郭刚,李鑫,韩雅坤,等. 东海盆地西湖凹陷平湖斜坡始新统平湖组成岩相类型及对储层的控制.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1494-1505. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230183.
Guo Gang, Li Xin, Han Yakun, et al. Diagenetic Facies Types and Their Control on Reservoirs of Eocene Pinghu Formation in Pinghu Slope, Xihu Sag, East China Sea Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1494-1505. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230183.

东海盆地西湖凹陷平湖斜坡始新统平湖组成岩相类型及对储层的控制

郭 刚,李 鑫,韩雅坤,李 峰,陈 莹,李林致
中海油研究总院有限责任公司,北京 100028

摘要:为了在深埋藏、强非均质性背景下寻找相对优质储层,本文以东海盆地西湖凹陷平湖组为例,基于直观微区观测、间接压汞表征及孔渗分析相结合的方法,在储层沉积学分析的基础上,先划分成岩相类型,进而明确不同成岩相的差异储集能力特征,评价成岩相储集能力。结果表明:平湖组沉积于河流和潮汐双向水动力条件的三角洲-潮坪体系,砂体多发育于水下分流河道、河口坝、潮道、砂坪和混合坪中,以细粒和极细粒为主,主要为长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩;基于成岩作用类型的强度差异将成岩相划分为3类,包括长石溶蚀相、富塑性压实相和钙质胶结相;同一成岩相类型孔渗特征和孔隙结构特征均一,而不同成岩相之间物性差异显著;以孔隙度、渗透率、最大连通孔喉半径为标准对3类成岩相进行量化参数分级评价,长石溶蚀相孔隙度>15%,渗透率>$10.0\times10^{-3}\ \mu m^2$,最大连通孔喉半径>5.0 μm,物性条件优于富塑性压实相和钙质胶结相,优选出长石溶蚀相为最有利的储层砂体类型。

关键词:西湖凹陷;平湖组;深层;非均质性;成岩相;压汞;东海盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230183 **中图分类号**:TE122.2 **文献标志码**:A

Diagenetic Facies Types and Their Control on Reservoirs of Eocene Pinghu Formation in Pinghu Slope, Xihu Sag, East China Sea Basin

Guo Gang, Li Xin, Han Yakun, Li Feng, Chen Ying, Li Linzhi
CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, *China*

Abstract: In order to find relatively high-quality reservoirs under the background of deep burial and strong heterogeneity, this paper takes Pinghu Formation in Xihu sag of East China Sea basin as an example. Based on the combination of intuitive micro-area observation, indirect mercury intrusion characterization and porosity/permeability test, the types of diagenetic facies are first divided based on reservoir sedimentology analysis, and then the differential reservoir capacity characteristics of different diagenetic facies are clarified, and the reservoir capacity of diagenetic facies is evaluated. The study

收稿日期:2023-07-27
作者简介:郭刚(1976—),男,高级工程师,博士,主要从事海洋油气勘探地质方面的研究,E-mail:guok@sina.com
通信作者:李鑫(1988—),男,高级工程师,博士,主要从事沉积与储层地质方面的研究,E-mail:lixin_2686@126.com
基金项目:国家自然科学基金项目(42202157);中国博士后科学基金项目(2021M693543)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (42202157) and the Postdoctoral Science Foundation of China (2021M693543)

shows that the Pinghu Formation is deposited in a deltaic-tidal transitional system with bi-directional hydrodynamic conditions of rivers and tides. The sand bodies are primarily developed in submerged divergent channels, estuarine dams, tidal channels, sand flats, and mixed flats, which are mainly fine-grained and very fine-grained. Lithologic characteristics are mainly feldspathic sandstones and lithic feldspathic sandstones. Three types of diagenetic phases are classified based on the difference in intensity of diagenetic types, including feldspathic dissolution facies, ductile-rich compaction facies, and calcareous cementation facies. The porosity-permeability and pore structure of the same diagenetic facies type are uniform, while the physical properties vary significantly among diagenetic facies. The three types of diagenetic facies are evaluated in terms of porosity, permeability and maximum connected pore throat radius. Among them, the porosity of feldspar dissolution facies is more than 15%, the permeability is more than $10.0\times10^{-3}\mu m^2$, the maximum connected pore throat radius is more than 5.0 μm, and the physical properties are better than ductile-rich compaction facies and calcareous cementation facies. Therefore, feldspathic dissolution facies is the most favorable reservoir sand body type.

Key words: Xihu sag; Pinghu Formation; deep-buried; heterogeneity; diagenetic facies; mercury pressure injection; East China Sea basin

0　引言

在过去一百多年的石油工业发展历程中，埋深小于 3 500 m 的浅层“黄金带”一直是油气勘探开发的重要着力点，其也为近代能源需求提供了有效支撑[1]。但随着浅层勘探的不断深入以及能源需求的日益紧张，浅层勘探已不能满足需求，深层油气资源开发已迫在眉睫。近年来的勘探实践证明，全球范围深层油气资源丰富，不断涌现的油气勘探开发新技术，也为探索深层油气资源提供了可能[2-5]。近年来相关研究的开展，包括典型盆地沉积物埋藏前的组成与结构，各种自生矿物的类型、含量、赋存方式及相应形成机制，成岩过程的温度、压力、时间、流体性质，系统的开放性和封闭性，烃类的占位，成岩反应的热力学与动力学机制等方面[6-11]，已大大加深了人们对成岩作用及其与油气储层特征关系的认识，从而使砂岩储层研究进入了一个新的里程。

在成岩作用以及相应的储层质量预测研究中，一些传统形成地下岩石次生孔隙的机制（如有机酸对铝硅酸盐溶解形成次生孔隙）受到挑战，新的机制（如大气淡水的溶解作用、深部冷却地下水的溶解作用等）得到了人们的普遍接受，这对于次生孔隙成因的解释及地下岩石孔隙度和渗透率的预测十分重要。然而，深层碎屑岩储层大多经历了复杂的演化过程和强烈的成岩改造，在深埋藏、强非均质性、低孔渗背景下，寻找相对优质储层难度较大[6-9]。

东海盆地是我国近海陆架最大的沉积盆地，西湖凹陷是其最重要的勘探区，目前油气勘探主要集中在凹陷的平湖斜坡区和中央反转构造带。深层平湖组蕴含的油气储量大，但由于平湖组砂岩储层埋深大，普遍发育低渗透储层，储层非均质性强，优质储层和“甜点”储层的分布预测是目前油气勘探遇到的最大问题。为此，针对深层碎屑岩储层的客观强非均质性，本文以中国东海盆地西湖凹陷平湖组为例，基于直观微区观测和间接压汞表征相结合的方法，在储层沉积学分析的基础上，先划分成岩相类型，进而明确不同成岩相的差异储集能力特征，评价成岩相储集能力，最后揭示有效储层发育控制因素和作用机理，以期为中国近海及国外区块的深层碎屑岩储层油气勘探提供一些推广借鉴。

1　区域地质概况

西湖凹陷自西向东划分为 5 个二级构造带，依次为西部斜坡带、西次凹、中央反转构造带、东次凹和东部断阶带，其中西部斜坡带包括杭州斜坡、平湖斜坡和天台斜坡（图 1a）。平湖斜坡是本次研究的主要区域，其构造较为复杂，发育有反向的大断层以及基底古隆起，并且受正断层、反断层和古隆起的共同控制，整体表现为复杂斜坡背景，局部发育有次级地堑/地垒构造和断裂转换带/坡折带[10]，构造背景对于局部的沉积中心起着明显的控制作用。

西湖凹陷古近系发育较全，自下而上发育古新统，始新统八角亭组、宝石组、平湖组和渐新统花港组（图 1b）。本次研究重点为始新统平湖组。这一时期受太平洋弧后扩张的影响，古琉球岛首次裂解，新生的钓鱼岛火山弧与残余的凸起间形成西湖凹

