黄骅坳陷深凹区油气成藏条件与富集模式

陈长伟，陈家旭*，柴公权，刘国全，崔宇，宋舜尧，董文韬，张绍辉，张睿

中国石油大港油田公司，天津 300280

第一作者，E-mail：chenchwei@petrochina.com.cn

* 通信作者，E-mail：chenjxu@petrochina.com.cn

2024-11-05 收稿；2025-03-05 修回；2025-03-05 接受

基金项目：国家科技重大专项“渤海湾超级盆地油气富集规律与新领域勘探关键技术”(2024ZD1400100)；中国石油天然气集团有限公司科技项目“陆相页岩油开发优化技术研究与试验”(2023ZZ15YJ03)；中国石油大港油田公司博士后项目“黄骅坳陷深凹区控砂成储与成藏机理研究”(博 060)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)03-0002-15　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240657

摘　要：断陷湖盆深凹区勘探程度低，是寻找战略资源接替的重要勘探领域，深凹区油气成藏系统研究有待开展。以黄骅坳陷沧东深凹区和歧口深凹区为例，深入开展了深凹区沉积、储层、烃源岩和圈闭条件研究，明确了深凹区控砂成储机制与成藏模式。结果表明，沧东深凹为盆缘深凹，距离物源区近，源−断−凹配置控制发育扇三角洲沉积，具备“砂泥互层−下生上储型”源储空间配置和“早充注−早深埋型”源储时间配置。与之对比，歧口深凹为盆中深凹，距离物源区远，源−沟−坡配置控制发育远岸水下扇沉积，具备“泥包砂−立体充注型”源储空间配置和“晚充注−晚深埋型”源储时间配置。2 类深凹区均呈现出泥岩与砂岩富集的特征，深凹区优质烃源岩热演化程度高，具备规模生烃的条件，同时也具备发育大砂体的有利条件，“优势矿物−有机酸溶蚀−异常超压”三大控储因素造就深凹区有效储层发育。深凹区圈闭条件优越，以岩性油气藏为主，具备源储耦合、近源充注、带状富集的特点。研究进一步证实断陷湖盆深凹区具备良好的勘探潜力，为深凹区油气勘探提供了借鉴和参考。

关键词：断陷湖盆；黄骅坳陷；深凹区；成藏条件；油气成藏；富集模式

断陷湖盆深凹区是指由洼陷中心及其周缘斜坡低部位构成的负向构造单元，通常与湖盆生烃中心叠置，埋深大于成熟生烃门限深度，具有断裂不发育、储层致密、油气优先就近聚集而后向周缘离心式供烃的特点。断陷湖盆深凹区构造圈闭不发育，储层物性偏差，加之埋深大，勘探成本高，深凹区不是盆地初期油气勘探的首选。然而，当湖盆构造带主体和斜坡区达到高成熟勘探阶段后，随着勘探技术的革新，尤其是储层改造技术的成本不断下降之后，深凹区成为寻找战略资源接替、寻找可持续发展战略资源的重要靶区。

一些学者对断陷湖盆深凹区开展过一些探索工作，取得了诸多研究成果[1-9]。李平和[3]通过对泌阳凹陷深凹区成藏潜力进行分析，认为深凹区岩性油气藏共发育透镜体类岩性圈闭和薄互层砂体圈闭 2 种圈闭类型。吕明久等[1]基于对泌阳凹陷深凹区成藏条件分析，认为深凹区岩性油气藏的空间展布受控于沉积，三角洲前缘发育优质储层和烃源岩，湖侵体系域不仅是优质烃源岩的有利发育区，也是油气富集的有利区。肖淑民等[4]基于对牛庄洼陷成藏条件分析，认为深凹区发育滑塌浊积、深水浊积、水下冲积扇、三角洲席状砂等储集体，存在“烃源岩内油气短距离运移，泥岩裂缝或砂岩透镜体圈闭成藏”、“断层遮挡形成圈闭，油气聚集成藏”和“油气沿砂体侧向运移，地层超覆或砂岩上倾尖灭成藏”3 种成藏模式。刘明洁等[5]基于对牛庄洼陷深凹区砂岩透镜

著录信息：陈长伟，陈家旭，柴公权，等. 黄骅坳陷深凹区油气成藏条件与富集模式［J］. 地质科技通报，2025，44(3)：2-16.
CHEN Changwei, CHEN Jiaxu, CHAI Gongquan, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and enrichment models in the deep subsag zone of the Huanghua Depression［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 2-16.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

体成藏关键因素分析，认为至少被 2 条断层切割且成藏期古孔隙度较大的砂体是深凹区有利的油气富集区。卓勤功[7]对牛庄洼陷深凹区岩性油气藏进行了解剖，认为砂岩透镜体油藏多数为它源性多期幕式成藏，成藏机理为隐蔽输导和幕式置换。刘震等[8-9]提出断陷湖盆岩性油气藏的形成具有“多元控油−主元控藏”的特点，认为二连盆地深凹区为下生上储型岩性油藏成藏模式。关于断陷湖盆深凹区油气成藏规律主要有 2 种认识：①构造活动和沉积环境共同控制深凹区不同成因砂体的展布和富集。在沉积坡折带和构造坡折带，沉积物易发生滑塌形成重力流，为三角洲前缘滑塌砂体和深水浊积扇体的富集提供了有利条件，同时也是深凹区砂岩透镜体发育的主要地区。②烃源岩和储层的空间配置是深凹区油气富集与否的重要原因。尽管前人[1-9]在深凹区油气成藏条件分析方面已经取得了一些认识，但上述研究所分析的深凹区油藏深度多数小于 3 500 m，而对埋深更大、砂体发育条件苛刻、储层更致密的深凹区油气成藏规律认识不足。

黄骅坳陷为我国典型的新生代断陷湖盆，历经 60 年勘探，构造带主体和斜坡区的油气勘探程度已超过 70%，发现大规模油气藏的难度越来越大[10]。为寻找战略资源接替，大港油田公司针对沧东深凹区和歧口深凹区实施了风险勘探，CT1 井孔二段和 HT1 井东三段均取得了重大突破，开辟了深凹区新的增储领域[11]。本研究以黄骅坳陷沧东深凹区和歧口深凹区为例，通过沉积、储层、烃源岩和圈闭条件分析开展深凹区成藏条件系统研究，构建深凹区油气成藏模式，为断陷湖盆深凹区油气勘探提供指导。

1　区域地质概况

黄骅坳陷位于渤海湾盆地腹部，面积约 1.8×10^4 km^2，是渤海湾盆地一个重要的富油气坳陷[12-17]。黄骅坳陷历经了中−新元古代台缘裂陷，古生代稳定地台建造，中生代地台褶隆、解体和新生代断陷、坳陷 4 个阶段的构造演化，形成前新生界基底、古近系和新近系三大构造层，是在前新生界基底基础上发育起来的新生代断陷湖盆[10, 18-20]。受沧县隆起和埕宁隆起的夹持，黄骅坳陷整体呈 NE−SW 向展布，具备北宽南窄、北深南浅的结构特点(图 1)。以孔店−羊三木凸起为界，黄骅坳陷主要发育歧口和沧东两大富油气凹陷(图 1)。

热沉降作用和构造应力作用是断陷湖盆形成的 2 个主要机制[21]，二者共同作用控制断陷湖盆深凹

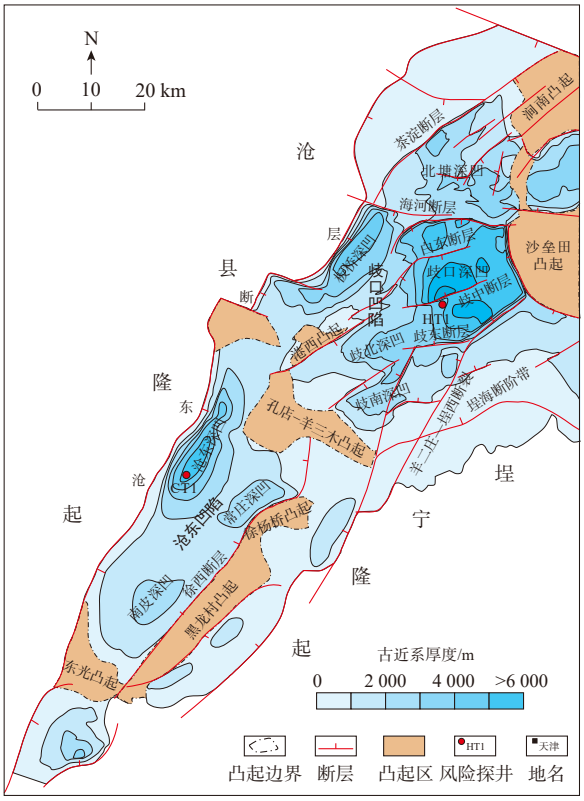


图 1　黄骅坳陷古近系厚度等值线图

Fig. 1　Contour map of Paleogene thickness in the Huanghua Depression

区的形成与分布。黄骅坳陷是典型的陆相断陷盆地[10]，在热沉降和构造应力综合作用下，黄骅坳陷形成了隆凹相间的构造格局，发育多个次凹，对应发育多个深凹区。

歧口凹陷西、北侧主要受沧东断层和茶淀断层控制，南部以阶梯状缓坡向埕宁隆起过渡，西南部以孔店−羊三木凸起与沧东凹陷相隔，总体上呈现出北断南超、堑垒相间的构造格局[22](图 1, 2)。凹陷内部发育 1 个主凹、4 个次凹共 5 个规模不等的次级凹陷单元，形成环歧口主凹、多沉降中心共存的宏观格局[23]。相应发育歧口深凹、板桥深凹、歧北深凹等深凹区，其中歧口深凹位于歧口凹陷腹部，东西向分别以斜坡构造向沙垒田凸起和北大港构造带过渡，北侧为白东构造带，南侧为埕海断阶带低断阶(图 1)。受海河断层和歧东断层的控制，歧口深凹区从古近纪至今持续接受沉积(图 2)。在沙河街组沉积期伴随着水平拉张，湖盆出现大幅沉降，沉降中心位于歧东断层下降盘一侧。在东营组沉积期湖盆进入萎缩阶段，沉积厚度减薄，在新近纪发生热沉降作用形成现今结构[22, 24]。

