

渤海湾盆地烃源岩有机-无机相互作用对生烃的影响

李 威, 李友川, 郭 刚, 杨树春

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 以渤中 19-6 气田为例, 以烃源岩为研究对象, 开展有机-无机相互关系研究, 厘清渤中 19-6 构造带烃源岩特征及有机-无机相互作用对生烃成气的影响。30 余口井泥岩样的有机地球化学、无机地球化学、古生物等分析结果表明, 渤中 19-6 构造带及周缘次洼古生物以被子类和裸子类高等植物为主, 形成了以腐殖型无定形体占绝对优势的 II₂ 型烃源岩; 渤中 19-6 构造带黏土矿中伊利石占绝对优势, 在黏土矿表面通过物理吸附和化学键作用富集了大量腐殖型无定形体并经加氢改造, 后期在伊利石的影响下, 烃源岩主要发生脱羧反应, 热裂解形成大量短链烃类, 产烃量大大增加, 进而富集形成现今凝析油气广泛分布的特征。

关键词: 渤中凹陷; 烃源岩类型; 伊利石; 有机-无机相互作用

中图分类号: TE122.14

文献标志码: A

Effects of Organic-inorganic Interaction on Hydrocarbon Generation of Source Rocks in Bohai Bay Basin

LI Wei, LI Youchuan, GUO Gang, YANG Shuchun

(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: In this paper, taking the Bozhong 19-6 gas field as an example and source rocks as the research object, the organic-inorganic interaction is studied to clarify the characteristics of source rocks in the Bozhong 19-6 structural belt and the effect of organic-inorganic interaction on the hydrocarbon generation and gas generation. Mudstone samples from more than 30 wells are selected for organic geochemistry, inorganic geochemistry, paleontology and other series analysis. The results show that, the source rocks in the study area are mainly partial humic organic matter, the paleontology is dominated by the higher plants of angiosperms and gymnosperms, and the humic amorphous forms are the dominant kerogen. The illite is the dominant clay mineral

in the Bozhong 19-6 structural belt. A large number of humic amorphous forms have been enriched by physical adsorption and chemical bond bridging, and the organic matter is hydrogenated by clay minerals. In the late period, under the effect of illite, the source rocks mainly undergo decarboxylation reaction and thermal cracking to form a large number of short-chain hydrocarbons. Under the action of illite, the hydrocarbon production increases greatly, and then enriches, forming the wide distribution of condensate oil and gas.

Keywords: Bozhong depression; types of source rocks; illite; organic-inorganic interaction

渤海湾盆地渤中凹陷超千亿方的渤中 19-6 凝析气田的发现突破了渤海湾盆地深层-超深层的天然气的勘探, 揭开了东部富油型裂陷盆地深层天然气的勘探的序幕^[1], 重新认识了裂谷盆地深层的资源潜力^[2-8]。学者们对渤中 19-6 气田天然气类型和来源进行了研究。按母质类型渤中 19-6 气田天然气可分为腐殖型气、腐殖腐泥型气、腐泥型气或者偏腐殖型气, 在来源方面渤中 19-6 气田天然气属于沙河街组烃源岩或者东营组和沙河街组混合烃源岩^[2-6]。已有研究在来源方面认识差异不大, 但是在类型上认识差异较大, 原因主要是, 对区域烃源岩特征及有机质来源和演化缺乏系统研究。因此, 以烃源岩为研究对象, 以烃源岩特征及有机质与无机矿物之间的相互作用为切入点, 探讨渤海湾盆地天然气形成的内在机理。

1 地质概况

渤中凹陷位于渤海湾盆地中东部, 面积近 1×10^4 km², 是渤海海域面积最大的二级构造单元。渤

收稿日期: 2022-03-22

第一作者: 李 威, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为地球化学与油气成藏。

E-mail: liwei173@cnooc.com.cn



论
文
拓
展
介
绍

中19-6气田位于渤中凹陷西南部(见图1),其北部、西部和东部分别为沙垒田凸起、埕北低凸起和渤南低凸起,气田周边为曹妃甸18-2油田、渤中13-1油田、渤中21—渤中22含气构造带^[9]。

渤中凹陷潜山地层在纵、横向上分布变化较大,由北部的中生界、下古生界和太古界地层逐渐过渡到南部的太古界,上覆新生界厚度可达4 500 m,发

育古近系孔店组、沙河街组和东营组,新近系馆陶组和明化镇组以及第四系^[4-6]。洼陷中发育沙三段、沙一段、东三段3套烃源岩。渤中19-6气田周缘各次洼中3套烃源岩的有机质丰度达到了好—最好的级别,其中沙三段是渤中19-6凝析气田的主力烃源岩层,超覆于低潜山和砂砾岩上或通过大断层断面直接接触^[1-2]。

