

大港探区南部二叠系致密砂岩储层特征及成因

孙沛沛¹, 操应长^{1,2}, 远光辉^{1,2}, 周立宏³, 靳子濠¹, 吴智平¹, 付立新³, 张飞鹏³, 陈长伟³

1. 深层油气全国重点实验室, 中国石油大学(华东), 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

摘要 【目的】大港探区南部二叠系致密砂岩获高产油气流, 但其储层特征与成因机制尚不明确。【方法】综合利用岩心观察、薄片鉴定、阴极发光分析、扫描电镜观察、流体包裹体分析、碳氧同位素与氢氧同位素组成分析、电子探针及原位激光剥蚀等技术方法, 结合埋藏演化史和油气充注史, 对大港探区南部王官屯、乌马营地区二叠系深层砂岩储层进行研究。【结果】大港南区二叠系砂岩以高成分成熟度的石英砂岩、亚岩屑砂岩为特征, 优质储层储集空间以次生粒间孔及高岭石晶间微孔为主。在构造运动的控制下, 储层经历早期开放体系大气水淋滤溶蚀作用和晚期封闭体系烃源岩生酸溶蚀作用。优质储层的发育受多种因素控制, 高成熟度的中粗砂岩是优质储层形成的物质基础, 早期地层抬升剥蚀导致的大气淡水淋滤作用形成大量次生孔隙是优质储层发育的关键, 早期烃类充注抑制胶结作用有利于次生孔隙的保存。【结论】地质历史时期为大气水淋滤注水区, 而现今位于斜坡带—洼陷带的深埋储层, 为下步有利勘探目标。该模式的建立对渤海湾盆地其他地区二叠系储层的钻前预测具有借鉴意义。

关键词 成因机制; 成岩演化; 砂岩储层; 二叠系; 大港探区南部

第一作者简介 孙沛沛, 男, 1989年出生, 博士研究生, 油气储层地质学, E-mail: sunpei1022@163.com

通信作者 操应长, 男, 教授, E-mail: caoych@upc.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

渤海湾盆地在中—新生代经历了复杂的构造演化过程, 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, 上古生界的油气资源潜力和储层储集性能被认为明显劣于同处于华北板块的鄂尔多斯盆地上古生界^[1-3], 形成规模油气藏的潜力不大。得益于复杂的构造运动, 渤海湾部分地区发育长期风化淋滤的二叠系高位潜山, 早期多以此为勘探重点; 近年来, 以大港南区为代表的渤海湾盆地二叠系中、低位潜山同样发现了大规模油气聚集^[4-6], 如官古1601、营古1及营古2

收稿日期: 2023-05-17; 收修改稿日期: 2023-10-07

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05006-007); 国家自然科学基金项目(42222208); 泰山学者青年专家项目(201909061) [Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05006-007; National Natural Science Foundation of China; No. 42222208; Young Experts Project of Taishan Scholars; No. 201909061]

井等储层中均获得高产油气流。大港探区南部地区在多期次差异性构造埋藏—抬升作用影响下,不同地区二叠系储层埋藏史、热史差异明显,相应的砂岩储层非均质性强,成因机制尚不明确,严重制约了油气勘探的进程。笔者综合利用钻井岩心、岩石薄片、压汞测试资料、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,探讨了大港探区南部二叠系致密储层特征和储层成岩演化历史,明确了研究区二叠系致密储层多期次埋藏—抬升背景下的成因机制,指出了优质储层分布规律,为渤海湾盆地其他地区致密储层的勘探提供理论指导。

1 地质概况

大港探区主体位于渤海湾盆地中心地带,包括黄骅坳陷、沧县隆起、埕宁隆起等三个大地构造单元(图 1a)。二叠纪时期发生大规模海退,大港探区二叠纪发育海陆过渡相及陆相碎屑岩地层(图 1b),自下而上依次为山西组(P_{1s})、下石盒子组(P_{1x})、上石盒子组(P_{2s})、石千峰组(P_{2sh})。大港探区在中、新生代经历了复杂的基底断裂改造过程,形成了大量的潜山构造^[7]。大港南部地区主要勘探区域为王官屯和乌马营潜山,此二潜山在埋藏过程中受白垩纪末期燕山运动及新生代喜山运动的影响,均表现出山顶地层保存完整,翼部剥蚀较强的特征。其中王官屯地区东高西低,地层东厚西薄,潜山顶部东侧为孔东正断层,断层下盘二叠系地层与上盘孔店组地层对接(图 1c)。乌马营地区西高东低,地层西厚东薄,无大型断层发育。大港探区南部上石盒子组辫状河相砂体为主要勘探目的层(图 1d)。

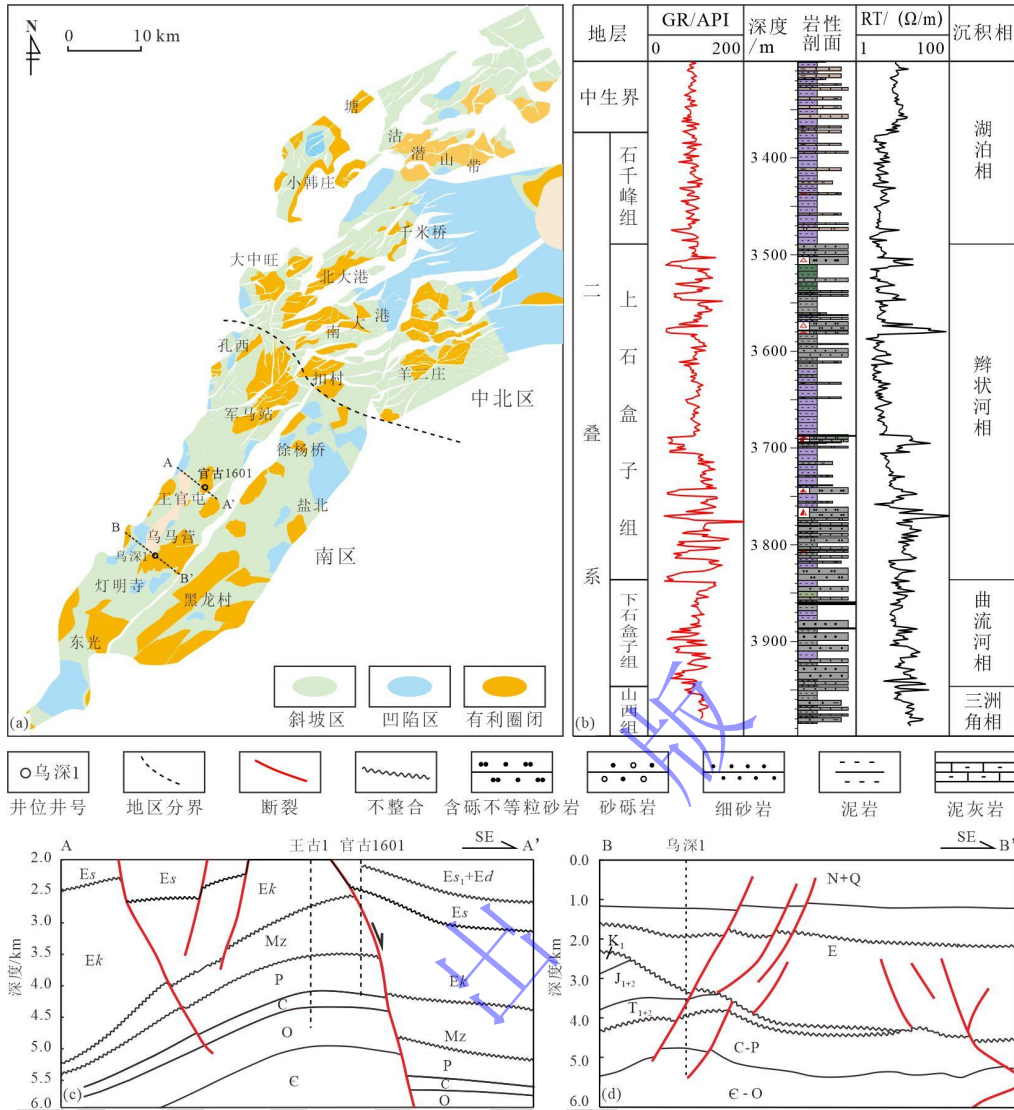


图1 大港南部地区构造位置、构造特征及沉积地层特征（据大港油田资料修改）

Fig.1 Location, structural characteristics and sedimentary stratigraphic characteristics of the southern Dagang area (amended from Dagang Oilfield data)