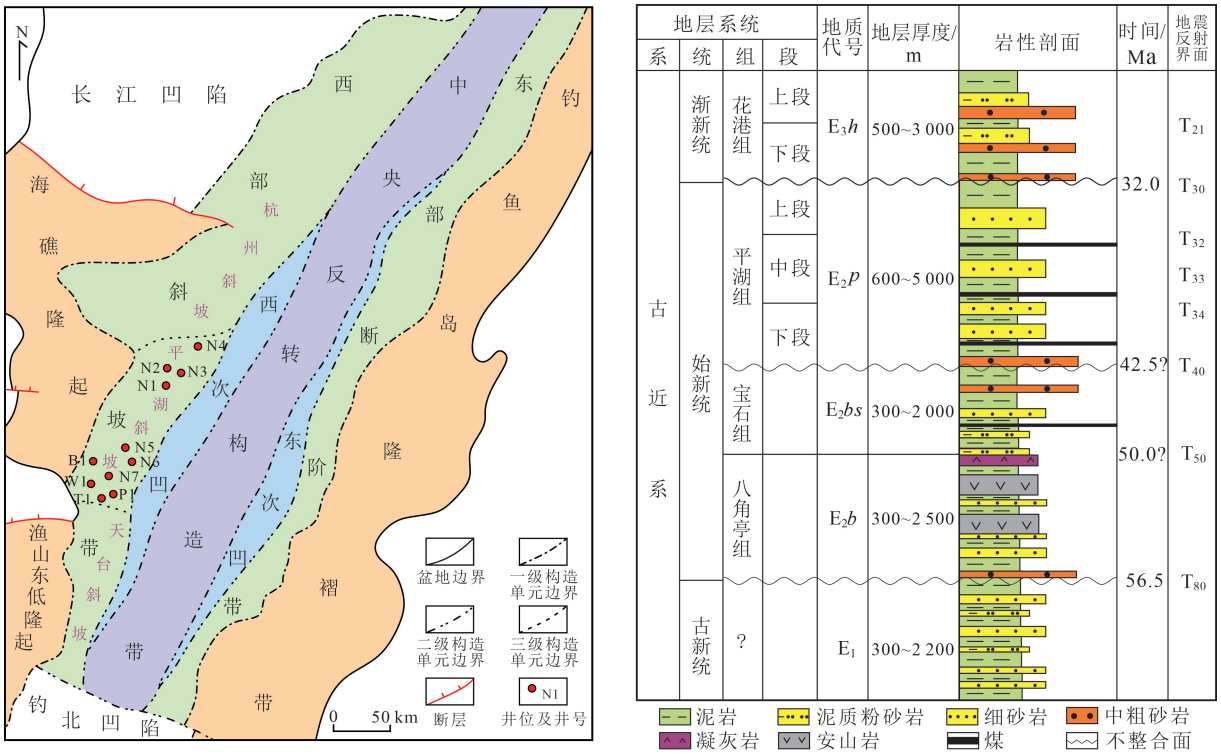


图1 西湖凹陷区域位置(a)及综合柱状图(b)

Fig.1 Regional location (a) and synthesis histogram (b) of Xihu sag

陷。盆地边缘断层控制了盆地的初始样式,形成了西高东低的地形。随着太平洋板块NNW向俯冲作用逐渐增强,并在始新世中后期达到高潮,盆地内形成了一系列由NNE—NE向断裂构成的地堑和半地堑。伴随盆地迅速拉张断陷,西湖凹陷发生了广泛海侵,盆地内的阶梯状同沉积断层控制了沉积分布[11],随着断裂距离的增加,沉积厚度也增大,最终形成了西薄东厚的始新统。

2 储集层岩相和矿物特征

2.1 沉积构造特征

平湖组总体属海陆过渡半封闭海湾相沉积,处于潮汐作用明显的半封闭局限海环境,为潮坪、潮汐改造的三角洲及潮坪体系陆源碎屑海湾充填,砂体主要发育在水下分流河道、河口坝、潮道、砂坪和混合坪中(图2)。

水下分流河道:以砂岩为主,粉砂岩、泥质较少,发育块状层理、楔状交错层理、板状交错层理,并见有层内变形构造(图3a)。

河口坝:主要由细粉砂岩和泥岩组成。由于潮汐作用的影响,往往出现多方向的古水流模式。通常发育板状、槽状交错层理、水流波纹交错层理及双向交错层理(图3b)。电测曲线特征多呈现多呈锯齿状漏斗型(图2)。

潮道:主要由细砂岩和少量泥岩组成,在垂向上自下而上具有粒度由粗变细、交错层规模和厚度变小变薄的正旋回层序。下部由较粗粒砂组成的深潮道沉积,具有双向大型板状交错层理和中型槽状交错层理;上部为中细砂组成的浅潮道沉积,具双向小型到中型槽状交错层理、平行层理和波纹层理(图3c)。在测井曲线上表现为顶、底突变的块状箱型,往往具有多阶性(图2)。

砂坪:以砂岩为主,夹泥质薄层,在沉积序列上为正粒序;在沉积构造上,主要是反映水下较高能特征的构造,如透镜状层理、波状层理及菱铁矿条带等(图3d),其主要沉积特征与潮间砂坪相同,且在垂向上与之过渡。电测曲线呈指状或齿状(图2)。

混合坪:主要由薄层粉砂岩、粉砂质泥岩与泥岩互层为主。发育波状层理、透镜状层理、小型波状交错层理(图3e)和生物遗迹化石,还发育较好的黏土层,以及由黏土层的规律变化而显示的潮汐周期层序。电测曲线呈指状或齿状(图2)。

2.2 矿物组分特征

粒度分析主要采用数据较多的图像分析法得出

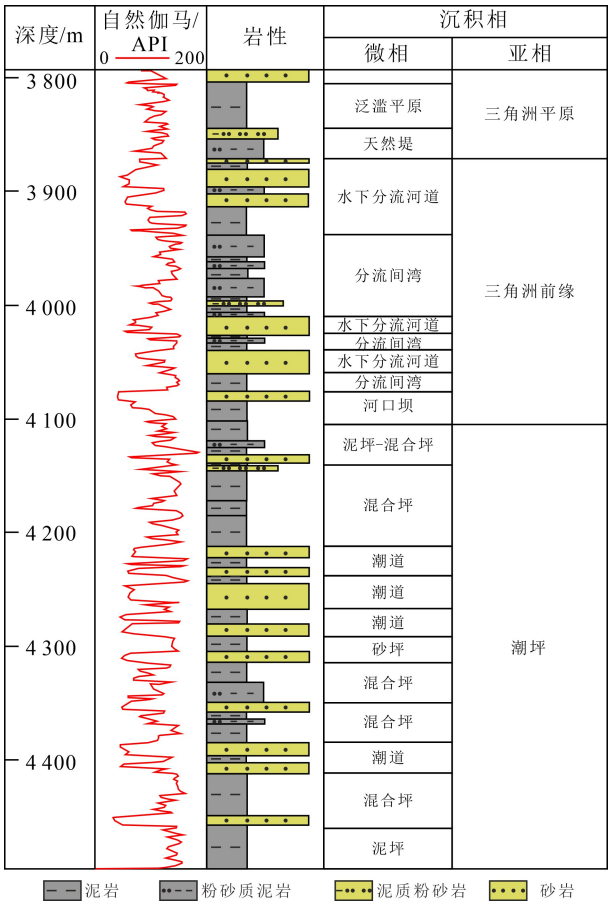
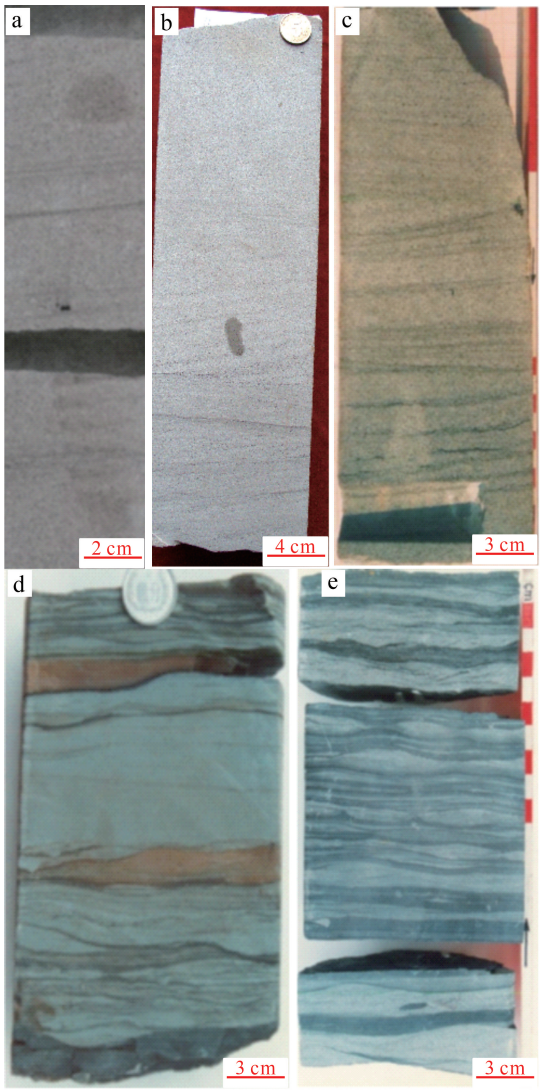


