

文章编号：1000-0747(2023)05-0000-13 DOI: 10.11698/PED.20220403

渤海湾盆地二叠系碎屑岩优质储集层成因与勘探方向

操应长^{1,2}, 孙沛沛¹, 周立宏³, 远光辉^{1,2}, 刘惠民⁴,
楼达³, 吴智平¹, 金强¹, 蒋有录¹

(1. 中国石油大学(华东)深层油气全国重点实验室, 山东青岛 266580; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国石油大港油田公司, 天津 300280; 4. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 山东东营 257001)

基金项目：国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(42222208)和国家自然科学基金创新群体项目(41821002);
国家科技重大专项(2016ZX05006-007); 泰山学者青年专家项目(201909061)

摘要：基于岩心观察、薄片鉴定、流体包裹体分析、碳氧同位素组成分析等技术方法，结合构造和埋藏演化史，系统分析渤海湾盆地上古生界二叠系碎屑岩储集层成岩演化过程、储集层成因及发育模式。研究表明：①渤海湾盆地上古生界整体经历3期埋藏和2期抬升过程，相应地发生3期干酪根热演化生酸溶蚀成孔和2期大气淡水淋滤成孔过程，深埋条件下近封闭成岩体系中溶蚀作用伴随自生黏土和石英沉淀，储集空间增加有限；②不同构造带差异性构造抬升—沉降过程造成二叠系碎屑岩储集层成岩—成储过程的差异性，并发育3类不同的储集层成因模式：I类“浅层成孔—中浅埋藏型”储集层经历两期暴露—长期开放环境，于近地表经历两期大气水淋滤增孔作用，晚期浅埋，次生孔隙为主，物性最好；II类“浅层成孔—深埋调配保孔型”储集层经历早期暴露开放—晚期埋藏封闭环境，溶蚀作用调配孔隙类型，以大量长石次生溶孔为主，物性次之；III类“多期埋藏溶蚀调配成孔型”储集层经历近封闭—一封闭环境有机来源酸性流体溶蚀，以高岭石晶间微孔隙为主，物性最差。地质历史时期为大气水淋滤注水区，而现今位于斜坡带—洼陷带的II类深埋储层，为下步有利勘探目标。

关键词：渤海湾盆地；二叠系；碎屑岩；成岩演化；成储机制；次生孔隙

中图分类号：TE122 文献标识码：A

Genetic mechanisms and exploration targets of high-quality Permian clastic rock reservoirs in Bohai Bay Basin, East China

CAO Yingchang^{1,2}, SUN Peipei¹, ZHOU Lihong³, YUAN Guanghui^{1,2}, LIU Huimin⁴,
LOU Da³, WU Zhiping¹, JIN Qiang¹, JIANG Youlu¹

(1. National Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China; 4. Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257001, China)

Abstract: Based on core observation, thin section examination, fluid inclusions analysis, carbon and oxygen isotope analysis, and other approaches, the structural and burial evolution histories were investigated, and the diagenetic evolution process and genetic/development models were systematically discussed of the Upper Paleozoic Permian clastic rock reservoirs in the Bohai Bay Basin. The Bohai Bay Basin underwent three stages of burial and two stages of uplifting in the Upper Paleozoic. Consequently, three stages of acidic fluid (oil and gas) leaching, generated by the thermal evolution of kerogen, and two stages of meteoric freshwater leaching occurred. Dissolution in deeply buried, nearly closed diagenetic system was associated with the precipitation of authigenic clay and quartz, leading to a limited increase in storage space. Different structural uplifting—subsidence processes of tectonic zones resulted in varying genetic—reservoir-forming processes of the Permian clastic reservoirs. Three genetic models of reservoirs are recognized. Model I reservoirs with pores formed in shallow strata and buried in shallow to medium strata underwent two phases of exposure to long-term open environment and two phases of meteoric freshwater leaching to enhance pores near the surface, and were shallowly buried in the late stage, exhibiting the dominance of secondary pores and the best physical properties. Model II reservoirs with pores formed in shallow strata and preserved due to modification after deep burial experienced an early exposure—open to late burial—closed environment, where pore types were modified due to dissolution, exhibiting the dominance of numerous secondary solution pores in feldspar and the physical properties inferior to Model I. Model III reservoirs with pores formed after being regulated after multiple periods of burial and dissolution experienced a dissolution of acidic fluids of organic origin under a near-closed to closed environment, exhibiting the dominance of intercrystalline micropores in

kaolinite and the poorest physical properties. The target reservoirs lied in the waterflood area in the geological period of meteoric freshwater leaching, and are now the Model II deep reservoirs in the slope zone–depression zone. They are determined as favorable options for subsequent exploration.

Key words: Bohai Bay Basin; Permian; clastic rock; diagenetic evolution; reservoir-forming mechanism; secondary pore

引用: 操应长, 孙沛沛, 周立宏, 等. 渤海湾盆地二叠系碎屑岩优质储集层成因与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 1-13.

CAO Yingchang, SUN Peipei, ZHOU Lihong, et al. Genetic mechanisms and exploration targets of high-quality Permian clastic rock reservoirs in Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1-13.

0 引言

渤海湾盆地以古近系湖相烃源岩^[1-4]和上古生界煤系烃源岩^[5-7]为源灶发育两套规模巨大的含油气系统, 油气勘探程度整体进入中高成熟阶段^[1]。其中, 由于以上古生界煤系烃源岩为中心的含油气系统在演化过程中经历了多次抬升破坏, 在过去数十年中油气勘探成果相对较少。近年来, 渤海湾盆地上古生界含油气系统被重新重视, 并于近几年在二叠系碎屑岩油气储集层中, 取得了多个油气勘探的重要突破^[5-7], 表明位于深层—超深层的渤海湾盆地上古生界油气系统仍具有重要的油气勘探潜力。由于上古生界油气系统具有多期次抬升-沉降背景, 经历差异构造叠合演化过程的、不同构造带的碎屑岩储集层特征、成储过程和优质储集层形成机制等尚不明确, 导致目前二叠系油气勘探成功率仍相对较低, 制约了油气勘探进程。

笔者综合利用渤海湾盆地黄骅拗陷、济阳拗陷、冀中拗陷、临清拗陷等地区钻井岩心、岩石薄片、物性测试资料、扫描电镜、同位素分析及油气地球化学资料等, 结合埋藏史-热史, 明确了渤海湾盆地上古生界二叠系不同构造带不同类型储集层特征, 系统研究了不同埋藏史-热史控制下的储集层演化过程、成储机制, 阐明了不同类型储集层的发育模式和分布规律, 以期对具有相似构造背景的探区优质储集层预测进行指导。

1 地质概况

渤海湾盆地位于华北平原北部、辽河平原南部和渤海海域, 周缘为燕山、山西、鲁西南、鲁东和辽东等隆起区, 盆地内部划分为辽河、渤中、济阳、黄骅、冀中、临清、昌潍等拗陷以及埕宁、沧县、邢衡、内黄等隆起^[8] (见图 1a)。

经历多期次构造运动改造和暴露剥蚀后, 渤海湾盆地上古生界现今仍保存较厚的石炭系与二叠系, 自下而上依次发育石炭系本溪组 (C_2b)、太原组 (C_3t)、二叠系山西组 (P_{1s})、下石盒子组 (P_{1x})、上石盒子组 (P_{2s}) 和石千峰组 (P_{2sh}) (见图 1b)。山西组—石千

峰组依次发育三角洲、曲流河、辫状河和河流/湖泊相沉积^[9-10], 其中上石盒子组辫状河沉积砂体纵向厚度大、横向分布稳定、粒度粗, 钻井油气显示活跃, 为二叠系目前主要勘探目的层。下伏太原组和山西组煤系烃源岩广泛发育, 受多期构造运动影响, 地层分布不均, 埋深差异大 (见图 1c), 除去火山活动影响的异常高值, 烃源岩 R_o 值主要为 0.65%~1.6%, 多处于中成岩阶段, 其在长期演化过程中发生 2~3 期生酸和生烃过程, 为上覆碎屑岩储集层提供了重要油气来源^[11-13]。

2 储集层基本特征

2.1 岩石学特征

岩心观察和薄片鉴定结果表明, 渤海湾盆地二叠系储集层岩性以细砂岩—砂质细砾岩为主; 其中上石盒子组岩石以中砂岩、粗砂岩和含砾砂岩为主, 下石盒子组和山西组以细砂岩为主。上石盒子组储集层以石英砂岩、岩屑石英砂岩等为主, 岩石成分成熟度较高, 骨架颗粒中石英平均含量为 84%, 长石平均含量为 7%, 以钾长石为主, 岩屑以石英质变质岩岩屑为主, 平均含量为 9% (见图 2), 杂基含量平均值为 2%。山西组—下石盒子组储集层成分成熟度整体较低, 骨架颗粒中石英平均含量为 42%, 长石平均含量为 35%, 岩屑平均含量为 23%, 杂基含量平均值为 5% (见图 2)。

2.2 储集物性与储集空间特征

经历长期成岩改造后, 渤海湾盆地二叠系储集层整体以中低孔、中低渗—致密储集层为主, 孔隙度多为 5%~20%, 渗透率主体为 $(0.1\sim 100.0)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (见图 3a、图 3b)。物性-深度剖面表明, 储集层孔隙度和渗透率随埋深增大略有降低, 3 500 m 以浅储集层孔隙度多为 5%~20%, 渗透率多为 $(0.1\sim 100.0)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$; 3 500 m 以深储集层孔隙度多为 1%~15%, 渗透率多为 $(0.01\sim 10.00)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

渤海湾盆地二叠系碎屑岩为孔隙型储集层, 储集空间包括原生孔隙、次生孔隙、微孔隙等 (见图 4)。原生孔隙主要发育于中浅层中粗碎屑砂岩储集层中, 为压实和胶结后的残余孔 (见图 4a); 次生孔隙发育,

