



珠江口盆地砂岩疏松主控因素分析 ——以恩平凹陷 M 油田新近系韩江组地层为例

梁 卫¹, 闫正和¹, 谢明英¹, 陈一鸣¹, 闫百泉², 文慧俭²

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000;

2. 东北石油大学 三亚海洋油气研究院, 海南 三亚 572024

摘 要: 珠江口盆地恩平凹陷新近系浅层砂岩存在疏松现象, 开发过程中出砂问题严重, 为油田高效开采带来了很大的困难. 通过对恩平凹陷 M 油田韩江组地层的沉积成因、成岩作用及油气充注期次的研究, 揭示了砂岩疏松的主要控制因素, 为后续根据属性情况进行井位调整等生产措施奠定了基础. 研究表明, 韩江组砂岩疏松的控因有 3 方面: 一是研究区韩江组属于三角洲前缘沉积环境, 粒度细, 泥质含量高, 不利于胶结成岩; 二是成岩程度弱, 属于早成岩 A 期, 胶结程度弱; 三是油气充注严重抑制了成岩作用.

关键词: 珠江口盆地; 恩平凹陷; 韩江组; 疏松砂岩; 成岩作用

MAIN CONTROLLING FACTORS OF UNCONSOLIDATED SANDSTONE IN PEARL RIVER MOUTH BASIN: A Case Study of Neogene Hanjiang Formation in M Oilfield of Enping Sag

LIANG Wei¹, YAN Zheng-he¹, XIE Ming-ying¹, CHEN Yi-ming¹, YAN Bai-quan², WEN Hui-jian²

1. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong Province, China;

2. Sanya Offshore Oil and Gas Research Institute, Northeast Petroleum University, Sanya 572024, Hainan Province, China

Abstract: The unconsolidated Neogene shallow sandstone in Enping Sag of Pearl River Mouth Basin causes severe sand production in the development process and brings great difficulties to the efficient exploitation of oil fields. Through the study of sedimentary origin, diagenesis and oil-gas charging period of Hanjiang Formation in M Oilfield of Enping Sag, the paper reveals the main controlling factors of unconsolidated sandstone, which lays a foundation for subsequent production measures such as well location adjustment according to attributes. The results show that there are three controlling factors contributed to the unconsolidated sandstone as follows: 1) Hanjiang Formation in the study area is of delta front sedimentary environment with fine grain size and high mud content, which is not conducive to cementation; 2) the diagenetic degree is low, belonging to stage A of early diagenesis, with poor cementation; and 3) the diagenesis is severely inhibited by oil-gas charging.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Enping Sag; Hanjiang Formation; unconsolidated sandstone; diagenesis

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2022-01-21. 编辑: 黄欣.

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于密集取心井构型分析及砂体匹配模式控剩余油模拟”(41772149); 中海石油(中国)有限公司重大课题“南海东部油田上产 2000 万吨关键技术研究”(CNOOC-KJ135ZDXM375Z03SZ).

作者简介: 梁卫(1967—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事油气田开发研究与管理, 通信地址 广东省深圳市南山区滨海路 3168 号, E-mail//liangw@cnooc.com.cn

通信作者: 闫百泉(1971—), 男, 教授, 主要从事储层沉积及油气田开发地质研究, 通信地址 海南省三亚市崖州区东北石油大学三亚海洋油气研究院, E-mail//yqbhht@163.com

0 前言

珠江口盆地新近系浅层砂岩存在疏松现象,恩平 M 油田韩江组地层尤为突出,油井出砂严重,损害井下设备,严重影响油田产量.疏松砂岩油气藏开采难度较大,在工程上研究较多,集中于防砂措施研究,如砾石充填防砂、化学防砂、压裂防砂等^[1-8].对于造成砂岩疏松的主要控因的研究较少.在工程地质领域,研究人员在野外剖面勘查基础上,通过室内颗粒分析实验、扫描电镜分析等方法,识别疏松砂岩的风成成因和水成成因^[9-11].在石油天然气领域,对低渗储层、致密储层成因分析较多,并总结出砂岩致密控因受沉积环境、成岩作用及油气充注与成岩作用的耦合关系影响^[12-13].参照致密储层的研究方法,本次研究分析了研究区韩江组疏松砂岩段沉积环境及沉积区,基于岩心、测井及微观资料,分析了成岩作用的各项指标参数,厘定了成岩阶段;参考研究区源岩生排烃史资料,结合本区目的层成岩演化分析结果及孔隙演化模型分析,分析了有机酸流体对矿物和胶结物的溶蚀作用,及油气充注与成岩作用的耦合关系,最终总结了 M 油田韩江组砂岩疏松的主要控制因素.

1 地质概况

珠江口盆地为中生代大陆边缘裂陷型盆地,盆地的形成、演化与太平洋板块向欧亚板块的俯冲碰撞、印度板块与欧亚板块的碰撞及南海扩张有关.珠江口盆地由北向南可划分为北部隆起带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带 5 个构造单元.恩平凹陷位于北部拗陷带珠 I 拗陷西缘,其东西分别为西江凹陷与阳江凹陷,南北分别与番禺低隆起及海南隆起相邻.凹陷总体走向为北西向,总面积约 5 000 km²,其东西分别为西江凹陷与阳江凹陷,南北与东沙隆起及海南 2 隆起相邻.该地区水深 80~100 m.恩平 M 油田位于 3 洼南部构造斜坡带,沉积环境为古珠江三角洲前缘相带,新生代自下而上发育有文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组及第四系等沉积地层(图 1).韩江组是该区的主要含油层系,是一套以水下分流河道-河口坝为主的三角洲前缘沉积体系^[14-24].