沧东凹陷东西向夹持在沧县隆起和徐−黑凸起之间，沧东、徐西大型断裂控制湖盆范围，南北以缓

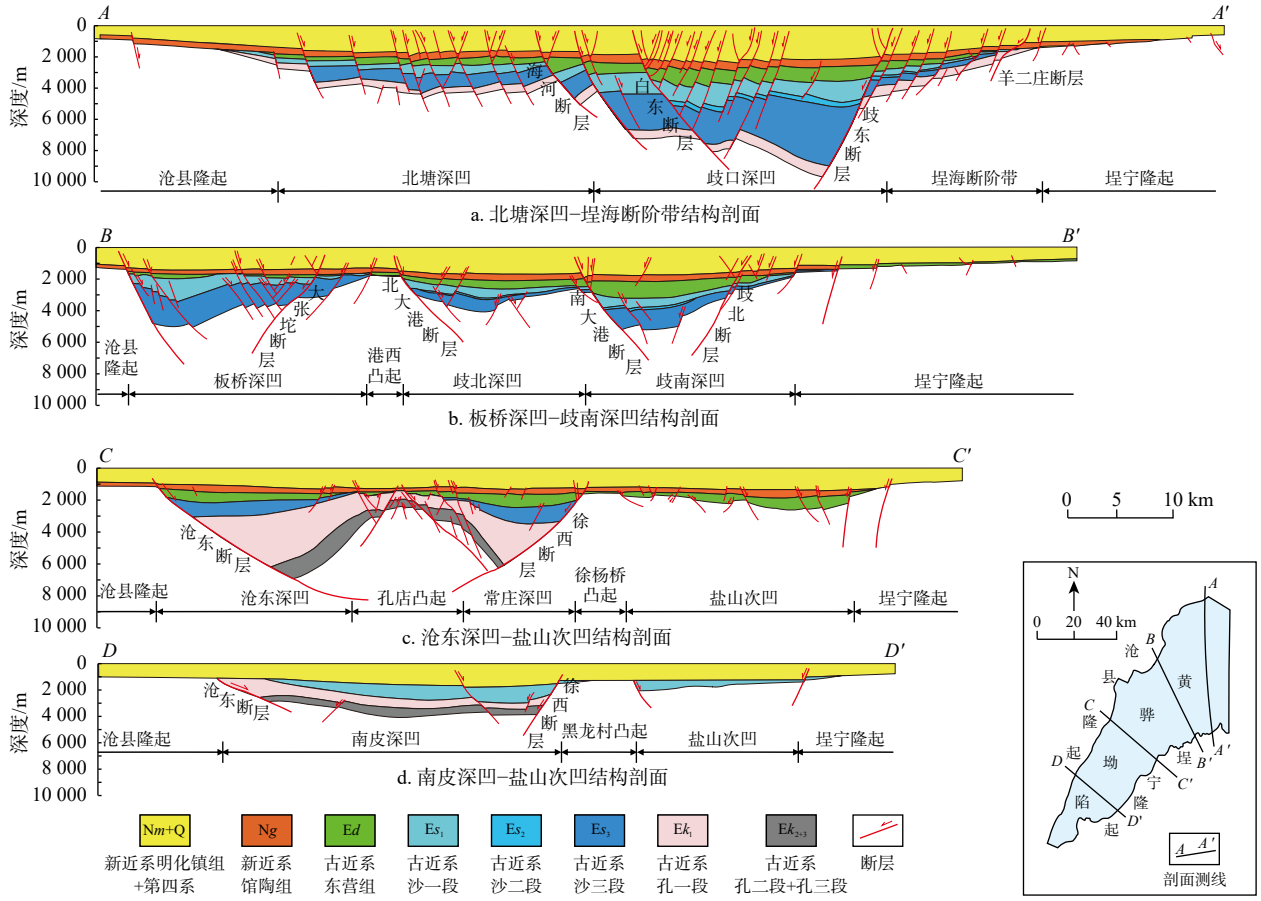


图 2　黄骅坳陷新生界地质结构剖面图

Fig. 2　Geological structure profile of the Cenozoic in the Huanghua Depression

坡向灯明寺构造和孔店凸起过渡，平面上呈现出向西南收敛、向北分散的喇叭状(图 1)。受沧东断层和徐西断层的控制，沧东凹陷表现为地堑式断陷，断陷结构在不同位置存在明显差异[25]，由南向北从简单的不对称地堑过渡到复杂的相向倾斜的 2 个半地堑(图 2)。沧东凹陷共发育沧东深凹、常庄深凹、南皮深凹 3 个深凹区。其中沧东深凹区位于沧东凹陷西侧，东接孔东深凹，西临沧县隆起，北侧为孔店–羊三木凸起，南侧为南皮深凹(图 1)。在孔二段沉积期沧东凹陷湖盆范围广，沧东、徐西断层下降盘孔二段厚度大。在孔一上亚段沉积期，湖盆发生构造反转，沧东、徐西断层活动加强，断层上升盘孔二段被剥蚀，下降盘沉积了巨厚的孔一段和沙河街组碎屑岩，形成了现今的沧东凹陷深凹区[25-27]。

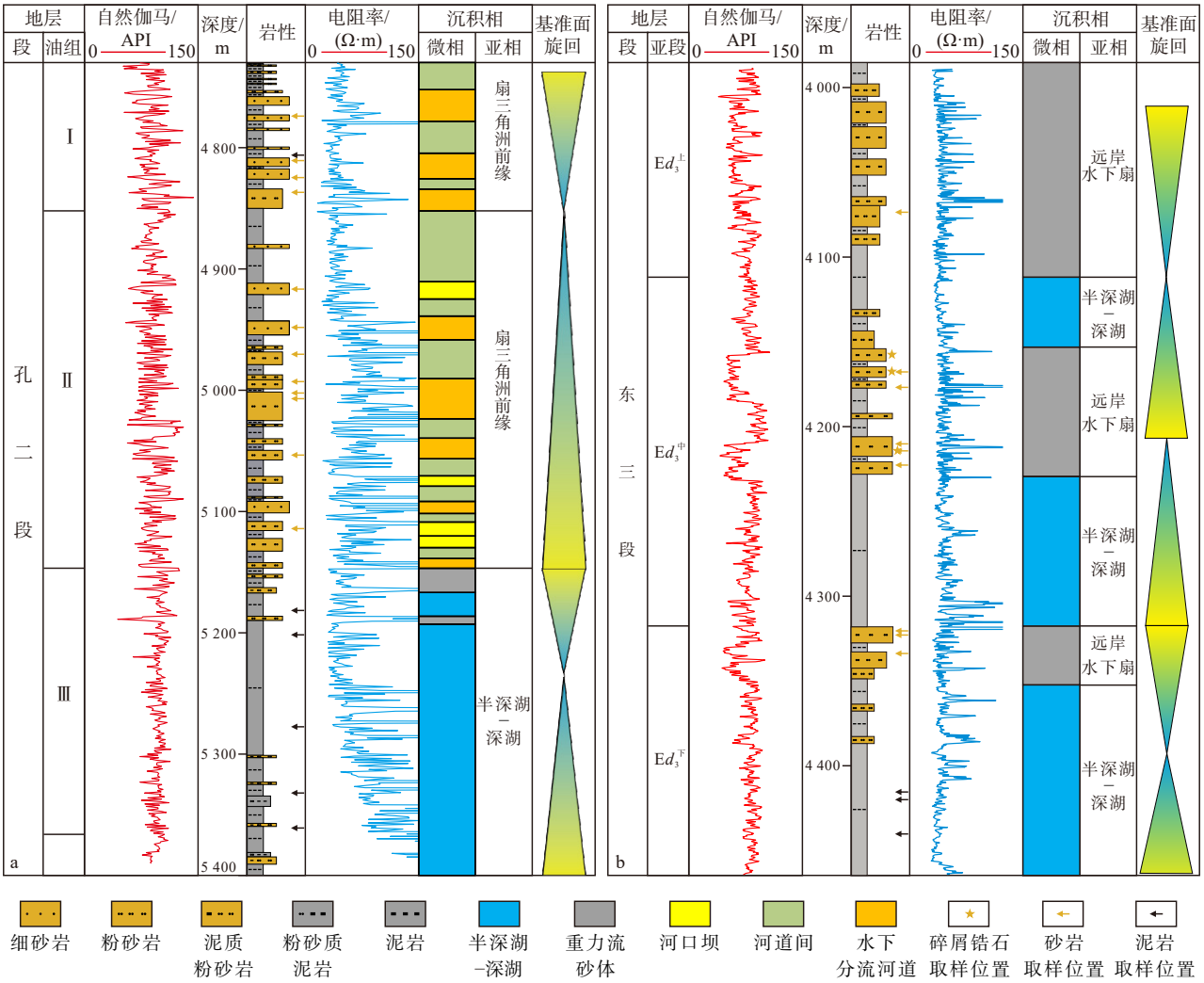
2　深凹区沉积体系展布与有效储层发育

2.1　深凹区沉积体系展布

依据深凹区构造位置，将其划分为盆缘深凹和盆中深凹 2 种类型。黄骅坳陷沧东深凹为典型的盆缘深凹，歧口深凹为典型的盆中深凹，2 类深凹区的沉积体系展布存在差异，对应发育 2 种砂体分布模式。

2.1.1　沧东深凹发育扇三角洲砂体

盆缘深凹距离物源区近，沧东深凹区 CT1 井孔二段物源主要来自于沧县隆起，重力与二维地震资料落实沧县隆起靠近沧东凹陷一侧发育 3 个古沟槽[28]。受应力场和区域形变差异控制，控凹断层(沧东断层)具有分段性，不同段之间主要形成 2 种类型转换带，为物源输入湖盆提供了通道[28]。沧东深凹区孔二段以半深湖–深湖相沉积和扇三角洲前缘相沉积为主，基准面旋回控制不同时期扇三角洲沉积规模，形成了厚泥厚砂叠置组合(图 3a, 4a)。在孔二段Ⅲ油组沉积期，湖盆处于高位体系域，沧东深凹区以半深湖–深湖相沉积为主，主要发育深灰色泥页岩，沧市物源供给弱，扇体规模小(图 3a)。在孔二段Ⅱ油组至孔二段Ⅰ油组沉积期，湖盆处于低位体系域和湖侵体系域，沧市物源供给增强，沧东深凹区发育多支扇三角洲前缘水下分流河道和河口坝沉积，砂体规模大(图 3a)。沧市物源距离近，断层坡度陡，深