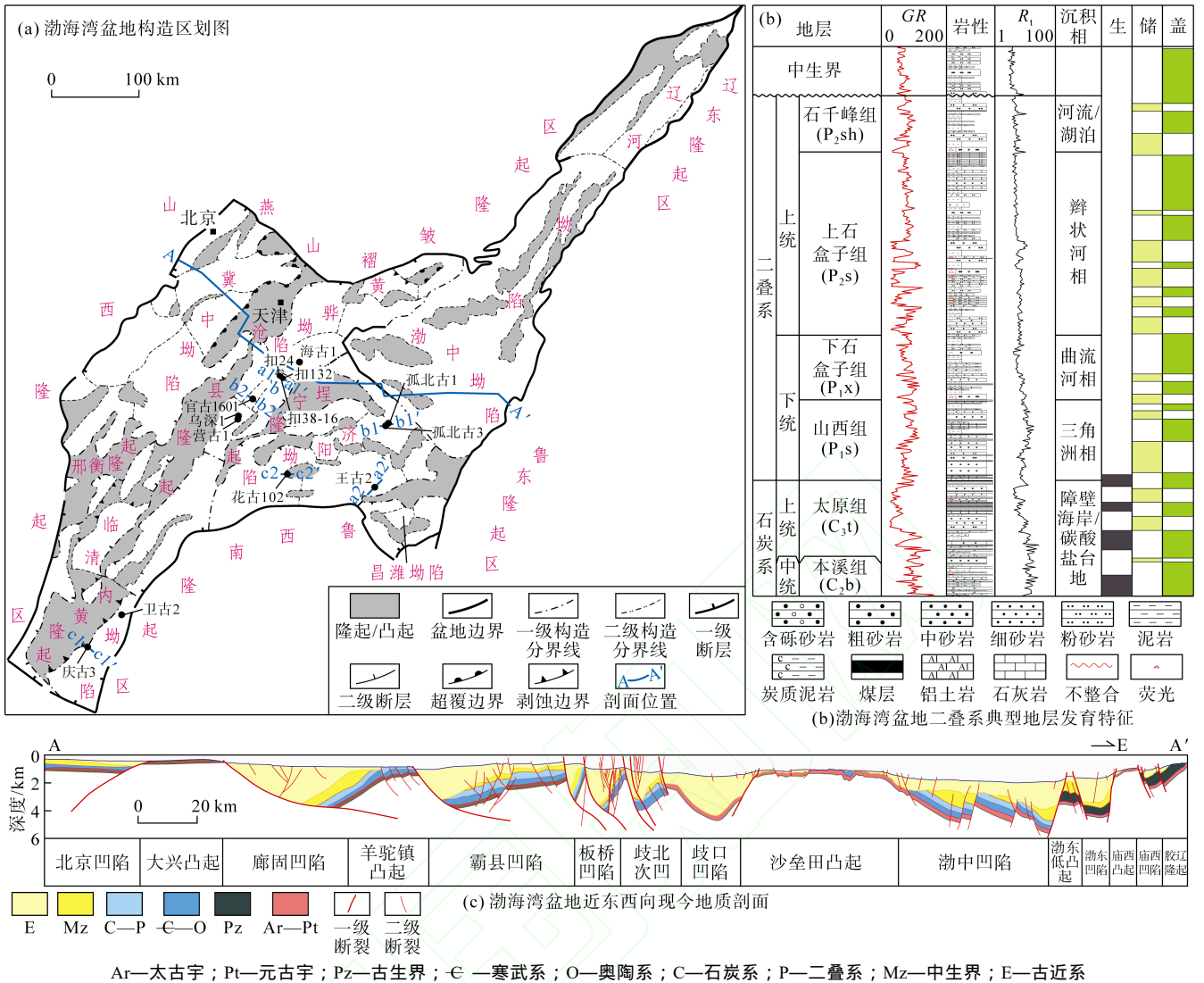


图1 渤海湾盆地构造位置、构造特征及沉积地层特征

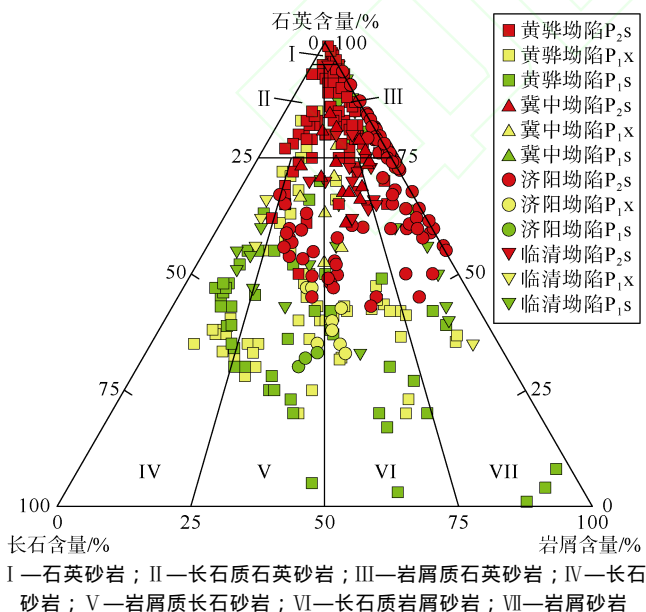


图2 渤海湾盆地二叠系碎屑岩储集层岩石类型图解 (分类标准据文献[14])

主要为长石颗粒溶蚀孔隙 (见图 4b—图 4d); 自生高岭石晶间微孔在中深层普遍发育 (见图 4d—图 4f); 深埋储集层局部可见少量微裂缝。铸体薄片定量统计数据表明: 二叠系浅层整体以次生孔隙 (4%~12%) 为主, 原生孔隙局部发育 (4%~9%); 中深层主要以次生孔隙 (1%~6%) 和微孔隙 (1%~5%) 并存为特征, 部分地区微孔隙 (4%~5%) 主导, 次生孔隙次之 (1%~3%) (见图 3c—图 3e)。

3 成岩-成储过程

长石是二叠系碎屑岩储集层的重要造岩矿物之一, 其溶蚀产生的次生孔隙也是二叠系储集层的主要储集空间 (见图 4), 长石溶蚀作用及其成孔效应决定了储集层的形成与发育。因此, 有必要在分析埋藏-抬升过程及不同区带构造演化差异叠合的基础上, 厘清不同阶段长石溶蚀的成孔效应及其叠合成储过程。

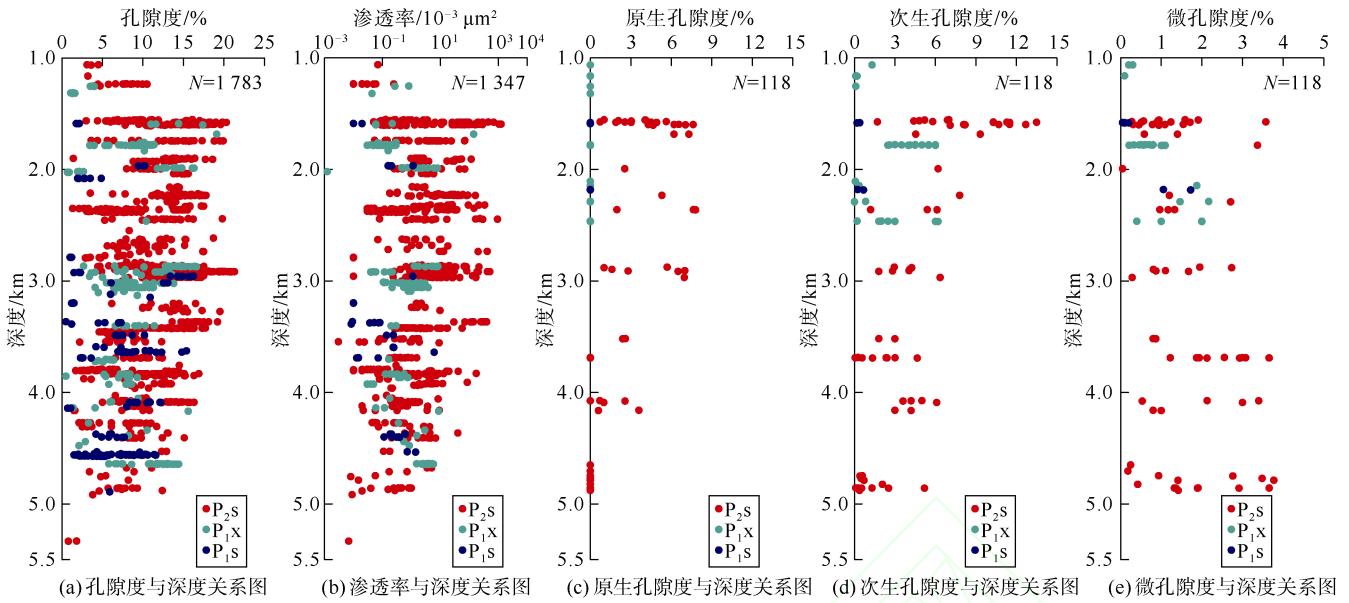
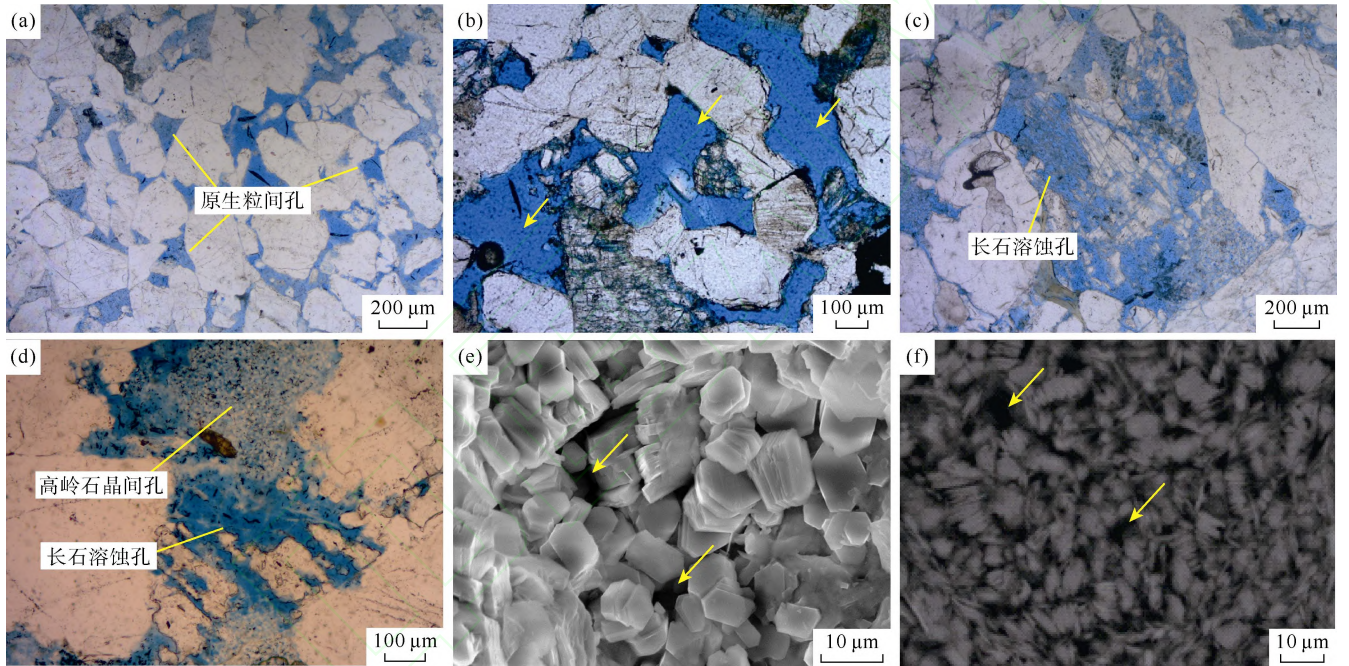