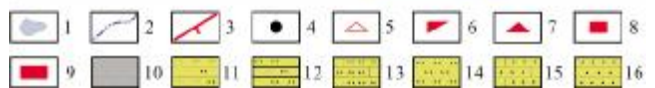
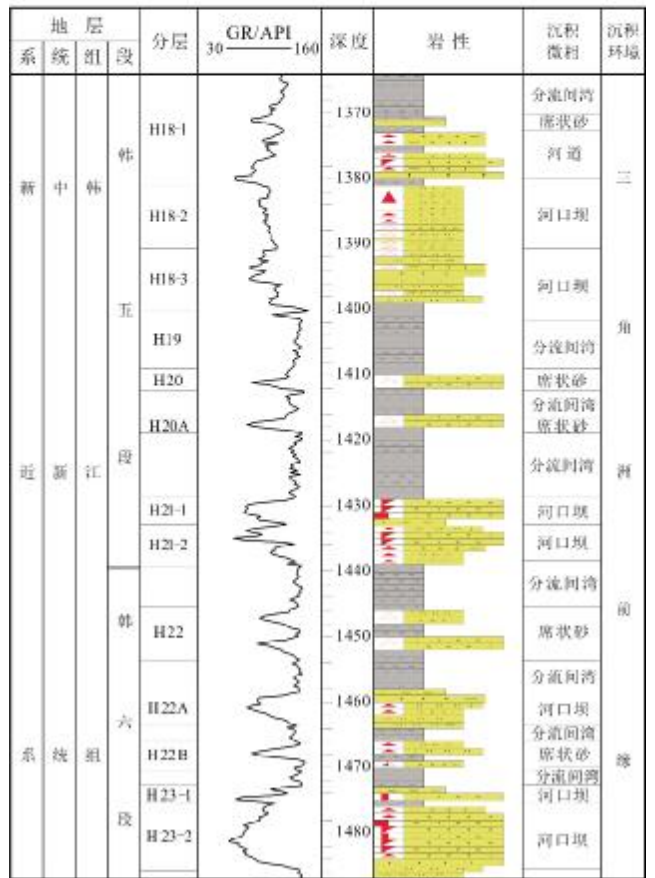
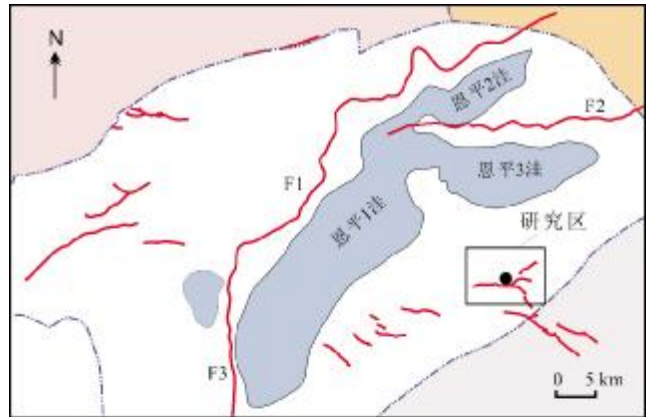


图 1 恩平凹陷构造位置及综合柱状图

Fig. 1 Tectonic location and stratigraphic column of Enping Sag
 1—洼陷(subsag); 2—洼陷边界(boundary of subsag); 3—断层(fault); 4—钻井(borehole); 5—荧光(fluorescence); 6—富含油(organic rich); 7—油斑(oil patch); 8—油浸(oil immersed); 9—饱含油(oil saturated); 10—泥岩(mudstone); 11—粉砂质泥岩(silty mudstone); 12—泥质粉砂岩(argillaceous siltstone); 13—钙质粉砂岩(calcareous siltstone); 14—粉砂岩(siltstone); 15—钙质细砂岩(calcareous fine sandstone); 16—细砂岩(fine sandstone)

2 疏松砂岩储层特征

2.1 岩矿特征

研究区3口取心井岩矿分析表明,韩江组岩石类型主要为石英砂岩、岩屑石英砂岩、长石石英砂岩和长石岩屑石英砂岩。碎屑颗粒的成分以石英为主,平均含量80.55%,且以单晶石英为主;长石以钾长石为主,含少量斜长石;岩屑以火山岩为主,其次是生物碎屑、海绿石、云母、变质岩,少量沉积岩(图2)。上述特征说明砂岩搬运距离远,成熟度高。

韩江组砂岩碎屑颗粒以次棱角—次圆状为主,磨圆较好,分选中—好,颗粒之间呈点接触,部分颗粒未一点接触(图3a—d,表1)。填隙物的成分以杂基为主(表1),占填隙物的91.67%,胶结物少,说明沉积时期水动力较弱。胶结物以黏土矿物为主,其次为碳酸盐矿物、含铁碳酸盐矿物、海绿石(图3e—i)。胶结类型以孔隙式胶结、基底胶结为主,表明成岩期胶结程度弱(图3j—l)。

2.2 粒度特征

研究区岩心粒度分析结果表明,恩平M油田韩江组储层岩性主要为细—中粒长石石英砂岩,以细砂岩为主。搬运方式为悬浮—跳跃。跳跃组分集中在 $2 < \phi \leq 3$,含量64.1%,为细砂, C 值0.31 mm, M 值0.16 mm;悬浮组分集 $\phi > 3$,含量约90%,为粉砂和泥, C 值0.16 mm, M 值0.06 mm。跳跃组分集中在 $1 < \phi \leq 3$,含量81.35%,为中砂—细砂, C 值0.48 mm, M 值0.23 mm;悬浮组分集 $\phi > 3$,含量29.39%,为粉砂

和泥。储集层颗粒总量约占岩石的72.6%。粒度特征显示,韩江组总体粒度细,分选性好,结构成熟度较好(表1)。

2.3 孔隙类型及结构特征

压汞分析表明,储层排驱压力较小,平均为0.07 MPa,最大孔喉半径32.35 μm ,平均孔喉半径3.48 μm 。主要流动孔喉半径较大,平均为16.55 μm 。样品岩石铸体薄片鉴定与扫描电镜分析表明,韩江组孔隙类型主要为粒间孔,少量的粒内溶孔、杂基微孔,见生屑内孔、粒间溶孔;面孔率为4%~33%,平均面孔率为17.7%;储层孔隙较发育,粒间孔分布较均,孔隙连通性较好,颗粒间以孔隙式胶结为主。数据表明压实程度弱,成岩程度弱,同时存在着大量的溶蚀作用,说明曾经有大量的有机酸充注。

2.4 物性特征

根据恩平M油田韩江组274块岩心分析结果,孔隙度19.1%~36.6%,主要分布在20%~28%之间;渗透率主要分布在10~1 000 mD之间。测井解释单层平均有效孔隙度19.7%~30.6%,中值24.9%,渗透率6.2~701.2 mD,中值148.5 mD,属于中孔、中渗油藏。15个油层厚度2.0~14.9 m,平均油层有效厚度0.8~4.4 m。储层物性较好,泥质含量较高,各油层平均2.6%~31.4%,全油田平均泥质含量17.2%。层内夹层发育,非均质程度较高。