图 2　平湖斜坡 N1 井平湖组沉积微相综合柱状图

Fig.2　Sedimentary microphase composite histogram of Pinghu Formation in Pinghu slope, Well N1



a. 楔状交错层理，N2 井，4 023.62 m，辫状三角洲水下分流河道；b. 灰白色粉砂岩，发育板状交错层理，N1 井，3 851.70 m，辫状三角洲河口坝沉积；c. 具有单、双黏土层和交错层理，W1 井，3 854.13 m，潮道；d. 发育透镜状层理、波状层理及菱铁质条带，B1 井，3 445.22 m，潮下带砂坪；e. 泥质粉砂岩、粉砂质泥岩，波状层理、透镜状层理和波状交错层理，P1 井，4 173.00 m，潮间-潮下带砂泥混合坪。

图 3　平湖斜坡平湖组沉积微相岩心特征描述

Fig.3　Core characteristics description of sedimentary microfacies of Pinghu Formation in Pinghu slope

的粒径测试结果[12]，采用 15 口井 352 个数据进行统计。基于以上统计数据确定了研究区储层砂岩以细粒、极细粒为主，其中极细砂岩占 55%，细砂岩占 31%，中砂岩和粗砂岩分别占 9%和 1%，另外有少量的粗粉砂岩占 4%(图 4a)。同时，根据 13 口井 340 个平湖组砂岩岩石薄片的岩石类型统计，平湖组岩石类型主要为长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩及少量的岩屑石英砂岩、长石石英砂岩和岩屑砂岩(图 4b)。碎屑组分的体积分数为 75.2%～97.0%，其中石英体积分数为 21.6%～70.8%，长石体积分数为 3.3%～36.9%，而岩屑的体积分数为 8.9%～34.2%，总体体积分数从大到小为石英、岩屑、长石，含极少量的云母。

3　成岩特征分析

3.1　镜下岩石学特征

通过偏光显微镜和扫描电镜观察识别出的填隙物/自生矿物包括渗滤黏土、自生黏土、次生加大石英/微晶石英、次生加大长石、碳酸盐矿物、长石溶蚀残留物等(图 5)，主要特征概述如下。

1)渗滤黏土。渗滤黏土在压实作用之前形成，主要贴附在碎屑颗粒表面的碎屑黏土上，发育于碎屑石英颗粒的边部(图 5a)。在成岩作用过程中，随埋深增加，渗滤黏土成因的伊利石与伊利石/蒙脱石(I/S)混层往往逐渐转变为发丝状的自生伊利石，

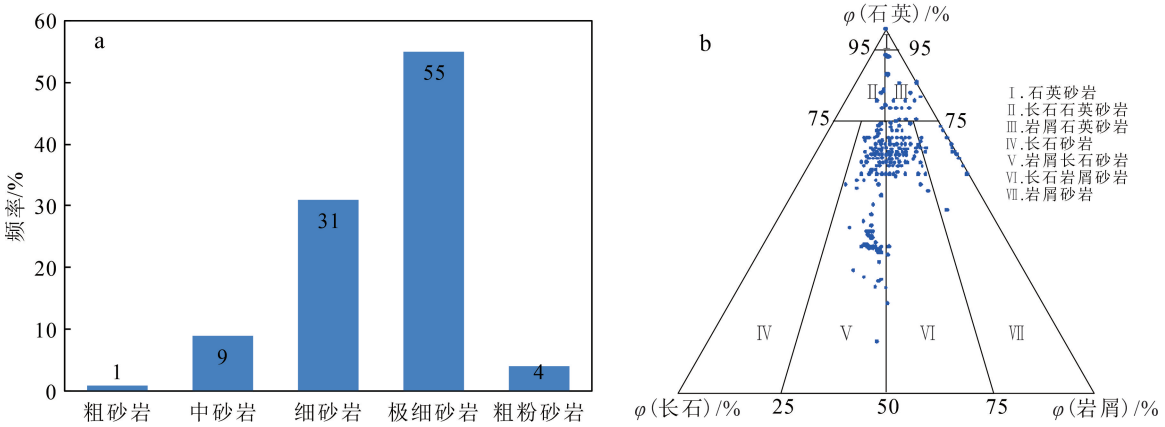
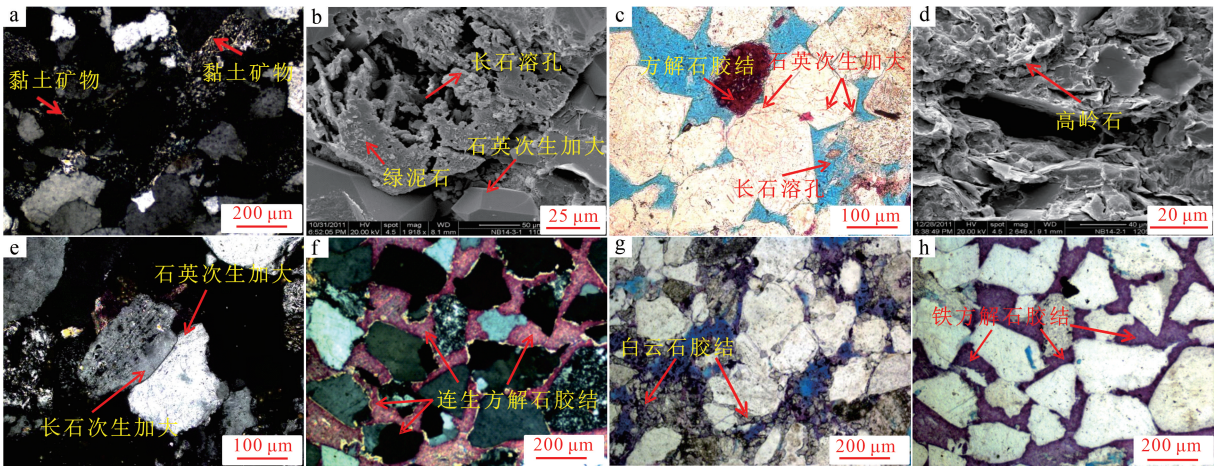