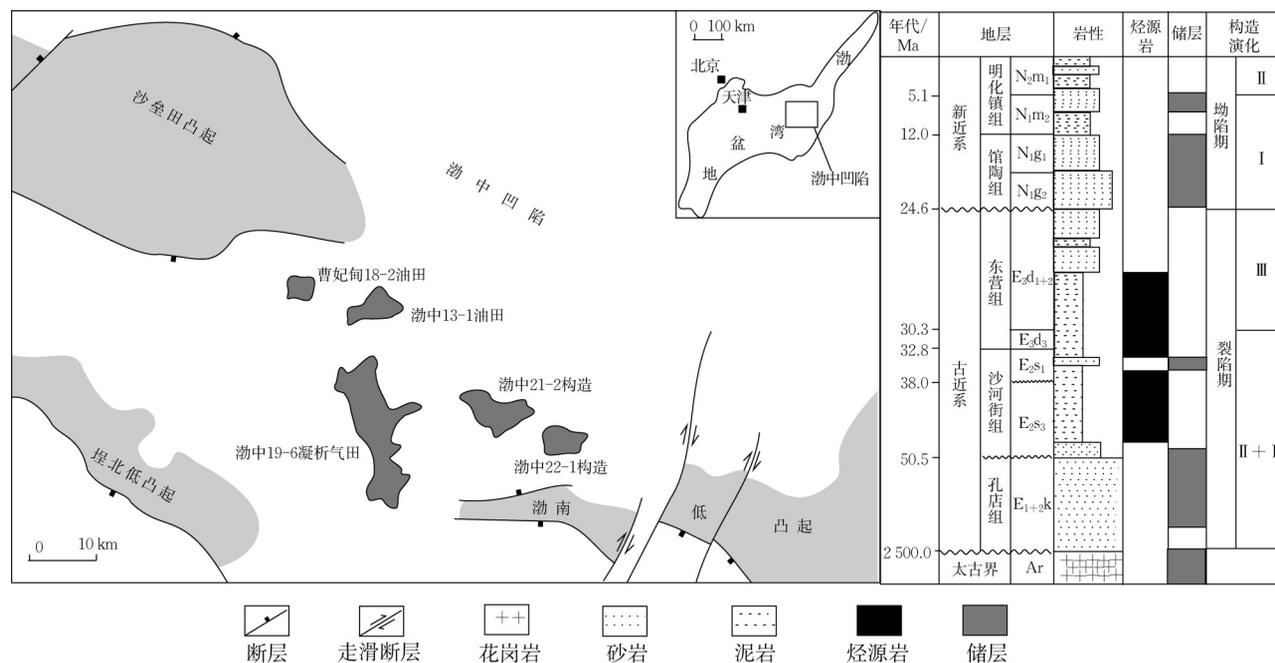


图1 渤中19-6凝析气田位置
Fig.1 Location of Bozhong 19-6 condensate gas field

2 烃源岩特征

2.1 烃源岩地球化学特征

利用热解数据对渤中19-6构造带及周缘次洼的烃源岩样品进行类型分析。3套烃源岩类型分布如图2所示。东三段烃源岩样品最多,类型分布较广,不同次洼的特征有所差异,其中渤中中洼、渤中西南洼、黄河口西洼部分样品类型好,属于I型烃源岩,渤中19-6构造带和南洼主要为II型烃源岩;沙一段烃源岩样品数较少,但整体类型较好,主要属于I~II₁型,在南洼局部地区烃源岩发育为II₂型;沙三段烃源岩分布较集中,以II₁~II₂型烃源岩为主,不同构造带分布特征有所差异,其中渤中19-6构造带烃源岩II₂型占比较大,渤中南洼烃源岩主要集中在II₂型,黄河口西洼烃源岩类型较好,I~II₁型占比较大,渤中西南洼烃源岩以II₁为主。

研究区东三段、沙一段、沙三段烃源岩在萘烷系

列中均发育有奥利烷。由图3可知,奥利烷普遍发育,奥利烷指数分布在0.1以上,表明3套烃源岩沉积期间一直存在以被子植物为主的高等植物来源^[10];在甾烷系列中,规则甾烷C₂₇/C₂₉色质参数值接近于1,同样说明高等植物是重要的有机质来源,也是构成烃源岩的主要组成部分^[10-11]。

2.2 烃源岩古生物特征

对研究区古生物分层位进行统计,从古生物质量分数来看(见图4),被子类占绝对优势,3套烃源岩中被子类平均质量分数都在40%以上、裸子类在30%左右、藻类在20%左右,这说明高等植物是构成研究区各套烃源岩的主要有机质。

利用古生物、热解、族组分等系列资料,对烃源岩进行垂向解剖,如图5所示。图5中,TOC表示总有机碳、S₁₊₂表示热解烃、HI表示氢指数、TI表示类型指数。垂向上自上而下有机碳、氯仿沥青A明显增大,产油潜力、热解烃等都有增大的趋势;从中生

