

苏北盆地溱潼凹陷断阶带油气运移 路径综合分析

陆黄生¹ 秦黎明² 刘 军² 杨永才² 胡 瑛³ 方朝合⁴ 张枝焕²

(1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石油勘探开发公司, 北京 100034; 4. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要:溱潼凹陷断阶带断裂系统发育, 控制油气聚集的断层主要有 F1、Ⅲ、F2、F3 及其相应的分支断层, 将断阶带分为北部的草舍扭动断裂带与南部的祝庄扭动断裂带。在断层封闭性定量评价与封闭史研究的基础上, 结合研究区生排烃史、油源分布特征、油气成藏期以及含氮化合物示踪分析研究表明, 断阶带Ⅲ、F2、F3 断层在不同的研究区封闭性存在明显的差异, 祝庄断阶带Ⅲ号断层垂向封闭性较好, 不能成为油气运移的通道, 使得角墩子地区的原油主要来源于阜四段源岩, 没有阜二段与泰州组源岩的贡献; 而 F3 断层活动期短, 侧向封闭性差, 也不为油气的运移通道; 相比之下, F2 断层活动期长, 断层垂向封闭性差, 而侧向封闭性好, 为祝庄地区主要的运移通道, 与油气成藏期具有较好的匹配关系, 流体包裹体分布与含氮化合物示踪分析也证明了这一点。研究还表明草舍断阶带 F2 断层活动期短, 垂向封闭性好, 侧向封闭性弱, 不是油气运移的通道; 相比之下, F3 断层活动期长, 垂向封闭性较弱, 可以作为油气运移的主要通道, 后期主要通过砂体和不整合面运移聚集成藏, 与生排烃史、油气成藏期和含氮化合物示踪也具有较好的匹配关系。

关键词:断层封闭性; 运移路径; 溱潼凹陷断阶带; 苏北盆地

中图分类号: P618.130.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)01-0067-12

1 区域地质背景

溱潼凹陷位于江苏省中部的苏北盆地, 为苏北—南黄海盆地东台坳陷的一个次级构造单元 (三级构造单元), 位于东台坳陷区吴堡低凸起与泰州凸起之间, 整体呈北东东向展布, 北以吴堡—博镇断裂为界, 东南部与泰州凸起以断层相接, 西连江都隆起, 东接梁垛低凸起, 西北部与吴堡低凸起以斜坡相连, 东北方向较开阔, 过梁垛与白驹凹陷、海安凹陷相连, 西南部较狭窄, 为凹陷的收敛部位, 其断阶带西南起姜小庄, 东北至小凡庄, 全长约为 60 km, 整体走向北东, 部分被近东西向 (个别为近南北向) 断

层错断 (图 1)。地层发育较全, 自下而上可分为白垩系浦口组 (K_p)、赤山组 (K_c), 古近系泰州组 (E_{1t})^①、阜宁组 (包括阜一段 (E_{f1})、阜二段 (E_{f2})、阜三段 (E_{f3})、阜四段 (E_{f4})), 戴南组包括戴一段 (E_{d1})、戴二段 (E_{d2}), 三垛组包括垛一段 (E_{s1})、垛二段 (E_{s2}), 新近系盐城组包括盐一段 (N_{y1})、盐二段 (N_{y2}), 及第四系东台组 (Q_d), 目前在断阶带已发现草舍、陶思庄、角墩子、储家楼、洲城、祝庄、淤溪等 7 个油田。

2 断层发育特征

溱潼凹陷断阶带断裂系统发育, 分布有一级、二级、三级断层。一级断层是整个凹陷的控边断层, 具有

收稿日期: 2007-06-29; 改回日期: 2007-09-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2001CB409800) 和国家自然科学基金项目 (40802017, 40212020) 共同资助。

作者简介: 陆黄生, 男, 1961 年生, 博士生, 主要从事石油地质研究, lsh2100@163.com。

通讯作者: 张枝焕 地址: 北京市昌平区中国石油大学资源与信息学院, 邮编: 102249; E-mail: zhangzh3996@vip.163.com。

① 本文根据中石化华东分公司的分层方案划归为古近系, 另一种方案将泰州组划归为白垩统。

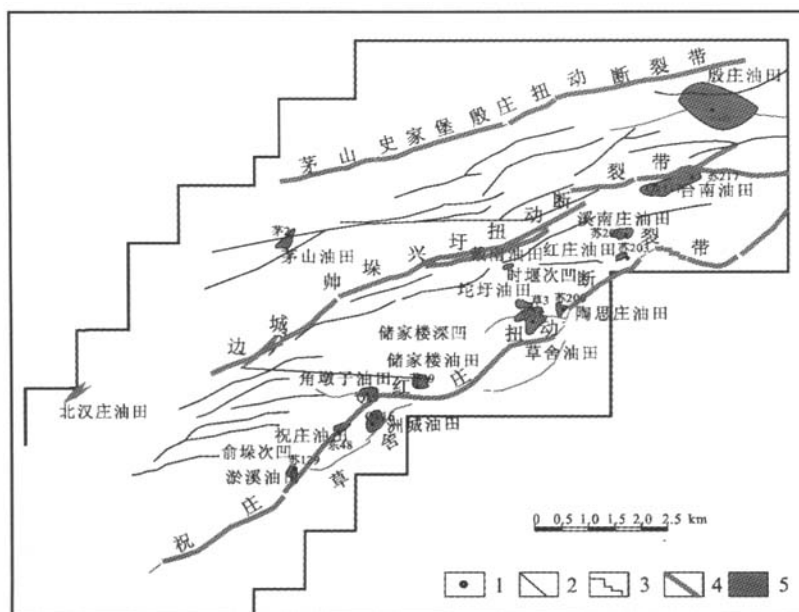


图1 溱潼凹陷区域构造图

1—井位;2—断层;3—区块边界;4—断裂带;5—油田

Fig.1 Tectonic location of the Qintong subbasin

1-Well;2-Fault;3-Block boundary;4-Main fault belt;5-Oilfield

规模大、活动时间长的特点,控制隆、坳、凸、凹的展布及构造单元的划分,也影响断层两侧地层的沉积和剥蚀,断阶带主要分布 F1 断层,二级断层是控制隆起与坳陷、凸起与凹陷边界断层或凹陷内有相当规模能控制地层沉积的断层,断阶带主要分布Ⅲ、F2、F3 断层,三级断层为凹陷内控制内部构造特征和地层沉积、剥蚀的断层,其规模较大,一般延伸 10~30 km,断距 100~500 m,断层形成期为吴堡、三垛期,仅在新生界内部发生,对油气的分带聚集起明显控制作用,断阶带主要分布Ⅲ、F2、F3 断层的分支断层,由此看出,断阶带控制油气聚集的断层主要有 F1、Ⅲ、F2、F3 主控断层及其相应的分支断层,将断阶带分为北部的草舍扭动断裂带与南部的祝庄扭动断裂带(图 1)。

