

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.304>



渤海湾盆地冀中坳陷潜山油气成藏模式及充注能力定量评价

蒋有录¹, 路允乾¹, 赵贤正², 杨德相³

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580
2. 中国石油大港油田公司, 天津 300280
3. 中国石油华北油田公司, 河北任丘 062552

摘要: 渤海湾盆地潜山油气资源量丰富, 深化潜山油气成藏研究, 定量评价潜山油气充注能力, 对该盆地潜山油气勘探具有重要意义。以大量统计资料为基础, 对渤海湾盆地冀中坳陷潜山油气成藏模式及充注能力开展了系统研究。研究表明: 潜山油气成藏受烃源岩及供烃方式、储集特征、储盖组合等多种因素的控制, 与烃源岩大面积直接接触的、长期风化淋滤的潜山储集体, 最有利于油气成藏。研究区潜山油气藏分为高位潜山型、中位潜山型和低位潜山型大类; 以任丘、苏桥、牛东1这3个典型潜山油气藏为代表, 建立了高位、中位、低位3类潜山油气成藏模式。高位模式多分布于中央隆起带, 具有“双向油源、源储对接”的特点; 中位模式多分布于斜坡带, 具有“侧向油源、复合疏导”的特点; 低位模式多分布于洼陷带, 具有“顶部油源、不整合疏导”的特点。综合考虑烃源岩生烃强度、潜山储层物性、供烃方式、储盖组合类型以及供烃窗口等多种潜山成藏主控因素, 建立了潜山油气充注能力定量评价公式并对9个典型潜山油气藏进行了评价, 3类潜山油气藏的油气充注能力明显不同, 其中高位潜山油气充注能力最强, 低位潜山次之, 中位潜山最弱。

关键词: 潜山油气藏; 供烃窗口; 潜山成藏模式; 油气充注能力; 冀中坳陷; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2020)01-226-12

收稿日期: 2018-07-25

Hydrocarbon Accumulation Model and Quantitative Evaluation of Hydrocarbon Filling Capacity of Buried Hills in Jizhong Depression of Bohai Bay Basin

Jiang Youlu¹, Lu Yunqian¹, Zhao Xianzheng², Yang Dexiang³

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China
2. Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China
3. Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062552, China

Abstract: There are abundant oil and gas resources and great exploration potential in the buried hill of Jizhong depression in Bohai bay basin, and it is of great significance to deepen the study of hydrocarbon accumulation in buried hill and establish the quantitative evaluation formula of hydrocarbon filling capacity. Based on the analyses of the distribution of oil and gas accumulation and geological factors, combining previous research results, the buried hill in the study area is divided into high buried hill, middle buried hill and low buried hill. Represented by Renqiu buried hill, Suqiao buried hill and Niudong 1 buried hill, respectively, three

基金项目: 国家科技重大专项(No.2016ZX05006-007)。

作者简介: 蒋有录(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油气藏形成与分布规律研究。ORCID: 0000-0001-5880-7796。

E-mail: jiangyl@upc.edu.cn

引用格式: 蒋有录, 路允乾, 赵贤正, 等, 2020. 渤海湾盆地冀中坳陷潜山油气成藏模式及充注能力定量评价. 地球科学, 45(1):226—237.

models of hydrocarbon accumulation are established, namely high buried hill forming mode, middle buried hill forming mode and low buried hill forming mode. Among them, the high buried hill formation pattern is mostly distributed in the central uplift zone, which has the characteristics of “two-way oil source and source reservoir connection”. The middle buried hill forming model is distributed in the slope zone, which has the characteristics of “lateral oil source and complex transmission”. The low buried hill forming model is mostly distributed in deep concave zone and has the characteristics of “top oil source and unconformity transmission source rocks from the cover-flow backward filling”. Considering the hydrocarbon-generation intensity of source rock, buried hill reservoir physical properties, assemblage type, hydrocarbon supply in buried hill and the influence of hydrocarbon-supplying window, a formula is established for quantitative evaluation of buried hill hydrocarbon filling capacity, and applied to the Jizhong depression, and the evaluation results show that the hydrocarbon filling capacity of three kinds buried hills is obviously different. The hydrocarbon filling capacity of high buried hill is the strongest, which is followed by the low buried hill, while that of the middle buried hill is the weakest.

Key words: buried hill reservoir; hydrocarbon-supplying window; model of hydrocarbon accumulation; hydrocarbon charging capacity; Jizhong depression; petroleum geology.

潜山油气藏一直是渤海湾盆地油气勘探的重要油气藏类型(Zhao *et al.*, 2014; 赵贤正等, 2014, 2017; 吴伟涛等, 2015). 1975年冀中坳陷任丘潜山油藏的发现掀起了渤海湾盆地潜山油气藏勘探的高潮(赵贤正等, 2012a), 之后在冀中坳陷相继发现了雁翎、八里庄、河间、南孟、苏桥等20多个大型潜山油气田(赵贤正等, 2012b). 随着冀中坳陷油气勘探程度的提高, 深潜山等隐蔽油气藏已成为油气勘探的重要目标. 近些年来, 随着潜山成藏研究的深入及技术进步, 相继发现了多个潜山油气藏, 特别是牛东1、文古3、长3以及杨税务等多个高产隐蔽潜山油气藏的发现(赵贤正等, 2011; 杜金虎等, 2017), 展现了冀中坳陷潜山勘探的潜力和良好前景.

不同学者针对含油气盆地潜山构造特征、储集体特征、油气成藏条件及分布规律等均进行了深入研究, 并取得了很多认识和成果(邹华耀等, 2001; 韩剑发等, 2007; 赵贤正等, 2012b; 江尚昆等, 2016; 杜金虎等, 2017; 吴庆勋等, 2018), 但对潜山油气藏的形成模式、供烃能力定量评价研究还相对较少(蒋有录等, 2015; 兰朝利等, 2015; Blouet *et al.*, 2017). 本文以潜山油气藏发现最多的渤海湾盆地冀中坳陷为对象, 在综合分析潜山油气成藏特征基础上, 建立不同类型潜山的油气成藏模式, 并综合烃源岩、储集体、疏导体系、储盖组合、供烃窗口等因素对潜山油气充注能力的影响, 定量评价潜山油气充注能力, 以期为含油气盆地潜山油气勘探提供理论支持.

1 地质背景

冀中坳陷位于渤海湾盆地西部, 总体呈现凸凹相间的构造格局, 以大兴—牛驼镇—高阳—刘村—草城一线的中央凸起带为界, 将冀中坳陷分为西部凹陷带和东部凹陷带(高长海等, 2015)(图1). 冀中坳陷自下而上发育太古界及下元古界变质岩系、中上元古界和下古生界海相碳酸盐岩、上古生界海陆交互相煤系、中生界侏罗系—白垩系含火山岩相的陆源碎屑岩、新生界古近系河—湖相砂泥岩和新近系冲积平原沉积(赵贤正等, 2014). 其中石炭系一二叠系和古近系沙三段、沙四段—孔店组是该区3套主要的烃源岩层系和区域性盖层, 且古近系暗色泥岩在全区广泛分布, 是主力烃源岩, 另外, 石炭二叠煤系可为冀中东北部的潜山提供大量气源(赵贤正等, 2012a). 潜山油气储层主要为中元古界、下古生界寒武系和奥陶系碳酸盐岩, 长期的构造抬升使碳酸盐岩层接受风化淋滤、岩溶及白云岩化作用, 形成了大量溶孔、裂缝以及溶洞, 这些孔、缝、洞在空间上相互连通, 成为油气存储的主要空间(吴兴宁等, 2011)(图2).