2 储层储集特征

2.1 岩石学特征

根据岩心观察和薄片鉴定结果，大港探区南部二叠系储层岩性以中、粗砂岩及含砾砂岩为主，其次为少量薄层细砂岩等（图 2a~c）。储层中碎屑颗粒以线接触—凹凸接触为主，分选较好，分选系数主要介于 1.25~1.29，颗粒磨圆以次棱角状—次圆状为主；胶结方式主要为孔隙式胶结。大港探区南部二叠系储层储集空间以次生孔隙（图 2d~f）和高岭石晶间微孔（图 2g, h）为主，原生孔隙极少，局部可见微裂缝发育（图 2i）。颗粒次生孔隙占总孔隙的 19%，高岭石晶间微孔占总孔隙的 78%，原生孔及微裂缝等共计 3%。其中局部发育的微裂缝对储集空间贡献小，但其为后期酸性流体运移提供了有利通道。研究区储层岩石类型

以石英砂岩、亚岩屑砂岩为主，岩石成分成熟度较高，骨架颗粒中石英平均质量分数为 82.61%，长石平均质量分数为 4.14%，以钾长石为主，岩屑以变质岩岩屑为主，平均质量分数为 13.23%，储层杂基含量低，平均质量分数 0.31%。

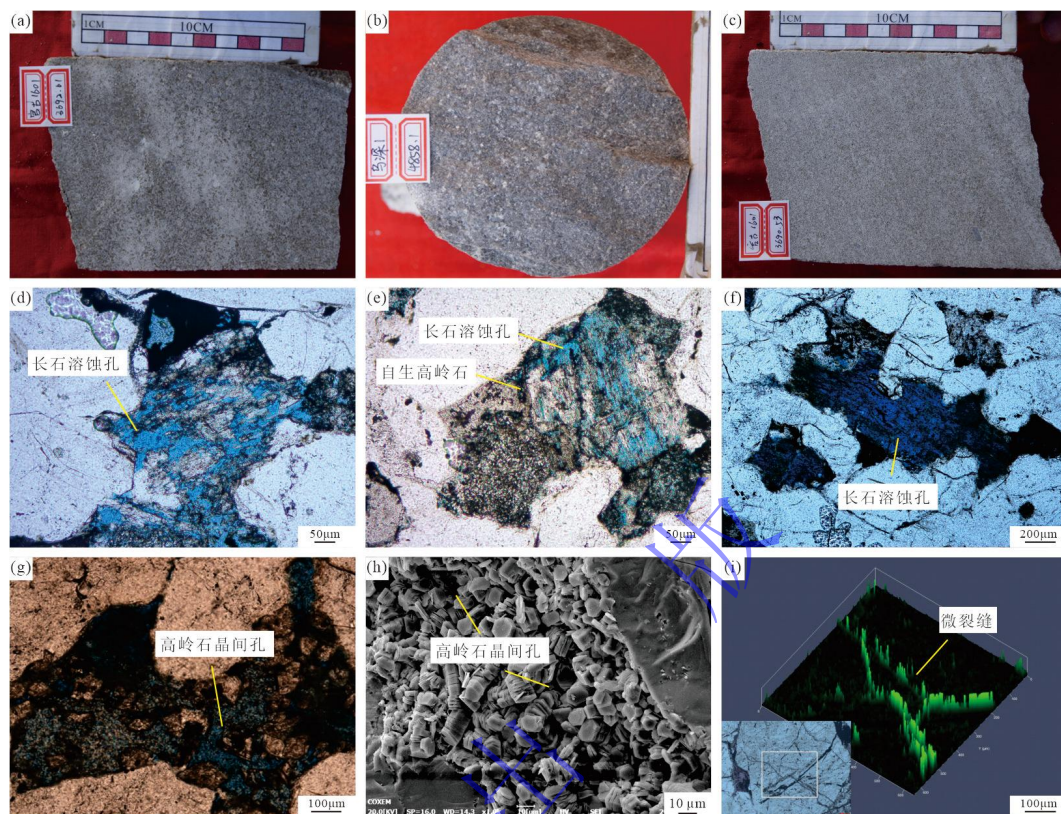


图2 二叠系储层岩石学特征图版

(a) 砾质粗砂岩，官古 1601 井，3 692.61 m，岩心；(b) 粗砂岩，乌深 1 井，4 858.10 m，岩心；(c) 中砂岩，官古 1601 井，3 690.53 m，岩心；(d) 长石溶蚀孔隙，官古 1601 井，3 692.51 m，单偏光；(e) 长石溶蚀孔隙，官古 1601 井，3 692.51 m，单偏光；(f) 长石溶蚀孔隙，营古 1 井，4 871.00 m，单偏光；(g) 高岭石晶间微孔，营古 2 井，4 707.30 m，单偏光；(h) 高岭石晶间微孔，乌深 1 井，4 858.27 m，扫描电镜；(i) 微裂缝，营古 1 井，4 748.00 m，激光共聚焦

Fig.2 Permian reservoir petrological characteristics

(a) gravel coarse sandstone, GG1601, 3 692.61 m, core; (b) coarse sandstone, WS1, 4 858.10 m, core; (c) medium sandstone, GG1601, 3 690.53 m, core; (d) feldspar dissolution pores, GG1601, 3 692.51 m, PPL (Plane-Polarized Light); (e) feldspar dissolution pores, GG1601, 3 692.51 m, PPL; (f) feldspar dissolution pores, YG1, 4 871.00 m, PPL; (g) kaolinite intercrystalline micropores, YG2, 4 707.30 m, PPL; (h) kaolinite intercrystalline micropores, WS1, 4 858.27 m, SEM; (i) microfracture, YG1, 4 748.00 m, LSCM (Laser Scanning Confocal Microscope)

2.2 储集物性特征

统计大港探区南部二叠系实测物性数据，储层孔隙度为 3.8%~14.0%（图 3a），平均孔隙度为 8.7%，其中孔隙度为 10%~15%的储集层比例为 25.93%，孔隙度为 5%~10%的储集层比例为 67.90%（图 3b）；渗透率为 $(0.01\sim63.9)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，平均渗透率为 $2.26\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，其中渗透率为 $(0.1\sim1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的储集层比例为 64.20%（图 3c）。由此可见，大港南区二叠系储层主要为特低孔特低渗储层。

