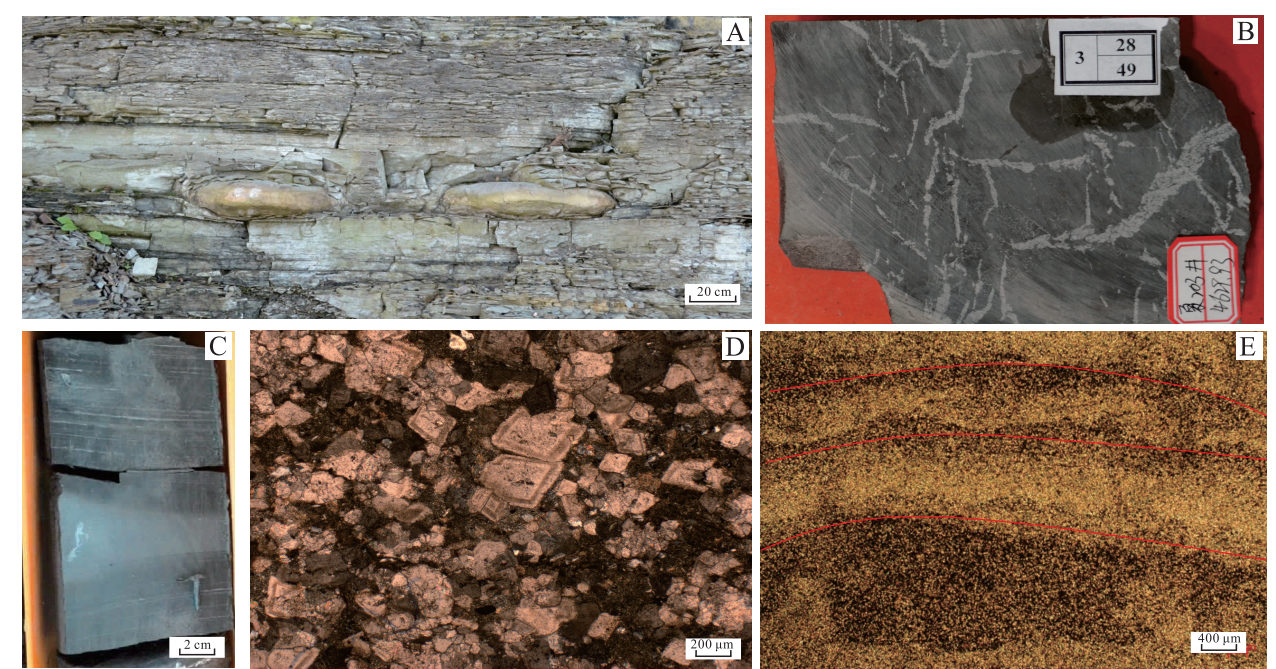
1.3.2 微生物白云石

国际沉积学会主席 McKenzie J. A. 团队于1995年提出微生物白云石机制(Vasconcelos *et al.*, 1995),为自然界的原生低温白云石成因提出了一个合理解释方案,对于深水页岩而言,产甲烷菌等的活动可诱导形成微生物白云岩。于炳松等(2012)在青海湖的深湖淤泥中分离出了原生微生物白云石。古龙凹陷青山口组页岩层系内的白云岩在薄片下可见白云石晶体被微生物包裹、吸附(图4-D),且表现为高碳高氧同位素(表2)的特征,判断为微生物白云岩(白翔宇等,2025)。

微生物白云石的页岩油气意义有待深化研究。笔者在收集古龙凹陷青山口组微生物白云岩的物性资料中发现微生物白云岩普遍较致密(平均孔隙度约2%),薄片显示晶体间孔隙较小(图4-E),与白云岩物性好的传统认识大相径庭。这可能与微生物白云岩为原生白云石,缺少白云石化增孔过程有关。

1.3.3 埋藏转化白云石

中国不同盆地的陆相页岩黏土矿物含量差异



A—松辽盆地青山口组白云岩野外露头，哈尔滨宾县；B—准噶尔盆地玛湖凹陷夏 203 井，风城组一段 4629.93 m，灰色云岩，白云石脉充填裂缝，脉宽 1~3 mm；C—渤海湾盆地东营凹陷 FY1 井，沙四上亚段 3615.82 m，岩石中超压缝被白云石充填；D—准噶尔盆地玛湖凹陷玛页 1 井，风城组一段 2549.10 m，单偏光，微生物白云石，藻类颗粒完整；E—松辽盆地古龙凹陷古页 1 井，青一段 2553.70 m，单偏光，白云岩，晶体间孔隙

图 4 陆相页岩油储集层内的白云石矿物典型特征

Fig. 4 Typical characteristics of dolomite minerals within continental shale oil reservoirs

表 2 松辽盆地古龙凹陷肇斜 4003 井碳酸盐岩碳氧同位素特征

Table 2 Carbon and oxygen isotope characteristics of carbonate rocks from Well ZX4003 in Gulong sag, Songliao Basin

编号	井号	样品描述	层位	井深/m	检测结果/‰	
					$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$
1	肇斜 4003	微晶白云岩	青一段	1820.14	5.14	-9.98
2	肇斜 4003	微晶白云岩	青一段	1837.04	11.96	-11.07
3	肇斜 4003	微晶白云岩	青一段	1811.16	7.73	-9.13
4	肇斜 4003	介壳灰岩	青一段	1813.21	4.42	-9.87
5	肇斜 4003	方解石脉体	青一段	1844.44	0.89	-16.61

大，部分陆相页岩的平均黏土矿物平均含量接近 40%(图 1)。湖盆的淤泥在沉积后，随埋深加大逐渐发生脱水及黏土矿物转化作用（例如，蒙脱石的伊利石化）（沈安江等，2025）。在转化的过程中释放出镁离子进入孔隙水中，使得富镁孔隙水被排替流入石灰岩中，从而导致白云石化（周刚等，2024）。黏土矿物转化的镁离子量控制白云岩化程度，因此埋藏转化白云石常作为页岩的一种矿物组分，而非纯白云岩的形式出现。

中国数个陆相页岩油勘探开发的重点层系内发

现了埋藏转化白云石。例如，济阳坳陷渤南洼陷深洼带的义页 1-1 井等页岩油高产井取心段，黏土矿物几乎全部伊利石化(表 1)，且含有一定量白云石（平均 10%~20%），因此推测为埋藏转化白云石。

1.4 “蒸发”矿物

“蒸发”矿物在部分陆相深水页岩也较常见。江汉盆地潜江凹陷潜江组页岩层系厚度达 1800 m，垂向上划分为 193 个米级盐韵律（李乐等，

2019)。渤海湾盆地东营凹陷沙四下亚段和沾化凹陷沙四上亚段的页岩层系也发育大量膏盐岩沉积(操应长等, 2011)。准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩层系发育大量碱岩, 在深湖区的累计厚度达 500 m 以上(冯允献等, 2025; 孙中良等, 2025)。

“蒸发”矿物一般被认为是湖盆干涸—蒸发成因(郭佩和李长志, 2022)。但对于陆相深水页岩层系内的膏盐岩及碱岩, 由于其处于深水环境, 干涸成因显然难以解释其成因机制。例如, 笔者在研究渤海湾盆地东营和沾化凹陷沙四段深水页岩层系内的膏盐岩发现: (1) 石盐岩、泥质钙芒硝岩、泥质硬石膏呈一个序列分布(图 5-A), 电镜下呈连续不规则断面特征(图 5-B), 呈蒸发化学成因的特征; (2) 部分膏盐岩沿构造裂缝分布(图 5-C 至 5-E); (3) 膏盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值 (0.709) 接近同期上地幔 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值 (0.706); (4) 膏盐岩 $\delta^{34}\text{S}$ 均值 (45‰) 显著高于同期海相膏盐岩 $\delta^{34}\text{S}$ (17‰~19‰)、大陆壳 $\delta^{34}\text{S}$ (<10‰) (表 2)。因此, 推断该区膏盐岩形成于深部卤水上涌进入湖盆后, 沉淀于深水环境, 而非干涸成因。类似深部卤水成因的还有准噶尔盆地玛湖凹陷的深部卤水碱岩(图 5-F 至 5-H)。

1.5 黏土矿物

母岩的风化—搬运作用, 是湖盆内黏土矿物的最主要成因。多数母岩在经历物理—化学风化后, 会产生大量黏土物质(彭军等, 2020)。水流将黏土物质携带进入湖盆后, 由于黏土矿物比表面积大、密度低, 多数黏土矿物表面带有正电荷或负电荷, 在水体中会相互吸引, 从而聚集形成“絮状物”, 并最终沉淀下来(Curran *et al.*, 2004) (图 6-A), 导致绝大多数黏土矿物沉积于页岩内。絮凝沉淀的黏土矿物会有絮凝孔(图 6-B), 是页岩油气潜在储集空间(Tourney and Ngwenya, 2014)。少数黏土矿物以分散状沉淀至湖盆底部。

在埋藏成岩阶段, 一般会发生黏土矿物转化, 并伴随新生黏土矿物的形成。其中最主要的是蒙脱石的伊利石化或绿泥石化(宋金民等, 2024; 刘旭东等, 2026)。二八面体蒙脱石转化为伊蒙混层, 并最终转化为伊利石; 三八面体蒙脱石转化为伊绿混层, 并最终转化为绿泥石。由于二八面体蒙脱石占主导位置, 因此古老页岩的黏土矿物以伊利石占

主导。地层温度和钾离子含量是控制转化速率的两个最关键要素(梅俊芳等, 2024)。

1.6 其他矿物

陆相页岩内还常含有长石、黄铁矿、沸石等十多种不同类型的矿物。不同矿物类型的成因机制各异。

长石主要来源于陆源风化搬运沉积, 黏土矿物等成岩转化也会形成少量长石。例如, 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组发育粉砂级碎屑长石、成岩转化长石。其成岩转化长石主要由原始黏土矿物、碎屑钾长石、钠长石及凝灰物质在酸碱成岩环境转化过程中形成, 其分布和含量受原始沉积环境的盐度、碱度以及有机质含量的控制(李长志等, 2024)。盐度和碱度越高, 自生长石含量越丰富。

深水页岩黄铁矿可分为自形黄铁矿、草莓状黄铁矿及交代型黄铁矿 3 类(杨文霞等, 2026)。自形黄铁矿包括普通自形黄铁矿及块状黄铁矿; 草莓状黄铁矿则可以细分为普通草莓状黄铁矿、充填型草莓状黄铁矿及过度生长型草莓状黄铁矿 3 类。深水页岩黄铁矿的成矿物质来源众多。铁源主要来自陆源输入、湖底沉积物的回收以及热液; 硫则源自浅层沉积物的 MSR (Microbial Sulfate Reduction, 微生物硫酸盐还原, 沉积物中一种重要的生物地球化学过程)(Fischer *et al.*, 2023), 及由深部热液流体或地温梯度驱动的 TSR (Thermochemical Sulfate Reduction, 硫酸盐热还原反应, 沉积盆地中常见的有机—无机相互作用)(Wan *et al.*, 2024)。