冀中坳陷潜山油气资源丰富、分布广泛, 但不同地区、不同层系油气富集程度差异明显. 平面上, 潜山油气分布具有“东富西贫”的特征, 规模较大的潜山油气藏几乎都分布在东部凹陷带, 西部地区虽凹陷众多, 但潜山储量整体偏低(赵贤正等, 2012a; 高长海等, 2015); 此外, 在东部凹陷带内, 油气相态分布也表现出较强的不均一性, 整体呈现“南油北气”的特征, 石油主要分布于中南区, 而天然气主要分布于北区(图1).

冀中坳陷已发现潜山油气藏赋存于元古界、上

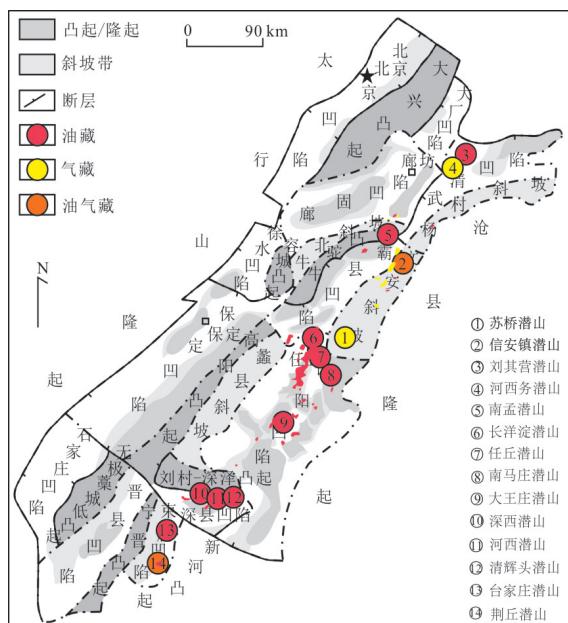


图 1 冀中坳陷潜山及油气资源分布

Fig.1 Distribution of buried hills, oil and gas resources in Jizhong depression

古生界和下古生界(赵贤正等,2011,2012b;杜金虎等,2017),主要富集于元古界和古生界碳酸盐岩中,下古生界及元古界以油藏为主,上古生界则以气藏为主(图2).

2 潜山油气成藏特征

潜山油气成藏受烃源岩及供烃方式、储集特征、储盖组合等多种因素的控制,从而造成不同潜山油气藏的富集特征具有明显差异性.

2.1 油气来源及供烃方式

丰富的油气来源是潜山油气藏形成的前提条件.冀中坳陷主力烃源岩沙三段及沙四段埋深一般大于3500 m,最大埋深超过8000 m,是深潜山的主要油气来源,另外,石炭系—二叠系煤系可为冀中东北部的潜山提供较充足的气源(赵贤正等,2012a;钱铮等,2015;侯中帅等,2017).

冀中坳陷潜山油气输导体系是由断层、不整合面以及碳酸盐岩顺层溶蚀带等多种输导要素组成,不同输导要素按照不同的组合方式形成了多种供

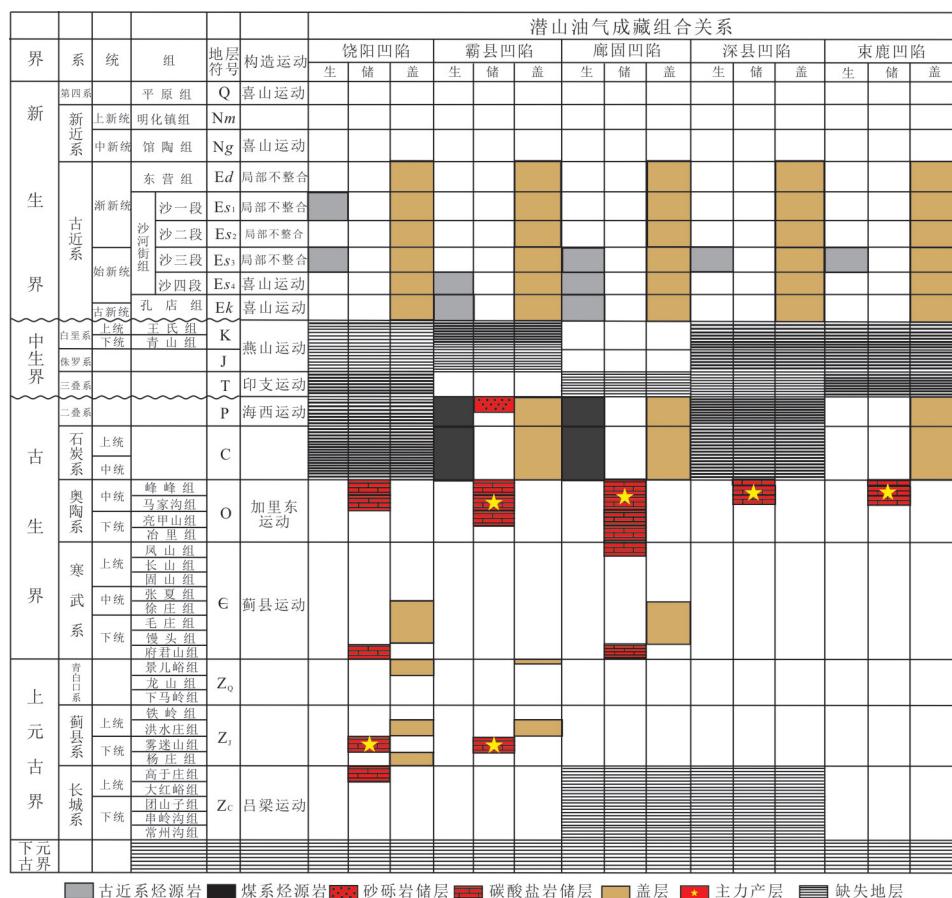


图 2 冀中坳陷地层发育及潜山成藏要素特征

Fig.2 Characteristics of stratum development in Jizhong depression

烃方式(蒋有录等,2011;高长海等,2015)。根据供烃洼陷的分布,将潜山供烃方式分为单向供烃和双向供烃,同时考虑烃源岩与潜山圈闭的接触关系,分为直接接触和间接接触两类。按照油气输导要素的类型,又将单向供烃方式分为断层型、不整合型、复合型3种;双向供烃油气输导要素往往为复合型(图3)。

根据潜山供烃特征,可将潜山供烃方式划分为6类:I类为直接接触、双向供烃型;II类为直接接触、单向复合供烃型;III类为直接接触、单向断层或不整合供烃型;IV类为间接接触、双向供烃型;V类为间接接触、单向复合供烃型;VI类为间接接触、单向断层或不整合供烃型(图3)。不同供烃方式供烃能力存在差异,其中直接接触双向供烃型具有近油源(直接接触)、油源充足的特点,供烃条件最好;其次为直接接触单向供烃型潜山,同样具有近油源的特点,供烃窗口大,供烃条件较好;间接接触双向供烃型潜山为多洼供烃,油气来源丰富,但未与潜山储层对接,供烃条件中等;间接接触单向供烃型潜山