图3 渤海湾盆地二叠系碎屑岩储集层储集物性特征 (N为样品数)



(a) 苏18井, 2687.20 m, 上石盒子组, 粒间孔, 铸体薄片(-); (b) 扣24井, 1558.50 m, 上石盒子组, 超大溶蚀孔隙, 铸体薄片(-); (c) 苏63井, 2331.00 m, 上石盒子组, 长石粒内溶孔, 铸体薄片(-); (d) 孤北古1井, 4077.85 m, 上石盒子组, 长石溶蚀孔与高岭石晶间孔, 铸体薄片(-); (e) 孤北古1井, 4123.22 m, 上石盒子组, 粗晶高岭石晶间孔, 扫描电镜; (f) 车古31井, 2233.00 m, 上石盒子组, 细晶高岭石晶间孔, 扫描电镜

图4 渤海湾盆地二叠系碎屑岩储集层储集空间特征

3.1 多期埋藏-抬升过程与构造叠加样式

渤海湾盆地上古生界整体经历了3期埋藏和2期抬升过程, 结合二叠系抬升暴露-埋藏深埋过程和现今地层结构特征, 将二叠系构造演化归纳为3类典型的叠合样式(见图5): ①两期不整合暴露型, 石千峰组及中生界完全剥蚀, 上石盒子组上覆古近系, 发育区域性角度不整合(见图5a1、图5a2), 如黄骅坳陷扣

村地区、济阳坳陷王家岗、大王庄地区等; 该类构造区在二叠系沉积后分别于印支末期—燕山期、燕山末期—喜马拉雅期发生两次地层抬升, 均导致二叠系暴露地表形成不整合, 潜山顶部中生界与石千峰组遭受剥蚀(见图5a3)。②一期不整合暴露型, 大部分石千峰组遭受剥蚀, 上石盒子组上覆残留薄层石千峰组或者厚层侏罗系, 侏罗系下发育区域性角度不整合(见

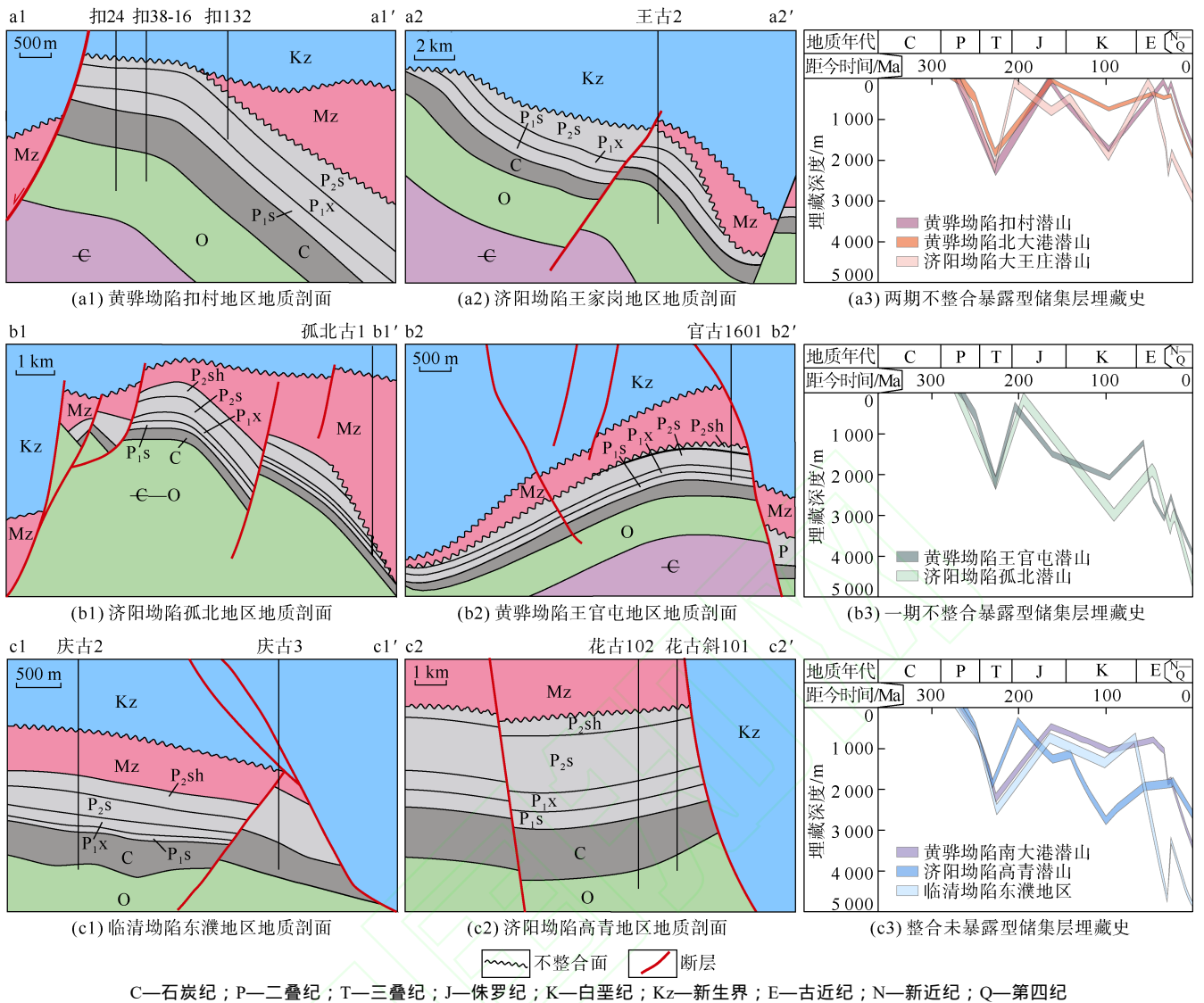


图5 渤海湾盆地二叠系典型地层构造特征及埋藏史(剖面位置见图1)

图 5b1、图 5b2), 如济阳坳陷孤北地区及黄骅坳陷王官屯地区等; 该类构造区在二叠系沉积后于印支末期—燕山期发生地层抬升, 二叠系暴露地表形成不整合; 再次沉降后, 于燕山末期/喜马拉雅期抬升, 二叠系未暴露地表, 而后沉降至今(见图 5b3)。

③未暴露型, 上石盒子组在区域范围上覆石千峰组, 中生界保存完好, 二叠系上石盒子组主力砂体之上无不整合(见图 5c1、图 5c2), 如临清坳陷东濮地区、济阳坳陷高青地区、黄骅坳陷南大港地区等, 该类构造区在二叠系沉积后分别于印支末期—燕山期及燕山末期—喜马拉雅期发生两次地层抬升, 但均未导致二叠系主力砂层暴露地表, 二叠系上部地层保存相对完整(见图 5c3)。

3.2 不同阶段长石溶蚀过程与成孔效应

3.2.1 抬升暴露阶段开放成岩体系

渤海湾盆地二叠系经历数次构造抬升, 地层出露

地表, 大气淡水沿倾斜地层注入砂体, 造成长石等矿物的淋滤溶蚀作用^[15-19]。如黄骅坳陷扣村地区不整合发育, 二叠系上石盒子组直接上覆古近系沙一段(见图 6a), 储集层中孔隙水矿化度整体较低, 且距离不整合越近, 开放体系下, 高流速、低矿化度的大气淡水能够促进浅层地表岩石中长石等矿物的大量溶解, 且释放的 K^+ 、 Al^{3+} 和水溶液形式的 SiO_2 等能够被及时带离溶蚀区^[19-21], 伴随溶蚀作用的进行, 酸性流体侵蚀性减弱和流体中 Al^{3+} 和 SiO_2 浓度增加, 可在储集层中沉淀部分高岭石。

以扣村地区储集层岩石为样品(孔隙度为 20%、长石含量为 7%、石英含量为 72%、高岭石含量为 1%), 利用 Geochemist's Workbench 模拟低温-高流速背景下倾斜砂层中长石溶解—溶解物质传输—次生矿物再沉淀的整个过程, 结果表明, 从注水区开始, 倾斜砂体中