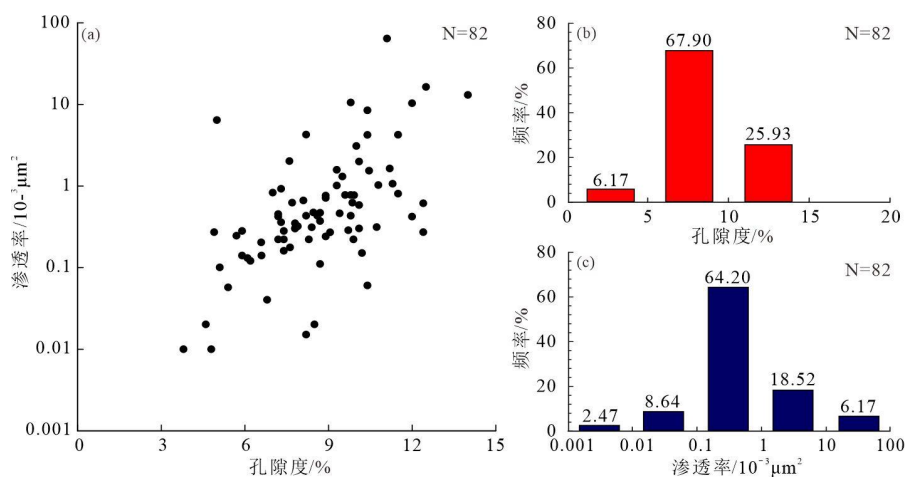


图3 二叠系储层物性分布特征

Fig.3 Distribution of physical properties of Permian reservoirs

3 储层成岩作用与改造过程

3.1 储层成岩作用类型与特征

通过对二叠系碎屑岩储层镜质体反射率 R_o (1.29%~1.53%) 分布、伊蒙层间比、自生矿物发育等方面的研究,依据石油行业标准 (SY/T 5477—2003) 碎屑岩成岩阶段划分规范^[8],认为研究区二叠系碎屑岩储层目前处于中成岩 B 期。大港探区南部二叠系砂岩储层成岩作用整体表现为压实作用强烈,胶结作用多样,溶解作用强烈等特征。

3.1.1 压实作用

大港探区南部二叠系储层中,石英含量高、塑性岩屑含量低,储层抗压实能力强,但整体埋深较大,介于 3 600~4 900 m,颗粒以线接触—凹凸接触为主 (图 4a, b),局部可见缝合接触,偶见塑性岩屑的压实变形。

3.1.2 胶结作用

二叠系储层胶结作用普遍,总含量约 1%~10%,平均为 5.6%。胶结物主要为自生高岭石、自生石英及碳酸盐矿物等。

自生高岭石发育广泛,多充填粒间孔隙或呈颗粒形态分布,可见长石颗粒局部蚀变为高岭石 (图 4c~e)。高岭石自形程度高,常见假六方片状单体,集合体呈书页状或蠕虫状几何体形态,单矿物粒径约 8~12 μm 。常见自生高岭石与硅质胶结物伴生现象 (图 4d, f)。XRD 数据表明高岭石占全部岩石组分的 1%~10%。激光剥蚀微量元素分析结果表明,自生高岭石与长石颗粒稀土元素配分模式一致 (图 5a),认为自生高岭石主要由长石溶蚀提供物质来源。

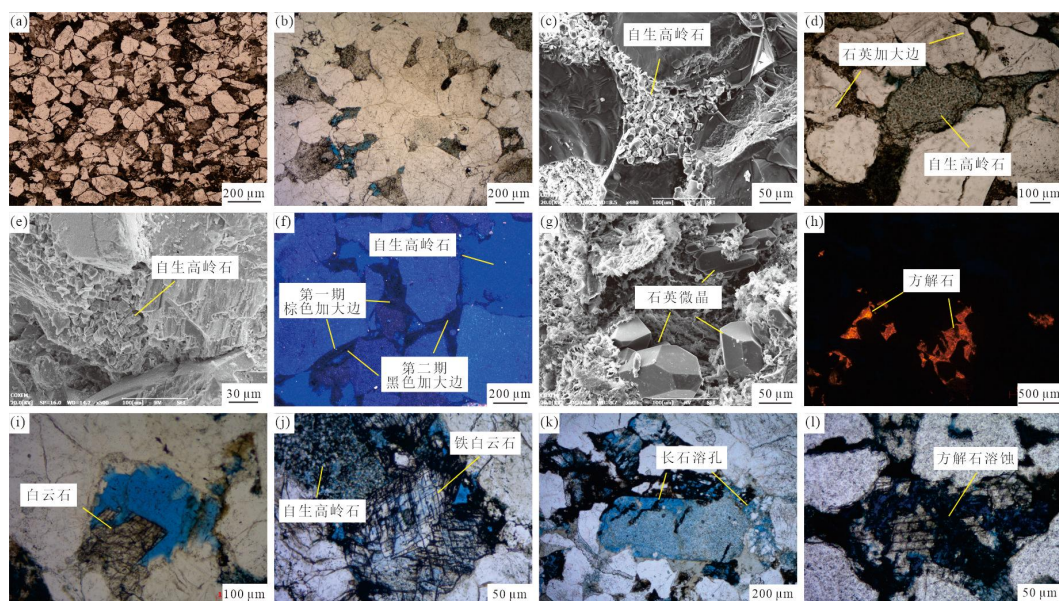


图4 二叠系储层成岩作用

(a) 颗粒线接触为主, 官古1601井, 3690.06 m, 单偏光; (b) 线接触—凹凸接触, 乌深1井, 4859.27 m, 单偏光; (c) 高岭石充填粒间孔, 营古2井, 4707.30 m, 扫描电镜; (d) 高岭石集合体呈颗粒形态, 官古1601井, 3689.83 m, 单偏光; (e) 长石颗粒蚀变为高岭石, 乌深1井, 4859.27 m, 扫描电镜; (f) 两期石英加大边, 营古2井, 4699.60 m, 阴极发光; (g) 自生石英微晶, 营古1井, 4824.80 m, 扫描电镜; (h) 方解石充填粒间孔, 官古1601井, 3692.51 m, 阴极发光; (i) 白云石充填长石溶孔, 官88-18井, 4132.60 m, 单偏光; (j) 铁白云石胶结, 乌深1井, 4859.27 m, 单偏光; (k) 长石颗粒溶蚀, 官古1601井, 乌深1井, 4859.27 m, 单偏光; (l) 方解石胶结物溶蚀, 官古1601井, 3692.86 m, 单偏光

Fig.4 Diagenetic characteristics of Permian reservoirs

(a) mainly particle line contact, GG1601, 3690.06 m, PPL; (b) line-concave/convex contact, WS1, 4859.27 m, PPL; (c) kaolinite filling intergranular pores, YG2, 4707.30 m, SEM; (d) kaolin aggregate in the form of particles, GG1601, 3689.83 m, PPL; (e) feldspar particles altered to kaolinite, WS1, 4859.27 m, SEM; (f) two phases of quartz overgrowth, YG2, 4699.60 m, CL; (g) authigenic microcrystalline quartz, YG1, 4824.80 m, SEM; (h) calcite intergranular infill, GG1601, 3692.51 m, CL; (i) dolomite filling feldspar dissolved pores, G88-18, 4132.60 m, PPL; (j) ankerite cementation, WS1, 4859.27 m, PPL; (k) feldspar dissolution, WS1, 4859.27 m, PPL; (l) dissolution of calcite cementation, GG1601, 3692.86 m, PPL

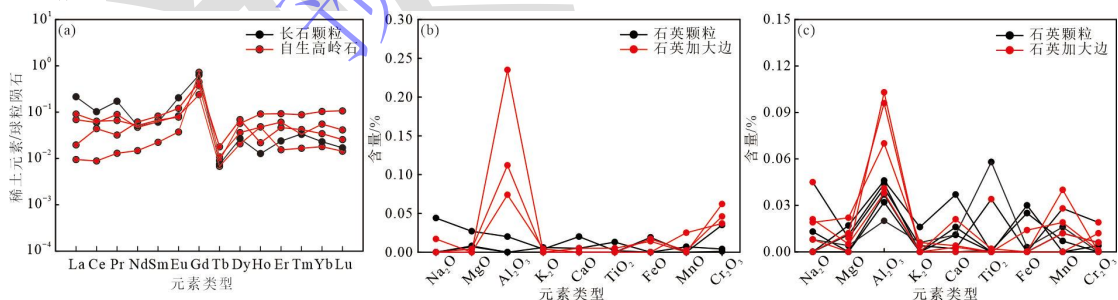


图5 二叠系砂岩储层长石、石英颗粒与自生高岭石、石英元素特征

(a) 自生高岭石与长石稀土元素特征; (b) 油层石英颗粒与自生石英主要元素特征; (c) 水层石英颗粒与自生石英主要元素特征

Fig.5 Characteristics of feldspars, quartz particles and authigenic kaolinite and quartz in Permian sandstone reservoirs

