

渤海湾盆地石炭系—二叠系煤系烃源岩 二次生烃研究进展与关键问题

徐进军, 金 强, 程付启, 林腊梅
(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要:渤海湾盆地地下伏石炭系—二叠系煤系烃源岩自古近纪以来的二次生烃具有重要的油气成藏意义, 成为中国东部深层油气研究的热点。综合前人对该套烃源岩的分布特征、地化特征、二次生烃研究方法以及二次生烃模式等研究成果, 认为研究区石炭系—二叠系煤系烃源岩的二次生烃起始点确定、二次生烃动力学机制分析以及二次生烃有效性评价是研究的关键问题; 此外, 构造演化解析和烃源岩生烃史的恢复可以确定二次生烃起始点, 开展不同二次生烃起始点的热模拟实验可以揭示二次生烃过程中形成油气的有机质性质及其生烃动力学机制, 结合研究区不同构造单元的温度和压力条件可以预测二次生烃资源量, 达到深层油气资源预测的目的。

关键词:石炭系—二叠系煤系烃源岩 二次生烃 研究进展 关键问题

中图分类号: TE112.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)01-0043-07

Advances and crucial issues on secondary hydrocarbon generation of the Carboniferous–Permian coal–measure source rocks in Bohai Bay Basin

Xu Jinjun, Jin Qiang, Cheng Fuqi, Lin Lamei

(School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China)

Abstract: Secondary hydrocarbon generation of the Carboniferous–Permian coal–measure source rocks underlying Bohai Bay Basin since the Paleogene becomes petroleum research focus of eastern China for its great significance of oil–gas accumulation. With literature review on its distribution and geological characteristics, investigation methods and models of secondary hydrocarbon generation about the source rocks, initial point, kinetic mechanism and effectiveness evaluation are concluded as the crucial issues on secondary hydrocarbon generation research of the Carboniferous–Permian coal–measure source rocks. Moreover, the tectonic evolution analysis and geochemistry evolution reconstruction are suggested to determine the initial point of secondary hydrocarbon generation. Based on different initial point of secondary hydrocarbon generation, thermal simulation experiments should contribute to imply the properties and hydrocarbon generation kinetic mechanism of organic matter during secondary hydrocarbon generation processes. Combining with temperature and pressure conditions of different structural units, resources of secondary hydrocarbon generation is predicted to evaluate petroleum sources of deep horizons.

Key words: Carboniferous–Permian; coal–measure source rocks; secondary hydrocarbon generation; advances; crucial issues

收稿日期: 2016-10-11。

作者简介: 徐进军(1987—), 男, 山东潍坊人, 博士, 从事油气地球化学研究。联系电话: 15166657556, E-mail: xujj2015@upc.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海湾盆地深层油气地质与增储方向”(2016ZX05006-007), 青岛市人社局博士后项目“渤海湾盆地南部石炭—二叠系烃源岩二次生烃模式”(05T15010830), 青岛市战略性新兴产业培育计划“页岩气勘探开发工艺与技术装备项目”(13-4-1-2-gx)。

石炭系—二叠系煤系烃源岩在华北地台广泛分布,至三叠纪中晚期,由于埋藏作用使其陆续达到生油门限,发生初次生烃;至侏罗纪,华北地台东部进入裂谷构造活动阶段,部分地区被深埋继续生烃,多数地区受构造抬升作用影响甚至被剥蚀,初次生烃暂停;新生代以来,再次大规模的裂谷活动使许多残留煤系烃源岩的埋深超过三叠纪的埋深,开始二次生烃^[1-3]。这种现象在中外含油气盆地均有发生,例如美国 Delaware 盆地、加拿大 Jeanne D'arc 盆地以及利比亚 Ghadames 和 Murzuq 盆地等^[4-7]。烃源岩的二次生烃动力学机制分析和资源量评价是油气地质研究中需要解决的重要问题之一,其控制因素和动力学过程决定了二次生烃的资源量与分布。

在渤海湾盆地的苏桥、文留、曲堤、孤北和乌马营等构造带均已发现来自石炭系—二叠系煤系烃源岩的油气资源^[8-11],表明石炭系—二叠系是盆地深层重要的油气勘探层系^[12]。针对渤海湾盆地石炭系—二叠系煤系烃源岩二次生烃及其油气聚集特征研究已有30多年,前人对残余煤系烃源岩的分布、演化和生烃潜力进行评价,分析不同构造单元的二次生烃及其油气成藏条件,多数学者认为自始新世以来的二次生烃具有一定的油气成藏意义^[13-14];但是对于渤海湾盆地石炭系—二叠系煤系烃源岩的二次生烃起始点、二次生烃动力学过程、二次生烃规模及其评价方法等还需进一步深入研究,以便对研究区各构造单元进行深层油气资源预测。为此,笔者在总结前人研究成果及方法^[6,9-10,12]的基础上,认为二次生烃起始点确定、二次生烃动力学机制研究以及二次生烃有效性评价等问题应是渤海湾盆地石炭系—二叠系煤系烃源岩二次生烃研究的关键问题,对其进行深入探讨有助于渤海湾盆地深层油气资源的评价与勘探。