由于离油源较远,且为单向供烃,供烃条件相对最差;复合型供烃由于具有多通道共同供烃的优势,供烃条件略好于断层或不整合单通道供烃型。

2.2 储层特征

碳酸盐岩储集空间具有多样性,但主要以溶蚀孔隙和裂缝为主,最普遍的是岩溶作用造成的次生孔隙,其形成主要受古风化壳的淋滤作用控制。碳酸盐岩储层改造强度与风化淋滤时间的长短有关,风化时间越长,对储层的改造越有利,有利于形成较大规模的潜山油气藏,故可将风化淋滤时间作为储层质量评价的参数(Luo et al., 2005;李建平等,2014;王永诗和李继岩,2017;昝念民等,2018;吴和源等,2018)。

根据潜山储集层系和其上覆层系的关系,可将冀中坳陷潜山分为6类(图4),由A类至F类,潜山经受的风化淋滤时间由长至短。

2.3 储盖组合特征

在渤海湾盆地众多凹陷中,潜山上覆地层不同,其成藏条件具有明显差异性,古近系主力烃源

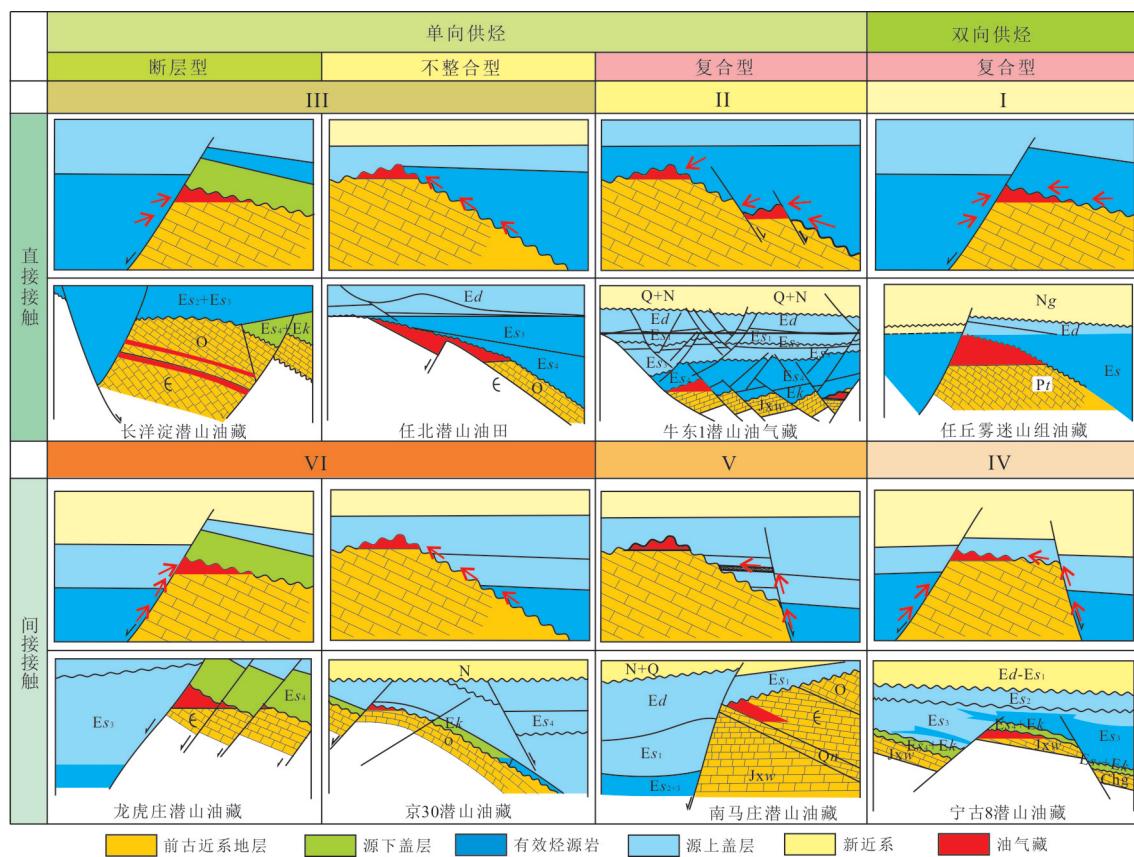


图3 冀中坳陷潜山油气供烃方式

Fig.3 Conveyance system condition classification of buried hills in Jizhong depression

岩层之下非生烃层与潜山优质储集层之上的岩层厚度越大,古近系油气越难以进入潜山储层中聚集成藏(蒋有录等,2015).从源储间隔的角度出发,源储间隔厚度越大,供烃条件越差.

根据潜山上覆地层的性质将潜山储盖组合划分为4类:I类为源下红层(主要为孔店组)覆盖,此类潜山保存条件较好,但烃源岩与潜山储层未直接接触,供烃条件较差,如肃宁潜山带的宁古8潜山,其油

气来源于古近系沙三段,上覆有沙四—孔店组的红层.II类潜山上覆地层为古近系有效烃源岩,一般为沙四段以及沙三段,潜山与烃源岩直接接触,最有利于潜山成藏,如牛东1潜山,直接被沙四段烃源岩覆盖.III类潜山上覆为石炭系—二叠系,古近系烃源岩与潜山储集层被隔断,如文安斜坡的苏桥潜山.IV类潜山被未成熟的东营组或沙一段泥岩覆盖,保存条件较差,主要通过断层供烃,如南马庄潜山(图5).

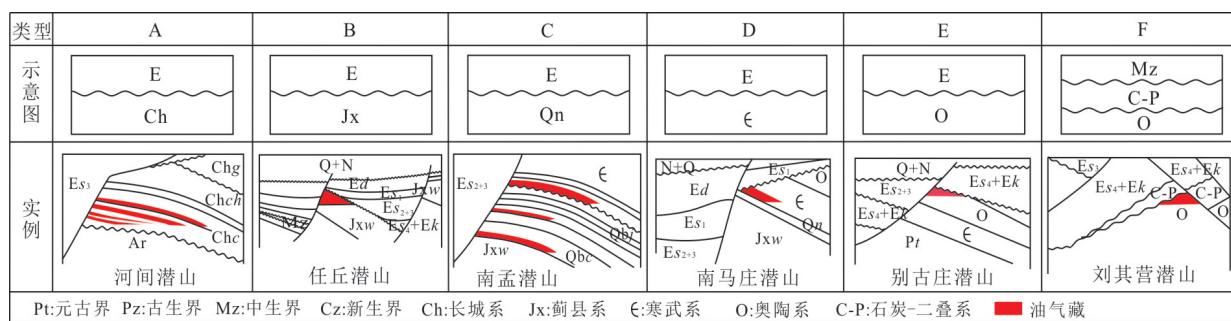


图4 冀中坳陷潜山储集体与其上覆层系关系

Fig.4 Classification of relationship between the buried hills and their overlying stratas in Jizhong depression

