

# 济阳拗陷奎山段石英砂岩母岩风化与有机酸溶蚀作用

李 博<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 2. 山东省非常规油气勘探开发重点实验室, 山东 东营 257015; 3. 东营市低渗透油层产能评价与增产改造重点实验室, 山东 东营 257015)

**摘要:**根据野外露头、岩心观察和岩石薄片资料,采用X线衍射、扫描电镜和粒度分析等测试方法,分析济阳拗陷奎山段石英砂岩成因、母岩风化与煤系有机酸溶蚀作用。结果表明:奎山段石英砂岩的形成过程受物源、古气候、沉积条件和有机酸溶蚀作用的影响,尤其是古气候控制下的风化作用和煤系有机酸溶蚀作用对长石矿物减少的效应明显。奎山段石英砂岩以岩屑石英砂岩为主,岩屑成分主要为花岗岩(溶蚀后呈多晶石英状),粒度以中砂至细砾为主,具有不等粒结构,颗粒分选差,呈次棱角状,表现为高成分成熟度和低结构成熟度。母岩主要来源于华北板块北缘的花岗岩,沉积相类型为曲流河砂坝。奎山段石英砂岩的形成受两期长石体积分数降低过程的影响:第一期与母岩区花岗岩风化作用相关,受控于奎山段沉积期的高CO<sub>2</sub>浓度和炎热多雨气候条件;第二期与三叠纪埋藏期煤系有机酸溶蚀作用相关,上古生界煤系地层生成的大量有机酸与相邻的曲流砂坝沉积石英砂岩相互作用,导致长石矿物强烈溶蚀。该结果为环渤海地区和华北地区上古生界石英砂岩的形成过程研究提供指导。

**关键词:**济阳拗陷;石英砂岩;奎山段;风化作用;有机酸溶蚀作用;长石溶蚀;古气候

**中图分类号:**TE122.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)05-0001-11

## 0 引言

石英砂岩储层在中国华北地区上古生界广泛分布,其中东部渤海湾盆地和西部鄂尔多斯盆地的二叠系上石盒子组最为典型<sup>[1-2]</sup>。目前,对上古生界石英砂岩的研究主要集中在物源分析、沉积作用、储集性能评估及成岩演化过程等方面<sup>[3-7]</sup>。在华北地区东部二叠系的研究中,认为物源主要来自华北板块北部的阴山古陆,部分来自南部的伏牛古陆<sup>[8]</sup>。华北地区石英砂岩主要形成于陆相曲流河沉积环境<sup>[9]</sup>,华北板块在晚古生代可能经历海侵过程<sup>[4,10]</sup>。储层控制因素研究主要集中在沉积相、不整合面和有机酸溶蚀作用等方面<sup>[11-13]</sup>,对石英砂岩中高石英质碎屑组成因方面的报道较少。

长石风化过程受多重动力学因素控制,在表生环境中,气候条件(高温湿热环境与强降水背景)通过增强水解反应速率显著促进长石分解<sup>[14]</sup>;大气CO<sub>2</sub>浓度升高加速硅酸盐矿物的碳酸化反应,形成次生黏土矿物并释放阳离子<sup>[15]</sup>;微生物活动通过质子交换和配体络合机制选择性破坏矿物晶格<sup>[16]</sup>。不同长石亚类的抗风化能力存在显著差异,在斜长石体系中,钙长石Ca<sup>2+</sup>具有较高的迁移活性,易发生解离;富钾端元的钾长石K<sup>+</sup>与结构铝硅酸盐的强键合作用表现更强的化学稳定性<sup>[17]</sup>。在成岩演化过程中,埋藏条件下的温度-压力场变化显著改变长石的溶蚀动力学,随地层温度升高(通常大于80℃),有机质热演化产生的羧酸与CO<sub>2</sub>等酸性流体的活性增强,促使钾长石发生选择性溶蚀并形成次生孔隙<sup>[18]</sup>。在开放体系下,酸性流体对长石的溶蚀作用使储层孔隙度提升2%~5%,且主要发育半径为10μm级的溶蚀孔喉,有效改善储层渗透性<sup>[19-20]</sup>。这一过程对深层-超深层储层质量的演化具有建设性,为次生孔隙型油气藏勘探提供依据。

济阳拗陷二叠系上石盒子组石英砂岩是上古生界潜山重要的储层类型之一。济阳拗陷Hgxl01等并二叠系石英砂岩储层的勘探取得突破,表明上古生界潜山具有良好的油气勘探潜力。由于成岩期长、构造活动频繁、储层成因复杂,储层主控因素不明确,特别是石英砂岩高石英质组成因问题成为制约济阳拗

收稿日期:2024-12-28;编辑:陆雅玲

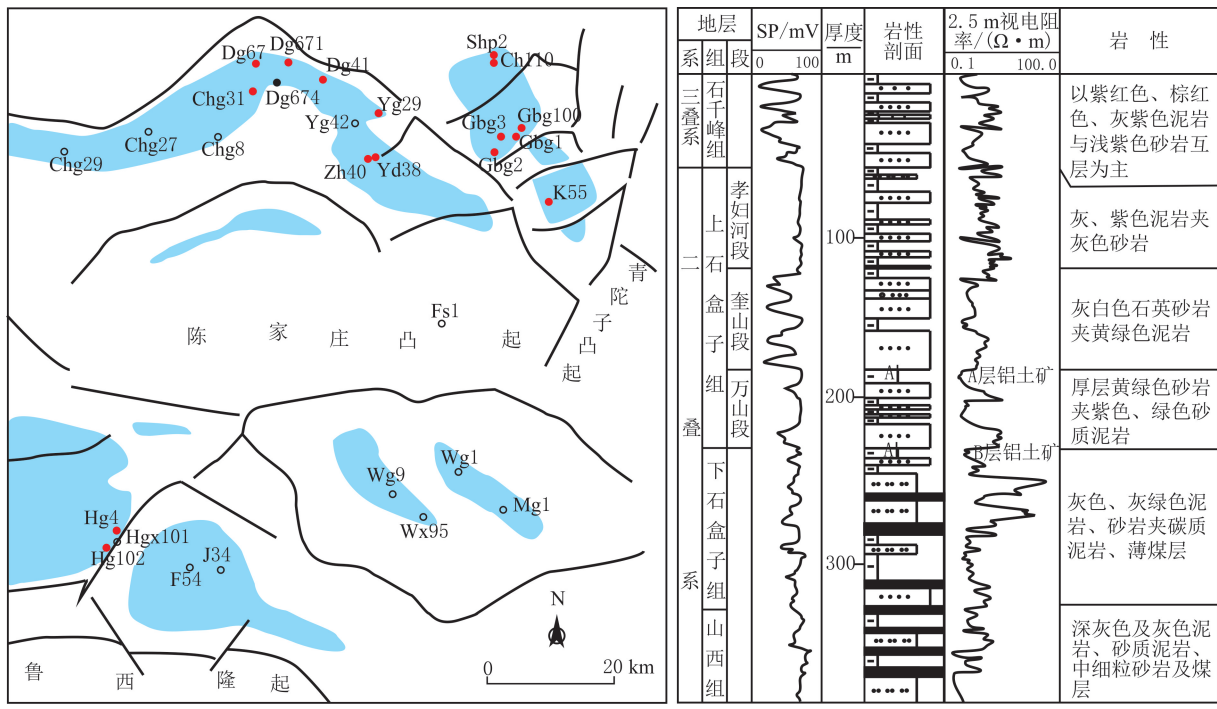
基金项目:国家科技重大专项(2024ZD14001)

