https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.119

东海盆地西湖凹陷中央背斜带反转构造对油气成藏的控制作用

杨子杰[1,2,3],陈冬霞[1,2,3*],常吟善[4],王 军[4],陈晓意[1,2,3],王福伟[1,2,3],刘金水[4],潘劲捷[1,2,3],刘 晨[1,2,3],王翘楚[1,2,3],王昱超[1,2,3],曲洪达[1,2,3],荣澜熹[1,2,3]

1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249
2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249
3. 中国石油大学(北京)海南研究院,海南三亚 572025
4. 中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335

摘 要: 西湖凹陷在中新世期间发生了强烈的构造反转,因此揭示其与油气成藏的耦合作用尤为重要.该研究利用三维地震、录井和测井等资料,并采用多方法定量评估构造反转的强度.结果表明:中央背斜带的凹-隆转换显著,背斜核部发育近EW向的横张正断层,早期NNE-NE向的正断层受到挤压反转发生活化,形成正反转断层,并且根据反转正断层特征划分出八种反转构造样式.通过褶皱波幅比、断裂分形及断层反转率等评价方法,明确中央背斜带的反转强度呈现出北强-南弱的特征,基于此建立了4种成藏模式:Ⅰ型:弱反转-继承性活化断砂耦合控藏模式;Ⅱ型:中强反转-高强度调整型深层局部富集模式;Ⅲ型:强反转-接力式纵向多层系局部富集模式;Ⅳ型:强反转-未贯穿型规模富集模式.深化了对西湖凹陷构造反转背景下油气成藏机理的认识,为类似盆地的勘探提供了指导意义.

关键词: 反转背斜;构造反转;油气成藏;西湖凹陷;东海盆地;石油地质学.

中图分类号: P618.13 **文章编号:** 1000-2383(2026)07-2682-21 **收稿日期:** 2026-01-07

Control of Hydrocarbon Accumulation by Inverted Structure of Central Anticline Belt in Xihu Depression, East China Sea Basin

Yang Zijie[1,2,3], Chen Dongxia[1,2,3*], Chang Yinshan[4], Wang Jun[4], Chen Xiaoyi[1,2,3], Wang Fuwei[1,2,3], Liu Jinshui[4], Pan Jinjie[1,2,3], Liu Chen[1,2,3], Wang Qiaochu[1,2,3], Wang Yuchao[1,2,3], Qu Hongda[1,2,3], Rong Lanxi[1,2,3]

1. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*
2. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*
3. *Hainan Institute of China University of Petroleum (Beijing), Sanya* 572025, *China*
4. *Research Institute of Shanghai Branch of CNOOC (China) Limited, Shanghai* 200335, *China*

基金项目: 中海石油(中国)有限公司上海分公司重大科技专项(No. CCL2024SHPS001RS).

作者简介: 杨子杰(1998—),男,博士研究生,从事油气成藏机理与分布规律.ORCID:0000-0002-9514-0481. E-mail:yangzj2834@163.com

* **通讯作者:** 陈冬霞, ORCID:0000-0003-4657-9081. E-mail:Lindachen@cup.edu.cn

引用格式: 杨子杰,陈冬霞,常吟善,王军,陈晓意,王福伟,刘金水,潘劲捷,刘晨,王翘楚,王昱超,曲洪达,荣澜熹,2026.东海盆地西湖凹陷中央背斜带反转构造对油气成藏的控制作用.地球科学,51(7):2682-2702.

Citation: Yang Zijie, Chen Dongxia, Chang Yinshan, Wang Jun, Chen Xiaoyi, Wang Fuwei, Liu Jinshui, Pan Jinjie, Liu Chen, Wang Qiaochu, Wang Yuchao, Qu Hongda, Rong Lanxi, 2026. Control of Hydrocarbon Accumulation by Inverted Structure of Central Anticline Belt in Xihu Depression, East China Sea Basin. *Earth Science*, 51(7): 2682-2702.

Abstract: The Xihu Depression underwent significant tectonic inversion during the Miocene, underscoring the importance of elucidating its coupling effects with hydrocarbon accumulation. This study utilizes various data, including 3D seismic, well logging, and employs multiple methods for a quantitative assessment of tectonic inversion intensity. The results indicate that the depression-uplift transition in the central anticline zone is pronounced, featuring the development of near EW extensional normal faults in the shallow anticline core, while early NNE-NE trending normal faults underwent activation through compressional inversion. Based on the characteristics of inversion normal faults, eight types of inverted structural styles have been classified. Through quantitative evaluations using fold amplitude ratios, fracture fractals, and fault inversion rates, it established that the central anticline belt exhibits a north-strong and south-weak pattern of tectonic inversion intensity, based on which four characteristic hydrocarbon accumulation models were established: Type I: fault-sand coupling under weak structural inversion;Type II: deep localized enrichment driven by intensive structural adjustment under moderate-to-strong inversion; Type III: vertical multi-stratigraphic enrichment facilitated by relay-style faulting under strong inversion; Type IV: large-scale enrichment preserved by non-penetrating faults under strong tectonic inversion. This research enhances the understanding of hydrocarbon accumulation mechanisms within the context of tectonic inversion in the Xihu Depression and provides valuable insights for exploration in analogous basins.

Key words: inverted anticlines; tectonic inversion; hydrocarbon accumulation; Xihu Depression; East China Sea Basin; petroleum geology.

0　引言

构造反转指的是由于盆地内区域应力状态发生改变,由拉张应力场转变为挤压性应力场则为正反转构造,反之则为负反转构造;其中反转构造是盆地受到构造反转运动后的一种具体表现形式,表现为横向拉伸与压缩的转变、垂向沉降与抬升、断层性质的转变以及特定反转构造的形成(Bally *et al.*, 1984; Harding *et al.*, 1985; Williams *et al.*, 1989; Buiter *et al.*, 2009; Tari *et al.*, 2023).反转构造在造山带和含油气盆地的演化中发挥着重要作用,构造反转运动过程会导致沉积盆地的地质结构和几何形状发生重大变化(肖坤叶等,2025).构造反转作用通过对盆地内断裂系统的几何特征与空间展布进行重构,有效重塑了油气的运移通道、聚集过程,此外构造反转强度与油气成藏关键要素的耦合匹配关系对油气成藏有重要影响(曾维特等,2012;薛永安等,2019;Aziz *et al.*, 2025).反转隆升的过程中会造成地层的抬升剥蚀,一方面会造成差异性的烃源岩热演化过程和生排烃时期(唐大卿等,2013);另一方面可以抑制机械压实作用和减缓成岩作用(Lin *et al.*, 2024).挤压反转强度会造成沉积地层向上弯曲,形成反转背斜带,强烈的反转作用会影响油气圈闭的规模和完整性(田琨等,2020).构造反转还会重塑盆地的结构格架,通过控制“源-汇”体系的演化,深刻改变了储集层的沉积特征与空间分布规律(Fu *et al.*, 2025).因此,深入探讨构造反转的复杂性及其对油气富集的控制作用,对于评估区域勘探潜力具有重要的实际意义(郭齐军等,2024;宋一帆等,2024).

东海陆架盆地在渐新世至中新世,在太平洋板块和菲律宾板块俯冲及碰撞的运动背景下经历了复杂的构造演化过程(张迎朝等,2025).区域应力场由伸展状态到挤压状态转变导致了盆地内各种构造单元和不同地层发生显著变形,凹陷内部发育不同规模的正反转构造.前人已经认识到西湖凹陷沉积中心与边缘斜坡区域的差异隆升是构造反转运动的重要表现形式,尤其在中新世中晚期西湖凹陷遭受强烈的挤压作用(龙井运动),在东部断阶带和中央背斜带形成大量的反转背斜构造.西湖凹陷内发育平湖组广覆式煤系优质烃源岩,主要储层花港组砂岩,在岩相约束下的演化过程中表现出显著的差异致密特征(林建力等,2019),这两者共同构成了构造反转背景下油气大规模聚集成藏的物质基础与空间格架.前人采用定性和半定量方法探讨了构造反转运动形成的构造特征及其对油气运移、聚集和保存的影响,揭示了凹隆转换特征及其控藏作用(郭真等,2015;何新建等,2024).但针对整个中央反转背斜带缺少系统的反转构造定量研究以及油气富集规律的深入剖析,尤其是关于区域背斜带及断裂带内部的断裂发育特征及其反转构造响应特征,缺少系统的定量评价工作.系统定量分析构造反转的强度、特征及其对油气富集的控制机理,为西湖凹陷中

央反转背斜带油气富集地质特征的认识和勘探开发策略的制定提供了重要的理论支撑.

本文在前人研究的基础上,深化了西湖凹陷反转构造特征的研究,采用三维地震资料、地球化学资料和钻井、测井数据以研究反转运动中形成的反转构造并分析它们的几何样式,对整个中央背斜带的反转构造进行多方法定量评价,系统总结了不同尺度反转构造响应下的反转强度及差异性,探讨了西湖凹陷不同尺度响应下的反转构造对油气成藏条件的控制作用及时空耦合关系,最终建立不同构造反转强度控制下的油气差异富集模式.本研究不仅为西湖凹陷中央反转背斜带的油气勘探提供了科学支撑,其所构建的多方法定量评价框架,在凹陷内其他构造带乃至全球类似反转盆地的油气藏解剖与成藏评价中,均具有重要的普适性与借鉴意义.

1 区域地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地的东部边缘,呈北北东方向延伸,为盆地内规模较大的含油气凹陷,面积约 5.9×10^4 km^2(周心怀等,2020).西湖凹陷平面上可以划分为西部斜坡带、西次洼、中央背斜带、东次洼和东部断阶带(图 1).西湖凹陷反转构造主要发育于中央背斜带,且发育类型多样,对油气成藏具有典型的控制作用,是西湖凹陷研究反转构造的热点地区.本次研究区的范围基本上覆盖了整个中央背斜带,自南向北依次分布着 6 个不同的构造,平面上形态呈窄长条状,具体包括 A 构造带、B 构造带、C 构造带、D 构造带、E 构造带和 F 构造带.西湖凹陷经历了断陷期(晚白垩世至早-中始新世)、断-坳转换期(中-晚始新世)、坳陷-反转期(渐新世-中新世)和区域热沉降(上新世至今)4 个构造演化阶段(蒋一鸣等,2020;刘金水等,2020)(图 2).西湖凹陷始新世应力场为 NW-SE 向和 NWW-SEE 向的伸展拉张应力环境,从渐新世开始,太平洋板块持续向东后撤,继续远离东海盆地区,菲律宾海板块开始向西俯冲,引发冲绳海槽近东西向伸展,对西湖凹陷产生了强烈的向西推挤力,区域应力场由伸展拉张应力转变为 NW-SE 向挤压性应力场.此时西湖凹陷整体处于挤压背景,在中新世末期的龙井运动中,西湖凹陷经历了地质时期中最为强烈的东西向水平挤压,反转构造在整个西湖凹陷均有发育,但在中央背斜带最为强烈,形成规模较大的反转背斜构造(郭真等,2015;朱伟林等,2025).

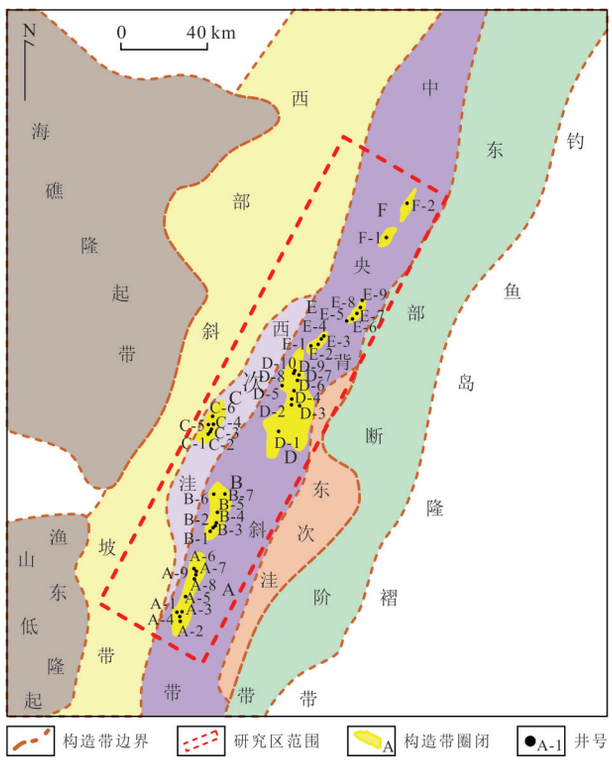


图 1 东海盆地西湖凹陷构造纲要图

Fig.1 Structural scheme of the Xihu Depression, East China Sea Basin

在中生界基底之上,沉积了数万米的新生界地层.自下而上沉积了始新统八角亭组(E_2bj)、宝石组(E_2b)、平湖组(E_2p),渐新统花港组(E_3h),中新统龙井组(N_1l)、玉泉组(N_1y)、柳浪组(N_1ll),上新统三潭组(N_2s)和第四系东海群(Qpdh)(图 3).其中,始新统平湖组和渐新统花港组是主要油气勘探层系.平湖组为钓鱼岛障壁背景下三角洲-潮坪-潟湖沉积,沉积物主要由粉砂岩、泥岩、碳质泥岩和煤组成,厚度大,分布广,生烃潜力大,提供了持续供烃的物质基础,其主要形成于西湖凹陷中-晚始新世强烈断陷阶段,为主要的烃源岩层系(Zeng *et al.*, 2021;张迎朝等,2025).花港组为陆相河湖交互体系,发育大型河流-三角洲储集体,其中,中央背斜带的花港组储层埋深大、温度高、经历了复杂的成岩演化,现今主要为低渗-特低渗储层,受构造-沉积控制深部发育局部优质甜点段.西湖凹陷目前已发现的规模油气藏多数分布在低渗-特低渗的花港组储层中,构成了西湖凹陷主要的砂岩储层勘探开发层段(Zeng *et al.*, 2021).