依次发育溶解带和过渡带 随地层倾角从 2° 增大到 40° , 模拟形成的溶解带—过渡带的总长度从大于 6.0 km 逐渐减小到 2.5 km (见图6b)。这一模拟结果与扣村地区潜山顶部扣24、扣38-16和扣11等井长石大量溶解、高岭石很少发育, 潜山斜坡区扣132井长石溶解、沉淀高岭石的现象也相一致; 且扣村地区高岭石同位素组成数据显示标准平均大洋水(SMOW)标准下 δD 值为 $-116.9\text{‰}\sim-100.0\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $11\text{‰}\sim 14\text{‰}$, 这与大气淡水成因高岭石分布范围重合度高, 也支撑大气淡水作用过程^[22](见图6d)。

整体来看, 抬升暴露的开放体系下, 砂层中长石溶蚀产生强烈的增孔作用, 伴生的次生矿物仅在局部下游地区得以沉淀。如扣村地区岩石薄片中长石溶蚀孔含量多为 $5\%\sim 12\%$, 自生高岭石含量一般低于 1% , 石英胶结物含量低于 0.2% (见图6c), 说明抬升暴露阶段大气淡水对长石溶蚀过程能够有效提高储集层物性, 形成的增孔型次生孔隙。这一过程在大王庄、孤北地区等经历过长期暴露的地区也显著发育。

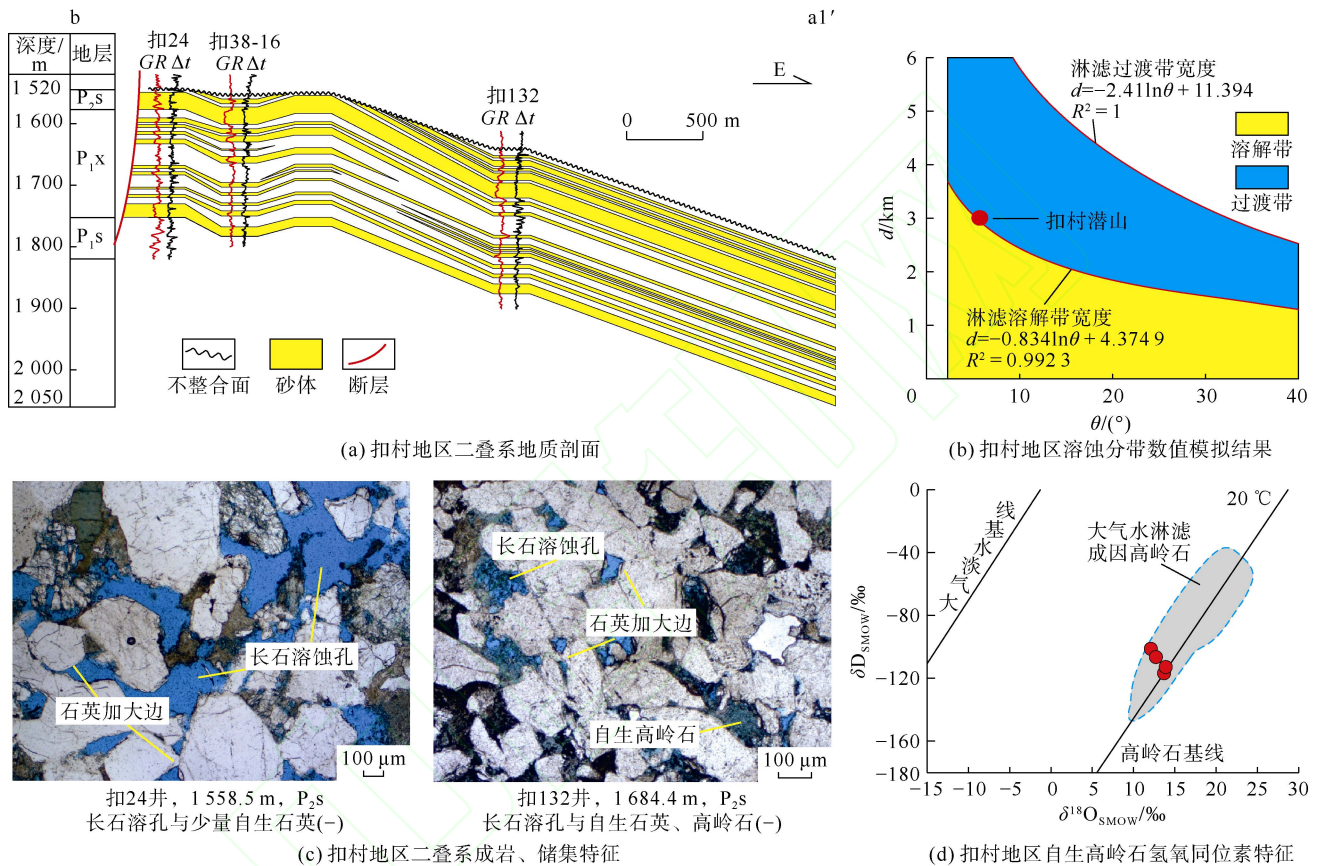


图6 渤海湾盆地扣村地区潜山带二叠系储集层储集空间剖面分布实例与数值模拟(剖面位置见图1;图d图版据文献[18])

3.2.2 中深埋藏阶段封闭成岩体系

二叠系主力砂体下伏的山西组和太原组厚层煤系烃源岩埋藏史和现今 R_0 数据表明, 在印支期地层抬升之前的第1次沉降过程中, 渤海湾盆地上古生界烃源岩最大埋深可达 3000 m , 干酪根演化至低成熟阶段(R_0 值约为 $0.6\%\sim 0.8\%$)^[11], 可以产生大量有机酸和 CO_2 ^[23-26]。当烃源岩埋深超过 3000 m 时, R_0 值也逐渐升至 5500 m 深度的 1.6% , 烃源岩会产生更多 CO_2 、有机酸和烃类^[23-26]。流体包裹体中的 CO_2 (见图7a)储集层中多期次烃类以及碳酸盐胶结物的同位素特征(见图7b), 均表明烃源岩中生成的酸性流体能够传输

到二叠系储集层中^[27]。埋藏条件相对封闭成岩体系下, 地层水温度高、流速低, 有机热演化来源的酸性流体溶蚀长石释放的元素通常不能被大规模及时带出, 倾向于在准原地发生自生黏土矿物和自生石英的沉淀(见图7c), 该过程发生了成岩物质的再调配作用, 在形成长石次生溶孔的同时, 伴生自生矿物充填了原生孔隙, 储集层总孔隙度变化不大^[20]。

整体来看, 近封闭体系下, 储集层中长石强溶蚀-高岭石强胶结-石英强胶结, 二叠系储集层中自生高岭石与长石溶蚀共生(见图4d) 高岭石稀土元素分析与长石颗粒稀土元素配分模式一致(见图7d) 自生