作者简介:李 博(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事油气储层综合方面的研究。

陷上古生界潜山油气勘探的关键问题。笔者采集济阳拗陷二叠系 311 个岩心样品,进行岩石薄片、粒度、X 线衍射和扫描电镜等分析测试,从物源、古气候、沉积条件和有机酸溶蚀作用等方面探讨研究区石英砂岩成因,为环渤海地区和华北地区上古生界石英砂岩的形成过程研究提供参考。

### 1 区域地质概况

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南缘、郯庐断裂带西侧,是在晚白垩世末期由伸展裂陷作用形成的断陷盆地。该拗陷南界为鲁西隆起,东临郯庐断裂带,北与西被埕宁隆起带环绕,总面积约为  $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$  (见图 1(a))。自古生代起,华北板块向北推移与北部的阴山古陆发生碰撞,伴随多期火山活动为研究区上古生界的形成提供重要物源<sup>[21]</sup>。自石炭系沉积时期起,海水逐渐从华北地区向南退去<sup>[8]</sup>。华北板块东部依次沉积上古生界石炭系本溪组和太原组的海陆交互相沉积层,以及二叠系山西组、下石盒子组和上石盒子组的陆相沉积层<sup>[4]</sup>。上古生界本溪组、太原组、山西组和下石盒子组含有丰富的煤层,一般厚度为 2~4 m。上石盒子组自下而上可划分为万山段、奎山段和孝妇河段。其中,奎山段厚度一般为 50~100 m,主要由砂岩和杂色泥岩组成,砂岩以高含量的石英碎屑和石英质岩屑为显著特征。在奎山段底部和下石盒子组顶部,分别发育 A 层和 B 层铝土矿(见图 1(b))。济阳拗陷上古生界沉积后,受印支期、燕山期和喜马拉雅期等构造运动的抬升、风化淋滤和剥蚀作用的影响,遭受不同程度的剥蚀,残余地层以条带状和断块状分布。



(a) 上古生界构造单元与上石盒子组奎山段分布

(b) 地层综合柱状图



图 1 济阳拗陷二叠系上古生界构造单元与上石盒子组奎山段分布、地层综合柱状图

Fig. 1 Composite stratigraphic column of Permian system in Jiyang Depression with distribution of Upper Paleozoic tectonic units and Kuishan Member of Upper Shihezi Formation

### 2 样品与测试方法

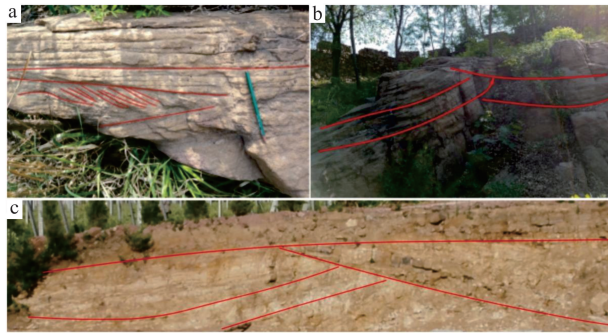
分析鲁中淄博博山上古生界露头区和济阳拗陷多口井岩心的沉积结构、构造特征。根据济阳拗陷奎

山段砂岩分布及相邻层位储层特征, 选取 22 口井 311 个样品进行分析测试(见图 1)。其中, 岩石薄片(167 个样品), 采用 ZEISS 多功能显微镜进行岩石矿物鉴定、成岩作用分析; X 线衍射全岩和黏土分析(41 个样品), 采用日本理学 D/max-2500pc X 线衍射仪进行分析测试; 扫描电镜(24 个样品), 采用美国 FEI Quanta450FEG 进行分析测试; 阴极发光(35 个样品), 采用英国剑桥 CL8200MK5-2 进行分析测试; 粒度分析(44 个样品), 采用英国马尔文 MS 2000 激光粒度分析仪进行分析测试。分析测试由山东省非常规油气勘探开发重点实验室完成。

### 3 储层特征

#### 3.1 沉积特征

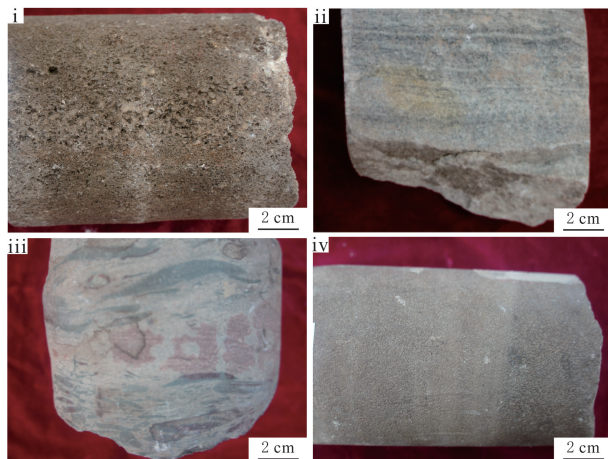
鲁中淄博博山上古生界露头区与济阳拗陷地理位置接近, 在岩石组分、结构和沉积构造上具有较高的相似性。野外露头观察表明, 奎山段主要发育灰白色至灰色的厚至巨厚粗砂岩, 砂体呈典型的“上平下凸”河道形态特征。砂泥厚度比介于 1 : 1.5 ~ 1 : 1, 为曲流河沉积环境, 发育楔状交错层理(见图 2(a))、大型槽状交错层理(见图 2(b-c))等典型沉积构造, 属于点砂坝微相。济阳拗陷奎山段岩心沉积特征与露头区的相似, 主要以粗砂岩为主, 底部可见含砾巨粒砂岩。岩心观察到的沉积现象包括块状层理、平行层理和滞留沉积等(见图 3(a))。粒度分析显示, 奎山段砂岩的颗粒分选较差, 概率累积曲线呈明显的三段式特征, 粒度频率分布特征为正偏态、单峰不对称形式(见图 3(b)), 为典型的陆相河流沉积。奎山段砂岩分选和磨圆较差, 与典型的海相石英砂岩的不同<sup>[22-23]</sup>。



(a) 楔状交错层理, 点砂坝, 博山露头; (b) 大型槽状交错层理, 博山露头; (c) 大型槽状交错层理, 点砂坝, 博山露头

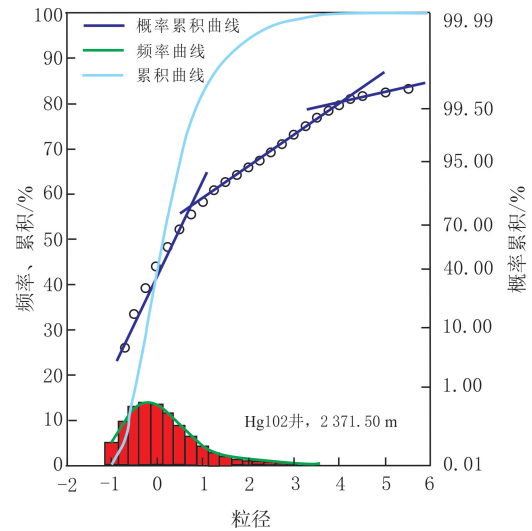
图 2 淄博博山上石盒子组奎山段露头沉积特征

Fig. 2 Outcrop sedimentary characteristics of Kuishan Member of Upper Shihezi Formation in Boshan, Zibo



(i) 褐灰色含砾巨粒砂岩, Shp2井, 2 003.07 m; (ii) 灰色—褐灰色粗砂岩, 块状构造, Chg31井, 2 240.10 m; (iii) 灰色中—粗砂岩, 平行层理, Dg67井, 2 198.64 m; (iv) 含泥砾灰色中砂岩, 滞留沉积, Y135井, 4 165.20 m