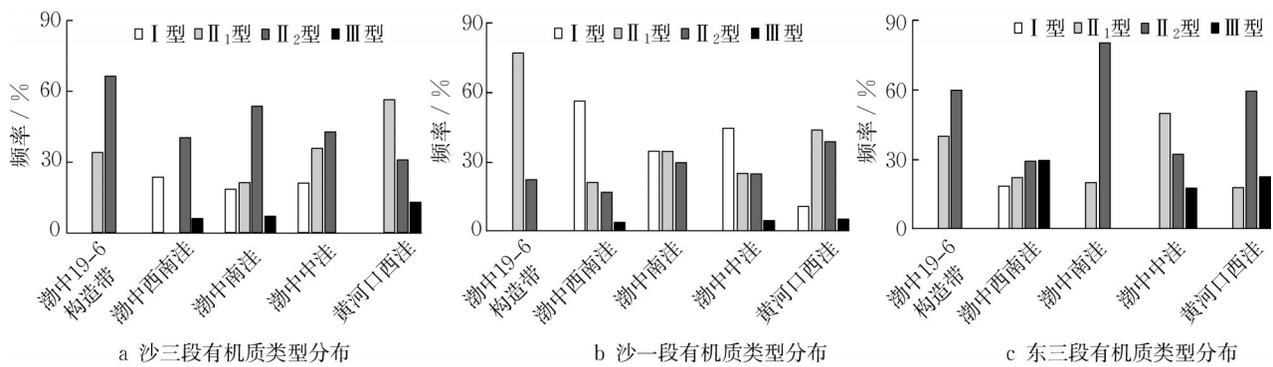


图 2 研究区不同层段烃源岩类型分布

Fig.2 Distribution of source rock types of different intervals in the study area

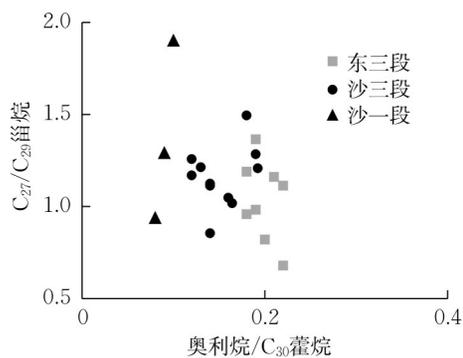


图 3 研究区烃源岩地球化学参数分布

Fig.3 Distribution of geochemical parameters of source rocks in the study area

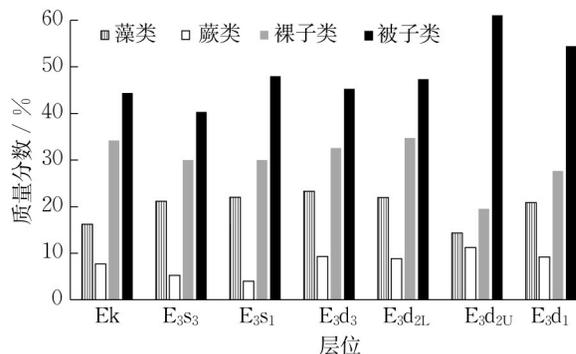


图 4 渤中 19-6 构造带孢粉分析图

Fig.4 Palynological analysis of source rocks in Bozhong 19-6 structural belt

物的分布来看,自上而下均表现出被子类、裸子类等的高丰度特征,其中被子类质量分数分布在 40%~60% 之间,裸子类质量分数分布在 20%~40% 之间,而藻类在古生物中的质量分数较小,占比普遍低于 20%,蕨类质量分数也较小,尤其是沙河街组基本不发育蕨类。结合前文中奥利烷的普遍发育,说明高等植物尤其是被子植物是构成研究区烃源岩的重要有机质;从垂向上各参数对比来看,有机质丰度指

标 TOC 与 4 类古生物的质量分数似乎没有很明显的关系,说明原生有机质虽然是形成烃源岩的物质基础,但是烃源岩在沉积埋藏后经历了明显的次生作用,即成岩作用中微生物活动及黏土矿物对烃源岩进行了明显的改造。

对研究区烃源岩进行显微观察,将各组分进行分类统计。通过显微组分观察发现,烃源岩以腐殖型无定形体为主,说明微生物对烃源岩有机质进行了明显的改造,形成了现今主要为 II₁~II₂ 型有机质的烃源岩。

2.3 烃源岩黏土矿物特征

黏土矿物是烃源岩中重要的组成部分,对有机质沉积、保存、烃源岩形成等均具有重要作用。目前,以泥岩为研究对象,开展有机-无机相互关系的研究越来越被重视。为了对渤中 19-6 构造带烃源岩黏土矿物有更清晰的认识,将研究区泥岩与周围的渤南洼陷、黄河口凹陷、沙南凹陷、垦利凹陷进行对比。从图 6 可见,研究区黏土矿物以伊利石为主,远高于周围凹陷泥岩中伊利石的质量分数;研究区垂向上不同深度泥岩样品中均不发育蒙皂石,自上而下伊利石具有逐渐增高的趋势,其中东一段泥岩中黏土矿物伊利石质量分数不到 20%,东二段泥岩中伊利石质量分数在 40% 左右,东三段泥岩中伊利石质量分数在 60% 以内,沙一段泥岩中伊利石质量分数在 70% 左右,沙三段泥岩中伊利石质量分数大于 90% (见图 6)。

伊利石按成因可分为原生和自生 2 种类型。原生伊利石是与陆源碎屑颗粒一起沉积的伊利石,主要受沉积物源和构造条件控制,一般而言,物源以变质岩为主,泥岩或砂岩中的泥质往往富含伊利石;在强烈的造山带,由于陆源区快速抬升、剥蚀,经历风化作用时间很短,黏土矿物组成往往富含伊利石^[12]。