(a) rare earth elements in authigenic kaolinite and feldspar; (b) main elements in authigenic quartz and quartz grains in oil layers; (c) main elements in authigenic quartz and quartz grains in water layers

研究区石英胶结物普遍发育, 主要以石英加大边和石英微晶的形式存在 (图4d, f, g),

含量介于 1%~1.5%。二叠系共发育两期石英胶结，第一期石英加大阴极发光下为棕色，第二期石英加大阴极发光下为黑色（图 4e）。电子探针分析结果表明，上石盒子组石英颗粒中 Al 元素含量多小于 0.05%，自生石英中 Al 元素含量高于 0.15%，更富含 Al 元素（图 5b）。这说明长石溶蚀是研究区自生石英的主要物质来源之一。

流体包裹体可以提供古地质流体的组成及温度等信息^[9]。大港南区上石盒子组砂岩中，流体包裹体主要存在于石英颗粒愈合缝与石英加大边中，盐水包裹体直径介于 2~8 μm 。分析结果显示，南区二叠系第一期石英加大盐水包裹体均一温度介于 100 $^{\circ}\text{C}$ ~125 $^{\circ}\text{C}$ ，第二期均一温度介于 110 $^{\circ}\text{C}$ ~140 $^{\circ}\text{C}$ （图 6）。

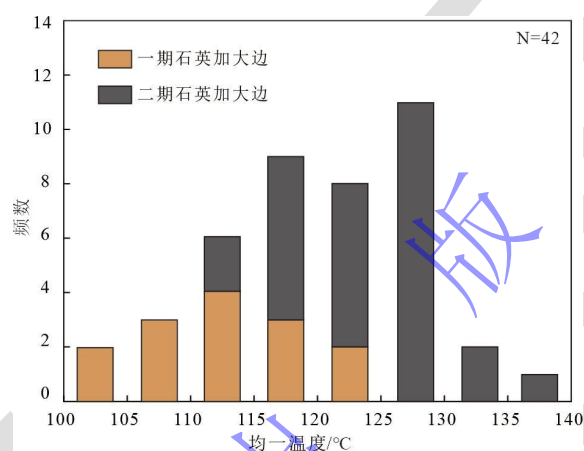


图 6 石英加大边中盐水包裹体均一温度

Fig.6 Histograms of homogenization temperature for aqueous inclusions in quartz overgrowths

储层碳酸盐胶结物局部发育，部分样品中碳酸盐含量可达 5%，主要包括方解石、白云石和铁白云石等（图 4h~j）。薄片及阴极发光分析可知，方解石充填原生粒间孔，为早期成因，（铁）白云石自形程度高，多分布于粒间孔或溶蚀孔隙内，常与自生高岭石共生（图 4j），形成时间晚于大规模溶蚀作用。碳酸盐胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -5.7‰~-9.6‰， $\delta^{18}\text{O}$ 介于 -13.1‰~-16.8‰（图 7），表明其受有机酸脱羧作用影响明显^[10-11]。其中铁白云石胶结物中盐水包裹体均一温度分布范围为 90 $^{\circ}\text{C}$ ~122 $^{\circ}\text{C}$ ，方解石胶结物中未观察到包裹体，为补充测温数据的不足，利用 $\delta^{18}\text{O}$ 值，据 Friedman *et al.*^[12]给出的方解石—水体系中方解石形成温度公式，计算可知研究区方解石形成温度分布范围为 43.8 $^{\circ}\text{C}$ ~67.7 $^{\circ}\text{C}$ 。

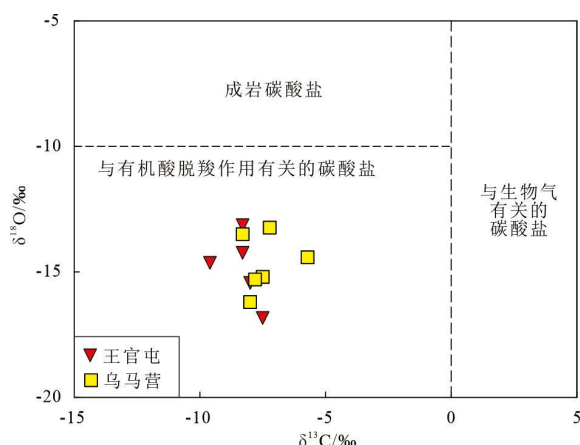


图7 二叠系砂岩碳酸盐胶结物碳氧同位素组成特征^[10-11]

Fig.7 Carbon and oxygen isotopes of carbonate cement in Permian sandstones^[10-11]

3.1.3 溶蚀作用

研究区储集层溶蚀作用以长石颗粒溶蚀为主（图4k），其次为少量岩屑及碳酸盐胶结物溶蚀（图4l）。镜下可见长石颗粒部分溶蚀、完全溶蚀为铸模孔、部分或整体蚀变为高岭石等。研究区残余次生孔隙含量多介于1%~3%，平均1.8%。统计镜下长石溶蚀孔隙与溶蚀产物（高岭石、自生石英）含量，显示溶蚀产物含量明显高于长石溶孔含量（图8a, b），这是典型的封闭体系成岩作用组合特征^[13]。

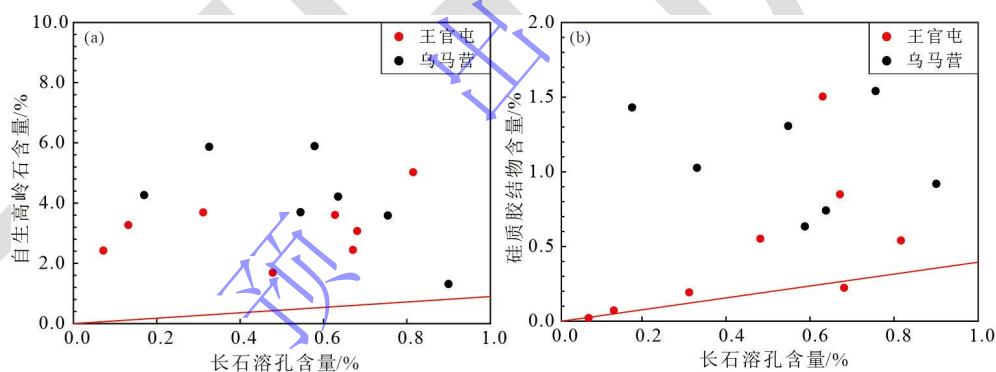


图8 溶蚀孔隙与自生矿物含量关系

Fig.8 Relationship between dissolution pores and authigenic mineral content

3.2 储集层成岩改造过程

利用自生矿物交切关系、溶蚀充填关系、稳定同位素数据、盐水包裹体均一温度及埋藏史、热史等资料，综合分析大港探区南部二叠系砂岩储层成因演化过程。

王官屯地区官古1601井埋藏史如下，储层经历了如下五个演化阶段（图9）：初次埋藏阶段，二叠系沉积后，逐渐埋藏，至三叠纪中期，其下伏烃源岩最大埋深达3000m；第一次抬升阶段，三叠纪中期发生地层抬升，三叠系与上二叠统地层遭受强烈剥蚀，上石盒子组砂岩出露地表；二次埋藏阶段，至侏罗纪，王官屯地层再次沉降，此阶段上石盒子组地层埋深浅于初次埋藏；第二次抬升阶段，白垩纪中期，地壳再次上升，白垩系地层剥蚀殆尽；三