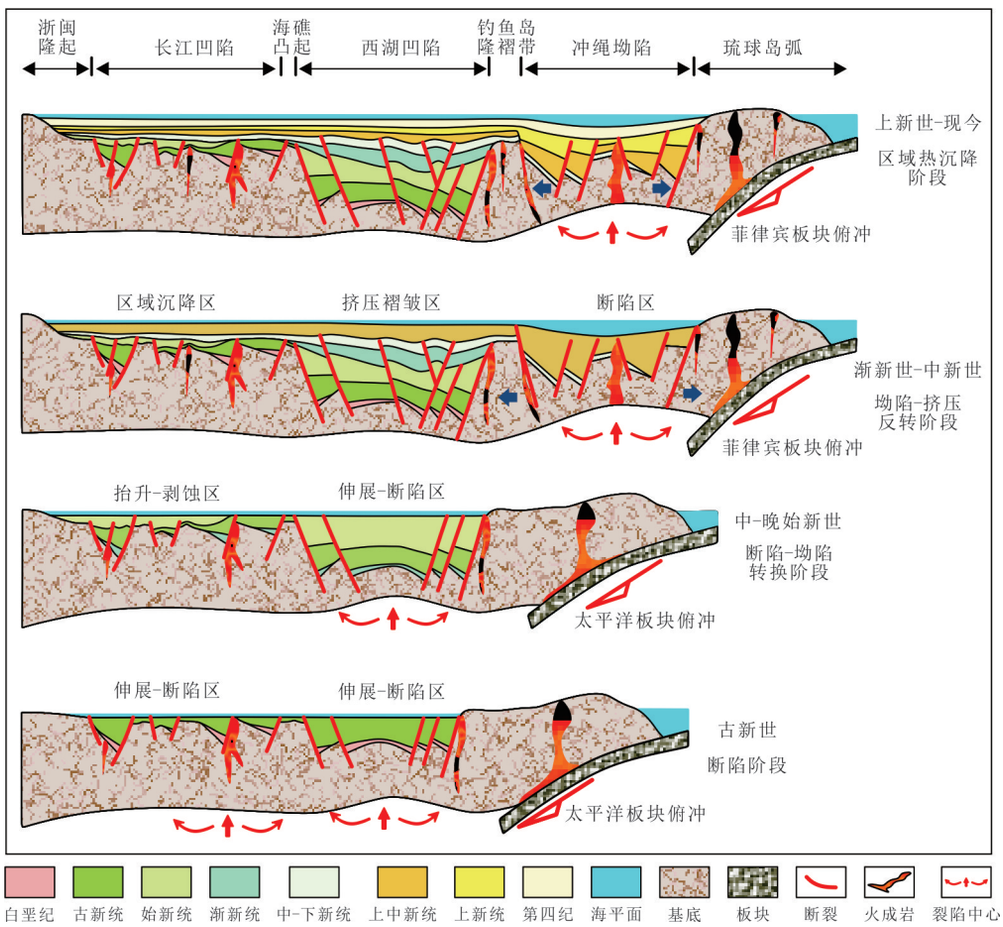


图 2　东海盆地西湖凹陷构造演化示意图(据刘金水等,2020修改)

Fig.2　Schematic diagram illustrating the tectonic evolution of the Xihu Depression, East China Sea Basin

2　不同尺度的反转构造响应特征

2.1　反转背斜响应特征

西湖凹陷中央背斜带的沉积中心与边缘斜坡的垂向差异沉降与抬升是构造反转运动后最为直观、重要的表现形式,同时也造就了中央背斜带反转背斜圈闭群的整体格局.本次研究基于精细构造解释,应用残厚法(闫海军等,2016),恢复花下段顶界面(T21)沉积期古构造形态(图4a).受到来自东侧的挤压逆冲作用影响,中央背斜带沉积地层表现出差异的隆升起伏,其中中南部及南部凹-隆变化特征相对较弱,局部地区发育多个宽缓低幅反转背斜构造,呈NNE走向狭长型分布(图4a~4c);而在中央背斜带中北部和北部的凹-隆变换最为显著,发育多个宽缓高幅反转背斜构造,呈NE-NNE走向型分布,同时在隆升较强的地区遭受的剥蚀程度较大,而相对弱隆升区剥蚀程度较弱发生沉降作用,导致了古沉积中心向古斜坡迁移,也奠定了D构造发育成为大型挤压背斜的构造形态(图4a、4b、4d).仅从反转运动造成的地层凹-隆变化特征分析,尽管局部的反转隆升强度有所差异,但是总体上中央背斜带反转隆升强度由北向南逐渐减弱.

2.2　区域背斜带内断裂响应特征

反转背斜的形成是构造反转运动的重要表现形式之一,此外断裂的发育期次与几何形态的变化也是重要的表现形式.西湖凹陷断裂体系可划分为深部断裂体系(断陷期-坳陷期)和浅部断裂体系(反转期),断陷期发育正断层性质的通源断裂体系,反转期断裂体系发育较为复杂,既有新的正断层形成,又会导致断陷期正断层发生活化,对西湖凹陷油气成藏具有重要意义.

2.2.1　断陷期断裂体系发育特征　西湖凹陷中央背斜带断陷期断裂构造平面展布规律性明显,除B构造西侧断裂受差异扭动变换作用外,绝大多数断裂为NNE或NE向展布,具有雁列状、分叉状、弧

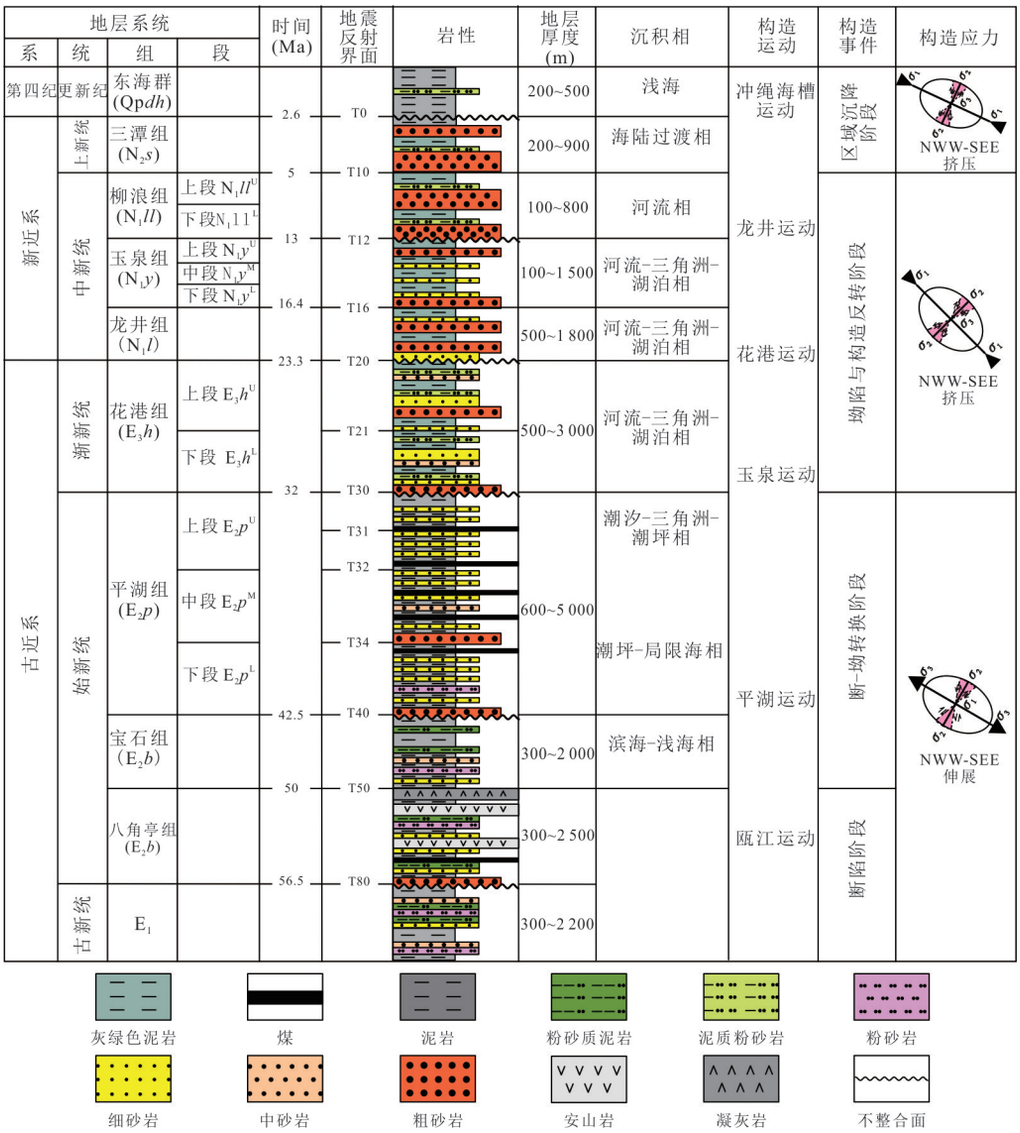


图 3 东海盆地西湖凹陷地层综合柱状图

Fig.3 Comprehensive stratigraphic histogram of the Xihu Depression, East China Sea Basin

形、直线形、“S”形等典型组合样式(图 5a).南北断裂发育规模具有差异性,北部 E 和 F 构造,以及南部 A 构造发育大量微小断裂,横向延伸距离较短,以 NNE 和 NEE 向断裂为主,中部 D 构造发育多条规模较大的断裂.在平湖组顶界面(T30),北部 E、F 构造的断裂发育密度明显低于中、南部.这一特征表明构造反转作用在该区域产生的应力强度较低,未能强烈活化早期断裂,导致其继续向上错断.

中央背斜带断陷期断裂主要发育为一系列 SE 倾向的板式正断层组成的“多米诺式”断阶结构(图 5b~5d).现今背斜高部位断裂倾向和断裂样式具有明显差异性,由南到北断裂倾向具有 NW 和 SE 向交互呈现的特点,体现了走滑断裂的特征.中部和北部还发育“Y”和“反 Y”字型断裂组合样式,这些断裂大多依附于主干断裂,是断陷断层在晚期发生再活化的具体表现.断陷期断裂纵向发育规模大,在强烈压扭应力的作用下,容易形成“花状”和“似花状”构造.

2.2.2 构造反转期断裂体系发育特征 中央背斜带内 NNE 和 NE 向断裂基本消失,只有局部的主干断裂继续发育,且发育规模较小,这些断裂主要是继承断陷期断裂发生再活化后形成的,主要分布于背斜核部,呈现出带状、雁行状组合(图 6a);此外这些反转期断裂表现出明显的南北差异分布特征,北部的 D 构造、E 构造和 F 构造反转期断裂以 NWW 向延伸为主,南部 A 构造和 B 构造反转期断裂以近