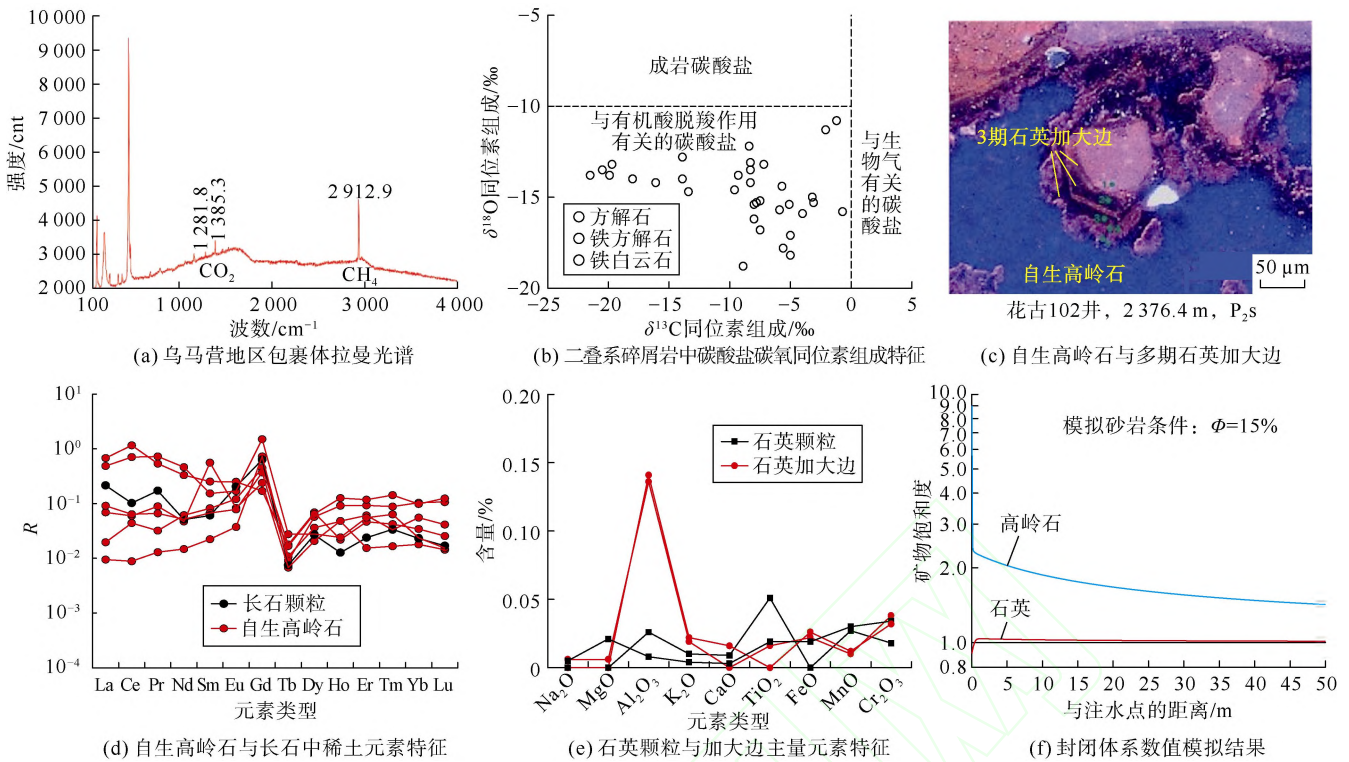


图7 二叠系碎屑岩自生矿物成分及同位素、包裹体温度及成分分析

石英电子探针测试获得的元素成分中 Al 元素含量多高于 0.15%，显著高于石英颗粒的 0.05%（见图 7e），都说明长石溶蚀作用是储集层中自生高岭石和自生石英的重要物质来源^[28-30]，多期次自生高岭石和石英（见图 7c）也表明存在多期次的深埋藏长石溶蚀过程。如以济阳坳陷高青地区为例，二叠系保存相对完整，上覆中生界泥岩（见图 5c2），说明其未经历大气水淋滤作用，岩石薄片中存在长石溶孔占比为 1%~3%，自生高岭石占比为 1%~7%，石英胶结物含量约 2%~6%，该条件下单位体积钾长石溶蚀后的相对增孔率为 11.91%~14.47%^[31]，自生高岭石的沉淀又导致储集层渗透率降低。以二叠系不同深层储集层为约束，利用 Geochemist's Workbench 模拟高温-低流速背景下砂层中长石溶解—溶解物质传输—一次生矿物再沉淀的整个过程，结果表明砂层中长石的溶解通常与高岭石和石英的沉淀伴生，主要发育沉淀带，不发育溶解带、发育极少的过渡带（<0.5 m）（见图 7f）。

3.3 多期次抬升-沉降背景下储集层成储机制

结合构造样式与长石溶蚀过程分析，综合利用自生矿物交切关系、同位素及包裹体、埋藏史-热史等资料，重建了不同类型构造区带储集层的成岩和储集层演化过程。

3.3.1 浅层成孔-中浅埋藏型

以铸体薄片资料为基础，结合成岩演化序列，利用“反演回剥”法，重建该类储集层成岩-成储演化过程表明（以扣村地区为例）（见图 8）：初始沉降阶段，二叠系埋藏至 2 500 m，此过程中以压实为主，孔隙度由原始 38%降至 19%；三叠纪晚期发生第 1 期隆升，二叠系整体水平抬升，上覆三叠系及二叠系石千峰组遭受剥蚀，上石盒子组暴露地表遭受大气水淋滤，储集层孔隙度增加至 25%，并沿斜坡向下依次形成溶蚀带、过渡带、沉淀带；侏罗纪晚期，地层再次沉降，孔隙度压实至 18%；白垩纪末期发生第 2 次抬升，上石盒子组再次暴露地表遭受淋滤，孔隙度增加至 21%；古近纪末期再次沉降至今，孔隙度再次压实至 18%。地层后续沉降幅度均小于初次沉降，淋滤形成的增孔型次生孔隙未经强烈压实得以有效保存。该类型储集层压实作用中等，颗粒间以线接触为主，长石溶蚀作用强烈，自生矿物含量低，典型成岩组合特征为强长石溶蚀-弱高岭石胶结-弱石英胶结，储集空间以次生孔隙为主，局部保留有原生孔隙，孔隙度多为 5%~20%，渗透率多为 $(0.1 \sim 100.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，孔渗相关性强（见图 9）。

3.3.2 浅层成孔-深埋调配保孔型

重建该类储集层成岩-成储演化过程表明（以济阳

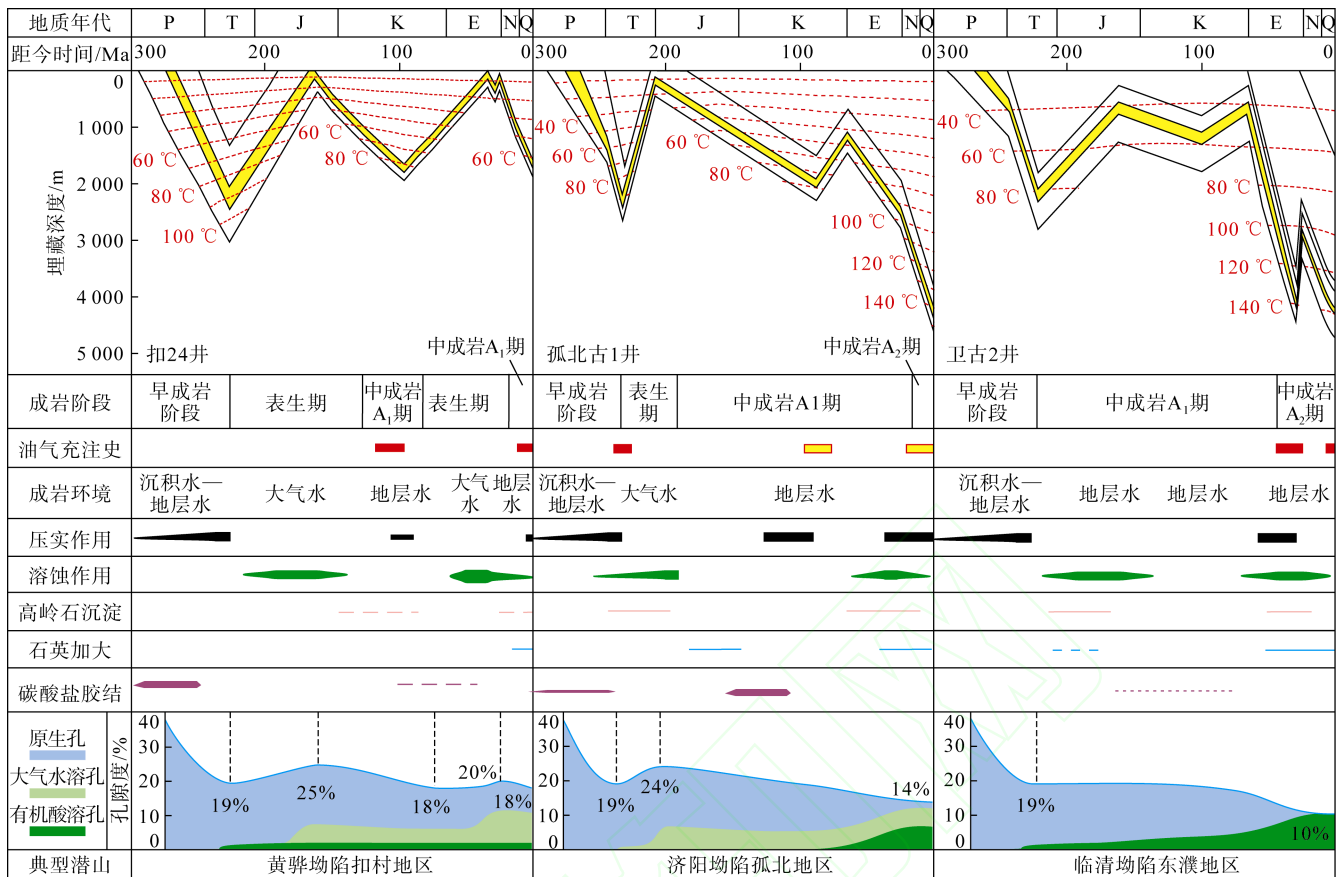


图8 渤海湾盆地二叠系典型潜山储集层成岩演化史

拗陷孤北地区为例)(见图8):初始沉降阶段,二叠系埋藏至2300m,此过程中成岩作用以压实为主,孔隙度由原始38%压至19%;三叠纪晚期地层发生第1期隆升,二叠系抬升接受大气水淋滤作用,储集层孔隙度增加至25%,并沿斜坡向下依次形成溶蚀带、过渡带、沉淀带;侏罗纪晚期再次沉降,孔隙度压实至21%;白垩纪末期构造第2次抬升,此阶段抬升幅度小,二叠系未抬升至地表;而后持续埋藏至今,压实作用减孔至14%,此阶段烃源岩热演化生酸溶蚀长石,仅调配孔隙类型,无明显增孔作用。在深埋藏过程中,烃类充注抑制部分碳酸盐胶结和硅质胶结作用,有效保存部分孔隙。该类储集层压实作用强,颗粒间以线-凹凸接触为主,典型成岩组合特征为强长石溶蚀-强高岭石胶结-中等偏弱石英胶结,储集空间兼有长石次生溶孔和大量高岭石微孔隙,储集层孔隙度多为5%~15%,渗透率多为 $(0.01\sim 10.00)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,孔渗相关性较弱。早期溶蚀区(黄骅拗陷埕海地区、济阳拗陷孤北地区)溶蚀孔隙量大于溶蚀产物,早期过渡区(黄骅拗陷王官屯、乌马营地区)反之(见图9)。

3.3.3 多期埋藏溶蚀调配成孔型

重建该类储集层成岩-成储演化过程表明(以临清

拗陷东濮地区为例)(见图8):第1次构造沉降过程压实作用强烈,孔隙度由原始38%压至19%;三叠纪晚期地层发生第1期隆升,二叠系整体抬升却未到达地表,此过程缺乏大气水淋滤作用;至燕山末期,地层埋藏浅,成岩作用整体较弱;喜马拉雅期二叠系迅速沉降,孔隙度压实至10%,同时发生有机酸溶蚀作用。此类砂岩构造运动中未暴露地表,深埋过程长石溶蚀作用伴随大量高岭石及自生石英沉淀调配孔隙。成岩作用表现为压实作用强,颗粒间以线-凹凸接触为主,典型成岩组合特征为强长石溶蚀-强高岭石胶结-强石英胶结,孔隙度多为5%~10%,渗透率多为 $(0.01\sim 1.00)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,溶蚀孔隙量小于溶蚀产物总量(见图9)。