次埋藏阶段，新生代时期至今，研究区地层持续沉降埋藏。乌深 1 井埋藏过程与官古 1601 井相似，仅各期埋藏深度与抬升剥蚀厚度不同。

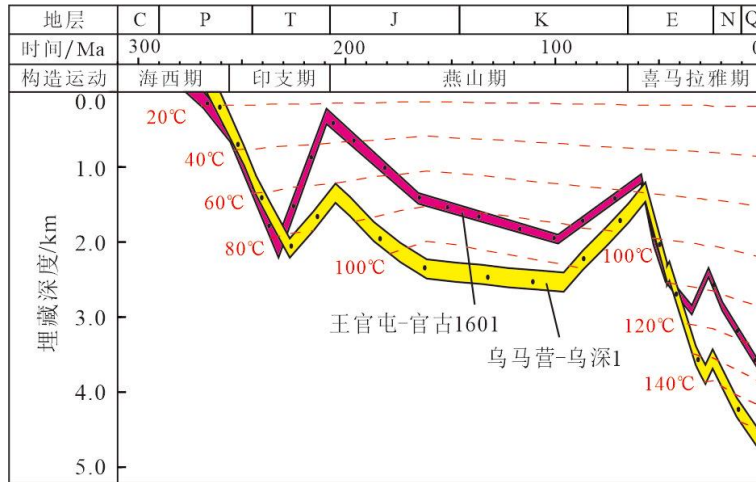
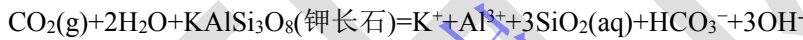


图 9 官古 1601、乌深 1 井埋藏史—热史
Fig.9 Burial-thermal history of GG1601 and WS1

3.2.1 抬升阶段开放成岩体系

大港探区南部地层接触关系与埋藏史表明，三叠纪末期发生大规模构造抬升，二叠系局部地层出露地表，这导致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。



自生高岭石氢氧同位素数据可用来分析推测其形成时的古流体来源^[14]。通过反复冷冻—解冻碎样装置，对岩石样品进行破碎，制备黏土悬浮液，而后使用离心分离法，获取纯度高于 95% 的高岭石样品。对研究区自生高岭石进行氢氧同位素测试，结果显示其 δD 介于 116.9‰~101.1‰， $\delta^{18}\text{O}$ 介于 20.2‰~16.5‰，同位素数据与大气水成因高岭石分布范围重合度高（图 10），说明自生高岭石成因与大气淡水淋滤作用相关。

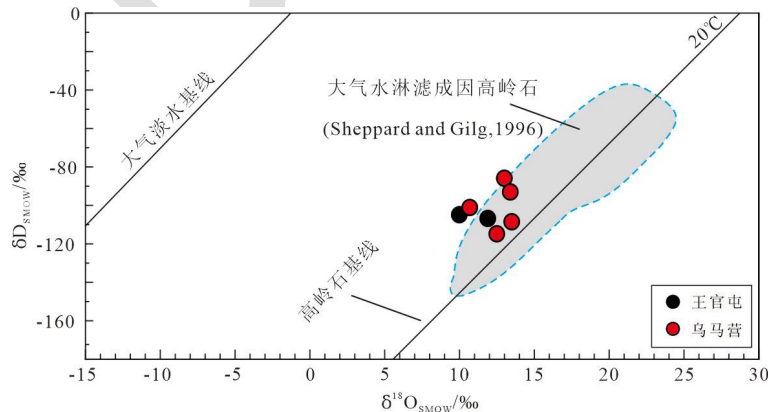


图 10 自生高岭石氢氧同位素组成特征（图版据文献[14]）
Fig.10 Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in authigenic kaolinite^[14]

3.2.2 埋藏阶段封闭成岩体系

渤海湾盆地在石炭纪—二叠纪经历了大面积的海侵以及后续的海退,在海陆交替的环境中形成了一套广泛分布的煤系地层,岩性主要为富有机质泥岩和煤岩等^[15]。构造演化史表明,在三叠纪末期的初次沉降过程中,下伏烃源岩最大埋深可达约 3 000 m,并演化至低成熟阶段,此时的烃源岩 R_o 约 0.6%~0.8%。干酪根在热演化过程中,产生大量有机酸及 CO_2 ^[16-17]。在后续埋藏过程中,当埋藏深度超过 3 000 m 时,烃源岩热演化产生更多有机酸及 CO_2 。其中王官屯地区古近系烃源岩与二叠系砂岩通过孔东断层对接(图 1c),其埋藏过程中形成的烃类和酸性流体,可通过断层注入二叠系储层。

据地层气成分,可知大港南区油气藏中 CO_2 仍大量存在,其摩尔分数介于 3.87%~7.33%。通过分析储层流体压力和储层中 CO_2 含量,可以确定 CO_2 分压介于 1.5~2.8 MPa(图 11a)。对研究区砂岩包裹体薄片进行激光拉曼分析,可在乌深 1 井包裹体中检测出 CO_2 气体(图 11b)。地层与包裹体中的 CO_2 均表明地质历史时期烃源岩热演化生成的酸性流体能够传输到二叠系砂岩中。

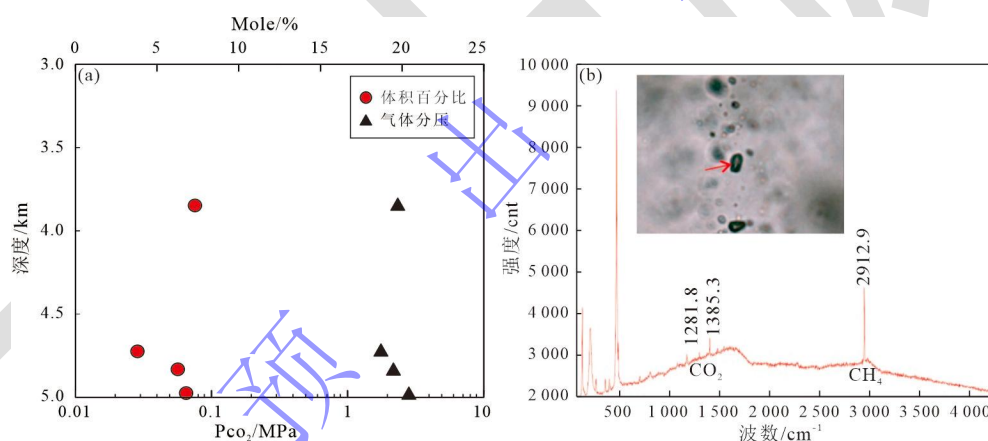


图 11 二叠系 CO_2 含量、 P_{CO_2} 垂向分布特征及包裹体成分分析

Fig. 11 Distribution of content and partial pressure of CO_2 and inclusion composition in Permian sandstone

来自下伏石炭—二叠系烃源岩或侧向古近系烃源岩的有机酸和 CO_2 溶蚀长石颗粒,长石颗粒局部蚀变为自生高岭石(图 4j)、自生高岭石与自生石英的大量共生、具长石颗粒形态的高岭石集合体(图 4b),均说明长石颗粒溶蚀产物的原地沉淀普遍发生。与自生高岭石共生的铁白云石矿物成因受有机酸脱羧作用影响明显,说明部分自生高岭石确为源岩生酸溶蚀长石的产物。