1 二次生烃研究进展

1.1 烃源岩发育与分布特征

渤海湾盆地石炭系—二叠系煤系烃源岩包括煤岩、炭质泥岩和湖相暗色泥岩。不同岩性烃源岩的地球化学特征存在明显差异,总体表现为有机显微组分以镜质组为主,较富氢,镜质组含量为40%~85%,惰质组次之,壳质组和腐泥组相对较少,但暗色泥岩中壳质组较多,例如临清拗陷石炭系—二叠系暗色泥岩的壳质组含量一般大于

15%^[15]。有机质丰度以煤岩最高,其有机碳含量为50%~70%,总烃含量为60~170 mg/g;炭质泥岩次之,其有机碳含量为10%~30%,总烃含量为3~50 mg/g;暗色泥岩的有机质丰度最低,其有机碳含量为6.0%,总烃含量为0.5~30 mg/g^[16-17]。有机质类型整体以Ⅲ型干酪根为主,含一定量的Ⅱ₂型干酪根^[11],表明研究区石炭系—二叠系煤系烃源岩具有良好的生烃潜力。

现今渤海湾盆地的隆起区、凸起区、低凸起区、斜坡带及洼陷带等不同构造单元内残留石炭系—二叠系煤系烃源岩的分布特征存在明显差异,其成熟度及热演化程度也具有显著差异(图1)。新生代以来的构造抬升运动,使隆起区和凸起区持续处于浅埋状态,烃源岩经历剥蚀和风化,未发生二次生烃,例如大城凸起石炭系—二叠系烃源岩的埋深小于1500 m,成熟度较低,镜质组反射率为0.5%~0.7%^[18-19]。低凸起区和斜坡带烃源岩则在构造沉降作用下处于较大埋深(约为3500~6000 m),受东营运动影响,自始新世以来共发生2期二次生烃,有机质热演化程度处于成熟—高成熟阶段,镜质组反射率主要为0.7%~1.2%,大部分烃源岩处于生油窗内,如文留地垒和孤北斜坡等^[17-18]。洼陷带烃源岩自新生代以来持续处于深埋状态,埋深普遍超过7000 m,最大埋深可达10000 m,有机质热演化程度处于过成熟阶段,镜质组反射率超过1.5%,发生二次生烃,可大量生气,如东濮凹陷的前梨园洼陷和莘县凹陷的禹城洼陷^[19]。

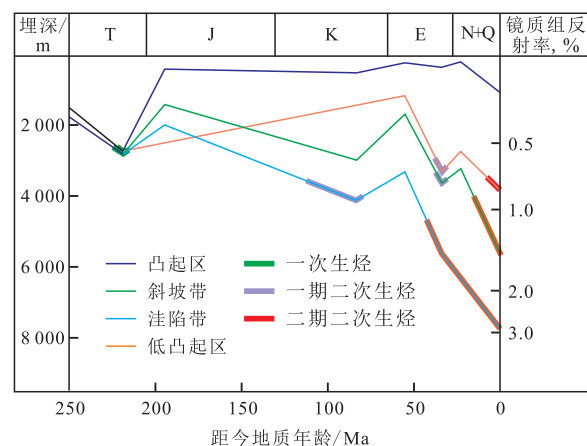


图1 渤海湾盆地不同构造单元二次生烃演化示意

Fig.1 Evolution diagram of secondary hydrocarbon generation within different structural units, Bohai Bay Basin