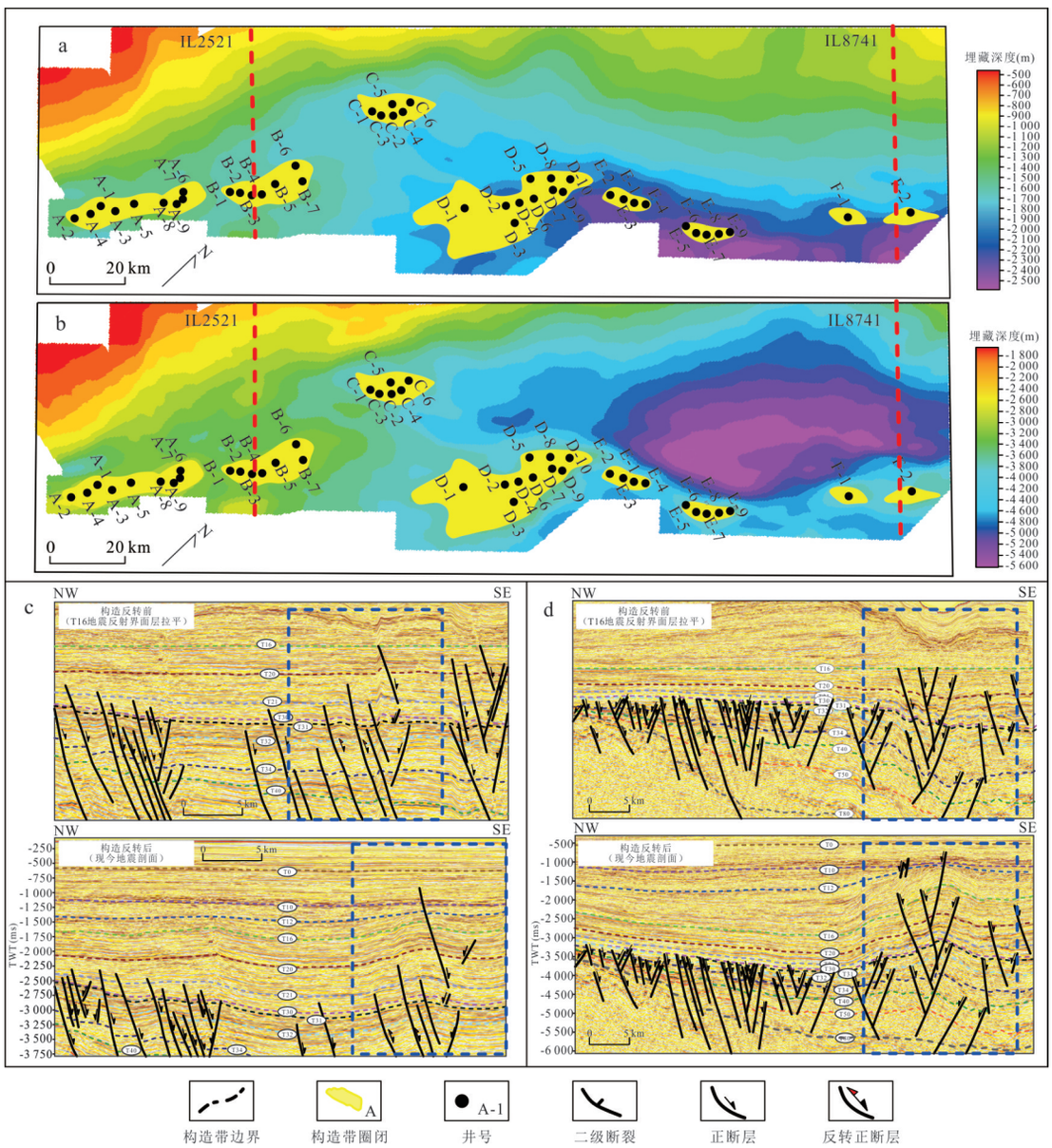


图 4　东海盆地西湖凹陷中央背斜带构造反转运动前后构造特征

Fig.4　Structural characteristics before and after tectonic inversion of the central anticline belt in Xihu Depression, East China Sea Basin

a.T21 界面 16 Ma 前古构造特征;b.T21 界面现今构造特征;c.IL2521 测线;d.IL8741 测线

EW 向延伸为主.构造反转活动最强烈时期主要集中在中新世时期,这一时期在剪切和挤压应力作用下、以及相对弱的 NS 向伸展环境下,促进了 NWW 和近 EW 向断裂形成.

受刚性基底差异发育影响(蒋一鸣等,2020),浅层反转期断裂剖面上表现出南北差异的特点,中央背斜带北部浅层断裂剖面上多表现为斜列发育,发育数量较少,向下多数终止于 T20 界面(图 6b).中部浅层断裂剖面上表现出斜列式和共轭断裂,发育的密度较大,断裂向下错断至 T21 界面,断裂切割较深,会刺穿下部背斜(图 6c);南部浅层发育共轭的横张断裂,控制局部地堑发育,横断层发育密度及规模显著高于北部,浅层断裂多数错断至 T30 界面以上,NWW 向和近 EW 向断裂在中央背斜带向下错断的层位具有显著的南深北浅特征(图 6d).

2.3　断裂带尺度内反转构造响应特征

2.3.1　断裂性质差异性变化　古新世-始新世时期,在 NW-SE 向区域拉张应力场作用下,西湖凹陷内部形成了一系列沿 NNE 或 NE 向展布的正断层(图 7a~7f),晚始新世末期,伸展作用逐渐减弱,断

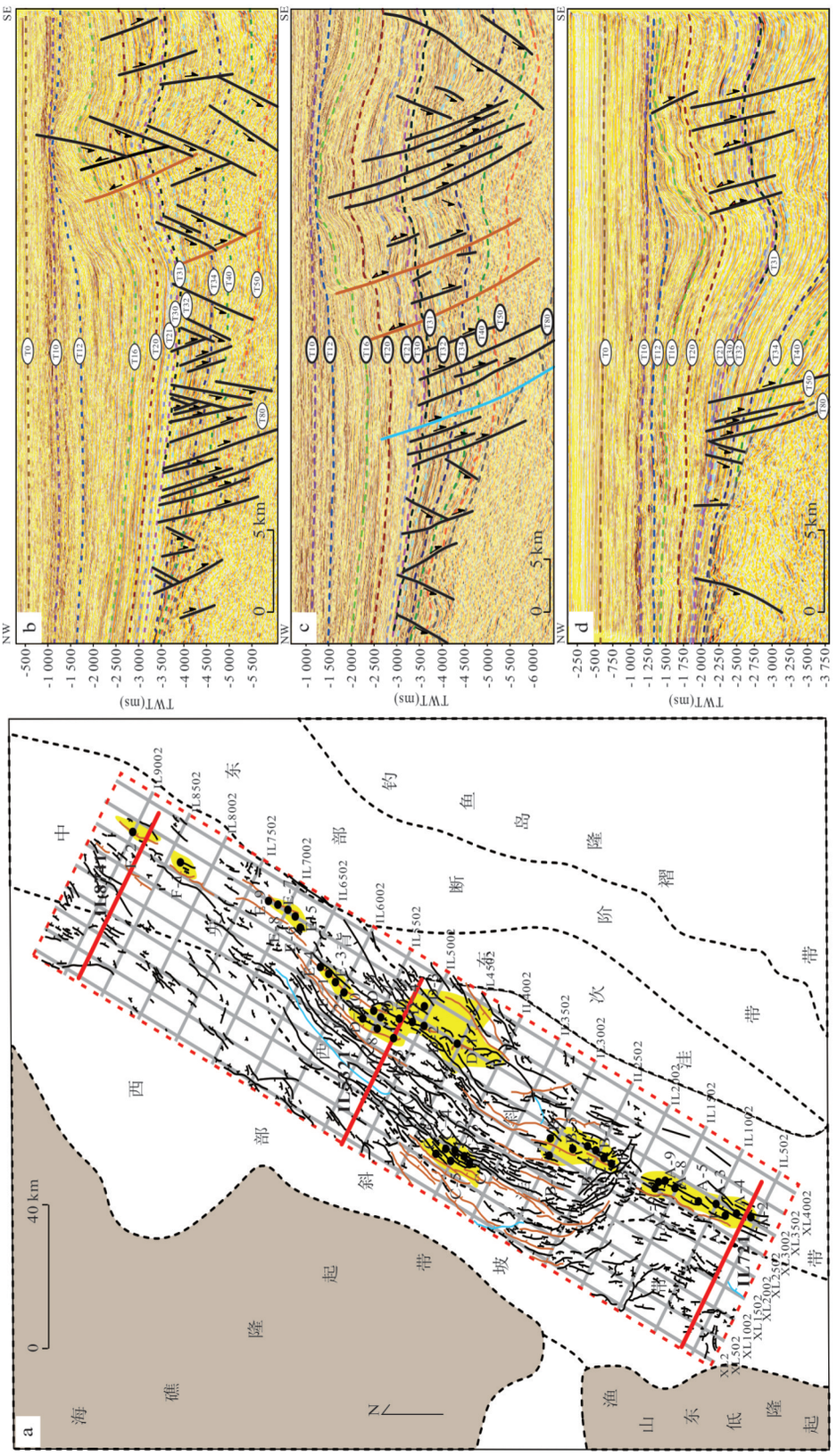


图5 东海盆地西湖凹陷中央背斜带构造断陷期断裂体系(T30界面)发育特征和NW-SE方向地震剖面图

Fig.5 Development characteristics of the fault system during the rifting period (T30) in the central anticline zone of the Xihu Depression, East China Sea Basin and seismic profiles in the NW-SE direction

a. T30地震反射界面; b. II8741测线; c. II5321测线; d. IL721测线

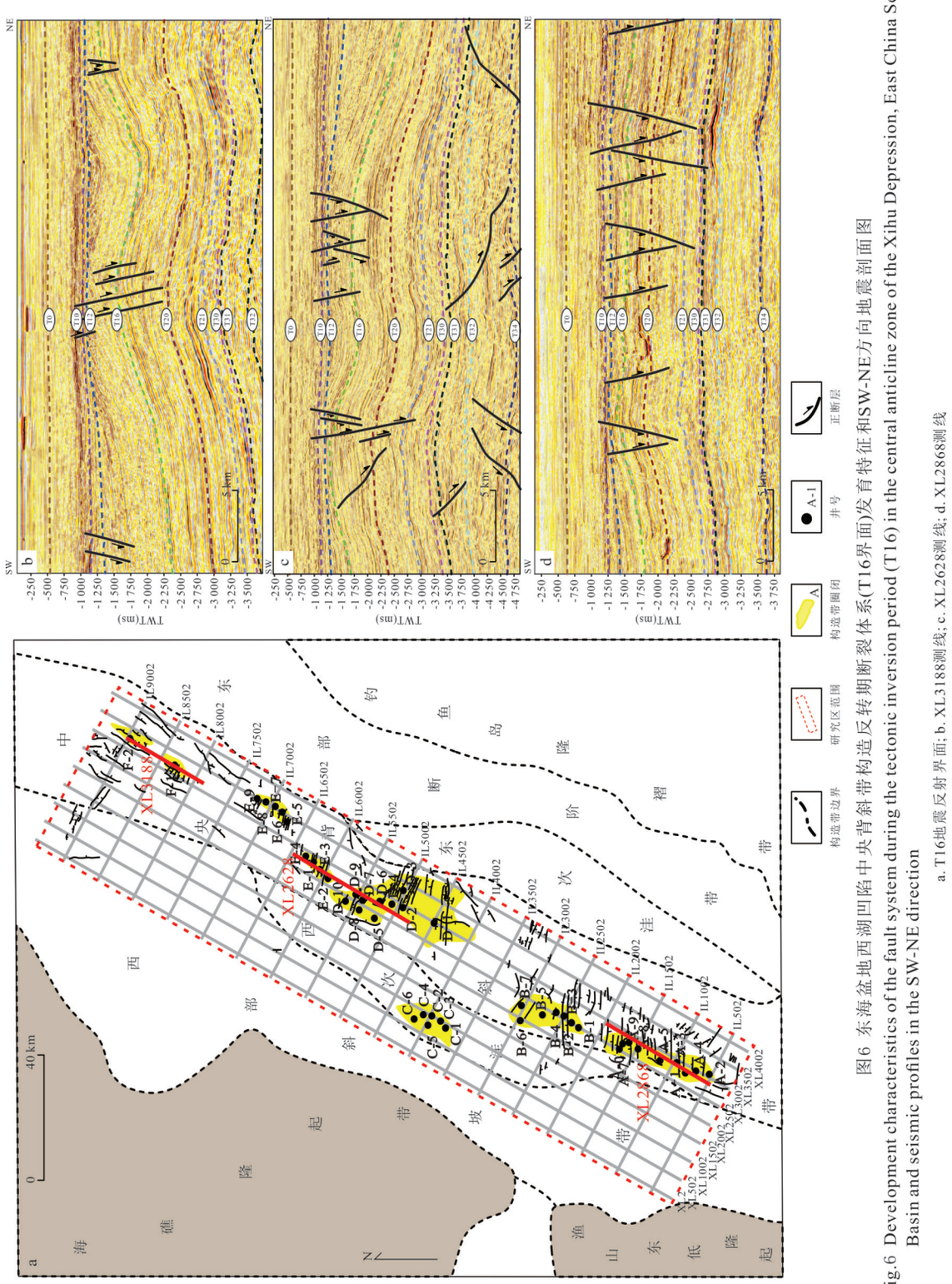


图6 东海盆地西湖凹陷中央背斜带构造反转期断裂体系(T16界面)发育特征和SW-NE方向地震剖面图

Fig.6 Development characteristics of the fault system during the tectonic inversion period (T16) in the central anticline zone of the Xihu Depression, East China Sea Basin and seismic profiles in the SW-NE direction