沸石矿物主要与火山—热液有关, 且会在成岩作用过程中发生一系列转化。沸石类型有原生沸石、热液成因沸石、火山物质蚀变沸石和矿物转化沸石(王继远等, 2025); 其骨架结构可以用 Si/Al 表征, 据此分为高硅沸石和低硅沸石。沸石的形成通常与火山物质密切相关。前人以准噶尔盆地西北缘下二叠统火山碎屑岩为研究对象, 建立了火山碎屑—斜发沸石—方沸石—片沸石—浊沸石的成岩序列(牛君等, 2025)。在沉积岩中, 沸石的来源多样, 形成机制复杂, 成因类型也多样。本研究根据成因类型, 将沸石分为 4 种: (1) 原生沸石, 岩浆冷凝固晶后, 铁镁质火成岩中可见沸石斑晶, 其中少部分沸石斑晶可成为沉积岩的造岩矿物; (2) 热液成因沸石, 富含钠质硅酸盐胶体的幔源热液受强



A—渤海湾盆地济阳坳陷丰页油 2 井，沙四上 3885.45 m，蒸发化学沉积成因的石盐岩、泥质钙芒硝岩、泥质硬石膏序列；B—渤海湾盆地济阳坳陷牛页 1 井，沙四上 3362.70 m，石膏，扫描电镜；C—渤海湾盆地济阳坳陷坨深 12 井，沙四上 3722.10 m，深部卤水石膏；D—渤海湾盆地济阳坳陷坨深 12 井，沙四上亚段 3721.85 m，深部卤水石膏；E—渤海湾盆地济阳坳陷坨深 12 井，沙四上亚段 3720.80 m，深部卤水石膏；F—准噶尔盆地玛湖凹陷玛页 2 井，风城组 4154.71 m，深部卤水碱；G—准噶尔盆地玛湖凹陷玛页 2 井，风城组 4156.71 m，深部卤水碱；H—准噶尔盆地玛湖凹陷风南 1 井，风城组 4362.28 m，深部卤水碱

图 5 中国陆相页岩油储集层内的“蒸发”矿物典型特征

Fig. 5 Typical characteristics of “evaporitic” minerals within continental shale oil reservoirs, China

烈构造活动影响，沿深部断裂上涌，与沉积水体混合后，发生冷凝作用析出的沸石；(3) 火山物质蚀

变沸石，富含火山碎屑的沉积物中，火山玻璃等不稳定物质在地层流体作用下分解释放大量 Na^+ 、

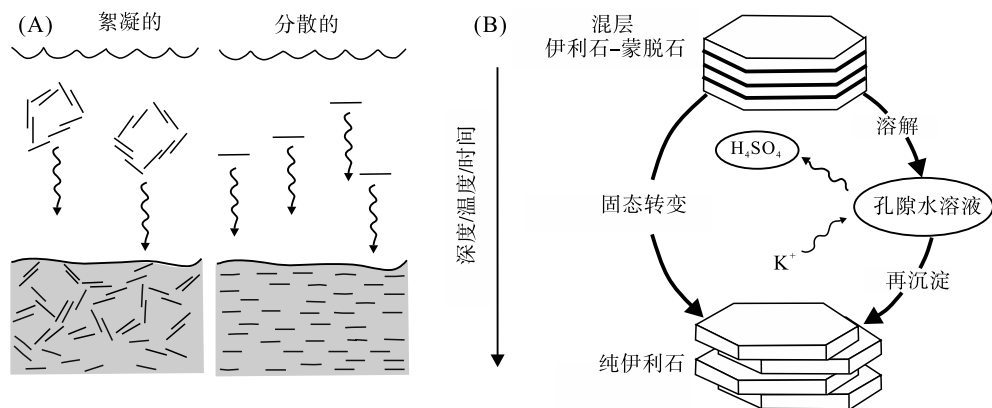


图 6 陆相页岩油储集层内的“黏土”矿物典型特征 (据 Schieber *et al.*, 2007)

Fig. 6 Typical characteristics of clay minerals within continental shale oil reservoirs
(modified after Schieber *et al.*, 2007)

K^+ 、 Ca^{2+} 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 等阳离子, 并在一定成岩条件下, 依次形成各类沸石; (4) 矿物转化沸石, 无火山物质条件下, 黏土矿物、长石等硅铝酸盐矿物与高盐碱性沉积水体或成岩流体相互作用, 形成硅铝酸盐凝胶, 并与水体中的阳离子结合形成沸石。

2 多元页岩成因驱动下的优质储集层类型及实例

陆相页岩的形成机制多样性导致优质储集层并非单一类型, 而是呈现出多类型并存的特点。按照优质储集层的形成主控因素, 可划分为沉积主控型、成岩改造型、沉积—成岩复合型优质页岩储集层。

2.1 沉积主控型优质页岩储集层

沉积主控型优质页岩储集层指沉积作用是形成优质储集层的最关键要素。沧东凹陷孔二段、古龙凹陷青山口组等发育此类页岩储集层甜点类型。

2.1.1 高 TOC 纹层状长英质页岩储集层: 以沧东凹陷孔二段和古龙凹陷青山口组为例

沧东凹陷孔二段 GD1701H 页岩油于 2018 年首获日产 76 方的工业性页岩油流, 目前已建成年产十万吨的效益开发平台 (周立宏等, 2023)。该区发育纹层状长英质页岩、纹层状碳酸盐岩与黏土岩等多种类型页岩 (韩文中等, 2021; 蒲秀刚等, 2024)。气候和沉积环境通过控制物源供给强度、水介质条件、沉积速率等, 进而控制页岩岩相类型

及纵横向分布。气候干旱、水体盐度高时主要发育灰云质页岩类, 气候较湿润、盐度略低时发育纹层状长英质页岩 (解德录等, 2024)。纹层状长英质页岩是本区最优质页岩油甜点, 其在特殊沉积环境形成的高频纹层结构、高有机质丰度、高脆性矿物含量、低黏土含量的“三高一低”地质特征, 驱动形成了优质甜点。纹层状长英质页岩高频纹层结构的沉积特征, 还导致其能够形成含油流体储集、运移通道, 具有相对较高的基质渗透性, 压裂改造后人工裂缝与基质孔缝形成复杂缝网结构, 具备页岩油长期稳产能力。大港油田瞄准纹层状长英质页岩, 实现了沧东凹陷页岩油的高产稳产, 其中 4 口水平井单井日产页岩油突破百吨, GY5-1-1L 井日产油达 208 m^3 , 日产气 5900 m^3 ; 截至 2022 年 4 月, 28 口生产井日产油稳定在 300~350 吨, 累产油 17.8×10^4 吨 (赵贤正等, 2022)。

古龙凹陷青山口组是松辽盆地最主要的烃源岩, 整体表现为自下而上古盐度降低、古水深减小、水体还原性减弱和陆源输入增强的特点 (陆加敏等, 2025)。这导致青山口组下部的有机质含量均值较高, 内源碳酸盐矿物及生物硅较发育; 青山口组上部的有机质含量均值高、脆性矿物较发育, 陆源矿物组分占绝对主导。陆源和内源组分共同组成了古龙凹陷青山口组页岩。对于陆源矿物主导阶段, 从靠近湖盆边缘区域到湖盆中心, 依次发育低有机质纹层状长英质页岩、中有机质纹层状长英质页岩及中—高有机质纹层状黏土岩。对于内源矿物较发育阶段, 从湖盆边缘到中心, 依次分布低

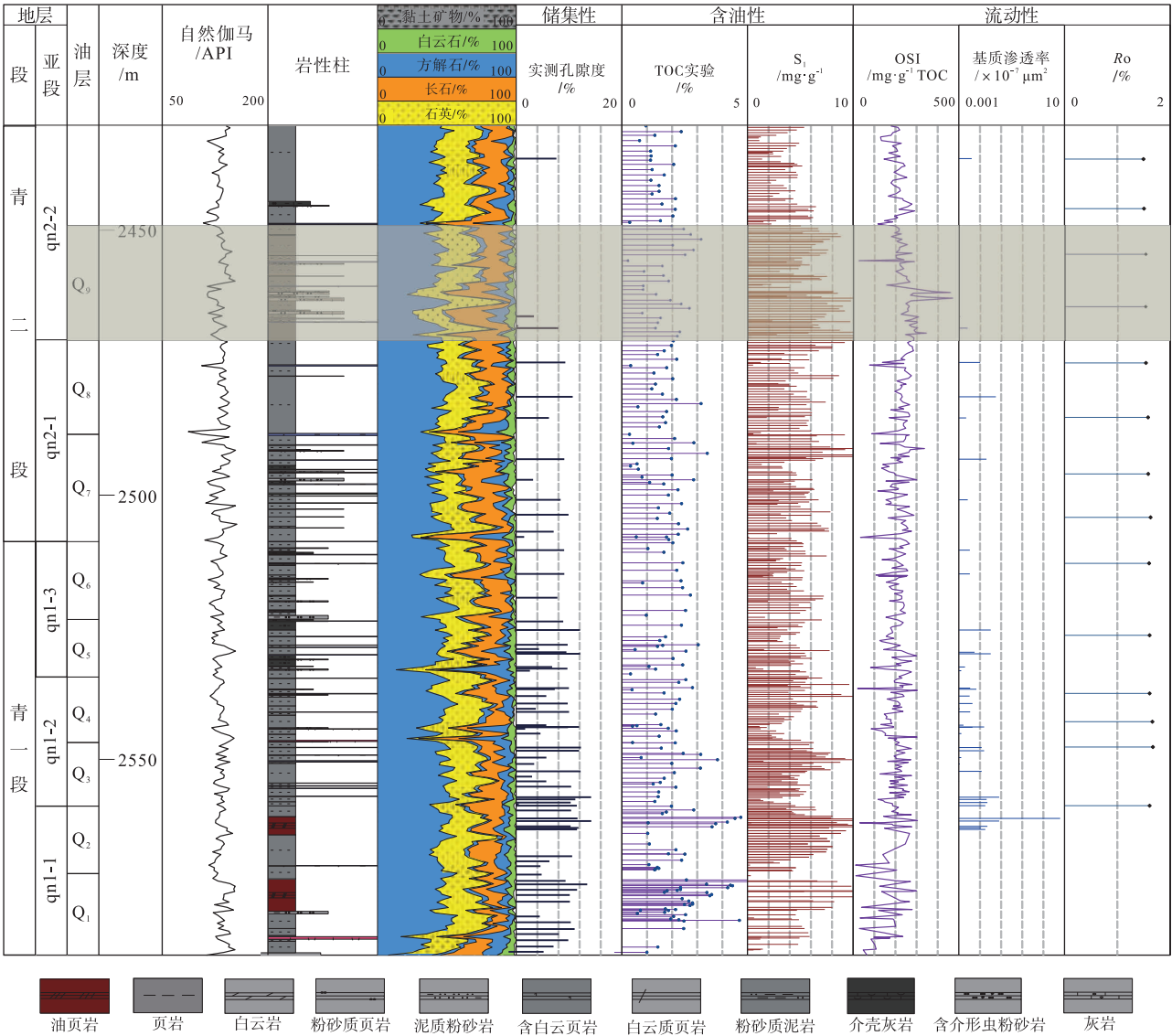


图 7 松辽盆地古龙凹陷古页 1 井青山口组一段、二段综合柱状图 (Q_9 为青山口组重点主攻油层)