1.2 二次生烃研究方法

前人主要利用盆地模拟技术和热模拟实验开展针对渤海湾盆地石炭系—二叠系煤系烃源岩二次生烃的条件、过程、影响因素及动力学机制等研

究,并已取得丰富的研究成果。

1.2.1 盆地模拟技术恢复二次生烃史

针对盆地内残留发育二次生烃煤系烃源岩的低凸起区、斜坡带和洼陷带等构造单元,前人在恢复其构造史和埋藏史的基础上,结合各构造单元的古地温梯度和烃源岩地化特征差异,根据镜质组反射率剖面特征及盆地模拟技术恢复的热演化史和生烃史分析结果,研究石炭系一二叠系煤系烃源岩二次生烃的门限深度和起始成熟度等二次生烃条件。研究结果^[2,20-21]表明,同一类型构造单元或不同构造单元的烃源岩在新生代的二次生烃条件均存在差异(图1)。例如沧东凹陷孔西潜山低凸起区的二次生烃门限深度约为3 000 m,镜质组反射率约为0.8%^[2];沾化凹陷孤北潜山低凸起的二次生烃门限深度约为4 000 m,镜质组反射率约为0.8%^[20];武清凹陷苏桥一文安斜坡带的二次生烃门限深度约为3 500 m,镜质组反射率约为0.7%;东营凹陷洼陷带下伏石炭系一二叠系煤系烃源岩在埋深超过4 500 m才开始二次生烃,镜质组反射率约为1.0%^[20]。总体来看,由低凸起区、斜坡带至洼陷带,石炭系一二叠系煤系烃源岩的二次生烃门限深度逐渐增大(图1),但其二次生烃的起始成熟度则由于新近纪以前的热演化史差异而各不相同,不具有明显的规律,显示出石炭系一二叠系煤系烃源岩二次生烃起始点具有空间差异性。烃源岩在达到前次生烃中止成熟度后,仍需一定的补偿深度才能发生二次生烃,即存在迟滞效应^[22-23]。此外,石炭系一二叠系煤系烃源岩的二次生烃除受构造运动和地温梯度影响,还受岩浆侵入作用影响,导致局部地区受热异常,加速有机质热演化,发生二次生烃^[17,22,24-26]。

渤海湾盆地石炭系一二叠系煤系烃源岩达到二次生烃条件后生成的油气,若不能保存成藏,则对油气勘探没有意义;因此,烃源岩的二次生烃需与储层发育、圈闭形成及成藏作用相匹配,才利于形成具有工业价值的油气藏,称之为有效二次生烃^[19,27]。渤海湾盆地自新近纪以来处于持续沉降时期,应有利于现今残余烃源岩二次生成的油气聚集成藏,为有效二次生烃^[28-29](图1)。

1.2.2 热模拟实验研究二次生烃动力学机制

对烃源岩二次生烃的动力学研究主要借助于可反映地下实际温度和压力条件的热模拟实验。分别利用自然演化系列样品和人工制备样品进行二次生烃热模拟实验,以连续升温、程序升温 and 不同升温速率等不同的加热方式,分析不同起始成熟度样品在不同温度条件下的二次生烃热演化过程,

总结煤系烃源岩的二次生烃特征,揭示主要影响因素和生烃动力学机制。

不同升温速率的热模拟实验可以反映不同构造单元地温梯度差异对二次生烃的影响。实验结果显示,不同的升温速率对二次生烃的产率、碳稳定同位素值以及化学反应活化能等均有不同程度的影响。不同的升温速率控制了气态烃和液态烃的产率,例如低升温速率条件下气态烃累积产率的增幅要大于高升温速率条件下^[23,30],液态烃产率高峰的出现则随升温速率的增加,迟滞效应增强^[31],但是对气态烃和液态烃累积产率的变化趋势未产生影响。碳稳定同位素值也受升温速率的影响,在不同的热演化阶段,高、低升温速率条件下碳稳定同位素值发生不同的变化;例如当加热温度小于400 ℃时,高升温速率条件下甲烷碳同位素值重于低升温速率条件,而当加热温度高于400 ℃时,则高升温速率条件下甲烷碳同位素值轻于低升温速率条件^[23]。雷天柱等发现在低升温速率条件下有机质具有充足的时间可以缩聚形成超大基团,而高升温速率条件下则易使有机质中的中等分子链断裂,显示出温度条件除影响反应速率之外还可能改变二次生烃的路径^[32]。因此,二次生烃特征是由二次生烃母质本身的化学结构所决定,但是生烃反应的进程、速率和生烃产物碳稳定同位素值则明显受升温速率等外界因素的影响。