Ed$_3^{上}$. 东三上亚段; Ed$_3^{中}$. 东三中亚段; Ed$_3^{下}$. 东三下亚段; 下同

图 3　黄骅坳陷沧东深凹区 CT1 井 (a) 和歧口深凹区 HT1 井 (b) 地层综合柱状图

Fig. 3　Comprehensive stratigraphic column of Well CT1 in the deep subsag zone of the Cangdong Sag (a) and Well HT1 in the deep subsag zone of the Qikou Sag (b), Huanghua Depression

凹区可容纳空间大, 源–断–凹配置控制盆缘深凹区砂体近源快速沉积, 发育捷地、沧市、姚官屯 3 个裙边扇, 砂体叠合面积 103 km^2(图 4a)。

2.1.2　歧口深凹发育远岸水下扇砂体

HT1 井东营组的勘探突破已证实盆中深凹区可发育大规模砂体(图 3b, 4b)[29]。盆中深凹区距离物源区远, 厘定物源区是刻画砂体分布模式的前提。应用锆石 U-Pb 定年技术对歧口深凹区东三段砂体和燕山物源区母岩的 U-Pb 年龄进行分析, 明确了歧口深凹区东三段物源来自北部燕山[29]。歧口深凹区东三段砂岩具备液化构造、撕裂泥粒状等构造, 矿物颗粒分选差, 表明歧口深凹区发育重力流沉积[29]。歧口深凹区东三段以半深湖–深湖相沉积和远岸水下扇沉积为主, 湖平面的升降变化导致盆中深凹区发育砂泥间互组合(图 3b, 4b)。当湖平面上升时, 歧口深凹区以发育厚层泥页岩为主, 砂体规模较小。当湖平面下降时, 北部燕山物源的碎屑物质通过长距离运移至斜坡区并沿斜坡滑塌向歧口深凹区输送砂体, 深凹区砂体规模较大。燕山物源供给充足, 砂体输导沟道长, 湖盆坡度适宜, 源–沟–坡配置控制盆中深凹区砂体展布, 歧口深凹区东三段远岸水下扇体有利砂体叠合面积为 102 km^2(图 4b)。

2.2　深凹区发育有效储层

2.2.1　深凹区储层特征

沧东深凹区孔二段发育不等粒长石砂岩和岩屑长石砂岩, 具备不等粒砂状结构, 粉砂、细砂、中砂、粗砂混杂分布, 主要粒径区间为 0.05 ~ 0.73 mm, 分选差, 磨圆为次棱–次圆, 支撑类型以颗粒支撑为主, 接触方式为线接触(图 5a, b)。砂岩矿物成分包括石英、长石、岩屑以及少量方解石和杂基, 其中石英体

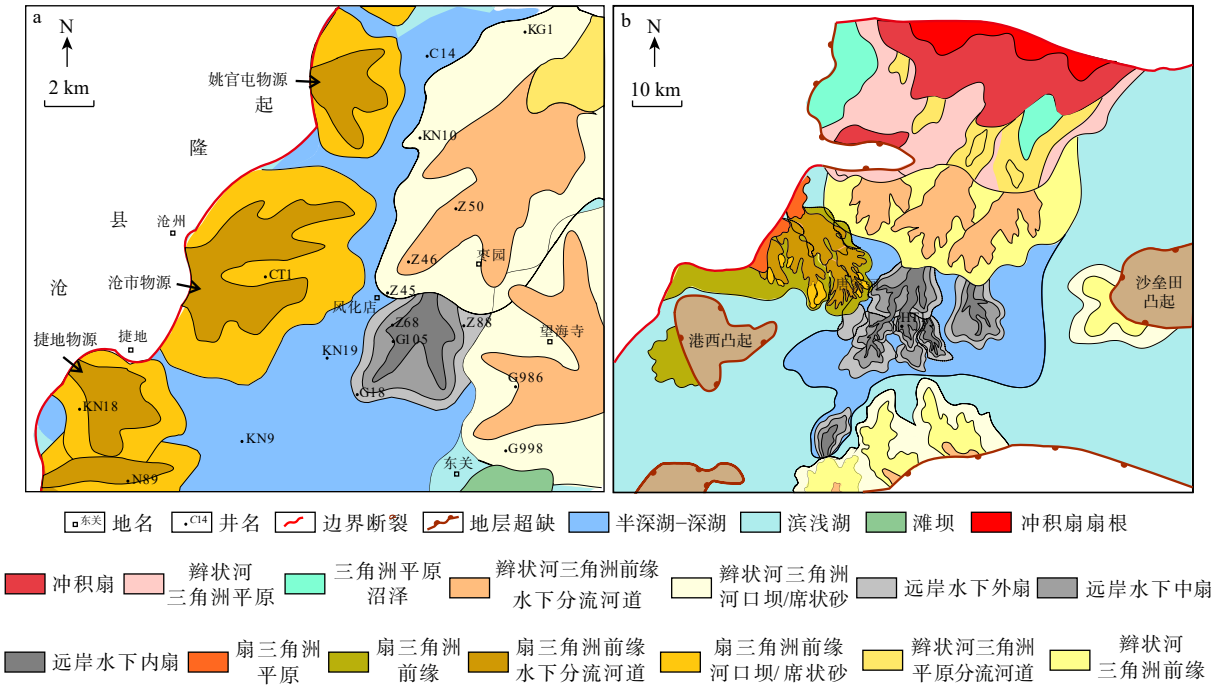


图 4　黄骅坳陷沧东凹陷孔二段 (a) 和歧口凹陷东三段 (b) 沉积体系图

Fig. 4　Sedimentary system map of the Ek_2 in the Cangdong Sag (a) and the Ed_3 in the Qikou Sag (b), Huanghua Depression

积分数占 22% ~ 40%, 长石体积分数为 29% ~ 51%, 岩屑体积分数为 10% ~ 26%(图 5a, b)。储层储集空间类型包括粒间孔和粒内溶蚀孔, 以粒内溶蚀孔为主(图 5c, d)。粒间孔是在岩石沉积或成岩过程中形成的空隙, 属于原生孔隙。粒内溶蚀孔多见于长石颗粒中, 是由长石组分溶解形成, 属于次生孔隙。在埋深 4 400 ~ 4 800 m 范围内, 储层孔隙度介于 6.4% ~ 13.6%, 仍发育有效储层(图 6a)。

歧口深凹区东三段发育中、细粒长石岩屑砂岩, 具备中细粒结构, 主要粒径范围在 0.04 ~ 0.30 mm, 分选磨圆中等, 支撑类型为颗粒支撑, 以线接触为主(图 5e, f)。砂岩矿物成分为石英、长石、岩屑以及少量的方解石和杂基, 其中石英体积分数为 26% ~ 41%, 长石体积分数为 26% ~ 38%, 岩屑体积分数为 17% ~ 25%(图 5e, f)。储层储集空间有粒间孔、溶蚀孔和铸模孔, 以溶蚀孔为主, 溶蚀矿物主要为长石和岩屑(图 5g, h)。铸模孔是在强烈的选择性溶蚀作用下, 部分岩屑颗粒被完全溶蚀, 但仍保留岩屑颗粒外形的孔隙。在埋深 3 900 ~ 4 200 m 范围内, 储层砂体孔隙度介于 11.2% ~ 17.5%(图 6b)。