Fig. 7 Generalized stratigraphic column of the Member 1 and 2 of Qingshankou Formation in Well G1, Gulong Depression, Songliao Basin (Q_9 : key target oil reservoir)

有机质块状介壳灰岩、中—高有机质泥微晶白云岩、高有机质纹层状生物硅质页岩（冯路尧等，2023）。勘探实践表明，古龙页岩青山口组具有核磁大孔发育、黏土含量相对低、脆性相对高等特征的层段(图 7)，具有良好的页岩油储集潜力（李士超等，2025）。相较而言，陆源沉积的纹层状黏土岩、纹层状长英质页岩的有机质丰度、含油性、储集物性、储集空间发育等均较差，页岩油储集潜力有限(图 7)。上述沉积规律使松辽盆地北部青山口组页岩油勘探方向为纵向上主攻青山口组二段 Q_9 油层（孙龙德等，2024）。从 2020 年突破到

2023 年，该区以高 TOC 纹层状长英质页岩储集层为主的基质型页岩油累产油气当量 46.5 万吨，2024 年产量突破 40 万吨。

2.1.2 高 TOC 纹层状富灰页岩储集层：以东营凹陷沙四上亚段缓坡带为例

济阳拗陷东营凹陷古近系沙四上亚段—沙三下亚段水体盐度高，属于半咸水—咸水环境（刘惠民等，2023d）。岩相展布受物源和水介质宏观环带状分布控制明显，平面上呈环带状分布（刘惠民，2022）。内源的富碳酸盐纹层状岩相主要分布在湖盆几何中心；外源含有机质块状、层状灰质泥

岩相主要分布在粗碎屑沉积体系边缘, 富有机质层状岩相主要分布在内源和外源的混源带。在东营凹陷南坡发育富灰(方解石含量 $>50\%$)页岩。方解石纹层与有机质、黏土、长英质混合纹层在垂向上呈韵律性互层。其中, 有机质、黏土、长英质所组成的混合纹层有机质含量高(平均 $\sim 8\%$), 生烃能力强; 方解石纹层由大量泥微晶方解石组成, 纹层内含大量微米级的方解石晶间孔, 储集能力强。2类纹层在垂向上构成了优质的生储结构, 是此类岩相富集高产的根本原因(王冠民等, 2024)。2020年, 牛斜55井、官斜26井首次在此类岩相取得勘探突破, 日产油超50吨; 随后钻遇10余口日产百吨井(刘惠民, 2022)。2024年, 此类以高TOC纹层状富灰页岩岩相为主的基质型页岩油储集层年产量接近30万吨, 是中国基质型页岩油产量最高的地区之一。

2.1.3 事件沉积型块状页岩储集层: 以渤南洼陷沙三下亚段深洼带为例

济阳坳陷渤南洼陷深洼带沙三下亚段发育厚度超1000m厚的富有机质页岩, 岩心上表现为块状构造, 普遍发育撕裂、变形、砂岩侵入(体)等现象, 薄片下大量发育棱角状颗粒, 且矿物杂乱堆积(图8), 指示事件沉积成因(张建国等, 2021)。事件沉积也带来丰富的陆源有机质, 使该套页岩陆源—内源有机质共存, 为II—III型干酪根, 具备同时生油和生气的能力(图9)。块状岩相在压裂后会形成网状裂缝系统, 更有利于油气运移到水平井筒内(Zhang *et al.*, 2016)。

2020年, 部署钻探渤页平5井, 峰值日产油80吨、气约10万方, 截至2023年累产超4万吨当量, 是中国目前油气当量累产最高的井之一。该发现突破了事件沉积难以形成优质页岩储集层的传统认识。

2.2 成岩改造主控型优质页岩储集层

成岩改造主控型储集层指成岩改造作用是其储集层质量优于其他岩相的最关键要素。渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段、玛湖凹陷风城组发育此类储集层。

2.2.1 含水平亮晶方解石脉体型优质储集层: 以渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段中央隆起带为例

东营凹陷沙四上亚段发育大量含水平亮晶方解

石脉体型页岩(图10)。方解石脉体顺层分布, 单期脉体厚度1~2cm, 垂向上高频出现(可达20~30条/米)。方解石脉体内含有大量直径10余微米的晶间孔, 孔隙连通性好, 构成了优越的孔渗组合。

研究发现, 成岩作用阶段的构造隆起及有机质生烃作用驱动了水平方解石脉的形成(杜玉山等, 2024)。构造隆起及有机质生烃作用形成的异常高压诱导形成水平微裂缝, 从而为方解石的形成提供了储集空间(王民等, 2018; 彭军等, 2020)。有机质成熟生烃作用形成的有机酸溶蚀细粒岩中的泥晶方解石, 使其重结晶形成亮晶方解石脉体。

针对此类岩相的勘探取得了较好效果。例如, 2021年钻探的樊页平1井日产油峰值达172吨/天, 截至2023年11月已累产油超2万吨。

2.2.2 硅质页岩型优质储集层: 以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例

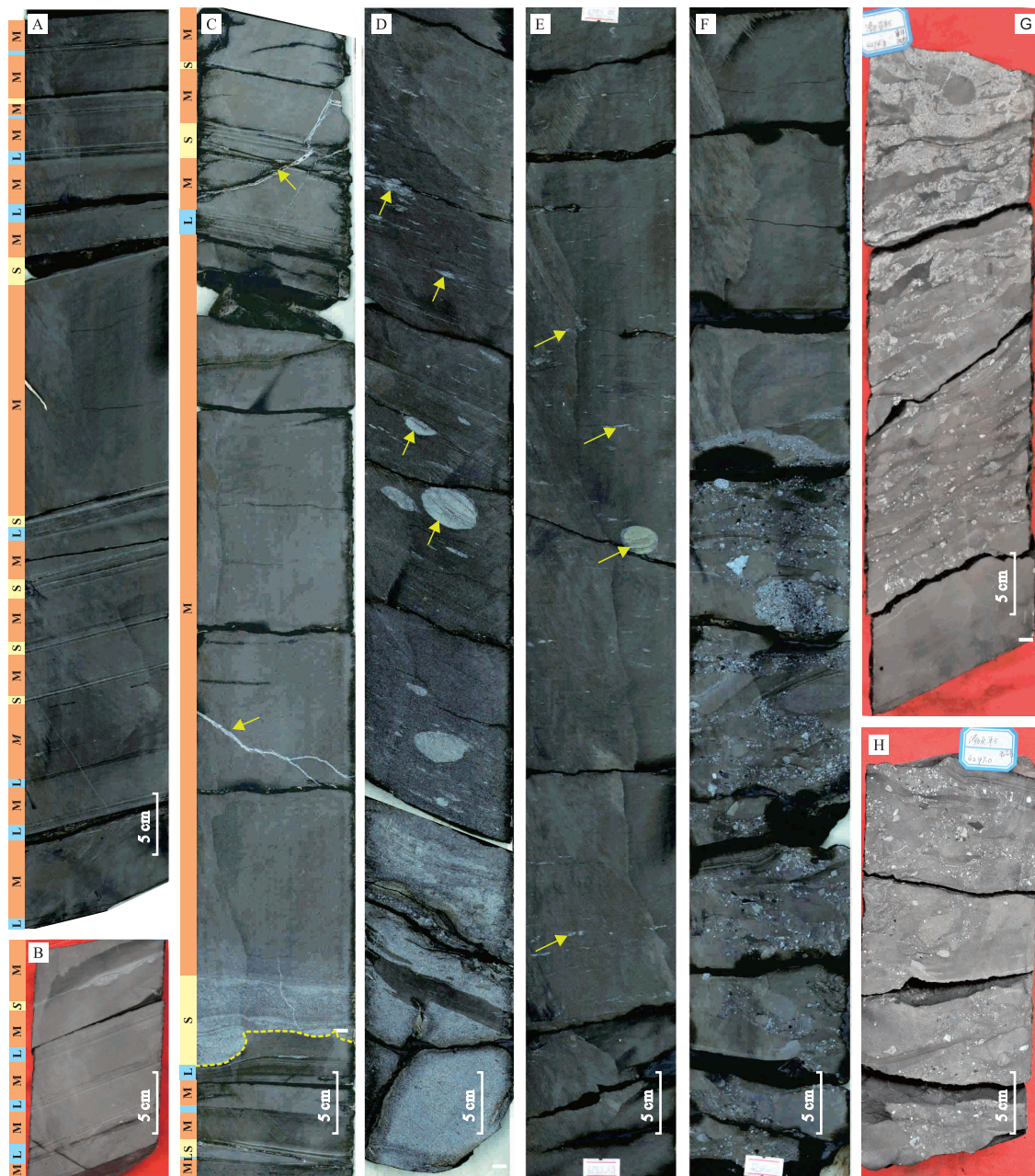
准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩层系发育贫碱灰质沉凝灰岩、含碱灰质沉凝灰岩、贫碱云质沉凝灰岩、含碱云质沉凝灰岩、硅质页岩、碱岩共6种细粒岩岩相类型, 其中硅质页岩储集层物性最好, TOC及 S_1 (岩石游离烃)含量最高(图11)。

通过薄片分析发现, 硅质页岩主要由玻璃质硅质矿物组成; 电镜下硅质矿物自形程度高, 说明该套页岩中的硅质为成岩蚀变形成。由于玛湖凹陷为典型的碱湖, 页岩层系内富有机质凝灰岩的生烃作用形成有机酸和 CO_2 , 使地层水从碱性转化为酸性, 为成岩硅的形成提供了必要条件。富有机质页岩能形成更多有机酸和 CO_2 , 解释了硅质页岩普遍富含TOC和 S_1 的原因。

2.3 沉积—成岩双控型优质页岩储集层

沉积—成岩双控型储集层是指沉积和成岩共同作用下形成的优质页岩储集层。在东营凹陷沙四上亚段陡坡带地区发育此类储集层。含成岩硅优质页岩储集层以东营凹陷沙四上亚段陡坡带为例。