通过不同起始成熟度样品的热模拟实验,可以揭示不同的构造单元及二次生烃起始点对二次生烃动力学机制的影响。热模拟实验发现,在二次生烃过程中均存在生烃高峰期^[29],且相对于初次生烃,二次生烃高峰期存在不同程度的迟滞效应;随着二次生烃起始成熟度的升高,二次生烃的迟滞效应越显著^[33-34];同时C₂以上烃类的质量分数越低,表现出气体组成越干燥的特点,而油气比则呈现先增大后减小的特征^[35]。渤海湾盆地石炭系一二叠系煤系烃源岩的二次生烃过程一般可以划分为4个阶段,分别为残留烃释放阶段、热降解—中间产物积聚阶段、解聚—裂解阶段以及热裂解阶段;各阶段对应的化学反应活化能的变化趋势表现为降低—增高—降低—增高,化学反应活化能与二次生烃演化阶段的高度吻合,揭示出二次生烃受控于反应动力学的地球化学机制^[36-37]。在二次生烃过程中,随着热演化程度的增高,气态烃的累积产率不断增加,干燥系数则呈现出高一低—高的变化趋势;甲烷碳同位素值表现为先降低后增大的趋势,且转折点处镜质组反射率约为1.0%~1.3%,乙烷和丙烷碳

同位素值均表现为逐渐增大的趋势^[23,31]。利用动力学模型计算化学反应活化能,结果表明,煤系烃源岩二次生成气态烃的化学反应活化能也不一致;如二叠系煤岩甲烷和C₂—C₅气态烃的化学反应活化能高于泥岩,而石炭系则相反^[23],但整体随温度的升高和产率的增加,煤系烃源岩二次生烃的化学反应活化能不断增加^[31]。此外,二次生烃的总气态烃的化学反应活化能高于初次生烃的,导致液态烃的生成早于气态烃,且气态烃的产率低于初次生烃的;同时认为虽然二次生烃的甲烷的化学反应活化能高于初次生烃,但是由于初次生烃过程中C₂以上重烃生成较多,导致二次生烃干燥系数仍高于初次生烃的干燥系数^[31,34]。

1.3 二次生烃模式

前人主要从生烃模拟实验角度,建立不同起始成熟度的二次生烃模式,并存在以下不同的认识:①二次生烃与初次生烃是连续的过程^[35,38];②二次生烃与初次生烃是不连续的过程^[39];③二次生烃的起始成熟度不同,二次生烃模式也不同^[36,40],目前均对该认识比较认可。金强等进一步结合研究区不同构造单元的构造演化和生烃史特征,应用煤岩初次、二次生烃动力学研究成果,建立了5种二次生烃模式^[14]:隆起区中晚期不生烃模式(如鲁西隆起区)、凸起区晚期不生烃模式(如大城凸起)、低凸起区晚期成熟—高成熟生烃模式(如孤北区块,其气态烃产率超过60%)、斜坡带晚期成熟—高成熟生烃模式(如沈庄洼陷斜坡,其气态烃产率为28%~60%)、深洼带晚期过成熟生烃模式(如冠县凹陷,其气态烃产率高达85%)等;其中,斜坡带晚期成熟—高成熟生烃模式和深洼带晚期过成熟生烃模式均可提供丰富的二次生烃资源,是有利的二次生烃源岩灶,而低凸起区晚期成熟—高成熟生烃模式则次之。

2 二次生烃研究的关键问题

前人虽然对渤海湾盆地不同构造单元石炭系—二叠系残留煤系烃源岩的发育与分布特征、二次生烃条件、二次生烃动力学过程与机制以及二次生烃模式等进行了大量研究,并取得丰富的成果^[22,27,31,40];但是笔者认为在二次生烃条件及二次生烃资源评价中仍存在二次生烃起始点确定、二次生烃动力学机制研究和二次生烃有效性评价3个关键问题需要解决。

2.1 二次生烃起始点确定

由于构造演化的差异性,不同位置烃源岩初次生烃中止时的热演化程度和地质条件不同,必然导致不同构造单元二次生烃起始点存在显著差异(图1)。只有基于不同构造单元确定的二次生烃起始成熟度和地温梯度等地质条件,开展二次生烃动力学机制研究,对不同区带二次生烃资源的潜力评价和勘探开发具有实际意义。因此,二次生烃起始点的确定是开展二次生烃研究的基础问题和关键问题。

结合前人和前期研究成果^[2,14,27]认为,在构造演化解析的基础上,通过恢复烃源岩的生烃演化史来确定二次生烃的起始点。在对发育残留煤系烃源岩构造单元的构造史与埋藏史恢复的基础上,结合其古地温和古地温梯度差异,利用数值模拟技术开展不同构造单元烃源岩的热演化史和生烃史分析(图1)。在提高分析结果精度的基础上,确定不同构造单元在不同地温梯度条件下烃源岩超过前次生烃终止温度时的深度,即二次生烃门限深度,再利用不同构造单元不同构造时期烃源岩埋深与成熟度的拟合公式,计算出与二次生烃门限深度相对应的二次生烃起始成熟度,即可以确定二次生烃起始点。