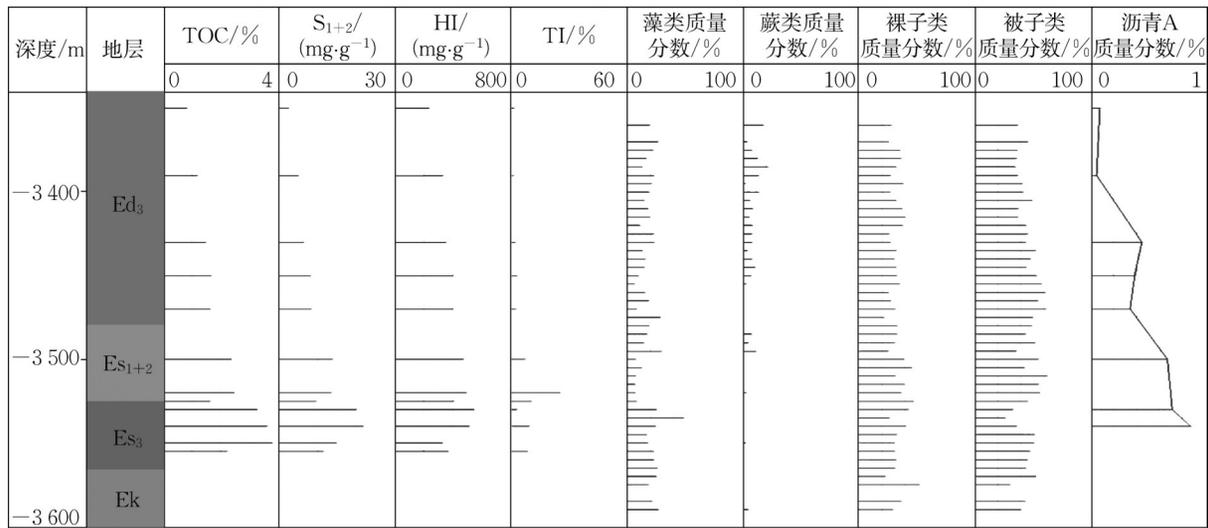


图5 研究区BZ19-A井烃源岩地球化学综合柱状图

Fig.5 Comprehensive geochemical histogram of source rocks of well BZ19-A in the study area

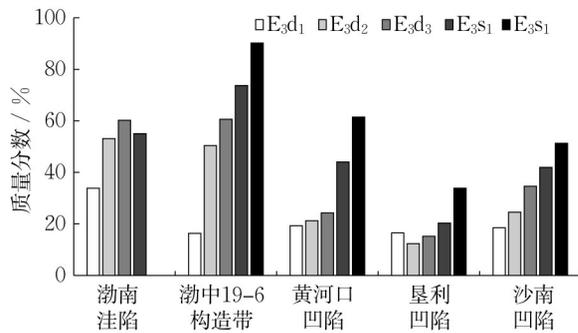


图6 渤海海域南部黏土矿物伊利石分布

Fig.6 Illite mineral distribution in the southern Bohai Sea

研究区位于渤海海域西南部,自下而上发育孔店组、沙四段、沙三段、沙一二段、东营组、馆陶组、明化镇组等地层,古近纪地层发育完整,说明研究区并非处于强烈的造山带环境。由图7可见,伊利石与泥岩深度具有明显的相关性,呈现有规律的变化,说明研究区主要为自生伊利石。自生伊利石是成岩期形成的伊利石,按物质来源可分为蒙脱石转化型、高岭石转化型和直接结晶型3种类型。直接结晶型发育的条件主要是外来富钾高温流体的加入,伊利石的分布与地层埋藏史无直接关系,主要受外来流体的波及范围控制。从伊利石与深度的变化规律来看,伊利石随地层埋深有规律地变化,判断研究区不发育直接结晶型伊利石。研究区垂向上不同深度均不发育蒙脱石,但是发育一定质量分数的伊蒙混层。伊利石与高岭石质量分数随深度变化,两者呈明显的负相关性,但伊利石与伊蒙混层质量分数随深度的变化呈一定程度的负相关性,这表明研究区伊利石

主要为高岭石转化而来,部分由蒙脱石转化而来。

从高岭石、绿泥石、伊利石垂向变化关系来看(见图7),黏土矿物质量分数变化可以划分为以下3个阶段:2 000 m以上基本未发生变化,可以代表原生沉积物,为第一阶段;2 000~3 000 m内为第二阶段,高岭石、绿泥石大量富集,质量分数由不到10%增加至近30%,伊利石质量分数增加10%左右,伊蒙混层质量分数减小,由80%左右降至30%左右,表明伊蒙混层转化为高岭石、绿泥石等矿物;3 000 m以下为第三阶段,伊利石质量分数急剧增至100%,高岭石、绿泥石、伊蒙混层质量分数减小至零,表明高岭石、绿泥石、伊蒙混层转化为伊利石。

3 烃源岩有机-无机相互作用

随着埋深增加伊蒙混层大量脱水,在不同的阳离子类型和浓度下,蒙脱石可向不同的黏土矿物转化。研究表明,高岭石在70~100℃的酸性环境下稳定,伊利石主要在富K⁺环境下大量存在,绿泥石在富含水的酸、碱条件下均可形成^[12-13]。按照地温梯度计算,埋深在2 000~3 000 m内,研究区地温在60~110℃时,伊蒙混层大量脱水,有机质释放大量有机酸,流体环境主要为酸性,H⁺浓度过大而达不到伊利石结晶的K⁺/H⁺浓度比值范围,以形成高岭石为主;在酸性条件下,大量H⁺参与,伊蒙混层中蒙脱石溶解形成绿泥石,由于2种矿物晶体形态和大小不同,转化过程中,一半蒙脱石溶解,即1.0 mol蒙脱石可转化为0.5 mol绿泥石,转化所需的OH⁻来源于