图4 平湖斜坡平湖组砂岩粒度(a)及岩矿组分特征(b)

Fig.4 Grain size (a) and rock mineral composition characteristics (b) of Pinghu Formation in Pinghu slope



a. 渗滤黏土,N4井,4 471.9 m,水下分流河道;b. 石英具次生加大,分布绿泥石,N2井,4 056.86 m,水下分流河道;c. 石英次生加大,方解石胶结(紫红色),N7井,3 439.37 m,潮道;d. 石英次生加大,缝隙分布高岭石,N2井,4 191.57 m,水下分流河道;e. 石英次生加大,长石次生加大,N7井,3 439.67 m,潮道;f. 连生方解石胶结,N3井,4 202.00 m,水下分流河道;g. 白云石胶结,N5井,4 183.60 m,潮道;h. 铁方解石胶结,N2井,4 202.87 m,水下分流河道。

图5 平湖斜坡平湖组储层溶蚀溶解特征

Fig.5 Reservoir dissolution characteristics of Pinghu Formation in Pinghu slope

形成伊利石搭桥,此种伊利石的形成晚于强烈压实作用。

2)自生黏土。自生黏土主要为绿泥石、高岭石和伊利石。其中:绿泥石在扫描电镜下呈叶片状或绒球状,体积分数为3%,主要分布在以点状接触为主的碎屑颗粒之间(图5b)。一般而言,自生黏土矿物的产状与储层物性密切相关,例如,黏土矿物呈包壳产出,对储层孔隙的保存极为有利,而以孔隙充填或裂缝充填形式产出,对储层往往带来不利的影响[13]。研究区内的黏土矿物多以孔隙充填形式出现,包壳的形式较为少见。高岭石在扫描电镜下呈书页状集合体的形态产出,偏光显微镜观察高岭石发育在长石大量溶解的地方。另外,观察到高岭石与自生石英共生(图5c、d),这说明高岭石的形成可能与石英次生加大相近。

3)次生加大石英/微晶石英。本区次生加大石英体积分数较少(0~3%,平均为0.8%),但普遍都有分布,围绕在碎屑石英颗粒的周围依附生长(图5e)。阴极发光系统中次生加大石英不发光[14]。由于其形成时硅质供应量有限,次生加大石英一般没有沿碎屑石英颗粒一周完全生长,且厚度有限(毫米级)。次生加大石英发育在渗滤黏土贴附碎屑石英颗粒而形成的剩余粒间孔隙中,可知次生加大石英形成于渗滤黏土之后。

4）次生加大长石。次生加大长石围绕长石碎屑颗粒的边缘生长，偏光显微镜下见长石加大边明亮，边缘见规则的晶体边界（图 5e），体积分数为 1%。

5）碳酸盐矿物。本区方解石体积分数较高，在 1%～30%之间，平均为 5.6%。茜素红-S 染色呈紫红色（图 5c），按产出形式可分为充填孔隙和交代颗粒。方解石往往充填于次生加大石英形成后剩余的孔隙空间，且交代次生加大石英，说明其形成晚于次生加大石英。方解石对岩石碎屑颗粒的交代作用导致其分布面积远不止其实际充填的孔隙空间。在阴极发光系统中，方解石发亮黄色光或不发光[15]。白云石和铁方解石均为晚期碳酸盐胶结矿物，体积分数分别为 3%和 5%，多分布于点状和线状接触为主的碎屑颗粒之间，呈连晶式胶结（图 5f、g）。若颗粒中发育有石英次生加大边，铁方解石则发育在次生加大边的剩余孔隙中（图 5h）。

6）长石溶蚀残留物。碎屑长石在上部和下部溶蚀带均发育强烈溶蚀、溶解作用，被溶蚀、溶解部分往往占碎屑长石体积的 1/2 以上，在溶蚀、溶解形成的次生孔隙中一般保留有破损百叶窗状的残留体。此外，也可见岩屑的溶蚀溶解作用，如安山岩岩屑，其基质被部分或全部溶解，而长石部分残留形成弥漫状（图 5b）和环状（图 5c）次生孔隙。

3.2　成岩序列

基于以上岩相学关系和自生矿物的组合特征，按照《碎屑岩成岩阶段划分》（SY/T 5477—2003）[16]，建立了西湖凹陷平湖组成岩共生序列。从早到晚依次为：早期方解石→菱铁矿→绿泥石→次生加大石英/微晶石英/高岭石→长石和方解石的溶蚀、溶解作用→晚期方解石→铁方解石→铁白云石（图 6）。

根据西湖凹陷古近系的地温梯度、镜质体反射率和自生矿物组合以及颗粒接触关系等，研究区内成岩演化阶段以中成岩 A 期为主，孔隙中的流体以酸性为主，次生孔隙最为发育，并且镜质体反射率最