(a) 岩心沉积特征



(b) 粒度特征

图 3 济阳拗陷奎山段岩心沉积特征及粒度特征

Fig. 3 Sedimentary and grain size characteristics of the core of Kuishan Member in Jiyang Depression

### 3.2 岩石学特征

济阳拗陷奎山段砂岩以高成分成熟度岩屑石英砂岩为主(见图 4),其次为岩屑砂岩。岩石学特征表现为石英碎屑体积分数为 50.0%~96.0%,平均为 77.3%,其中单晶石英占比突出,颗粒表面洁净且晶型完整(见图 5(a))。碎屑石英普遍发育次生加大边,通过共轴生长形成典型石英次生加大边,碎屑核心与加大边之间有明显的黏土分隔线(见图 5(d))。长石碎屑体积分数为 0~30.0%,平均为 2.0%,以聚片双晶的酸性斜长石为主。岩屑体积分数为 2.0%~42.0%,平均为 21.3%,主要为多晶石英。胶结系统以硅质—黏土质组合为主,石英次生加大边与自生石英构成主要硅质胶结,体积分数为 0~40.0%,平均为 4.2%,高岭石以书页状、蠕虫状形态选择性交代长石或充填孔隙,晶间孔发育显著。碳酸盐胶结(菱铁矿、方解石)呈微量分布,多表现为对黏土矿物的交代作用(见图 5(e-f))。奎山段砂岩在结构上呈低成熟度特征(以中砂—细砾级为主),分选差,为次棱角状,但高的石英纯度与硅质胶结作用共同构成石英砂岩的典型鉴定标志。

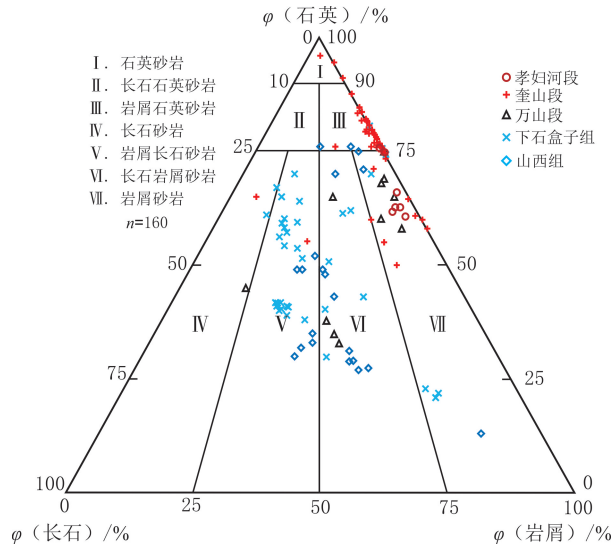
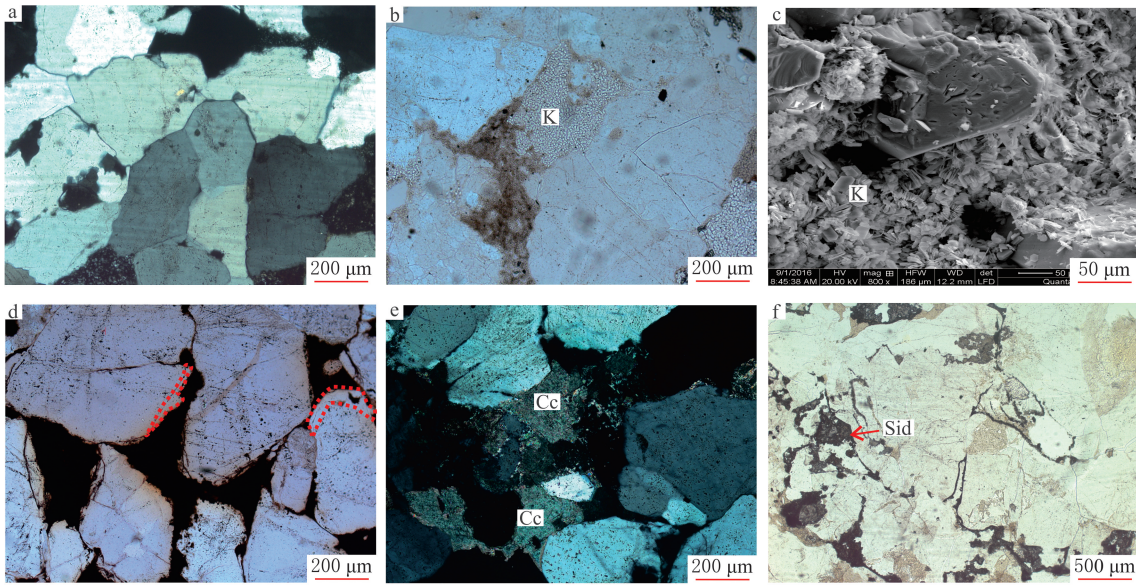


图 4 济阳拗陷二叠系各组段砂岩类型三端元图  
Fig. 4 The classification triangle chart of Permian sandstone in Jiyang Depression



(a) 碎屑颗粒, 石英碎屑及多晶石英, Ch110井, 1 907.15 m; (b) 粒间充填高岭石(K), 单偏光, Ch110井, 1 908.62 m; (c) 粒间充填高岭石(K), Hg102井, 2 381.40 m; (d) 自生石英加大现象, 单偏光, Chg31井, 2 225.10 m; (e) 粒间胶结方解石(Cc), 正交偏光, D675井, 3 139.70 m; (f) 粒间胶结菱铁矿(Sid), Ch110井, 1 910.52 m

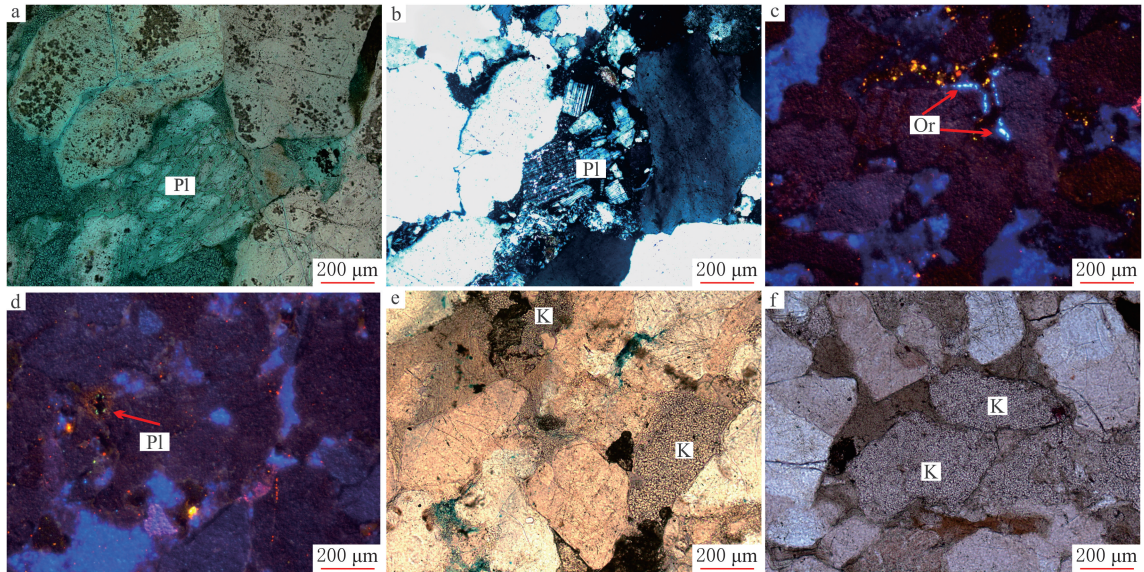
图 5 济阳拗陷上古生界奎山段砂岩碎屑及填隙物微观照片

Fig. 5 Micrograph photo of Upper Paleozoic sandstone fragments and fillings in Jiyang Depression