2.2 二次生烃动力学机制研究

虽然通过构造史、埋藏史、热演化史和生烃史分析,可以确定二次生烃的期次、范围以及起始点,但仍需通过可模拟地下温度和压力条件的生烃热模拟实验开展二次生烃的过程、影响因素和模式等动力学机制研究。前人利用二次生烃热模拟实验^[14,22,31-32],在一定程度上反映出实际地质条件下不同起始成熟度和地温梯度下的二次生烃过程,但难以揭示不同性质有机质在不同地质条件下的二次生烃动力学过程以及定量评价二次生烃资源量,如低凸起区和斜坡带的二次生烃为油、气同时生成,洼陷带则以生成气态烃为主,导致不同构造单元二次生烃资源预测和潜力评价结果不准确,不能满足油气资源评价和勘探的要求。因此,只有明确不同构造单元不同烃源岩在特定地质条件下的二次生烃动力学机制,才能为定量评价二次生烃资源潜力和预测有利勘探目标区奠定可靠的理论基础,是深层煤系烃源岩二次生烃成因油气资源潜力评价的关键问题。

笔者认为应充分解析不同构造单元不同构造演化背景下二次生烃的地质条件和现今残留煤系

烃源岩的地球化学特征,在明确其二次生烃起始点的基础上,开展不同温度和压力条件下的二次生烃热模拟实验,准确揭示不同烃源岩的二次生烃动力学机制,进而建立具有实际指导意义的二次生烃模式。需注意的是,自新近纪以来由于东营运动的影响,一些低凸起区和斜坡带存在2期二次生烃,烃源岩中参与二次生烃的有机质性质不同,并且具有明显不同的二次生烃起始成熟度和中止成熟度,导致具有2期不同的二次生烃过程,开展生烃热模拟实验时应考虑研究区实际的生烃过程。因此,应在明确不同构造单元残留石炭系—二叠系煤系烃源岩有机质性质的基础上,开展基于不同构造单元不同的二次生烃起始成熟度、中止成熟度和地温梯度等地质条件下的生烃热模拟实验,分析不同烃源岩在不同二次生烃过程中参与油气生成的有机质性质,明确其二次生烃产物的组成和演化差异,并阐明煤系烃源岩在不同起始成熟度和升温速率条件下的二次生烃高峰期、迟滞效应、产率、碳稳定同位素值等演化规律(图2);结合不同产物的化学反应活化能和指数因子等动力学参数特征,揭示研究区石炭系—二叠系煤系烃源岩二次生烃的动力学机制,进而针对不同地质条件建立二次生烃模式,例如低凸起区成熟—高成熟阶段的二次生油(气)模式、深洼带的过成熟二次生气模式等,最终针对不同的构造单元进行准确的二次生烃资源评价。

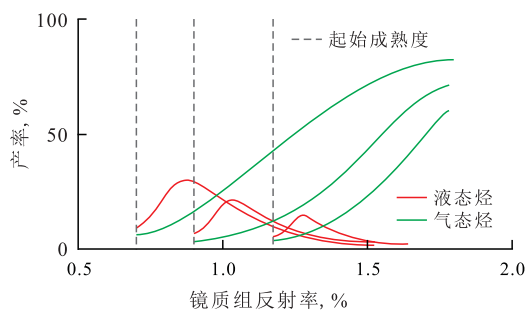


图2 不同起始成熟度对二次生烃的影响

Fig.2 Influence on secondary hydrocarbon generation from different initial maturity

2.3 二次生烃有效性评价

只有已进入二次生烃阶段、可生成具有工业价值的油气资源量,且与成藏地质条件形成良好匹配的二次生烃才是有效二次生烃。而如何从油气成因机理和油气地质条件的综合研究,实现二次生烃有效性评价是目前二次生烃研究中亟需解决的关键问题。目前通过生烃史分析可确定已进入二次生烃的构造单元,在局部地区利用经验公式可定性估算二次生烃门限深度、成熟度等参数,并依据残

留烃源岩的生烃特征和生烃动力学参数定性估算各构造单元的生烃强度、生烃量等有效性评价指标。综合研究区油气勘探成果来看,仅在局部地区实现了初步的二次生烃有效性评价,但油气资源评价效果不明显,难以满足渤海湾盆地石炭系—二叠系煤成油气藏勘探的需求。因此,进行准确的二次生烃有效性评价是预测有利二次生烃区带的关键,也是推动渤海湾盆地石炭系—二叠系煤成油气资源勘探进展的关键问题。