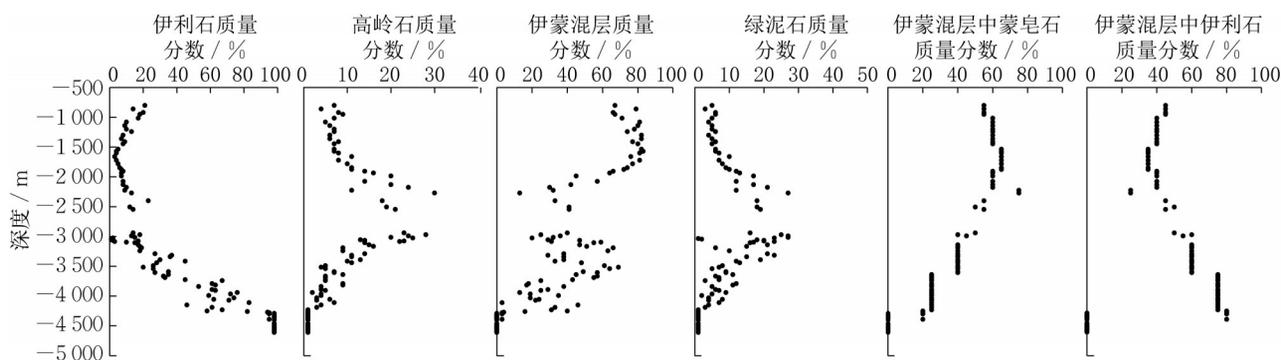


图7 黏土矿物垂向分布特征

Fig.7 Vertical distribution characteristics of clay minerals

水($H_2O \rightarrow OH^- + H^+$),随着反应的进行, H^+ 逐渐富集,反应体系pH值逐渐降低^[12-14]。换言之,在该阶段,黏土矿物发生脱水作用,黏土矿物表面吸附水含量的减小提高了表面阳离子对吸附的极化能力,进而提高水的离解常数和黏土矿物的催化活性,也促使有机质释放大量有机酸,环境偏酸性富含 H^+ ,黏土矿物一方面活性激发,另一方面在转化过程中发生溶解,泥岩中孔隙增加^[12-14]。

前文对研究区有机质来源进行了统计分析,主要以陆生植物为主,陆生植物沉积埋藏后烃源岩形成过程主要发生黏土矿物第二阶段即早成岩阶段,该阶段温度为 $60 \sim 110^\circ C$,微生物大量发育,微生物作用下高等植物降解和转化,一部分能够保留其生物形态,一部分则在土壤中形成腐殖质,以无定形的形态保存^[15-19]。从研究区显微组分分析来看,主要为腐殖型无定形体。在酸性介质条件下,腐殖型无定形体不仅可以与黏土矿物发生表面结合,还可以通过阳离子键桥(羟基)结合,或者通过酰胺基与阳离子型有机化合物电价结合,同时伊蒙混层转化为绿泥石过程中,溶解作用产生大量孔隙,促使更多的腐殖质通过成键的方式参与黏土矿物层间和表面的定向排列,大大增强了有机分子的稳定性,增强了抗生物降解能力。因此,被无机矿物吸附及大分子有机质封装的无定形有机质能够较好地保存下来^[15-21]。从黏土矿物与烃源岩参数的关系图(见图8a、b、c)可以看出:绿泥石质量分数、高岭石质量分数均与HI有明显的正相关性。随着转化程度的加大, H^+ 富集作用下烃源岩具有明显的富氢效应,大大改造了烃源岩品质。黏土矿物绿泥石、高岭石比表面积为 $15 m^2 \cdot g^{-1}$,而伊利石比表面积为 $30 m^2 \cdot g^{-1}$,在伊蒙混层、绿泥石、高岭石转化为伊利石过程中,比表面积增加,吸附作用变强,可显著增加有机质吸附,从25

$kg \cdot t^{-1}$ 左右增加至 $60 kg \cdot t^{-1}$ 左右^[14],表现为随着伊利石的增加,腐殖型无定形体显著增加(见图8c),显著提高了泥岩中有机质丰度,即伊利石越高,总有机碳越高(见图8d)。

在酸性泥炭中(pH值为 $4.5 \sim 6.0$),微生物可以分泌出的生物酶,以及通过分泌胞外聚合物(EPS)来提供吸附场所,两者共同促进藿烷向 $C_{31}\alpha\beta$ 藿烷转化^[22]。研究区3套烃源岩 $C_{31}\alpha\beta$ 藿烷/ C_{30} 藿烷色质参数值大于0.5,远高于渤海海域其他地区,这表明研究区烃源岩成岩环境以酸性为主,并发育大量的微生物。

总之,在泥岩黏土矿物演化的第二阶段,泥岩埋深在 $2000 \sim 3000 m$,成岩环境主要是酸性环境,该环境及温压条件促进黏土矿物大量脱水、活性增强、 H^+ 富集、微生物发育,有机质加氢改造作用明显,同时与黏土矿物大量吸附结合,通过键能作用,大大增强了有机质抗生物降解作用。