a. T16地震反射界面; b. XL3188测线; c. XL2628测线; d. XL2868测线

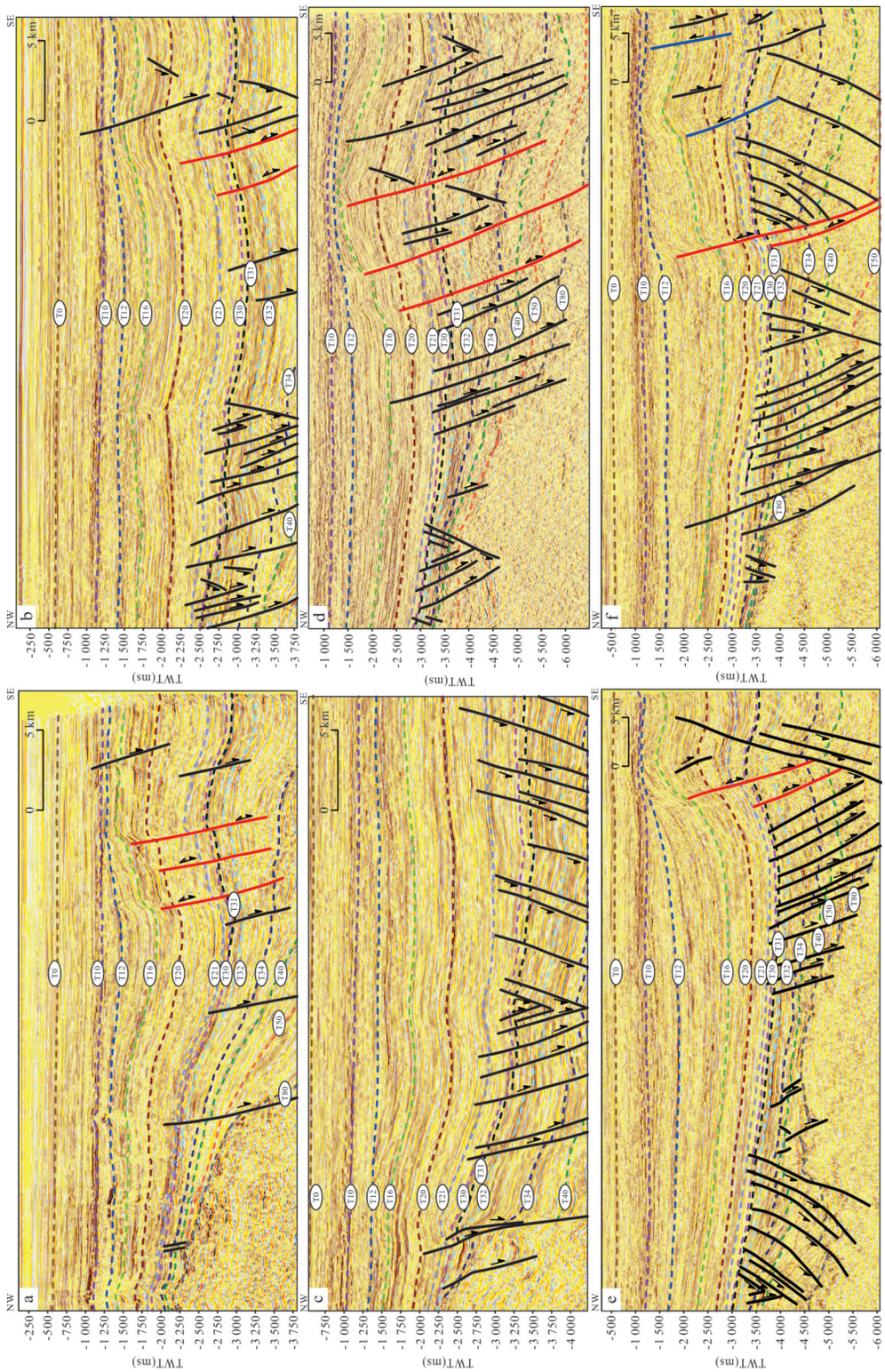


图7 不同构造带NW-SE方向地震剖面图(具体测线位置见图5a)

Fig.7 NW-SE direction seismic profiles of different structural zones (see Fig.5a for specific survey line locations)

a. A构造: 11921; b. B构造: 112521; c. C构造: 113921; d. D构造: 115541; e. E构造: 117241; f. F构造: 1L9041

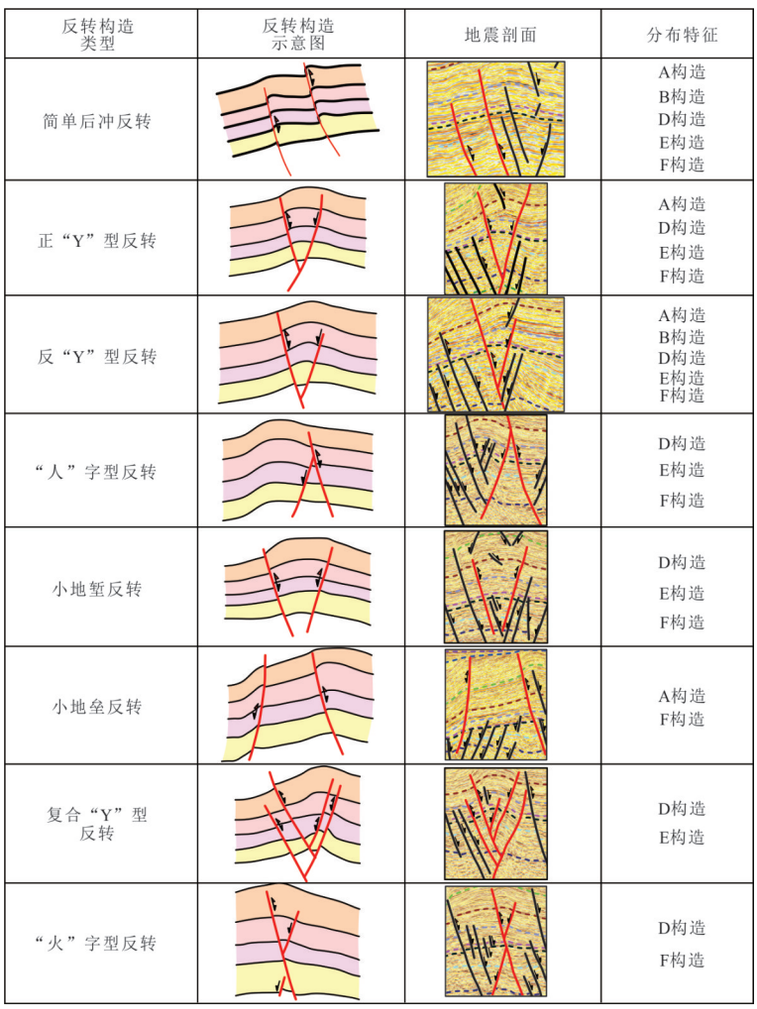


图 8　西湖凹陷中央背斜带反转构造样式

Fig.8　The inversion tectonic pattern of the central anticline belt in Xihu Depression

陷期发育的大量生长正断层逐步停止活动,尽管中新世末期应力场发生变化,仍有多数先存正断层未发生显著变化.

中新世时期受板块活动影响,区域应力场转换为NW-SE向挤压应力场,在此应力条件下,西湖凹陷内地层发生挤压隆升,造成先存正断层活化并且反转隆升形成逆断层,表现为“下正上逆”正反转断层剖面特征(图 7a、7b、7d～7f).受反转强度控制,大多数正反转断层只向上断穿至花港组及龙井组,D构造和F构造正反转断层可到达玉泉组和柳浪组,断穿至更浅层.C构造位于中央背斜带西侧,受到来自东侧的挤压应力较弱,先存正断层未形成逆断距但在上盘的浅部层系发生了褶皱变形,形成反转背斜构造(图 7c).此外在强烈挤压褶皱作用下还会形成新生逆冲断层,逆冲断层两盘厚度相差不大,为龙井运动时期的产物,悬挂于浅层,断层倾向与先存正断层倾向基本一致(图 7f).

2.3.2　反转构造样式　中央背斜带在中新世中晚期受强烈挤压,形成多种反转构造样式,包括“简单后冲反转”、“正Y型反转”、“反Y型反转”、“人字型反转”、“小地堑反转”、“小地垒反转”、“复合Y字型反转”、“火字型反转”等反转构造样式.自北向南挤压作用差异导致各构造带样式不同(图 8).

南部(A构造)以SE倾向正断层构成的“简单后冲反转”为主,局部见“正Y型”和“反Y型”及“小地垒反转”样式,单个正反转断层表现为简单的穿透型背斜反转特征断层,反映反转强度较强(图 7a 和图 8).

中南部(B、C构造)主要为“简单后冲反转”构造样式,局部发育“反Y型”样式,整体反转较弱,构造反转运动仅使C构造地层微隆升,未形成显著反转构造(图 7b、7c 和图 8).

中北部(D构造)反转构造样式较为复杂,发育SE倾向高角度叠瓦状逆冲正反转断层,与伴生断层组成“正Y型”和“反Y型”;受压扭作用影响,还出现“复合Y字型反转”、“人字型反转”和“火字型反转”构造样式;北段强挤压形成“小地堑反转”样式.多数断层刺穿背斜,显示反转作用强(图7d和图8).

北部(E、F构造)发育多条高角度SE倾向叠瓦状逆冲正反转断层,断层具“下正上逆”特征,向上刺穿至龙井组地层,以“简单后冲反转”和“反Y型”反转构造样式为主,核部见“复合Y字型”等其他反转构造样式,局部发育“小地堑反转”和“小地垒反转”构造样式(图7e、7f和图8).

总体上看,中央背斜带反转样式分布具有规律性:中北部和北部反转构造样式多样、断层向上刺穿程度高,以“正Y型”和“反Y型”反转构造样式为主;中南部反转构造样式单一、挤压较弱,以“简单后冲反转”样式为主;南部样式有所增加但不及中北部.根据反转构造样式及分布特征,反映出中央背斜带自北向南挤压反转强度有逐渐减弱的趋势.

3　不同尺度响应的构造反转强度表征

3.1　构造反转强度表征方法

3.1.1　反转褶皱波幅比　受反转运动影响,中央背斜带在区域尺度上的反转构造样式整体以反转背斜构造呈现(唐贤君等,2025).背斜的振幅直接反映了褶皱的规模和隆升高度,利用褶皱谐波分析的波长和振幅参数(Hudleston *et al.*, 1973),可以定量分析区域尺度上的反转构造强度(I_{ar})(图9a).

$$I_{ar}=\frac{2A}{W}, \tag{1}$$

式中:I_{ar}为反转背斜波幅比,单位为m/km;A为振幅,单位为m;W是波长,单位为km.

3.1.2　构造反转期中新世浅层断裂发育规模　不同断裂带的反转强度对应不同数量、密度、延伸长度和结构的浅层断裂(张宏国等,2024).结合数学地质思想,本次引入断裂分形维数的概念去表征反转强度控制下的浅层断裂发育规模(图9b).因此基于断裂体系的分形维数可以综合表征断裂空间分布特征,相对于单一参数更具有代表性.本次采用较为广泛的计盒维数法,用于计算不同构造带内的分形维数值,即分别取不同边长的正方形格子构成二维正交网格去覆盖断层体系所在的平面,在不断改变正方形边长l的情况下,分别统计出有断层迹线穿过的网格数$N_{(l)}$,$N_{(l)}$与l满足如下幂定律关系(Roy *et al.*, 2007):

$$N_{(l)}=C\cdot l^{-D}, \tag{2}$$

式中:$N_{(l)}$是不同边长格子里断裂的数量(条);C为常数,无量纲;l为正方形格子边长(m);D为分形维数,无量纲.

3.1.3　断层反转率　构造反转作用造成断层性质发生改变,相对应地会形成反转正断层或反转逆断层(Ziegler *et al.*, 1987).在构造反转过程中,同一断陷地层层序中存在一个点,这一点被称为零点,