东营凹陷陡坡带沙四上亚段发育碳酸盐矿物、长英质矿物、黏土矿物含量相对均等的混合质页岩(图12)。其在相对较强陆源输入阶段沉积富陆源物质的页岩(石英、长石、黏土), 而在相对弱陆



A—块状泥页岩、纹层状泥页岩、粉砂岩交替出现，4268.00~4268.60 m；B—变形薄层砂岩条带分布于块状泥页岩中，4300.05 m；C—粉砂岩，内部见有裂缝被方解石充填（黄色箭头指示），4337.35~4338.10 m；D—泥页岩中分布有砾石及粉砂岩透镜体（黄色箭头指示），4273.68~4274.35 m；E—块状泥页岩中分布有砾石及粉砂岩透镜体（黄色箭头指示），4288.85~4289.60 m；F—变形构造，4295.85~4296.65 m；G—变形构造，4274.8 m；H—变形构造，4297.00 m。L—泥灰岩，M—泥岩，S—砂岩

图 8 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷页岩平 5 井沙三下亚段事件沉积特征岩心

Fig. 8 Core with characteristics of event deposits from the Lower Submember of Member 3 of Shahejie Formation in Well BYP5, Bonan subsag, Zhanhua sag, Bohai Bay Basin

源输入阶段沉积富碳酸盐矿物的页岩。有机质含量与陆源物质含量正相关，使富陆源物质的页岩含油性更好。虽然东营凹陷沙四上亚段陡坡带营养普遍埋深 3500 m 以下，但由于陡坡带的高沉积速率，

使页岩压力系数高，原生孔得到较好保存。同时，黏土矿物在成岩转化过程中形成成岩硅，增加了储集层物性和脆性，进一步提升了储集层质量。

胜利油田 2020—2021 年针对该套页岩钻探丰

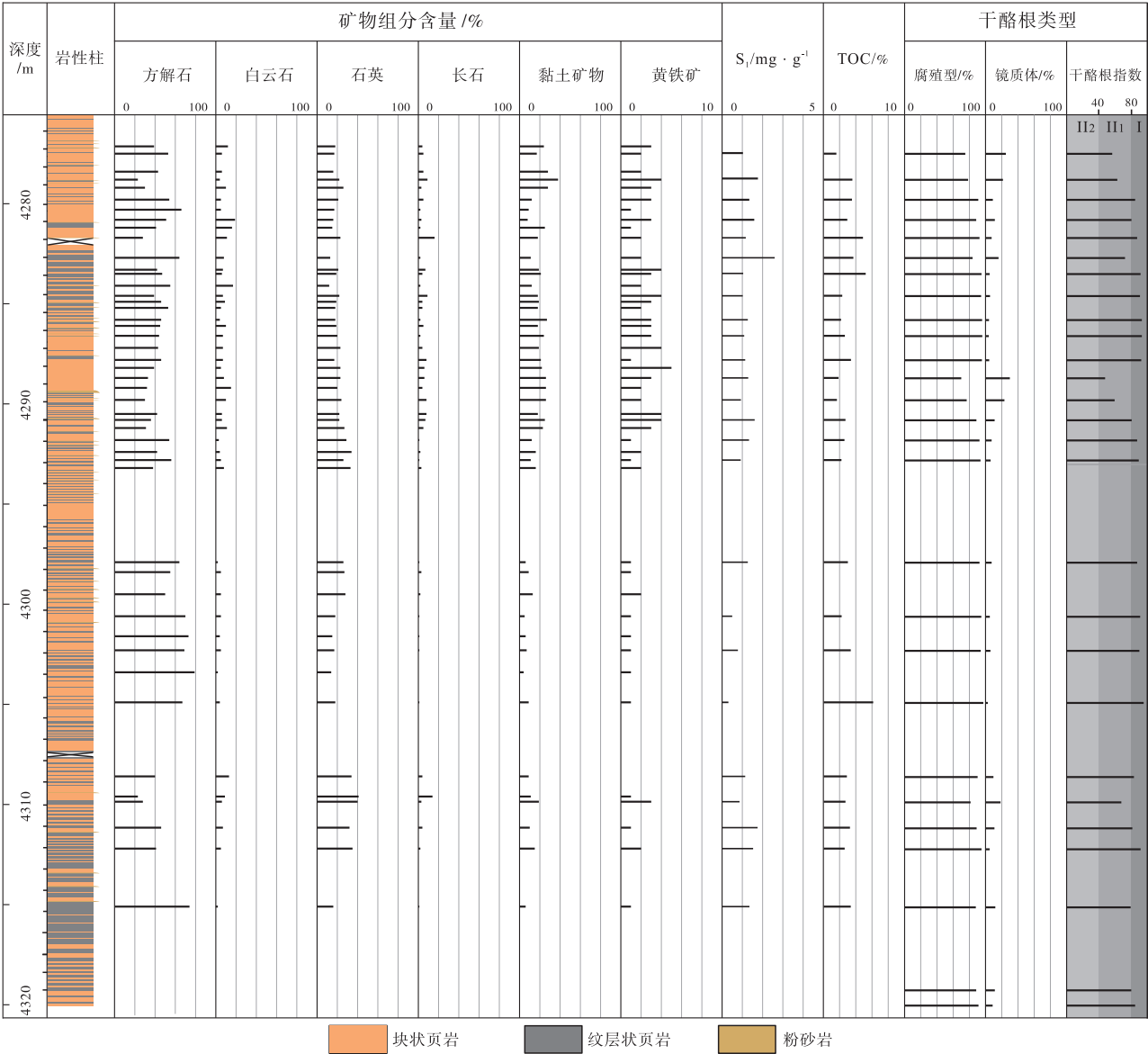


图 9 渤海湾盆地沾化凹陷渤平 5 井沙三下亚段综合柱状图

Fig. 9 Generalized stratigraphic column of the Lower Submember of Member 3 of Shahejie Formation in Well BYP5, Zhanhua sag, Bohai Bay Basin

页 1-1 和丰页 1 井，分别获得峰值日油 270 吨/天和 236 吨/天，创世界同类型页岩油产量世界纪录。目前丰页 1-1 井累产超 3 万吨。

3 结论

1) 中国陆相页岩的矿物成因具有多样性。硅质矿物可来源于陆源碎屑、生物硅、黏土矿物转化及火山物质蚀变；方解石存在化学沉淀、生物诱导、生物残骸、陆源输入和重结晶等多种成因；白云石则以微生物、热液和埋藏转化成为为主；深水

环境中的“蒸发”矿物多与深部热液流体活动有关，而非传统蒸发成因。

2) 矿物成因的多样性直接控制了优质储集层类型的多元性。根据主控因素，可将陆相页岩优质储集层划分为 3 种类型：沉积主控型（高有机质纹层状长英质/富灰页岩）、成岩改造型（含水平亮晶方解石脉或成岩硅的页岩）和沉积—成岩复合型。同一湖盆内常多种类型储集层共生。

3) 优质储集层的分布受益地内不同部位和层位的沉积—成岩作用差异控制，具有明显的时空分

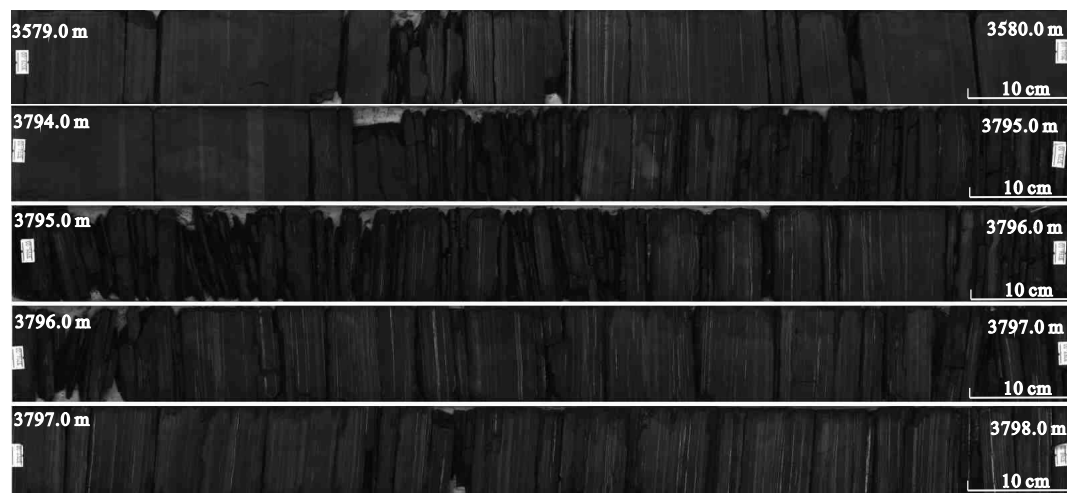


图 10 发育大量水平亮晶方解石脉体的页岩岩心 (渤海湾盆地东营凹陷 FY1 井沙四上亚段)

Fig. 10 Shale core with abundant horizontal sparry calcite veins (the Upper Submember of Member 4 of Shahejie Formation, Well FY1 in Dongying sag, Bohai Bay Basin)