3 断阶带重要构造历史时期断层封闭性

生烃史分析表明^①,泰州组烃源岩早在始新世中期就已开始生烃,阜二段烃源岩从戴南期开始生烃,阜四段烃源岩从三垛期开始生烃,但生烃量很少,其

生烃量占总生烃量的 2% 以下,几乎可以忽略不计,盐城期和东台期达到生烃高峰,其生烃量占总生烃量的 98%,因此,烃源岩生排烃期与构造演化期结合表明,对溱潼凹陷油气运移、聚集有意义的构造演化期为三垛运动后的地质时期,因此,三垛期运动后的断层封闭与开启控制着溱潼凹陷断阶带油气的分布。溱潼凹陷断阶带断层封闭性的总体评价主要是在构造演化史、构造应力场演化史研究的基础上,通过计算断层面所承受的正压力,综合考虑地质因素(断层两侧的岩性配置关系、泥岩涂抹因子等因素),预测研究区 F1、Ⅲ、F2、F3 主控断层在祝庄构造带与草舍构造带的封闭性,断层面所承受的正压力主要采取如下的计算公式^[1-3]:

$$P=H(\rho_r-\rho_w)\times 0.00987\cos\theta$$

式中 P 为断面所受的正压力 (MPa); H 为断面埋深 (m); ρ_r 为上覆地层的平均密度 (g/cm^3); ρ_w 为地层水密度 (g/cm^3); θ 为断面倾角 ($^\circ$)。

3.1 祝庄构造带不同地质时期断层封闭性

断层演化和活动期研究表明(图 2-a),祝庄构

① 中石化股份有限公司华东分公司, 溱潼凹陷、金湖探区烃源岩地球化学特征及油源精细分析(研究报告), 2005。

造带Ⅲ号断层形成较晚,在三垛运动时期(47.8~23.2 Ma)形成并开启,而且Ⅲ号断层活动期非常短;F2、F3断层形成较早,在吴堡运动时期已形成,三垛运动前后断层断距的差异表明,戴南组和三垛组沉积

时活动最剧烈,三垛运动后,F3断层停止活动,而F2断层继续活动,F2断层切穿盐城组地层,并且上下盘盐城组地层厚度差异较大,表明F2断层一直到盐城组一段沉积后才停止活动;F1断层是控制盆地边

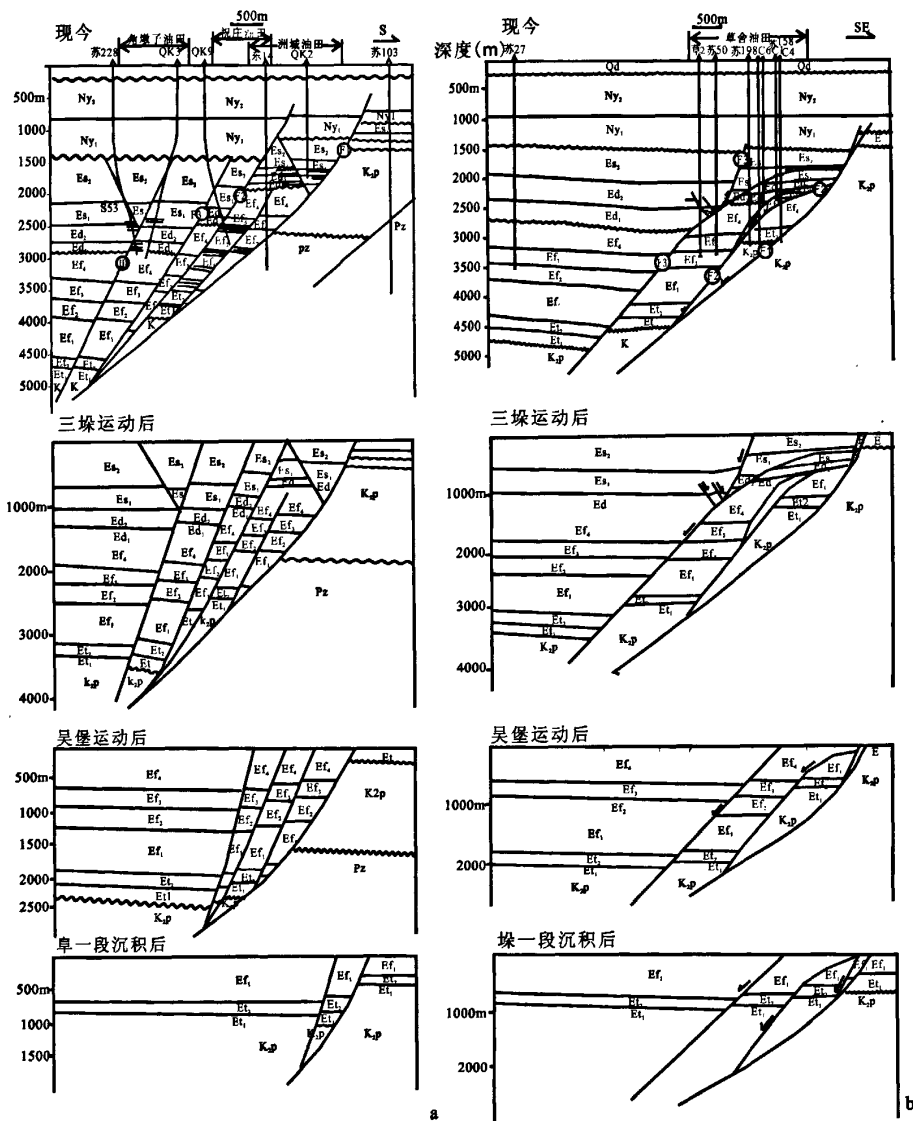


图 2 泰潼凹陷断阶带构造发展史

a—祝庄构造带;b—草舍构造带

Qd—东台组;Ny₂—盐二段;Ny₁—盐一段;Es₂—垛二段;Es₁—垛一段;Ed₂—戴二段;Ed₁—戴一段;
Ef₄—阜四段;Ef₃—阜三段;Ef₂—阜二段;Ef₁—阜一段;Et—泰州组

Fig.2 Structural history of fault steps in the Qintong subbasin

a—Zhuzhuang fault belt;b—Caoshe fault belt

Qd—Dongtai Formation;Ny₂—second member of the Yancheng Formation;Ny₁—first member of the Yancheng Formation;
Es₂—second member of the Sanduo Formation;Es₁—first member of the Sanduo Formation;Ed₂—second member of the Dainan Formation;Ed₁—first member of the Dainan Formation;Ef₄—fourth member of the Funiu Formation;
Ef₃—third member of the Funiu Formation;Ef₂—second member of the Funiu Formation;
Ef₁—first member of the Funiu Formation;Et—Taizhou Formation

界的断层,规模大、活动时间长。断层两侧岩性配置表明,Ⅲ号断层断距远小于断层两侧大套阜四段泥岩厚度,使上下盘阜四段泥岩接触,断层垂向封闭,由于断距较小,断层两盘的阜三段与阜三段对接、阜一段与阜一段对接,使得断层侧向封闭性较差;F2和F3断层断距较大,错移阜四段和阜二段大套泥岩,使上下盘砂一泥、砂一砂对接概率增大,断层侧向封闭性减弱,有利于油气的侧向运移;F1断层下盘的中生界泥岩整体封闭,使断层面泥岩涂抹因子较高,垂向封闭性较强。结合断面正应力与泥地比分析也可以得到,三垛组沉积后,Ⅲ号断层阜四段以下的地层断面压力较大,泥地比高,断层垂向封闭,因此,Ⅲ号断层在三垛组沉积期整体上断层垂向封闭性较好,侧向封闭性较差,不能作为油气垂向运移的通道,F3断层垂向封闭性明显好于F2断层,F2断层更易成为油气运移的优势通道。