4 储集层综合发育模式与下步勘探方向

4.1 二叠系储集层发育综合模式

渤海湾盆地不同构造带经历差异性构造叠加过程,导致不同构造带二叠系砂岩储集层发育差异性成岩和成储过程(见图10)。综合构造演化过程和成岩改造过程,二叠系不同类型储集层的发育可细分为3种模式(见图11):

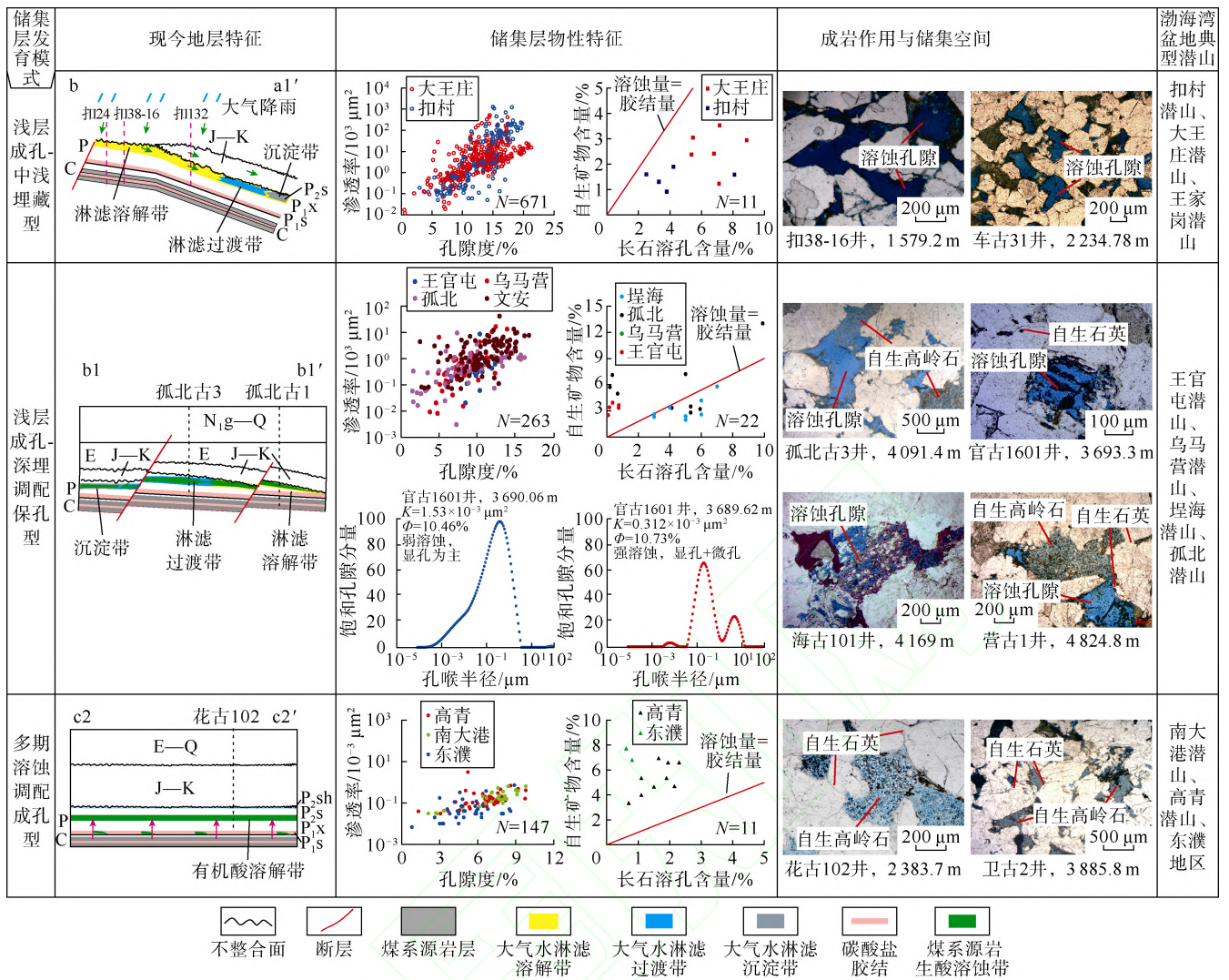


图9 渤海湾盆地二叠系储集层分类及成岩、储集特征(剖面位置见图1; N—样品数; N_{1g}—中新统陶馆组)

I类为“浅层成孔-中浅埋藏型”储集层，此类砂岩在埋藏过程中，分别于燕山期和喜马拉雅期经历两期抬升至地表的构造运动，并遭受大气水淋滤作用增加次生孔隙，由于成储过程中埋深未及3000m，大量浅部形成的孔隙得以有效保存。“浅层成孔-中浅埋藏型”储集层在大气淡水淋滤阶段沿倾斜砂体自上而下形成溶蚀区和过渡区，优质储集层位于两次大气水淋滤注水区附近，储集层质量最好，如黄骅拗陷扣村地区及济阳拗陷大王庄地区等(见图11)。

II类为“浅层成孔-深埋调配保孔型”储集层，此类砂岩在埋藏过程中，于燕山期抬升至地表遭受大气水淋滤作用增加次生孔隙，深埋过程中，有机质热演化生酸调配孔隙类型，砂岩刚性颗粒含量高和伴随长石溶蚀作用发生的石英胶结抵御深埋藏过程中的压实作用，早期烃类充注抑制胶结作用，有效保存孔隙。“浅

层成孔-深埋调配保孔型”储集层在晚三叠世地层暴露剥蚀之后持续埋藏，封闭条件下干酪根热演化形成的有机酸和CO₂溶蚀长石，由于该过程不涉及溶蚀产物的大规模远程运移)，早期大气水淋滤注水区仍保持相对高孔渗，为优质储集层。在后续构造演化过程中，若溶蚀区保持潜山的相对高位，则优质储集层现今仍位于潜山顶部；若潜山发生地层倒转，则先前的溶蚀区现今处于潜山斜坡处，同样具备良好的储集层特征，如济阳拗陷孤北地区和黄骅拗陷王官屯地区等(见图11)。

III类为“多期溶蚀调配成孔型”储集层，此类砂岩在构造运动中未被暴露地表，未经历大气水淋滤增孔作用，受多期次有机质热演化生酸溶蚀成孔作用的改造，储集空间由原生孔隙向次生孔隙+微孔隙转化。“多期溶蚀调配成孔型”储集层未经历抬升剥蚀，储

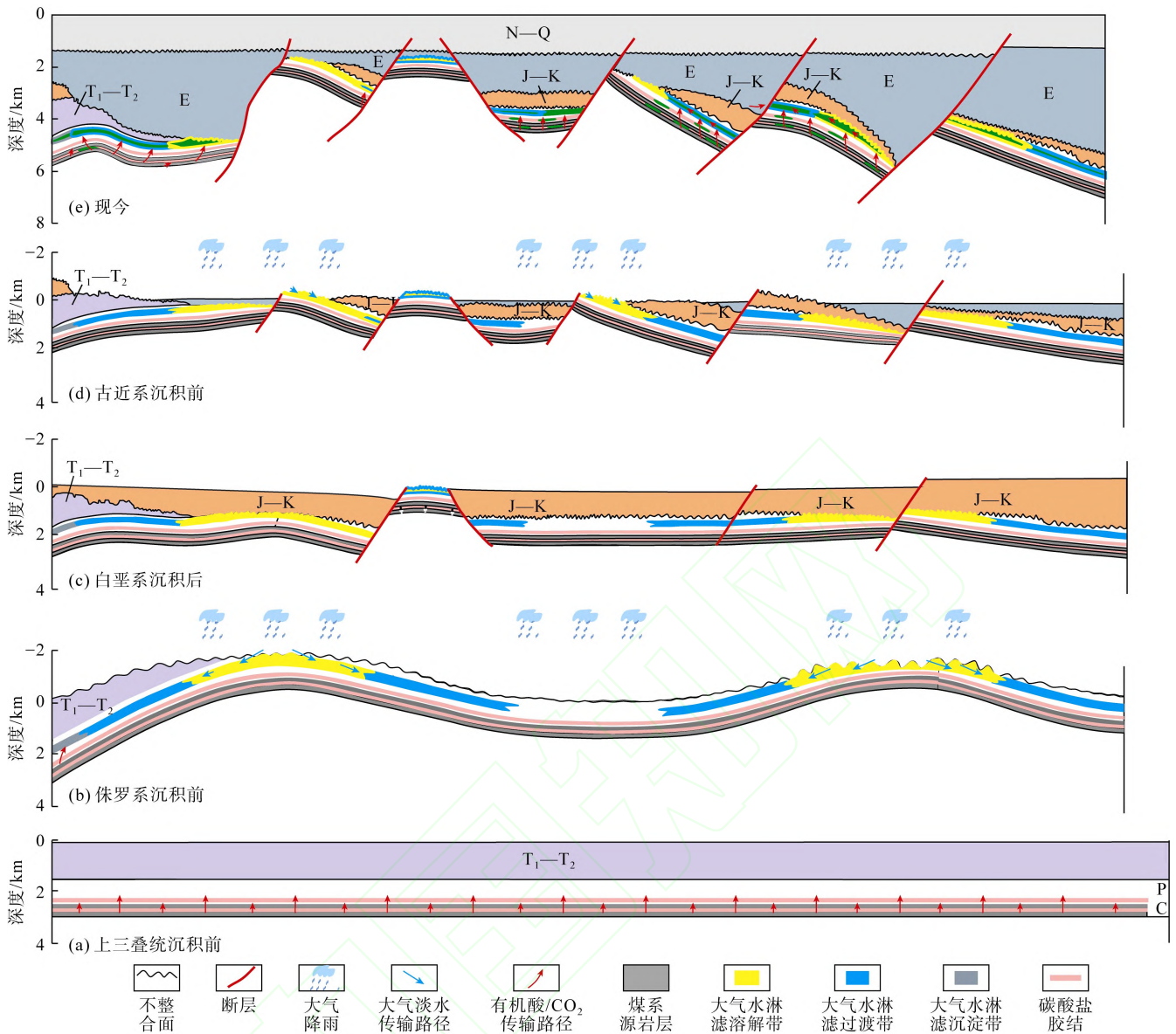


图 10 渤海湾盆地二叠系碎屑岩储集层成储综合模式 (据文献[32]修改)

