中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 4 期： 1535–1552
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

渤海湾盆地渤中隆起超深层隐伏走滑断裂系统特征及对火山岩控储效应

杨海风*，王昕，张江涛

中海石油(中国)有限公司天津分公司，天津 300452

* 通讯作者，E-mail：yanghf3@cnooc.com.cn

2025-09-27收稿，2025-12-17修回，2026-01-08接受，2026-03-06网络版发表
国家自然科学基金-企业创新发展联合基金项目(U24B2017)资助

摘要 中生界火山岩潜山是渤海海域出露范围最广的基底型古潜山。近期，中海油渤海油田在5000 m超深层渤中隆起带中生界火山岩中探获巨厚油气层，其自然产能创中国海上深层油气探井最高纪录。这一重大突破，证实了渤海深层-超深层中生界火山岩潜山具有巨大的勘探潜力。该研究针对渤海湾盆地渤中隆起带中生界火山机构群，充分利用三维地震、录井、薄片、测井、孔渗、压汞、锆石同位素年代学等资料，精细解析了渤中隆起带共轭走滑断裂系统的展布、成因与演化。在此基础上，系统揭示了该断裂系统对火山岩喷发就位、裂缝形成与优质储层发育的控制作用。研究结果表明：(1) 渤中隆起带发育南北向、北西向和北东向三组断裂体系。其中南北向和北西向断裂为一对符合安德森模式的共轭左旋走滑断裂系统。该共轭断裂系统在平面上相互切割，在剖面上则发育正花状、负花状、直立状及海豚效应等一系列典型走滑构造样式。(2) 燕山期，继承性活动的南北和北西向共轭走滑断裂，为深部中酸性岩浆的上涌提供了优势通道，控制了典型的中心式喷发。受其制约，中-高丘状火山机构沿共轭断裂带呈显著的棋盘格状连片分布；与此同时，该期酸性岩浆广泛的侵入与底辟作用，最终塑造了渤中隆起带这一横弯褶皱构造。(3) 主干走滑断裂的分段叠接形成了宽广的叠覆区，这些叠覆区成为构造应力集中释放的场所。应力释放强烈改造了火山岩，并产生大量次生构造缝，断裂与裂缝的耦合最终构建出强连通的缝网体系，为各类酸性流体的溶蚀作用提供了优势通道，从而显著增孔扩缝。因此，即使在远离火山口的中-远源相带，仍具备发育优质储层的有利条件。基于以上认识，本研究建立了渤中隆起带火山岩“中酸性优势岩性、走滑断裂叠加改造、多类流体溶蚀增孔”的三元耦合成储模式，该模式揭示了连片高孔渗缝溶体及规模性火山岩油气藏的形成机制。

关键词 渤海湾盆地，渤中隆起，共轭走滑断裂，横弯褶皱，火山岩潜山，控储效应

1 引言

火山岩是全球深地资源勘探的重要领域之一，目前已在全球近40个盆地中发现超过150个与火山岩相关的油气藏(Hunter和Davies，1979；Seemann和Scherer，1984；Hawlader，1990；Kawamoto，2001；Polyansky等，2003；Sruoga和Rubinstein，2007；刘嘉麒等，2010；Pola等，2012；卫平生等，2015；何辉等，2020；Tang等，2020；单玄龙等，2023a；徐长贵等，2025a)。自2000年以来，我国陆上相继发现克拉美丽、徐深、松南等大中型火山岩油气田10余个，成功建成了松辽与准噶尔两大陆上深层火山岩油气区(王璞珺等，2003；匡立春等，2010；唐华风等，2012；孙圆辉等，2008)。相比陆上，我国海域盆地至今尚无规模性火山岩油气勘探突破。渤海海域作为我国海域油气勘探的重点区域，其中生界火山岩广泛发育，火山岩出露面积约占基底潜山总面积的80%，具备形成规模性储集体的地质基础(衣健等，2022；单玄龙等，2023b；徐长贵等，2025a)；渤中凹陷作为渤海湾盆

中文引用格式：杨海风, 王昕, 张江涛. 2026. 渤海湾盆地渤中隆起超深层隐伏走滑断裂系统特征及对火山岩控储效应. 中国科学: 地球科学, 56(4): 1535–1552, doi: 10.1360/SSTe-2025-0325
英文引用格式：Yang H, Wang X, Zhang J. 2026. Characteristics of ultra-deep buried strike-slip fault system in the Bozhong Uplift of the Bohai Bay Basin and its control on volcanic reservoir development. Science China Earth Sciences, 69(4): 1498–1516, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1830-4

© 2026《中国科学》杂志社

地中-新生代裂陷活动中心及最大富烃凹陷，烃源岩条件优越，为中生界火山岩规模成藏提供了充足的油源保障(牛成民等，2024；徐春强等，2024；王昕等，2025；徐长贵等，2025c；杨海风等，2025a)。早期勘探阶段，渤海油田主要针对埋藏较浅的凸起带火山岩潜山展开钻探，累计实施探井20余口，仅发现2个中小型火山岩油气田，未实现规模性突破(周家雄等，2025)。近年来，勘探思路由浅部转向深层，聚焦于渤中坳陷超深层隆起带与优质烃源岩直接接触的大型中生界火山岩目标，依据“近源隆起、酸性熔岩、厚泥封盖”的部署原则，在5000 m以深地层先后钻探BZ8-3S-2与BZ8-3S-3两口风险探井，分别钻遇125 m和393 m气层。其中BZ8-3S-3井测试获日产天然气54.3×10^4 m^3、凝析油855.12 m^3，创中国海上深层探井最高测试产能纪录，展现出海域规模性火山岩油气藏的突破潜力(徐长贵等，2024a，2025b)。尽管勘探取得重要进展，但受燕山期复杂隐伏走滑断裂系统的强烈控制，渤中隆起带超深层火山岩储层非均质性强导致后续多口探井的钻探效果差异显著。为实现海域火山岩油气的规模性突破，必须系统阐明渤中隆起超深层隐伏走滑断裂系统的时空展布规律与控储机制，为储层的精准预测提供理论依据。

走滑断裂系统对深层储层的控制作用已成为国内外油气地质研究的重要前沿(Huang和Liu，2014；Zhang等，2024)。国际上，以北海维京地堑、美国洛杉矶盆地等为代表的经典案例表明，走滑断裂带是控制基岩与致密储层中裂缝发育与流体运移的关键构造要素，其“断裂-流体”耦合成储模式具有广泛适用性(Yu等，2024；Brandes等，2025；Sordi等，2025)。国内研究同样支持这一认识，例如塔里木盆地塔北隆起奥陶系碳酸盐岩潜山中发育的“断控缝洞体”，以及四川盆地深层走滑断裂对碳酸盐岩和页岩储层的显著改造作用，均揭示了走滑系统在优质储层形成中的关键地位(黄少英等，2021；邓尚等，2024；马兵山等，2025)。尽管上述成果为渤海地区的相关研究提供了理论参考与方法借鉴，但由于渤海地区经历了更为复杂的多旋回构造叠加作用，其多期活动、多类流体参与的走滑断裂控储模式仍需进一步探索与建立。