3.2 草舍构造带不同地质时期断层封闭性

断层演化和活动期研究表明(图2-b),草舍地区F3断层形成时间早,在仪征运动已形成。在戴南组和三垛组沉积时构造活动剧烈,且派生出一系列倾向相反的小断层。在盐城组沉积时活动基本停止,只有在盐一段沉积早期有轻微活动,推测在三垛组沉积时,F3断层垂向开启。在油气大量生成的盐一段沉积早期也是开启的,F3断层在盐一段沉积初期之前是垂向开启的。与F3断层类似,F2断层也是在仪征运动时期形成的,在三垛运动前期活动剧烈,断层垂向开启并派生出次级断层,但在戴一段沉积期后活动停止,推测不能作为油气垂向运移的通道。断层两侧岩性配置研究表明,三垛组沉积时期由于断距较大,F3断层两侧阜四段与阜三段泥岩对接,阜二段与阜一段对接,形成了良好的油气侧向运移通道,侧向封闭性较弱,F2及其次级断层断距大(大于1000 m),断层面泥岩涂抹性很差,侧向封闭性很差,岩性对接关系复杂,有利于油气的侧向运移。断面正应力与泥地比分析也表明,三垛组沉积后,F3断层在阜一段和泰州组的垂向封闭性较好,而上部层位F3断层封闭性差。F2由于地层埋藏较浅,相对于F3断层,断面压力也较小,垂向封闭性也较弱。

4 断层作为运移路径的综合分析

油气在二次运移过程中仅仅通过局限的优势通道运移,也就是油气在无外来干扰情况下自然优先

流经的通道^[4],是沉积盆地输导系统的非均质性、能量场的非均一性和流体流动等多种因素共同作用的结果,主要包括断层、不整合面和高孔渗的砂体输导层,输导层与源岩的三维配置关系决定了源岩的优势排烃方向,源岩中生成的油气优先向输导层发育、势能较低且与源岩势能差较大的方向排放^[5-10],因此,优势运移通道的识别必须结合油气成藏静态与动态要素综合考虑,而断层是否可以作为地质历史时期油气运移的优势通道,仅仅依靠断层封闭性与演化史的预测是远远不够的,必须结合油源分布特征、生排烃史、油气成藏期等因素综合研究。

4.1 油源特征与断层封闭性匹配关系

控制油气运移聚集的因素非常复杂^[11],其中油源断层封闭性及其与烃源岩的配置关系也起着十分重要的作用。原油之间或原油与生油岩之间具有亲缘关系,二者在母源性质、沉积环境、成熟度上都应是一致的^[12,13],因此,原油类型划分与油源对比可以较好的判识原油来源。综合生物标志物的地球化学特征以及甾、萜烷烃的分布特征表明,祝庄断阶带洲城与祝庄地区原油主要来源于泰州组和阜二段烃源岩(图3-a,b,图4-a),而角墩子油田的原油主要来源于阜四段烃源岩(图3-c,d,图4-a)。生物标志物成熟度参数 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 、 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 、 C_{31} 升藿烷 $22S/(22S+22R)$ 也显示洲城与祝庄地区的原油成熟度明显高于角墩子地区的,也表明角墩子原油主要来源于成熟度低的阜四段,没有深部源岩阜二段与泰州组源岩的贡献。结合断层的封闭性研究也可以得到,洲城与祝庄地区F3断层垂向与侧向封闭性差,F2断层垂向封闭性差,而侧向封闭性好,深部阜二段与泰州组源岩在三垛期进入生烃阶段,正好与F2、F3断层活动期匹配,但F3断层侧向封闭性差而且活动期短,因此,油气主要聚集在F2断层的下盘,呈阶梯状分布,此断层为洲城与祝庄地区的主要运移通道。Ⅲ号断层为角墩子地区的主要运移通道,此断层在三垛期之后,垂向封闭性较好,断层活动期较短,深部阜二段与泰州组的源岩无法通过Ⅲ号断层垂向运移,阜四段源岩刚好进入生排烃阶段。

草舍断阶带原油主要来源于阜二段源岩,部分地区有泰州组源岩贡献(图3-e,f,图4-b)。结合断层封闭性研究表明,与F2断层相比,F3断层活动期较长,断层垂向封闭性较弱,草舍油田中断块中构造

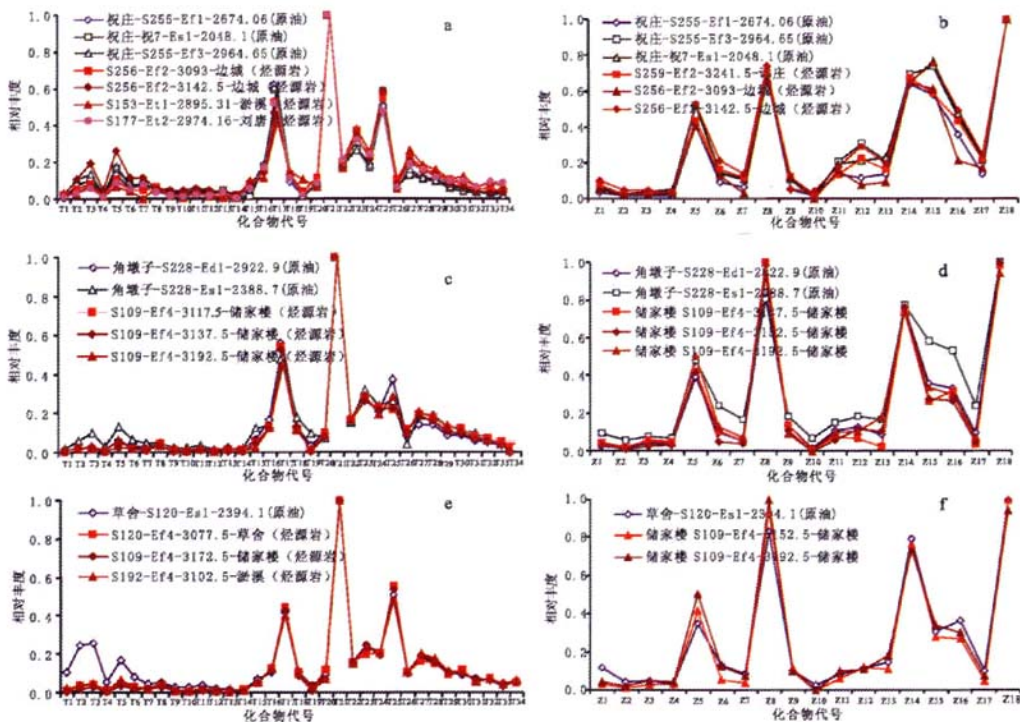


图3 祝庄构造带与草舍构造带原油岩心抽提物中甾萜烷烃指纹分布图(a,b,c,d为祝庄构造带,e,f为草舍构造带)