集层质量在 3 类中最差，如济阳坳陷高青地区和临清坳陷东濮地区等 (见图 11)。

4.2 下步勘探方向

综合研究表明，经历不同成岩改造过程的二叠系储集层质量差异显著。因此，根据三维地震数据，可在系统分析不整合、上覆地层、埋藏深度和构造演化过程的基础上，判断无钻井区储集层的成岩改造过程，预估其储集层发育模式，进行储集层质量的钻前评价预测。系统研究结果表明：渤海湾盆地二叠系 I 类储集层主要发育在冀中坳陷东北部、沧县隆起、济阳坳陷西北部等地区，II 类储集层多发育在

渤中坳陷、黄骅坳陷中南部、济阳坳陷东北部等地区的上石盒子组砂岩储集层中；III 类储集层发育较为广泛，包括山西组砂岩及其他地区上、下石盒子组砂岩等 (见图 12a)。

渤海湾盆地上古生界早期油气勘探主要关注潜山顶部，而对潜山斜坡区和洼陷带关注相对较少。“浅层成孔-深埋调配保孔”型储集层，由于经历早期大气水淋滤之后，发生构造反转，曾位于大气水淋滤溶蚀区的储集层，现今埋藏于潜山斜坡/洼陷带，具有较好的储集层发育潜力，同时配套的上古生界煤系烃源岩处在生油气高峰期 (见图 12a)，应该作为下步重点勘探方向 (见图 12b)。

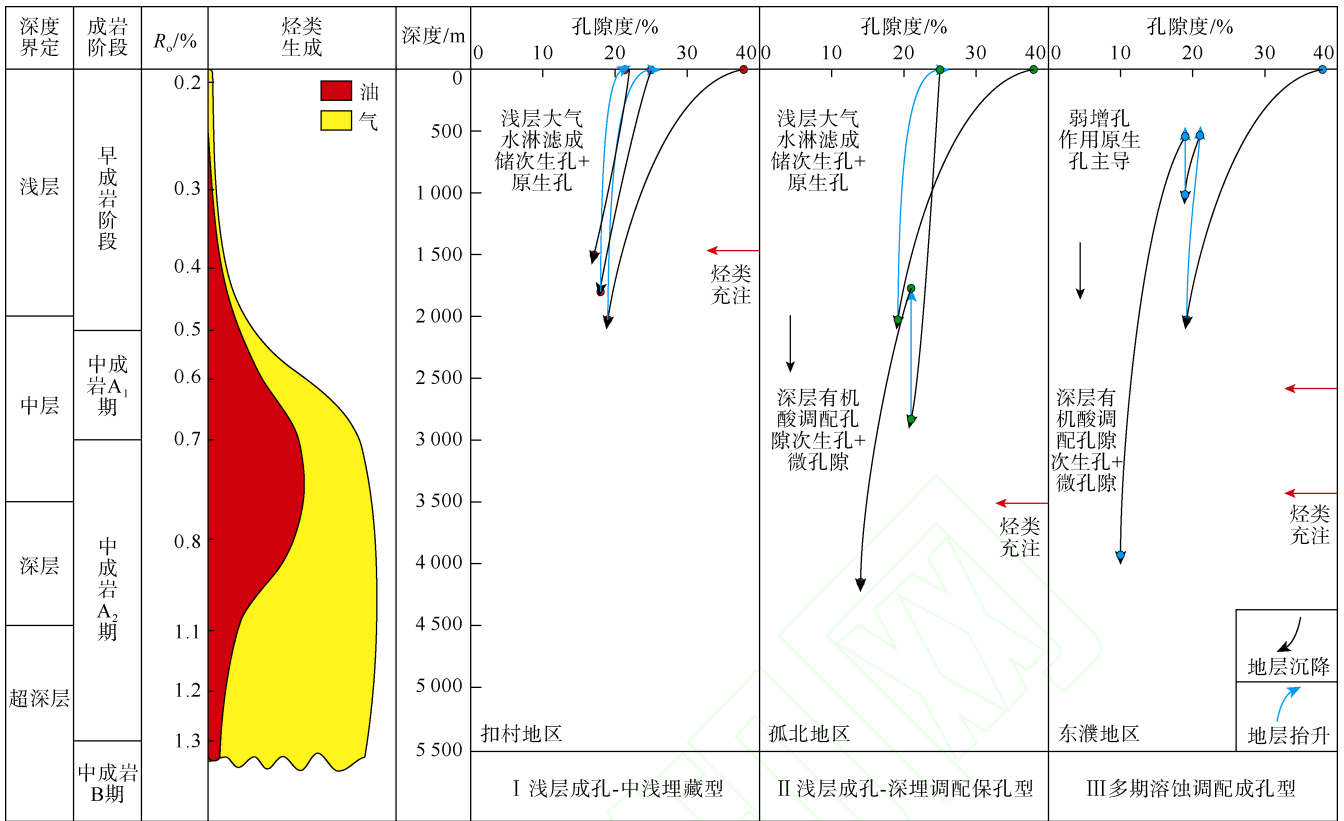


图 11 渤海湾盆地二叠系储集层典型孔隙演化过程 (烃类生成据文献[33]修改)

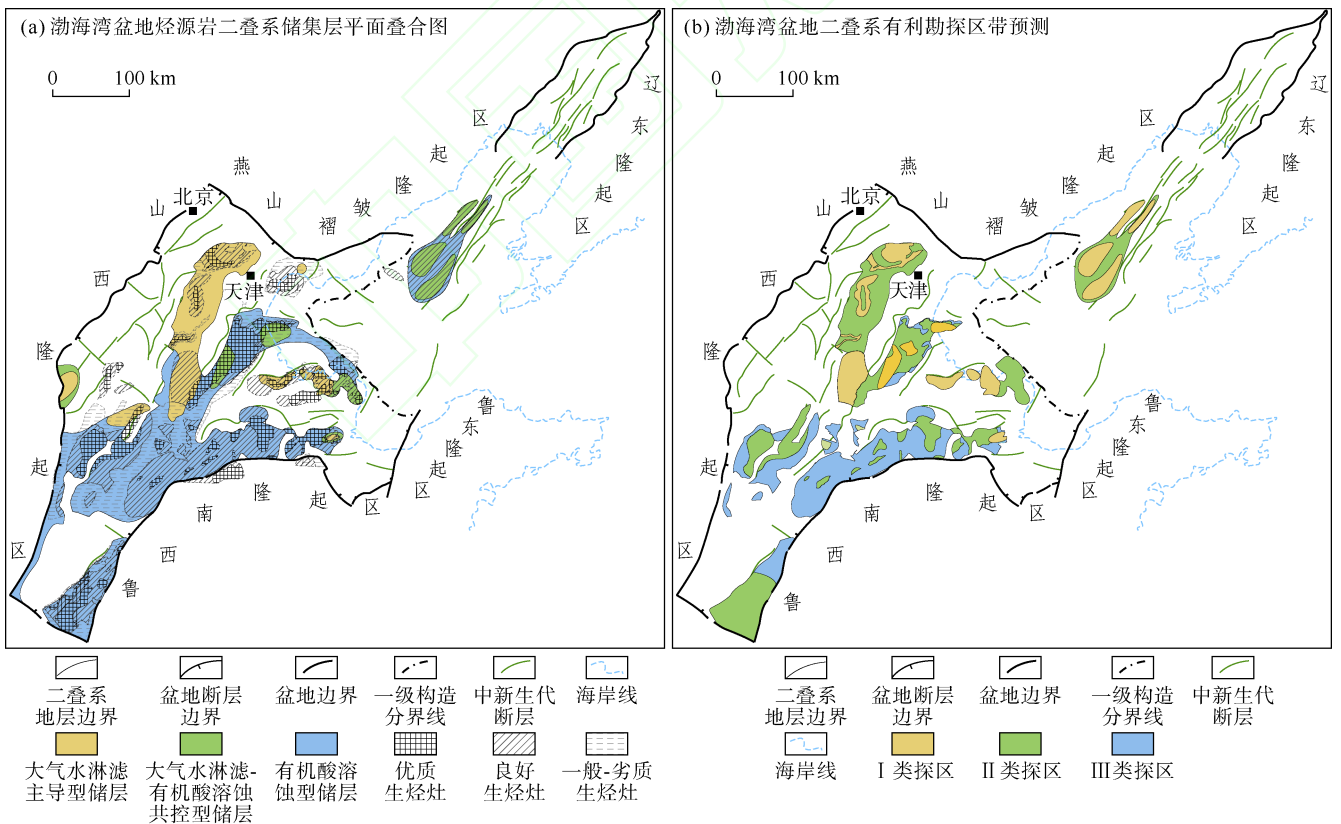


图 12 渤海湾盆地二叠系烃源储叠合图及有利勘探区预测

5 结论

渤海湾盆地上石盒子组碎屑岩粒度较粗,成分成熟度高,以富石英砂岩为主;下石盒子组、山西组砂岩粒度较细,以低成分成熟度的贫石英砂岩为主。二叠系储集层以中低孔-中低渗/致密储集层为主,孔隙度多为5%~20%,渗透率多为 $(0.1\sim 100.00)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$;储集空间以长石溶孔为主,中浅层局部发育原生孔隙,中深层高岭石晶间普遍发育。