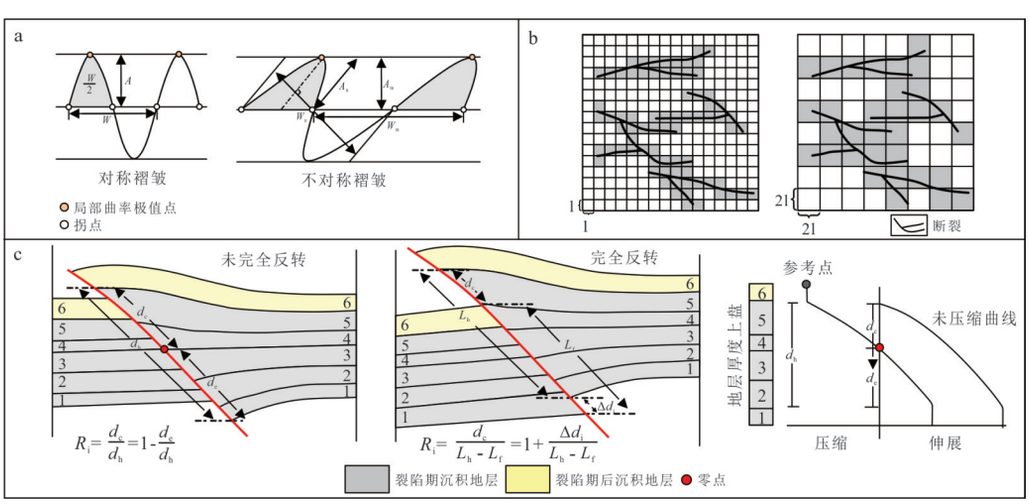


图9　构造反转强度定量计算方法示意图

Fig.9　Scheme of the method for calculating tectonic inversion intensity

a. 反转褶皱波幅比;b. 断裂分形维数;c. 断层反转率

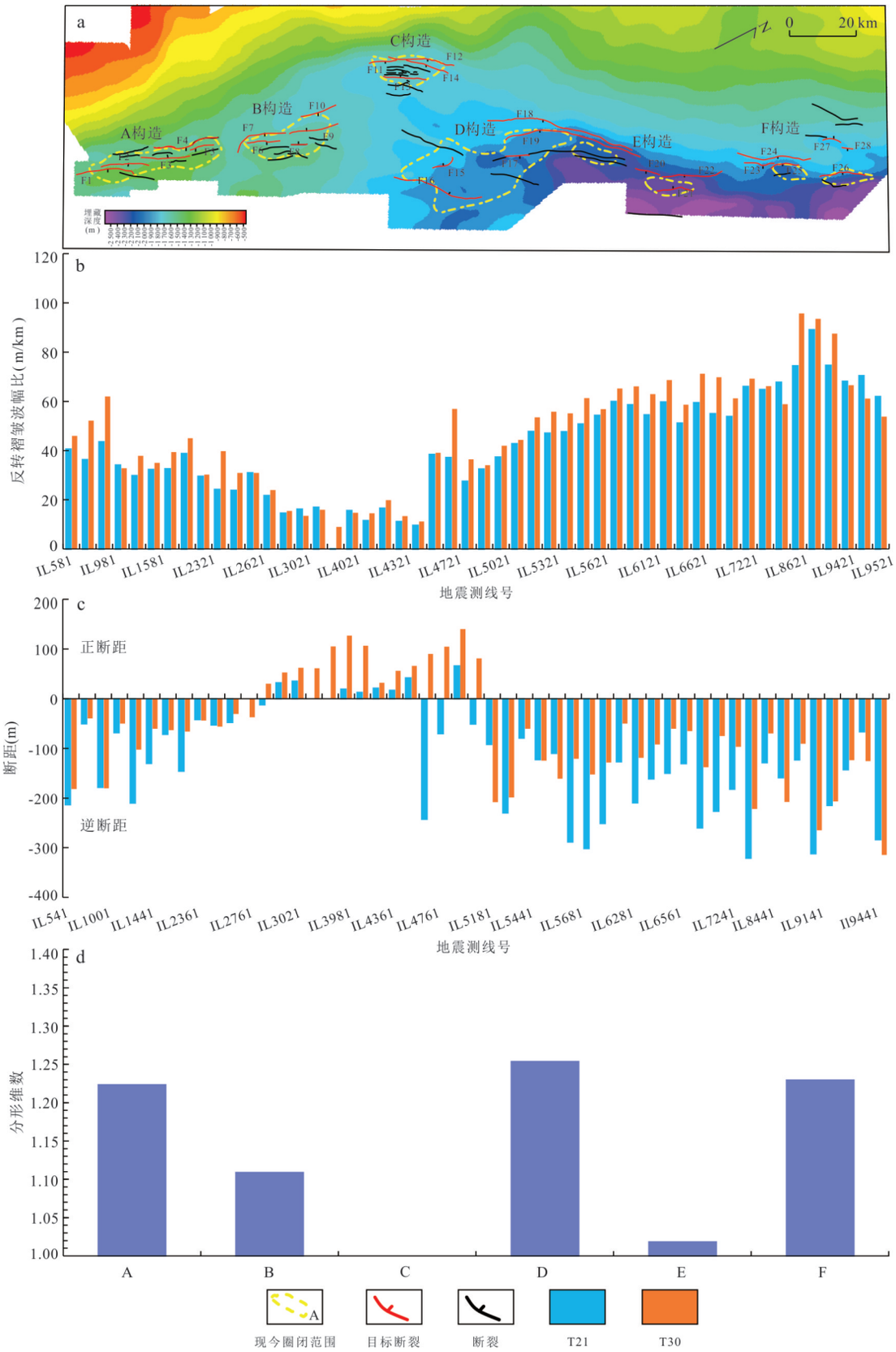


图 10　西湖凹陷中央背斜带不同构造带反转强度综合对比分析

Fig.10　Comprehensive comparative analysis diagram of the inversion intensity of different tectonic zones in the central anticline belt of the Xihu Depression

a.T21 界面 16 Ma前古构造特征;b.不同构造带反转褶皱波幅比;c.NNE 向断裂断距特征;d.不同构造带 EW 向断裂分形维数特征

是既不体现拉伸应力也不体现收缩应力的位置(Cooper *et al.*, 2020).未完全反转成逆断层时,通过分析零点位置和伸展地层、压缩地层厚度,计算断层的反转率(式3),可以定量确定断层剖面上的挤压反转相对强度(图9c);当正断层完全反转为逆断层时,通过计算沿着断层面挤压逆向滑距与正向伸展断距的比值作为反转率(Song, 1997)(式4).

$$R_i=\frac{d_c}{d_h}=1-\frac{d_e}{d_h}, \tag{3}$$

$$R_i=\frac{D_c}{L_h-L_f}=1+\frac{\Delta d_i}{L_h-L_f}, \tag{4}$$

式中:R_i为反转率,无量纲;d_c为压缩位移,单位m;d_h为伸展位移,单位m;d_e为保持正断层的位移部分,单位m;D_c为上盘平行于断层的逆冲量,单位m;L_h为裂陷期地层平行于断层的上盘地层厚度,单位m;L_f为裂陷期地层平行于断层的下盘地层厚度,单位m;Δd_i为反转的位移量,断层完全反转时为正值,单位m.

3.2 构造反转强度差异性

3.2.1 区域背斜带尺度内构造反转强度 本次研究主要通过反转褶皱波幅比、浅层断裂分形特征以及反转背斜主控断层的断距等参数,分析了中央背斜带各构造带挤压反转变形强度的差异.构造反转前,花下段古构造显示北部为沉积中心,花港组圈闭形态不明显,尚未形成规模化的背斜构造,与现今圈闭格局差异较大(图10a).直至中新世中晚期龙井运动发生大规模挤压抬升,花港组圈闭才开始逐步形成并定型.受差异反转强度影响,各构造带圈闭规模明显不同.D、E和F构造的反转背斜

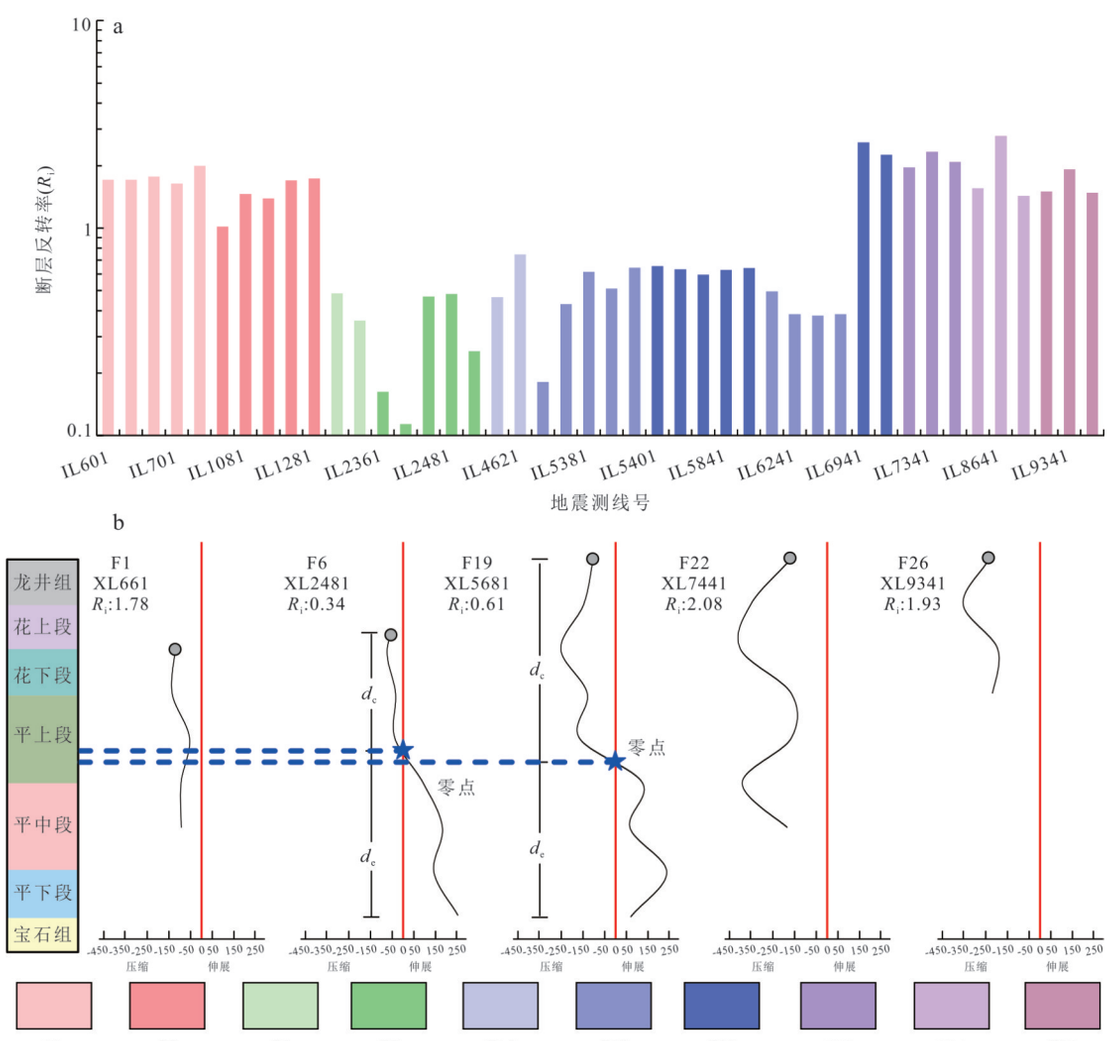


图11 西湖凹陷中央背斜带局部断裂尺度内构造反转强度综合分析图

Fig.11 Comprehensive analysis diagram of the inversion intensity at the scale of local faults in the central anticline belt of the Xihu Depression

a.不同构造带主要断裂反转率计算结果;b.不同构造带典型断裂位移-距离图

I_{ar}值远大于南部,表现为闭合高度大、形态宽缓,且正断层反转现象显著.T21 和 T30 界面断距已完全逆转为逆断距,且数值明显高于南部,反映该区变形强烈(图 10b、10c).中南部 C 构造的I_{ar}普遍低于 20 m/km,为中央背斜带中构造反转最弱的区域,圈闭规模较小.该区先存断裂未呈现明显的"下正上逆"特征,T20 与 T30 界面仍保持正断距性质,表明所受构造反转影响较弱(图 10b、10c).

此外,龙井运动引发的强烈构造反转在反转背斜带内形成了大量晚期活动断层(图 6),其分形维数也呈现显著差异.整体上,北部断层具有数量多、延伸长、规模大的特点;而中南部 C 构造浅层几乎不发育晚期断层,表明该区域所受反转作用较弱,这与前述认识一致(图 10a～10d).E 构造的分形维数值低于 B 构造,主要原因在于尽管 E 构造受反转作用较强,发育了较多近 EW 向断层,但其延伸长度与分布范围明显小于 B 构造,从而导致分形维数值较低.

中新世末期的构造反转运动在区域背斜带的响应,整体上表现出北部和中北部构造反转非常强烈,呈现出凹陷到隆起的空间变化;南部较强,不仅形成了规模圈闭,还造成了断层的反转,形成了浅层断裂;中南部表现出中-强的反转强度,局部构造带仅造成了岩层挤压变形,如 C 构造仅形成了有效的圈闭储集空间,未形成正反转断层.

3.2.2　断裂尺度内构造反转强度　对局部断裂尺度的反转断层开展反转率研究,结果表明南部 A 和北部 E 和 F 构造的断裂基本发生了完全反转,表现为逆断层特征,断层反转率基本上在 1.0 以上,受到的挤压反转作用非常强烈(图 7a、7e、11a、11b).中南部 B 构造和中北部 D 构造断层发生了较强烈的反转作用,表现出"下正上逆"的正反转构造特征,反转率介于 0.15～0.85 之间,发育的断层零点位置基本上位于平湖组上段,其中 D 构造零点位置略低于 B 构造,且反转率均大于 0.65,表明 D 构造反转程度略大于 B 构造(图 7b、7d、11a、11b).

龙井运动引发的挤压反转作用在局部断裂尺度上的响应特征存在明显空间差异.整体上,北部与南部构造带内断裂反转最为强烈,表现为多数断裂性质由正断层转变为逆断层;中北部与中南部构造带的断裂反转较为显著,少数断裂局部呈现逆断层特征.在中北部构造中,断裂反转后产生的逆断距数值尤为突出,但断层反转率普遍未超过 1.0.例如,F18 与 F19 断裂虽向下断穿至宝石组地层,但仅在浅部发生反转,深部仍保持正断层性质(图 7d、11a、11b).研究表明,这种反转程度的差异可能受控于不同埋深条件下的地层应力状态、岩石力学性质及温压条件,而这些因素又与断裂规模、区域挤压应力方向及基底结构等有关(蒋一鸣等,2020;刘金水等,2020;何新建等,2024;宋一帆等,2024).