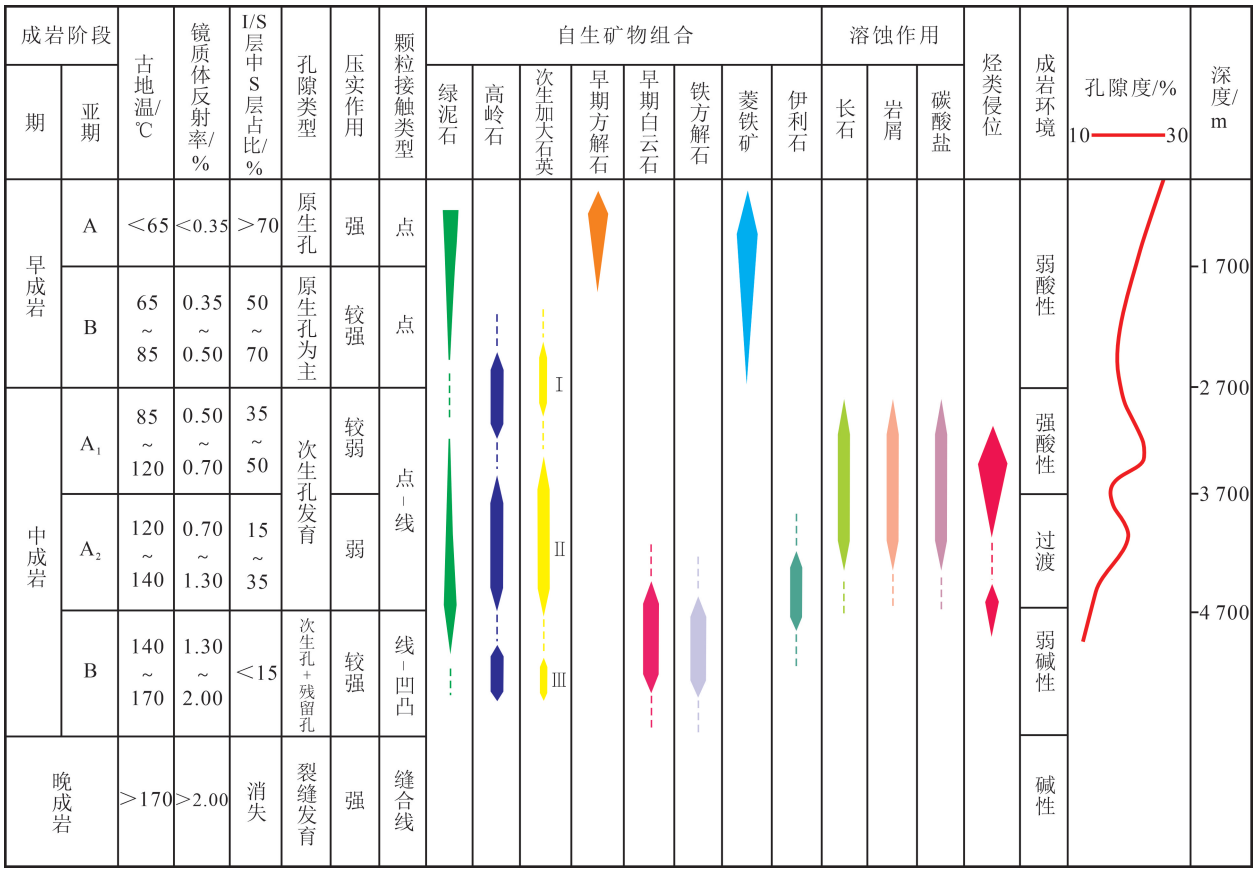


图 6　平湖斜坡平湖组成岩共生序列

Fig.6　Diagenetic symbiotic sequence of Pinghu Formation in Pinghu slope

大为1.30%左右,古地温最高为140 ℃。成岩演化如下:早成岩A期发生机械压实作用,绿泥石、方解石以及菱铁矿开始沉淀;逐渐过渡到早成岩B期继续发生机械压实作用,少量的绿泥石、菱铁矿以及方解石继续沉淀,其沉积环境为弱酸性环境;到了中成岩A_1期,发育次生加大石英,并且随着有机流体的进入,开始发生溶蚀,形成自生高岭石,同时长石、岩屑以及碳酸盐开始发生溶蚀;最后发展到中成岩A_2期,绿泥石以及高岭石再次发生沉淀,同期铁方解石以及白云石开始发育,长石也再次发生溶蚀,并伴有伊利石发育(图6)。

4 成岩作用划分和成岩相类型

4.1 成岩作用划分

成岩作用主要包括压实、胶结和溶蚀3类成岩作用,本文对这3种主要成岩作用进行了定量表征[17],计算公式如表1。通过定量成岩相计算,结果见图7,由图7可以看到,物理成岩作用中,压实率与孔隙度具有负相关关系(图7a),整体压实作用较强。化学成岩作用中,胶结率和溶蚀率与储层孔隙度分别呈负相关和正相关,且相关性较好,即胶结率越高,孔隙度越差(图7b),溶蚀率越高,孔隙度越好(图7c)[18]。因此由相关性统计分析可以看出,平湖组储层受物理成岩和化学成岩作用影响,原始沉积时期的储集物性已经被改造,以沉积微相为单元的物性分析对成岩改造过的强非均质性储层分析方法并不适合,成岩相划分和分类评价就显得尤为必要。

4.2 成岩相类型

通过上述的物性主控因素分析,可以判定平湖组储层具有压实、胶结、溶蚀3种主要的成岩作用类型。通过镜下观察可以看出,不同的成岩作用类型在不同沉积微相间或同一沉积微相内的作用程度不同,这也是储层具有强非均质性的主要原因。依据成岩类型的作用程度,平湖组可分为3种成岩相类型,包括长石溶蚀相、富塑性压实相和钙质胶结相。

1)长石溶蚀相:该类岩石相多发育于潮道和分流河道中上部,沉积时期水动力相对强,中砂岩体积分数高,分选好。镜下颗粒以点接触和线接触方式排列,孔隙以溶蚀孔隙为主,溶蚀颗粒为长石,孔隙中及周围多见高岭石、钙质胶结物,石英具有次生加大边。岩矿特征体现了弱压实后的溶蚀特征(图8a、b)。

2)富塑性压实相:该类岩石相多发育于混合坪和砂坪中,沉积时期水动力较弱、泥质含量较高。镜下多见细粉砂岩和泥岩混杂及岩屑、云母变形等特征,颗粒多为线接触和缝合接触。岩矿特征体现了塑性含量高、变形程度大的强压实特征(图8c、d)。

3)钙质胶结相:该类岩石相集中发育于潮道和河道底部,砂泥交界处矿物交互作用频繁,有助于碳酸盐析出沉淀[19]。镜下颗粒多呈线接触,其间钙质

表1 平湖斜坡平湖组孔隙度演化定量计算公式及含义

Table 1 Quantitative formulae and meanings of porosity evolution of Pinghu Formation in Pinghu slope

	作用类型	孔隙度演化参数	符号	单位	计算公式
物理成岩	沉积作用	分选系数	S_0		$S_0=(D_{25}/D_{75})^{1/2}$
		初始孔隙度	φ_0	%	$\varphi_0=20.91+22.90/S_0$
	压实作用	压实损失孔隙度	L_1	%	$L_1=\varphi_0-\varphi_1$
		压实后剩余孔隙度	φ_1	%	$\varphi_1=\varphi\varphi_{ri}/\varphi_{por}+\varphi_{ce}$
		压实减孔率	a	%	$a=((\varphi_0-\varphi_1)/\varphi_0)\times100\%$
化学成岩	胶结作用	胶结损失孔隙度	L_2	%	$L_2=\varphi_1-\varphi_2$
		压实、胶结后剩余孔隙度	φ_2	%	$\varphi_2=\varphi\varphi_{ri}/\varphi_{por}$
		胶结减孔率	b	%	$b=((\varphi_1-\varphi_2)/\varphi_0)\times100\%$
	溶蚀作用	溶蚀次生孔隙度	φ_3	%	$\varphi_3=\varphi\varphi_{rr}/\varphi_{por}$
		溶蚀增孔率	c	%	$c=(\varphi_3/\varphi_0)\times100\%$

注:D_{25}、D_{75}分别为概率累积曲线上25%、75%处对应的粒径,mm;φ为实测孔隙度,%;φ_{ri}为铸体粒间面孔率,%;φ_{por}为总面孔率,%;φ_{ce}为胶结物体积分数,%;φ_{rr}为溶蚀面孔率,%。

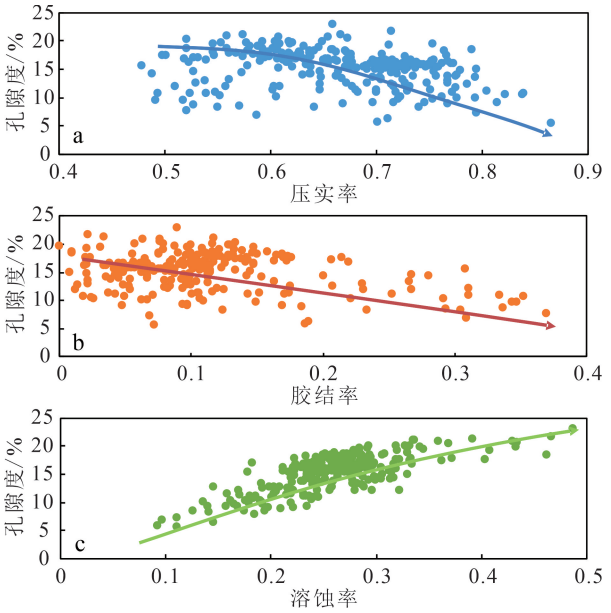


图 7　平湖斜坡平湖组孔隙度与压实率(a)、胶结率(b)、溶蚀率(c)相关性统计图

Fig.7　Statistical diagram of correlation between porosity and compaction rate (a), cementation rate (b), dissolution rate (c) of Pinghu Formation in Pinghu slope