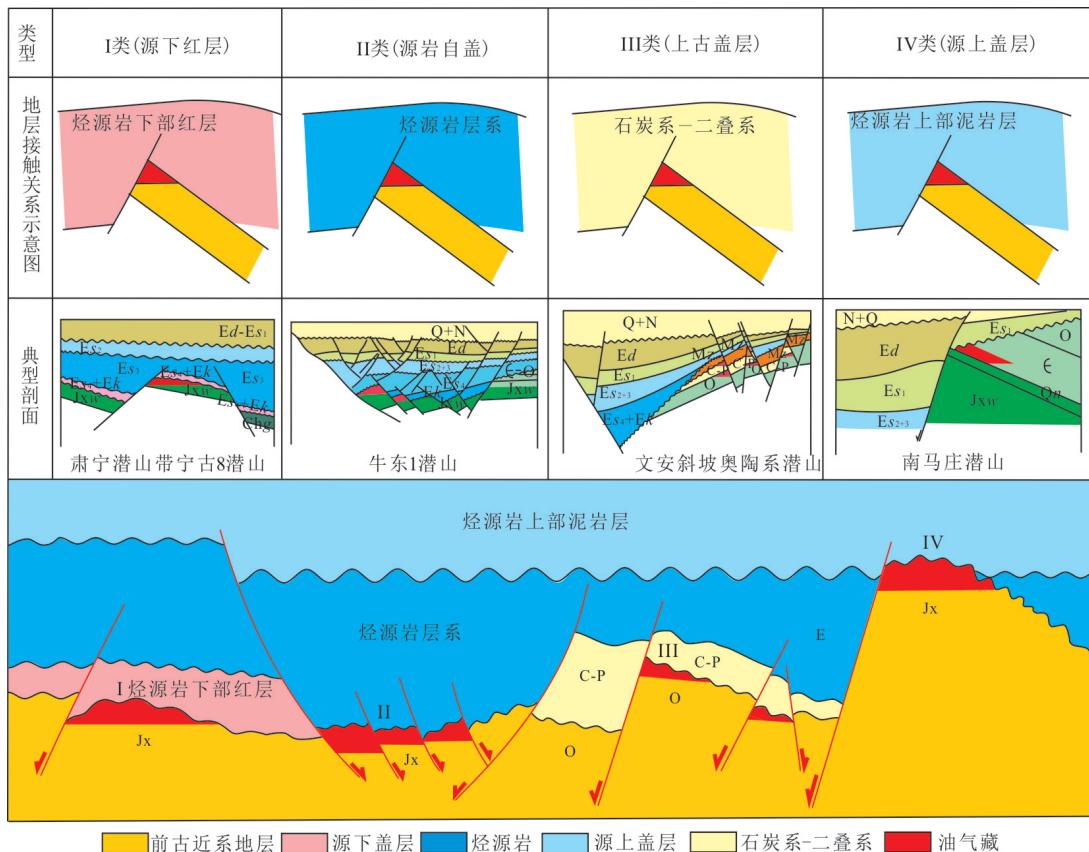


图5 冀中坳陷储盖组合类型

Fig.5 Storage cover type classification in Jizhong depression

3 潜山油气成藏模式

不同类型潜山在演化历史、构造位置、形态特征、供烃方式等方面均存在明显差异,使得不同类型潜山油气成藏特征不同,相同类型潜山油气藏应具有相似的地质背景及油气成藏条件,油气成藏模式也具有相似性(赵贤正等,2017)。潜山带油气成藏主要受油源、运移通道和储层等多种因素控制。烃源岩与圈闭的接触关系决定供烃方式,潜山带的类型决定储集特征,潜山带的位置决定了成藏方式(李丕龙等,2003)。

以潜山油气藏分布的二级构造带为基础,根据潜山的埋深及成藏条件差异,将冀中坳陷潜山油气藏分为3类,分别为高位潜山油气藏、中位潜山油气藏以及低位潜山油气藏(图6)。3类潜山油气成藏模式分别反映了中央隆起带、斜坡带、深凹带这3类构造带潜山成藏过程和特征。高位潜山虽缺失上古生界,但两侧都临近古近系生烃洼陷,供烃条件优越,圈闭面积及源—储接触面积大,且储集层经受长时间风化淋滤,孔、缝、洞十分发育。中位潜山通常为单向供烃且烃源岩与潜山未直接接触,供烃条件较

差,上覆石炭系—二叠系使得潜山接受风化时间较短,储层条件较差。低位潜山位于古近系烃源岩层之下,供烃条件好,深埋藏也使得保存条件优越。

3.1 高位潜山成藏模式

以任丘潜山为代表,是冀中坳陷潜山主要成藏模式。任丘潜山发育在中央隆起带,凹中隆的构造格局使得潜山具有充足的油气源条件,两侧洼陷古近系烃源岩和潜山储集层直接对接,油气经不整合和断层直接进入潜山,供烃条件优越,潜山前古近系与古近系之间不整合间断时间长,中上元古界、古生界碳酸盐岩遭受长期风化剥蚀、淋滤,形成大量裂缝、溶孔、溶洞等,储层条件好(臧明峰等,2009;韩剑发等,2017)。任丘潜山在 E_{s2+3} 沉积时期普遍接受沉积, E_s1 沉积期,雾迷山组进一步翘倾,此时沙三段烃源岩进入生油门限,生成的油气沿断层于不整合进入潜山圈闭; E_d 沉积后潜山幅度进一步加大,潜山基本定型(吴孔友等,2010); $Q+N$ 沉积期潜山深埋,沙三段烃源岩进入高成熟阶段,以产油为主,向潜山圈闭持续供烃,形成雾迷山组山头块状油藏和寒武系、奥陶系内幕层状油藏(蒋有录等,2018)(图7)。