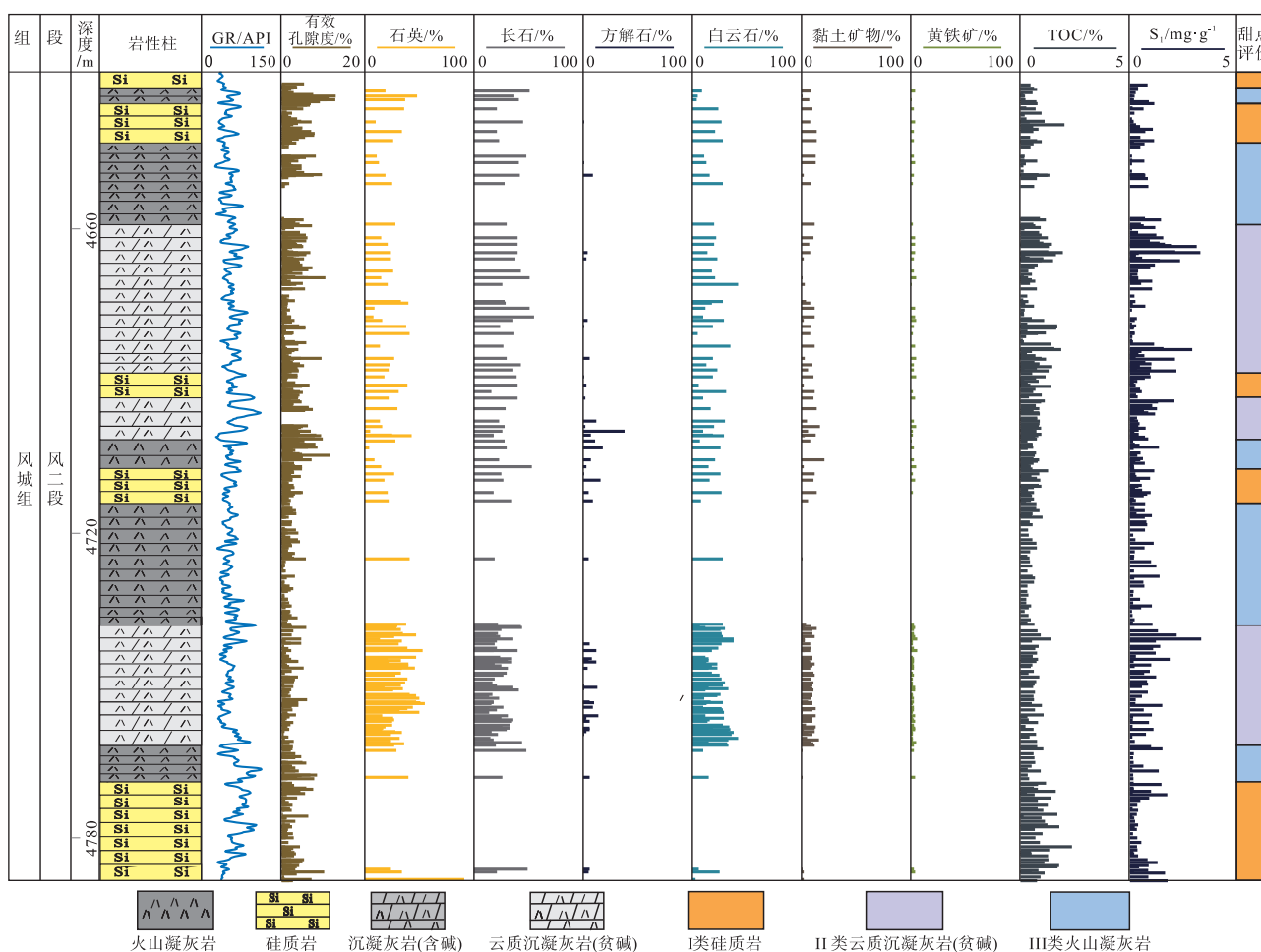


图 11 准噶尔盆地玛湖凹陷玛页 1 井风城组二段综合柱状图

Fig. 11 Generalized stratigraphic column of Well MY1, the Member 2 of Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin

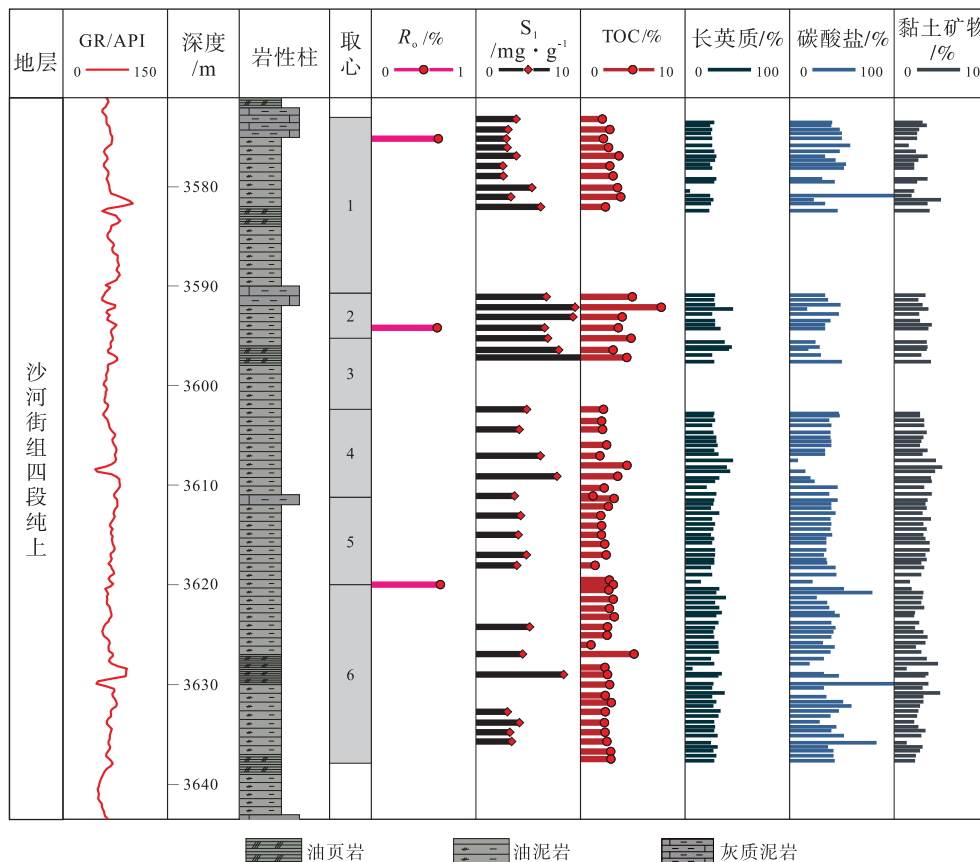


图 12 渤海湾盆地东营凹陷 FY1 井沙四纯上亚段综合柱状图

Fig. 12 Generalized stratigraphic column of Well FY1, Es₄^{cs}, Dongying sag, Bohai Bay Basin

异性。这一认识突破了海相页岩优质储集层类型相对单一的模式，对陆相页岩油“甜点”预测具有重要指导意义。未来勘探应注重沉积背景与成岩演化历史的耦合分析。

参考文献 (References)

白斌,戴朝成,侯秀林,刘显阳,王瑞,杨亮,李士祥,贺君玲,董若婧. 2022. 陆相湖盆页岩自生硅质特征及其油气意义. 石油勘探与开发,49(5): 896-907. [Bai B, Dai C C, Hou X L, Liu X Y, Wang R, Yang L, Li S X, He J L, Dong R J. 2022. Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance. Petroleum Exploration and Development,49(5): 896-907]

白翔宇,耿锋,刘波,沈向存,尚凯,许启鲁,何卿,李俊,王远翀,石开波. 2025. 塔里木盆地西北缘震旦系奇格布拉克组微生物白云岩类型及储集意义. 地质学报,99(10): 3574-3594. [Bai X Y, Geng F, Liu B, Shen X C, Shang K, Xu Q L, He Q, Li J, Wang Y C, Shi K B. 2025. Microbial dolomite types and reservoir significance of Sinian Qigebulak Formation in the northwest margin of Tarim Basin. Acta Geologica Sinica,99(10): 3574-3594]

操应长,王健,高永进,刘惠民,唐东. 2011. 济阳坳陷东营凹陷古近

系红层—膏盐层沉积特征及模式. 古地理学报,13(4): 375-386. [Cao Y C, Wang J, Gao Y J, Liu H M, Tang D. 2011. Sedimentary characteristics and model of red beds-gypsum salt beds of the Paleogene in Dongying sag, Jiyang Depression. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),13(4): 375-386]

操应长,梁超,韩豫,蒯克来,王俊然,籍士超,梅俊芳. 2023. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨. 古地理学报,25(4): 729-741. [Cao Y C, Liang C, Han Y, Xi K L, Wang J R, Ji S C, Mei J F. 2023. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),25(4): 729-741]

杜安业,叶玥豪,刘树根,汪华,宋金民,李智武,金鑫,廖志芳,张钊益,闫春桥,马小刚. 2026. 川东地区上二叠统大隆组页岩硅质成因及其与有机质富集的耦合关系. 地质论评,72(2): 375-394. [Du A Y, Ye Y H, Liu S G, Wang H, Song J M, Li Z W, Jin X, Liao Z F, Zhang Z Y, Yan C Q, Ma X G. 2026. The siliceous genesis of Upper Permian Dalong Shale in eastern Sichuan and its coupling relationship with organic matter enrichment. Geological Review,72(2): 375-394]

杜佰松,朱光有,刘舒飞,王业哈,于炳松,徐渴鑫. 2023. 浅析影响方解石生长和溶解的动力学因素及机制. 地学前缘,30(4): 335-351. [Du B S, Zhu G Y, Liu S F, Wang Y H, Yu B S, Xu K X.