综合岩性、沉积构造、成分及测井特征分析表明,研究区韩江组沉积时期属于三角洲前缘亚相环境,粒

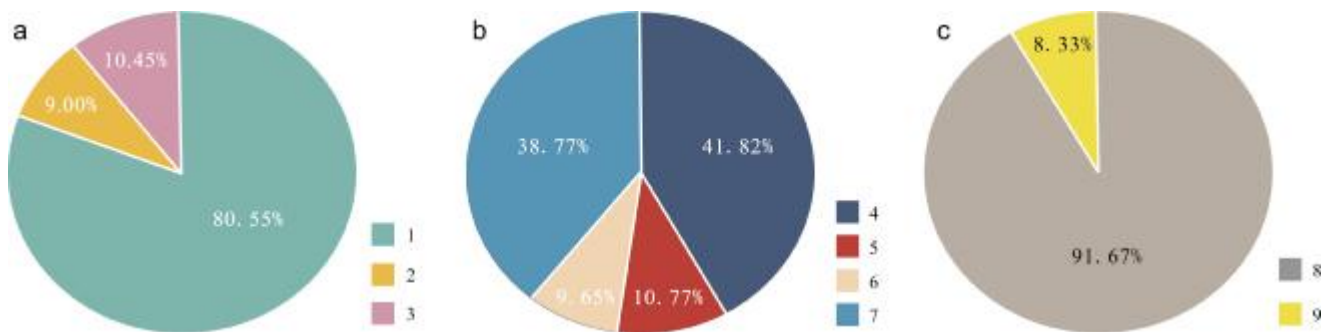


图2 韩江组砂岩成分特征

Fig. 2 Composition of sandstone in Hanjiang Formation

a—碎屑颗粒成分 (clastic particle composition); b—岩屑成分 (debris composition); c—填隙物成分 (interstitial composition); 1—石英 (quartz); 2—长石 (feldspar); 3—岩屑 (debris); 4—火成岩 (igneous rock); 5—变质岩 (metamorphic rock); 6—沉积岩 (sedimentary rock); 7—其他 (other rocks); 8—杂基 (matrix); 9—胶结物/自生矿物 (cement/authigenic mineral)

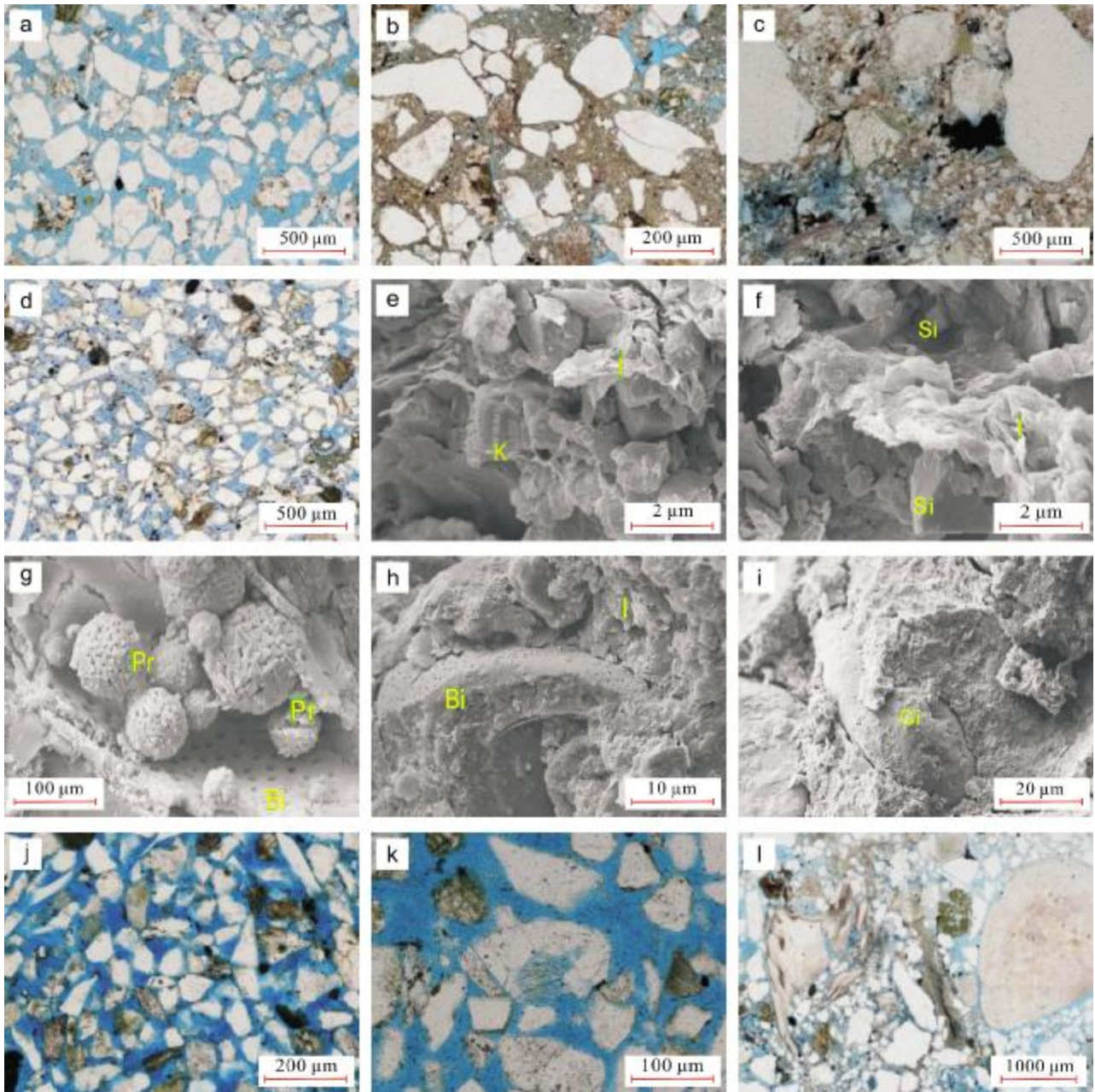


图3 韩江组岩矿镜下特征

Fig. 3 Microphotographs showing the rock and mineral characteristics of Hanjiang Formation

a—碎屑颗粒孔隙发育(pores well developed in clastic particles); b—碎屑颗粒孔隙发育较差(pores poorly developed in clastic particles); c—泥质杂基(argillaceous matrix); d—碎屑颗粒分选较好(well sorted clastic particles); e—蠕虫状高岭石以及蜷曲片状伊利石(worm-like kaolinite and curly sheet illite); f—菱铁矿以泥晶碳酸盐矿物的形式产出(siderite occurred in the form of micritic carbonate minerals); g—球状黄铁矿充填生屑体腔(bioclastic cavity filled with spherical pyrite); h—伊利石充填生物碎屑(bioclast filled with illite); i—椭球状海绿石以嵌晶形式充填粒间孔隙(intergranular pores filled with ellipsoidal glauconite as embedded crystals); j—粒间溶孔(intergranular dissolved pore); k—长石溶解形成长石粒内溶孔(feldspar intragranular dissolved pore formed by feldspar dissolution); l—大量生物碎屑(massive bioclasts); Bi—生屑颗粒(bioclastic particle); Gi—海绿石(glauconite); Si—菱铁矿(siderite); Pr—黄铁矿(pyrite); K—高岭石(kaolinite); I—伊利石(illite)

度细,泥质含量高.在相同的成岩环境条件下,该岩相砂岩成岩程度要弱于河流相或者海相砂岩.