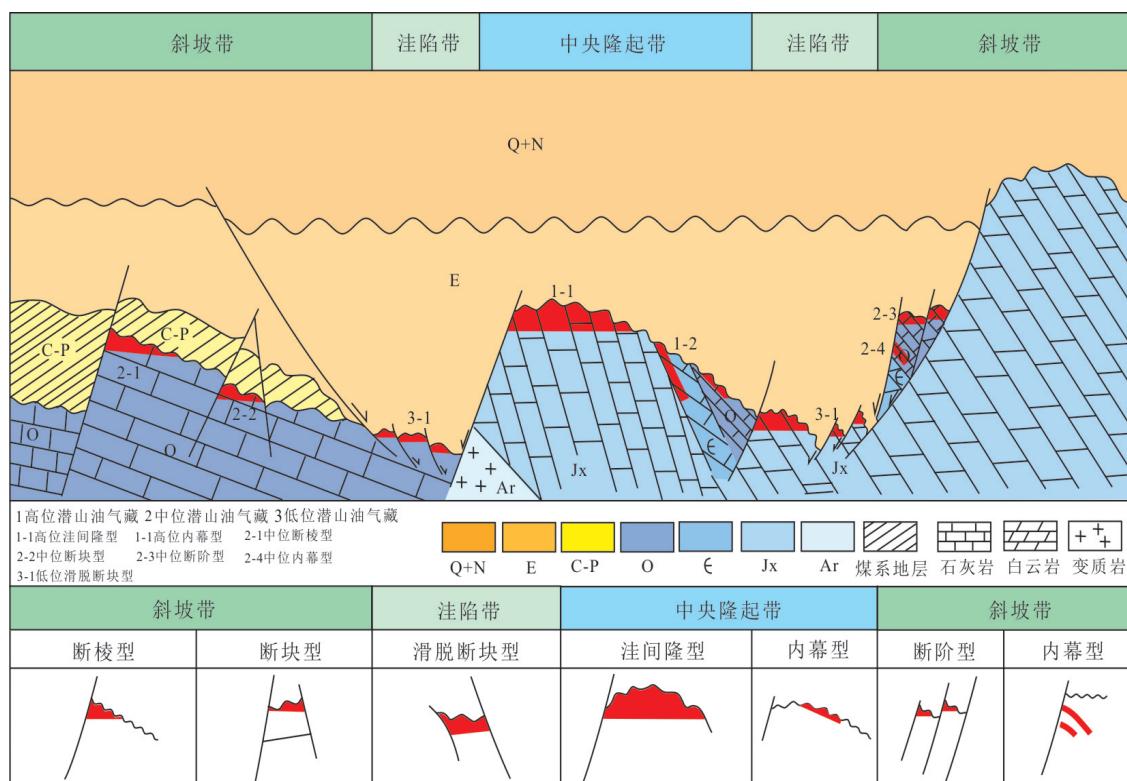


图6 冀中坳陷潜山油气藏分类

Fig.6 Classification of buried hill oil and gas reservoirs in Jizhong depression

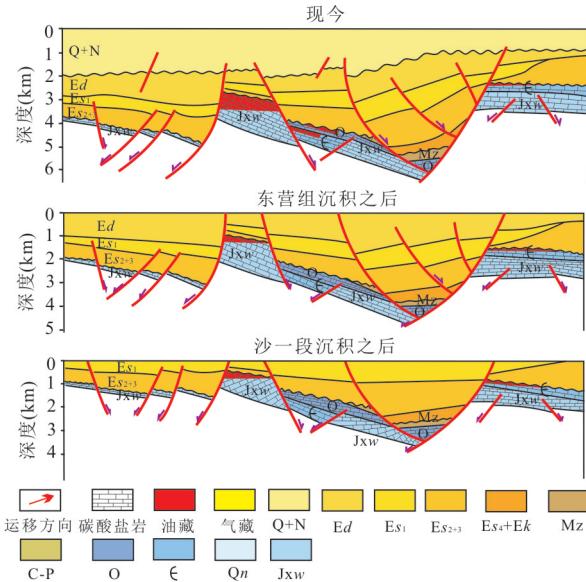


图 7 任丘(高位)潜山成藏模式
Fig.7 Renqiu (high) buried hill reservoir model

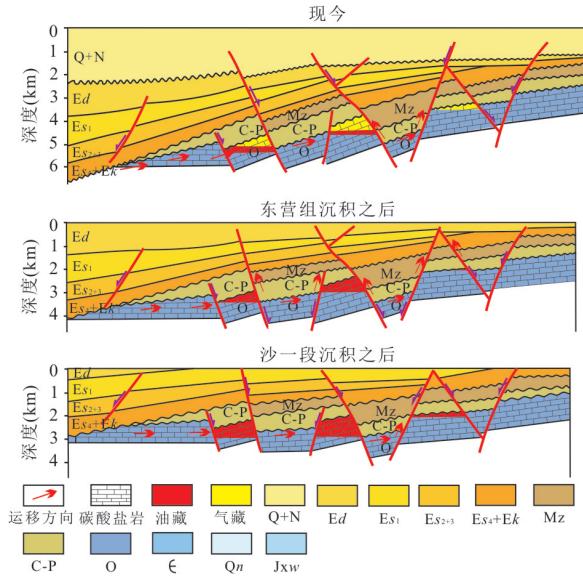


图 8 苏桥(中位)潜山成藏模式
Fig.8 Suqiao (median) buried hill reservoir model

3.2 中位潜山成藏模式

中位潜山油气藏发育在斜坡带向源一侧，断层与不整合构成遮挡，由一侧洼陷单向供烃，断层与不整合复合输导，储集层内的顺层溶蚀带是此类潜山重要的输导要素。由于潜山上覆石炭系一二叠系，中位潜山储层经受风化淋滤时间较短，储层条件较差。

中位潜山成藏模式以苏桥潜山最为典型，苏桥潜山油气来源于一侧的霸县洼陷，潜山圈闭在古近系沉积之前就已形成，古近系早期，由于东部沧县隆起的上升和西部霸县凹陷的急剧沉降，文安斜坡发生翘倾，形成了西倾东抬的斜坡， Es_1 末期沙四孔店组烃源岩进入生油门限，生成的低熟油沿奥陶系不整合和断层进入奥陶系潜山圈闭； Ed 沉积末期，霸县凹陷整体抬升接受剥蚀，早期形成的油气藏部分遭受破坏； $Q+N$ 沉积期构造活动弱，潜山定型，此时沙四孔店组烃源岩进入高成熟阶段，石炭系一二叠系烃源岩达到生烃高峰，沙四孔店组生成的高成熟油和天然气以及石炭系一二叠系生成的天然气进入潜山圈闭高部位，驱替前期聚集的低成熟油，从油藏过度为油气藏 (Liu and Qiu, 2017; Liu et al., 2017) (图 8)。

3.3 低位潜山成藏模式

此类潜山通常位于烃源岩层之下，与烃源岩直接接触，古近系烃源岩生成的油气可通过下伏不整合进入潜山，供烃条件较好，潜山层系与烃源岩之间经历了较长时间的沉积间断，储层条件较好，保存条件优越。

低位潜山成藏模式以牛东 1 潜山为代表 (图 9)，

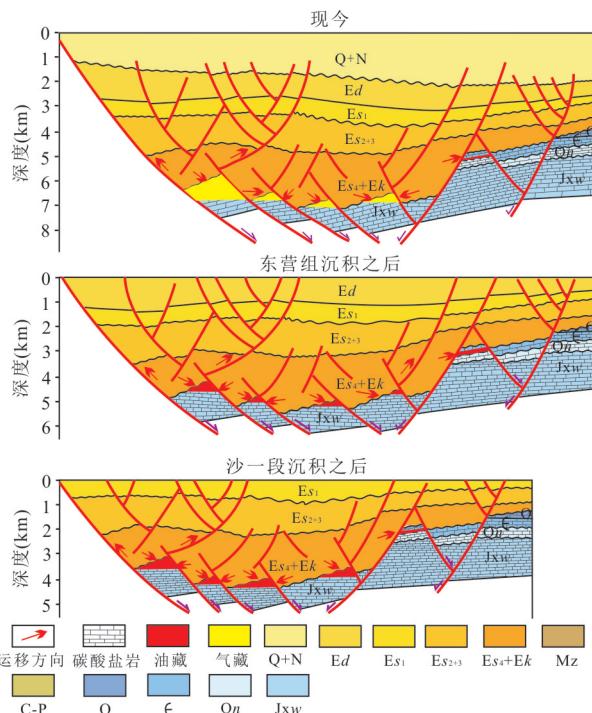


图 9 牛东 1(低位)潜山成藏模式
Fig.9 Niudong 1 (low) buried hill reservoir model

牛东 1 潜山位于洼陷带，潜山形成于古近系之前，至 Ed 末期基本定型，沙四孔店组烃源岩在 Es_2 沉积末期就超过了成熟门限深度，开始向潜山供油，使得潜山圈闭具有早期充注的特征； Ed 沉积末期的构造抬升使部分低熟油发生逸散；至 $Q+N$ 沉积期沙四孔店组烃源岩已超过高成熟门限，大量生成的油气

向潜山高压充注,占据潜山圈闭高部位,形成凝析气藏(高长海等,2017)。

4 潜山油气充注能力定量评价

潜山油气充注能力受到烃源岩、储集层以及油气输导条件等因素的控制。为方便比较研究区潜山充注能力的大小,可以采用权重赋值的方法,综合影响潜山充注能力的要素,定量评价潜山油气的充注能力(朱荣伟等,2017)。

对于源储对接型潜山油气藏,影响潜山油气充注能力的主要因素包括:潜山储层孔隙度及渗透率、潜山风化淋滤时间、供烃方式、储盖组合类型、供烃窗口大小以及烃源岩生烃强度,故将这7项因素作为评价潜山油气充注能力的指标。对于源储分离型潜山油气藏,潜山储层与烃源岩没有接触,供烃窗口不影响其油气充注能力,因此剔除供烃窗口大小这一影响因素。