### 3.3 碎屑特征

奎山段砂岩表现明显的低长石特征。镜下观察表明,原岩中的长石碎屑在埋藏作用后发生强烈溶蚀作用(见图 6(a))。部分溶蚀的长石在后续埋藏压实作用下发生破碎现象,表明溶蚀作用非常强烈,长石溶蚀活动早于强压实作用(见图 6(b))。阴极发光薄片观察表明,在碎屑颗粒周缘存在溶蚀残余的斜长石和钾长石碎屑(见图 6(c-d)),是岩石早期存在长石的直接证据。在与奎山段物源基本一致的上石盒子组

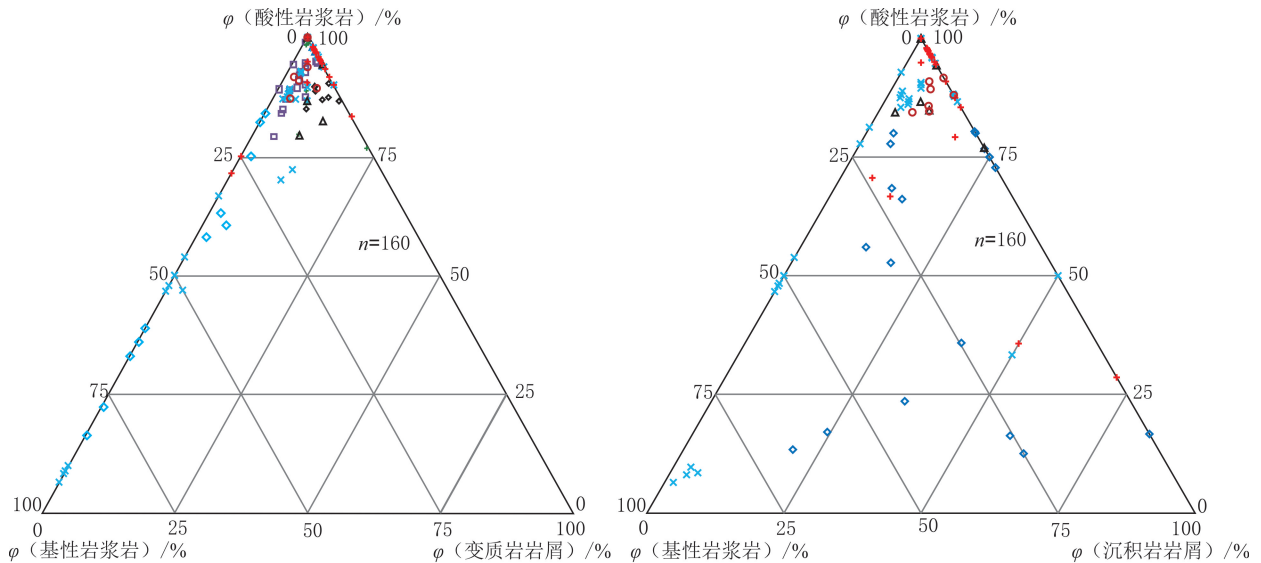
孝妇河段和下石子组中, 泥质杂基含量较高的储层部分呈“碎屑状”的高岭石, 长石埋藏作用后碎屑颗粒整体溶蚀呈“同像异质”现象(见图 6(e-f))。奎山段砂岩花岗岩岩屑以石英质为主, 表现为多晶石英的特征, 与变质岩石英岩岩屑的区别在于石英晶体接触边界比较平直, 石英颗粒不具有拉伸等变形特征; 在阴极发光特征上, 主要发蓝紫色光, 为高温岩浆岩成因<sup>[24]</sup>。岩石薄片分析表明, 济阳凹陷二叠系岩屑类型可分为酸性岩浆岩(花岗岩)、基性喷出岩、沉积岩和变质岩四大类。分析不同组段岩屑成分三角图(见图 7), 二叠系物源存在由沉积岩、基性喷出岩、变质岩向花岗岩迁移过程。



(a) 溶蚀残余斜长石(Pl), 万山段, 单偏光, D677井, 2 875.00 m; (b) 斜长石(Pl)溶蚀后压实破碎, 山西组, 正交偏光, D671井, 3 093.44 m; (c) 钾长石(Or)溶蚀残余颗粒发亮蓝色光, 奎山段, 阴极发光, Cg31井, 2 240.10 m; (d) 斜长石(Pl)溶蚀残余发育黄绿色光, 奎山段, 阴极发光, Shp2井, 2 104.61 m; (e) 长石碎屑高岭石(K)化后呈碎屑状, 下石子组, 单偏光, Yg71-41井, 1 780.70 m; (f) 长石碎屑高岭石(K)化后呈碎屑状, 孝妇河段, 单偏光, Gbg3井, 4 086.85 m

图 6 济阳拗陷上古生界砂岩长石溶蚀、破碎及高岭石化特征显微照片

Fig. 6 Micrograph of dissolution, fragmentation and kaolinization characteristics of feldspar in the sandstone of Upper Paleozoic in Jiyang Depression



(a) 酸性岩浆岩—基性岩浆岩—变质岩岩屑

(b) 酸性岩浆岩—基性岩浆岩—沉积岩岩屑

○孝妇河段 + 奎山段 ▲万山段 ×下石子组 ◆山西组

图 7 济阳拗陷二叠系各组段岩屑类型三端元图

Fig. 7 The classification triangle chart of Permian rock cuttings in Jiyang Depression

## 4 石英砂岩成因

石英砂岩中高石英质碎屑的形成通常涉及多种成因方式,主要包括高石英质物源、海滩反复冲刷作用及远距离搬运等<sup>[25]</sup>。从母岩特征、古气候、沉积条件和有机酸溶蚀作用等方面,分析济阳拗陷奎山段砂岩中高石英质碎屑的成因。

### 4.1 母岩特征

母岩的矿物组成对石英含量有直接影响。早石炭世晚期,华北板块逐渐向北与阴山古陆拼合在华北板块北缘,发育大量的花岗岩类侵入体<sup>[26]</sup>,为华北地区上古生界提供主要的物源。根据济阳拗陷及邻区二叠系泥岩的稀土元素发育模式、岩相古地理证据,渤海湾盆地上石盒子组的物源主要来自华北板块北缘的阴山古陆,母岩类型为花岗岩<sup>[21,27]</sup>。分析华北东部淄博博山地区奎山段底部 A 层铝土矿成因,铝土矿矿层和顶底板中碎屑锆石大部分具有明显的震荡环带特征<sup>[28]</sup>。碎屑锆石年龄和 Hf 同位素参数表明,铝土矿和顶底板物源来自岩浆活动的产物。岩屑成分三角图表明,奎山段母岩类型主要为花岗岩,与文献<sup>[27-28]</sup>的结果一致。

花岗岩母岩中的石英含量较高,石英稳定性和抗风化能力强,在风化和侵蚀过程中容易产生大量的石英质碎屑。长石矿物体积分数一般约为 40%,根据风化、搬运规律,沉积区存在长石碎屑。如济阳拗陷母岩为太古界花岗岩的古近系沙河街组砂岩,现今碎屑长石体积分数约为 40%,与母岩特征一致。奎山段砂岩碎屑矿物中长石体积分数极低,表明花岗岩母岩中的长石矿物可能经历大量消耗。