化合物代号:甾烷:T1—C₁₉-三环甾烷;T2—C₂₀-三环甾烷;T3—C₂₁-三环甾烷;T4—C₂₂-三环甾烷;T5—C₂₃-三环甾烷;T6—C₂₄-三环甾烷;T7—C₂₅-三环甾烷;T8—C₂₄-四环甾烷;T9—C₂₆-三环甾烷;T10—C₂₆-三环甾烷;T11—C₂₈-三环甾烷;T12—C₂₈-三环甾烷;T13—C₂₉-三环甾烷;T14—C₂₉-三环甾烷;T15—Ts;T16—Tm;T17—降甾烷;T18—18 α (H)-30-降新甾烷(C₂₉Ts);T19—18 α (H)-重排甾烷;T20—17 β (H),21 α (H)-30-降莫烷;T21—17 α (H),21 β (H)-甾烷;T22—17 β (H),21 β (H)-莫烷;T23—17 α (H),21 β (H)-30-升甾烷(22S);T24—17 α (H),21 β (H)-30-升甾烷(22R);T25—伽马蜡烷;T26—17 β (H),21 α (H)-30-升莫烷(20R);T27—17 α (H),21 β (H)-30,31-二升甾烷(22S);T28—17 α (H),21 β (H)-30,31-二升甾烷(22R);T29—17 α (H),21 β (H)-30,31,32-三升甾烷(22S);T30—17 α (H),21 β (H)-30,31,32-三升甾烷(22R);T31—17 α (H),21 β (H)-30,31,32,33-四升甾烷(22S);T32—17 α (H),21 β (H)-30,31,32,33-四升甾烷(22R);T33—17 α (H),21 β (H)-30,31,32,33,34-五升甾烷(22S);T34—17 α (H),21 β (H)-30,31,32,33,34-五升甾烷(22R)。甾烷:Z1-孕甾烷;Z2-孕甾烷;Z3-5 α ,13 β ,17 α -重排甾烷(20S);Z4-5 α ,13 β ,17 α -重排甾烷(20R);Z5-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20S)+24-M-13 α ,17 β -重排甾烷(20R);Z6-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20R)+24-E-13 β ,17 α -重排甾烷(20S);Z7-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20S)+24-M-13 α ,17 β -重排甾烷(20R);Z8-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20R);Z9-24-E-13 β ,17 α -重排甾烷(20R);Z10-24-E-13 α ,17 β -重排甾烷(20S);Z11-24-M-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20S);Z12-24-M-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20R)+24-E-13 β ,17 α -重排甾烷(20R);Z13-24-M-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20S);Z14-24-M-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20R);Z15-24-E-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20S);Z16-24-E-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20R);Z17-24-E-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20S);Z18-24-E-5 α ,14 β ,17 β -甾烷(20R)

Fig.3 Fingerprints of steranes and terpanes from core extracts and oils in the Zhuzhuang and Caoshe fault belts

(a, b, c, d—Zhuzhuang fault belt; e, f—Caoshe fault belt)

Symbols;hopane:T1—C₁₉-tricyclic terpane;T2—C₂₀-tricyclic terpane;T3—C₂₁-tricyclic terpane;T4—C₂₂-tricyclic terpane;T5—C₂₃-tricyclic terpane;T6—C₂₄-tricyclic terpane;T7—C₂₅-tricyclic terpane;T8—C₂₄-tetracyclic terpane;T9—C₂₆-tricyclic terpane;T10—C₂₆-tricyclic terpane;T11—C₂₈-tricyclic terpane;T12—C₂₈-tricyclic terpane;T13—C₂₉-tricyclic terpane;T14—C₂₉-tricyclic terpane;T15—Ts;T16—Tm;T17—norhopane;T18—18 α (H)-30-C₂₉Ts;T19—18 α (H)-rearranged hopane;T20—17 β (H),21 α (H)-30-normoretane;T21—17 α (H),21 β (H)-hopane;T22—17 β (H),21 β (H)-moretane;T23—17 α (H),21 β (H)-30-homohopane(22S);T24—17 α (H),21 β (H)-30-homohopane(22R);T25—gamacerane;T26—17 β (H),21 α (H)-30-homo-moretane(20R);T27—17 α (H),21 β (H)-30,31-homohopane(22S);T28—17 α (H),21 β (H)-30,31-homohopane(22R);T29—17 α (H),21 β (H)-30,31,32-homohopane(22S);T30—17 α (H),21 β (H)-30,31,32-homohopane(22R);T31—17 α (H),21 β (H)-30,31,32,33-homohopane(22S);T32—17 α (H),21 β (H)-30,31,32,33-homohopane(22R);T33—17 α (H),21 β (H)-30,31,32,33,34-homohopane(22S);T34—17 α (H),21 β (H)-30,31,32,33,34-homohopane;Z1—pregnane;Z2—homohopane;Z3—5 α ,13 β ,17 α -rearranged sterane(20S);Z4—5 α ,13 β ,17 α -rearranged sterane(20R);Z5—5 α ,14 β ,17 α -sterane(20S)+24-M-13 α ,17 β -rearranged sterane(20S);Z6—5 α ,14 β ,17 β -sterane(20R)+24-E-13 β ,17 α -rearranged sterane(20R);Z7—5 α ,14 β ,17 β -sterane(20S)+24-M-13 α ,17 β -rearranged sterane(20R);Z8—5 α ,14 β ,17 β -sterane(20R);Z9—24-E-13 β ,17 α -rearranged sterane(20R);Z10—24-E-13 α ,17 β -rearranged sterane(20S);Z11—24-M-5 α ,14 β ,17 β -sterane(20S);Z12—24-M-5 α ,14 β ,17 β -sterane(20R)+24-E-13 α ,17 β -sterane(20R);Z13—24-M-5 α ,14 β ,17 β -sterane(20S);Z14—24-M-5 α ,14 β ,17 β -sterane(20R);Z15—24-E-5 α ,14 β ,17 β -sterane(20S);Z16—24-E-5 α ,14 β ,17 β -sterane(20R);Z17—24-E-5 α ,14 β ,17 β -sterane(20S);Z18—24-E-5 α ,14 β ,17 β -sterane(20R)

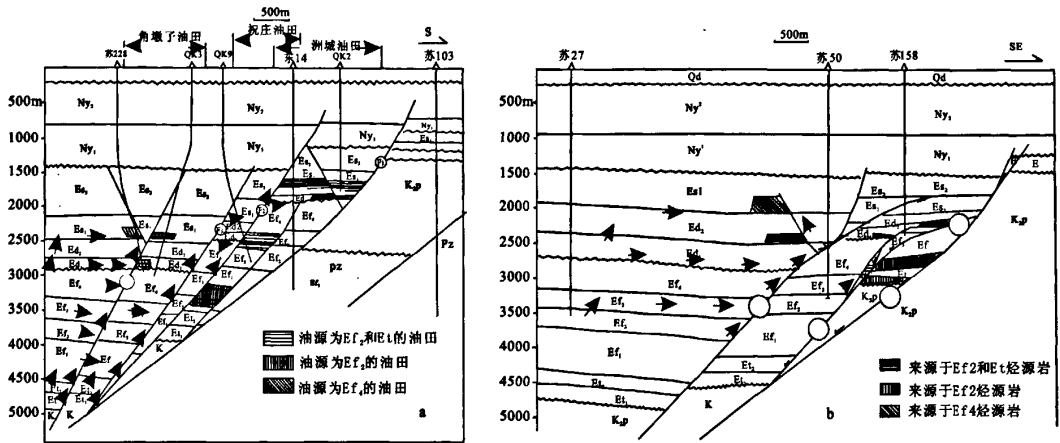


图4 祝庄构造带与草舍构造带油源分布特征

(a—祝庄构造带;b—草舍构造带)