4.1 源储对接型潜山

在权重总值为1的前提下,考虑各个指标对潜山油气充注能力的贡献程度,对每个评价指标进行权重赋值:潜山储层的孔隙度、渗透率、风化淋滤时间为0.1,供烃方式、供烃窗口大小、烃源岩生烃强度均为0.2,储盖组合类型为0.1(蒋有录等,2015;高长海等,2017;赵凯等,2018)。根据上述评价指标的分布范围以及成藏要素类型的优劣,建立各项指标的赋值标准。对于烃源岩生烃强度、孔隙度与渗透率的赋值标准,则根据主力源岩生烃强度和储层实测孔隙度与渗透率的大小,按照相等的间隔将其划分为几个区间,对每个区间进行赋值,而供烃方式、风化时间、储盖组合类型赋值大小则根据区间个数,从差到好分别赋予1~10的整数(表1),最后综合考虑上述因素,建立源储对接型潜山油气充注能力定量评价公式: $S=0.1\times W_{孔}+0.1\times W_{渗}+0.1\times W_{T}+0.2\times HSP+0.2\times SRM+0.2\times HGD$,

其中: S 为潜山油气充注能力; $W_{孔}$ 、 $W_{渗}$ 、 W_T 分别为潜山储层孔隙度的赋值、渗透率、风化淋滤时间的赋值;HSP、SRM、HW分别为潜山供烃方式、储盖组合类型、供烃窗口大小的赋值;HGD为烃源岩生烃强度的赋值。

4.2 源储分离型潜山

由于源储分离型潜山储层与烃源岩没有直接接触,供烃窗口不影响其油气充注能力,供烃对油气充注能力的影响主要体现在供烃方式及储盖组合类型上,因此删除供烃窗口大小项,对剩余影响因素的权重进行调整。具体的,对于源储分离型潜山,供烃方式对其油气充注能力的贡献最大,因而,将其权重由0.2调整为0.3;储盖组合类型对其油气充注能力的贡献也相对增大,因而,将其权重由0.1调整为0.2;由此,即可得到源储分离型潜山油气充注能力的计算公式: $S=0.1\times W_{孔}+0.1\times W_{渗}+0.1\times W_T+0.3\times HSP+0.2\times SRM+0.2\times HGD$,HSP、 W_T 、SRM的分类标准如图3~图5所示。计算结果S值越大,表示油气越容易进入潜山储层,以此可以评价各个潜山的成藏概率的大小。基于上述评价方法,选取位于不同构造带的多个潜山,涵盖3种潜山类型(图6),进行潜山供烃能力计算,计算结果如表2所示。典型潜山的孔隙度、渗透率、生烃强度为油田实测数据,潜山风化时间、供烃方式、储盖组合类型、供烃窗口大小可通过潜山油藏实际剖面获得。

中央隆起带的任丘潜山和任北寒武系、奥陶系内幕潜山,均经历了长时间的风化淋滤,储层物性好,沙三段烃源岩生烃强度大且潜山与烃源岩直接接触,双侧洼陷同时供烃,供烃方式优越,潜山供烃能力最强。斜坡带的苏桥潜山、刘其营潜山、龙虎庄潜山储集层与烃源岩未直接接触,潜山供烃能力较

表1 冀中坳陷潜山油气充注能力评价指标赋值标准

Table 1 Distributing criteria for evaluation index of hydrocarbon charging capacity in buried hills in Jizhong depression

评价指标	指标范围	赋值	指标范围	赋值	指标范围	赋值	指标范围	赋值	指标范围	赋值	指标范围	赋值
孔隙度(%)	0~5	4	5~10	6	10~15	8	15~20	10				
渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	0~1	2	1~10	4	10~100	6	100~1 000	8	$>1 000$	10		
风化时间(W_T)(Ma)	A	9	B	8	C	7	D	5	E	4	F	3
供烃方式(HSP)	VI	2	V	3	IV	4	III	8	II	9	I	10
储盖组合类型(SRM)	I	5	II	10	III	4	IV	2				
生烃强度($10^5\text{t}/\text{km}^2$)	4 000~5 000	5	5 000~6 000	6	6 000~7 000	7	$>7 000$	8				

表 2 冀中坳陷潜山油气充注能力计算结果

Table 2 Calculation results of hydrocarbon charging capacity in buried hills in Jizhong depression

潜山类型	中央隆起带潜山(高位潜山)				斜坡带潜山(中位潜山)				洼陷带潜山(低位潜山)	
	任丘潜山	任北寒武	任北奥陶	苏桥潜山	刘其营潜山	龙虎庄潜山	肃宁潜山	河间潜山	牛东1潜山	
典型潜山	任丘潜山	任北寒武	任北奥陶	苏桥潜山	刘其营潜山	龙虎庄潜山	肃宁潜山	河间潜山	牛东1潜山	
孔隙度(%)	6.43	6	5.9	2	2.69	6	3	12	6.85	
赋值	6	6	6	4	4	6	4	8	6	
渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	>1000	100~1 000	296	1~10	0.37	12	50	167	10~100	
赋值	10	8	8	4	2	6	6	8	6	
风化时间(Ma)	B	D	E	F	F	D	B	A	B	
赋值	8	5	4	3	3	5	8	9	8	
供烃方式	I	III	III	V	VI	VI	V	III	II	
赋值	10	8	8	3	2	2	3	8	9	
储盖组合类型	II	II	II	III	III	I	I	II	II	
赋值	10	10	10	4	4	5	5	10	10	
供烃窗口(km)	2.16	0.54	1.29	0	0	0	0	0.11	2.73	
生烃强度($10^5\text{t}/\text{km}^2$)	7 500	6 800	6 800	4 500	5 000	4 500	6 500	5 500	6 500	
赋值	8	7	7	5	5	5	7	6	7	
S	7.43	6.01	6.06	3.8	3.3	4.3	5.1	6.32	6.75	

差。洼陷带潜山的牛东1潜山、肃宁潜山、河间潜山位于烃源岩之下,供烃方式较好,潜山储集层经历风化淋滤时间较长,溶蚀孔洞发育且保存条件好,潜山供烃能力较好。

冀中坳陷各潜山充注能力计算结果与勘探发现的潜山油气成藏概率有较好的匹配关系:如任丘潜山,两侧都临近生烃洼陷,古近系主力烃源岩生烃强度可达 $7500 \times 10^5 \text{t}/\text{km}^2$,潜山通过断层和不整合与烃源岩直接接触,供烃窗口超过2 km,且雾迷山组储层经历了超过1 000 Ma的风化淋滤,成藏条件优越。任丘潜山供烃能力计算结果与任丘潜山富集高产吻合,证明潜山供烃能力计算对于潜山成藏有利区带预测有重要的指导意义。

5 结论

(1)冀中坳陷不同类型潜山的供烃条件、储层及储盖组合特征等具有显著差异。上覆有效烃源岩、经长期风化淋滤的潜山,最有利于油气成藏;若潜山与烃源岩之间存在源下红层或上古生界盖层,则成藏条件较差。

(2)冀中坳陷主要存在高位、中位、低位等3类潜山油气成藏模式。高位潜山油气成藏模式以任丘潜山为代表,具有“双向油源、源储对接”的特点;中位成藏模式以苏桥潜山为代表,具有“侧向油源、复合输导”的特点;低位成藏模式以牛东1潜山为代表,具有“顶部油源、不整合输导”的特点。