二叠系碎屑岩储集层经历了3期埋藏和2期抬升过程,据此将二叠系分为3种典型构造叠加样式,两期不整合暴露型、1期不整合暴露型及相对整合未暴露型。溶蚀增孔作用主要发生于抬升期中浅层开放-半开放环境,埋藏期深埋条件下近封闭成岩体系中的溶蚀作用将原生孔隙向次生孔隙和高岭石晶间孔进行调配,储集空间增加有限。

“浅层成孔-中浅埋藏型”储集层于(近)地表经历两期大气水淋滤增孔作用,浅埋保存溶孔,储集空间以大量次生孔隙为主,兼有部分原生孔隙,物性最好;“浅层成孔-深埋调配保孔型”储集层于(近)地表接受大气水淋滤增孔,深埋封闭体系下溶蚀作用调配孔隙类型,高刚性颗粒含量和烃类充注保存孔隙,以大量长石次生溶孔为主,高岭石晶间微孔隙为辅,物性次之;“多期溶蚀调配成孔型”储集层主要经历近封闭-封闭环境下有机来源酸性流体溶蚀调配成孔作用,储集空间以高岭石晶间微孔隙为主、长石次生溶孔为辅,原生孔隙不再发育,物性相对较差。经历早期大气水淋滤,晚期发生构造反转,现今埋藏于潜山斜坡/洼陷带的“浅层成孔-深埋调配保孔型”储集层为下一步重点勘探方向。

致谢:本文在研究中得到了大港油田、胜利油田、华北油田、中原油田等石油公司提供的岩石样品、地质资料和技术支持,谨致谢忱。

符号注释:

d ——与注水点的距离, km; K ——渗透率, $10^3\mu\text{m}^3$; R ——样品中稀土元素含量与球粒陨石中的稀土元素含量的比值, 无因次; θ ——地层倾斜角度, ($^\circ$); ϕ ——孔隙度, %。

参考文献:

[1] 周心怀, 王德英, 于海波, 等. 环渤中地区浅层大规模岩性油藏的成藏主控因素与成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 660-669, 740.
ZHOU Xinhui, WANG Deying, YU Haibo, et al. Major controlling factors and hydrocarbon accumulation models of large-scale

lithologic reservoirs in shallow strata around the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 660-669, 740

[2] 韩文中, 赵贤正, 金凤鸣, 等. 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[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 777-786.
HAN Wenzhong, ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, et al. Sweet spots evaluation and exploration of lacustrine shale oil of the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4): 777-786.

[3] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩型页岩油勘探开发理论技术与实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 616-626.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Theories, technologies and practices of lacustrine shale oil exploration and development: A case study of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 616-626.

[4] 付晓飞, 宋宪强, 王海学, 等. 裂陷盆地断层圈闭含油气有效性综合评价: 以渤海湾盆地歧口凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 677-686.
FU Xiaofei, SONG Xianqiang, WANG Haixue, et al. Comprehensive evaluation on hydrocarbon-bearing availability of fault traps in a rift basin: A case study of the Qikou Sag in the Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4): 677-686.

[5] 黄土鹏, 龚德瑜, 于聪, 等. 石炭系—二叠系煤成气地球化学特征: 以鄂尔多斯盆地和渤海湾盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 98-108.
HUANG Shipeng, GONG Deyu, YU Cong, et al. Geochemical characteristics of the gases sourced from the Carboniferous-Permian coal measures: A case study of Ordos and Bohai Bay basins, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 98-108.

[6] 钱铮, 张松航, 唐书恒, 等. 文安-杨村斜坡石炭-二叠系煤成气成藏模式[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 160-166.
QIAN Zheng, ZHANG Songhang, TANG Shuheng, et al. Accumulation mode of Carboniferous-Permian coal-formed gas in Wen'an-Yangcun Slope[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 160-166.

[7] 张亮. 冀中拗陷北部石炭-二叠系煤成油气成藏作用与主控因素分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
ZHANG Liang. Study on the reservoir-forming process and exploration directions of coal-derived oil and gas from the Permo-Carboniferous in the north of Jizhong Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.

[8] 付立新, 楼达, 冯建元, 等. 歧口凹陷中位序、低位序潜山地质特征及油气勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(4): 559-565.
FU Lixin, LOU Da, FENG Jianyuan, et al. Geologic features and hydrocarbon exploration potential of middle-and low-buried hill in Qikou Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(4): 559-565.

[9] 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.
- [10] 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.
- [11] XU J J, JIN Q. Hydrocarbon generation from Carboniferous-Permian coaly source rocks in the Huanghua Depression under different geological processes[J]. *Petroleum Science*, 2020, 17(6): 1540-1555.
- [12] 金强, 宋国奇, 梁宏斌, 等. 渤海湾盆地源于石炭系-二叠系的煤成气成因特征和潜力分析[J]. *地质学报*, 2009, 83(6): 861-867.
JIN Qiang, SONG Guoqi, LIANG Hongbin, et al. Characteristics of Carboniferous-Permian coal-derived gas in the Bohai Bay Basin and their implication to exploration potential[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(6): 861-867.
- [13] 赵贤正, 李宏军, 付立新, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷古生界煤成凝析气藏特征、主控因素与发育模式[J]. *石油学报*, 2021, 42(12): 1592-1604.
ZHAO Xianzheng, LI Hongjun, FU Lixin, et al. Characteristics, main controlling factors and development mode of Paleozoic coal-formed condensate gas reservoirs in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2021, 42(12): 1592-1604.
- [14] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [15] FRANÇA A B, ARAÚJO L M, MAYNARD J B, et al. Secondary porosity formed by deep meteoric leaching: Botucatu eolianite, southern South America[J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(7): 1073-1082.
- [16] YUAN G H, CAO Y C, SCHULZ H M, et al. A review of feldspar alteration and its geological significance in sedimentary basins: From shallow aquifers to deep hydrocarbon reservoirs[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 114-140.
- [17] 邱隆伟, 侯立新, 汪丽芳. 埕110块碎屑岩储层物性表生作用分带性研究[J]. *油气地质与采收率*, 2005, 12(5): 16-20.
QIU Longwei, HOU Lixin, WANG Lifang. A study on the zoning of hypergenesis of physical properties of clastic reservoir in Cheng 110 Block[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(5): 16-20.
- [18] BJØRLYKKE K, JAHREN J. Open or closed geochemical systems during diagenesis in sedimentary basins: Constraints on mass transfer during diagenesis and the prediction of porosity in sandstone and carbonate reservoirs[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(12): 2193-2214.
- [19] GILES M R, MARSHALL J D. Constraints on the development of secondary porosity in the subsurface: Re-evaluation of processes[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1986, 3(3): 243-255.
- [20] YUAN G H, CAO Y C, GLUYAS J, et al. Feldspar dissolution, authigenic clays, and quartz cements in open and closed sandstone geochemical systems during diagenesis: Typical examples from two sags in Bohai Bay Basin, East China[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(11): 2121-2154.
- [21] GILES M R. Mass transfer and problems of secondary porosity creation in deeply buried hydrocarbon reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1987, 4(3): 188-204.
- [22] SHEPPARD S M F, GILG H A. Stable isotope geochemistry of clay minerals[J]. *Clay Minerals*, 1996, 31(1): 1-24.
- [23] SURDAM R C, CROSSEY L J. Integrated diagenetic modeling: A process-oriented approach for clastic systems[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1987, 15(1): 141-170.
- [24] SCHMIDT V, MCDONALD D A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis[M]//SCHOLLE P A, SCHLUGER P R. *Aspects of Diagenesis*. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1979: 175-207.
- [25] KAWAMURA K, KAPLAN I R. Dicarboxylic acids generated by thermal alteration of kerogen and humic acids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 3201-3207.
- [26] BARTH T, BJØRLYKKE K. Organic acids from source rock maturation: generation potentials, transport mechanisms and relevance for mineral diagenesis[J]. *Applied Geochemistry*, 1993, 8(4): 325-337.
- [27] 郭宏莉, 王大锐. 塔里木油气区砂岩储集层碳酸盐胶结物的同位素组成与成因分析[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(3): 31-32.
GUO Hongli, WANG Darui. Stable isotopic composition and origin analysis of the carbonate cements within sandstone reservoirs of Tarim oilgas bearing area[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(3): 31-32.
- [28] GÖTTE T, RAMSEYER K, PETTKE T, et al. Implications of trace element composition of syntaxial quartz cements for the geochemical conditions during quartz precipitation in sandstones[J]. *Sedimentology*, 2013, 60(5): 1111-1127.
- [29] EMERY D, MYERS K J, YOUNG R. Ancient subaerial exposure and freshwater leaching in sandstones[J]. *Geology*, 1990, 18(12): 1178-1181.
- [30] LAWRENCE M G, GREIG A, COLLERSON K D, et al. Rare earth element and yttrium variability in south east Queensland waterways[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2006, 12(1): 39-72.
- [31] 操应长, 远光辉, 王艳忠, 等. 典型含油气盆地深层富长石碎屑岩储层长石溶蚀接力成孔认识及其油气地质意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(9): 1694-1725.
CAO Yingchang, YUAN Guanghui, WANG Yanzhong, et al. Successive formation of secondary pores via feldspar dissolution in deeply buried feldspar-rich clastic reservoirs in typical petroliferous basins and its petroleum geological significance[J]. *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, 2022, 65(9): 1673-1703.
- [32] YUAN G H, CAO Y C, SUN P P, et al. Genetic mechanisms of Permian Upper Shihezi sandstone reservoirs with multi-stage subsidence and uplift in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 124: 104784.
- [33] MASTALERZ M, DROBNIK A, STANKIEWICZ A B. Origin, properties, and implications of solid bitumen in source-rock reservoirs: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 195: 14-36.

第一作者简介: 操应长(1969-), 男, 安徽潜山人, 博士, 中国石油大学(华东)教授, 主要从事构造地质学、石油地质学和油气勘探研究。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 中国石油大学(华东), 邮政编码: 266580。E-mail: caoych@upc.edu.cn

收稿日期: 2022-06-09 修回日期: 2023-08-16

(编辑 谷江锐)