3 储层疏松主控因素分析

储层的物性主要受沉积、成岩和流体充注的影响

表1 韩江组矿物组分及结构特征

Table 1 Mineral compositions and structural characteristics of Hanjiang Formation

样品号	石英/%	钾长石/%	斜长石/%	黏土矿物/%	其他/%	杂基/%	成分成熟度/%	接触方式	胶结类型	分选	磨圆	粒径/mm
1-03A	60	12	11	17	0	4	72	点	孔隙	中	次圆—次棱	0.067
1-09A	61	20	6	13	0	5	70	点	孔隙	好—中	次棱—次圆	0.125
1-15A	40	27	12	19	2	7	51	点	孔隙	好—中	次棱—次圆	0.165
1-16A	61	19	6	12	2	11	71	点	孔隙	中	次棱—次圆	0.186
1-17A	56	13	7	24	0	9	74	点	孔隙	较好	次圆—次棱	0.075
2-10A	53	9	9	29	0	1	75	点—未	镶嵌	中	次棱—次圆	0.135
2-14A	45	7	14	34	0	4	68	点	孔隙	差—中	次棱—次圆	0.112
2-18A	51	9	8	30	2	5	75	点	孔隙	中	次圆—次棱	0.156
3-06A	67	12	4	17	0	3	81	点	孔隙	中	次圆—次棱	0.130
3-11A	60	19	3	18	0	2.5	73	点	孔隙	好	次圆	0.114
3-14A	54	16	7	23	0	4	70	点	孔隙	好	次棱—次圆	0.202
3-18A	66	10	10	14	0	5	77	点	孔隙	好	次棱—次圆	0.198
3-23A	60	11	9	20	0	2	75	点	孔隙	中	次棱—次圆	0.202
3-26A	62	14	10	14	0	14	72	点	孔隙	中	次棱—次圆	0.091
4-01A	54	14	11	19	2	1	68	点	孔隙	中	次棱—次圆	0.112
4-06A	66	11	9	14	0	3	77	点	孔隙	好—中	次圆	0.240
5-06A	67	8	11	12	2	1.5	78	点	孔隙	中	次圆—次棱	0.158
5-12A	68	13	13	6	0	6	72	点	孔隙	中	次圆—次棱	0.274
5-17A	71	9	8	12	0	4.5	81	点	孔隙	好	次圆	0.189
5-20A	54	12	13	17	4	10	68	点	孔隙	中—好	次棱—次圆	0.226
6-05A	65	16	5	13	1	4	76	点	镶嵌	中	次棱—次圆	0.253
6-07A	61	19	9	11	0	5	69	点	孔隙	中	次棱—次圆	0.156
6-09A	65	16	6	13	0	3.5	75	点	孔隙	中—好	次圆	0.145
7-01A	70	14	7	9	0	4	77	点—未	镶嵌	差	次圆—次棱	0.369
7-05A	71	10	7	12	0	5	81	点	孔隙型	好	次圆	0.265
7-11A	70	13	7	10	0	5	78	点	镶嵌	中—好	次圆	0.263

比较大,本次针对研究区韩江组储层疏松的特征从上述几个方面开展讨论,厘定其疏松的主控因素。

3.1 沉积作用

沉积作用是储层物性的先天控制因素,因为沉积环境能量决定了沉积物的成分成熟度和结构成熟度,进而控制了储层的原始物性。本次主要讨论韩江组储层的

沉积环境及该环境下沉积物特征对储层疏松性的影响。

取心井韩江组泥岩段普遍为暗色含菱铁矿结核具水平波状层理的泥岩,菱铁矿结核沿着层面分布;含油砂岩疏松性强,见大量的生物扰动构造;生物碎屑较多,镜下可见浮游有孔虫、珊瑚等水下生物,并保留体腔孔(图4)。取心井层段反韵律特征明显,测井主要表现

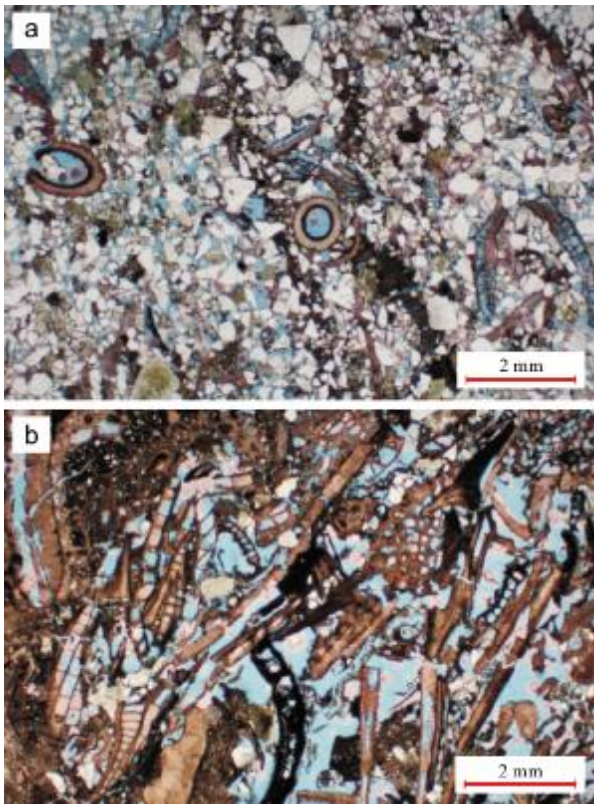


图4 韩江组砂岩镜下生物特征

Fig. 4 Microphotographs showing the biological characteristics of sandstone from Hanjiang Formation

a—有孔虫腔体(foraminifera cavity); b—珊瑚碎屑(coral elastic)

为漏斗状,即具有典型的水下砂坝沉积特点(图5a);指状测井形态,岩心上为粉砂岩,具有扰动构造的水下席状砂微相特征发育(图5b);分流间湾泥岩测井曲线平直,岩心上水平层理发育,颜色为灰黑色(图5c).上述特征反映了该区韩江组沉积时期水下弱水动力环境特点,结合前人研究成果,该时期应为三角洲前缘亚相.水下分流河道局部发育,储层以河口砂坝、远砂坝沉积为主.结合成分成熟度和结构成熟度研究结果,该环境下形成的以细砂岩为主的储层,由于泥质含量比较高,在成岩过程中,泥质胶结使颗粒之间连接程度弱,一定程度上降低了成岩强度.