Qd—东台组;Ny₂—盐二段;Ny₁—盐一段;Es₂—垛二段;Es₁—垛一段;Ed₂—戴二段;Ed₁—戴一段;
Ef₄—阜四段;Ef₃—阜三段;Ef₂—阜二段;Ef₁—阜一段;Et—泰州组

Fig.4 Distribution characteristics of oil sources in the Zhuzhuang and Caoshe fault belts

a—Zhuzhuang fault belt; b—Caoshe fault belt

Qd—Dongtai Formation; Ny₂—second member of the Yancheng Formation; Ny₁—first member of the Yancheng Formation; Es₂—second member of the Sanduo Formation; Es₁—first member of the Sanduo Formation; Ed₂—second member of the Dainan Formation; Ed₁—first member of the Dainan Formation; Ef₄—fourth member of the Funing Formation; Ef₃—third member of the Funing Formation; Ef₂—second member of the Funing Formation; Ef₁—first member of the Funing Formation; Et—Taizhou Formation

层戴南组原油主要来源于泰州组烃源岩,而在埋藏较深的泰州组和阜一段原油主要来源于阜二段源岩,表明源于戴南组的原油不是沿F2断层垂向运移的,而是沿F3断层垂向运移的,北断块原油主要来自于阜二段源岩,也表明F3断层为草舍构造带油气垂向运移通道。

4.2 油气成藏期次与断层封闭性匹配关系

流体包裹体记录了含油气流体及其他各种来源流体的性质、组分、物化特征和地球动力学条件,对储层和断裂带中流体包裹体的均一化温度的测定,结合盆地热演化史和埋藏史特征,可以确定油气运移时间和成藏期次,并且利用流体包裹体丰度(GOI, grains containing oil inclusions)可以判识油气的运移通道^[14,15]。

祝庄断阶带D34井阜宁组岩心主要发育液态烃类流体包裹体,部分发育气液两相包裹体,在石英碎屑中广泛分布(图5-a、b、c),烃类包裹体周边的盐水包裹体较好地记录了当时的古地温,研究表明,盐水包裹体均一化温度主要有两个高峰区(图5-d),第一个区间为80~85℃,第二个区间为90~

100℃。结合地层的埋藏史及古地温资料可以得到,油气主要存在两期充注(图6-a),第一期为26~19 Ma,第二期为15~3 Ma。第一期油气注入阜三段的时间约为三垛运动期,结合生烃史表明,断阶带的烃源岩未进入成熟阶段,而深凹带的阜二段烃源岩刚进入成熟阶段,未达到生烃高峰,泰州组源岩埋藏深,已经达到成熟排烃阶段,因此,早期祝庄断阶带阜三段原油主要来源于泰州组源岩;第二期油气充注期为凡川运动前后,深凹带上的各套烃源岩均已达到成熟阶段,处于生烃高峰期,综合油气成藏期与断层封闭性研究表明,早期三垛运动时断层活动性强(Ⅲ号断层和F3断层),而此时断阶带源岩未进入成熟阶段,深凹带泰州组源岩有贡献,而生烃量较少,凡川运动时深凹带上的各烃源岩进入成熟阶段,油气大量生成,Ⅲ号断层和F3断层停止活动,断层垂向封闭,油气通过砂岩输导层以侧向运移为主,F2断层仍有活动,可以作为油气运移主通道,由于泰州组烃源岩埋藏最深,断层面泥岩压实作用较强,Ⅲ号断层和F3断层的垂向封闭作用,油气不能有效排出。相比之下,阜二段烃源岩生成的油气可以通过

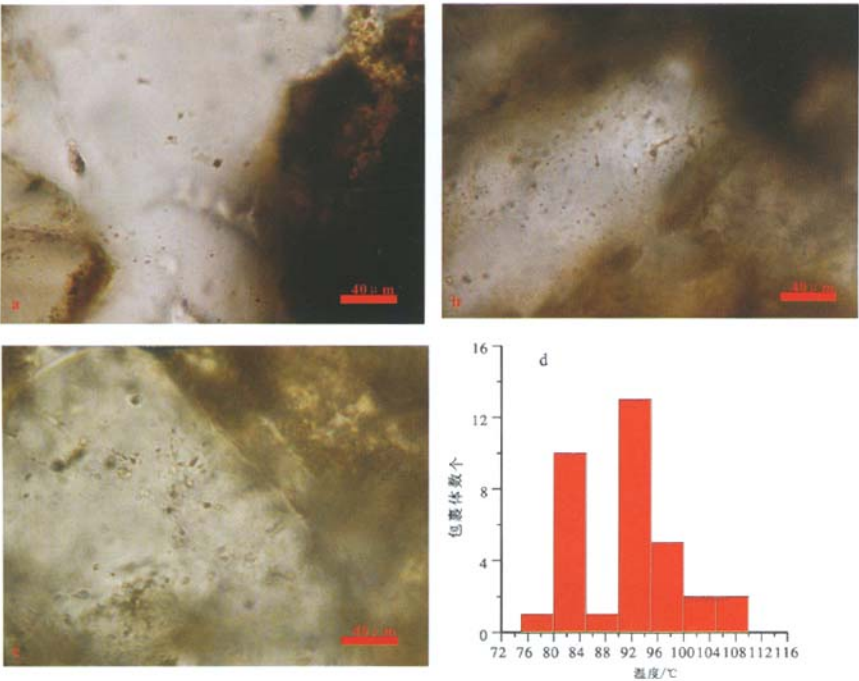


图 5 祝庄构造带包裹体与均一化温度分布直方图
a、b、c—石英碎屑中液烃包裹体,单偏光,d—包裹体均一化温度分布直方图
Fig.5 Frequency histograms of homogenization temperatures of fluid inclusions in the Zhuzhuang fault belt
(a, b, c—Distribution of liquid hydrocarbon fluid inclusions, plain light;d—Histograms of homogenization temperatures of fluid inclusions)