### 4.2 古气候

古气候条件影响岩石化学风化进程及硅质碎屑富集。在炎热潮湿环境中,加速水解、氧化反应(长石类矿物分解为黏土矿物)与生物—矿物协同作用,促使抗风化性强的石英碎屑选择性保留。同时,充沛的降水通过淋滤效应移除不稳定组分,形成高成熟度的石英砂岩<sup>[29]</sup>。晚二叠世,华北陆块在北纬  $0^{\circ}\sim 30.0^{\circ}$  之间,南邻古特提斯洋,处于热带气候带<sup>[30]</sup>。上石盒子组沉积时期属于早空谷阶,气候为半湿润<sup>[31]</sup>,大气中  $\text{CO}_2$  浓度较高<sup>[32,33]</sup>,与上覆孙家沟组(石千峰组下部)存在 20 Ma 的沉积间断<sup>[31]</sup>。奎山段沉积时期,古气候条件受“巨型季风气候”的影响,华北板块形成强烈的季节性降水和高温干旱气候<sup>[34]</sup>,阵发性洪水作用是奎山段砂岩具有低结构成熟度的主要原因;旱季高温干旱造成水位下降,形成紫色等杂色泥岩沉积。高温、季节性降水及较高的  $\text{CO}_2$  浓度是源区长石物理风化、化学风化和生物风化作用的重要因素<sup>[13]</sup>。旱季高温昼夜温差条件有利于母岩物理风化作用;在高浓度  $\text{CO}_2$  条件下,水体  $\text{CO}_2$  分压增加,流体 pH 降低,影响长石矿物的溶蚀。雨季充沛的降水条件有利于矿物离子溶解及搬运,促进溶蚀反应的进行。长石风化淋滤溶蚀效应明显,钾长石表现为边缘港湾状溶蚀和内部溶蚀缝形成,斜长石沿双晶方向发生更强烈的溶蚀。溶蚀产物主要为高岭石等黏土矿物,伴随  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子浓度的显著变化<sup>[35]</sup>。此外,高温湿热环境促进生物风化作用,参与长石矿物的风化<sup>[13]</sup>。热带环境有利于植物、微生物繁盛,进一步促进长石的风化蚀变。

在深圳南山公园采集中生代花岗岩样品,采集点位于北纬  $22.5^{\circ}$ ,与二叠纪华北板块纬度相近。手标本观察显示,样品风化强烈。X 线衍射黏土分析表明,黏土矿物中高岭石质量分数大于 40%,与中生代花岗岩原始长石质量分数相比,推测地表有质量分数为 30%左右的长石发生风化作用(见图 8);位于北纬  $36.0^{\circ}$ 左右的鲁西地区新太古代花岗岩露头岩石表面新鲜,黏土矿物质量分数为 2%(见图 9),风化作用强度较弱,古气候在长石的风化溶蚀过程中起重要作用<sup>[34,36]</sup>。

华北地区上石盒子组奎山段底部和下石盒子组顶部分别发育沉积型的 A 层和 B 层铝土矿<sup>[37]</sup>,是强风化作用的证据之一。花岗岩母岩经过强烈风化,在水中形成大量胶体并在沉积过程中沉淀富集,形成现今具有高有序度、高结晶度特征的高岭石。

### 4.3 沉积条件

沉积作用是控制碎屑岩特征的关键过程。在强烈的水动力条件下,如海滩反复冲刷作用可有效分离和搬运石英质碎屑,形成高石英质含量的砂岩。石英砂岩的成因多与波浪作用有关。华北地区寒武系馒头组石英砂岩,发育小型板状交错层理、小型槽状交错层理、浪成波痕等典型沉积构造,为滨岸带沉积<sup>[38]</sup>。

梁吉坡<sup>[3]</sup>分析山东西南部单县二叠纪奎山段砂岩沉积环境,砂岩沉积受频繁的海侵与海退影响。受上古生界华北地区向西南方向逐渐海退的影响<sup>[4,9,21]</sup>,单县地区海侵的频次和程度较强,西北方向的济阳拗陷受海侵的影响非常小。在济阳拗陷勘探中,未发现支持海相沉积的结构构造、古生物和微量元素等证据。晚古生代,随华北板块东部逐渐向南海退,奎山段沉积时期的海侵作用主要发生在华北板块中南部。即使在奎山段沉积时期存在短暂的海侵作用,也对长石组分含量的影响有限。根据露头区、岩心沉积构造和粒度分析,济阳拗陷奎山段为曲流砂坝沉积,与文献<sup>[2]</sup>的结果一致。沉积水动力条件不是奎山段高石英质成分形成的原因,水动力条件对沉积物的搬运和沉积有重要作用,但在济阳拗陷奎山段沉积作用并非高石英质成分形成的主要因素。

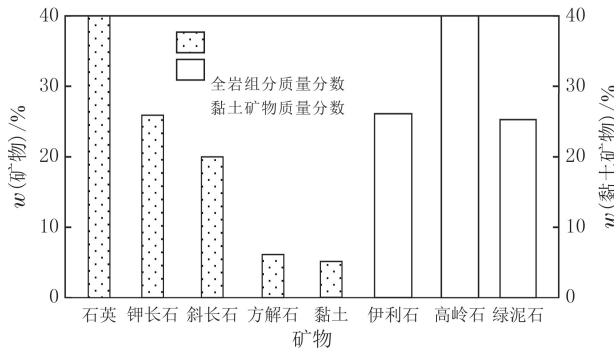


图8 深圳南山公园中生代花岗岩X线衍射全岩及黏土矿物组成

Fig. 8 X-ray diffraction (XRD) analysis of whole-rock and clay mineral composition of Mesozoic granite from Nanshan Park, Shenzhen

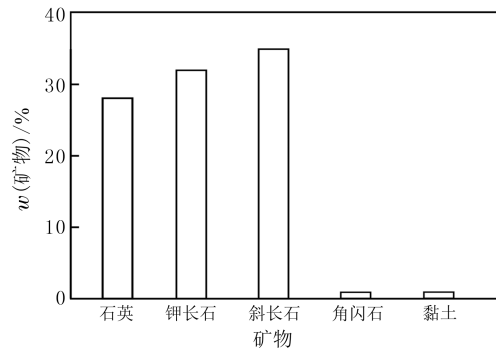


图9 鲁西太古界二长花岗岩全岩矿物组成

Fig. 9 Mineral composition of whole-rock of the archaean Erzogranite outcrop in Western Shandong

#### 4.4 有机酸溶蚀作用

有机酸溶蚀作用是影响砂岩中长石含量的重要因素<sup>[39]</sup>,间接影响石英质碎屑含量。在煤系地层的影响下,有机酸溶蚀作用可以明显降低长石含量,从而提高石英质碎屑含量。在奎山段砂岩的形成过程中,有机酸溶蚀作用发挥重要作用。奎山段及相邻地层中长石矿物的“同像异质”和溶蚀压实破碎现象,是埋藏后发生溶蚀过程的直接证据。古近系沙河街组烃源岩排出的有机酸发生溶蚀,长石溶蚀表现非均质性,通常呈港湾状和沿解理缝溶蚀等特征。鲁中淄博博山地区的奎山段砂岩与济阳拗陷特征类似,表明长石溶蚀活动发生时间较早。郑浚茂等分析华北地区石炭系煤系地层的煤及淡水—半咸水泥岩中的有机酸量,表明煤层产生的有机酸量是泥页岩的数百倍<sup>[40]</sup>,为长石矿物的溶蚀创造有利条件。济阳拗陷石炭系和二叠系广泛分布煤层和暗色泥岩,其中煤层累计厚度大于35 m,为煤系有机酸的生成提供物质基础。鄂尔多斯盆地上古生界存在类似的作用过程<sup>[41]</sup>。