2023. Key factors and mechanisms affecting calcite growth and dissolution: a critical review. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 335–351]
- 杜玉山, 蒋龙, 倪良田, 张云蛟, 王冠民, 任敏华, 程紫燕. 2024. 东营凹陷沙河街组页岩中纹层状亮晶方解石成因与储集意义. *油气地质与采收率*, 31(3): 1–15. [Du Y S, Jiang L, Ni L T, Zhang Y J, Wang G M, Ren M H, Cheng Z Y. 2024. Genesis and reservoir significance of lamellar sparry calcites of Shahejie Formation shale in Dongying sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(3): 1–15]
- 冯路尧, 张建国, 姜在兴, 李长昇, 白云凤. 2023. 松辽盆地青山口组高精度沉积旋回格架及有机质富集响应. *石油学报*, 44(2): 299–311. [Feng L Y, Zhang J G, Jiang Z X, Li C S, Bai Y F. 2023. High-precision sedimentary cycle framework and organic matter enrichment response of Qingshankou Formation in Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(2): 299–311]
- 冯允献, 唐勇, 秦志军, 杨森, 周圆全, 阿布力米提·依明, 王维, 白雨. 2025. 准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡带风城组沉积特征及古环境演化. *石油学报*, 46(7): 1308–1326. [Feng Y X, Tang Y, Qin Z J, Yang S, Zhou Y Q, Ablimit Yiming, Wang W, Bai Y. 2025. Sedimentary characteristics and palaeoenvironmental evolution of Fengcheng Formation in the northern slope zone of Mahu sag, Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(7): 1308–1326]
- 郭佩, 李长志. 2022. 含油气盆地蒸发盐矿物成因类型及其地质意义. *古地志学报*, 24(2): 210–225. [Guo P, Li C Z. 2022. Genesis of evaporites in petroliferous basins and the sedimentary and climatic significances. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(2): 210–225]
- 韩文中, 赵贤正, 金凤鸣, 蒲秀刚, 陈世悦, 牟连刚, 张伟, 时战楠, 汪虎. 2021. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩甜点评价与勘探实践. *石油勘探与开发*, 48(4): 777–786. [Han W Z, Zhao X Z, Jin F M, Pu X G, Chen S Y, Mu L G, Zhang W, Shi Z N, Wang H. 2021. Sweet spots evaluation and exploration of lacustrine shale oil of the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 48(4): 777–786]
- 何海龙, 郭佩, 李长志, 魏研, 张锡婷, 文华国. 2025. 柴达木盆地渐新统上干柴沟组碳酸盐纹层成因及古气候意义. *沉积学报*, 43(3): 1019–1036. [He H L, Guo P, Li C Z, Wei Y, Zhang X T, Wen H G. 2025. Formation of carbonate laminae in the Oligocene Shangganchaigou Formation of the Qaidam Basin and its paleoclimatic significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(3): 1019–1036]
- 何文渊, 蒙启安, 付秀丽, 郑强, 苏杨鑫, 崔坤宁. 2024. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩沉积环境特征及其有机质富集机理. *沉积学报*, 42(5): 1799–1816. [He W Y, Meng Q A, Fu X L, Zheng Q, Su Y X, Cui K N. 2024. Geochemical study of the sedimentary environment and its organic matter enrichment mechanism in Qingshankou Formation Shale, Gulong sag, Songliao Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(5): 1799–1816]
- 贺海燕, 王勇, 刘沛杰, 孟兴平, 施泽进, 田亚铭. 2025. 微生物与黏土矿物对碳酸盐矿物沉淀的影响. *岩石矿物学杂志*, 44(1): 194–206. [He H Y, Wang Y, Liu P J, Meng X P, Shi Z J, Tian Y M. 2025. Effects of microorganisms and clay minerals on carbonate mineral precipitation. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 44(1): 194–206]
- 胡宗全, 王濡岳, 路菁, 冯动军, 刘粤蛟, 申宝剑, 刘忠宝, 王冠平, 何建华. 2023. 陆相页岩及其夹层储集特征对比与差异演化模式. *石油与天然气地质*, 44(6): 1393–1404. [Hu Z Q, Wang R Y, Lu J, Feng D J, Liu Y J, Shen B J, Liu Z B, Wang G P, He J H. 2023. Storage characteristic comparison of pores between lacustrine shales and their interbeds and differential evolutionary patterns. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1393–1404]
- 胡宗全, 王倩茹, 申宝剑, 冯动军, 杜伟, 孙川翔. 2025. 四川盆地地下古生界五峰组—龙马溪组海相页岩气储层孔隙分类及特征. *石油与天然气地质*, 46(3): 705–718. [Hu Z Q, Wang Q R, Shen B J, Feng D J, Du W, Sun C X. 2025. Classification and characteristics of pores in marine shale gas reservoirs in the Lower Paleozoic Wufeng–Longmaxi Formations, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(3): 705–718]
- 贾承造, 王祖纲, 姜林, 赵文. 2024. 中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题. *世界石油工业*, 31(4): 1–11, 13. [Jia C Z, Wang Z G, Jiang L, Zhao W. 2024. Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China. *World Petroleum Industry*, 31(4): 1–11, 13]
- 姜广明, 马海旭, 肖凯巍, 韩方超, 崔奕帆, 胡水. 2021. 硅藻页岩的调湿性能的比较研究和结构分析. *工程质量*, 39(4): 65–69. [Jiang G M, Ma H X, Xiao K W, Han F C, Cui Y F, Hu S. 2021. Comparative study and selection of diatom shale with high humidity control performance. *Construction Quality*, 39(4): 65–69]
- 姜广明, 崔奕帆, 毛立君, 韩方超, 胡水, 刘清龙. 2025. 硅藻页岩的吸附机理及与调湿性能的关系研究. *工程质量*, 43(4): 40–44. [Jiang G M, Cui Y F, Mao L J, Han F C, Hu S, Liu Q L. 2025. Study on the adsorption mechanism of diatom shale and its relationship with humidity control performance. *Construction Quality*, 43(4): 40–44]
- 姜在兴, 陈代钊. 2022. *沉积学*. 北京: 中国石化出版社, 554–558. [Jiang Z X, Chen D Z. 2022. *Sedimentology*. Beijing: Sinopec Press, 554–558]
- 姜在兴, 孔祥鑫, 杨叶芄, 张建国, 张元福, 王力, 袁晓冬. 2021. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多元成因. *石油勘探与开发*, 48(1): 26–37. [Jiang Z X, Kong X X, Yang Y P, Zhang J G, Zhang Y F, Wang L, Yuan X D. 2021. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots. *Petroleum Exploration and Development*, 48(1): 26–37]
- 李长志, 郭佩, 许景红, 钟凯, 文华国. 2024. 碱湖页岩酸碱性差异对页岩成岩演化及储集层的影响. *石油勘探与开发*, 51(1): 88–101. [Li C Z, Guo P, Xu J H, Zhong K, Wen H G. 2024. Influences of different alkaline and acidic diagenetic environments on diagenetic evolution and reservoir quality of alkaline lake shales. *Petroleum Exploration and Development*, 51(1): 88–101]

- 李军亮,王民,秦峰,王勇,魏晓亮,孟伟,沈安超,宋兆京,余昌琦,李俊乾,刘嘉祺. 2025. 陆相富碳酸盐页岩纹层组合对页岩油富集的控制作用:以渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组页岩为例. 石油与天然气地质,46(2): 392-406. [Li J L, Wang M, Qin F, Wang Y, Wei X L, Meng W, Shen A C, Song Z J, Yu C Q, Li J Q, Liu J Q. 2025. Controlling effects of *Lamina* assemblages on shale oil enrichment for lacustrine carbonate-rich shales: a case study of shales in the Paleogene Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(2): 392-406]
- 李乐,王自翔,郑有恒,陈凤玲,吴世强,漆智先,刘爱武. 2019. 江汉盆地潜江凹陷潜三段盐韵律层页岩油富集机理. 地球科学, 44(3): 1012-1023. [Li L, Wang Z X, Zheng Y H, Chen F L, Wu S Q, Qi Z X, Liu A W. 2019. Mechanism of shale oil enrichment from the salt cyclotherm in Qian3 Member of Qianjiang sag, Jiangnan Basin. *Earth Science*, 44(3): 1012-1023]
- 李士超,杨建国,姚玉来,王博洋,肖飞,黄一鸣. 2025. 松辽盆地北部三肇凹陷青山口组一段基岩型页岩油富集地质特征及勘探实践. 地质学报, 99(11): 3842-3857. [Li S C, Yang J G, Yao Y L, Wang B Y, Xiao F, Huang Y M. 2025. Enrichment geological characteristics and exploration practice of matrix-type shale oil in the first Member of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, Sanzhao sag, northern Songliao basin. *Acta Geologica Sinica*, 99(11): 3842-3857]
- 李勇,邓虎成,熊亮,何建华,魏力民,赵勇,黄滔. 2026. 页岩气超压保存与富集特征及类型:以四川盆地东南部五峰组—龙马溪组为例. 地质学报, 100(6): 2252-2267. [Li Y, Deng C H, Xiong L, He J H, Wei L M, Zhao Y, Huang T. 2026. Characteristics and classification of overpressure preservation and shale gas enrichment: a case study of the Wufeng-Longmaxi Formations in the southeastern Sichuan basin. *Acta Geologica Sinica*, 100(6): 2252-2267.]
- 梁兴,赵建章,张涵冰,张介辉,范小东,罗瑀峰,蒋立伟,张磊,徐应才,徐方镇. 2025. 上扬子地区五峰组—龙马溪组生物硅质页岩特征及成因机制:以川南昭通地区为例. 古地理学报, 27(6): 1434-1451. [Liang X, Zhao J Z, Zhang H B, Zhang J H, Fan X D, Luo Y F, Jiang L W, Zhang L, Xu Y C, Xu F Z. 2025. Characteristics and genesis mechanism of biogenic siliceous shale of the Wufeng and Longmaxi Formations in Upper Yangtze Region: a case study of Zhaotong area in southern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(6): 1434-1451]
- 刘惠民. 2022. 济阳坳陷页岩油勘探实践与前景展望. 中国石油勘探, 27(1): 73-87. [Liu H M. 2022. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression. *China Petroleum Exploration*, 27(1): 73-87]
- 刘惠民,高阳,秦峰,杨怀宇. 2023a. 渤海湾盆地济阳坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 44(12): 2141-2159. [Liu H M, Gao Y, Qin F, Yang H Y. 2023a. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Jiyang depression, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2141-2159]
- 刘惠民,王勇,李军亮,张鹏飞,张顺,魏晓亮,秦峰. 2023b. 济阳坳陷始新统页岩岩相发育主控因素及分布特征. 古地理学报, 25(4): 752-767. [Liu H M, Wang Y, Li J L, Zhang P F, Zhang S, Wei X L, Qin F. 2023b. Main controlling factors and distribution characteristics of shale lithofacies in the Eocene of Jiyang Depression. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 752-767]
- 刘惠民,李政,包友书,张守春,王伟庆,吴连波,王勇,朱日房,方正伟,张顺,刘鹏,王敏. 2023c. 渤海湾盆地济阳坳陷高产页岩油井BYP5页岩地质特征. 石油与天然气地质, 44(6): 1405-1417. [Liu H M, Li Z, Bao Y S, Zhang S C, Wang W Q, Wu L B, Wang Y, Zhu R F, Fang Z W, Zhang S, Liu P, Wang M. 2023c. Geology of shales in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1405-1417]
- 刘惠民,张顺,王学军,张鹏飞,李军亮,王勇,魏晓亮,银燕,朱德燕. 2023d. 陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征:以济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段页岩为例. 地球科学, 48(1): 30-48. [Liu H M, Zhang S, Wang X J, Zhang P F, Li J L, Wang Y, Wei X L, Yin Y, Zhu D Y. 2023d. Types and characteristics of shale lithofacies combinations in continental faulted basins: a case study from Upper Sub-Member of Es4 in Dongying sag, Jiyang Depression. *Earth Science*, 48(1): 30-48]
- 刘旭东,彭军,许天宇,王豪楠. 2026. 细粒沉积岩物质来源及成因研究现状. 沉积学报, 44(4): 1238-1472. [Liu X D, Peng J, Xu T Y, Wang H N. 2026. Material characteristics and provenance research of fine-grained sedimentary rocks. *Acta Sedimentologica Sinica*, 44(4): 1238-1472]
- 陆加敏,林铁峰,付晓飞,付秀丽,言语,李瑛,徐亮. 2025. 松辽盆地北部青山口组泥页岩沉积古环境研究. 石油科学通报, 10(4): 647-665. [Lu J M, Lin T F, Fu X F, Fu X L, Yan Y, Li Y, Xu L. 2025. Study on the sedimentary paleoenvironment characteristics of shale in the Qingshankou Formation in the northern part of the Songliao Basin. *Petroleum Science Bulletin*, 10(4): 647-665]
- 马诚佑,康志强,张立浩,玄惠灵,农培杰,潘树芬,孔琪琪,朱义年,朱宗强. 2023. 方解石在不同水环境中的溶解与沉淀作用. 中国岩溶, 42(1): 29-39, 51. [Ma C Y, Kang Z Q, Zhang L H, Xuan H L, Nong P J, Pan S F, Kong Q Q, Zhu Y N, Zhu Z Q. 2023. Dissolution and precipitation of calcite in different water environments. *Car-sologica Sinica*, 42(1): 29-39, 51]
- 梅俊芳,梁超,操应长,韩豫. 2024. 页岩中的石英类型、成因及意义. 古地理学报, 26(2): 487-501. [Mei J F, Liang C, Cao Y C, Han Y. 2024. Types, genesis and significance of quartz in shales. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(2): 487-501]
- 甯濛,梁子珩,冯滢杰,夏攀,沈冰,文华国. 2025. 白云岩成因研究方法:回顾与展望. 沉积学报, 43(5): 1814-1856. [Ning M, Liang Z H, Feng Y J, Xia P, Shen B, Wen H G. 2025. Current methodologies and emerging trends in dolomite research: review and perspectives. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(5): 1814-1856]
- 牛君,王聪,梁飞. 2025. 绿泥石与浊沸石矿物特征及其对储集层物性的影响:以准噶尔盆地陆梁隆起西部下乌尔禾组为例. 新疆石油地质, 46(1): 13-21. [Niu J, Wang C, Liang F. 2025. Mineral features of chlorite and laumontite and their impacts on reservoir