沉积成因影响了砂岩的胶结程度,韩江组属于三角洲前缘亚相沉积区位,成分成熟度高,粒度细,杂基含量低.在成岩过程中,胶结程度弱.实验数据分析表明,杂基和石英含量是控制岩石疏松的主要因素.杂基含量高、石英含量低的岩心粉末化程度低;杂基含量低、石英含量高的岩心,疏松粉末化明显(图6).

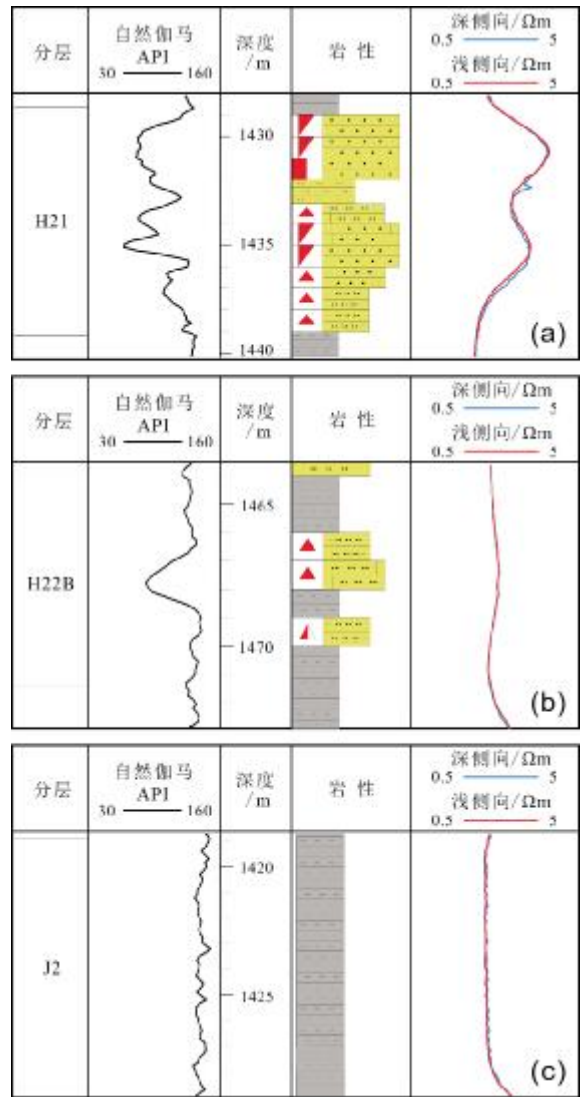


图5 韩江组测井特征

Fig. 5 Logging characteristics of Hanjiang Formation
a—河口坝(mouth bar); b—席状砂(sheet sand); c—分流间湾(interdistributary bay)

3.2 成岩作用

成岩作用是储层疏松或致密的重要控制因素,镜下薄片和扫描电镜等分析表明,恩平M油田韩江组储层疏松与其成岩程度较弱有直接关系.压实作用和胶结作用都比较弱,同时溶蚀作用加剧了储层的疏松性.

铸体薄片分析显示,韩江组压实作用程度较弱,颗粒之间呈点接触、未-点接触,杂基含量高,也减弱了压实作用的强度.

韩江组泥质基质中杂基含量非常高,达到了90%以上,胶结物仅占8.33%,总体胶结程度弱.胶结矿物包括碳酸盐矿物、含铁碳酸盐矿物、海绿石及各类黏土

矿物. 黏土矿物类型多样, 包括伊蒙混层矿物、伊利石、高岭石及绿泥石(图 7). 泥质胶结是主要的胶结类型, 胶结强度很弱. 交代作用不太发育. 溶解作用普遍

发育, 包括颗粒溶解、胶结物溶解、杂基溶解等. 上述特征表明韩江组成岩程度弱.

3.3 成岩阶段

伊蒙混层矿物(I/S)中的蒙脱石(S)的比例是重要的成岩阶段划分标志, 恩平 M 油田韩江组 I/S 中的 S 的比例为 50%~80%, 大于 70%的占 55%, 70%的界限大概在深度 1 390 m 左右. 黏土矿物类型包括伊蒙混层、伊利石、高岭石及绿泥石黏土矿物. 各种黏土矿物含量相近, 高岭石最高, 绿泥石含量最低. 扫描电镜下, 伊利石比较明显, 高岭石次之. 其他自生矿物以菱铁矿和黄铁矿为主, 此外还含有铁方解石和铁白云石矿物(出现在深度 1 380 m 以下). 上述特征表明, 1 390 m 深度以上部分成岩程度较弱(表 2).

参照中国石油天然气碎屑岩成岩阶段划分标准, 根据孔隙类型及成岩标志的特征, 将恩平油田韩江组成岩作用阶段划分为两个阶段: 早成岩 A 期和早成岩 B 期. 深度界限为 1 390 m, 以上为早成岩阶段 A 期, 以下为早成岩 B 期(表 2).

3.4 成岩演化序列

根据微观薄片、黏土矿物 X 衍射分析以及扫描电镜自生矿物观察, 对韩江组主要成岩作用特征及形成条件进行了分析, 得出成岩演化序列: 碎屑黏土衬边—早期碳酸盐胶结—大量有机酸侵入—长石岩屑颗粒及早期碳酸盐胶结物溶蚀—高岭石及石英次生加大—烃类侵位—方解石重结晶—铁方解石、铁白云石.

3.5 孔隙演化模型

在各种成岩作用的先后顺序及其与孔隙度演化关系分析的基础上, 建立了韩江组孔隙度演化模型(图 8). 压实-孔隙度演化曲线, 反映了刚性颗粒组成岩石在不发生溶蚀、烃类侵位等作用下的孔隙度演化特征. 刚性颗粒恢复演化曲线, 反映出分选好、杂基含量少的砂岩在溶蚀、烃类侵位等因素作用下孔隙度演化特征.