3.2.3 储层成岩演化过程

在储层岩石学及储集特征、成岩作用类型与特征、同位素及流体包裹体等研究的基础上,将包裹体均一温度及碳酸盐形成温度投射到埋藏史—热史图中,结合构造演化过程,明确了

二叠系储层石英及碳酸盐胶结物形成时间，恢复了二叠系砂岩储层成岩演化过程。以官古1601井为例（图12）：

(1) 二叠系沉积后，持续埋藏至三叠纪中期，其下伏烃源岩最大埋深达3000 m，地层温度约100℃，有机质热演化生少量酸性物质，此阶段压实作用强烈，粒间体积急剧缩小，孔隙度降低，为早成岩阶段。据方解石形成温度(43.8℃~67.7℃)可知早期碳酸盐胶结物形成于此阶段。(2) 三叠纪中晚期，印支运动导致二叠系地层不均匀抬升，部分地层暴露地表遭受强烈剥蚀，大气淡水入侵上石盒子组砂岩，发生开放体系下的长石溶蚀作用。(3) 侏罗纪早期，地层二次沉降阶段埋深超过初次埋藏，煤系源岩地层温度最高达140℃，持续生成酸性流体，发生相对封闭体系下的长石溶蚀作用，并沉淀自生高岭石及第一期石英加大边(盐水包裹体均一温度介于100℃~125℃)。镜下常见自形(铁)白云石与高岭石共生，铁白云石中盐水包裹体均一温度(90℃~122℃)表明晚期碳酸盐胶结物此时发生沉淀。煤系源岩生、排烃，注入二叠系储层。(4) 白垩纪末期，燕山运动致地层差异性抬升但未暴露地表，缺乏大气淡水淋滤作用，且煤系源岩停止生酸、生烃，溶蚀作用停滞。(5) 自古近系起，地层整体沉降迅速埋藏，煤系源岩持续生成有机酸及CO₂，发生封闭体系下的长石矿物溶蚀，伴生具有颗粒形态或充填粒间的自生高岭石集合体以及第二期石英加大边。此过程中，煤系源岩持续生成烃类充注储层；在新进纪，孔二段源岩生成烃类沿断层运移至二叠系储层。

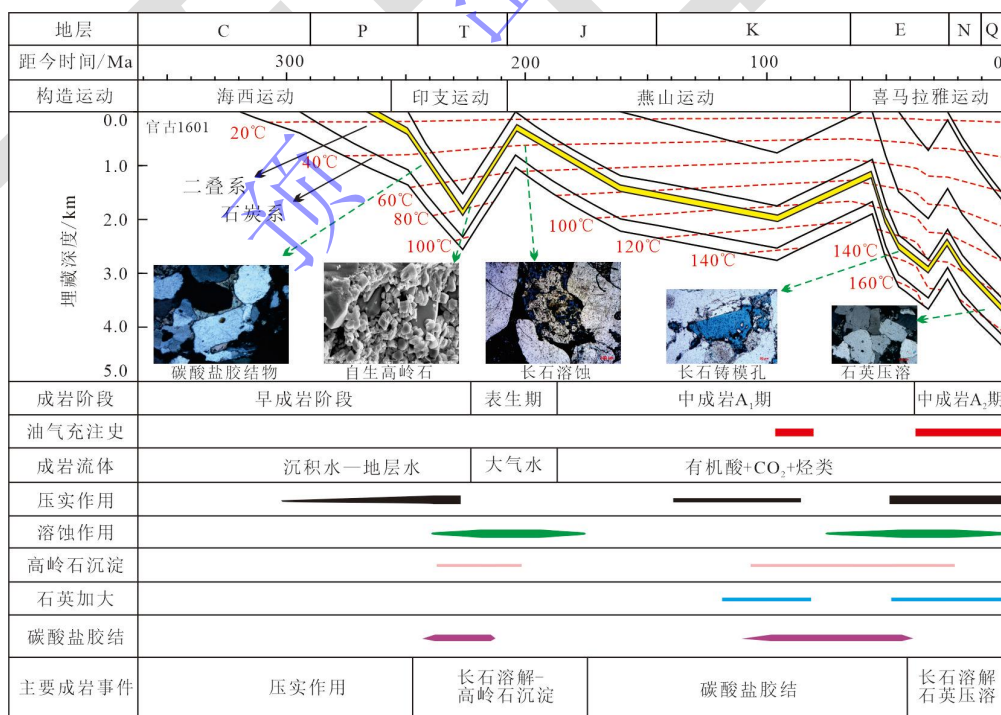


图12 王官屯地区二叠系砂岩储层成岩演化

Fig.12 Diagenetic evolution of Permian sandstone reservoir in WGT area

4 优质储层成因

4.1 优质储层主控因素

4.1.1 岩石类型

岩石类型对储层物性的影响,本质上分为岩石结构和成分两方面。统计二叠系岩石粒度中值与物性的关系发现,岩石粒径小于 1 mm 时,孔隙度随粒径增加而增大(图 13a),这是由于沉积物粒度较细时,泥质含量相对较高,分选较差,后期抗压实能力较弱;渗透率与粒径无明显相关关系(图 13b),则是深埋期溶蚀作用导致孔隙再分配的结果。

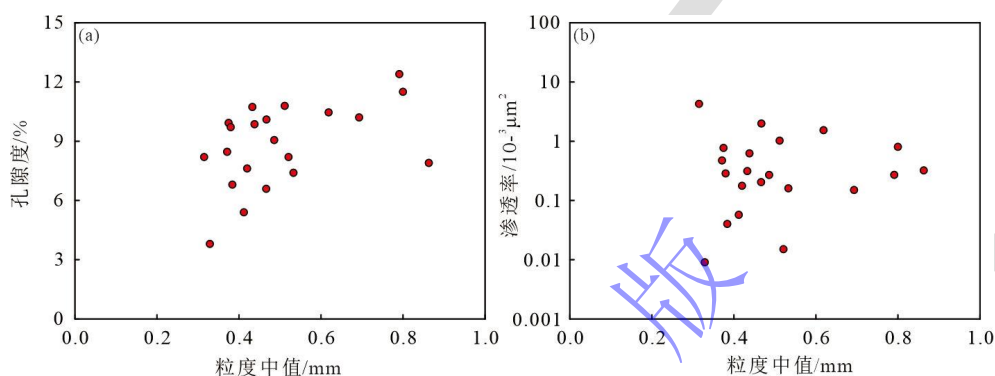


图 13 二叠系储层物性与岩石粒径中值关系

Fig.13 Relationships between physical properties of Permian reservoir and median size of rock particles

研究区二叠系储层岩石以石英颗粒为主,其次为长石及石英岩、英安岩等岩屑,刚性颗粒含量极高。刚性颗粒含量高的砂体埋藏过程中抗压实能力强,经历相同埋深时能够保存较多的孔隙,也能为侵蚀性流体的进入提供优势通道^[18]。

4.1.2 溶蚀作用

1) 开放体系大气水淋滤改善物性

开放成岩体系下,大气淡水促进浅层地表岩石中长石等矿物的大量溶解,释放的 K^+ 、 Al^{3+} 和 $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 等产物被及时带离溶蚀区^[13,19-20]。携带溶蚀产物 (Al^{3+} 和 SiO_2) 的地质流体沿倾斜砂岩层向下倾方向运移,并在适当条件下沉淀为自生高岭石、自生石英。自上游至下游依次发育溶解带、过渡带、沉淀带,其中溶解带形成大量长石溶孔—微量黏土矿物—微量硅质胶结物的矿物组合,过渡带形成大量长石溶孔—大量黏土矿物—微量硅质胶结物的矿物组合,沉淀带形成大量长石溶孔—大量黏土矿物—大量硅质胶结物的矿物组合^[13]。

2) 封闭体系源岩生酸溶蚀调配孔隙

封闭条件下单位体积钾长石溶蚀作用的相对增孔率为 11.91%~14.47%,溶蚀后的储层弱增孔,但自生高岭石阻塞了原有孔隙,渗透率随之降低^[21]。封闭体系下的长石溶蚀作用,实际是成岩物质的再分配作用,将部分原生孔和次生孔隙转换为了高岭石晶间微孔。溶蚀形