在黏土矿物质量分数变化第三阶段,泥岩埋深达到 $3000 m$ 以下深度,地层已基本处于封闭状态,前期的酸性环境及黏土矿物转化为高岭石、绿泥石等,为后期的伊利石化提供物质基础。该阶段,前期酸性环境下由黏土矿物脱水作用而储存大量水并形成大量的有机酸,溶解钾长石等含钾矿物,达到足够高的 K^+/H^+ 浓度比值,并且温度超过 $110^\circ C$,大大克服了伊利石的成核动力学屏障,自生伊利石的结晶速率明显增加,表现为随着深度增加,伊利石急剧增加^[23]。伊利石为 $2:1$ 型层状硅酸盐,矿物表面具有暴露在晶体边角上的具有八面体配位特征的由 Al^{3+} 或 Fe^{3+} 形成的L酸中心^[12-15],L酸中心对有机质的脱羧反应具有良好的催化活性。有机质脱羧时,此位置上的 Al^{3+} 或 Fe^{3+} 从吸附的有机分子中得到一个电子,而羧酸失去一个 CO_2 形成自由基,自由基进一步

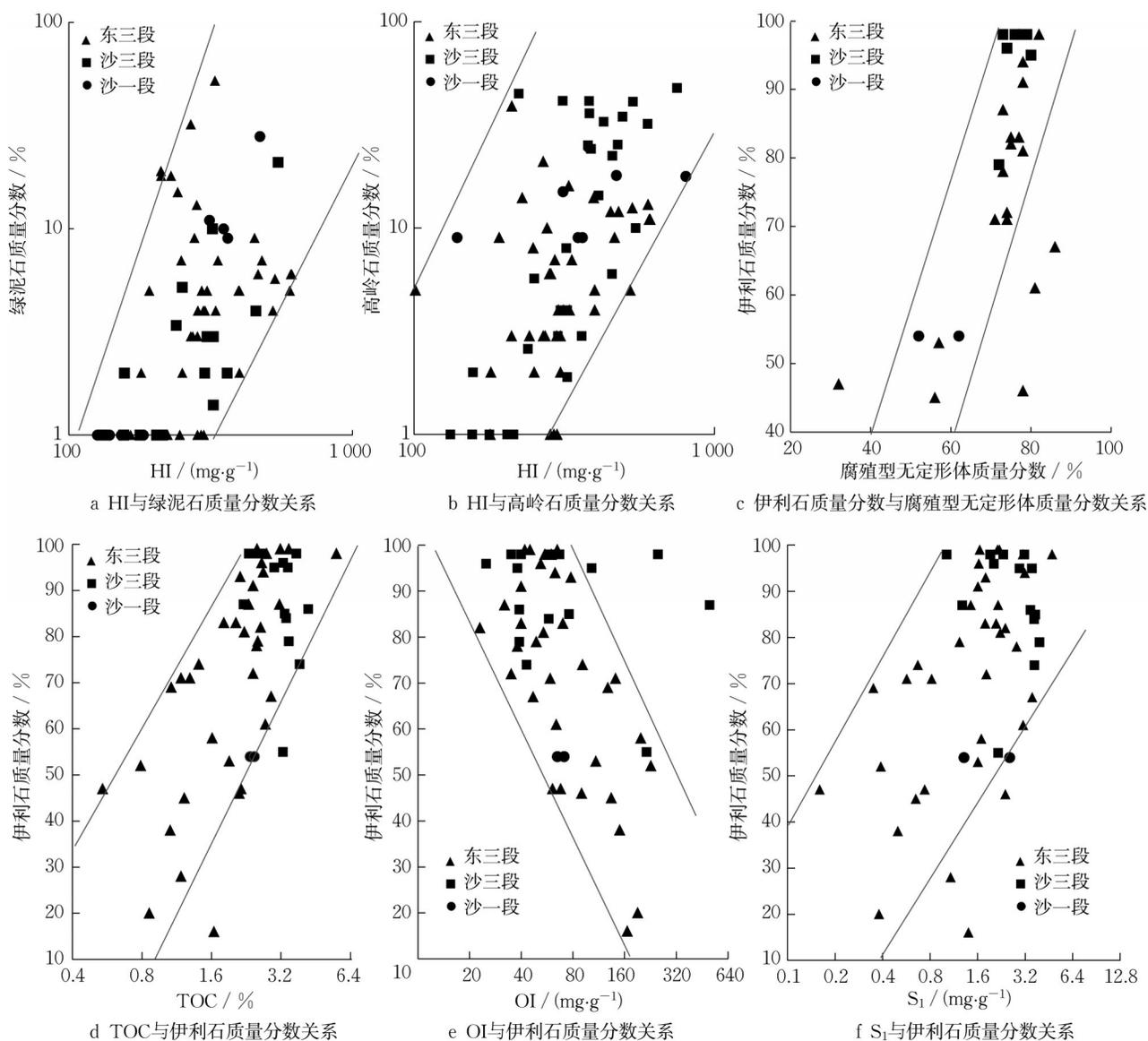


图8 渤中19-6构造带烃源岩有机-无机相互作用关系

Fig.8 Organic-inorganic interaction of source rocks in Bozhong 19-6 structural belt