渤海超深层隐伏走滑断裂系统是指发育于渤海海域埋深大于2500 m(以5000 m以下为主)基岩内部、未直接出露于基岩顶面的断裂构造体系。该系统主要形成于印支期-燕山期及喜山早期，后被巨厚新生代沉积物快速覆盖掩埋，因而呈现“隐伏”状态。受多期构造叠加与深层地震分辨率较低等因素影响，对该隐伏断裂系统的识别与刻画仍面临显著困难。目前，针对渤中隆起超深层隐伏走滑断裂系统及其控储作用的研究已取得初步进展，主要形成以下认识：(1) 断裂系统性质得以明确：系统的断裂解释揭示，渤中隆起带火山岩潜山内主要发育燕山期隐伏走滑断裂系统，以多组高角度走滑断层为主，具有多期次活动的构造特征(徐长贵，2024)。(2) 断裂系统控储作用得到确认：研究证实，渤中隆起带火山岩储层的有效储集空间并非原生孔隙，而是以次生裂缝及伴生溶蚀形成的“缝-溶体”为主导(徐春强等，2022；周家雄等，2025)。燕山期隐伏走滑断裂系统是该类储集体形成与分布的主控地质要素，断裂活动构成了裂缝网络发育与储层渗透性改善的先决条件(胡志伟等，2019；徐长贵，2022)。(3) “断裂-流体”协同成储模式获得共识：研究表明，优质储层的形成是隐伏走滑断裂系统与多期流体活动耦合作用的结果(徐长贵等，2017；张正涛等，2019；胡贺伟等，2022)。断裂带作为深部热液与有机酸等流体的优势运移通道，促进了沿断裂发生的强烈溶蚀作用，显著扩大储集空间，最终形成高孔高渗的“缝-溶体”储集带(宫亚军等，2025)。尽管研究已取得重要进展，但渤中隆起带超深层火山岩油气要实现规模性勘探突破，仍面临以下两大关键科学问题：一是在印支-燕山期构造体制转换的宏观背景下，渤中隆起隐伏走滑断裂系统的三维空间展布规律、多阶段演化历史及其动力成因机制尚未系统揭示；二是断裂系统与多成因流体耦合控制“缝-溶体”储集体发育规模与空间分布的具体机制仍不明确。

针对渤中隆起深层火山岩走滑隐伏断裂的发育规律与控储作用，本次研究综合前人区域构造研究成果，基于高精度三维地震资料开展断裂系统精细解释，并结合新钻井的钻录井信息、薄片鉴定、测井数据、孔渗与压汞测试、锆石U-Pb同位素定年及储层自生矿物微区同位素分析等多种资料，系统揭示了潜山内幕隐伏走滑断裂的展布特征、演化过程与成因机制，明确了隐伏走滑断裂-多成因流体耦合对渤中隆起火山岩缝溶体储层分布的控制作用。

2　区域地质概况

渤中隆起带坐落于渤海湾盆地中部海域，是发育在渤海最大富烃坳陷——渤中坳陷内部的一个核心正向构造单元，属典型的“洼中隆”构造(图1a)。该构造呈北低南高趋势，向北倾斜终止于渤中西洼，向南与渤中坳陷南斜坡通过低鞍相连。东西向地层双向下倾，分别终止于渤中主洼和渤中西1、2、3洼(图1b、图2)。该区域南北长约32.6 km，东西宽约15–17.6 km，整体呈长轴方向南北向的大型背斜褶皱构造，具备良好的油气汇聚条件。研究区以T_8地震反射层位为界，可划分为前新生界基底

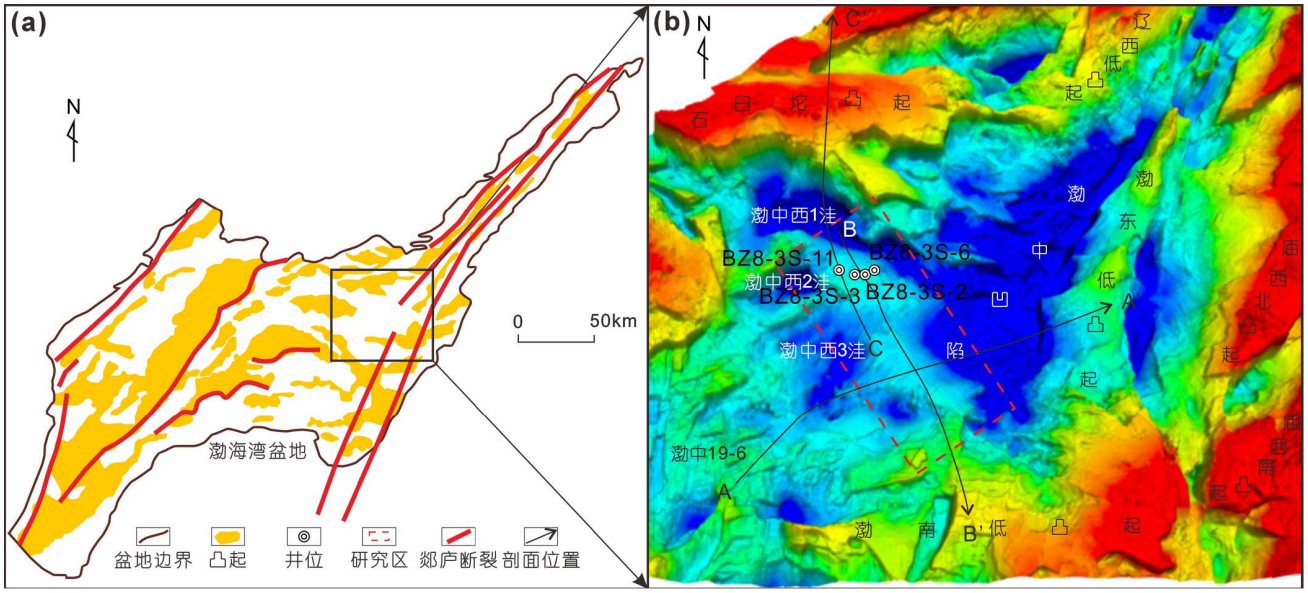


图 1　渤海湾盆地海域构造纲要(a)和渤海海域中生界顶面形态图(b)