- physical prop-erties; a case study of lower Wuerhe Formation in western Luliang uplift, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 46(1): 13–21]
- 庞小娇, 王贵文, 匡立春, 赵飞, 李红斌, 韩宗晏, 白天宇, 赖锦. 2023. 沉积环境控制下的页岩岩相组合类型及测井表征: 以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例. *古地理学报*, 25(5): 1156–1175. [Pang X J, Wang G W, Kuang L C, Zhao F, Li H B, Han Z Y, Bai T Y, Lai J. 2023. Logging evaluation of lithofacies and their assemblage under control of sedimentary environment: a case study of the Qingshankou Formation in Gulong sag, Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1156–1175]
- 彭军, 许天宇, 于乐丹. 2020. 东营凹陷沙河街组四段湖相细粒沉积特征及其控制因素. *岩性油气藏*, 32(5): 1–12. [Peng J, Xu T Y, Yu L D. 2020. Characteristics and controlling factors of lacustrine fine-grained sediments of the fourth member of Shahejie Formation in Dongying Depression. *Lithologic Reservoirs*, 32(5): 1–12]
- 蒲秀刚, 董姜畅, 柴公权, 宋舜尧, 时战楠, 韩文中, 张伟, 解德录. 2024. 渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段页岩高丰度有机质富集模式. *石油与天然气地质*, 45(3): 696–709. [Pu X G, Dong J C, Chai G Q, Song S Y, Shi Z N, Han W Z, Zhang W, Xie D L. 2024. Enrichment model of high-abundance organic matter in shales in the 2nd member of the Paleogene Kongdian Formation, Cangdong sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(3): 696–709]
- 钱迈平, 张宗言, 彭博, 马雪, 郑剑威, 陈荣, 余明刚. 2014. 浙江永康、东阳盆地白垩系湖相碳酸盐岩地层及其沉积环境. *地层学杂志*, 38(4): 390–401. [Qian M P, Zhang Z Y, Peng B, Ma X, Zheng J W, Chen R, Yu M G. 2014. Cretaceous lacustrine carbonate and its depositional environments in Yongkang and Dongyang basins, Zhejiang Province. *Journal of Stratigraphy*, 38(4): 390–401]
- 钱一雄, 武恒志, 周凌方, 董少峰, 王琼仙, 宋晓波, 邓美洲, 李勇. 2023. 深埋条件下微生物碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化: 以四川盆地西部中三叠统雷口坡组为例. *石油与天然气地质*, 44(1): 55–74. [Qian Y X, Wu H Z, Zhou L F, Dong S F, Wang Q X, Song X B, Deng M Z, Li Y. 2023. Diagenesis and porosity evolution of microbial carbonate rocks undergone a deep burial history: taking the Leikoupo Formation of Middle Triassic in western Sichuan Basin as an example. *Oil & Gas Geology*, 44(1): 55–74]
- 沈安江, 胡安平, 谭秀成, 乔占峰, 郑剑锋, 潘立银, 余敏. 2025. 白云岩与白云岩储层成因: 回顾、进展与展望. *石油与天然气地质*, 46(3): 740–758. [Shen A J, Hu A P, Tan X C, Qiao Z F, Zheng J F, Pan L Y, She M. 2025. Geneses of dolomites and dolomite reservoirs: review, advances, and prospects. *Oil & Gas Geology*, 46(3): 740–758]
- 宋金民, 王佳蕊, 刘树根, 李智武, 罗平, 江青春, 金鑫, 杨迪, 黄士鹏, 范建平, 叶玥豪, 王俊轲, 邓豪爽, 王斌, 郭嘉欣. 2024. 含海泡石层系泥质灰岩中自生黏土矿物的类型、组成与成岩演化过程: 以川东地区中二叠统茅口组茅一段为例. *石油勘探与开发*, 51(2): 311–322. [Song J M, Wang J R, Liu S G, Li Z W, Luo P, Jiang Q C, Jin X, Yang D, Huang S P, Fan J P, Ye Y H, Wang J K, Deng H S, Wang B, Guo J X. 2024. Types, composition and diagenetic evolution of authigenic clay minerals in argillaceous limestone of sepiolite-bearing strata: a case study of Mao-1 Member of Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(2): 311–322]
- 孙龙德, 贾承造, 张君峰, 崔宝文, 白静, 霍秋立, 徐兴友, 刘卫彬, 曾花森, 刘伟. 2024. 松辽盆地古龙页岩油重点地区资源潜力. *石油学报*, 45(12): 1699–1714. [Sun L D, Jia C Z, Zhang J F, Cui B W, Bai J, Huo Q L, Xu X Y, Liu W B, Zeng H S, Liu W. 2024. Resource potential of Gulong shale oil in the key areas of Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(12): 1699–1714]
- 孙中良, 李志明, 何文军, 冷筠滢, 祝敏敏, 刘得光, 王濡岳. 2025. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩源—储协同演化机理. *石油与天然气地质*, 46(6): 2012–2025. [Sun Z L, Li Z M, He W J, Leng J Y, Zhu Q M, Liu D G, Wang R Y. 2025. Mechanisms behind source rock-reservoir coevolution of shales in the Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(6): 2012–2025]
- 王飞宇, 冯伟平, 庞雄奇, 郭秋麟, 贾承造. 2023. 全油气系统生、排烃和运聚定量分析中的关键问题与解决途径. *石油学报*, 44(9): 1434–1444. [Wang F Y, Feng W P, Pang X Q, Guo Q L, Jia C Z. 2023. Key problems and solutions in quantitative analysis of hydrocarbon generation, expulsion, migration and accumulation in whole petroleum system. *Acta Petrolei Sinica*, 44(9): 1434–1444]
- 王冠民, 白玉, 蒋龙, 张云蛟, 孟维新, 任敏华, 熊周海. 2024. 牛庄洼陷沙四上一沙三下亚段细粒沉积岩成分与纹层结构的关系. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 48(2): 1–10. [Wang G M, Bai Y, Jiang L, Zhang Y J, Meng W X, Ren M H, Xiong Z H. 2024. Relationship between composition and lamination structure of fine-grained sedimentary rocks in Upper Fourth Member to Lower Third Member of Shahejie Formation in Niuzhuang Depression. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 48(2): 1–10]
- 王继远, 王斌, 邱岐, 李振明, 孙中良, 马龙杰. 2025. 沸石成因及其控储机制研究进展. *油气地质与采收率*, 32(1): 29–39. [Wang J Y, Wang B, Qiu Q, Li Z M, Sun Z L, Ma L J. 2025. Progress in zeolite origin and its control for reservoir development. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 32(1): 29–39]
- 王剑, 周路, 刘金, 马聪, 卞保力, 李啸, 张宝真. 2024. 湖相热液白云岩成因机理: 以准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组为例. *沉积学报*, 42(1): 130–141. [Wang J, Zhou L, Liu J, Ma C, Bian B L, Li X, Zhang B Z. 2024. Genetic mechanism of the huxiang hydrothermal dolomite: a case study of the Permian Fengcheng Formation in the Mahu sag, Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(1): 130–141]
- 王建功, 李江涛, 李翔, 高妍芳, 张平, 孙秀建, 白亚东, 左洛滔. 2023. 柴西地区新生界湖相微生物碳酸盐岩岩相组合差异性及控制因素. *岩性油气藏*, 35(3): 1–17. [Wang J G, Li J T, Li X, Gao Y F, Zhang P, Sun X J, Bai Y D, Zuo M T. 2023. Differences and controlling factors of lithofacies assemblages of Cenozoic lacustrine microbial carbonate rocks in western Qaidam Basin. *Lithologic Reser-*