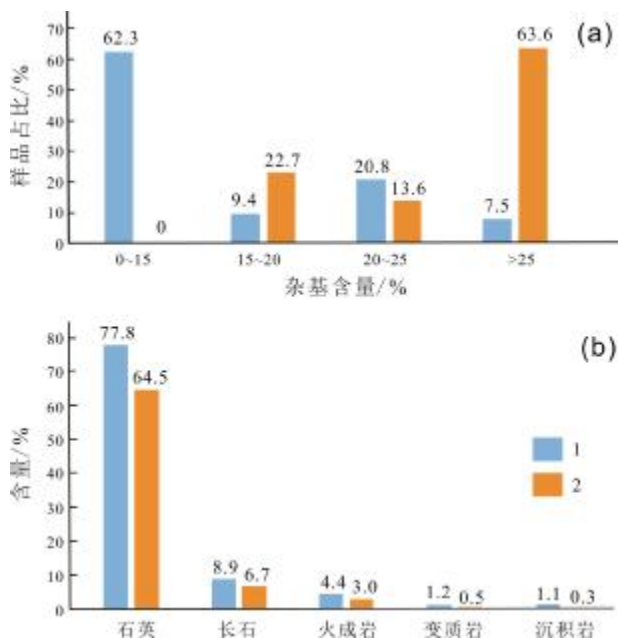


图 6 疏松砂岩与非疏松砂岩碎屑物对比

Fig. 6 Comparison of detrital materials between unconsolidated sandstone and normal sandstone

a—杂基含量对比 (comparison of matrix content); b—碎屑成分对比 (comparison of detrital materials); 1—疏松砂岩 (unconsolidated sand); 2—正常砂岩 (normal sandstone)

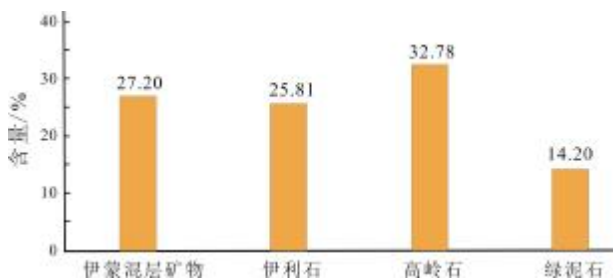


图 7 黏土矿物类型及比例

Fig. 7 Types and proportions of clay minerals

表 2 恩平凹陷 M 油田韩江组储层成岩标志特征

Table 2 Diagenetic markers of Hanjiang Formation reservoir in M Oilfield, Enping Sag

时期	R _v /%	成熟带	蒙脱石/%	混层类型	固结程度	伊蒙混层	高岭石	伊利石	绿泥石	石英加大	菱铁矿	方解石	铁方解石	铁白云石	长石及岩屑	孔隙类型	深度/m
早成岩 A	0.35	未成熟	70	蒙皂石带	弱固结	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	原生孔	1331~1390
早成岩 B	0.5	半成熟	50~70	无序混带	半固结	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	混合孔	1390~1505

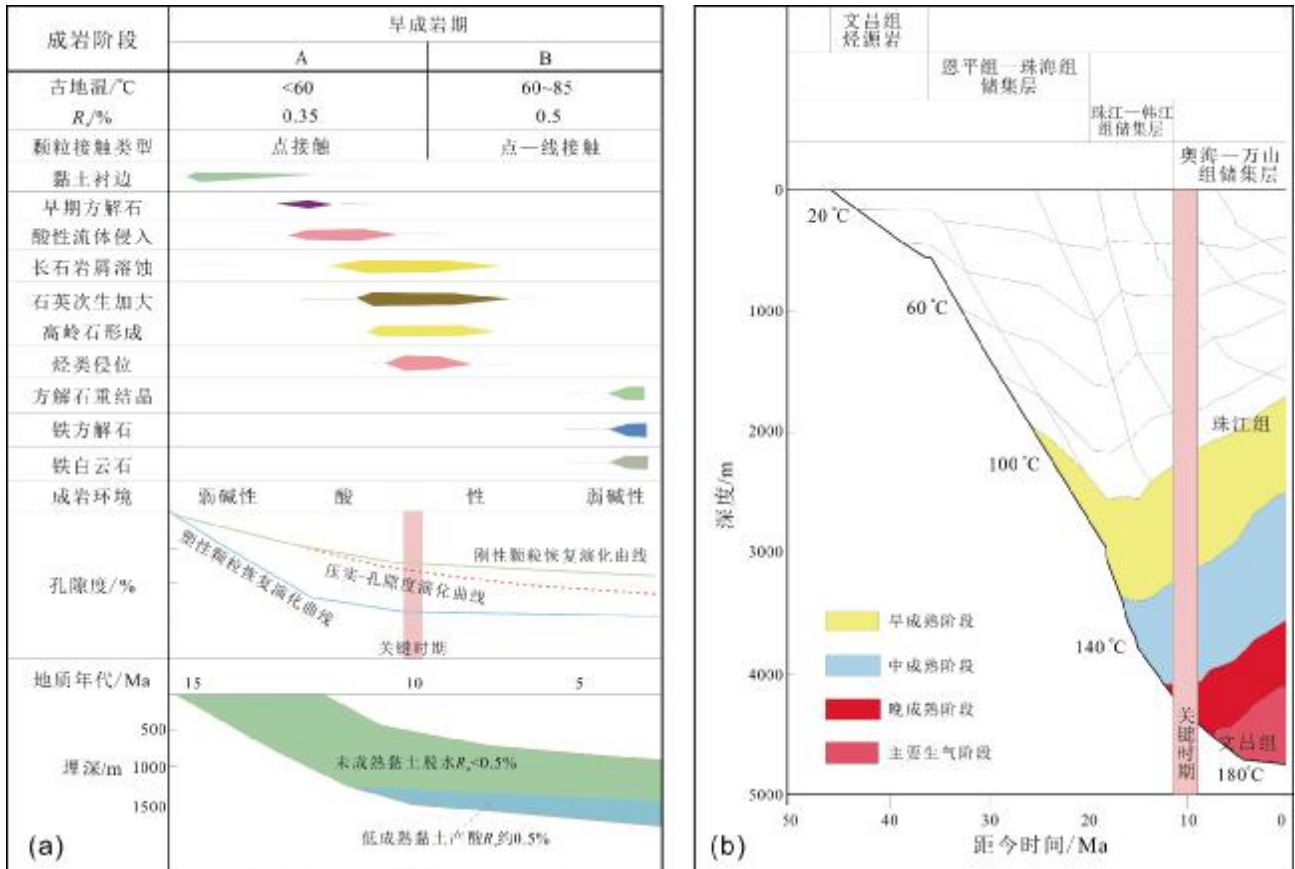


图8 韩江组成岩序列与孔隙演化模式

Fig. 8 Diagenetic sequence and pore evolution model of Hanjiang Formation

a—成岩序列与孔隙演化模式(diagenetic sequence and pore evolution model); b—恩平凹陷埋藏史与生烃演化(据文献[23]修改)(burial history and hydrocarbon-generation evolution of Enping Sag, modified from Reference [23])