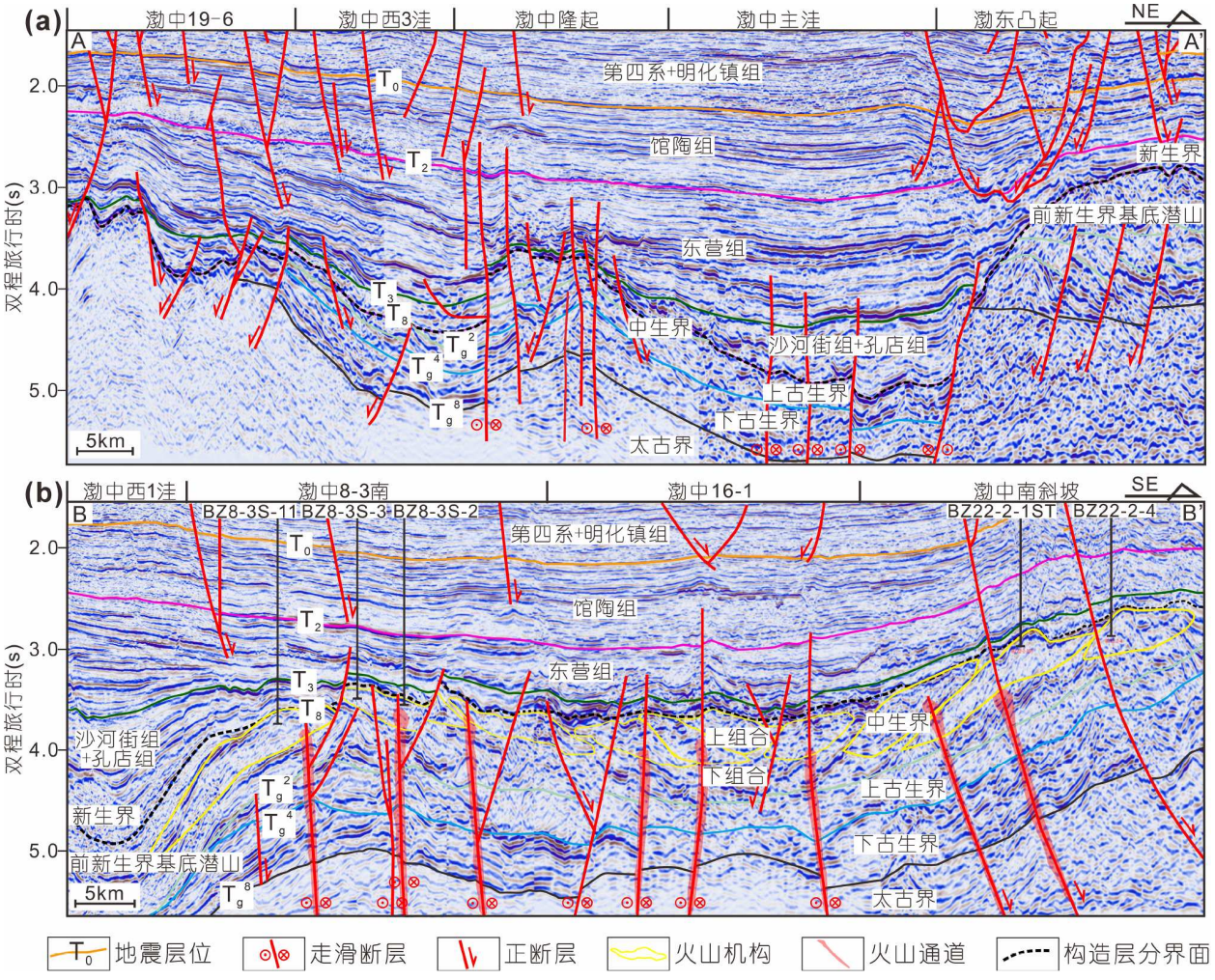


图 2　渤海海域区域构造格架(剖面位置见图1)

潜山与新生界两大构造层。前新生代为强构造活动阶段，基底潜山内幕断裂极为发育，地层强烈变形与破碎；而至新生代，该区转入强拗陷与深埋藏阶段，构造活动显著减弱，地层以区域性稳定沉积为特征(图2)。综合研究区钻井资料，结合地震反射特征，识别出前新生代基底具有典型的三层结构，自下而上依次由太古界、古生界与中生界构成。太古界主要为变质花岗岩；下古生界是典型的碳酸盐岩系；上古生界发育陆源碎屑岩系。中生界由厚层义县组火山岩构成，依据岩性可划分为上、下两个组合：下组合主体为中基性火山岩，地震相呈强振幅连续反射；上组合主要发育中酸性火山岩，地震相表现为杂乱空白及丘状反射(图2b)。新生界为陆相碎屑岩沉积序列：古近系发育厚层灰黑色泥岩夹薄层砂岩，构成优质烃源岩与区域盖层；新近系则为河流相泥岩与砂岩不等厚互层(图3)。

渤中隆起的形成经历了印支-燕山-喜山多期构造作用：印支期，扬子板块向北与华北板块发生强烈挤压碰撞(杨森楠，1985)，南北走向郯庐走滑断裂体系已现雏形(叶涛等，2019)，奠定了渤中隆起带发育演化的断裂基础。至燕山期，华北板块受太平洋板块俯冲的影响，从古特提斯构造域转变为太平洋构造域(王德英等，2022)。随着古太平洋板块持续向NW-SE方向俯冲，区域