胶结物大量充填，呈现嵌晶状结构，阴极发光呈现亮橙色，体现了成岩晚期的高温特征(图 8e、f)。

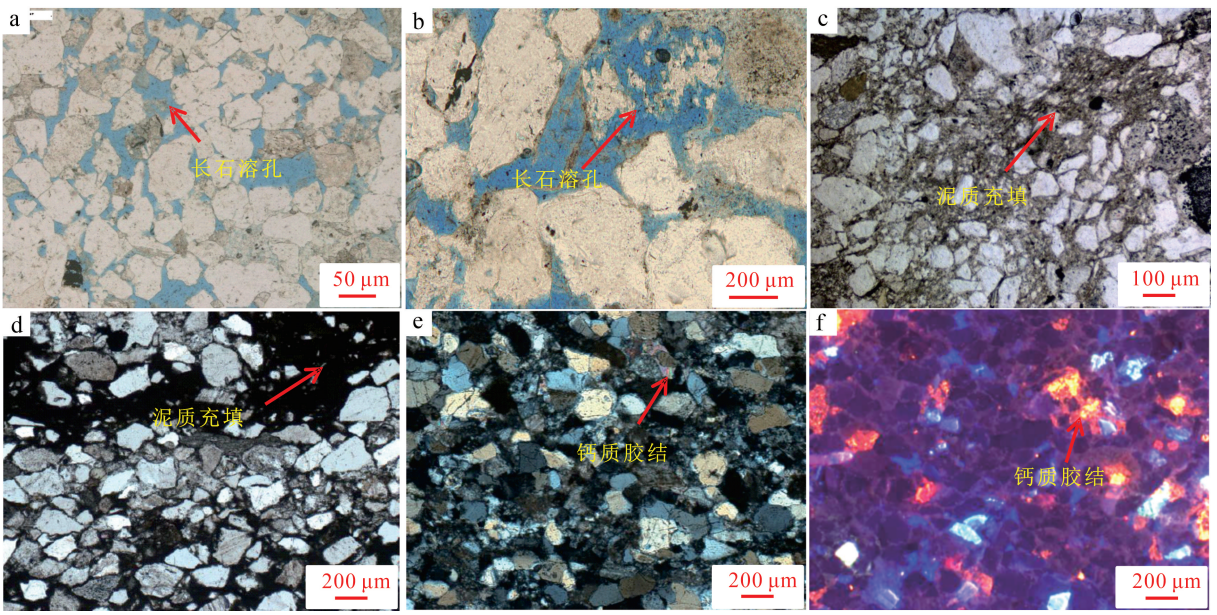
5　成岩相对储层的控制作用

5.1　不同成岩相类型物性特征差异

在对平湖组砂岩进行成岩相划分的基础上，通过对具有薄片观察和孔渗测试的平行样品点统计可知，不同成岩相孔隙度和渗透率具有分段分层级差异特征。长石溶蚀相孔隙度基本大于 10%，渗透率大多超过 $10\times10^{-3}\mu m^2$，具有较高的物性条件；富塑性压实相孔隙度多分布于 7%～15%区间内，而渗透率多分布于 0.1×10^{-3}～$7.0\times10^{-3}\mu m^2$ 区间内，物性条件较差；钙质胶结相孔隙度基本低于 7%，而渗透率多低于 $0.1\times10^{-3}\mu m^2$，体现了致密的物性特点。从渗透率和孔隙度的统计结果(图 9)来看，长石溶蚀相物性最优，富塑性压实相次之，而钙质胶结相物性最差。

5.2　不同成岩相孔隙结构特征

孔隙度和渗透率参数仅能代表整体物性特征，为表征不同成岩相的孔隙结构特征，本文引入高压压汞对每类成岩相的代表性样品进行孔隙结构参数分析。高压压汞获取的孔隙结构参数与孔隙度、渗透率具有较好的相关性(表 2)，因此，高压压汞获取的孔隙结构参数能够表征一定孔渗物性砂岩的孔隙结构特征。



a. 颗粒间点、线接触，压实强度弱，多见长石溶蚀，N7 井，3 446.67 m；b. 长石溶蚀量大，可见石英次生加大边，N6 井，4 406.00 m。c. 颗粒间泥质充填，压实强度高，可见云母等塑性颗粒变形，P1 井，4 156.00 m；d. 泥质含量高，颗粒分选性差，P1 井，4 163.00 m；e、f. 颗粒间呈线接触，其间见大量钙质沉淀，N2 井，3 857.21 m。

图 8　平湖斜坡平湖组成岩相类型镜下岩矿特征

Fig.8　Rock and mineral characteristics of diagenetic facies types under microscope of Pinghu Formation in Pinghu slope

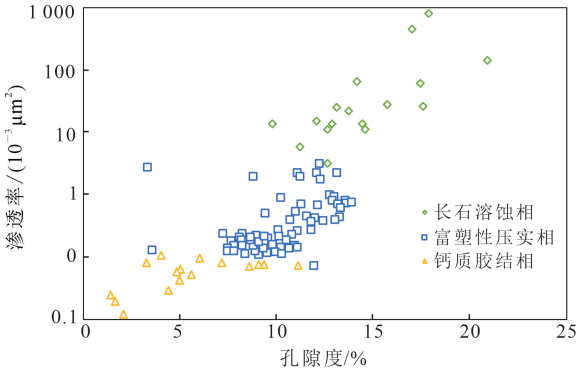


图9 平湖斜坡平湖组不同类型成岩相物性分布

Fig.9 Physical property distribution of different diagenetic facies types of Pinghu Formation in Pinghu slope

长石溶蚀相平均排驱压力为0.05 MPa(图10a),表明允许油气充注的动力较低;同时平均最大孔喉半径为15.8 μm(图10b),表明长石溶蚀相以大孔为主,易于油气的充注和运移。从压汞曲线上可以看出进汞曲线较陡,这也从侧面证明了溶蚀类型的次生孔隙发育并不集中于一个孔径区间内。

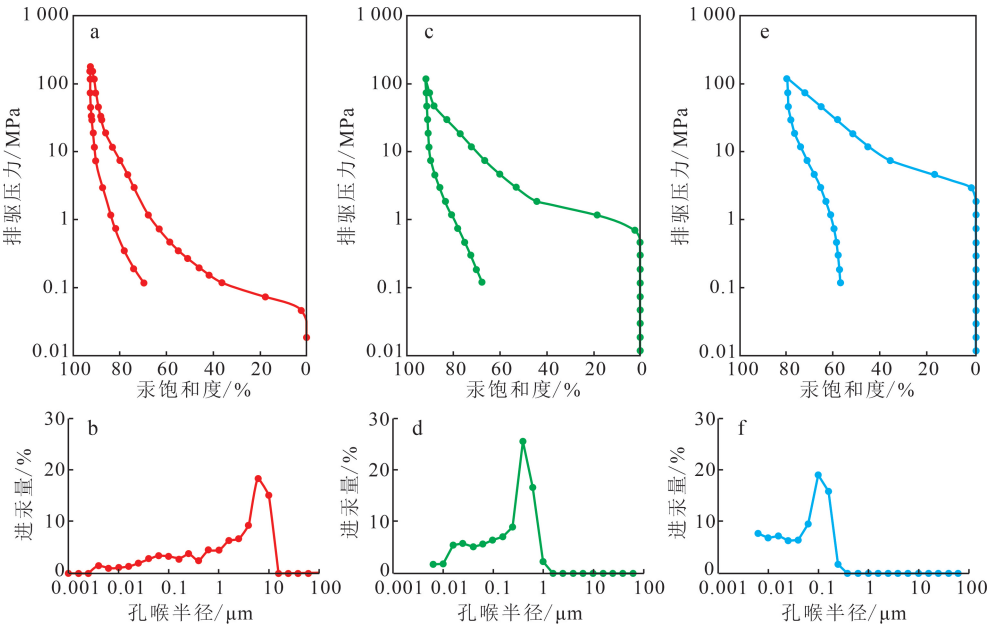
富塑性压实相平均排驱压力为0.74 MPa(图10c),表明油气能够进入储层的动力需求较高;同时平均最大孔喉半径为1.0 μm(图10d)。从压汞曲线上可以看出进汞曲线较平缓,也从侧面证明了富塑性压实相中压实作用对大孔径孔隙的破坏,仅有部分小孔径孔隙残余。