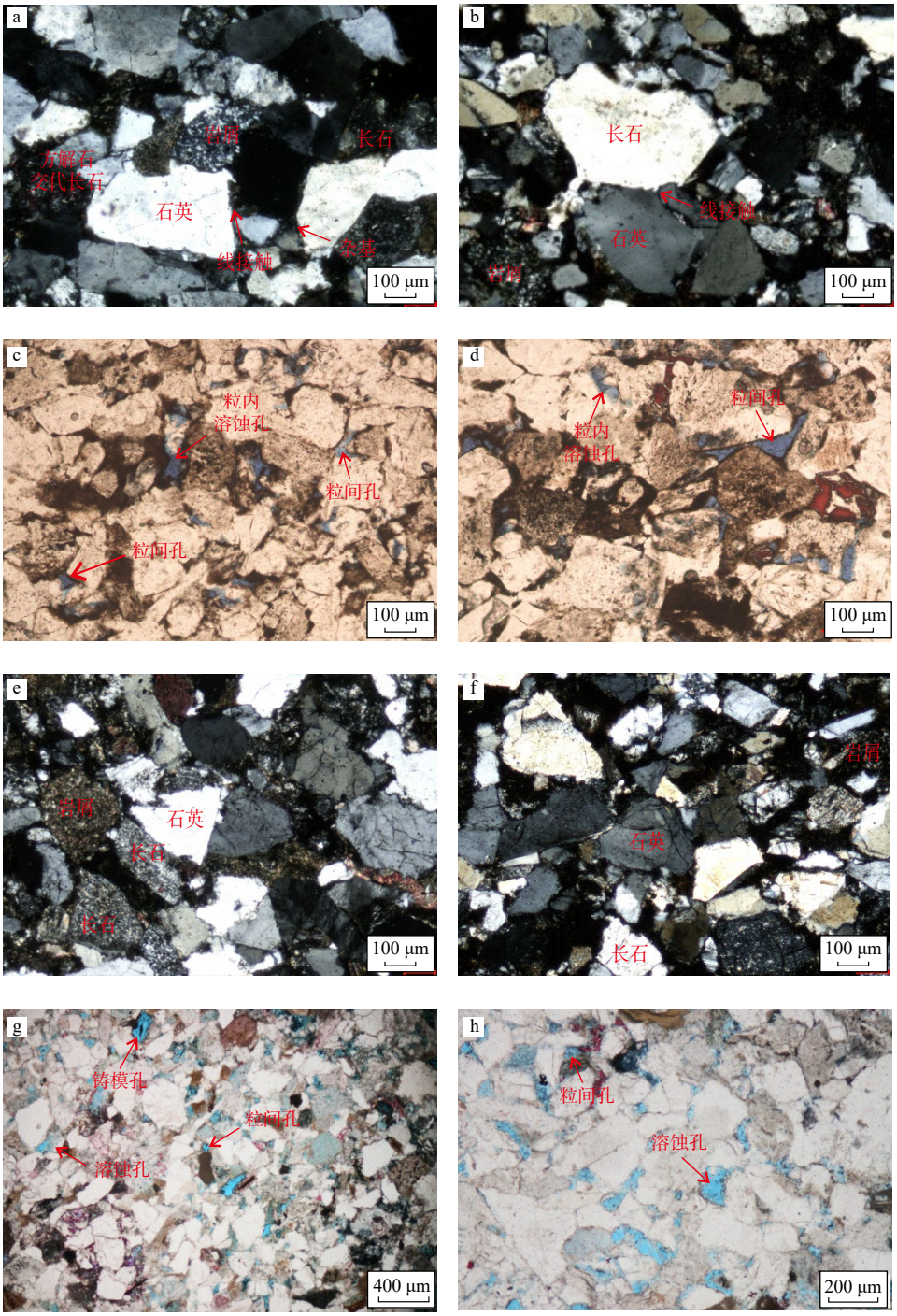
2.2.2　深凹区有效储层发育机制

沧东深凹区孔二段和歧口深凹区东三段均发育有效储层, 沧东深凹区埋深 4 400 ~ 4 800 m, 孔隙度为 6.4% ~ 13.6%, 歧口深凹区埋深 3 900 ~ 4 200 m, 孔隙度为 11.2% ~ 17.5%, 破解了深凹区储层物性差的认识。沧东和歧口深凹区有效储层的发育机制相似, 均受控于“优势矿物–有机酸溶蚀–异常超压”3 个方面。

沧东深凹区孔二段砂岩中长石体积分数为 29% ~ 51%, 长石和岩屑之和占比为 63% ~ 84%。歧口深凹区东三段砂岩中长石体积分数为 26% ~ 38%, 长石和岩屑之和占比为 63% ~ 72%。深凹区较高的刚性石英、长石颗粒含量增加了储层的抗压性, 有利于粒间孔的保存。较高的易溶长石颗粒含量利于形成粒内溶蚀孔和铸模孔[30-33]。高刚性颗粒和易溶颗粒的优势矿物组分为深凹区有效储层发育提供了物质基础。

在沉积盆地中, 当烃源岩成熟度达到 0.5% 时, 有机酸会从烃源岩中排出。通常在 [80, 120)℃ 时, 烃源岩中的干酪根会脱去含氧官能团产生大量有机酸; 在 [120, 160)℃ 时, 地层水中 CO_2 浓度提高, 有机酸浓度降低, 但有机酸仍占主导; 温度≥160℃, 地层水的酸碱度由 CO_2 控制[32, 34-35]。基于 BasinMod 软件, 利用地层回剥方法对区域埋藏史进行了模拟[36-37]。沧东深凹区孔二段和歧口深凹区东三段储层古地温均小于 160℃(图 7), 利于有机酸长时间溶蚀, 深凹区储层中广泛发育的粒间溶蚀孔和铸模孔也证实溶蚀作用较强。深凹区储层中有机酸的长期溶蚀也抑制了碳酸盐矿物的胶结, 导致储层中碳酸盐矿物平均体积分数为 4%。

黄骅坳陷深凹区广泛发育异常高压。沧东深凹区孔二段在埋深 4 408 ~ 4 997 m 范围内孔隙流体



a. CT1 井, 孔二段, 4916.2 m, 正交光, 不等粒长石砂岩, 以石英和长石为主, 含少量方解石和杂基; b. CT1 井, 孔二段, 5008.5 m, 正交光, 不等粒长石砂岩; c. CT1 井, 孔二段, 4949.6 m, 铸体薄片, 可见粒间孔和粒内溶蚀孔; d. CT1 井, 孔二段, 5008.5 m, 铸体薄片, 可见粒间孔和粒内溶蚀孔; e. HT1 井, 东三段, 4177 m, 正交光, 中粒长石砂岩, 以石英和长石为主, 含少量岩屑; f. HT1 井, 东三段, 4211 m, 正交光, 中粒长石砂岩; g. HT1 井, 东三段, 4211 m, 铸体薄片, 可见粒间孔、溶蚀孔和铸膜孔; h. HT1 井, 东三段, 4516 m, 铸体薄片, 可见粒间孔和溶蚀孔

图 5　黄骅坳陷沧东深凹区孔二段 (a ~ d) 和歧口深凹区东三段 (e ~ h) 储层镜下照片

Fig. 5　Microscopic photos of reservoirs in the Ek_2 in the deep subsag zone of the Cangdong Sag (a-d) and the Ed_3 in the deep subsag zone of the Qikou Sag (e-h), Huanghua Depression

压力介于 46.7 ~ 82.0 MPa, 压力系数介于 0.99 ~ 1.59 (图 6a)。歧口深凹区东三段在埋深 3906 ~ 4336 m 范围内孔隙流体压力介于 41.7 ~ 77.4 MPa, 压力系数介于 0.92 ~ 1.72(图 6b)。在此深度范围内, 沧东深凹区孔二段和歧口深凹区东三段储层的实测孔隙度均偏离正常压实趋势(图 6)。储层中的孔隙流体承担了部分上覆地层压力, 减小了岩石骨架颗粒之间的应力, 减弱了压实作用[38], 使得深凹区储层在埋

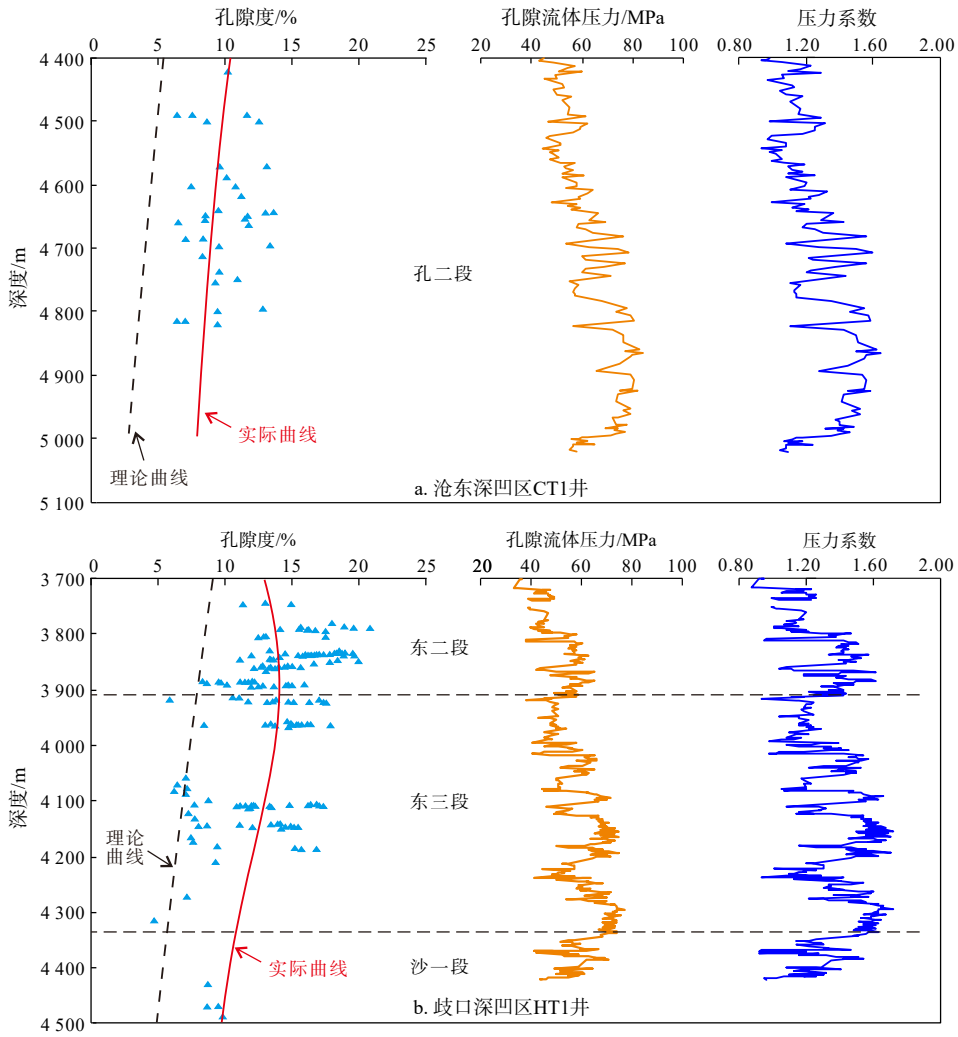


图 6　黄骅坳陷储层孔隙度、孔隙流体压力与压力系数随深度演化图

Fig. 6　Evolution diagrams of reservoir porosity, pore fluid pressure, and pressure coefficient with depth in the Huanghua Depression