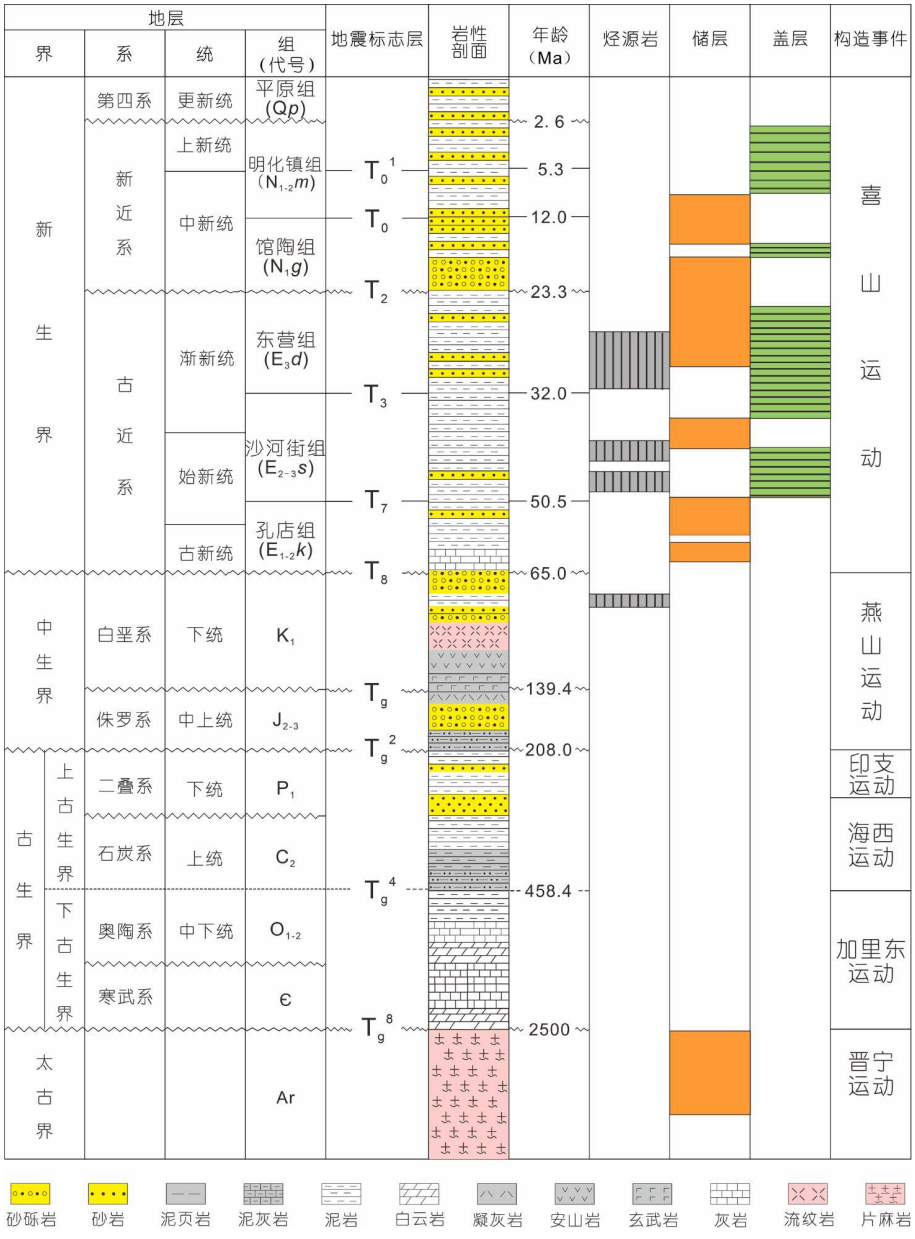


图 3　渤海湾盆地海域地层综合柱状图

构造应力场发生了显著变化。郯庐断裂带经历了大规模的左旋压扭活动，同时伴随中酸性岩浆的侵位与喷发。这些因素共同作用，促进了渤中隆起带的形成和隆升(周琦杰等，2022)。喜马拉雅期以来，随着太平洋板块俯冲方向及后撤速率的调整，叠加印度-欧亚板块碰撞所产生的远程构造效应，郯庐断裂带的性质转变为以右旋张扭为主，引发渤海海域发生大规模弧后伸展裂陷作用(李三忠等，2010)。在此过程中，早期形成的深凹区进一步发育，并在其内部或侧缘伴随大型隆起的最终定型，从而共同构成现今区内典型的“隆-凹”耦合构造格局。

3 断裂几何学特征

3.1 渤中隆起构造格架

渤海湾盆地的形成演化受控于多期次、多方向、多性质的构造叠加与复合改造(图3；Xu等，1987；Yin和Nie，1993；侯贵廷等，2000，2001；吴智平等，2003，2007；郭涛等，2021；杨海风等，2021)。基于覆盖全区的三维地震资料，本次研究在渤中隆起潜山内幕识别出大量走向、性质及活动强度各异的断裂带。这些断裂带相互交切、差异活动，最终受控于NE向断裂$F_{3\text{-}2}$，其形成的鞍部构造将隆起区一分为二，构成了两个盆地结构截然不同的构造带(图4)：渤中8-3南构造带和渤中16-1构造带。渤中8-3南构造带基底潜山整体表现为相对完整的穹隆背斜构造(图2b，图5a–5c)，潜山四面下倾，整个背斜直径为17.6 km，顶面构造圈闭面积为163 km^2，幅度为750 m，油气汇聚条件优越，高部位上覆地层为新生界东营组，向低部位则逐渐转变为新生界沙河街组。渤中16-1构造带整体表现为SN向短轴背斜构造(图2a，图5d)，东西长12 km，南北长15 km，潜山顶面构造圈闭面积