表2 平湖斜坡平湖组压汞参数与物性参数相关性系数统计表

Table 2 Mercury injection parameters and physical parameters correlation coefficient statistical table in Pinghu Formation, Pinghu slope

压汞参数	孔隙度		渗透率	
	相关关系方程	R^2	相关关系方程	R^2
最大连通孔喉半径	$y=2.01\ln x+9.96$	0.80	$y=0.77x^{1.32}$	0.84
平均孔喉半径	$y=2.04\ln x+12.30$	0.64	$y=2.17x^{1.47}$	0.81
中值孔喉半径	$y=1.52\ln x+13.74$	0.36	$y=7.66x^{0.88}$	0.38
排驱压力	$y=-1.69\ln x+9.02$	0.52	$y=0.21x^{-1.30}$	0.78
结构系数	$y=1.34\ln x+10.98$	0.37	$y=0.82x^{0.78}$	0.32
分选系数	$y=2.01\ln x+13.70$	0.79	$y=8.78x^{1.27}$	0.77

注:R 为相关系数。



a、b. 长石溶蚀相,N5井,4 183.50 m;c、d. 富塑性压实相,N4井,4 471.30 m;e、f. 钙质胶结相,T1井,4 219.90 m。

图10 平湖斜坡平湖组不同成岩相类型压汞曲线形态及孔径分布特征

Fig.10 Mercury intrusion curve shape and pore size distribution characteristics of different diagenetic facies types in Pinghu Formation, Pinghu slope

钙质胶结相平均排驱压力为 2.0 MPa（图 10e），表明油气能够进入储层的动力需求更为苛刻；同时平均最大孔喉半径为 0.4 μm（图 10f）。从压汞曲线上可以看出进汞曲线较平缓，说明受到钙质胶结作用的影响，孔隙空间基本被胶结物充填，成为基本不能进行油气充注的致密储层。

5.3　成岩相储集能力分类评价

通过上述分析首先划分了具有特色成岩作用类型的不同成岩相；进一步通过孔渗、压汞的分析发现，同一成岩相类型孔渗特征和孔隙结构特征均一，而不同成岩相之间物性差异显著。基于此，本文以孔隙度、渗透率以及压汞中与孔渗相关性最显著的最大连通孔喉半径为标准对三类成岩相进行量化参数分级评价（表 3）。通过量化参数的评价亦能凸显长石溶蚀相作为有利储层的优势。

5.4　长石溶蚀相是高孔渗带发育主要成岩相类型

通过渗透率随深度变化的关系（图 11a）可以看出，平湖斜坡平湖组储层在纵向上存在异常高的孔渗带，主要分布在 3 200～3600 m 和 4 000～4 400 m 两个深度范围内，后者更为显著。同时，从视溶蚀率与深度的对应关系（图 11b）可以看出，异常高孔渗带与溶蚀发育带具有良好的对应关系；说明溶蚀长石为异常高孔渗带提供了孔隙空间。另一方面，从溶蚀孔隙在整个孔隙空间的占比（图 11c）中可以看出，平湖斜坡平湖组储层以溶蚀孔隙为主，绝大部分占比超过 60%，而异常高孔渗带对应的溶蚀孔隙占比超过 80%；这进一步说明了有效储层的储集空间主要由溶蚀孔隙提供，也证明长石溶蚀相是高孔渗带发育主要成岩相类型。

然而，储层物性呈现强非均质性，这也表明储层发生溶蚀作用并不均衡，从成岩序列可以看出，塑性矿物的压实作用、碳酸盐矿物的胶结作用均早于长石的溶蚀作用，使得储层在成岩早期阶段致密化，后期的酸性流体难以进入其中溶蚀长石，造成了储层

表 3　平湖斜坡平湖组成岩相储集能力分级评价

Table 3　Grading evaluation of diagenetic facies reservoir capacity of Pinghu Formation in Pinghu slope

成岩相类型	孔隙度/%	渗透率/(10^{-3} μm²)	最大连通孔喉半径/μm	储层级别
长石溶蚀相	＞15	＞10.0	＞5.0	Ⅰ
富塑性压实相	6～15	0.1～10.0	0.2～5.0	Ⅱ
钙质胶结相	＜6	＜0.1	＜0.2	Ⅲ

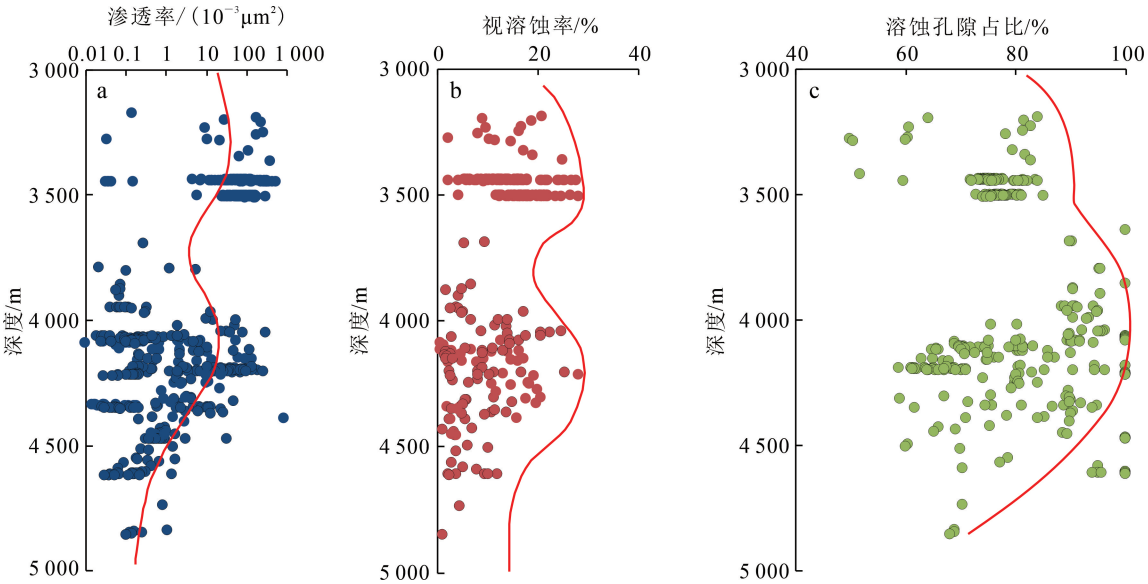


图 11　平湖斜坡平湖组储层渗透率（a）、视溶蚀率（b）、溶蚀孔隙占比（c）随深度变化趋势图

Fig.11　Trend plot of permeability (a), apparent dissolution rate (b), and percentage of dissolved pore space with depth (c) of Pinghu Formation in Pinghu slope

的差异成岩现象。由此可见,深部储层非均质性成因研究需要考虑成岩作用的差异化和时序性。

6 结论

1)东海盆地西湖凹陷平湖组沉积于受河流和潮汐双向水动力条件控制的三角洲-潮坪环境,砂体主要发育水下分流河道、河口坝、潮道、砂坪和混合坪中;砂岩以细粒、极细粒为主,岩石类型主要为长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩。

2)直观微区观测证明成岩作用主要包括压实、胶结和溶蚀,并基于成岩作用类型的强度差异将成岩相划分为3类,包括长石溶蚀相、富塑性压实相和钙质胶结相。

3)通过孔渗、压汞的分析发现,同一成岩相类型孔渗特征和孔隙结构特征均一,而不同成岩相之间物性差异显著。基于此点,本文以孔隙度、渗透率、最大连通孔喉半径为标准对3类成岩相进行量化参数分级评价,优选出长石溶蚀相为最为有利的储层砂体类型。

参考文献(References):

[1] 赵文智,胡素云,刘伟,等.论叠合含油气盆地多勘探"黄金带"及其意义[J].石油勘探与开发,2015,42(1):1-12.
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Liu Wei, et al. On Multi-Exploration 'Gold Belt' in Superimposed Petroliferous Basins and Its Significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(1):1-12.