(3)综合考虑烃源岩生烃强度、潜山储层孔隙度及渗透率、储层风化淋滤时间、供烃方式、储盖组合类型以及供烃窗口大小等对潜山成藏的控制作用,建立了潜山供烃能力定量评价公式。冀中坳陷3类典型潜山的计算结果与油气富集程度匹配良好,潜山油气充注能力及富集程度总体表现为:高位潜山最大,低位潜山次之,中位潜山最小。

References

- Blouet, J. P., Imbert, P., Foubert, A., 2017. Mechanisms of Biogenic Gas Migration Revealed by Seep Carbonate Paragenesis, Panoche Hills, California. *AAPG Bulletin*, 101(8): 1309—1340. <https://doi.org/10.1306/10171616021>
- Du, J.H., He, H.Q., Zhao, X.Z., et al., 2017. Significant Exploration Breakthrough in Yangshuiwu Ultra-Deep and Ultra-High Temperature Ordovician Buried-Hill in Langgu Sag, Bohai Bay Basin. *China Petroleum Exploration*, 22(2):1—12 (in Chinese with English abstract).
- Gao, C.H., Zha, M., Zhao, X.Z., et al., 2015. Migration Systems and Hydrocarbon Accumulation Models of Buried Hill Reservoirs in Jizhong Depression. *Lithologic Reservoirs*, 27(2):26—30, 37 (in Chinese with English abstract).
- Gao, C.H., Zha, M., Zhao, X.Z., et al., 2017. Hydrocarbon Accumulation Models and Their Main Controlling Factors in the Deep Buried Hills of the Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Industry*, 37(4): 52—59

- (in Chinese with English abstract).
- Han, J.F., Mei, L.F., Pan, W.Q., et al., 2007. Complex Carbonate Hydrocarbon Reservoir Modeling and Reserve Calculating: Taking the Buried Carbonate Hill Oil-Gas Pool Reserve Calculation as an Example. *Earth Science*, 32(2):267—272, 278 (in Chinese with English abstract).
- Han, J.F., Sun, C.H., Wang, Z.Y., et al., 2017. Superimposed Compound Karst Model and Oil and Gas Exploration of Carbonate in Tazhong Uplift. *Earth Science*, 42(3):410—420 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.S., Chen, S.Y., Yan, J.H., et al., 2017. Sedimentary Characteristics and Control Factors of Upper Palaeozoic in Dafang Exploration Area. *Earth Science*, 42(11): 2055—2068, 2104 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S.K., Wu, H.M., Zeng, J.C., et al., 2016. Hydrocarbon Difference Enrichment and Main-Controlling Factors of Buried-Hill Reservoir in the Central of Liaozi Low-Salient. *Special Oil and Gas Reservoir*, 23(6):55—59, 143—144 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.L., Lu, H., Liu, H., et al., 2011. Enrichment Characteristics and Major Controlling Factors of Hydrocarbons in the Neogene of Raoyang Depression, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 32(5):791—796 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.L., Ye, T., Zhang, S.W., et al., 2015. Enrichment Characteristics and Main Controlling Factors of Hydrocarbon in Buried Hill of Bohai Bay Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 39(3):20—29 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.L., Zhang, W.J., Liu, H., et al., 2018. Properties of Fluid Inclusions and Periods of Hydrocarbon Accumulation in Paleogene Reservoirs in Raoyang Depression. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 42(4):23—33 (in Chinese with English abstract).
- Lan, C.L., Liao, B.F., Wang, Z.K., et al., 2015. Characteristics and Growth Mechanism of Fractures within the Ordovician Buried Carbonate Hill in Nanpu Sag Offshore, Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 252—261 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.P., Zhou, X.H., Wang, G.Z., et al., 2014. Lithologic Constitution and its Control on Reservoir Development on Penglai 9-1 Buried Hill, Bohai Sea Basin. *Earth Science*, 39(10):1421—1430 (in Chinese with English abstract).
- Li, P.L., Zhang, S.W., Song, G.Q., et al., 2003. Exploration Potential of Nonstructural Pools in Th Matured Acreage of Jiyang District. *Acta Petrolei Sinica*, 24(5): 10—15 (in Chinese with English abstract).
- Liu, N., Qiu, N.S., 2017. Hydrocarbon Migration and Accumulation of the Suqiao Buried-Hill Zone in Wen'an Slope, Jizhong Subbasin, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 512—525. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.05.040>
- Liu, N., Qiu, N.S., Chang, J., et al., 2017. Hydrocarbon Migration and Accumulation of the Suqiao Buried-Hill Zone in Wen'an Slope, Jizhong Subbasin, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 512—525. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.05.040>
- Luo, J.L., Morad, S., Liang, Z.G., et al., 2005. Controls on the Quality of Archean Metamorphic and Jurassic Volcanic Reservoir Rocks from the Xinglongtai Buried Hill, Western Depression of Liaohe Basin, China. *AAPG Bulletin*, 89(10): 1319—1346. <https://doi.org/10.1306/05230503113>
- Qian, Z., Zhang, S.H., Liang, H.B., et al., 2015. Hydrocarbon Evaluation of Carboniferous Permian Source Rocks in Northeast Jizhong Depression. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(5): 1332—1341 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.S., Li, J.Y., 2017. Characteristics and Main Controlling Factors of Layered Reservoir in Buried Hill of Carbonate Rock in Pingfangwang Oilfield, Jiyang Depression. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 41(4): 27—35 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H.Y., Wang, J.G., Wang, P.X., et al., 2018. Genesis of Dolomite Reservoir of Middle-Lower Cambrian in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 39(4): 416—426 (in Chinese with English abstract).
- Wu, K.Y., Li, J.Y., Lu, S.K., et al., 2010. Evolution Types and Hydrocarbon Accumulation Differences of Buried Hills in Raoyang Sag, Jizhong Depression. *Marine Origin Petroleum Geology*, 15(1):27—34 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q.X., Wei, A.J., Wang, Y.C., et al., 2018. Tectonic Difference and Genetic Mechanism of Buried Hill in Southern Bohai Area. *Earth Science*, 43(10): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W.T., Gao, X.Z., Li, L., et al., 2015. Favorable Conditions Formed in Large-Scale Buried-Hill Reservoir in Bohai Bay Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 22(2): 22—26, 151—152 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X.N., Li, G.J., Tian, J.Q., et al., 2011. Characteristics of Inner Buried Hill Carbonate Reservoirs and Their Main Controlling Factors in the Jizhong Depression. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 18(2): 22—25, 136 (in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- Zan, N.M., Wang, Y.Z., Cao, Y.C., et al., 2018. Characteristics and Development Patterns of Reservoir Space of the Lower Paleozoic Buried Hills in Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(2):355—365 (in Chinese with English abstract).
- Zang, M.F., Wu, K.Y., Cui, Y.Q., et al., 2009. Hydrocarbon Transporting System and Migration Pattern in the Buried Hill Reservoir of Jizhong Depression. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 16(6):22—25, 95 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K., Jiang, Y.L., Liu, H., et al., 2014. Analysis on the Causes of Different Enrichment of Hydrocarbon in Gudao and Chengdao Buried-Hills, Jiayang Depression. *Journal of Geomechanics*, 24(2):220—228 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. Z., Hu, S. Y., Liu, W., et al., 2014. Petroleum Geological Features and Exploration Prospect of Deep Marine Carbonate Rocks in China Onshore: A Further Discussion. *Natural Gas Industry B*, 1(1): 14—23. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2014.10.002>
- Zhao, X.Z., Jiang, Y.L., Jin, F.M., et al., 2017. Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Model of Sub-Sags in Hydrocarbon-Rich Sag: A Case Study of Raoyang Sag in Jizhong Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 38(1):67—76 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Z., Jin, F.M., Cui, Z.Q., et al., 2012a. Types of Subtle Buried-Hill Oil Reservoirs and Their Accumulation Simulation in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2):137—143 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Z., Wang, Q., Jin, F.M., et al., 2012b. Secondary Exploration Method and Its Application for Hydrocarbon Enriched Depressions in Highly Explored Areas. *China Petroleum Exploration*, 17(6): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Z., Jin, F.M., Wang, Q., et al., 2011. Niudong 1 Ultra-Deep and Ultra-High Temperature Subtle Buried Hill Field in Bohai Bay Basin: Discovery and Significance. *Acta Petrolei Sinica*, 32(6):915—927 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Z., Jin, F.M., Wang, Q., et al., 2014. Exploration and Discovery of Subtle Deep Buried Hill and Buried Hill Inner-Curtain Hydrocarbon Reservoir in Jizhong Sag. *China Petroleum Exploration*, 19(1): 10—21 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.W., Jiang, Y.L., Liu, J.D., et al., 2017. Natural Gas Enrichment Difference and Prediction of Favorable Exploration Targets in the Midland of Jingxi Area, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(1): 32—42 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H.Y., Xiang, L.B., Liang, H.B., et al., 2001. Dynamic Models of Petroleum Migration and Accumulation for Paleozoic-Proterozoic Buried Hills in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 26(1):67—72 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 杜金虎, 何海清, 赵贤正, 等, 2017. 渤海湾盆地廊固凹陷杨税务超深超高温奥陶系潜山油气勘探重大突破实践与启示. 中国石油勘探, 22(2):1—12.
- 高长海, 查明, 赵贤正, 等, 2015. 冀中坳陷潜山油气藏输导体系及成藏模式. 岩性油气藏, 27(2):26—30, 37.
- 高长海, 查明, 赵贤正, 等, 2017. 渤海湾盆地冀中坳陷深层古潜山油气成藏模式及其主控因素. 天然气工业, 37(4):52—59.
- 韩剑发, 梅廉夫, 潘文庆, 等, 2007. 复杂碳酸盐岩油气藏建模及储量计算方法:以潜山油气储量计算为例. 地球科学, 32(2):267—272, 278.
- 韩剑发, 孙崇浩, 王振宇, 等, 2017. 塔中隆起碳酸盐岩叠合复合岩溶模式与油气勘探. 地球科学, 42(3):410—420.
- 侯中帅, 陈世悦, 鄭继华, 等, 2017. 大港探区上古生界沉积特征与控制因素. 地球科学, 42(11):2055—2068, 2104.
- 江尚昆, 吴昊明, 曾金昌, 等, 2016. 辽西低凸起中段潜山油气差异富集及主控因素. 特种油气藏, 23(6):55—59, 143—144.
- 蒋有录, 卢浩, 刘华, 等, 2011. 渤海湾盆地饶阳凹陷新近系油气富集特点与主控因素. 石油学报, 32(5):791—796.
- 蒋有录, 叶涛, 张善文, 等, 2015. 渤海湾盆地潜山油气富集特征与主控因素. 中国石油大学学报(自然科学版), 39(3):20—29.
- 蒋有录, 张文杰, 刘华, 等, 2018. 饶阳凹陷古近系储层流体包裹体特征及成藏期确定. 中国石油大学学报(自然科学版), 42(4):23—33.
- 兰朝利, 廖保方, 王志坤, 等, 2015. 渤海湾盆地南堡凹陷滩海潜山裂缝特征及其形成机制. 地质学报, 89(2): 252—261.
- 李建平, 周心怀, 王国芝, 2014. 蓬莱9-1潜山岩性组成及其对储层发育的控制. 地球科学, 39(10):1521—1530.
- 李丕龙, 张善文, 宋国奇, 等, 2003. 济阳成熟探区非构造油气藏深化勘探. 石油学报, 24(5):10—15.
- 钱铮, 张松航, 梁宏斌, 等, 2015. 冀中坳陷东北部石炭一二叠系烃源岩生烃潜力评价. 吉林大学学报(地球科学版) 45(5):1332—1341.
- 王永诗, 李继岩, 2017. 济阳坳陷平方王油田碳酸盐岩潜山内幕储层特征及其主控因素. 中国石油大学学报(自然