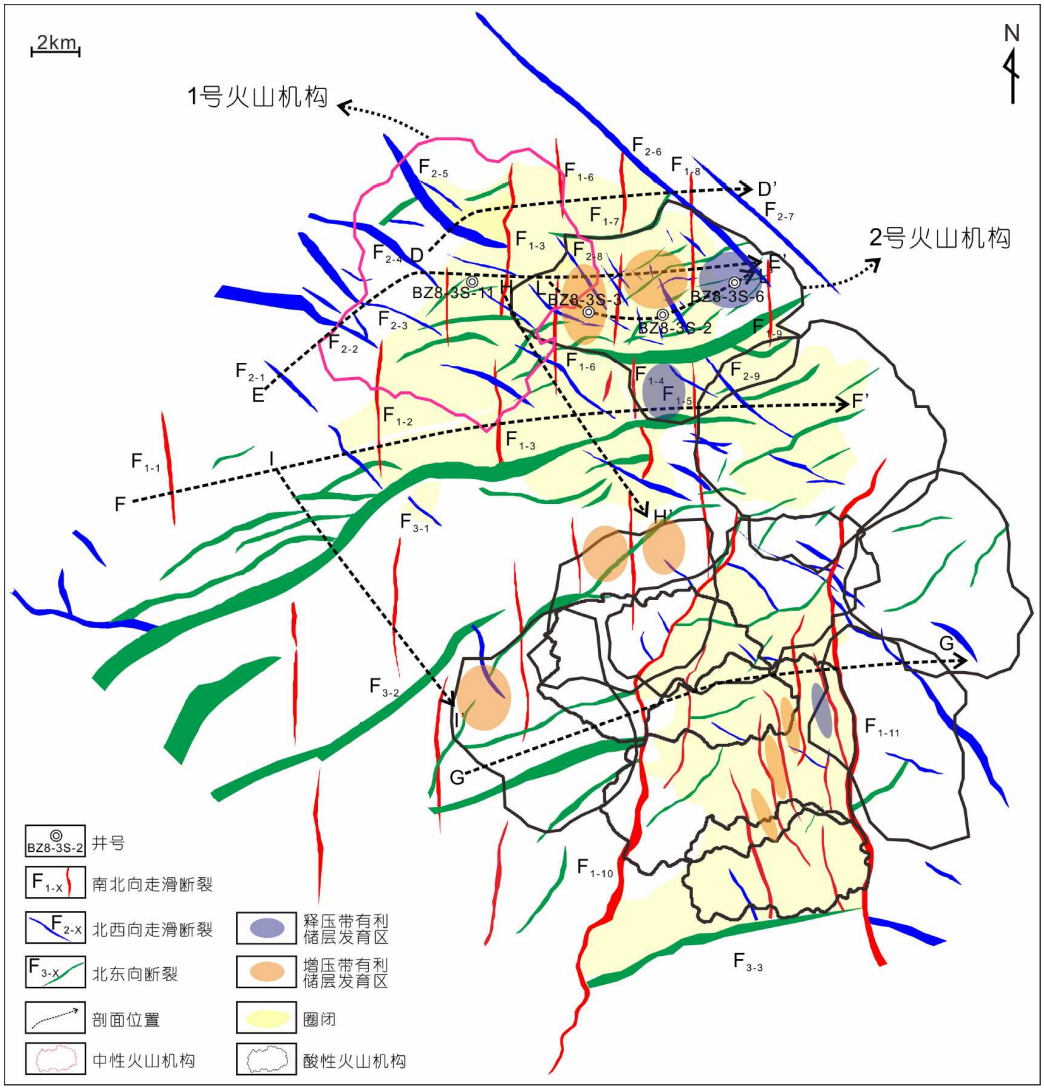


图 4 渤中隆起中生界顶面断裂与火山机构展布图

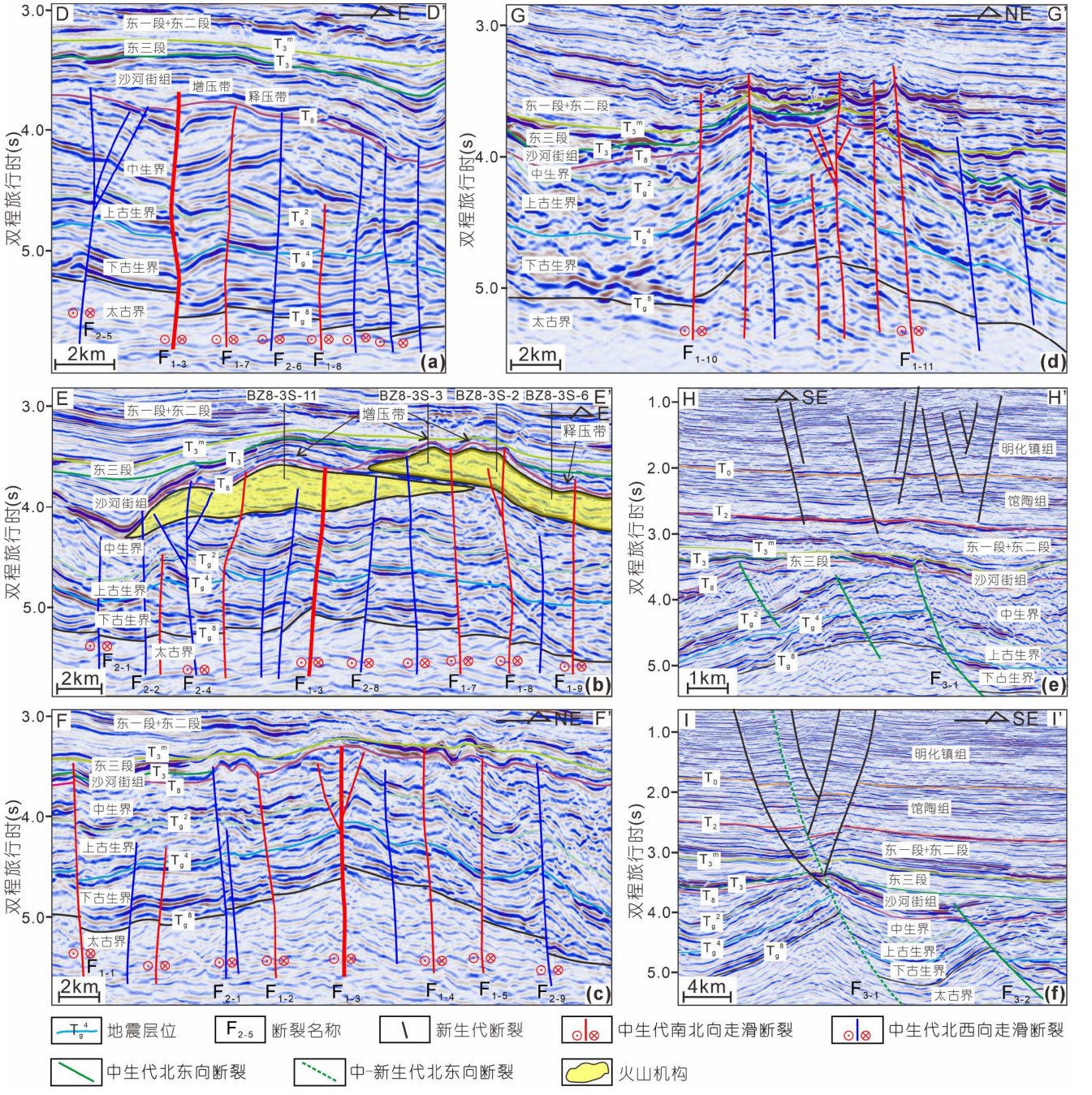


图 5　渤中隆起结构特征及典型构造样式(剖面位置见图4)

103 km^2，幅度500 m，上覆地层为新生界沙河街组。

3.2　断裂平面展布

连片构造解释结果表明，渤中隆起潜山内幕发育南北向(SN)、北西向(NW)和北东向(NE)三组断裂带。这些断裂在地震剖面上表现为清晰可辨的同相轴错断，它们相互切割、交织，在隆起区内密集发育，共同构成一个近乎全域分布的网状断裂系统(图4)。NE向断裂发育有限，规模较小，主要包含$F_{3\text{-}1}$、$F_{3\text{-}2}$、$F_{3\text{-}3}$等主干断裂。$F_{3\text{-}2}$断裂在其中起关键分割作用，致使渤中8-3南与渤中16-1地区的断裂体系差异显著。渤中8-3南构造区主要发育SN向与NW向两组走滑断裂，彼此交互切割。SN向断裂在数量与规模上略占优势，其主干断裂共9条，长度介于4.4–13.7 km；NW向主干断裂共8条，长度介于4.5–13.1 km。两组断裂沿走向多呈分段软连接特征，共同控制该区穹隆背斜构造的发育。具体表现为：NW向断

裂控制背斜翼部外缘，而SN向断裂则主导核部隆起区形态。渤中16-1构造区则以SN向走滑断裂为主导，其中$F_{1\text{-}10}$与$F_{1\text{-}11}$两条主干断裂呈连续线状展布，长度分别为26.1 km与21.6 km，分别控制背斜褶皱核部的东西两侧边界。背斜翼部发育少量NE向与NW向断裂，核部则发育一系列SN向次级断裂，长度介于2.1–7.1 km。

3.3 断裂剖面结构

渤中隆起的SN向与NW向断裂在断裂力学性质及构造样式上均表现出典型的强走滑特征。这些断裂面普遍高陡直立，断裂带狭窄，沿断裂走向的不同区段可识别出正花状、负花状以及直立板状等走滑典型构造样式。其成因主要与断裂走向上的分段不连续性有关，受“左行右阶”和“左行左阶”等叠覆效应控制，导致发育强度不一、规模不等的压扭性与张扭性断裂带，并引起地层的强烈扭曲变形。NE向$F_{3\text{-}1}$断裂具有伸展-走滑性质，断面形态上陡下缓，呈铲式构造样式。该断裂对根部中生界地层的控沉积作用不明显，无楔状加厚特征。新生代以来，断裂东西两段活动性分异显著：东段活动性弱，中止于中生界潜山，新生代未再活化(图5e)；而西段则表现为强烈的继承性活化，持续活动至浅层并形成花状构造(图5f)。根据切穿层位分析，渤中8-3南构造的NW向与SN向主干断裂自太古界向上切穿古生界至中生界，均终止于中生界顶面T_8。其次级断裂仅切穿下古生界顶面T_g^4或古生界顶面T_g^2后即告消亡，新生代断裂活动总体微弱。与之相比，渤中16-1构造的SN向主干断裂在切穿前述地层后，继续向上延伸并继承性活动至新生代古近纪，表明其新生代断裂活动强度显著强于渤中8-3南构造(图5d)。

整体上，SN向走滑断裂带数量众多、规模宏大，以其典型的高陡直立形态和线性展布特征，构成研究区的主导构造，并自南向北贯穿整个渤中隆起带，基本控制了该带的构造格局。而NW与NE向断裂则在此背景上叠加改造，使构造面貌进一步复杂化。