发生重排反应,导致C—C键的断裂,生成键长较短的游离烃^[13-16]。从图8e可以观察到:随着伊利石的增加氧指数(OI)显著下降,代表伊利石促进脱羧基反应,丢失大量O原子,形成 CO_2 ;大量的较短键长的游离烃在伊利石表面吸附富集,即随着伊利石增加,热解游离烃增加(见图8f)。Shimoyama等^[24]研究乐黏土矿物对于干酪根的裂解反应。对于与黏土矿物伊利石混合的干酪根,热解烃中 C_{11} 部分显著降低, C_{1-10} 轻烃部分显著富集,也表明伊利石促进干酪根脱羧反应,进一步导致自由基重排裂解而形成较短链游离烃(见图8f)。李术元等^[25]选取东营凹陷烃源岩研究黏土矿物对于干酪根裂解生烃的影响,发现黏土矿物对于干酪根的生烃促进作用明显,影响效果

从大到小依次为伊利石、高岭石、伊蒙混层、蒙脱石、矿物混合物,其中伊利石影响最大,从纯干酪根的总生烃量 $309.6 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增至 $363.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,增率达20%。同属于渤海湾盆地的渤中19-6气田所处的渤中凹陷西南部发育的烃源岩和东营凹陷一样,主要为东营组、沙河街组湖相烃源岩;渤中19-6构造带与东营凹陷临近,烃源岩沉积期间所处的构造背景、气候特征、植被体系均相似,因此关于东营凹陷烃源岩中黏土矿物尤其是伊利石大大促进干酪根生成短链烃类产物,同样适用于渤中19-6构造带。从前文分析来看,渤中19-6构造带东营组、沙河街组烃源岩中黏土矿物主要为伊利石,在热演化高熟阶段,受黏土矿物中伊利石的促进作用,短链烃类将大

大增加,表现为现今渤中19-6超千亿立方大气田。该气田的发现大大超出此前的评价和预期,也印证了无机矿物对有机质的生烃成气的重要影响。

对比渤中19-6构造带烃源岩特征与黏土矿物演化,发现黏土矿物和烃源岩具有良好的对应关系。早期黏土矿物脱水演化,矿物活性激发,对有机质吸附作用加大,并促使地层水离解,形成大量的 H^+ 。大量的 H^+ 促使有机质进行加氢作用,极大地改造了烃源岩性质,使得以陆源高等植物为主的有机质大量富氢,HI指数上升,类型变好。后期伊利石化作用促进前期干酪根产生大量脱羧反应,并降低裂解反应活化能,自由基大量裂解成较短链的烃类。伊利石层间结合紧密,热解烃不易进入层间,在表面以物理吸附及化学键的形式保存,在埋深增加的情况下,温度升高,破坏键能及吸附作用,短链烃直接释放,形成大量的裂解油气。

4 结语

渤中19-6构造带及相邻次洼东营组、沙河街组烃源岩中普遍发育高等植物,其中被子植物、裸子植物、藻类植物占比约为6:4:2,在生物标志化合物中广泛检测到代表高等植物的奥利烷化合物。以高等植物为主的有机质在形成干酪根的过程中,受微生物、黏土矿物等的作用形成以腐殖型无定形体占绝对优势的显微组分特征。在演化过程中,干酪根受到黏土矿物脱水转化的作用,大量富集的 H^+ 促使腐殖质富氢脱氧,HI指数上升,类型变好;后期受伊利石化作用,干酪根发生大量脱羧反应,降低裂解反应活化能,并在伊利石表面以物理吸附及化学键的形式富集大量短链烃类产物,埋深增加的情况下短链烃直接释放,形成现今凝析油气特征。

作者贡献声明:

李威:论文撰写,图件绘制。

李友川:学术指导,论文审阅。

郭刚:学术指导,论文审阅。

杨树春:论文审阅。

参考文献:

- [1] 徐长贵,于海波,王军,等.渤海海域渤中19-6气田形成条件与成藏特征[J].石油勘探与开发,2019,46(1):1.
XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, *et al.* Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 1.
- [2] 薛永安,李慧勇.渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J].中国海上油气,2018,30(3):1.
XUE Yong'an, LI Huiyong. Large condensate gas field in deep Archean metamorphic buried hill in Bohai Sea: discovery and geological significance [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3):1.
- [3] 施和生,王清斌,王军,等.渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J].中国石油勘探,2019,24(1):36.
SHI Hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, *et al.* Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 36.
- [4] 胡安文,牛成民,王德英,等.渤海湾盆地渤中凹陷渤中19-6构造凝析油气特征与形成机制[J].石油学报,2020,41(4):403.
HU Anwen, NIU Chengmin, WANG Deying, *et al.* The characteristics and formation mechanism of condensate oil and gas in Bozhong 19-6 structure, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(2): 403.
- [5] 李威.渤海湾盆地渤中19-6气田凝析气成因研究[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(3):458.
LI Wei. Origin of condensate gas in Bozhong 19-6 gas field in Bohai Bay Basin [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(3):458.
- [6] 李威,李友川,兰蕾,等.渤海湾盆地渤中19-6气田凝析油特征及油气关系[J].地质学报,2021,95(3):913.
LI Wei, Li Youchuan, LAN Lei, *et al.* Genetic type of condensates oil and oil-gas relationship in the Bozhong 19-6 gas field, Bohai Bay Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(3):913.
- [7] 赵文智,王兆云,王红军,等.再论有机质接力成气的内涵与意义[J].石油勘探与开发,2011,38(2):129.
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, WANG Hongjun, *et al.* Further discussion on the connotation and significance of the natural gas relaying generation model from organic materials [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 129.
- [8] 李剑,马卫,王义凤,等.腐泥型烃源岩生排烃模拟实验与全过程生烃演化模式[J].石油勘探与开发,2018,45(3):445.
LI Jian, MA Wei, WANG Yifeng, *et al.* Modeling of the whole hydrocarbon-generating process of sapropelic source rock [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 445.
- [9] 侯明才,曹海洋,李慧勇,等.渤海海域渤中19-6构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J].天然气工业,2019,39(1):33.
HOU Mingcai, CAO Haiyang, LI Huiyong, *et al.* Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai Sea area [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 33.
- [10] 李威,窦立荣,文志刚,等.乍得Bongor盆地潜山油气成因和