- 科学版), 41(4):27—35.
- 吴和源, 汪建国, 王培玺, 等, 2018. 渤海湾盆地南堡凹陷中一下寒武统白云岩成因及储层形成机理. 石油学报, 39(4):416—426.
- 吴孔友, 李继岩, 陆诗阔, 等, 2010. 冀中饶阳凹陷潜山演化类型及成藏差异性分析. 海相油气地质, 15(1):27—34.
- 吴庆勋, 韦阿娟, 王粤川, 等, 2018. 渤海南部地区潜山构造差异与成因机制. 地球科学, 43(10):1—17.
- 吴伟涛, 高先志, 李理, 等, 2015. 渤海湾盆地大型潜山油气藏形成的有利因素. 特种油气藏, 22(2): 22—26, 151—152.
- 吴兴宁, 李国军, 田继强, 等, 2011. 冀中坳陷碳酸盐岩潜山内幕储层特征及其形成主控因素. 特种油气藏, 18(2): 22—25, 136.
- 昝念民, 王艳忠, 操应长, 等, 2018. 东营凹陷下古生界碳酸盐岩古潜山储层储集空间特征及发育模式. 石油与天然气地质, 39(2):355—365.
- 臧明峰, 吴孔友, 崔永谦, 等, 2009. 冀中坳陷潜山油气藏输导体系及运移方式. 特种油气藏, 16(6):22—25, 95.
- 赵凯, 蒋有录, 刘华, 等, 2018. 济阳坳陷孤岛与埕岛潜山油气差异富集原因分析. 地质力学学报, 24(2):220—228.
- 赵贤正, 蒋有录, 金凤鸣, 等, 2017. 富油凹陷洼槽区油气成藏机理与成藏模式——以冀中坳陷饶阳凹陷为例. 石油学报, 38(1):67—76.
- 赵贤正, 金凤鸣, 崔周旗, 等, 2012a. 冀中坳陷隐蔽型潜山油藏类型与成藏模拟. 石油勘探与开发, 39(2): 137—143.
- 赵贤正, 王权, 金凤鸣, 等, 2012b. 高勘探程度区富油气凹陷二次勘探方法及应用. 中国石油勘探, 17(6):1—10.
- 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 等, 2011. 渤海湾盆地牛东1超深潜山高温油气藏的发现及其意义. 石油学报, 32(6): 915—927.
- 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 等, 2014. 冀中坳陷隐蔽深潜山及潜山内幕油气藏的勘探发现与认识. 中国石油勘探, 19(1):10—21.
- 朱荣伟, 蒋有录, 刘景东, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地靖西中部地区天然气富集差异及有利勘探方向预测. 天然气地球科学, 28(1):32—42.
- 邹华耀, 向龙斌, 梁宏斌, 等, 2001. 冀中坳陷潜山油气运聚动力学特征及其类型. 地球科学, 26(1):67—72.