深超 4 000 m 的深度仍以矿物颗粒线接触为主，保护了储层孔隙。

3　深凹区优质烃源岩特征与分布

断陷湖盆深凹区处于湖盆沉积/沉降中心，细粒沉积岩发育，通常也是湖盆生烃中心，在深埋作用下烃源岩热演化程度高，沧东和歧口深凹区内烃源岩均具备规模生烃的条件。

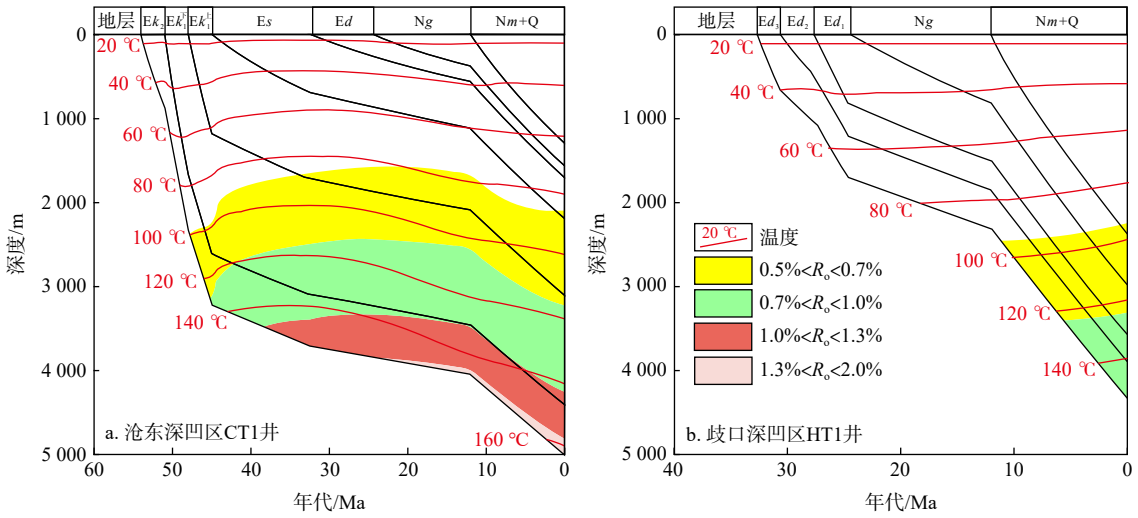
沧东凹陷孔二段发育一套厚度稳定、连续分布的暗色泥岩[39-41]。沧东深凹区孔二段Ⅲ油组暗色泥岩为主力生烃层段，深凹区处于孔二段Ⅲ油组烃源岩分布的厚值区，暗色泥岩厚度普遍大于 100 m（图 8a）。沧东深凹区孔二段烃源岩干酪根类型以Ⅱ$_1$～Ⅱ$_2$型为主，w(TOC)介于 2%～5%，有机质类型好、丰度高。沧东凹陷孔二段实测镜质体反射率 R_o 和深度拟合结果表明，在埋深 2 800 m 时孔二段烃源岩进入生烃门限，在埋深 3 500 m 进入成熟生烃门限（图 9a）。

歧口凹陷东三段烃源岩厚度等值线图显示深凹区为暗色泥岩厚度最大的地区，歧口深凹区东三段泥岩厚度普遍大于 200 m（图 8b）。歧口深凹区东三段共发育 4 套泥岩，其中东三下亚段和东三中亚段泥岩厚度最大（图 3b）。歧口深凹区东三段烃源岩Ⅱ$_1$～Ⅱ$_2$以型干酪根为主，w(TOC)平均值为 4.0%，有机质丰度高。歧口深凹区烃源岩实测 R_o 和深度拟合结果表明歧口深凹区烃源岩在埋深 3 500 m 已进入生烃门限，在埋深 4 000 m 进入成熟生烃门限（图 9b）。

4　深凹区圈闭条件与油气富集模式

4.1　深凹区圈闭类型及发育模式

黄骅坳陷深凹区构造活动弱，内部不发育大型



Ek$_2$. 孔二段; Ek$_1^{下}$. 孔一下亚段; Ek$_1^{上}$. 孔一上亚段; Es. 沙河街组; Ed$_1$. 东一段; Ed$_2$. 东二段; Ed$_3$. 东三段; R_o. 镜质体反射率; 下同

图 7　黄骅坳陷沧东深凹区和歧口深凹区埋藏史和热史图

Fig. 7　Burial and thermal histories of the deep subsag zones of the Cangdong Sag and Qikou Sag in the Huanghua Depression

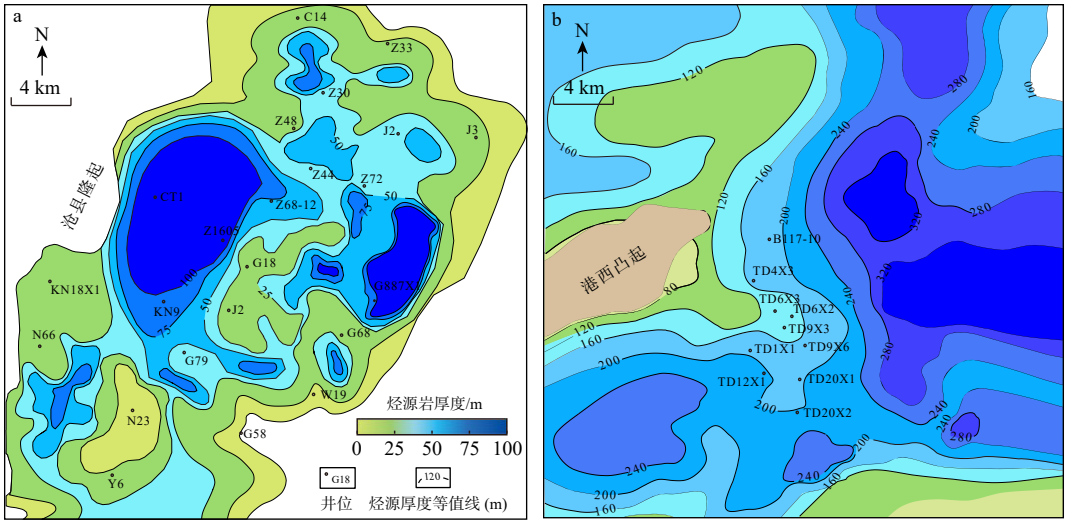


图 8　黄骅坳陷沧东凹陷孔二段Ⅲ油组 (a) 和歧口凹陷东三段 (b) 烃源岩厚度等值线图

Fig. 8　Thickness contour map of the Ek$_2^3$ source rocks in the Cangdong Sag (a) and the Ed$_3$ source rocks in the Qikou Sag (b), Huanghua Depression

控凹断裂，以岩性油气藏为主，发育砾岩岩性遮挡、砂岩上倾尖灭、断裂遮挡和砂岩透镜体 4 种圈闭类型(图 10)。

沧东深凹区在靠近沧东断层一侧坡度陡，在靠近孔店凸起一侧坡度缓。在陡坡带沧市物源碎屑沿沧东断层输导至深凹区形成扇三角洲沉积，靠近断层部位碎屑沉积以砂砾岩为主，形成砾岩岩性遮挡圈闭。在近物源条件下，沉积物搬运距离短，沉积速度快，容易形成厚度大、横向变化快的砾岩体，这种快速堆积形成的砾岩通常由不同粒径的砾石、砂和泥质组成，岩石分选差，非均质性强，会导致渗透率和孔隙度的显著差异，从而形成岩性遮挡。在缓坡带，部分砂体的上倾方向被非渗透性泥岩封闭形成砂岩上倾尖灭圈闭，部分砂体的上倾方向被局部断层遮挡形成断裂遮挡圈闭。

歧口深凹区在东营组沉积期发育来自北部燕山物源的远岸水下扇砂体，远源坡折供砂，南北向展布的重力流砂体被局部断层遮挡形成断裂遮挡圈闭，部分砂体四周均被非渗透性泥岩封闭形成砂岩透镜体圈闭。

4.2　深凹区油气成藏模式

在成藏条件分析的基础之上，结合源储配置关系、区域埋藏史、热史、生烃史、原油充注史、压力演化史等分析，对黄骅坳陷深凹区不同油藏进行解

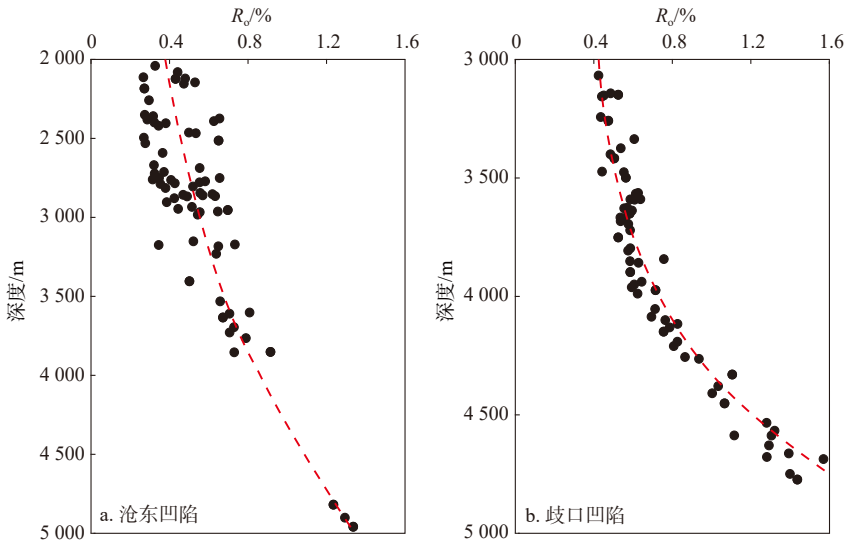


图 9　黄骅坳陷烃源岩成熟度随深度演化图

Fig. 9　Maturity evolution of source rocks with depth in the Huanghua Depression

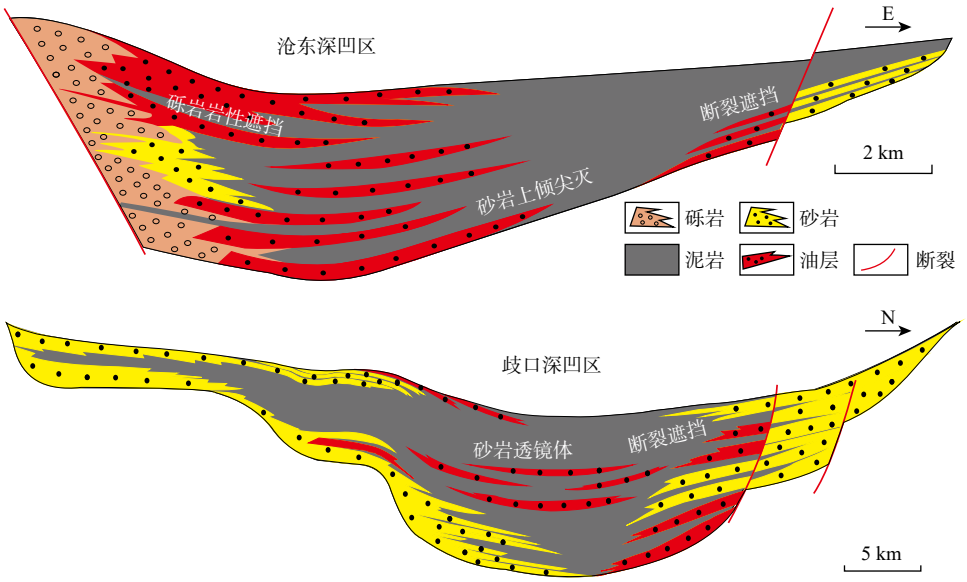


图 10　黄骅坳陷深凹区圈闭发育模式

Fig. 10　Trap development pattern in the deep subsag zone of the Huanghua Depression