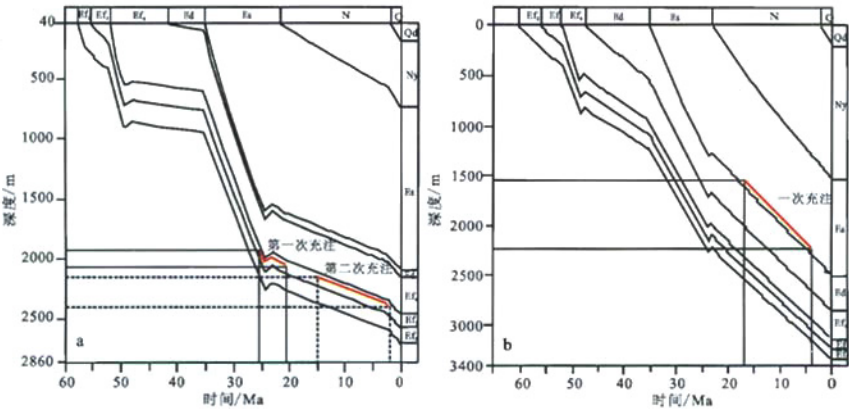


图 6 祝庄构造带与草舍构造带油气成藏期次
Qd—东台组;Ny—盐城组;Es—三垛组;Ed—戴南组;E₄—阜四段;
E₃—阜三段;E₂—阜二段;E₁—阜一段
Fig. 6 Stages of petroleum accumulation in the Zhuzhuang and Caoshe fault belts
Qd—Dongtai Formation;Ny—Yancheng Formation;Es—Sanduo Formation;Ed—second member of the Dainan Formation;
Ed—Dainan Formation;E₄—fourth member of the Funing Formation;E₃—third member of the Funing Formation;
E₂—second member of the Funing Formation;E₁—first member of the Funing Formation

F3 断层下盘的阜一段砂岩输导层侧向运移至 F2 断层,后沿 F2 断层垂向运移,依次形成阜一段油藏和阜三段混合油藏。

草舍断阶带 S120 井三垛组岩心主要发育液态烃类流体包裹体,均具有强荧光特征,在石英碎屑中广泛分布(图 7-a、b、c),均一化温度主要分布于 78~90℃与 95~115℃两个高峰区(图 7-d)。结合地层演化史研究表明(图 6-b),第一期(早期)烃类充注时期为中新世中期(凡川运动),充注时间为 17~4 Ma;第二期无法找到对应的成藏时间,表现出深部热流体沿断裂活动的历史记录,结合草舍断阶带封闭性综合研究表明,三垛组沉积期,研究区烃源岩未达到成熟阶段,而深凹带的泰州组源岩刚达到成熟阶段,可能有所贡献,到凡川运动后,此地区的源岩均已达到成熟排烃阶段,而此时 F3 断层处于活动期,垂向

封闭性较差,而 F2 断层由于在戴一段沉积期后已不再活动,而且垂向封闭性较好,因此,F3 断层为油气垂向运移的主要通道。

4.3 吡咯类含氮化合物的示踪分析

前人研究表明,在油气二次运移过程中,随运移距离增大,原油中含氮化合物特征将发生下列变化:

(1)含氮化合物绝对丰度降低;(2)氮官能团遮蔽型异构体相对于半遮蔽型异构体或暴露型异构体富集;(3)烷基吡唑相对于烷基苯并吡唑富集;(4)苯并[a]吡唑比苯并[c]吡唑相对富集^[16-20],因此,分别选取了祝庄断阶带 F2 断层以及草舍断阶带 F3 断层不同层位原油样品分析。研究表明(图 8),祝庄断阶带祝庄油田祝 2 井阜三段原油、州城油田洲 6 井、洲 8 井、QK5 井阜一段含氮化合物总浓度($\mu\text{g/g}$)依次为 27.28、10.80、9.48、8.77、8.72,DMC(暴露型)化合物浓

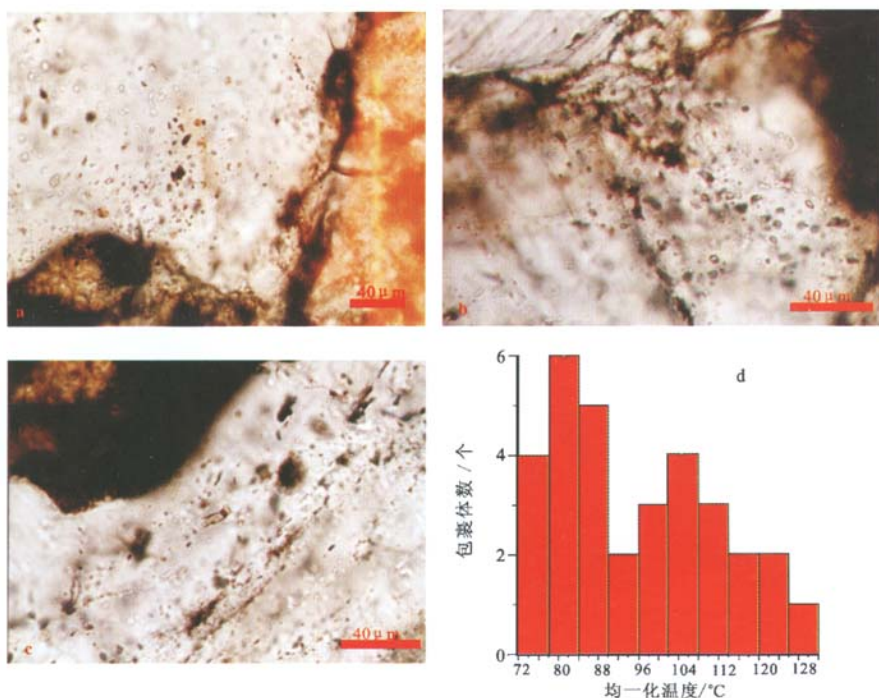


图 7 草舍构造带包裹体与均一化温度分布直方图

a—石英碎屑液烃包裹体,单偏光;b—石英碎屑中液烃包裹体,单偏光;c—石英碎屑液烃包裹体(切穿石英颗粒及其次生加大边的微裂隙)单偏光;d—包裹体均一化温度分布直方图

Fig.7 Frequency histograms of homogenization temperatures of fluid inclusions in the Caoshe fault belt
a—Liquid hydrocarbon fluid inclusions in quartz grains, plain light; b—Liquid hydrocarbon fluid inclusions in quartz grain, plain light; c—Liquid hydrocarbon fluid inclusions in quartz grains (microfractures cutting through quartz grains and their overgrowth edges) plain light; d—Histograms of homogenization temperatures of fluid inclusions