4 断裂活动特征及成因机制

4.1 断裂活动期次

综合地震-地质分析，将渤中隆起断裂系统的活动期次划分为：印支期(破裂雏形)、燕山期(强活化改造)和喜马拉雅期(弱活化定型)。判断SN与NW向断裂活动期次一致的依据包括：首先，在平面上，两组断裂相互切割且均呈分段展布；其次，在剖面上，它们切穿的地质层位相当，多数始于太古界并终止于中生界。这些特征共同证明了两组走滑断裂活动期次的一致性(图3)。走滑断裂两盘古生界地层的错位对接关系清晰，并发育典型的“海豚效应”构造，这为印支期走滑活动的启动提供了直接证据。以$F_{1\text{-}3}$断裂为例，其两盘自北向南差异隆升并对接。其中，下古生界厚度稳定且一致，表明走滑活动尚未影响该时期沉积；而上古生界则出现显著厚度差，表明在古生界沉积末期，受强印支运动控制，断裂开始走滑活动，导致上古生界因差异隆升而遭受不同程度的剥蚀(图5a–5c)。燕山期走滑断裂发生强烈活动为岩浆上涌提供了良好通道，致使岩浆沿断裂喷发的特征极为显著，具体表现为沿断裂带展布的大规模厚层火山岩(图2b，图4)。本次研究在BZ8-3S-2与BZ8-3S-3井的中生界火山岩中，获得了123.2±2.3 Ma与124±1.7 Ma的同位素年龄，精确限定了该期火山活动发生于早白垩世，这恰与燕山期的强活化改造阶段相吻合(图6)。进入喜马拉雅期，整个渤中隆起断裂体系的活动性显著减弱，并呈现“北弱南强”的活动性分带：北部的渤中8-3南构造断裂基本不再活动，进入深埋稳定阶段；而南部的渤中16-1构造其SN向主干走滑断裂则继承性活动至新近纪(图2，图5d)。此外，NE向断裂切割并错断了NW与SN向断裂，且未控制中生界沉积，表明其形成于燕山末期。该NE向断裂在喜马拉雅期的活动也具有分段性：其东段早期消亡，而西段则持续活动至第四纪(图5e–5f)。

4.2 走滑位移量及位移方向

本文基于地层沉积展布规律与岩石学特征，结合地震时间切片与最大振幅属性分析方法，在渤中隆起识别出古生界与中生界走滑错位标志层，进而明确了断裂的走滑方向并测量了走滑位移距离。地震相分析结果显示，下古生界寒武系显示为中强振幅、中频、平行连续的反射特征，其地层产状存在明显倾斜。在4600 ms等时切片与主干断裂叠合图中，揭示了下古生界标志层的平面展布规律。$F_{1\text{-}2}$、$F_{1\text{-}12}$、$F_{1\text{-}3}$和$F_{1\text{-}6}$四条南北走向主干断裂两盘的上古生界同相轴均发生不同程度的左旋错动。基于标志层统计，各断裂左旋走滑位移量分别为：$F_{1\text{-}2}$约3.4 km，$F_{1\text{-}12}$约1.8 km，$F_{1\text{-}3}$约2.5 km，$F_{1\text{-}6}$约1.5 km(图7)。应用中生界火山岩特殊岩体标志层法，本研究确认$F_{1\text{-}3}$断裂将1号火山机构完全错断(图4)。地震资料解译在机构内部发现一高陡强反射异常体，解释为沿断裂分布的岩浆侵入体(图8)。通过计算火山机构顶面以下100–150 ms的最大振幅属性，刻画出该异常体的平面展布范围，并清晰揭示出$F_{1\text{-}3}$断裂的左旋走滑特征：断裂两盘的异常体形态呈现良好的空间可拼合性，测算得到左旋走滑位移量为2.4 km(图9)。尤为重要的是，基于古生界与中生界