济阳拗陷中生界与上古生界之间的剥蚀量恢复结果存在差异<sup>[42]</sup>,研究区石炭系煤系地层在三叠纪初次埋深超过3 000 m<sup>[43]</sup>,镜质体反射率为0.8%<sup>[44]</sup>,达到煤系地层大规模排出有机酸的条件<sup>[42,45]</sup>,与长石早期溶蚀特征相吻合。对山西组、下石盒子组和上石盒子组41个样品进行X线衍射测试。其中,高岭石质量分数可以近似表示长石溶蚀程度,去除高岭石的黏土质量分数可以近似表示泥质杂基含量。高岭石质量分数与去除高岭石的黏土质量分数呈明显的负相关关系,长石溶蚀程度与去除高岭石的黏土质量分数呈正相关关系(见图(10-11))。沉积水动力条件直接控制原始沉积期粒间泥质杂基含量,从而影响储层的原始物性及后续流体交换过程。渗透性较好的砂层杂基含量低,储层物性好,有机酸容易进入砂层,更多长石被溶蚀;泥质杂基含量较高的砂层,储层物性差,有机酸难以进入,流体交换速率慢,从而保留较多长石。

#### 4.5 砂岩形成过程

石炭纪—二叠纪,华北板块向北漂移至北纬 $0^{\circ}\sim 20.0^{\circ}$ ,处于“巨型季风气候”区域,大气中 $\text{CO}_2$ 体积分数较高,约为15%,促进奎山段源区花岗岩母岩中大部分长石风化蚀变,蚀变产物主要以高岭石为主。济阳拗陷奎山段为曲流河沉积,具有强烈的水动力作用,导致粒间杂基含量低。分析黄骅拗陷、济阳拗陷、

淄博博山及山东单县等地区奎山段砂岩中长石含量,搬运距离与长石含量相关关系不强,表明沉积水动力条件和搬运距离对长石含量的影响不显著。三叠纪,随埋深增加,石炭系煤系地层开始排出大量有机酸,有机酸分布广泛。奎山段砂体杂基含量低,渗透性好,煤系有机酸更易进入,导致奎山段残存的长石大部分被有机酸溶蚀,形成目前奎山段砂岩中高石英及石英质岩屑、低长石的基本特征。印支—喜马拉雅运动期,济阳拗陷经历多次构造抬升事件,其中奎山段受区域性不整合面的影响,沉积后经历多次表生风化淋滤作用。奎山段储层经历两期长石含量降低的过程,普遍缺乏可溶性矿物(碳酸盐胶结物、长石颗粒),导致大气淡水淋滤作用缺乏有效的溶蚀对象,从而削弱表生风化作用对储层的改造效果。

鄂尔多斯盆地上古生界石盒子组和珠一坳陷恩平组发育类似高石英或多晶石英砂岩<sup>[46]</sup>,母岩类型主要以花岗岩为主。研究济阳拗陷奎山段砂岩成因对两个地区具有借鉴意义,有助于理解类似地质背景下富石英砂岩的形成过程。总体上,奎山段砂岩的形成是一个多阶段、多因素共同作用的结果,包括季风气候和高 CO<sub>2</sub> 体积分数的母岩风化,以及三叠纪煤系有机酸的溶蚀作用,共同塑造奎山段砂岩的高石英质特征。

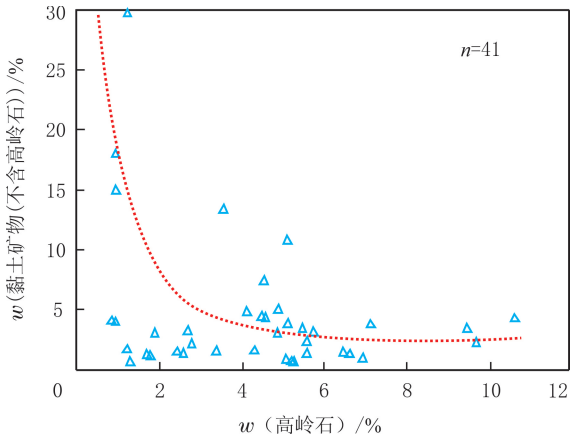


图 10 高岭石—黏土矿物(不含高岭石)质量分数关系  
Fig. 10 Kaolinite vs. clay content (in the absence of Kaolinite)

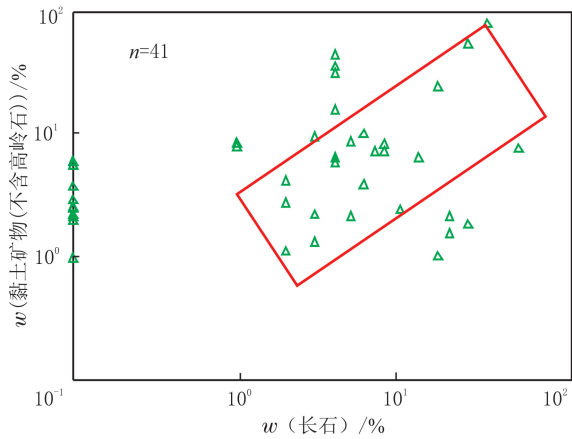


图 11 长石—黏土矿物(不含高岭石)质量分数关系  
Fig. 11 Keldspar vs. clay content (in the absence of Kaolinite)

## 5 结论

(1) 济阳拗陷上石盒子组奎山段石英砂岩具有显著的高成分成熟度与低结构成熟度的双重特征。岩石类型以岩屑石英砂岩为主,石英碎屑占绝对优势,单晶石英颗粒表面洁净、晶型完整,普遍发育次生加大现象,形成以硅质胶结为主的胶结体系。岩屑成分以花岗岩溶蚀形成的多晶石英为主,粒径范围为中砂至细砾,分选差,为次棱角状,呈不等粒结构。沉积环境为曲流河砂坝,砂体厚度大,发育楔状交错层理、大型槽状交错层理等典型河流相沉积构造。奎山段砂岩中长石含量极低,黏土矿物以高岭石为主,经历强烈的风化和溶蚀作用。

(2) 奎山段砂岩高石英碎屑的形成,是母岩风化与埋藏期有机酸溶蚀双重减少长石含量的结果。第一期长石含量减少,晚二叠世,华北板块处于热带季风气候带,高温多雨、高 CO<sub>2</sub> 体积分数的环境加速母岩花岗岩中长石的水解、化学风化和生物风化作用,导致长石分解为黏土矿物(高岭石)并随地表径流流失,抗风化能力强的石英碎屑富集。第二期长石含量减少,三叠纪,石炭系煤系地层生成有机酸并随流体运移至奎山段砂岩,优先溶蚀残余长石矿物,进一步降低含量。溶蚀作用受储层物性控制,渗透性较好的砂层因有机酸易侵入而长石溶蚀更彻底。两期作用叠加,形成目前高石英质碎屑与低长石的岩石学特征。

(3) 原始沉积水动力条件(杂基含量差异)导致溶蚀作用空间分布不均,渗透性较好的砂层溶蚀更彻底,形成高孔渗条带;泥质杂基含量高的区域溶蚀受限,储层物性较差。母岩风化和酸性流体溶蚀双重作用导致埋藏后多期表生风化作用缺乏可溶矿物对象,对储层改造作用有限。