4　构造反转强度对油气成藏的控制

4.1　区域背斜带尺度构造反转运动对背斜规模和油气汇聚的控制作用

4.1.1　控制背斜的形成及规模　渐新世前西湖凹陷整体以断陷-坳陷作用为主,区域构造活动较弱,这种背景下沉积储层内缺乏形成大型优质圈闭的构造环境(图 10a).中新世末期的构造反转运动使西湖凹陷花港组地层形成大规模的构造圈闭,产生与反转构造相关的反转背斜圈闭和断背斜圈闭,为凹陷深部烃源岩产生的油气垂向运移、聚集提供了优越的储集空间,花下段现今构造油气运移路径及潜在聚集区模拟结果表明,反转期后的构造形态具有较好的汇烃条件(图 12a).

中央背斜带经历不同强度的挤压作用,引起不同构造带的沉积地层差异性隆升,形成的圈闭对汇烃规模具有显著的控制作用,在低反转褶皱波幅比时(I_{ar}<50 m/km),圈闭规模对汇烃量的影响不显著,单井油气显示厚度在 100 m 左右,当反转褶皱波幅比介于 50～90 m/km 时,单井油气显示厚度明显增加,汇烃厚度最大可达 550 m,反映出构造反转运动形成的圈闭规模对汇烃强度具有一定的控制作用(图 12b).中北部 D、北部 E 和 F 构造在构造反转作用下形成的圈闭规模较大(图 7d～7f),反转褶皱波幅比平均值为 64 m/km,单井油气显示厚度平均为 290 m,为大规模油气田的形成提供了充足的聚集空间;而中南部 B 和 C 构造圈闭规模较小,圈闭汇烃量有限,同时又受到晚期保存条件影响,现今的油气富集程度较弱(图 12c).南部 A 构造尽管具有较大的反转褶皱波幅比,但其聚集的油气程度显著低于北部,与该构造晚期油气藏的保存条件有关(图 12c).

4.1.2　晚期横张断裂控制油气藏形成和改造　西湖凹陷在中新世中晚期的龙井运动使得中央背斜带构造复杂.反转作用不仅活化先存断裂、凹-隆转换形成反转背斜构造,还在背斜核部中浅层发育近东西向正断层,改变圈闭溢出点,导致油气逸散、含

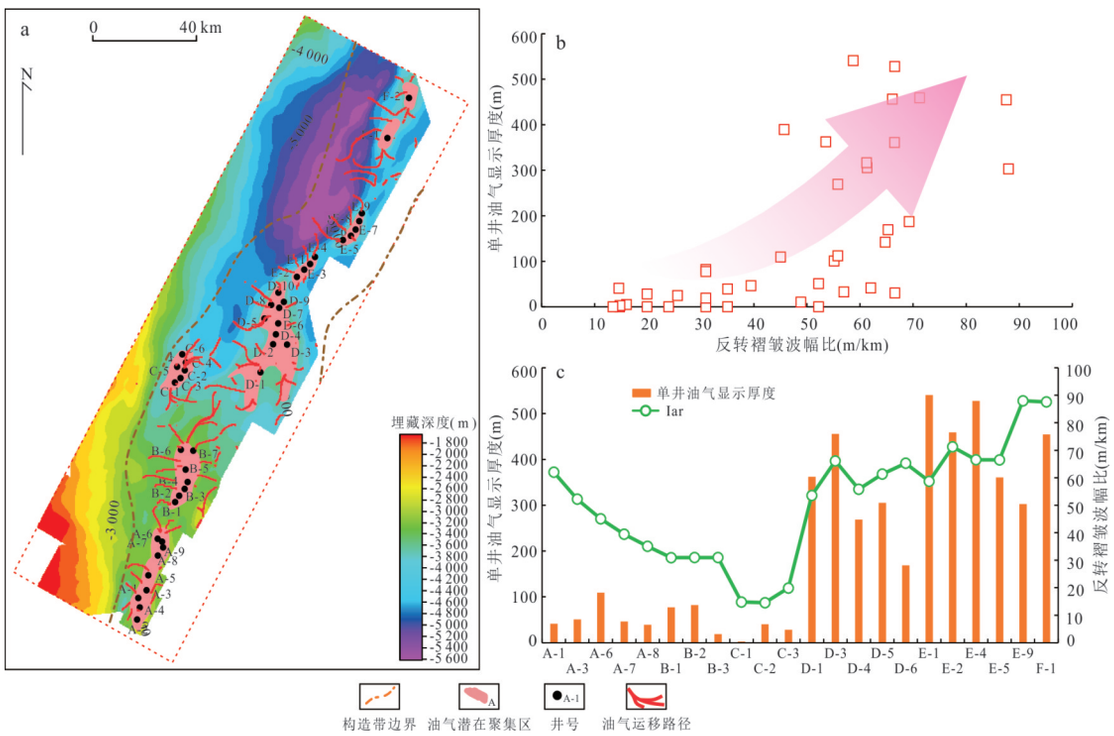


图 12 西湖凹陷中央背斜带构造反转作用对背斜规模及油气汇聚的耦合关系

Fig.12 Coupling relationship diagram between tectonic inversion effects on the scale of anticline and hydrocarbon accumulation in the central anticline belt of the Xihu Depression

a. 现今 T21 界面背斜发育特征及油气运移路径；b. 反转褶皱波幅比与单井油气显示厚度关系散点图；c. 不同构造带单井油气显示厚度综合柱状图与反转褶皱波幅比折线图

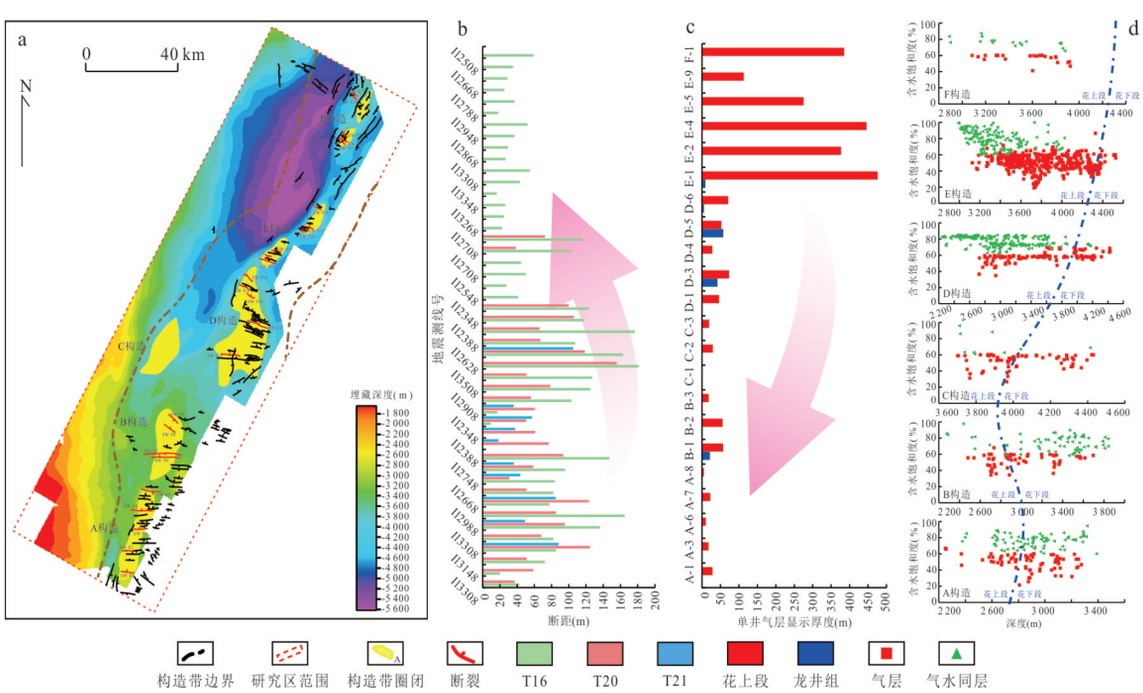


图 13 西湖凹陷中央背斜带构造反转作用对东西向断裂发育及油气富集的耦合关系

Fig.13 Coupling relationship diagram between tectonic inversion effects on the development of east-west strike faults and hydrocarbon accumulation in the central anticline belt of the Xihu Depression

a. 现今 T21 界面背斜发育特征与 EW 向断裂发育关系；b. 主要 EW 向断裂断距特征(测线号见图 5)；c. 典型单井花上段与龙井组气层显示厚度；d. 典型单井花上段与花下段气层及气水同层含气饱和度散点图

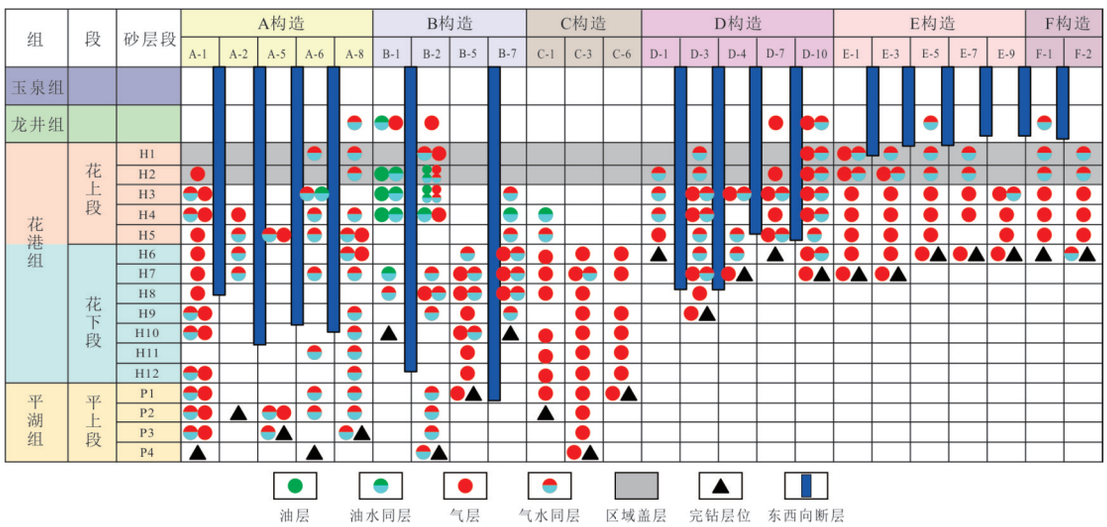


图 14　西湖凹陷中央背斜带不同构造带东西向断裂及油气分布特征

Fig.14　Characteristics of East-West strike faults and hydrocarbon distribution of different tectonic zones in the central anticline belt of the Xihu Depression

气程度降低(图 13、图 14).地震与钻井资料显示,中央背斜带自北向南,核部近东西向断层发育密度增大,下切深度也逐渐增加.南部 A 构造、中南部 B 构造及中北部 D 构造的断层下切至花下段,在 T20 界面的平均断距分别为 80.6 m、60.5 m 和 88.8 m;北部仅有少数断层下切至 T20 界面,平均断距 55.5 m.下切至 T21 界面的近东西向断层仅见于 A、B、D 构造局部区域,平均断距 55.7 m.整体表现为南部断层下切深、断距大,北部断层下切浅、断距小(图 13b).

单井油气显示分析表明,北部 E、F 构造近东西向断层活动弱、下切浅,未严重破坏原生油气藏,花上段气层厚度最大可达 450 m;而 A、B、D 构造受此类断层影响强烈,花上段气层厚度平均仅 36 m,龙井组中也仅有约 32 m 气层显示.此外,不发育或仅发育弱活动断层的 C、E 构造气水同层显示少,花下段多为气层,反映圈闭保存较好(图 13a~13d).A、B、D 构造的近东西向断层破坏性强,导致气层丰度降低、气水同层显示活跃,说明天然气发生再运移.这些断层与活化的 NNE 向断裂在空间组合上形成较好的接力运移油气输导体系,在浅层龙井组良好储盖条件下,促使油气在龙井组储层中二次成藏(图 13c、图 14).

综上,中央背斜带北部近 EW 向断层活动弱、下切浅,并非完全破坏性,未导致原生油气大规模散失;而南部近 EW 向断层则活动强、下切深,对原生油气藏有明显的改造作用.

4.2　断裂带断层活化对油气输导的影响

自古近纪至今,西湖凹陷经历了由伸展作用到挤压作用复杂的构造运动,造就了多类型、多性质、不同规模的断裂体系,尤其是裂陷期伸展作用形成的通源断裂对油气富集具有较明显的控制作用,是油气运移的主要通道.先存的通源断裂在龙井运动期间受到强烈的挤压作用并开始反转活化,强反转构造带中的先存断裂在活化后,甚至向上断穿至龙井组和玉泉组(图 5b~5d、图 7d~7f).研究表明平湖组烃源岩在 23~15 Ma 进入生排烃高峰,与挤压反转期形成的构造圈闭及活化的断裂输导体系构成了良好的时空匹配,促成了 15~10 Ma 及 5 Ma 至今的两期大规模成藏过程(徐陈杰等,2021;何新建等,2024;周平等,2024).