剖。沧东深凹区具备“砂泥互层–下生上储型”源储组合空间配置和“早充注–早深埋型”源储组合时间配置(图 3a, 11), 歧口深凹区具备“泥包砂–立体充注型”源储组合空间配置和“晚充注–晚深埋型”源储组合时间配置(图 3b, 12)。

沧东深凹区储层为孔二段Ⅱ油组砂泥互层型储层, 测井解释油层 55.2 m/27 层(油层一共 27 层, 累计厚度 55.2 m), 差油层 23.2 m/12 层, 砂地比为 57%, 烃源岩以孔二段Ⅲ油组厚层泥岩为主, 构成了“砂泥互层–下生上储型”源储组合空间配置(图 3a)。在孔店组沉积期, 沧东深凹区的地层沉积速率较高, 达到了 356 m/Ma。至孔店组沉积末期, 孔二段进入成熟生烃门限深度, 属于“早深埋型”时间配置(图 11)。在孔店组沉积期, 地层温度迅速升高, 导致孔二段烃源岩在孔店组末期开始生烃并于沙河街组沉积期达到生烃高峰。孔二段烃源岩具有早生早排、持续生烃时间长、生烃高峰期集中的特点(图 11)。孔二段泥岩生成的原油向上运移至孔二段储层中, 原油大规模充注期为沙河街组沉积期, 表现出“早充注型”时间配置(图 11)。孔二段在孔店组沉积期的快速埋藏过程也导致孔隙流体排出不畅, 地层发育以欠压实成因为主的超压, 在沙河街组沉积期地层沉积速率减小导致欠压实成因的超压逐渐减弱, 由原油大规模充注造成的超压逐渐增强。沧东深凹区孔二段

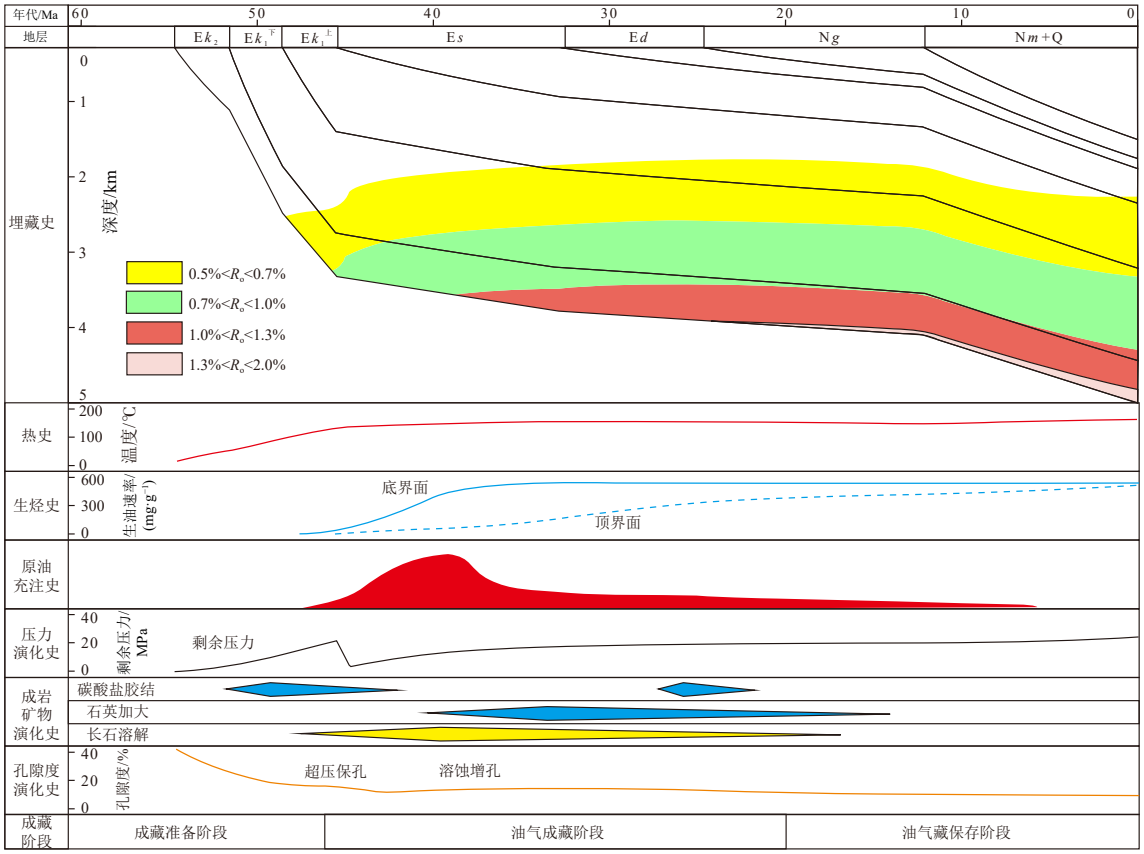


图 11　沧东深凹区 CT1 井孔二段油气成藏事件综合图

Fig. 11　Comprehensive map of hydrocarbon accumulation events in Ek_2 at Well CT1 in the deep subsag zone of the Cangdong Sag

在孔店组沉积末期进入深埋阶段，早期大规模充注到储层中的原油引发的有机酸溶蚀增孔和异常超压保孔效应利于深凹区发育有效储层，具备“早充注–早深埋型”有利源储组合时间配置。

歧口深凹区储层为东三段泥包砂型储层，包括东三下亚段和东三中亚段砂体，测井解释油层 58.5 m/7 层，差油层 3.7 m/2 层，砂地比为 23%，烃源岩为东三段厚层泥岩，这些要素构成了“泥包砂–立体充注型”源储组合空间配置(图 3b)。在东营组–馆陶组沉积期，歧口深凹区地层沉积速率低，仅为 47 ~ 167 m/Ma。直至明化镇组沉积期，地层沉积速率升高(200 m/Ma)，东三段才达到成熟生烃门限深度，属于“晚深埋型”时间配置(图 12)。自沉积之后，东三段烃源岩温度升高缓慢，于明化镇组沉积早期开始生烃(图 12)。在明化镇组沉积期东三段厚层泥岩生成的原油以立体充注的方式向薄层砂岩透镜体内大规模运移成藏，表现出“晚充注型”的时间配置(图 12)。虽然歧口深凹区东三段原油充注时间较晚，但东三段在东营组–馆陶组沉积期沉积速率小，压实作用弱，东三段孔隙度降低缓慢。在明化镇组沉积期，东三段进入深埋阶段，同时烃源岩达到成熟阶段。生烃增压减弱了上覆地层的压实作用，原油充注到储层中并伴随着有机酸的注入，导致溶蚀孔隙增加，使得歧口深凹区发育有效储层，“晚充注–晚深埋型”源储组合时间配置也有利于深凹区油气富集。

整体上，黄骅坳陷深凹区油气藏表现出源储耦合、近源充注、带状富集的特点(图 13)。沧东深凹区孔二段共发育捷地、沧市、姚官屯 3 个扇体，有利面积为 103 km^2，依据 CT1 井区油气资源丰度(172×10^4 t/km^2)，落实石油资源量为 1.77×10^8 t。歧口深凹区东三段有利砂体面积为 102 km^2，依据 HT1 井区油气资源丰度(114.7×10^4 t/km^2)，落实石油资源量为 1.17×10^8 t。黄骅坳陷整体表现为隆凹相间的基本构造特征，发育沧东深凹、歧口深凹、板桥深凹、歧北深凹、歧南深凹、常庄深凹、南皮深凹、北塘深凹共 8 个深凹区，勘探面积约 1 300 km^2。在深化深凹区成藏研究的基础上，大港油田公司按照“集中勘探沧东深凹，拓展勘探歧口深凹，风险勘探板桥深凹，积极准备常庄、歧北等深凹”的思路稳步推进深凹区勘探，实现深凹区规模效益增储。沧东深凹和歧口深凹的勘探突破为老油田资源接替夯实了基础，进一步证实了断陷湖盆深凹区的勘探潜力，为断陷湖盆

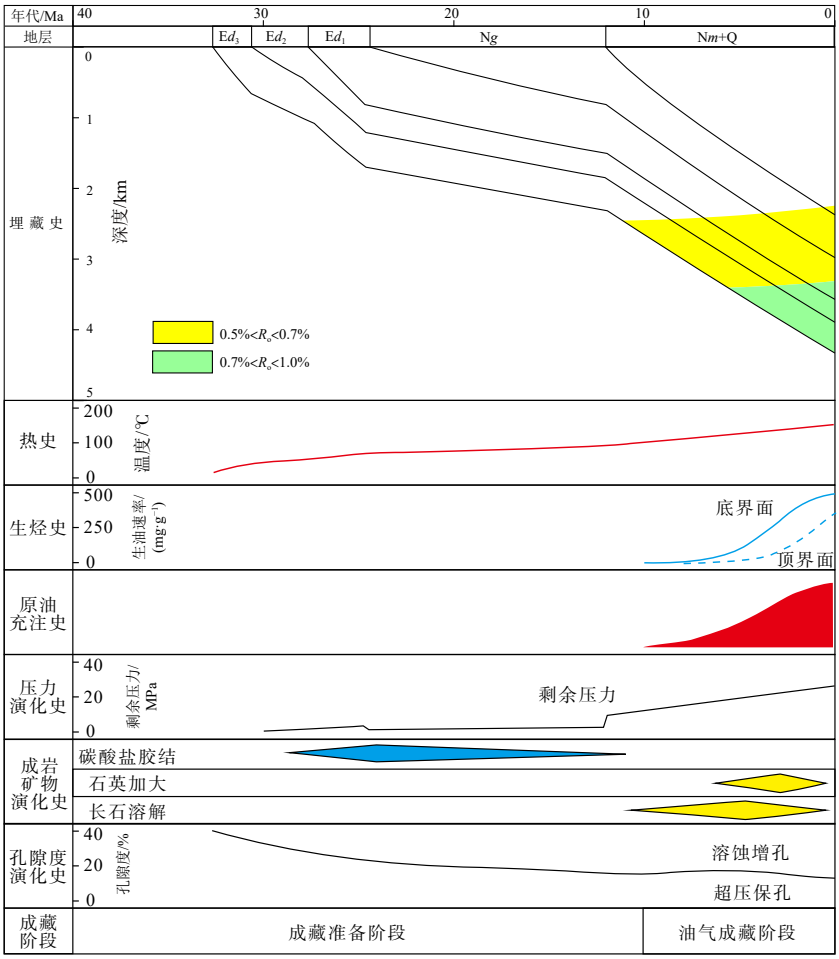


图 12　歧口深凹区 HT1 井东三段油气成藏事件综合图

Fig. 12　Comprehensive map of hydrocarbon accumulation events in Ed_3 at Well HT1 in the deep subsag zone of the Qikou Sag