成的粒内溶孔相比粒间原生孔隙具有更强的抗压实效应，此外伴生的硅质胶结作用增强岩石抗压性，而自生高岭石晶片的交叉支撑作用也承担了一部分应力，因此埋藏溶蚀过程有利于储层后期埋藏过程中的孔隙保存^[21]。

4.1.3 烃类充注

王官屯、乌马营地区二叠系储层分别于白垩纪和古近系至今发生两期大规模烃类充注^[4-5,22]。对黄骅坳陷王官屯地区不同含油性砂岩样品的碳酸盐胶结物含量及储层物性的统计关系表明，油气饱和度与碳酸盐胶结物含量存在明显的负相关关系（图 14a），与储层物性则存在正相关关系（图 14b）。晚期碳酸盐胶结作用发生在第一次烃类充注之后，可知初次油气充注一定程度上抑制了晚期碳酸盐胶结物的发育。

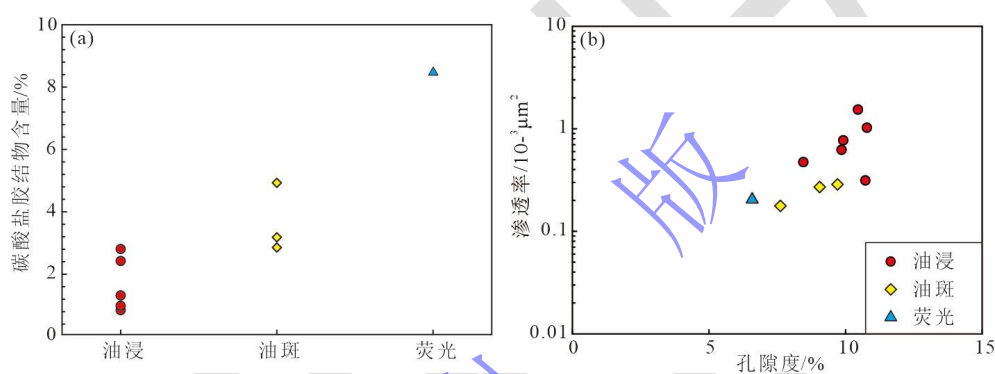


图 14 烃类充注抑制胶结物发育

Fig.14 Inhibition of hydrocarbon filling by cement development

另外，王官屯地区深埋藏干层/水层中（官 88-18，4 039.8 m）石英颗粒 Al 含量介于 0.002%~0.046%，石英胶结物中 Al 含量介于 0.038%~0.103%（图 5c），部分与颗粒含量重合，说明其物质来源除长石溶蚀外，部分为石英压溶作用的贡献；而深层油气层中（营古 1 井，4 871 m）石英颗粒中 Al 含量介于 0%~0.02%；石英胶结物中 Al 含量介于 0.074%~0.235%（图 5b），均明显高于颗粒，说明石英胶结物以长石溶蚀为主要物质来源，缺乏压溶成因自生石英。这说明油气充注一定程度上抑制了硅质胶结物的发育，有利于储层孔隙的有效保存。

4.2 优质储层成因模式

大港探区南部二叠系经历多期次抬升—埋藏过程，笔者在储层成岩演化和主控因素综合分析的基础上，建立了优质储层成因模式（图 15）。二叠纪辫状河道砂体逐渐沉积，包括大量成分成熟度较高的中、粗砂岩及含砾砂岩等，埋藏过程中形成了区域上广泛分布的厚层砂岩，构成优质储层形成的物质基础。印支期第一次隆升阶段，上石盒子组砂岩出露地表遭受大气淡水淋滤，大量溶蚀产物随流水沿倾斜砂岩层向斜下方运移，自山顶注水区向下依次形成溶蚀带、过渡带和沉淀带，此过程有效增加储层物性，是优质储层形成的关键。喜山期构

造沉降阶段，地层发生反转，取样位置（官古 1601、乌深 1 等）所处的斜坡区相对抬升，形成现今潜山的顶部，而先前的注水区溶蚀带，则处于现今潜山的斜坡区。封闭体系下的长石溶蚀作用，伴随大量溶蚀产物的原地沉淀，调配储层孔隙，降低储层渗透率。因此，南区整体表现出的强长石溶蚀—强高岭石胶结—弱石英胶结矿物组合是大气水淋滤和深部溶蚀共同作用的产物。综上，早期暴露剥蚀开放成岩体系下发生矿物溶蚀增孔作用，埋藏条件下封闭成岩体系中，溶蚀作用伴随自生高岭石和自生石英的原地沉淀，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。研究区最优质储层现今处于潜山斜坡区，这也为后续潜山勘探指明了方向。

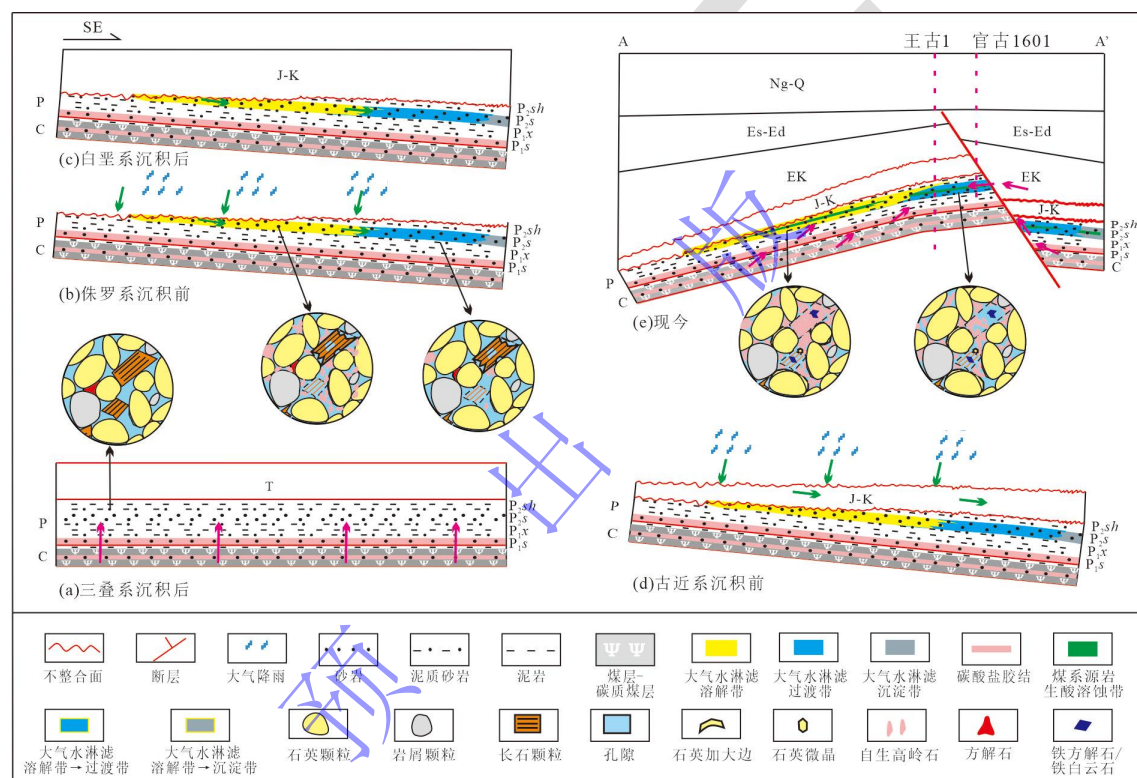


图 15 王官屯潜山优质储层成因模式

Fig.15 Genetic model of high-quality reservoir in Wangguantun buried hill

5 结论

(1) 大港南区二叠系优质砂岩储层成分成熟度高、结构成熟度较高，储集空间以次生粒间孔及高岭石晶间微孔为主，储层现今主要处在中成岩 B 期，成岩作用包括压实作用、多期溶蚀作用、自生高岭石、自生石英及碳酸盐胶结作用等。