研究表明,自新生代以来渤海湾盆地的构造活动较为平缓,有利于二次生成的油气聚集成藏^[27],因此古近纪以来生烃量较大的二次油气生成作用是二次生烃有效性评价的重点研究对象^[19]。针对盆地内现今不同构造单元二次生烃起始点、持续时间和生烃量等的准确评价是二次生烃有效性评价的关键问题,例如较低的二次生烃起始成熟度和较高的现今热演化成熟度均有利于大规模的二次生烃(图2);针对上述关键问题,可在二次生烃起始点确定和二次生烃动力学机制研究的基础上得到有效解决。在地质条件分析和二次生烃动力学机制研究的基础上,选取合适的动力学模型,将各构造单元不同地质条件下的二次生烃模式应用于二次生烃潜力评价中,并准确计算不同构造单元的二次生烃量;根据二次生烃量的计算结果,确定是否能够达到聚集形成油气藏的规模,进而结合同期油气成藏地质条件的发育情况,进行不同构造单元的二次生烃有效性评价,预测有利的二次生烃目标区,为渤海湾盆地深层石炭系—二叠系二次生烃资源评价提供参考。

3 结论

基于渤海湾盆地二次生烃研究成果,结合存在的关键问题,认为今后研究区下伏石炭系—二叠系煤系烃源岩的二次生烃研究应主要针对3个方面:①在二次生烃研究中,研究区不同构造单元二次生烃起始点的准确确定依然是研究的重点;根据有机地球化学参数和构造演化特征,寻找能够有效、快速确定二次生烃起始点的方法和技术,是深入开展二次生烃研究亟需解决的问题。②完善二次生烃热模拟实验的各项条件,尽可能实现恢复或接近实际地下地质条件,并结合二次生烃的地质条件开展单因素、多因素组合生烃热模拟实验;着重加强对不同性质有机质、不同起始成熟度、可控制的压

力、不同矿物介质和侵入岩等条件下的二次生烃动力学机制研究,建立针对研究区不同构造单元具有油气资源评价和预测指导意义的二次生烃模式。③加强油气地质条件分析与生烃动力学机制研究在二次生烃有效性评价中的综合利用,将不同地质模型的二次生烃动力学模式准确地应用于研究区不同构造单元二次生烃资源量的定量计算中,完成二次生烃的规模化评价,建立精确的二次生烃有效性评价方法,准确预测研究区不同构造区带的有利二次生烃源岩灶。

参考文献:

- [1] 郑礼全,李贤庆,钟宁宁.华北地区上古生界煤系有机质热演化与二次生烃探讨[J].中国煤田地质,2001,13(4):16-19.
Zheng Liqian, Li Xianqing, Zhong Ningning. Discussion on thermal evolution and secondary hydrocarbon generation of organic matter from Upper Paleozoic coal measures in Northern China[J]. Coal Geology of China, 2001, 13(4): 16-19.
- [2] 朱炎铭,秦勇,范炳恒,等.黄骅拗陷歧古1井古生界烃源岩的二次生烃演化[J].地质学报,2001,75(3):426-431.
Zhu Yanming, Qin Yong, Fan Bingheng, et al. The second hydrocarbon-generation evolution of Palaeozoic source rocks in Qigu-1 well in the Huanghua Depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3): 426-431.
- [3] 郝蜀民,李良,张威,等.鄂尔多斯盆地北缘石炭系-二叠系大型气田形成条件[J].石油与天然气地质,2016,37(2):149-154.
Hao Shumin, Li Liang, Zhang Wei, et al. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 149-154.
- [4] Belaid A, Krooss B M, Littke R. Thermal history and source rock characterization of a Paleozoic section in the Awbari Trough, Murzuq Basin, SW Libya [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(3): 612-632.
- [5] Dick H, Meloche J D, Gunther P. Source-rock geochemistry and hydrocarbon generation in the Jeanne d'arc basin, Grand banks, offshore eastern Canada [J]. Journal of Petroleum Geology, 1989, 12(1): 51-68.
- [6] Galushkin Y, Sak M. Generation of hydrocarbons in the burial history of Silurian formations in the Libyan part of the Ghadames Basin [J]. Geochemistry International, 2014, 52(10): 857-867.
- [7] Hill R J, Tang Y, Kaplan I R. Insights into oil cracking based on laboratory experiments [J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(12): 1651-1672.
- [8] 梁宏斌,降栓奇,杨桂茹,等.冀中拗陷北部天然气类型、成藏模式及成藏条件研究[J].中国石油勘探,2002,7(1):17-33.
Liang Hongbin, Xiang Shuanqi, Yang Guiru, et al. Study on natural gas type, reservoir forming models and conditions in north Jizhong depression [J]. China Petroleum Exploration, 2002, 7(1): 17-33.
- [9] 王力.济阳和临清拗陷深层天然气成因鉴别与生成模式研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2008.
Wang Li. Genetic identification and generation models of deep natural gas in Jiyang and Linqing super-depression [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.
- [10] 许化政,周新科.文留地区石炭-二叠纪煤系生烃史及生烃潜力[J].石油与天然气地质,2004,25(4):400-407,421.
Xu Huazheng, Zhou Xinke. Hydrocarbon-generating potential and history of Carboniferous-Permian coal measure strata in Wenliu area [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 400-407, 421.
- [11] 于岚.临清拗陷东部石炭-二叠系煤系烃源岩特征及生烃史[J].新疆石油天然气,2006,2(3):16-21.
Yu Lan. The history of hydrocarbon generation and the characterization of coal-measure source rock from the Carboniferous-Permian in the eastern part of Linqing depression [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2006, 2(3): 16-21.
- [12] 康玉柱,凌翔.中国松辽-渤海湾盆地油气勘探老区资源潜力分析[J].天然气工业,2011,31(12):7-10.
Kang Yuzhu, Ling Xiang. Hydrocarbon resource potential of mature fields in the Songliao and Bohai Bay basins [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 7-10.
- [13] 李荣西.三次生烃作用——以济阳拗陷石炭-二叠系烃源岩为例[J].地球学报,2003,24(z1):129-133.
Li Rongxi. Three times of hydrocarbon generation: A case study of Jiyang Depression [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(z1): 129-133.
- [14] 金强,宋国奇,王力.胜利油田石炭-二叠系煤成气生成模式[J].石油勘探与开发,2009,36(3):358-364.
Jin Qiang, Song Guoqi, Wang Li. Generation models of Carboniferous-Permian coal-derived gas in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 358-364.
- [15] 王艳.渤海湾盆地石炭-二叠系烃源岩特征与评价[D].北京:中国地质大学(北京),2006.
Wang Yan. Characteristics of Carboniferous-Permian hydrocarbon source rocks in the Bohai Bay Basin and their evaluation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [16] 谯汉生,方朝亮,牛嘉玉,等.渤海湾盆地深层石油地质[M].北京:石油工业出版社,2002.
Qiao Hansheng, Fang Chaoliang, Niu Jiayu, et al. Petroleum geology of the deep zone in Bohai Bay Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [17] 朱建辉,胡宗全,吕剑虹,等.渤海湾盆地济阳、临清拗陷上古生界烃源岩生烃史分析[J].石油实验地质,2010,32(1):58-63.
Zhu Jianhui, Hu Zongquan, Lü Jianhong, et al. Hydrocarbon generation history of upper Paleozoic source rocks of Jiyang and Linqing depressions, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(1): 58-63.
- [18] 张松航,梁宏斌,唐书恒,等.冀中拗陷东北部石炭-二叠系烃源岩热史及成熟史模拟[J].高校地质学报,2014,20(3):454-463.
Zhang Songhang, Liang Hongbin, Tang Shuheng, et al. Simulation of the thermal and maturity history of Carboniferous-Permian