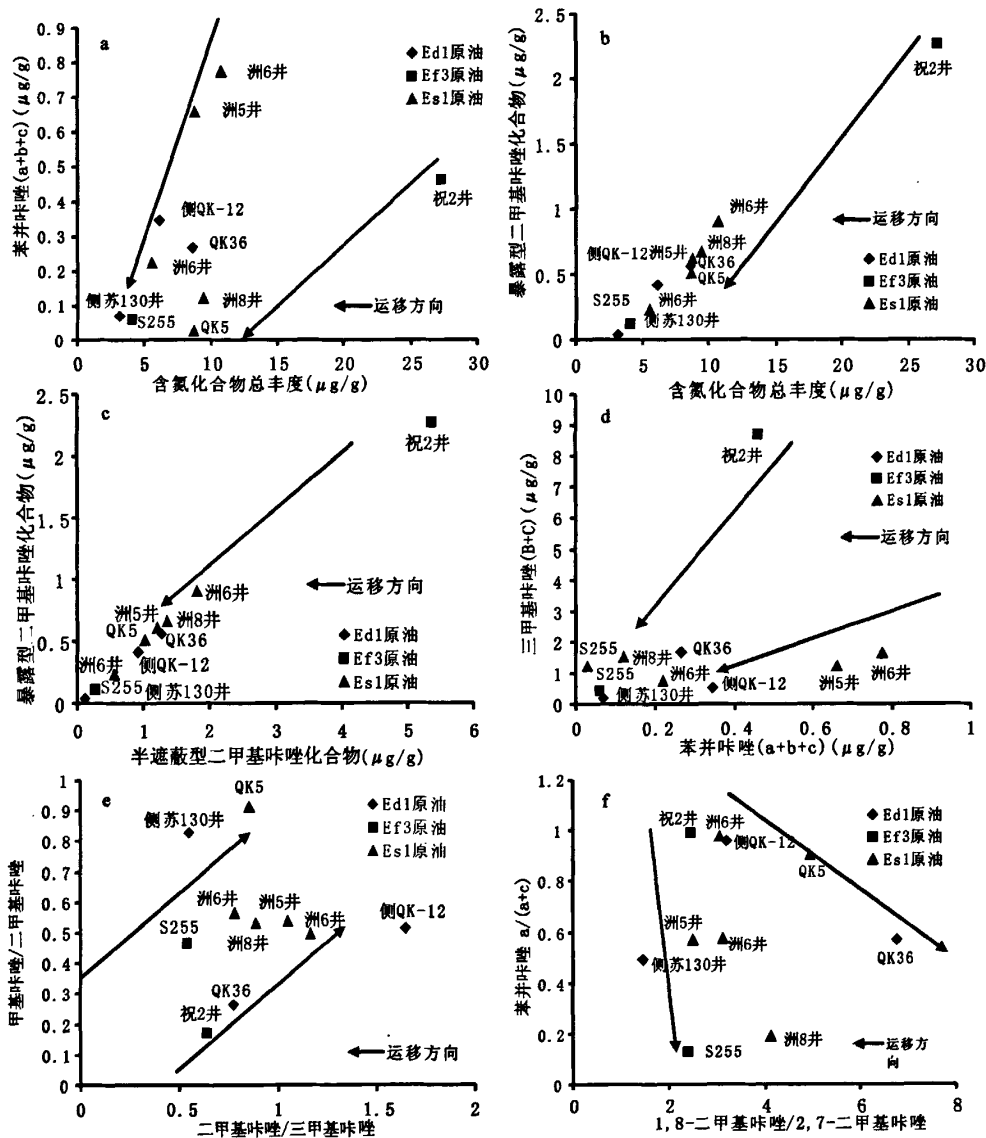


图 8 断阶带吡咯类化合物油气运移分馏效应

Fig.8 Fractionation effects of pyrrolic nitrogen compounds in oils from fault steps during migration

度($\mu\text{g/g}$)依次为 2.27、0.90、0.66、0.61、0.51,存在明显的浓度梯度变化,含氮化合物与苯并吡啶[a+b+c]、含氮化合物与 DMC(暴露型)、DMC(遮蔽型)与 DMC(暴露型)以及苯并吡啶[a+b+c]与 TMC(B+C)浓度具有很好的相关性(图 8-a-d);祝 2 井、洲 6 井、洲 8 井、QK5 井原油含氮化合物相关参数 1,8-/2,7-DMC 依次为 2.45、3.14、4.14、4.94,含氮化合物的参数(TMC)A/C 与(TMC)A/B,DMC/ TMC 与 MC/

DMC,DMC(遮蔽型)/ DMC(半遮蔽型),DMC(遮蔽型)/ DMC(暴露型)也具有一定的相关性(图 8-e、h)。因此,结合断层封闭性综合研究表明,F2 断层垂向封闭性差,祝庄油田阜三段原油沿 F2 断层垂向运移到垛一段,垛一段原油沿洲 6 井、QK5 井、洲 8 井区 F2 分支断层以及砂体侧向运移形成洲城油田。

与祝庄—洲城构造带相比,草舍构造带含氮化合物浓度具有一定的油气运移规律,QK12 井、苏

130 井戴一段原油总浓度依次为 $6.16 \mu\text{g/g}$ 、 $3.15 \mu\text{g/g}$ 、DMC(暴露型)化合物浓度依次为 $0.41 \mu\text{g/g}$ 、 $0.04 \mu\text{g/g}$ 、苯并呋啉 $[a+b+c]$ 浓度依次为 $0.35 \mu\text{g/g}$ 、 $0.07 \mu\text{g/g}$ 、1-MC/4-MC 为 0.40 、 0.73 ，而其余相关参数分馏效应效果也较差(图 8-e、f)。结合断层封闭性研究表明，深部原油沿 F3 断层进行短距离的垂向运移后沿断层上盘砂体做横向运移再通过不整合面进入戴南组成藏，F3 断层为主运移通道，而 F2 断层并未作为油气运移的通道。

5 结 论

(1)断层封闭性定量评价与封闭史研究表明，祝庄构造带Ⅲ号断层在三垛组沉积期整体上垂向封闭性较好，侧向封闭性较差，不能作为垂向运移的通道；F3 断层垂向封闭性明显好于 F2 断层，F2 断层更易成为油气运移的优势通道。草舍构造带三垛组沉积后，F3 断层在阜一段和泰州组层段的垂向封闭性较好，而上部层位 F3 断层封闭性差；F2 断层由于地层埋藏较浅，相对于 F3 断层，垂向封闭性较弱，但是活动期短，不易成为油气运移的通道。

(2)综合油源分布特征、油气成藏期次以及含氮化合物的示踪分析研究表明，祝庄断阶带Ⅲ号断层不能成为油气运移的优势通道，角墩子地区原油主要来源于阜四段源岩，没有阜二段与泰州组源岩的贡献，也说明了Ⅲ号断层垂向封闭性较好；F3 断层活动期短，侧向封闭性差，也不能成为油气的主要运移通道；相比之下，F2 断层活动期长，断层垂向封闭性差，侧向封闭性好，为研究区主要的优势运移通道，与油气成藏期具有较好的匹配关系，流体包裹体分析与含氮化合物示踪分析也证明了这一点。草舍断阶带 F2 断层活动期短，垂向封闭性好，侧向封闭性弱，不能成为油气运移的主要通道；相比之下，F3 断层活动期长，垂向封闭性较弱，可以作为油气运移的主要通道，后期主要通过砂体和不整合面运移聚集成藏，与生排烃史和含氮示踪均具有较好的匹配关系。

参考文献(References)