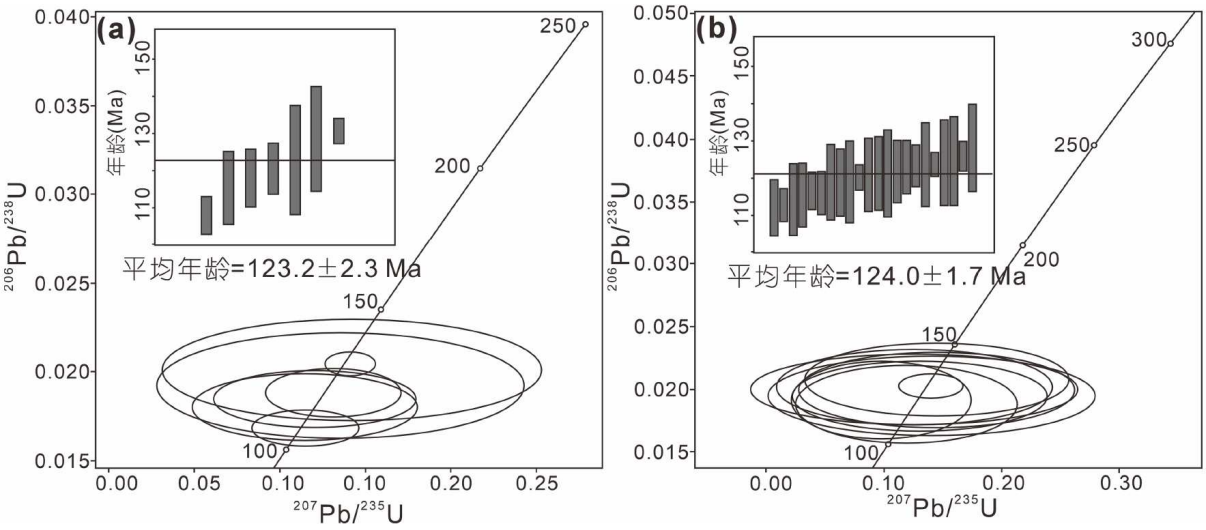


图 6　锆石U-Pb年龄协和图和加权平均年龄图。(a) BZ8-3S-2井；(b) BZ8-3S-3井

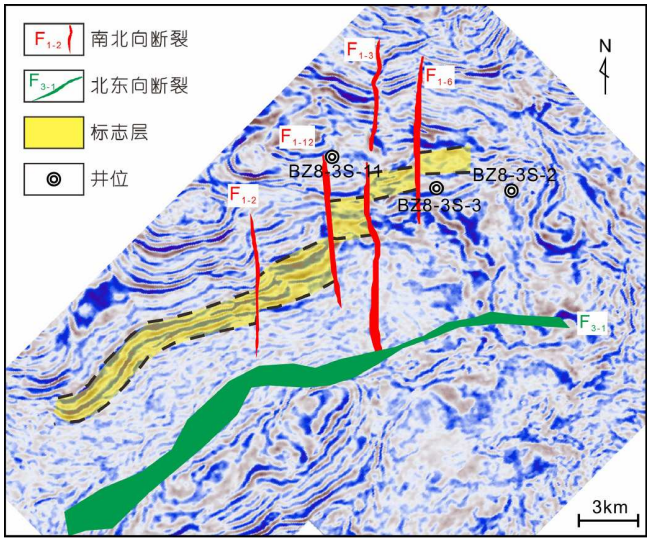


图 7　渤中8-3南古生界等时切片(4600 ms)与SN向主干断裂叠合图

标志层分别独立计算的$F_{1\text{-}3}$断裂总位移量结果相当，相互验证了结论的可靠性。

4.3　共轭走滑断裂

共轭走滑断裂是指同一期构造应力场作用下同时或近乎同时形成的、具有特定几何关系和力学成因联系的两组剪切断裂。它们通常成对出现，以特定的角度相交，夹角范围在50°到60°之间，共同调节区域变形。这类断裂的成因多采用安德森模式进行解释(Mitchell和Faulkner，2009；Faulkner等，2010)。晚三叠世印支运动期间，扬子板块以剪刀式碰撞方式向北与华北板块挤压闭合。此过程产生的远程效应(Engebretson等，1985；张国伟等，2003；郭涛等，2021)，在整个渤海海域诱发了一个强烈的NNW向挤压构造应力场。该应力场使得渤中隆起北部的石臼坨凸起发生强烈挤压隆升，并形成了一系列大规模的近EW向逆冲断裂。如石南1号断裂和秦南1号断裂等，识别出秃底和薄底等典型强挤压构造样式。位于强挤压逆冲构造后翼的渤中8-3南构造区，先存构造不发育，垂向形变微弱。该区域基底结构平缓、差异小，上覆古生界海相-海陆交互相地层分布稳定、岩石物理性质均一(图10a)，具备发育共轭走滑断裂的有利条件(Wu等，2018)。在近NNW向远程挤压应力作用下，该区发育了共轭角为55°的SN向与NW向走滑断裂。这些共轭断裂相互切割，限制了长距离水平滑动，因而尽管断裂垂向切穿深、特征清晰，其水平位移量却较小且呈分段性，共同构成了渤海湾盆地中较为罕见的安德森模式共轭走滑断裂系统。位于南部的渤中16-1构造主要受郯庐走滑断裂带控制，发育有$F_{1\text{-}10}$和$F_{1\text{-}11}$两条近南北走向的主走滑-转换调节断裂。该断裂系统主要通过水平位移调节并释放区域挤压变形，断裂面平直且延伸连续，仅发育少量NW向次级断裂(图10b)。燕山运动期间，受扬子板块向北弱挤压与西太平洋板块向华北板块俯冲的双重构造机制控制，渤中8-3南与渤中16-1断裂体系发生继承性活动。至喜山运动，渤中隆起发生强烈拗陷，并接受巨厚泥岩沉积。由于厚层泥岩通过塑性形变吸收了区域应力，加之共轭断裂体系相互切割、阻碍水平滑动，渤中8-3南共轭走滑断裂体系在喜马拉雅期未再次发生继承性活化；而在渤中16-1构造区，受郯庐断裂带强烈的剪切作用影响，SN走向的断裂则不同程度地向上切穿新生界，继续表现出继承性活动。

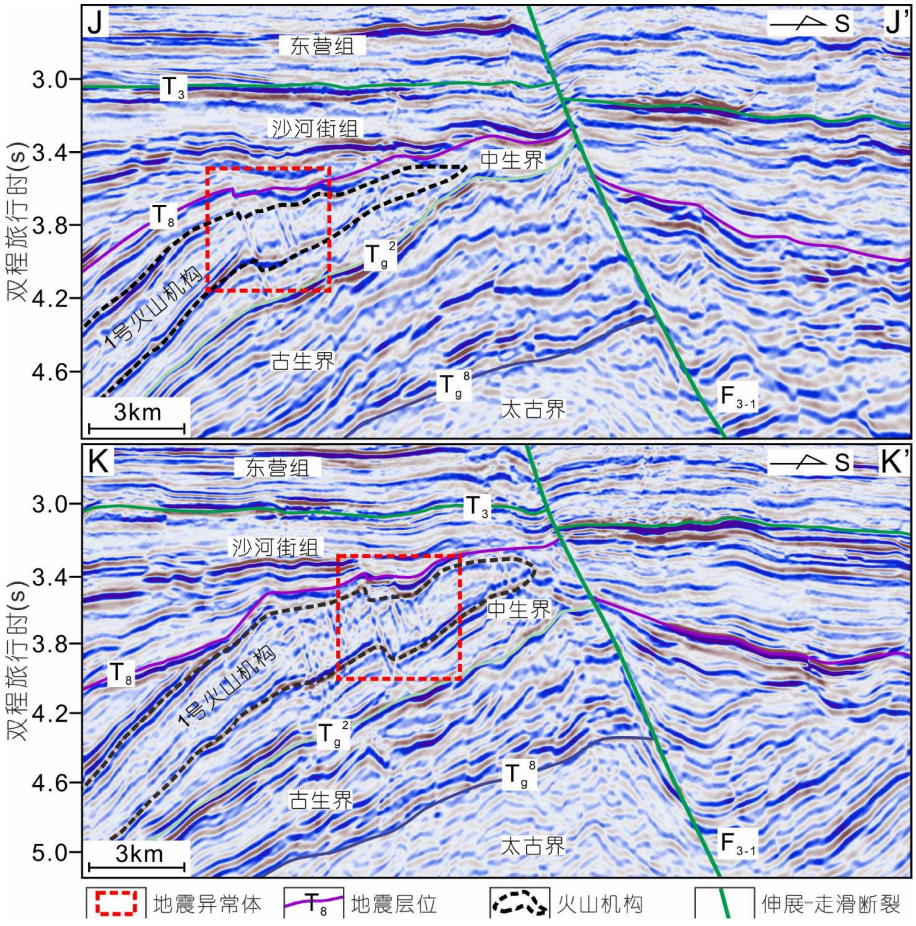


图 8 1号火山机构沿$F_{1\text{-}3}$走滑断裂两盘地震剖面(剖面位置见图9)

5 断裂对火山岩控储效应

5.1 大规模酸性火山岩的形成

渤海中生界义县组火山活动可划分为基性、中性与酸性三个喷发旋回(徐长贵等，2024)。旋回一以幔源基性岩浆为主，表现为沿大型走滑断裂的裂隙式喷发，基性岩浆流动性强，熔岩分布范围广，覆盖全区(张志军等，2021)；旋回二形成于华北克拉通破坏的鼎盛期，伴随岩石圈强烈拆沉与地幔上涌，壳幔混合形成的中性岩浆呈裂隙中心式喷发。该期岩浆体量大、黏度较低，受深大断裂及次级断裂多级次控制，火山岩体分布广泛且厚度相对均匀，断裂对岩体分布的控制作用相对减弱；旋回三对应于克拉通破坏的萎缩阶段，岩浆以壳源酸性成分为主，黏度显著增大、流动性弱，喷发过程强烈依赖高效通道。在此阶段，基底先存走滑断裂的交叉部位成为酸性岩浆上涌的优选路径，从而显著控制了酸性熔岩的空间展布(徐长贵等，2025b)。以BZ8-3南构造区2号火山机构为例，其酸性流纹岩在平面上与SN-NW向共轭走滑断裂的交汇部位高度吻合(图4，图11)，显示出显著的空间耦合性。地震剖面进一步揭示，这些断裂交汇处发育近直立、向上发散的火山通道，刺穿古生界，呈现典型的中心式喷发特征(图11a；卫平生等，2015)。平面与剖面特征共同证实，燕山期SN-NW向断裂体系的强烈再活化对酸性火山岩的喷发与就位起到了主导控制作用。