- source rock in the northeast of Jizhong Depression [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2014, 20(3): 454-463.
- [19] 金强, 宋国奇, 梁宏斌, 等. 渤海湾盆地源于石炭系—二叠系的煤成气成因特征和潜力分析[J]. *地质学报*, 2009, 83(6): 861-867.
- Jin Qiang, Song Guoqi, Liang Hongbin, et al. Characteristics of Carboniferous-Permian coal-derived gas in the Bohai Bay Basin and their implication to exploration potential [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(6): 861-867.
- [20] 李政. 济阳坳陷石炭系—二叠系烃源岩的生烃演化[J]. *石油学报*, 2006, 27(4): 29-35.
- Li Zheng. Hydrocarbon-generation evolution of Permian-Carboniferous source rock in Jiyang Depression [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 27(4): 29-35.
- [21] 倪春华, 包建平, 周小进, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷胡古2井天然气地球化学特征与成因[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(6): 764-769.
- Ni Chunhua, Bao Jianping, Zhou Xiaojin, et al. Geochemical characteristics and types of natural gas from well Hugu2 in the Dongpu Sag of Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(6): 764-769.
- [22] 胡晓庆, 金强, 王秀红, 等. 烃源岩二次生烃热模拟实验研究进展[J]. *断块油气田*, 2009, 19(3): 8-10.
- Hu Xiaoqing, Jin Qiang, Wang Xiuhong, et al. Study on thermal modeling for secondary hydrocarbon generation of source rock [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2009, 19(3): 8-10.
- [23] 郭春清. 沾化凹陷孤北潜山中、古生界煤系烃源岩特征及其煤成气判别标志研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- Guo Chunqing. Characteristics of coal-measures source rocks and the identification marks of their coal gases in the Mesozoic and Paleozoic erathern of Gubei buried hill, Zhanhua Sag [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [24] 范昆, 张林炎, 黄臣军, 等. 济阳坳陷上古生界烃源岩二次生烃特征[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(1): 23-28.
- Fan Kun, Zhang Linyan, Huang Chenjun, et al. Secondary hydrocarbon-generation characteristics of upper Paleozoic source rock in Jiyang depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(1): 23-28.
- [25] 万丛礼, 金强, 李钜源, 等. 裂谷盆地岩浆活动控制油气概论[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(1): 1-5.
- Wan Congli, Jin Qiang, Li Juyuan, et al. Outline on magmatic activities controlling oil-gas theory in rift basins [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(1): 1-5.
- [26] 方旭庆. 沾化凹陷凸起带旋扭运动及其与新近系油气聚集的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(2): 39-44, 65.
- Fang Xuqing. Rotation-shearing movement and its relationship with hydrocarbon accumulation of Neogene in uplift belts of Zhanhua sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(2): 39-44, 65.
- [27] 陈武珍, 陈红汉, 李文涛, 等. 临清坳陷东部石炭—二叠系二次生烃差异性研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(1): 179-188.
- Chen Wuzhen, Chen Honghan, Li Wentao, et al. Study on differentiation of secondary hydrocarbon generation for the Carboniferous-Permian source rocks in the eastern Linqing Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1): 179-188.
- [28] 耿春雁, 王玉林, 刘华. 济阳地区煤系有机质二次生烃特征及勘探思路[J]. *新疆石油天然气*, 2007, 3(1): 29-33.
- Geng Chunyan, Wang Yulin, Liu Hua. Characteristics of secondary hydrocarbon generation of organic matter in coal-measure and exploration concept in Jiyang area [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2007, 3(1): 29-33.
- [29] 吕剑虹, 缪九军, 张欣国, 等. 济阳—临清东部地区石炭—二叠系煤系烃源岩二次生烃研究[J]. *江苏地质*, 2008, 32(2): 102-108.
- Lu Jianhong, Miao Jiujun, Zhang Xinguo, et al. Study on secondary hydrocarbon genesis of hydrocarbon rocks of Carboniferous to Permian coal series in east Jiyang to Linqing [J]. *Jiangsu Geology*, 2008, 32(2): 102-108.
- [30] Li E, Pan C, Yu S, et al. Hydrocarbon generation from coal, extracted coal and bitumen rich coal in confined pyrolysis experiments [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 64: 58-75.
- [31] 李林. 石炭—二叠系煤系烃源岩二次生烃模拟实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- Li Lin. Thermal simulation on secondary hydrocarbon generation from the Permo-Carboniferous coal-measure source rocks [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [32] 雷天柱, 夏燕青, 张瑞, 等. 二次生烃过程中升温速率对生烃途径的影响——以鄂尔多斯烃源岩生烃动力学研究为例[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(2): 97-99.
- Lei Tianzhu, Xia Yanqing, Zhang Rui, et al. Effects of heating rate on hydrocarbon generation process in hydrocarbon regeneration: a case investigation on hydrocarbon generation kinetics of source rocks from the Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(2): 97-99.
- [33] 关德师, 王兆云, 秦勇, 等. 二次生烃迟滞性定量评价方法及其在渤海湾盆地中的应用[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 533-538.
- Guan Deshi, Wang Zhaoyun, Qin Yong, et al. Quantitative evaluation method of secondary hydrocarbon generation and its application in Bohai Bay basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 533-538.
- [34] 金强, 王秀红, 胡晓庆, 等. 煤岩初次和二次生烃动力学及其对沾化凹陷孤北天然气成因的解释[J]. *地球化学*, 2008, 37(3): 239-244.
- Jin Qiang, Wang Xiuhong, Hu Xiaoqing, et al. Kinetics of primary and secondary generation of coal-derived gases and its application to genesis of natural gases found in Gubei area, Zhanhua Depression [J]. *Geochimica*, 2008, 37(3): 239-244.
- [35] 官色, 李剑, 张英, 等. 煤的二次生烃机理探讨[J]. *石油实验地质*, 2002, 24(6): 541-544.
- Gong Se, Li Jian, Zhang Ying, et al. Discussion on the secondary hydrocarbon-generation mechanism of coal [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(6): 541-544.
- [36] 秦勇, 张有生. 煤中有机质二次生烃迟滞性及其反应动力学机制[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2000, 25(3): 278-282.