成藏期内,构造反转作用可以使断层活化重塑油气运移路径,先存通源断层的活化程度会影响到垂向输导油气的潜力.本次研究使用含油包裹体颗粒指数(GOI)(郭迎春等,2013)和单井油气显示厚度来反映构造反转作用造成的先存断层活化对油气输导的影响.随着 R_i 值增加 GOI 指数呈现出先增加后减少的趋势,单井油气显示厚度也呈现出同样的变化趋势,R_i 值小于 0.5 时,断裂活化效果较弱,GOI 指数和油气显示厚度较低(图 15a~15c).R_i 值介于 0.5~1.0 之间,油气显示程度较为活跃,GOI 指数和油气显示厚度快速升高,表明断裂活化有助于油气快速充注(图 15a、15b、15d).然而当 R_i 值大于 1.0 时,GOI 指数和油气显示厚度呈现出下降的趋

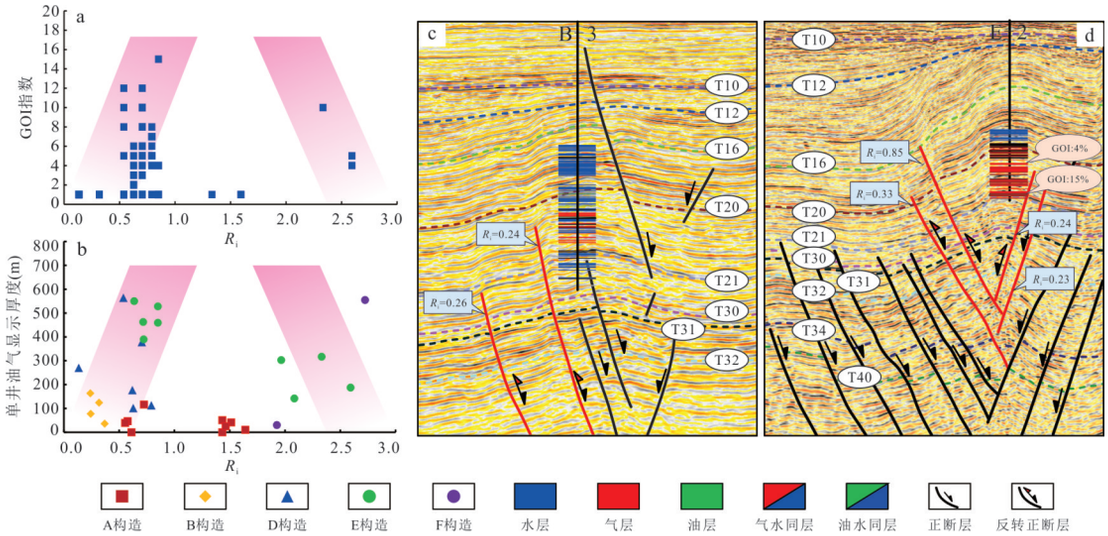


图 15 西湖凹陷中央背斜带构造反转控制下的断层活化与油气运移、聚集耦合关系

Fig.15 Coupling relationship diagram between fault activation and hydrocarbon migration and accumulation controlled by tectonic inversion in the central anticline belt of the Xihu Depression

a.GOI 指数与断层反转率散点图；b. 单井油气显示厚度与断层反转率散点图；c. 低断层反转率的 B-3 井油气显示特征；d. 高断层反转率的 E-2 井油气显示特征

势，分析其原因可能存在以下 3 点：①强烈的构造反转使得断裂活化效果显著，会向上继续断穿至浅层，存在造成油气逸散的风险，如 E 构造和 F 构造（图 5b～5d、7d～7f、15a、15b）；②强烈的构造反转使得反转背斜核部发育 EW 向断裂，破坏圈闭的有效性，造成油气向古地表逸散，如 A 构造（图 6d、13a～13d）；③晚期的构造反转动力来自东侧太平洋板块持续向东后撤和菲律宾海板块俯冲，进而产生向西的挤压作用力，造成 NEE 倾向的通源断裂发生反转，尽管较大的逆断距反映了非常强烈的断裂活化效果，但也增加了断层面的挤压应力作用，进而降低了正反转断层输导油气的潜力，如 D 构造和 E 构造（图 2、7d～7f、10c）.

前人及本次研究均证实最优选的油气勘探潜在的目标是轻度-中度构造反转强度（陈哲龙等，2015；Tari *et al.*，2020；Riahi *et al.*，2021）. 适中的构造反转强度使中央背斜带形成了有效圈闭，并且控制通源断裂的活化输导油气，有利于规模油气聚集成藏（图 15d）；而在较强的构造反转作用下，油气成藏条件较为苛刻，需要较优越的断－储-盖组合作为晚期保存条件，否则油气难以规模聚集成藏. 此外，在强烈反转作用背景下，构造带翼部发育较小的次生构造，这些圈闭构造可能保持较好的完整性，有利于油气聚集与成藏.

4.3 构造反转强度控制下的油气差异成藏模式

西湖凹陷中央背斜带不同构造带现今油气藏受到构造反转作用影响，纵向上呈现出有序分布特征，但是油气运移、聚集过程和保存条件具有显著差异. 综合反转构造类型、反转强度定量表征及其空间分布特征，明确构造反转作用与油气运聚保成藏要素的耦合关系，建立了构造反转运动控制下的油气运移、聚集和差异富集的动态成藏模式. 依据构造反转强度对于油气运-聚-保成藏要素的影响程度，共划分出四种类型成藏模式（图 16a、16b）：Ⅰ型：弱反转-继承性活化断砂耦合控藏模式（C 构造）；Ⅱ型：中强反转-高强度调整型深层局部富集模式（A 和 B 构造）；Ⅲ型：强反转-接力式纵向多层系局部富集模式（D 构造）；Ⅳ型：强反转-未贯穿型规模富集模式（E 和 F 构造）.

Ⅰ型：弱反转-继承性活化断砂耦合控藏模式（图 16a、16b）. C 构造邻近西部斜坡带，受东部侧向挤压作用较弱，圈闭隆升幅度低，断裂性质未发生明显转变，且不发育晚期近 EW 向调整性横张正断层. 花港组盖层保存完整，油气封闭条件良好. 龙井运动引发的构造反转不仅塑造了反转背斜圈闭，还促使了通源断裂的继承性活化. 平湖组生成的油气沿活化通源断裂垂向运移，受控于良好的断砂耦合关系，在花港组储层中聚集成藏.

Ⅱ型：中强反转-高强度调整型深层局部富集

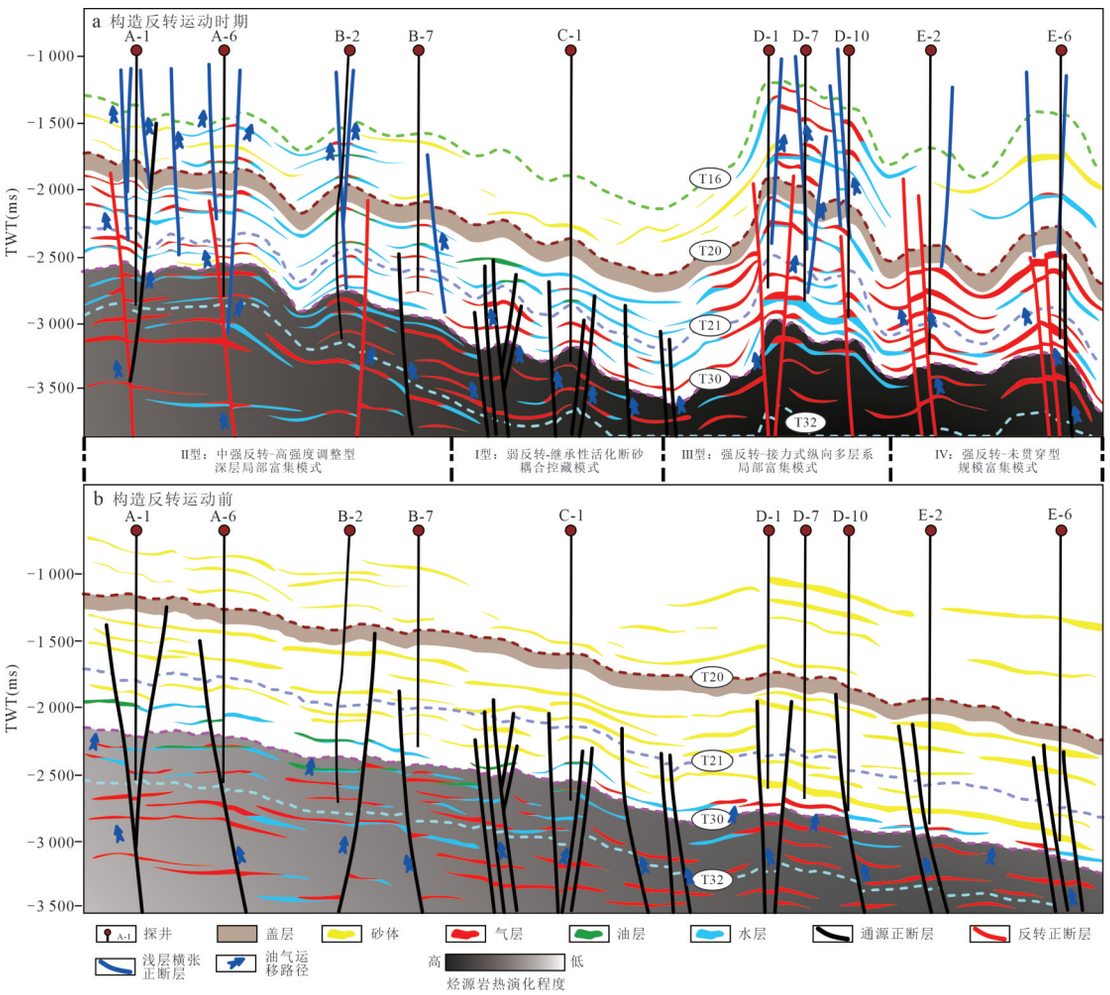


图 16　西湖凹陷中央背斜带构造反转作用控制下的油气差异成藏模式

Fig.16　Diagram of the differential hydrocarbon accumulation models controlled by tectonic inversion in the central anticline belt of the Xihu Depression

模式(图 16a、16b).A 和 B 构造位于中央背斜带南部及中南部,受中-强构造反转作用影响,龙井运动造成的近 EW 向横张正断层下切层位深、活动性强、调整能力显著,该类断层破坏了花港组及平湖组的原生油气藏,驱动油气向浅层纵向调整.但由于浅层储盖配置条件不佳,油气大规模逸散,浅层难以有效聚集成藏,最终仅在深部层位局部残留富集.

Ⅲ型:强反转-接力式纵向多层系局部富集模式(图 16a、16b).在板块交替俯冲背景下的龙井运动期间,D 构造经受了强烈的挤压反转与大幅度隆升.这种强反转作用导致背斜核部发育多条近 EW 向横张断裂,不仅破坏了原生圈闭的有效性与盖层封闭性,更触发了活化断层与近 EW 向断层的“接力输导”体系.受此动力驱动,深部原生油气历经剧烈的纵向调整与动态再分配,同时浅层存在良好储盖条件,最终形成了“龙井组次生-花港组调整残留”的纵向多层系局部富集油气藏.

Ⅳ型:强反转-未贯穿型规模富集模式(图 16a、16b).强烈反转形成的宽缓背斜及其核部未贯穿的近 EW 向调节断裂,有效避免了原生规模油气藏遭受晚期破坏.在成藏动态演化上,早期古隆起优先汇聚油气,加之龙井运动驱动的先存断裂活化与花港组圈闭形成在时空上高度耦合,促使平湖组生成的油气能够沿活化通道向反转背斜圈闭大规模迁移,这种优越的汇聚背景与差异化调节断裂系统的协同作用,最终确保了花港组储层中油气在强反转背景下的规模聚集与有效保存.

5　结论

(1)中新世末期的龙井运动促使中央背斜带发育了多样化的构造样式,主要包括“简单后冲反

转”、“正Y型反转”、“反Y型反转”、“人字型反转”、“小地堑反转”等八类典型的反转构造样式.空间分布上,反转构造表现出显著的南北异质性,北部构造带的样式复杂程度与多样性均高于南部.

(2)构造反转驱动了中央背斜带垂向“凹-隆”及横向“伸展-挤压”的体制转换.综合定量评价结果揭示,构造反转强度呈现出显著的空间异质性:中央背斜带北部及中北部强度最高,背斜规模、浅层断裂发育程度及断层性质反转最为剧烈;南部表现为强反转下的宽缓隆起和贯穿型横张断裂;中南部强度较强-中等,其西侧构造带仅局部发生凹-隆转换.

(3)中央背斜带构造反转运动对于油气成藏要素的时空匹配关系具有重要的控制作用,基于此建立了差异性反转强度控制下的油气运-聚-保的多因素耦合的中央背斜带油气成藏模式.规模富集模式:Ⅰ型:弱反转-继承性活化断砂耦合控藏模式;Ⅳ型:强反转-未贯穿型规模富集模式.局部富集模式:Ⅱ型:中强反转-高强度调整型深层局部富集模式;Ⅲ型:强反转-接力式纵向多层系局部富集模式.