塑性颗粒演化曲线,反映了杂基含量较高的砂岩在溶蚀及烃类侵位等因素作用下的孔隙度演化特征.孔隙度演化模型揭示,该区韩江组以原生孔隙为主,烃类侵位作用比较明显,成岩程度弱.

3.6 成岩演化序列与油气充注的耦合关系

文昌组是该区韩江组油藏的主要源岩,在14 Ma左右产生大量有机酸流体,溶蚀长石、岩屑颗粒及早期碳酸盐胶结物.在10 Ma左右进入生烃门限,大量排烃,烃类侵位抑制后期胶结作用保护孔隙,同时有机酸介入,发生了溶蚀作用,进一步抑制了成岩作用,是砂岩疏松的主要控制因素^[19].

4 结论

通过对研究区韩江组砂岩沉积环境、成岩作用及油气充注等因素分析,厘定了砂岩疏松的主控因素.

1) 珠江口盆地恩平 M 油田韩江组时期沉积环境对砂岩的疏松具有一定的影响,主要表现在研究区韩江组处于三角洲前缘亚相区,磨圆以次棱一次圆为主,分选中等到好,颗粒支撑,多呈点接触.总体成分成熟度和结构成熟度较高,埋深较浅,一定程度上减弱了成岩作用程度.

2) 恩平 M 油田韩江组以点接触孔隙式胶结原生粒间孔为主,胶结物含量低,成岩处于早成岩 A 期层段,且存在大量溶蚀,即各项成岩指标都比较弱,致使砂岩比较疏松.

3) 10 Ma 时期的油气大量充注也是本区韩江组砂岩疏松的主控因素.烃类充注站增加抗压实能力,减弱了胶结作用,增强了溶蚀作用.14 Ma 左右产生大量有机酸流体,溶蚀长石、岩屑颗粒及早期碳酸盐胶结物,进一步抑制了成岩作用.

参考文献(References):

- [1]田波,魏裕森,汪红霖,等.南海东部疏松砂岩油藏防砂历程研究及展望[J].石油化工应用,2021,40(2):1-5.
Tian B, Wei Y S, Wang H L, et al. Research and prospect of sand control history of unconsolidated sandstone reservoir in eastern South China Sea[J]. Petrochemical Industry Application, 2021, 40(2): 1-5.
- [2]罗宪波,李金宜,何逸凡,等.海上疏松砂岩油藏水驱油效率影响因素研究及应用——以NNX油田为例[J].石油地质与工程,2021,35(1):61-65.
Luo X B, Li J Y, He Y F, et al. Influencing factors of water flooding efficiency in offshore unconsolidated sandstone reservoir and its application: By taking NNX oilfield as an example [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(1): 61-65.
- [3]赵博,苏亚中,丛巍,等.疏松砂岩油气藏出砂风险及机理离散元分析[J].中国安全生产科学技术,2020,16(11):59-65.
Zhao B, Su Y Z, Cong W, et al. Discrete element analysis on sand production risk and mechanism in unconsolidated sandstone oil and gas reservoir[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(11): 59-65.
- [4]温晓杰.海上油田疏松砂岩稠油水平井出砂因素和治理研究[J].石化技术,2020,27(11):130-131.
Wen X J. Study on sand production factors and treatment of horizontal wells with loose sandstone heavy oil in offshore oilfield[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(11): 130-131.
- [5]张运来,张吉磊,周焱斌,等.海上疏松砂岩油藏高含水期水驱开发规律研究[J].石油化工高等学校学报,2020,33(5):30-35.
Zhang Y L, Zhang J L, Zhou Y B, et al. Study on the development law of water flooding in offshore loose sandstone reservoir at high water cut stage [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2020, 33(5): 30-35.
- [6]李进,张晓诚,韩耀图,等.疏松砂岩储层出砂风险综合预测新方法及其应用[J].大庆石油地质与开发,2021,40(2):87-94.
Li J, Zhang X C, Han Y T, et al. New method to comprehensively predict the sand production risk for unconsolidated sandstone reservoirs and its application [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(2): 87-94.
- [7]张启龙,陈彬,袁伟伟,等.海上疏松砂岩防砂设计方法的研究与应用[J].中外能源,2020,25(8):28-33.
Zhang Q L, Chen B, Yuan W W, et al. Research and application of design method for sand control in offshore loose sandstone oilfield [J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(8): 28-33.
- [8]谢明英,刘伟新,戴宗,等.海相强水驱疏松砂岩稠油薄油藏高效开发实践[J].中外能源,2019,24(6):54-59.
Xie M Y, Liu W X, Dai Z, et al. Practice of efficient development in marine strong-water flooding loose sandstone heavy oil thin reservoirs [J]. Sino-Global Energy, 2019, 24(6): 54-59.
- [9]刘高,魏蒙恩,谢裕江,等.甘肃新近系疏松砂岩成因[J].地质论评,2015,61(1):139-148.
Liu G, Wei M E, Xie Y J, et al. Genetic analysis of the neogene unconsolidated sandstone in Gansu, Northwest China [J]. Geological Review, 2015, 61(1): 139-148.
- [10]谢裕江,刘高,李高勇.甘肃兰州黄河北岸疏松砂岩成因[J].现代地质,2012,26(4):705-711.
Xie Y J, Liu G, Li G Y. Genesis of the unconsolidated sandstones in the north side of the Yellow River in Lanzhou, Gansu [J]. Geoscience, 2012, 26(4): 705-711.
- [11]顾端阳,窦文博,丁富寿,等.疏松砂岩气藏低阻气层成因及识别研究——以柴达木盆地涩北气田为例[J].物探与化探,2020,44(3):649-655.
Gu D Y, Dou W B, Ding F S, et al. Research on the genesis and identification of low resistivity gas reservoirs in unconsolidated sandstone gas reservoirs: A case study of the Sebei Gas Field, Qaidam Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 649-655.
- [12]邓孝亮,杨希冰,尤丽,等.北部湾盆地涠西南凹陷始新统流沙港组一段低渗储层特征及控制因素[J].石油实验地质,2021,43(4):628-637.
Deng X L, Yang X B, You L, et al. Characteristics and constrains of low-permeability reservoirs in the first member of Eocene Liushagang Formation, Weixinan Sag, Beibuwan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(4): 628-637.
- [13]朱明,张向涛,杨兴业,等.珠江口盆地惠南半地堑恩平组烃类充注特征与砂岩致密化成因分析[J].中国海上油气,2018,30(6):14-24.
Zhu M, Zhang X T, Yang X Y, et al. Hydrocarbon charging characteristics and sandstone densification genesis of Enping Formation in Huinan half-graben, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(6): 14-24.
- [14]傅宁,丁放,何仕斌,等.珠江口盆地恩平凹陷烃源岩评价及油气成藏特征分析[J].中国海上油气,2007,19(5):295-299,305.
Fu N, Ding F, He S B, et al. Source rocks evaluation and reservoir characteristics analysis in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(5): 295-299, 305.
- [15]龙更生,施和生,郑荣才,等.珠江口盆地惠州凹陷深部古近系储层特征及发育控制因素[J].海相油气地质,2011,16(3):71-78.
Long G S, Shi H S, Zheng R C, et al. Characteristics and development controlling factors of Paleogene deep reservoirs in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(3): 71-78.
- [16]刘振宇.惠州凹陷恩平组烃源岩发育与沉积相关系[D].北京:中国地质大学,2020.
Liu Z Y. Relationship between source rocks and sedimentary facies of Enping Formation in Huizhou Sag [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.