深凹区勘探提供了借鉴和参考。

5　结　论

（1）沧东深凹区为盆缘深凹，距离物源区近，源–断–凹配置控制盆缘深凹区发育扇三角洲砂体，发育砾岩岩性遮挡、砂岩上倾尖灭、断裂遮挡圈闭，具备“砂泥互层–下生上储型”源储组合空间配置和“早充注–早深埋型”源储组合时间配置。歧口深凹区为盆中深凹，距离物源区远，源–沟–坡配置控制盆中深凹区发育远岸水下扇砂体，发育砂岩透镜体和断裂遮挡圈闭，具备“泥包砂–立体充注型”源储组合空间配置和“晚充注–晚深埋型”源储组合时间配置。

（2）黄骅坳陷深凹区可容纳空间大，具备泥岩与

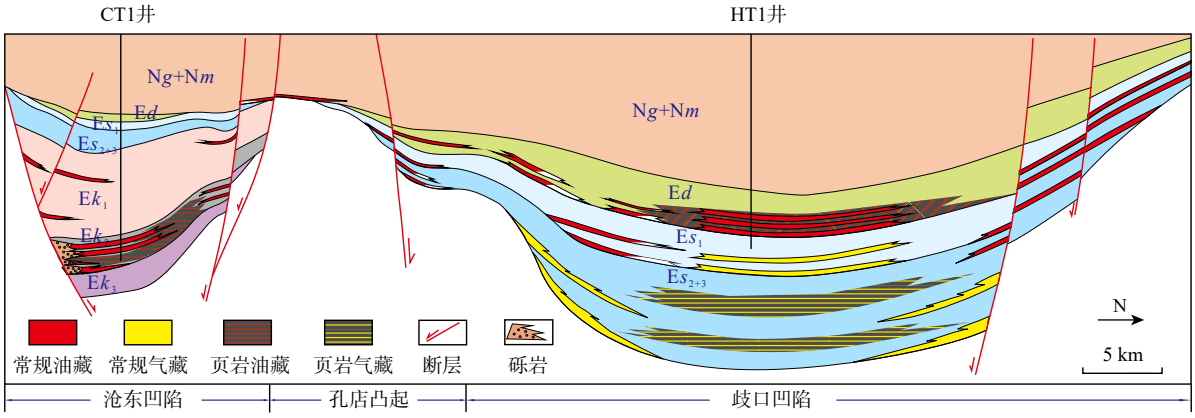


图 13　黄骅坳陷深凹区油气成藏模式图

Fig. 13　Hydrocarbon accumulation model in the deep subsag zone of the Huanghua Depression

砂岩均富集的条件。深凹区发育优质烃源岩，在深埋作用下烃源岩已达成熟生烃门限，具备规模生烃的条件。深凹区能够发育大规模砂体，高刚性颗粒和易溶颗粒的优势矿物组分为深凹区发育有效储层提供了物质基础，有机酸长时间溶蚀增孔和异常超压保孔造就了深凹区有效储层发育。

（3）黄骅坳陷深凹区以岩性油气藏为主，源储时空匹配是深凹区高效率油气充注、高程度油气富集的关键因素。深凹区具有源储耦合、近源充注、带状富集的特点。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 吕明久，马义忠，曾兴，等. 泌阳凹陷深凹区岩性油藏发育规律 [J]. 特种油气藏，2010，17(5)：26-29.
LÜ M J, MA Y Z, ZENG X, et al. Characteristics of the lithologic reservoirs in the sag area of the Biyang Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(5): 26-29. (in Chinese with English abstract)

[2] 张鑫，陈红汉，孔令涛，等. 泌阳凹陷深凹区古流体压力演化与油气充注耦合关系 [J]. 地球科学，2020，45(5)：1769-1781.
ZHANG X, CHEN H H, KONG L T, et al. The coupling relationship between paleofluid pressure evolution and hydrocarbon-charging events in the deep of Biyang Depression, central China[J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1769-1781. (in Chinese with English abstract)

[3] 李平和. 泌阳凹陷深凹区岩性油藏潜力分析 [J]. 石油地质与工程，2017，31(3)：55-57.
LI P H. Potential analysis of lithologic reservoirs in the deep sub-sag zone of the Biyang Sag[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(3): 55-57. (in Chinese with English abstract)

[4] 肖淑民，钟建华，夏景生. 牛庄洼陷油气成藏条件及成藏模式分析 [J]. 特种油气藏，2007，14(5)：38-42.
XIAO S M, ZHONG J H, XIA J S. Hydrocarbon accumulation conditions and patterns in Niuzhuang lowland[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2007, 14(5): 38-42. (in Chinese with English abstract)

[5] 刘明洁，季永承，刘震，等. 牛庄洼陷砂岩透镜体成藏关键因素与富集条件研究 [J]. 特种油气藏，2020，27(1)：40-46.
LIU M J, JI Y C, LIU Z, et al. Key hydrocarbon accumulation factors and enrichment conditions of the sandstone lenses in Niuzhuang Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 40-46. (in Chinese with English abstract)

[6] 崔杰，张伟. 牛庄洼陷沙三中亚段浊积岩储层特征及油气富集规律 [J]. 科技导报，2015，33(15)：32-37.
CUI J, ZHANG W. Characteristics and oil and gas enrichment pattern of turbidite reservoir in the Middle of Third Member of the Shahejie Formation in Niuzhuang Sub-sag[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(15): 32-37. (in Chinese with English abstract)

[7] 卓勤功. 断陷盆地洼陷带岩性油气藏成藏机理及运聚模式 [J]. 石油学报，2006，27(6)：19-23.
ZHUO Q G. Reservoir-forming mechanism and migration-accumulation mode of lithological pool in deep sub-depression of rift-subsidence basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 19-23. (in Chinese with English abstract)

[8] 刘震，赵阳，杜金虎，等. 陆相断陷盆地岩性油气藏形成与分布的“多元控油-主元成藏”特征 [J]. 地质科学，2006，41(4)：612-635.
LIU Z, ZHAO Y, DU J H, et al. Characteristics of "multi-factor controlling and key-factor entrapping" of formation and distribution of lithologic petroleum reservoirs in continental rift basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(4): 612-635. (in Chinese with English abstract)

[9] 刘震，付东阳，肖伟，等. 二连盆地三种典型构造带岩性油藏形成模式分析 [J]. 石油实验地质，2007，29(1)：32-39.
LIU Z, FU D Y, XIAO W, et al. The analysis of formation models of lithological reservoirs on three kinds of typical structural zones in the Erlian Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(1): 32-39. (in Chinese with English abstract)

[10] 大港油气区编纂委员会. 中国石油地质：志卷五. 大港油气区 [M]. 北京：石油工业出版社，2019.
Dagang Oil and Gas Area Compilation Committee. China petroleum geology: Volume Five. Dagang oil and gas field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019. (in Chinese)

[11] 周立宏，陈长伟，杨飞，等. 陆相断陷盆地深凹区致密油气成藏模式与勘探实践：以渤海湾盆地黄骅坳陷为例 [J]. 石油学报，2024，45(5)：755-770.
ZHOU L H, CHEN C W, YANG F, et al. Accumulation models and exploration practice of tight oil and gas in the deep sag areas of continental fault basins: A case study of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 755-770. (in Chinese with English abstract)

[12] 赵贤正，周立宏，蒲秀刚，等. 断陷湖盆斜坡区油气富集理论与勘探实践：以黄骅坳陷古近系为例 [J]. 中国石油勘探，2017，22(2)：13-24.
ZHAO X Z, ZHOU L H, PU X G, et al. Hydrocarbon enrichment theory and exploration practice in the slope of fault lake basin: A case study of Paleogene in Huanghua Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(2): 13-24. (in Chinese with English abstract)

[13] 周立宏，时筱淞，官全胜，等. 渤海湾盆地沧东凹陷南皮斜坡地质特征与油气成藏 [J]. 天然气地球科学，2017，28(9)：1289-1297.
ZHOU L H, SHI X S, GUAN Q S, et al. Geological characteristics and hydrocarbon accumulation of Nanpi slope in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(9): 1289-1297. (in Chinese with English abstract)

[14] 周立宏，陈长伟，崔宇，等. 渤海湾盆地黄骅坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力 [J]. 石油学报，2023，44(12)：2160-2178.
ZHOU L H, CHEN C W, CUI Y, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Huanghua Depression of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2160-2178. (in Chinese with English abstract)

[15] CHEN J X, GUO X W, HAN Y J, et al. Combination of basin modelling and carbazoles to investigate secondary oil migration pathways in the Dongying Depression of the Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 131: 105163.

[16] SONG Y, YE X, SHI Q R, et al. A comparative study of organic-rich shale from turbidite and lake facies in the Paleogene Qikou Sag (Bohai Bay Basin, East China): Organic matter accumulation, hydrocarbon potential and reservoir characterization[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 594: 110939.

[17] DONG Y Y, ZENG J H, DONG X Y, et al. The control effect of normal faults and caprocks on hydrocarbon accumulation: A case study from the Binhai fault nose of the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 218: 110918.

[18] ZHU C Z, GANG W Z, ZHAO X Z, et al. Reconstruction of oil charging history in the multi-source petroleum system of the Beidagang buried-hill structural belt in the Qikou Sag, Bohai Bay Basin, China: Based on the integrated analysis of oil-source rock correlations, fluid inclusions and geologic data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109197.

[19] WU Z Y, ZHAO X Z, PU X G, et al. Petroleum resource potential evaluation using insights based on hydrocarbon generation, expulsion, and retention capabilities: A case study targeting the Paleogene Es_1 Formation, Qikou Sag[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109667.