- voirs, 35(3): 1-17]
- 王俊怀, 刘英辉, 万策, 朱筱敏, 王小军, 葛家旺, 张昕. 2014. 准噶尔盆地乌—夏地区二叠系风城组云质岩特征及成因. 古地理学报, 16(2): 157-168. [Wang J H, Liu Y H, Wan C, Zhu X M, Wang X J, Ge J W, Zhang X. 2014. Characteristics and origin of dolomitic tuff in the Permian Fengcheng Formation in Wu-Xia area of Junggar Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 16(2): 157-168]
- 王民, 关莹, 李传明, 刘洋, 刘薇, 徐健鹏, 李政, 卢双舫. 2018. 济阳拗陷沙河街组湖相页岩储层孔隙定性描述及全孔径定量评价. 石油与天然气地质, 39(6): 1107-1119. [Wang M, Guan Y, Li C M, Liu Y, Liu W, Xu J P, Li Z, Lu S F. 2018. Qualitative description and full-pore-size quantitative evaluation of pores in lacustrine shale reservoir of Shahejie Formation, Jiyang Depression. Oil & Gas Geology, 39(6): 1107-1119]
- 王昕尧, 金振奎, 郭氏恒, 王金艺, 任奕霖, 王凌, 王兆峰. 2021. 川东北下侏罗统大安寨段陆相页岩方解石成因. 沉积学报, 39(3): 704-712. [Wang X Y, Jin Z K, Guo Q H, Wang J Y, Ren Y L, Wang L, Wang Z F. 2021. Genesis of calcite in nonmarine shale of the Lower Jurassic Da'anzhai member, northeastern Sichuan. Acta Sedimentologica Sinica, 39(3): 704-712]
- 魏晓亮, 刘惠民, 李军亮, 张鹏飞, 王勇, 张顺. 2025. 咸化湖盆页岩自生石英特征及成因分析: 以东营凹陷沙四上亚段页岩为例. 地质论评, 71(S1): 305-308. [Wei X L, Liu H M, Li J L, Zhang P F, Wang Y, Zhang S. 2025. Characteristics and genetic analysis of authigenic quartz in saline lake basin shale: a case study of the Upper Es₄ shale in the Dongying sag. Geological Review, 71(S1): 305-308]
- 吴峰炜, 汪福顺, 吴明红, 尹然. 2009. 滇池、红枫湖沉积物中总磷、分态磷及生物硅形态与分布特征. 生态学杂志, 28(1): 88-94. [Wu F W, Wang F S, Wu M H, Yin R. 2009. Distributions of total phosphorus, phosphorus fractions, and biogenic silica in Dianchi Lake and Hongfeng Lake sediments. Chinese Journal of Ecology, 28(1): 88-94]
- 吴霞, 陈睿倩, 白昕. 2024. 松辽盆地三肇凹陷青山口组页岩中碳酸盐矿物成因研究. 石油实验地质, 46(6): 1226-1239. [Wu X, Chen R Q, Bai X. 2024. Genesis of carbonate minerals in shale of Qingshankou Formation, Sanzhao sag, Songliao Basin. Petroleum Geology and Experiment, 46(6): 1226-1239]
- 蒯克来, 张媛媛, 操应长, 宫剑飞, 李克, 林救若. 2023. 孔隙微观润湿性对页岩油赋存的控制作用: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组纹层状页岩为例. 石油勘探与开发, 50(2): 297-308. [Xi K L, Zhang Y Y, Cao Y C, Gong J F, Li K, Lin M R. 2023. Control of micro-wettability of pore-throat on shale oil occurrence: a case study of laminated shale of Permian Lucaogou Formation in Jimusar sag, Junggar Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 50(2): 297-308]
- 解德录, 赵贤正, 金凤鸣, 蒲秀刚, 韩文中, 时战楠, 张伟, 董雄英. 2024. 沧东凹陷深湖亚相纹层状页岩成因及页岩油可动性影响因素. 石油学报, 45(5): 804-816. [Xie D L, Zhao X Z, Jin F M, Pu X G, Han W Z, Shi Z N, Zhang W, Dong X Y. 2024. Genesis of deep lacustrine subfacies laminated shale and influence factors on shale oil mobility in Cangdong sag, Bohai Bay Basin. Acta Petrologica Sinica, 45(5): 804-816]
- 徐文强, 陈丽蓉, 黄求获, 申顺喜, 董太禄. 1989. 冲绳海槽沉积物中火山型石英颗粒表面的微结构. 海洋科学, 13(1): 26-28, 76-77. [Xu W Q, Chen L R, Huang Q H, Shen S X, Dong T L. 1989. Surface textures of volcanic quartz grains in the sediments of Okinawa trough. Marine Sciences, 13(1): 26-28, 76-77]
- 杨文霞, 桂丽蓉, 鲁雪松, 李传新, 姚诗华, 卓勤功, 陈玮岩. 2026. 准噶尔盆地南缘高泉地区清水河组储层中黄铁矿成因及地质意义. 地学前缘, 33(2): 386-398. [Yang W X, Gui L L, Lu X S, Li C X, Yao S H, Zhuo Q G, Chen W Y. 2026. Genesis and geological significance of pyrite in the Qingshuihe Formation reservoir in the Gaoquan area at the southern margin of the Junggar Basin. Earth Science Frontiers, 33(2): 386-398]
- 于炳松, 董海良, 韩彭彦. 2012. 微生物降解蒙脱石层间吸附有机质的实验研究. 岩石学报, 28(3): 949-960. [Yu B S, Dong H L, Han P Y. 2012. Experimental research on microbial degradation of organic matter adsorbed in smectite internal surface area in the inter-layer of the structure. Acta Petrologica Sinica, 28(3): 949-960]
- 张建国, 姜在兴, 刘立安, 袁方, 冯路尧, 李长昇. 2021. 渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组三段下亚段细粒沉积岩岩相特征与沉积演化. 石油学报, 42(3): 293-306. [Zhang J G, Jiang Z X, Liu L A, Yuan F, Feng L Y, Li C S. 2021. Lithofacies and depositional evolution of fine-grained sedimentary rocks in the lower submember of the Member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua sag, Bohai Bay Basin. Acta Petrologica Sinica, 42(3): 293-306]
- 张建国, 姜在兴, 刘鹏, 孔祥鑫, 葛云锦. 2022. 陆相超细粒页岩油储层沉积机制与地质评价. 石油学报, 43(2): 234-249. [Zhang J G, Jiang Z X, Liu P, Kong X X, Ge Y J. 2022. Deposition mechanism and geological assessment of continental ultrafine-grained shale oil reservoirs. Acta Petrologica Sinica, 43(2): 234-249]
- 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 潘立银, 胡安平, 张杰. 2018. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因. 石油勘探与开发, 45(6): 923-935. [Zhao W Z, Shen A J, Qiao Z F, Pan L Y, Hu A P, Zhang J. 2018. Genetic types and distinguished characteristics of dolomite and the origin of dolomite reservoirs. Petroleum Exploration and Development, 45(6): 923-935]
- 赵文智, 卞从胜, 李永新, 刘伟, 董劲, 王坤, 曾旭. 2023. 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. 石油勘探与开发, 50(1): 12-23. [Zhao W Z, Bian C S, Li Y X, Liu W, Dong J, Wang K, Zeng X. 2023. Organic matter transformation ratio, hydrocarbon expulsion efficiency and shale oil enrichment type in Chang 73 shale of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 50(1): 12-23]
- 赵贤正, 金凤鸣, 蒲秀刚, 罗群, 周立宏, 姜文亚, 董雄英, 时战楠, 韩文中, 张伟, 汪虎. 2022. 油气聚集链: 内涵、特征与勘探实践: 以渤海湾盆地冀中、黄骅拗陷为例. 地学前缘, 29(6): 120-135.

- [Zhao X Z, Jin F M, Pu X G, Luo Q, Zhou L H, Jiang W Y, Dong X Y, Shi Z N, Han W Z, Zhang W, Wang H. 2022. "Hydrocarbon accumulation chain": concept, characteristics and application. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 120-135]
- 支东明, 谢安, 杨帆, 马强, 何昌松, 苟红光. 2024. 准噶尔盆地东部二叠系富烃凹陷全油气系统勘探前景. *地质力学学报*, 30(5): 781-794. [Zhi D M, Xie A, Yang F, Ma Q, He C S, Gou H G. 2024. Exploration prospects of the whole oil and gas system in the Permian hydrocarbon depressions in the Eastern Junggar Basin. *Journal of Geomechanics*, 30(5): 781-794]
- 支东明, 何文军, 秦志军, 甘仁忠, 郑孟林, 尤新才, 钱海涛, 赵龙. 2025. 全油气系统理论指导下的北疆地区油气勘探实践. *石油学报*, 46(7): 1235-1259. [Zhi D M, He W J, Qin Z J, Gan R Z, Zheng M L, You X C, Qian H T, Zhao L. 2025. Oil and gas exploration practice in northern Xinjiang area under the guidance of the Whole Petroleum System theory. *Acta Petrolei Sinica*, 46(7): 1235-1259]
- 周刚, 阎泽昊, 雷鼎丞, 李琦, 钟原, 严威, 张亚, 乔艳萍, 豆霜. 2024. 白云岩成因模式及其对碳酸盐岩优质储层发育的影响. *天然气勘探与开发*, 47(1): 1-11. [Zhou G, Yan Z H, Lei D C, Li Q, Zhong Y, Yan W, Zhang Y, Qiao Y P, Dou S. 2024. Genetic model of dolomite and its influence on development of high-quality carbonate reservoir. *Natural Gas Exploration and Development*, 47(1): 1-11]
- 周立宏, 陈长伟, 杨飞, 崔宇, 宋舜尧, 官全胜, 周凤春. 2023. 渤海湾盆地沧东凹陷页岩油效益开发探索与突破. *中国石油勘探*, 28(4): 24-33. [Zhou L H, Chen C W, Yang F, Cui Y, Song S Y, Guan Q S, Zhou F C. 2023. Research and breakthrough of benefit shale oil development in Cangdong sag, Bohai Bay Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(4): 24-33]
- 朱世发, 朱筱敏, 吴冬, 刘英辉, 李盼盼, 姜淑贤, 刘学超. 2014. 准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层中火山物质蚀变及控制因素. *石油与天然气地质*, 35(1): 77-85. [Zhu S F, Zhu X M, Wu D, Liu Y H, Li P P, Jiang S X, Liu X C. 2014. Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at north-western margin of Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 35(1): 77-85]
- Curran K J, Hill P S, Schell T M, Milligan T G, Piper D J W. 2004. Inferring the mass fraction of flocc-deposited mud: application to fine-grained turbidites. *Sedimentology*, 51: 927-944.
- Fischer S, Mörtz C M, Rosqvist G, Giesler R, Jarsjö J. 2023. Wide-spread microbial sulfate reduction (MSR) in northern European freshwater systems: drivers, magnitudes and seasonality. *Science of the Total Environment*, 889: 163764.
- James N P, Jones B. 2016. *Origin of Carbonate Sedimentary Rocks*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 1-8.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91: 475-499.
- Jiang Z X, Chen D Z, Qiu L W, Liang H B, Ma J. 2007. Source-controlled carbonates in a small Eocene half-graben lake basin (Shulu sag) in central Hebei Province, North China. *Sedimentology*, 54: 265-292.
- Kuznetsov V G. 2023. Trend and phasing of carbonate accumulation in the history of the Earth. *Doklady Earth Sciences*, 510: 449-452.
- Li Q, You X L, Jiang Z X, Wu S H, Zhang R F. 2020. Lithofacies and reservoir characterization of a source-controlled carbonate succession in a lacustrine rift basin, the Shulu sag of Bohai Bay Basin, East China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 192: 107180.
- Scanlon B R, Reedy R C, Male F, Walsh M. 2017. Water issues related to transitioning from conventional to unconventional oil production in the Permian basin. *Environmental Science & Technology*, 51(18): 10903-10912.
- Schieber J, Southard J, Thaisen K. 2007. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples. *Science*, 318: 1760-1763.
- Tourney J, Ngwenya B T. 2014. The role of bacterial extracellular polymeric substances in geomicrobiology. *Chemical Geology*, 386: 115-132.
- Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, Grujic D, Tiens A J. 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. *Nature*, 377: 220-222.
- Wan Q, Wang X L, Hu W X, Wan Y, Chou I M. 2024. Reaction pathway, mechanism and kinetics of thermochemical sulfate reduction: insights from *in situ* Raman spectroscopic observations at elevated temperatures and pressures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 381: 25-42.
- Zhang J G, Jiang Z X, Liang C, Wu J, Xian B Z, Li Q. 2016. Lacustrine massive mudrock in the Eocene Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China: nature, origin and significance. *Marine and Petroleum Geology*, 77: 1042-1055.

(责任编辑 李新坡)