## 参考文献(References):

- [1] 赵贤正, 蒲秀刚, 姜文亚, 等. 黄骅拗陷古生界含油气系统勘探突破及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 621-632.  
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, JIANG Wenya, et al. An exploration breakthrough in Paleozoic petroleum system of Huanghua Depression in Dagang Oilfield and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 621-632.
- [2] 马帅, 王永诗, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地中一晚二叠世河流相沉积演化特征及砂体展布规律[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(4): 1-11.  
MA Shuai, WANG Yongshi, PU Xiugang, et al. Sedimentary evolution and sandstone distribution of Middle-Late Permian fluvial facies in Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4): 1-11.
- [3] 梁吉坡. 山东西部单县地区二叠纪奎山组砂岩沉积环境探讨[J]. 山东国土资源, 2018, 34(8): 13-18.  
LIANG Jipo. Study on the sedimentary environment of Permian Kuishan sandstone in Shanxian County in Western Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(8): 13-18.
- [4] 侯中帅, 陈世悦, 郭宇鑫, 等. 华北中南部博山地区上古生界沉积相与沉积演化特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 731-742.  
HOU Zhongshuai, CHEN Shiyue, GUO Yuxin, et al. Sedimentary facies and their evolution characteristics of Upper Paleozoic in Zibo Boshan Area, central and southern region of North China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 731-742.
- [5] 刘琴琴, 陈桂华, 陈晓智, 等. 鄂尔多斯盆地L地区上古生界上石盒子组物源特征及其对储层的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(8): 1094-1101.  
LIU Qinqin, CHEN Guihua, CHEN Xiaozhi, et al. Characteristic of provenance and its impact on reservoir quality of Upper Shihezi Formation, L Block, Ordos Basin[J]. Cnooc Research Institute, 2018, 29(8): 1094-1101.
- [6] 马帅, 王永诗, 王学军, 等. 华北东部石炭—二叠纪沉积充填过程及其对物源区构造演化的响应[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(4): 1-20.  
MA Shuai, WANG Yongshi, WANG Xuejun, et al. Carboniferous-Permian sedimentary filling process in Eastern North China and its response to tectonic evolution of provenance area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 1-20.
- [7] 付炜, 胡望水, 王晨晨, 等. 致密砂岩储层特征及质量影响因素: 以鄂尔多斯盆地西北部二叠系下石盒子组为例[J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(5): 36-48.  
FU Wei, HU Wangshui, WANG Xiaochen, et al. Characteristics of tight sandstone reservoir and influencing factors of reservoir quality: a case study in Lower Shihezi Formation of Permian, Northwestern Ordos Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023, 47(5): 36-48.
- [8] 陈世悦, 刘焕杰. 华北地台东部石炭—二叠纪岩相古地理特征[J]. 中国区域地质, 1997, 16(4): 379-386.  
CHEN Shiyue, LIU Huanjie. Carboniferous-Permian lithofacies and paleogeography in the eastern part of the North China Platform[J]. Regional Geology of China, 1997, 16(4): 379-386.
- [9] 陈世悦, 徐凤银, 刘焕杰. 华北晚古生代层序地层与聚煤规律[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 113-127.  
CHEN Shiyue, XU Fengyin, LIU Huanjie. Study on sequence stratigraphic and coal accumulation law of Late Paleozoic in North China[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2000: 113-127.
- [10] 李增学, 李晓静, 王东东, 等. 华北中南部地区石盒子群沉积环境研究新进展[J]. 地球学报, 2016, 37(5): 615-625.  
LI Zengxue, LI Xiaojing, WANG Dongdong, et al. New progress in the study of sedimentary environment of Shihezi Group in central and southern region of North China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(5): 615-625.
- [11] 贾志明. 济阳拗陷石炭—二叠纪沉积演化与储层展布研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 51-53.  
JIA Zhiming. The sedimentary evolution and reservoir distribution in Carboniferous and Permian period in Jiyang Depression[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016: 51-53.
- [12] 张关龙, 刘文汇, 郑冰, 等. 济阳拗陷石炭系—二叠系储层成岩作用及孔隙演化[J]. 海相油气地质, 2009, 14(3): 1-9.  
ZHANG Guanlong, LIU Wenhui, ZHENG Bin, et al. Diagenesis and porosity evolution of Carboniferous-Permian reservoirs in Jiyang Depression[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(3): 1-9.
- [13] 王晔磊, 邱隆伟, 杨勇强, 等. 济阳拗陷义和庄—大王庄地区二叠系储集层成岩作用及孔隙演化[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(6): 676-682.  
WANG Yelei, QIU Longwei, YANG Yongqiang, et al. Diagenesis and pore evolution of Permian reservoirs in Yihezhuang-Dawang-zhuang Area, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(6): 676-682.
- [14] 莫彬彬, 连宾. 长石风化作用及影响因素分析[J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 281-289.  
MO Binbin, LIAN Bin. Study on feldspar weathering and analysis of relevant impact factors[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(3): 281-289.
- [15] HILTON R G, WEST A J. Mountains, erosion and the carbon cycle[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(6): 284-299.
- [16] 陈欣阳, 李彪, 李超. 新元古代成冰纪雪球地球与化学风化作用[J]. 地球科学, 2025, 50(3): 1048-1065.