References

Aziz, T., Li, X. Q., Xie, X. N., et al., 2025. A Large-Scale T2 (Late Cretaceous Turonian) Polygonal-Fault System Influenced by Regional Tectonic Stress in the Songliao Basin, Northeast China. *Journal of Earth Science*, 36(2): 584−596. https://doi. org/10.1007/s12583-024-0048-6

Bally, A. W., 1984. Tectogenese et Sismique Reflexion. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(2): 279−285. https://doi.org/10.2113/gssgfbull.s7-xxvi.2.279

Buiter, S. J. H., Pfiffner, O. A., Beaumont, C., 2009. Inversion of Extensional Sedimentary Basins: A Numerical Evaluation of the Localisation of Shortening. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3−4): 492−504. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.011

Chen, Z. L., Liu, G. D., Lu, X. J., et al., 2015. Quantitative Study on Inversion Degree of Inversion Tectonics and Its Impact on Hydrocarbon Accumulation in Erlian Basin, Northern China. *Journal of Central South University* (*Science and Technology*), 46(11): 4136−4145 (in Chinese with English abstract).

Cooper, M., Warren, M. J., 2020. Inverted Fault Systems and Inversion Tectonic Settings. Regional Geology and Tectonics: Principles of Geologic Analysis. Elsevier, Amsterdam, 169−204. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64134-2.00009-2

Fu, C., Fan, X., Li, S. L., et al., 2025. Effect of the Tectonic Inversion on the Source-to-Sink System Evolution in a Lacustrine Rift Basin, a Case Study of South Yellow Sea Basin, East China. *Journal of Earth Science*, 36(2): 562−583. https://doi. org/10.1007/s12583-022-1664-7

Guo, Q. J., Deng, M. Z., Zhang, C. Y., et al., 2024. Structural Styles and Their Geological Significance to Petroliferous Basins of China. *Oil & Gas Geology*, 45(3): 609−621 (in Chinese with English abstract).

Guo, Y. C., Pang, X. Q., Chen, D. X., et al., 2013. Progress of Research on Hydrocarbon Accumulation of Tight Sand Gas and Several Issues for Concerns. *Oil & Gas Geology*, 34(6): 717−724 (in Chinese with English abstract).

Guo, Z., Liu, C. Y., Tian, J. F., 2015. Structural Characteristics and Main Controlling Factors of Inversion Structures in Xihu Depression in Donghai Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 59−67 (in Chinese with English abstract).

Harding, T. P., 1985. Seismic Characteristics and Identification of Negative Flower Structures, Positive Flower Structures, and Positive Structural Inversion. *AAPG Bulletin*, 69(4): 582−600. https://doi. org/10.1306/ad462538-16f7-11d7-8645000102c1865d

He, X. J., Jiang, Y. M., Li, L., et al., 2024. Progressive Deformation Characteristics and Mechanism of Longjing Movement in Xihu Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 36(5): 34−43 (in Chinese with English abstract).

Hudleston, P. J., 1973. Fold Morphology and Some Geometrical Implications of Theories of Fold Development. *Tectonophysics*, 16(1−2): 1−46. https://doi.org/10.1016/0040-1951(73)90129-7

Jiang, Y. M., Zou, W., Liu, J. S., et al., 2020. Genetic Mechanism of Inversion Anticline Structure at the End of Miocene in Xihu Sag, East China Sea: A New Understanding of Basement Structure Difference. *Earth Science*, 45(3): 968−979 (in Chinese with English abstract).

Lin, J. L., Dong, C. M., Lin, C. Y., et al., 2024. The Impact of Tectonic Inversion on Diagenesis and Reservoir Quality of the Oligocene Fluvial Sandstones: The Upper Huagang Formation, Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 165: 106860. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106860

Lin, J. L., Zhang, X. G., Lin, C. Y., et al., 2019. Diagenetic Evolution Characteristics Constrained by Lithofacies in Deep Tight Sand Gas Reservoir. *Oil & Gas Geology*,

40(4): 886－899 (in Chinese with English abstract).

Liu, J. S., Xu, H. Z., Jiang, Y. M., et al., 2020. Mesozoic and Cenozoic Basin Structure and Tectonic Evolution in the East China Sea Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 675－691 (in Chinese with English abstract).

Riahi, Z. T., Sarkarinejad, K., Faghih, A., et al., 2021. Impact of Inversion Tectonics on the Spatial Distribution of Hydrocarbon Traps in the NW Persian Gulf and the Southern Dezful Embayment, SW Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 134: 105364. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105364

Roy, A., Perfect, E., Dunne, W. M., et al., 2007. Fractal Characterization of Fracture Networks: An Improved Box-Counting Technique. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 112(B12): 2006JB004582. https://doi.org/10.1029/2006jb004582

Song, T. G., 1997. Inversion Styles in the Songliao Basin (Northeast China) and Estimation of the Degree of Inversion. *Tectonophysics*, 283(1－4): 173－188. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00147-9

Song, Y. F., Dou, L. R., Cheng, D. S., et al., 2024. Driving Mechanism of Tectonic Inversion in Intra-Plate Rift Basins and Its Impact on Oil: A Case Study of the Bongor Basin in Central Africa. *Geological Review*, 70(S1): 239－240 (in Chinese).

Tang, D. Q., Chen, H. H., Jiang, T., et al., 2013. Neogene Differential Structural Inversion and Hydrocarbon Accumulation in the Yitong Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(6): 682－691 (in Chinese with English abstract).

Tang, X. J., Zhu, H. H., Li, N., et al., 2025. Segmented Differential Deformation of Inverted Anticlines and Its Significance on Hydrocarbon Accumulation in the Ningbo Structural Zone, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(1): 167－177 (in Chinese with English abstract).

Tari, G., Arbouille, D., Schléder, Z., et al., 2020. Inversion Tectonics: A Brief Petroleum Industry Perspective. *Solid Earth*, 11(5): 1865－1889. https://doi. org/10.5194/se-11-1865-2020

Tari, G., Connors, C.P., Flinch, J.F., et al., 2023. Negative Structural Inversion: An Overview. *Marine and Petroleum Geology*, 152: 106223. https://doi. org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106223

Tian, K., Yin, J. Y., Wang, D. P., et al., 2020. Petroleum Geology and Exploration in Levant Basin, Eastern Mediterranean. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(1): 95－102 (in Chinese with English abstract).

Williams, G. D., Powell, C. M., Cooper, M. A., 1989. Geometry and Kinematics of Inversion Tectonics. *Geological Society, London, Special Publications*, 44(1): 3－15. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.044.01.02

Xiao, K. Y., Zhang, X. S., Gao, Y. J., et al., 2025. Formation Mechanism of Rift Basins in Central African Strike-Slip Tectonic Setting: A Case Study of Bongor Basin. *Earth Science*, 50(12): 4801－4818 (in Chinese with English abstract).

Xu, C. J., Ye, J. R., Liu, J. S., et al., 2021. Key Evidence of Gas Accumulation Period in Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin: Gas Hydrocarbon Inclusion. *Natural Gas Industry*, 41(11): 64－73 (in Chinese with English abstract).

Xue, Y. A., Niu, C. M., Wang, D. Y., et al., 2019. New Understanding and Exploration Progress of Shallow Oil and Gas Migration in Bohai Sea Area. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S2): 29－37 (in Chinese).

Yan, H. J., He, D. B., Xu, W. Z., et al., 2016. Paleotopography Restoration Method and Its Controlling Effect on Fluid Distribution: A Case Study of the Gas Reservoir Evaluation Stage in Gaoqiao, Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(12): 1483－1494 (in Chinese with English abstract).

Zeng, F., Dong, C. M., Lin, C. Y., et al., 2021. Analyzing the Effects of Multi-Scale Pore Systems on Reservoir Properties—A Case Study on Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 203: 108609. https://doi. org/10.1016/j.petrol.2021.108609

Zeng, W. T., Ding, W. L., Jiu, K., et al., 2012. Review of Inversion Structure and the Relationship between Hydrocarbon Accumulation and Inversion Structure. *Science & Technology Review*, 30(2): 58－64 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H. G., Yang, H. F., Su, W., et al., 2024. Key Stages in Hydrocarbon Migration and Accumulation in Layers Outside Source Rocks and the Evaluation Methods Related: A Case Study of the Lower Member of the Minghuazhen Formation, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(1): 281－292 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. Z., Jiang, Y. M., Diao, H., et al., 2025. Exploration and Development Practice, New Geological Understanding and Resource Potential of Low to Ultra-Low Permeability Gas Reservoirs in Xihu Sag of East China Sea Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(6): 1074－1088 (in Chinese with English abstract).

Zhou, P., Sun, P., Liu, C. F., et al., 2024. On Time-Space Matching of Hydrocarbon Accumulation in the Yuquan Structure, Xihu Sag. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 44(1): 121－129 (in Chinese with English abstract).

Zhou, X. H., 2020. Geological Understanding and Innovation in Xihu Sag and Breakthroughs in Oil and Gas Exploration. *China Offshore Oil and Gas*, 32(1): 1－12 (in Chinese with English abstract).

Zhu, W. L., Zhang, Y. Z., Jiang, Y. M., et al., 2025. Research Advances and Prospects on Fundamental Geological Issues of the East China Sea Petroliferous Basin. *Earth Science*, 50(12): 4783－4800 (in Chinese with English abstract).

Ziegler, P. A., 1987. Compressional Intra-Plate Deformations in the Alpine Foreland—An Introduction. *Tectonophysics*, 137(1－4): 1－5. https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90223-X

中文参考文献

陈哲龙, 柳广弟, 卢学军, 等, 2015. 二连盆地反转构造反转程度定量研究及对油气成藏的影响. 中南大学学报(自然科学版), 46(11): 4136－4145.

郭齐军, 邓铭哲, 张晨雨, 等, 2024. 中国含油气盆地不同构造样式及其油气地质意义. 石油与天然气地质, 45(3): 609－621.

郭迎春, 庞雄奇, 陈冬霞, 等, 2013. 致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题. 石油与天然气地质, 34(6): 717－724.

郭真, 刘池洋, 田建锋, 2015. 东海盆地西湖凹陷反转构造特征及其形成的动力环境. 地学前缘, 22(3): 59－67.

何新建, 蒋一鸣, 李磊, 等, 2024. 西湖凹陷龙井运动构造递进变形特征与机制. 中国海上油气, 36(5): 34－43.

蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 等, 2020. 东海西湖凹陷中新世末反转背斜构造成因机制: 来自基底结构差异的新认识. 地球科学, 45(3): 968－979.

林建力, 张宪国, 林承焰, 等, 2019. 岩相约束下的深层致密砂岩气藏储层演化特征. 石油与天然气地质, 40(4): 886－899.

刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等, 2020. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化. 地质学报, 94(3): 675－691.

宋一帆, 窦立荣, 程顶胜, 等, 2024. 板内裂谷盆地构造反转驱动机制以及对油气的影响——以中非 Bongor 盆地为例. 地质论评, 70(S1): 239－240.

唐大卿, 陈红汉, 江涛, 等, 2013. 伊通盆地新近纪差异构造反转与油气成藏. 石油勘探与开发, 40(6): 682－691.

唐贤君, 朱虹浩, 李宁, 等, 2025. 东海陆架盆地西湖凹陷宁波构造带反转背斜分段差异变形及其油气地质意义. 石油与天然气地质, 46(1): 167－177.

田琨, 殷进垠, 王大鹏, 等, 2020. 黎凡特盆地油气地质特征与勘探方向. 石油实验地质, 42(1): 95－102.

肖坤叶, 张新顺, 高彦杰, 等, 2025. 中非剪切背景下裂陷盆地的发育机制: 以 Bongor 盆地为例. 地球科学, 50(12): 4801－4818.

徐陈杰, 叶加仁, 刘金水, 等, 2021. 东海西湖凹陷天然气成藏时期的关键证据: 气烃包裹体. 天然气工业, 41(11): 64－73.

薛永安, 牛成民, 王德英, 等, 2019. 渤海海域浅层油气运移新认识与勘探新进展. 石油学报, 40(S2): 29－37.

闫海军, 何东博, 许文壮, 等, 2016. 古地貌恢复及对流体分布的控制作用——以鄂尔多斯盆地高桥区气藏评价阶段为例. 石油学报, 37(12): 1483－1494.

曾维特, 丁文龙, 久凯, 等, 2012. 反转构造进展与油气聚集关系. 科技导报, 30(2): 58－64.

张宏国, 杨海风, 宿雯, 等, 2024. 源外层系油气运聚关键环节研究与评价方法——以渤海湾盆地渤中凹陷明化镇组下段为例. 石油与天然气地质, 45(1): 281－292.

张迎朝, 蒋一鸣, 刁慧, 等, 2025. 东海盆地西湖凹陷低渗-特低渗天然气勘探开发实践、地质新认识及资源潜力. 石油学报, 46(6): 1074－1088.

周平, 孙鹏, 刘春锋, 等, 2024. 西湖凹陷玉泉构造油气成藏时空匹配关系研究. 海洋地质与第四纪地质, 44(1): 121－129.

周心怀, 2020. 西湖凹陷地质认识创新与油气勘探领域突破. 中国海上油气, 32(1): 1－12.

朱伟林, 张迎朝, 蒋一鸣, 等, 2025. 东海含油气盆地基础地质问题研究进展及展望. 地球科学, 50(12): 4783－4800.