- [1] 吕延防, 付广. 断层封闭性研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002, 122-126.
- [2] Lü Yanfang, Fu Guang. The Study on Sealing Capacity of Fault [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002, 122-126 (in Chinese).
- [3] 高先志, 陈祥, 原建香, 焉善盆地博湖坳陷断层封闭性与油气藏形成[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(1): 35-38.
- [4] Gao Xianzhi, Chen Yang, Yuan Jianxiang. Sealing effect of faults on petroleum migration and accumulation in Bohu depression of Yanqi Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24 (1): 35-38 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李明诚. 油气运移基础理论与油气勘探 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(4): 379-383.
- [6] Li Mingcheng. Basic principles of migration and hydrocarbon exploration [J]. Earth Science -Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(4): 379-383 (in Chinese with English abstract).
- [7] England W A, Mackenzie A S, Mann D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of Geological Society of London, 1987, 144 (2): 327-347.
- [8] Price L C. Basin richness and source rock disruption: A fundamental relationship [J]. Journal of Petroleum Geology, 1994, 17 (1): 5-38.
- [9] 秦胜飞, 贾承造, 陶士振. 塔里木盆地库车坳陷油气成藏的若干特征[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 103-108.
- [10] Qin Shengfei, Jia Chengzao, Tao Shizhen. Some characteristics of oil and gas accumulation in the Kuqa depression, Tarim basin[J]. Geology in China, 2002, 29(1): 103-108 (in Chinese with English abstract).
- [11] 郝芳, 邹华耀, 王敏芳, 等. 油气成藏机理研究进展和前沿研究领域[J]. 地质科技情报, 2002, 21(4): 7-14.
- [12] Hao Fang, Zou Huayao, Wang Minfang, et al. Research advances and frontier areas of mechanisms of petroleum accumulation [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(4): 7-14 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王震亮, 陈荷立. 有效运聚通道的提出与确定初探[J]. 石油实验地质, 1999, 21(1): 71-75.
- [14] Wang Zhenliang, Chen Heli. Preliminary approach to the definition and confirmation of effective pathways for migration and accumulation [J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(1): 71-75 (in Chinese with English abstract).
- [15] 董国臣, 孙景民, 张守鹏, 等. 廊固凹陷古近系层序地层特征及油气储集规律探讨[J]. 中国地质, 2002, 29(4): 397-400.
- [16] Dong Guochen, Sun Jingmin, Zhang Shoupeng, et al. Paleogene sequence stratigraphy and oil-gas accumulation in the Langgu subdepression [J]. Geology in China, 2002, 29 (4): 397-400 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张忠民, 李铁军, 赵洪文, 等. 库车坳陷南缘油气成藏主控因素及勘探前景[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1321-1327.
- [18] Zhang Zhongmin, Li Tiejun, Zhao Hongwen, et al. Key controlling factors for hydrocarbon accumulation on the southern margin of the Kuqa depression and prospects for hydrocarbon exploration [J]. Geology in China, 2006, 33 (6): 1321-1327 (in Chinese with English abstract).

- [12] 张枝焕, 关强. 新疆三塘湖盆地二叠系油源分析 [J]. 石油实验地质, 1988, 20(2):174-181.
Zhang Zhihuang, Guang Qiang. The Permian source rock analysis in the Santanghu Basin of Xinjiang [J]. Experimental Petroleum Geology, 1988, 20(2):174-181 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张枝焕, 关强, 阳安成. 三塘湖盆地煤层与原油地球化学特征对比 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(3):207-211.
Zhang Zhihuang, Guang Qiang, Yang Ancheng. Correlation of geochemical characteristics between coals and crude oils in Santanghu basin [J]. Oil and Gas Geology, 1999, 20(3): 207-211 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘德汉. 包裹体研究—盆地追踪的有力工具 [J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4):149-154.
Liu Dehan. Fluid inclusion studies—an effective means for basin fluid investigation [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience, Beijing), 1995, 2 (3/4): 149-154 (in Chinese with English abstract).
- [15] Lisk M, O'Brien G W, Eadington P J. Quantitative evaluation of the oil Zieg potential in the Oliver gas field, Timor Sea, Australia [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(9):1531-1542.
- [16] Larter S R, Mills N. Phase-controlled molecular fractionation in migrating petroleum charges [C]//England W A and Fleet A J. Petroleum Migration. London:Geological Society Special Publication, 1992:137-147.
- [17] Li M, Larter S R, Stoddart D. Fractionation of pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration, derivation of migration related geochemical parameters [C]//Cubitt J M, England W A. The Geochemistry of Reservoirs. Geological Society Special Publication, London, 1995:103-123.
- [18] Liu L F, Xu X D, Mao D F, et al. Application of carbazole compounds in study of hydrocarbon migration [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42 (23):1970-1973.
- [19] 张枝焕, 王铁冠, 吴水平, 等. 原油中部分吡咯类含氮化合物运移参数的适用性 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31 (2):162-167.
Zhang Zhihuan, Wang Tieguang, Wu Shuiping, et al. Discussion on effects of pyrrolic nitrogen compound parameters on petroleum migration [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 24(2):162-167 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王铁冠, 李素梅, 张爱云, 等. 利用原油含氮化合物研究油气运移 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4):83-86.
Wang Tieguan, Li Sumei, Zhang Aiyun, et al. Oil migration analysis with pyrrolic nitrogen compounds [J]. Acta Petrolei Sinica (Science & Technology Edition), 2000, 24 (4):83-86 (in Chinese with English abstract).

Quantitative evaluation of the sealing capacity and identification of the preferred petroleum migration path in the Quintong subbasin, Subei basin

LU Huang-sheng¹, QIN Li-ming², LIU Jun², YANG Yong-cai², HU Ying³,
FANG Chao-he⁴, ZHANG Zhi-huan²

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, China University of Petroleum, Changping,

Ministry of Education, Beijing 102249, China; 3. China National Oil and Gas Exploration

and Development Corporation, CNPC, Beijing 100034, China; 4. Langfang Branch, PetroChina Research Institute
of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, Hebei, China)

Abstract: In the Quintong subbasin, the fault system is well-developed, and the faults controlling petroleum accumulation include faults F1, III, F2 and F3 and their branch faults, which divide the fault steps into the Zhuzhuang wrench fault belt in the north and Caoshe wrench fault belt in the south. Based on the quantitative evaluation of the vertical and lateral sealing capacities of the faults, combined with the history of hydrocarbon generation and expulsion, distribution of oil sources, formation stage of petroleum accumulations and tracing analysis of pyrrolic nitrogen compounds, there is appreciable difference in sealing capacities of faults III, F2 and F3 in different study areas. In the Zhuzhuang fault belt, the vertical sealing capacity of fault III is good and cannot act as conduits of petroleum migration; so in the Jiadunzi area, the oil was mainly derived from source rocks of the fourth member of the Funing Formation, but there are no contributions from the second member of the Funing Formation and the Taizhou Formation. The activity of fault F3 is short-continued and its lateral sealing capacity is poor; so this fault is not a conduit of petroleum migration either. By contract, fault F2 is long-active and its vertical sealing capacity is poor while its lateral sealing capacity is good; so this fault is a main conduit of petroleum migration in the Zhuzhuang area and has a good match with the stage of formation of petroleum accumulations. The distribution of fluid inclusions and tracing analysis of pyrrolic nitrogen compounds also support this. Study also indicates that fault 2 in the Caoshe fault belt is short-active and has a good vertical sealing capacity but a poor lateral sealing capacity; so this fault is not a conduit of petroleum migration. Fault F3 is long-active and has a weak vertical sealing capacity; so it is a preferred conduit of petroleum migration. In the late stage, petroleum migrated and was accumulated mainly through sand bodies and unconformities, which also matches well with the history of hydrocarbon generation and expulsion, the formation stage of accumulation and the analysis of pyrrolic nitrogen compounds.

Key words: fault sealing analysis; petroleum migration path; fault step of the Quintong subbasin; Subei basin

About the first author: LU Huang-sheng, male, born in 1961, doctoral student, engages in petroleum geology; E-mail: lhs2100@163.com.

About the corresponding author: ZHANG Zhi-huan, E-mail: zhangzh3996@vip.163.com.