- [17]刘强虎,朱红涛,舒誉,等.珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制[J].石油学报,2015,36(3):286-299.
Liu Q H, Zhu H T, Shu Y, et al. Provenance systems and their control on the beach-bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 286-299.
- [18]葛家旺,朱筱敏,吴陈冰洁,等.辫状河三角洲沉积特征及成因差异——以珠江口盆地陆丰凹陷恩平组为例[J].石油学报,2019,40(S1):139-152.
Ge J W, Zhu X M, Wu C B J, et al. Sedimentary characteristics and genetic difference of braided delta: A case study of Enping Formation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 139-152.
- [19]许新明,刘丽华,陈胜红,等.珠江口盆地恩平凹陷新近系油气成藏主控因素分析[J].地质科技情报,2015,34(1):100-106.
Xu X M, Liu L H, Chen S H, et al. Analysis of the main control factors on Neogene hydrocarbon accumulation in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(1): 100-106.
- [20]刘方圆,叶加仁,舒誉,等.恩平凹陷含油气系统划分与评价[J].西安石油大学学报(自然科学版),2014,29(4):37-45.
Liu F Y, Ye J R, Shu Y, et al. Division and evaluation of hydrocarbon-bearing system in Enping Sag [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(4): 37-45.
- [21]于开平,张功成,梁建设,等.珠江口盆地恩平凹陷油气成藏条件研究[J].石油实验地质,2011,33(5):509-512.
Yu K P, Zhang G C, Liang J S, et al. Petroleum accumulation conditions in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 509-512.
- [22]黄丽芬.层序地层学在陆相沉积凹陷分析中的应用——以珠江口盆地恩平凹陷为例[J].中国海上油气(地质),1999,13(3):159-168.
Huang L F. The application of sequence stratigraphy for analysis in nonmarine depression with example of Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1999, 13(3): 159-168.
- [23]嵇喜准,王琪,李娟,等.早期碳酸盐胶结作用对恩平凹陷珠江组砂岩孔隙演化模式的影响[J].天然气工业,2013,33(4):26-30.
Zhuo X Z, Wang Q, Li J, et al. Influence of early carbonate cementation on porosity evolution of sandstones in the Zhujiang Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(4): 26-30.
- [24]邢作昌,张忠涛,林畅松,等.珠江口盆地荔湾凹陷上新统一早中新统物源特征及其对沉积充填的影响[J].中国地质,2020,47(5):1577-1588.
Xing Z C, Zhang Z T, Lin C S, et al. Provenance feature of Upper Oligocene to Early Miocene in Liwan Sag, Pearl River Mouth Basin and its influence on depositional filling [J]. Geology in China, 2020, 47(5): 1577-1588.

(上接第 365 页/Continued from Page 365)

- [14]蓝振江,蔡红霞,曾涛,等.九寨沟主要植物群落生物量的空间分布[J].应用与环境生物学报,2004,10(3):299-306.
Lan Z J, Cai H X, Zeng T, et al. Biomass distribution of the major plant communities in Jiuzhaigou Valley, Sishuan [J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2004, 10(3): 299-306.
- [15]马丹炜.九寨沟自然保护区次生林物种多样性分析[J].四川师范大学学报(自然科学版),1999,22(1):83-87.
Ma D W. The analysis of community species diversity of secondary forests in Jiuzhaigou Valley Nature Reserve [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 1999, 22(1): 83-87.
- [16]Leicester R H, Wang C H, Nguyen M, et al. Structural durability of exposed timber [C]//Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering. Lahti, 2004: 571-576.
- [17]王小丽,刘昊天,王雪亮.腐朽虫蛀木构件的耐久性预测模型研究进展[J].土木工程,2015,4(5):207-214.
Wang X L, Liu H T, Wang X L. Review of the prediction model for durability of structural wood under decay and termite attack [J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2015, 4(5): 207-214.
- [18]赵柔.木构件腐朽程度的试验研究[D].南京:东南大学,2018.
Zhao R. Experimental research on decay of timber component [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [19]杨成林,陈宁生,李战鲁.汶川地震次生泥石流形成模式与机理[J].自然灾害学报,2011,20(3):31-37.
Yang C L, Chen N S, Li Z L. Formation mode and mechanism for debris flow induced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 31-37.
- [20]朱巍,蔡贺,唐雯,等.长白山天池火山泥石流展布特征及其灾害研究[J].地质与资源,2017,26(6):608-615.
Zhu W, Cai H, Tang W, et al. The Tianchi volcanic mudflow in Changbai Mountains: Its distribution and disaster research [J]. Geology and Resources, 2017, 26(6): 608-615.