[2] 康玉柱.再论塔里木盆地古生代油气勘探潜力:纪念沙参2井油气重大突破20周年[J].石油与天然气地质,2004,25(5):479-483.
Kang Yuzhu. Further Discussion on Paleozoic Oil and Gas Exploration Potential in Tarim Basin: Commemorating the 20th Anniversary of the Major Breakthrough of Oil and Gas in Shacan 2 Well[J]. Oil and Gas Geology, 2004,25(5):479-483.

[3] Bai H Q, Xie X J, Zhang G C, et al. Mechanism of Carbonate Cementation and Its Influence on Reservoir in Pinghu Formation of Xihu Sag[J]. Acta Oceanol Sin, 2023, 42(3): 65-75.

[4] 白国平,曹斌风.全球深层油气藏及其分布规律[J].石油与天然气地质,2014,35(1):19-25.
Bai Guoping, Cao Binfeng. Global Deep Oil and Gas Reservoirs and Their Distribution Law[J]. Oil and Gas Geology,2014,35(1):19-25.

[5] 贾承造,庞雄奇.深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J].石油学报,2015,36(12):1457-1469.
Jia Chengzao, Pang Xiongqi. Research Progress and Main Development Direction of Deep Oil and Gas Geology Theory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12):1457-1469.

[6] 操应长,远光辉,李晓艳,等.东营凹陷北带古近系中深层异常高孔带类型及特征[J].石油学报,2013,34(4):683-691.
Cao Yingchang, Yuan Guanghui, Li Xiaoyan, et al. Types and Characteristics of Anomalously High Porosity Zones in Paleogene Mid-Deep Buried Reservoirs in the Northern Slope, Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 683-691.

[7] 张凯逊,白国平,曹斌风,等.深层碎屑岩含油气储层发育特征[J].工程科学学报,2016,38(1):1-10.
Zhang Kaixun, Bai Guoping, Cao Binfeng, et al. Development Characteristics of Oil and Gas Reservoirs in Deep Clastic Rocks [J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(1): 1-10.

[8] 姜平,王珍珍,邹明生,等.文昌A凹陷珠海组砂岩碳酸盐胶结物发育特征及其对储层质量的影响[J].地球科学,2021,46(2):600-620.
Jiang Ping, Wang Zhenzhen, Zou Mingsheng, et al. Development Characteristics of Sandstone Carbonate Cements in Zhuhai Formation of Wenchang A Sag and Its Influence on Reservoir Quality[J]. Earth Science, 2021,46(2):600-620.

[9] 李耀华,徐兴友,张君峰,等.火山活动期断陷湖盆富有机质混积页岩形成条件:以松辽盆地南部梨树断陷沙河子组富有机质页岩为例[J].地球科学,2022,47(5):1728-1747.
Li Yaohua, Xu Xingyou, Zhang Junfeng, et al. The Formation Conditions of Organic-Rich Mixed Shale in Faulted Lake Basin During Volcanic Activity Period : Taking the Organic-Rich Shale of Shahezi Formation in Lishu Fault Depression in Southern Songliao Basin as an Example[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1728-1747.

[10] 周心怀,高顺莉,高伟中,等.东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J].中国石油勘探,2019,24(2):153-164.
Zhou Xinhuai, Gao Shunli, Gao Weizhong, et al. Formation and Distribution Prediction of Marine-Continental Transitional Lithologic Oil and Gas Reservoirs in Pingbei Slope Zone of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. China Petroleum

Exploration，2019，24(2)：153－164.

[11] 李居云，姜波，屈争辉，等.东海西湖凹陷构造演化及控煤作用[J].煤田地质与勘探，2016，44(5)：22－27.
Li Juyun，Jiang Bo，Qu Zhenghui，et al. Structural Evolution and Coal Control of Xihu Sag in East China Sea[J]. Coal Geology & Exploration，2016，44(5)：22－27.

[12] 季长军，伊海生，夏国清.图像分析技术在碎屑岩粒度分析中的应用[J].地质科技通报，2012，31(3)：122－127.
Ji Changjun，Yin Haisheng，Xia Guoqing. Application of Image Analysis Technology in Grain Size Analysis of Clastic Rock [J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2012，31(3)：122－127.

[13] 陈朝兵，赵振宇，付玲，等.鄂尔多斯盆地华庆地区延长组 6 段深水致密砂岩填隙物特征及对储层发育的影响[J].石油与天然气地质，2021，42(5)：1098－1111.
Chen Chaobing，Zhao Zhenyu，Fu Ling，et al. The Characteristics of Deep-Water Tight Sandstone Interstitials in the 6th Member of Yanchang Formation in Huaqing Area of Ordos Basin and Its Influence on Reservoir Development[J]. Oil and Gas Geology，2021，42(5)：1098－1111.

[14] 肖冬生，付强.鄂尔多斯盆地北部杭锦旗区块下石盒子组自生石英形成机制[J].岩石矿物学杂志，2011，30(1)：113－120.
Xiao Dongsheng，Fu Qiang. The Formation Mechanism of Authigenic Quartz of Xiashihezi Formation in Hangjinqi Block，Northern Ordos Basin [J]. Acta Petrologica et Mineralogica，2011，30(1)：113－120.

[15] 杨毅，王斌，曹自成，等.塔里木盆地顺托果勒低隆起北部中下奥陶统储层方解石脉成因及形成时间[J].地球科学，2021，46(6)：2246－2257.
Yang Yi，Wang Bin，Cao Zicheng，et al. The Genesis and Formation Time of Calcite Veins in the Middle-Lower Ordovician Reservoirs in the Northern Shuntuoguole Low Uplift，Tarim Basin[J]. Earth Science，2021，46(6)：2246－2257.

[16] 碎屑岩成岩阶段划分：SY/T 5477—2003[S].北京：石油工业出版社，2003.
Clastic Rock Diagenetic Stage Division：SY/T 5477—2003[S]. Beijing：Petroleum Industry Press，2003.

[17] 王亚，杨少春，路研，等.渤海湾盆地东营凹陷高青地区中生界低渗透碎屑岩有效储层特征及发育控制因素[J].石油与天然气地质，2019，40(2)：271－283.
Wang Ya，Yang Shaochun，Lu Yan，et al. Effective Reservoir Characteristics and Development Control Factors of Mesozoic Low Permeability Clastic Rocks in Gaoqing Area of Dongying Sag，Bohai Bay Basin [J]. Oil and Gas Geology，2019，40(2)：271－283.

[18] 丁晓琪，张哨楠.鄂尔多斯盆地西南缘中生界成岩作用及其对储层物性的影响[J].油气地质与采收率，2011，18(1)：18－22，112.
Ding Xiaoqi，Zhang Shaonan. Diagenesis of Mesozoic in the Southwestern Margin of Ordos Basin and Its Influence on Reservoir Physical Properties [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency，2011，18(1)：18－22，112.

[19] 曾溅辉，彭继林，邱楠生，等.砂-泥岩界面碳酸盐溶解-沉淀反应及其石油地质意义[J].天然气地球科学，2006，17(6)：760－764.
Zeng Jianhui，Peng Jilin，Qiu Nansheng，et al. Carbonate Dissolution-Precipitation Reaction at Sand-Mudstone Interface and Its Petroleum Geological Significance[J]. Natural Gas Geoscience，2006，17(6)：760－764.