- CHEN Xinyang, LI Biao, LI Chao. Chemical weathering during the Neoproterozoic snowball earth events[J]. *Earth Science*, 2025, 50(3):1048-1065.
- [17] LUO Kai, MA Jinlong, WANG Zhibing, et al. Fractionation mechanism and flux estimation of strontium isotopes during basalt weathering[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2024, 10(4):255-270.
- [18] 丁茜,何治亮,王静彬,等. 生烃伴生酸性流体对碳酸盐岩储层改造效应的模拟实验[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1):223-234.  
DING Qian, HE Zhiliang, WANG Jingbin, et al. Simulation experiment of carbonate reservoir modification by source rock-derived acidic fluids[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1):223-234.
- [19] 单祥,郭华军,陈希光,等. 准噶尔盆地玛西斜坡区百口泉组砂砾岩埋藏溶蚀作用实验模拟研究[J]. *沉积学报*, 2022, 40(5):1406-1418.  
SHAN Xiang, GUO Huajun, CHEN Xiguang, et al. Experimental simulation of burial dissolution of conglomerate reservoir in Baikouquan Formation in Western Slope of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(5):1406-1418.
- [20] 陈启林,黄成刚. 沉积岩中溶蚀作用对储集层的改造研究进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(11):1112-1129.  
CHEN Qilin, HUANG Chenggang. Research progress of modification of reservoirs by dissolution in sedimentary rock[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(11):1112-1129.
- [21] 张拴宏,赵越,刘建民,等. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6):824-842.  
ZHANG Shuanhong, ZHAO Yue, LIU Jianmin, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: a preliminary review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6):824-842.
- [22] AIGBADON G O, AKAKURU O C, CHINYEM F I, et al. Facies analysis and sedimentology of the Campanian-Maastrichtian sediments, Southern Bida Basin, Nigeria[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2023, 38:27.
- [23] 赵子霖,周雪威,李夔洲,等. 辽东湾海域新元古界长龙山组石英砂岩物源特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2024, 42(4):1342-1353.  
ZHAO Zilin, ZHOU Xuwei, LI Kuizhou, et al. Characteristics and geological significance of the provenance of quartz sandstone in the neoproterozoic Changlongshan Formation in the offshore Liaodong Bay[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(4):1342-1353.
- [24] 张本琪,余宏忠,姜在兴,等. 应用阴极发光技术研究母岩性质及成岩环境[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3):117-120.  
ZHANG Benqi, YU Hongzhong, JIANG Zaixing, et al. Characteristics and diagenetic environments of source rocks by cathodoluminescence[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3):117-120.
- [25] 刘庆山,魏玉帅,张宝森,等. 古新世特提斯喜马拉雅南亚热带石英砂岩成因及其构造意义:以藏南岗巴地区古新统基堵拉组为例[J]. *现代地质*, 2019, 33(3):561-573.  
LIU Qingshan, WEI Yushuai, ZHANG Baosen, et al. Genesis and tectonic significance of quartz sandstones in the southern subzone of tethyan himalayas: a case study on the Paleocene Jidula Formation in Gamba Area, Southern Tibet[J]. *Geoscience*, 2019, 33(3):561-573.
- [26] 赵越,翟明国,陈虹,等. 华北克拉通及相邻造山带古生代—侏罗纪早期大地构造演化[J]. *中国地质*, 2017, 44(1):44-60.  
ZHAO Yue, ZHAI Mingguo, CHEN Hong, et al. Paleozoic-early Jurassic tectonic evolution of North China Craton and its adjacent orogenic belts[J]. *Geology in China*, 2017, 44(1):44-60.
- [27] 郑雪,李景贤,周鑫,等. 鲁西地区石炭纪—二叠纪煤系关键金属富集特征及其控制因素[J]. *地质学报*, 2024, 98(3):2351-2364.  
ZHENG Xue, LI Jingxian, ZHOU Xin, et al. Enrichment characteristics and controlling factors of critical metals in the Carboniferous-Permian coal measures in the Luxi Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(3):2351-2364.
- [28] 雒蓉. 华北东部淄博中二叠统铝—黏土矿物物质来源与成矿过程[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020:30-45.  
LUO Rong. Metallogenic process and structural driving mechanism of the Middle Permian aluminum clay deposits in Zibo, Eastern North China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020:30-45.
- [29] 李绪龙,张霞,林春明,等. 常用化学风化指标综述:应用与展望[J]. *高校地质学报*, 2022, 28(1):51-63.  
LI Xulong, ZHANG Xia, LIN Chunming, et al. Overview of the application and prospect of common chemical weathering indices[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(1):51-63.
- [30] 李维波,李江海,王洪浩,等. 二叠纪古板块再造与岩相古地理特征分析[J]. *中国地质*, 2015, 42(2):685-694.  
LI Weibo, LI Jianghai, WANG Honghao, et al. Characteristics of the reconstruction of Permian paleoplate and lithofacies paleogeography[J]. *Geology in China*, 2015, 42(2):685-694.
- [31] 申博恒,沈树忠,吴琼,等. 华北板块石炭纪—二叠纪地层时间框架[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(7):1181-1212.  
SHEN Boheng, SHEN Shuzhong, WU Qiong, et al. Carboniferous and Permian integrative stratigraphy and timescale of North China Block[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2022, 52(7):1181-1212.
- [32] BERNER R A, KOTHAVALA Z. Geocarb: a revised model of atmospheric CO<sub>2</sub> over phanerozoic time[J]. *American Journal of Science*, 2001, 301(2/3):182-204.

- [33] BERNER R A. Geocarbsulf: a combined model for Phanerozoic atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006,70(23):5653-5664.
- [34] 侯中帅,陈世悦,鄢继华,等. 大港探区上古生界沉积特征与控制因素[J]. *地球科学*, 2017,42(11):2055-2068.  
HOU Zhongshuai, CHEN Shiyue, YAN Jihua, et al. Sedimentary characteristics and control factors of Upper Palaeozoic in Dagang exploration area[J]. *Earth Science*, 2017,42(11):2055-2068.
- [35] 冯佳睿,高志勇,崔京钢,等. 长石表生淋滤溶蚀模拟实验[J]. *新疆石油地质*, 2018,39(6):660-665.  
FENG Jiarui, GAO Zhiyong, CUI Jinggang, et al. Simulation experiment of feldspar supergene leaching and dissolution[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018,39(6):660-665.
- [36] 计波,焦养泉,刘阳. 鄂尔多斯盆地东北部下侏罗统富县组底部石英砂岩成因与物源[J]. *地质通报*, 2022,41(9):1601-1612.  
JI Bo, JIAO Yangquan, LIU Yang. Petrogenesis and provenance of the quartz sandstone from the bottom of Lower Jurassic Fuxian Formation, Northeastern Ordos Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022,41(9):1601-1612.
- [37] 梁太涛,李洪奎,耿科,等. 山东省石炭—二叠纪沉积岩建造与成矿作用[J]. *山东国土资源*, 2014,30(10):21-25.  
LIANG Taitao, LI Hongkui, GENG Ke, et al. Formation and mineralization of Carboniferous-Permian sedimentary rocks in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 2014,30(10):21-25.
- [38] AVIGAD D, SANDLER A, KOLODNER K, et al. Mass-production of Cambro-Ordovician quartz-rich sandstone as a consequence of chemical weathering of Pan-African terranes: environmental implications[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2005,240(3/4):818-826.
- [39] 宋来弟,李美蓉,于海鹏,等. 不同 pH 条件下长石和方解石矿物选择性溶蚀过程[J]. *东北石油大学学报*, 2022,46(3):74-83.  
SONG Laidi, LI Meirong, YU Haipeng, et al. Selective dissolution process of feldspar and calcite minerals under different pH conditions[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(3):74-83.
- [40] 郑浚茂,应凤祥. 煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式[J]. *石油学报*, 1997,18(4):19-24.  
ZHENG Junmao, YING Fengxiang. Reservoir characteristics and diagenetic model of sandstone intercalated in coal-bearing strata (acid water medium)[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997,18(4):19-24.
- [41] 刘锐娥,吴浩,魏新善,等. 砂岩储层中长石的异常分布及成因:以鄂尔多斯盆地二叠系石盒子组 8 段为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017,46(1):96-105.  
LIU Ruie, WU Hao, WEI Xinshan, et al. Anomaly distribution and genesis of feldspar in the 8th member sandstone reservoir of Shihezi Formation, Permian, Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017,46(1):96-105.
- [42] 陈中红,查明,宋国奇. 利用古成熟度方程初步恢复济阳拗陷晚三叠世印支运动剥蚀量[J]. *地质学报*, 2008,82(8):1036-1045.  
CHEN Zhonghong, ZHA Ming, SONG Guoqi. Restoration of the thickness eroded during the Late Triassic Indo-Chinese tectonic movement in the Jiyang Depression by using the paleo-maturity-equation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008,82(8):1036-1045.
- [43] 李政. 济阳拗陷石炭系—二叠系烃源岩的生烃演化[J]. *石油学报*, 2006,27(4):29-35.  
LI Zheng. Hydrocarbon-generation evolution of Permian-Carboniferous source rock in Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006,27(4):29-35.
- [44] 范昆,张林炎,黄臣军,等. 济阳拗陷上古生界烃源岩二次生烃特征[J]. *天然气地球科学*, 2008,19(1):23-28.  
FAN Kun, ZHANG Linyan, HUANG Chenjun, et al. Secondary hydrocarbon-generation characteristics of Upper Paleozoic source rock in Jiyang Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008,19(1):23-28.
- [45] 牛子铖,王永诗,王学军,等. 济阳拗陷前古近纪烃源岩生烃潜力分析[J]. *高校地质学报*, 2022,28(1):73-85.  
NIU Zicheng, WANG Yongshi, WANG Xuejun, et al. Hydrocarbon generation potential of Pre-Paleogene source rocks in the Jiyang Depression[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022,28(1):73-85.
- [46] 李敏,张月霞,吴琼玲,等. 南海珠江口盆地陆丰凹陷文昌组沉积成岩特征及储层物性控制因素[J]. *东北石油大学学报*, 2024,48(4):69-88.  
LI Min, ZHANG Yuxia, WU Qionglin, et al. Sedimentary diagenetic characteristics and controlling factors of reservoir physical properties of Wenchang Formation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(4):69-88.