[20] 宋舜尧, 王敏芳, 尚晓雨, 等. 渤海湾盆地大港探区明化镇组多级别层序格架及砂岩型铀成矿条件 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 1-17.
SONG S Y, WANG M F, SHANG X Y, et al. Sequence stratigraphic frameworks in different scales and sandstone-type uranium ore-formation of Minghuazhen Formation in Dagang area, Bohai Bay Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 1-17. (in Chinese with English abstract)

[21] 解习农, 程守田, 陆永潮. 陆相盆地幕式构造旋回与层序构成 [J]. 地球科学, 1996, 21(1): 27-33.
XIE X N, CHENG S T, LU Y C. Episodic tectonic cycles and internal architectures of sequences in continental basin[J]. Journal of Earth Science, 1996, 21(1): 27-33. (in Chinese with English abstract)

[22] 周立宏, 卢异, 肖敦清, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷盆地结构构造及演化 [J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 373-382.
ZHOU L H, LU Y, XIAO D Q, et al. Basinal texture structure of Qikou Sag in Bohai Bay Basin and its evolution[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 373-382. (in Chinese with English abstract)

[23] 赵贤正, 周立宏, 肖敦清, 等. 歧口凹陷斜坡区油气成藏与勘探实践 [J]. 石油学报, 2016, 37(增刊 2): 1-9.
ZHAO X Z, ZHOU L H, XIAO D Q, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration practice of slope area in Qikou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[24] 索艳慧, 李三忠, 许立青, 等. 渤海湾盆地大歧口凹陷新生代构造演化与盆地原型 [J]. 地质科学, 2015, 50(2): 473-488.
SUO Y H, LI S Z, XU L Q, et al. Cenozoic structural evolution and prototype basin of the Great Qikou Sag, the Bohai Bay Basin[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2015, 50(2): 473-488. (in Chinese with English abstract)

[25] 时筱淞, 林伶, 李洪香, 等. 沧东凹陷孔二段斜坡演化及控砂控藏机制 [J]. 天然气与石油, 2018, 36(3): 65-70.
SHI X S, LIN L, LI H X, et al. Sand-gathering and reservoir-controlling mechanisms of Ek_2 slope in Cangdong Sag[J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36(3): 65-70. (in Chinese with English abstract)

[26] 陈长伟, 薛林福, 徐兴科, 等. 黄骅坳陷孔南地区孔二段湖盆结构恢复 [J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 511-517.
CHEN C W, XUE L F, XU X K, et al. Re-establishment of basin framework on Member 2 of Kongdian Formation in Kongnan area, Huanghua Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 511-517. (in Chinese with English abstract)

[27] 薛林福, 孙晶, 陈长伟, 等. 黄骅坳陷孔南地区孔一、孔二段构造沉积演化 [J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(2): 62-68.
XUE L F, SUN J, CHEN C W, et al. Tectonic-sedimentary evolution of the First and Second members of the Kongdian Formation in southern Kongdian, Huanghua Depression[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2008, 28(2): 62-68. (in Chinese with English abstract)

[28] 周立宏, 陈长伟, 孙统, 等. 渤海湾盆地沧东深凹区沧探 1 井古近系孔二段重大突破与勘探意义 [J]. 中国石油勘探, 2024, 29(2): 16-29.
ZHOU L H, CHEN C W, SUN T, et al. A major discovery in the Second Member of the Paleogene Kongdian Formation in Well Cangtan 1 in Cangdong deep subsag area in Bohai Bay Basin and its exploration significance[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(2): 16-29. (in Chinese with English abstract)

[29] 周立宏, 何海清, 陈长伟, 等. 歧口凹陷滨海斜坡深凹区海探 1 井东营组勘探突破与启示 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(6): 78-89.
ZHOU L H, HE H Q, CHEN C W, et al. Exploration breakthrough and enlightenment of Dongying Formation in Well Haitan 1 in the deep subsag area in Binhai slope, Qikou Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(6): 78-89. (in Chinese with English abstract)

[30] 操应长, 远光辉, 杨海军, 等. 含油气盆地深层-超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展 [J]. 石油学报, 2022, 43(1): 112-140.
CAO Y C, YUAN G H, YANG H J, et al. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 112-140. (in Chinese with English abstract)

[31] 远光辉, 操应长, 杨田, 等. 论碎屑岩储层成岩过程中有机酸的溶蚀增孔能力 [J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 207-219.
YUAN G H, CAO Y C, YANG T, et al. Porosity enhancement potential through mineral dissolution by organic acids in the diagenetic process of clastic reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 207-219. (in Chinese with English abstract)

[32] 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)：1673-1703.
CAO Y C, YUAN G H, WANG Y Z, 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)：1673-1703.（in Chinese with English abstract）

[33] 李松，马立元，王濡岳，等. 鄂尔多斯盆地石盒子组−山西组致密储层形成主控因素与发育模式：以彬长地区为例 [J]. 地质科技通报，2024，43(2)：28-40.
LI S, MA L Y, WANG R Y, et al. Main controlling factors and development model of tight reservoirs in the Shihezi Formation-Shanxi Formation in the Ordos Basin：Taking the Binchang area as an example[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2024，43(2)：28-40.（in Chinese with English abstract）

[34] CHEN L, JI H C, ZHANG L, et al. Effect of burial processes on the evolution of organic acids and implications for acidic dissolution from a case study of the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering，2017，39：173-187.

[35] 朱抱荃，程中第，应凤祥. 地层干酪根有机酸与储层次生孔隙的关系 [J]. 石油实验地质，1996，18(2)：206-215.
ZHU B Q, CHENG Z D, YING F X. Relation of organic acid generated by kerogen to secondary porosity of reservoir[J]. Experimental Petroleum Geology，1996，18(2)：206-215.（in Chinese with English abstract）

[36] CHEN J X, GUO X W, HE Z L, et al. Maturity assessment of solid bitumen in the Sinian carbonate reservoirs of the eastern and central Sichuan Basin, China：Application for hydrocarbon generation modelling[J]. Geological Journal，2022，57(11)：4662-4681.

[37] CHEN J X, CHEN C W, HE Z L, et al. Differential evolution of pore fluid pressure in the Sinian carbonate reservoirs of the central and eastern Sichuan Basin, China：Implication for gas preservation and destruction[J]. Geological Journal，2024，59(10)：2720-2739.

[38] 尤丽，曲希玉，钟佳，等. 高温超压储层孔隙演化的物理模拟实验 [J]. 天然气工业，2019，39(7)：21-30.
YOU L, QU X Y, ZHONG J, et al. Physical simulation experiments on pore evolution in high-temperature and overpressure reservoirs[J]. Natural Gas Industry，2019，39(7)：21-30.（in Chinese with English abstract）

[39] 姜文亚，王娜，汪晓敏，等. 黄骅坳陷沧东凹陷孔店组石油资源潜力及勘探方向 [J]. 海相油气地质，2019，24(2)：55-63.
JIANG W Y, WANG N, WANG X M, et al. Oil resources potential and exploration direction of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Huanghua Depression of Bohai Bay Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology，2019，24(2)：55-63.（in Chinese with English abstract）

[40] 赵贤正，周立宏，蒲秀刚，等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征：以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例 [J]. 石油学报，2019，40(9)：1013-1029.
ZHAO X Z, ZHOU L H, PU X G, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin：A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica，2019，40(9)：1013-1029.（in Chinese with English abstract）

[41] 蒲秀刚，金凤鸣，韩文中，等. 陆相页岩油甜点地质特征与勘探关键技术：以沧东凹陷孔店组二段为例 [J]. 石油学报，2019，40(8)：997-1012.
PU X G, JIN F M, HAN W Z, et al. Sweet spots geological characteristics and key exploration technologies of continental shale oil：A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag[J]. Acta Petrolei Sinica，2019，40(8)：997-1012.（in Chinese with English abstract）

Summary for “黄骅坳陷深凹区油气成藏条件与富集模式”

Hydrocarbon accumulation conditions and enrichment models in the deep subsag zone of the Huanghua Depression

CHEN Changwei，CHEN Jiaxu*，CHAI Gongquan，LIU Guoquan，CUI Yu，
SONG Shunyao，DONG Wentao，ZHANG Shaohui，ZHANG Rui

PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China

First author，E-mail：chenchwei@petrochina.com.cn

* Corresponding author， E-mail：chenjxu@petrochina.com.cn

Abstract：[**Objective**] The deep subsag zones of rift lake basins remain underexplored, but are critical areas for the discovery of strategic resource plays. Thus, understanding the hydrocarbon accumulation systems in these zones is essential. [**Methods**] This study focuses on the deep subsag zone of the Huanghua Depression and conducts an in-depth analysis of the sedimentary, reservoir, source rock, and trap conditions to elucidate the sandstone distribution mechanisms, reservoir development processes, and hydrocarbon accumulation models in the deep subsag zone. [**Results**] The deep subsag zone of the Cangdong Sag, located near the basin margin and close to the provenance area, has a source-fault-sag configuration that promotes fan-delta deposition. This zone exhibits a spatial configuration of "sandstone-mudstone interlayers with lower source and upper reservoir" and a temporal pattern of "early oil charge and early deep burial". In contrast, the deep subsag zone of the Qikou Sag, situated farther from the provenance area at the basin center, follows a source-trench-slope configuration conducive to far-shore submerged fan deposition. Its spatial configuration is "mudstones covering sandstones with three-dimensional oil charging", and its temporal configuration is "late oil charge and late deep burial". Both zones are rich in mudstones and sandstones, with high-quality source rocks that exhibit high thermal maturity and are conducive to large-scale hydrocarbon generation. The prevailing conditions favor the development of large sand bodies. Three key factors (dominant minerals, organic acid dissolution, and anomalous overpressure)play a critical role in the formation of effective reservoirs. The deep subsag zones also offer superior trapping conditions, primarily in the form of lithological hydrocarbon reservoirs, characterized by source-reservoir coupling, proximal source charging, and zonal enrichment. [**Conclusion**] This study highlights the substantial exploration potential of the deep subsag zones in faulted lake basins, providing valuable insights for hydrocarbon exploration in these areas.

Key words: faulted lake basin；Huanghua Depression；deep subsag zone；accumulation condition；hydrocarbon accumulation；enrichment model

Received：2024-11-05；Revised：2025-03-05；Accepted：2025-03-05

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240657