- 成藏过程[J].石油学报,2017,38(11):1253.
- LI Wei, DOU Lirong, WEN Zhigang, *et al.* Buried-hill hydrocarbon genesis and accumulation process in Bongor Basin, Chad[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(11): 1253.
- [11] 马博,吉利明,张明震,等. 酒西盆地白垩统赤金堡组烃源岩孢粉相特征及其石油地质意义[J].石油学报,2020,41(11):88.
- MA Bo, JI Liming, ZHANG Mingzhen, *et al.* Palynofacies characteristics of source rocks of Lower Cretaceous Chijinbao Formation in Jiuxi Basin and their petroleum geological significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(11):88.
- [12] 田建锋,高永利,张蓬勃,等. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油储层伊利石成因[J].石油与天然气地质,2013,34(5):700.
- TIAN Jianfeng, GAO Yongli, ZHANG Pengbo, *et al.* Genesis of illite in Chang7 tight oil reservoir in Heshui area, Ordos Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 2013, 34(5):700.
- [13] 刘菲,杜佳宗,蔡进功,等. 泥岩成岩矿物演化特征与成岩体系划分:以东营凹陷古近系为例[J].高校地质学报,2019,25(4):583.
- LIU Fei, DU Jiazong, CAI Jingong, *et al.* Evolution of diagenetic minerals and classification of diagenetic systems in mudstones: a case in the Paleogene of the Dongying Sag [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019, 25(4):583.
- [14] 李晓霞,谷渊涛,万泉,等. 泥页岩中有机质-黏土复合体微结构研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2020,39(3):663.
- LI Xiaoxia, GU Yuantao, WAN Quan. Research advance on microstructures of the organic-clay composite in mud shale [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(3):663.
- [15] 李颖莉,蔡进功. 泥质烃源岩中蒙脱石伊利石化对页岩气赋存的影响[J].石油实验地质,2014,36(3):352.
- LI Yingli, CAI Jingong. Effect of smectite illitization on shale gas occurrence in argillaceous source rocks [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2014, 36(3):352.
- [16] 蔡进功,曾翔,韦海伦,等. 从水体到沉积物:探寻有机质的沉积过程及其意义[J].古地学报,2019,21(1):49.
- CAI Jingong, ZENG Xiang, WEI Hailun, *et al.* From water body to sediments: exploring the depositional processes of organic matter and their implications [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(1):49.
- [17] YANG Feng, NING Zhengfu, WANG Qing, *et al.* Pore structure of Cambrian shales from the Sichuan Basin in China and implications to gas storage [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2016, 70: 14.
- [18] ZHU Xiaojun, CAI Jingong, LIU Weixin, *et al.* Occurrence of stable and mobile organic matter in the clay-sized fraction of shale: significance for petroleum geology and carbon cycle [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 160/161: 1.
- [19] KUILA U, MCCCARTY D K, DERKOWSKI A, *et al.* Nano-scale texture and porosity of organic matter and clay minerals in organic-rich mudrocks[J]. *Fuel*, 2014, 135: 359.
- [20] LOHR S C, KENNEDY M J. Organomineral nanocomposite carbon burial during Oceanic Anoxic Event 2 [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(18): 4971.
- [21] DAWIT S, JOHANNES L, JENNIFER H, *et al.* Micro- and nano-environments of carbon sequestration: multi-element STXM-NEXAFS spectromicroscopy assessment of microbial carbon and mineral associations [J]. *Chemical Geology*, 2012, 329:53.
- [22] 谢树成,刘邓,邱轩,等. 微生物与地质温压的一些等效地质作用[J].中国科学:地球科学,2016,46(8):1087.
- XIE Shucheng, LIU Deng, QIU Xuan, *et al.* 2016. Microbial roles equivalent to geological agents of high temperature and pressure in deep Earth [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 46(8):1087.
- [23] 魏文文,黄思静,郇金来. 伊利石形成相关反应的热力学计算及其对砂岩成岩作用研究的意义[J].地质科技情报,2011,30(1):20.
- WEI Wenwen, HUANG Sijing, HUAN Jinlai. Thermodynamic calculation of illite formation and its significance in research of sandstone diagenesis [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(1):20.
- [24] SHIMOYAMA A, JOHNS W D. Catalytic conversion of fatty acids to petroleum-like paraffin and their maturation [J]. *Nature Physical Science*, 1971, 232: 140.
- [25] 李术元,林世静,郭绍辉,等. 矿物质对干酪根热解生烃过程的影响[J].石油大学学报(自然科学版),2002,26(1):69.
- LI Shuyuan, LIN Shijing, GUO Shaohui, *et al.* Catalytic effects of minerals on hydrocarbon generation in kerogen degradation [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2002, 26(1):69.