(2) 开放体系下，长石溶蚀作用增孔，副产物随水流走；封闭体系下，长石溶蚀作用调配孔隙，副产物原地沉淀。多期次构造叠合控制下，储层成岩演化经历如下过程：初次埋藏过程中的压实及早期碳酸盐胶结作用；初次抬升期的开放体系大气淡水淋滤溶蚀增孔作用；

埋藏过程中封闭体系下烃源岩生酸溶蚀调配作用，自生石英、高岭石胶结作用；以及后期深埋阶段的压实作用与晚期碳酸盐、石英等胶结作用。

(3) 优质储层的发育受多种因素控制，高成熟度的中粗砂岩是优质储层形成的物质基础，早期地层抬升剥蚀导致的大气淡水淋滤作用形成大量次生孔隙是优质储层发育的关键，晚期地层深埋调配孔隙抑制压实作用，早期烃类充注抑制胶结作用有利于次生孔隙的保存。

(4) 早期地层抬升，大气水淋滤作用致使自潜山顶部向翼部依次发育的溶解带、过渡带与沉淀带。其中早期溶蚀区储层经历构造反转，现位于深部潜山斜坡带，可作为下步有利勘探方向。

参考文献 (References)

- [1] 张文才, 顾岱鸿, 赵颖, 等. 苏里格气田二叠系相对低密度砂岩特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 57-59. [Zhang Wencai, Gu Daihong, Zhao Ying, et al. Characteristics and generating mechanism of Permian relative low-density sandstone in Sulige Gas Field, Northwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 57-59.]
- [2] 郑承光, 范正平, 侯云东, 等. 鄂尔多斯盆地陕 141 井区上古生界气藏储层特征[J]. 天然气工业, 1998, 18(5): 25-28. [Zheng Chengguang, Fan Zhengping, Hou Yundong, et al. Reservoir characteristics of gas deposit in the Upper Paleozoic at well shaan 141 area in Eerduosi Basin[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(5): 25-28.]
- [3] 郑和荣, 胡宗全. 渤海湾盆地及鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏条件分析[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 1-5. [Zheng Herong, Hu Zongquan. Gas pool-forming conditions for Bohai Bay Basin and Ordos Basin in the Upper Paleozoic[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 1-5.]
- [4] 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 Petrolei Sinica, 2021, 42(12): 1592-1604.]
- [5] 赵贤正, 蒲秀刚, 姜文亚, 等. 黄骅坳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.]
- [6] 韩国猛, 吴雪松, 崔宇, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷二叠系致密砂岩储层特征、主控因素及发育模式[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 509-519. [Han Guomeng, Wu Xuesong, Cui Yu, et al. Characteristics, control factors and development models of Permian tight sandstone reservoirs in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 509-519.]
- [7] 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.]
- [8] 国家经济贸易委员会. SY/T 5477—2003 碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003. [State Economic and Trade Commission. SY/T 5477-2003 The division of diagenetic stages in clastic rocks[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.]
- [9] 刘可禹, Bourdet J, 张宝收, 等. 应用流体包裹体研究油气成藏: 以塔中奥陶系储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 171-180. [Liu Keyu, Bourdet J, Zhang Baoshou, et al. Hydrocarbon charge history of the Tazhong Ordovician reservoirs, Tarim Basin as revealed from an integrated fluid inclusion study[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 171-180.]
- [10] 蒯克来, 操应长, 王艳忠, 等. 低渗透储集层成岩作用与孔渗演化: 以准噶尔盆地中部 1 区侏罗系三工河组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 434-443. [Xi Kelai, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Diagenesis and porosity-permeability

- evolution of low permeability reservoirs: A case study of Jurassic Sangonghe Formation in Block 1, central Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4): 434-443.]
- [11] 尤丽, 李才, 张迎朝, 等. 珠江口盆地文昌 A 凹陷珠海组储层碳酸盐胶结物分布规律及成因机制[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(6): 883-889, 899. [You Li, Li Cai, Zhang Yingchao, et al. Distribution and genetic mechanism of carbonate cements in the Zhuhai Formation reservoirs in Wenchang-A Sag, Pear River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(6): 883-889, 899.]
- [12] Friedman I, O'Neil J R. *Compilation of stable isotope fractionation factors*[R]. Reston: USGS, 1977: 440.
- [13] 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.
- [14] Dekoninck A, Moussi B, Vennemann T, et al. Mixed hydrothermal and meteoric fluids evidenced by unusual H- and O-isotope compositions of kaolinite-halloysite in the Fe(-Mn) Tamra deposit (Nefza district, NW Tunisia)[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 163: 33-45.
- [15] 金强, 宋国奇, 梁宏斌, 等. 渤海湾盆地源于石炭系一二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.]
- [16] 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: 141-170.
- [17] 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.
- [18] 远光辉, 操应长, 贾珍臻, 等. 含油气盆地中深层碎屑岩储层异常高孔带研究进展[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(1): 28-42. [Yuan Guanghui, Cao Yingchang, Jia Zhenzhen, et al. Research progress on anomalously high porosity zones in deeply buried clastic reservoirs in petroliferous Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(1): 28-42.]
- [19] 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.
- [20] 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.]
- [21] 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, 52(9): 1694-1725.]
- [22] 勾琪玮, 蒋有录, 刘景东, 等. 黄骅坳陷王官屯地区中-古生界油气成藏条件与成藏模式[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(6): 57-64. [Gou Qiwei, Jiang Youlu, Liu Jingdong, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and patterns of the Mesozoic and Paleozoic in Wangguantun area of Huanghua Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(6): 57-64.]

Characteristics and Genesis of Permian Tight Sandstone Reservoirs in Southern Dagang Exploration Area

SUN PeiPei¹, CAO YingChang^{1,2}, YUAN GuangHui^{1,2}, ZHOU LiHong³, JIN ZiHao¹, WU ZhiPing¹, FU LiXin³, ZHANG FeiPeng³, CHEN ChangWei³

1. National Key laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China

3. Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China

Abstract: **[Objective]** Exploration of Permian sandstone in southern Dagang shows high-yield oil, but the reservoir characteristics and genetic mechanisms remain uncertain. **[Methods]** Core observations, thin-section identifications, cathodoluminescence analysis, scanning electron microscopy, fluid inclusion analysis, carbon and oxygen isotopic composition analysis, electron probe microanalysis, and in-situ laser ablation, coupled with the consideration of burial evolution history and hydrocarbon charging history, were used in this investigation into the deep-seated sandstone reservoirs in the Wangguantun and Wumaying regions of the southern Dagang exploration area. **[Results and Discussions]** It was found that the Permian sandstone in the southern Dagang region has a high compositional maturity, predominantly characterized by quartz sandstone and sublithic sandstone. The storage spaces in high-quality reservoirs consist primarily of secondary intergranular pores and intercrystalline micropores in kaolinite. Influenced by tectonic movements, the reservoirs have undergone early open-system atmospheric-water leaching and dissolution, followed by late closed-system acid dissolution resulting from hydrocarbon source rock interactions. A range of factors influenced the development of high-quality reservoirs, with the high compositionally mature medium-to-coarse sandstones being the basic material. Early strata uplift and erosion, which led to significant secondary porosity from atmospheric fresh-water leaching, were critical factors. Early hydrocarbon charging inhibited by cementation processes favored the preservation of secondary porosity. **[Conclusions]** Reservoirs in the slope and depression zone that were formed in an area of atmospheric water leaching are appropriate exploration targets. This model is also relevant for pre-drilling prediction of Permian reservoirs in other regions of the Bohai Bay Basin.

Key words: genetic mechanisms; diagenetic evolution; sandstone reservoirs; Permian; southern Dagang exploration area