在SN-NW向走滑断裂的控制下，渤中隆起带不仅形成了BZ8-3南等多个大型酸性熔岩火山机构，邻近的渤中16-1构造也发育一系列大型火山机构。这些火山机构喷发就位期次稍晚，形态与渤中8-3南构造相似，均呈高丘状，尽管尚未经钻井直接证实，但依据其形态与地震反射特征，推测仍属大型酸性熔岩火山机构。因此，基底隐伏断裂系统控制了目前渤海地区规模最大的中生界酸性火山岩群，酸性熔岩叠合面积超过550 km^2，累计厚度超过1500 m(图2，图4)。前人研究及勘探实践表明，火山岩岩性是控制规模性储层发育的关键因素(Tang等，2022；徐长贵等，2024a，2025a)。溶蚀与应力实验结果显示，酸性火山岩中长英质矿物含量高，易于溶蚀形成

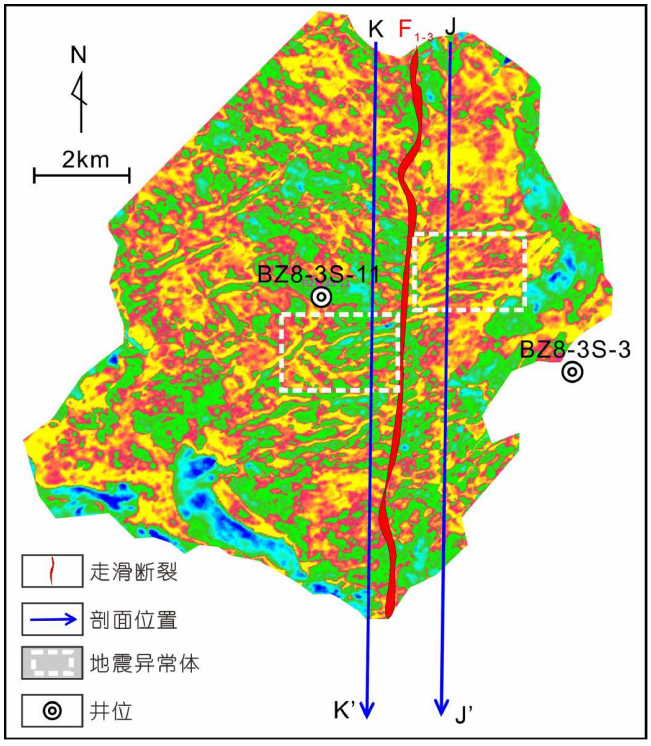


图 9　1号火山机构最大振幅属性(火山机构位置见图4)

次生孔隙，且抗压强度较低，更易产生裂缝，因而是发育规模性火山岩储层的最有利岩性(Sruoga等，2004；赵海玲等，2009；范存辉等，2014)。因此，本区受隐伏走滑断裂控制而广泛发育的酸性熔岩，为形成大规模优质火山岩储层奠定了坚实的岩性基础。

5.2　形成横弯褶皱隆起带

横弯褶皱是指由垂直作用于岩层层面的力(主要是下伏物质的垂向运动)所导致的褶皱变形，多发育于被动大陆边缘(盐底辟、差异压实)、岩浆活动区(岩浆底辟)等(徐开礼和朱志澄，1989；张长厚等，2004；张岳桥等，2004；Yan等，2006；许志琴等，2016)。渤中隆起带内断裂深切并沟通深部岩浆房，引发强烈岩浆喷发，产生巨大的垂向上拱构造应力。该时期古生界整体处于水平或近水平岩层产状，在此构造应力作用下，渤中隆起区地层发生垂向挠曲变形，形成典型的横弯褶皱，标志着渤中隆起构造地貌格局的初步形成。南北两带断裂体系的差异控制了两类横弯褶皱的发育：北带受网状NW向与SN向共轭断裂体系控制，岩浆底辟上拱构造应力呈以喷发中心为起点、向四周均匀辐射的释放模式，导致地层发生同心垂向变形，形成相对完整的穹隆背斜型横弯褶皱(图12a)；南带则受一系列SN向走滑断裂带约束，上拱构造应力迫使地层产生线状垂向变形，最终形成轴向SN的短轴背斜型横弯褶皱(图12b)。横弯褶皱带的展布范围与断裂体系及火山岩分布范围高度吻合。两大构造带的组合，共同构成了渤海最大富生烃凹陷内的洼中隆起带(夏庆龙等，2012；徐长贵等，2024b；张功成等，2024)，展现出优越的油气汇聚条件。

5.3　走滑断裂增释压控制规模性火山岩构造裂缝

断裂及次生裂缝一方面为火山岩提供储集空间；另一方面也沟通了火山岩中的原生孔隙，显著提升了流体的储集与渗流能力，直接决定了火山岩储层的有效性，成为火山岩油气藏获得高自然产能的关键基础(Tang等，2022)。据已钻井壁心、成像测井及薄片等资料揭示，渤中隆起火山岩中构造裂缝极为发育(图11，图14–16)，构成该区中生界火山岩储层的典型特征。燕山末期，走滑断裂的强烈活动不仅控制了火山岩的喷发，也对火山岩储层产生了显著的次生改造作用。主干走滑断裂沿走向表现出明显的分段特征，不同段落叠加形成规模不一的强构造应力释放带(Dahlstrom，1970；Woodcock和Fischer，1986；Morley等，1990；叶洪，1988；徐嘉炜，1995；Mann和Gordon，1996；Dooley和McClay，1997；Faulds和Varga，1998；万桂梅等，2010；徐长贵，2016)。在渤中隆起带中，主要识别出两类构造带：其一为“左行右阶”增压带，其二为“左行左阶”释压带。走滑断裂的叠加作用导致增压区与释压区发生显著差异变形：增压区地层隆起形成丘状构造，而释压区则发生断陷，形成凹状构造(图13)。

BZ8-3S-3井位于增压区核心部位，火山岩地层受挤压上拱形成丘状构造(图4，图5b)。该井区发育大量压扭性构造缝以释放挤压应力，壁心显示构造裂缝平直且连续(图4，图14a–14d)，剪切能力强，可见裂缝切穿长石斑晶(图14b)。构造裂缝密度为0.61条/米，裂缝在垂向上连续分布，形成网状缝系，储层连续、厚度大(图14)，有效储层厚度与总厚度之比(以下简称净毛比)达92.3%。BZ8-3S-2井位于增压区边缘(图4，图5b)，该区主要通过部分断层的挤压错动释放应力，导致全井段广泛发育断层角砾岩(图15a–15d)。裂缝在垂向上呈分段性发育，构造裂缝密度为0.32条/米，净毛比为35.5%。裂缝形态相对平直，成像测井显示以中-高角度为主(图15)，整体表现出弱压扭性力学特征。BZ8-3S-6井处于释压凹陷区核心(图4，图5b)，发育大量张性裂缝以释放拉张应力。壁心显示裂缝多呈锯齿状，并绕开斑晶分布(图16a–16d)，剪切能力较弱。裂缝垂向分布较为连续，构造裂缝密度为0.41条/米，净毛比为56.5%。上述三口井均位于2号火山机构内，岩性一致。BZ8-3S-2井属于近火山口的近源相

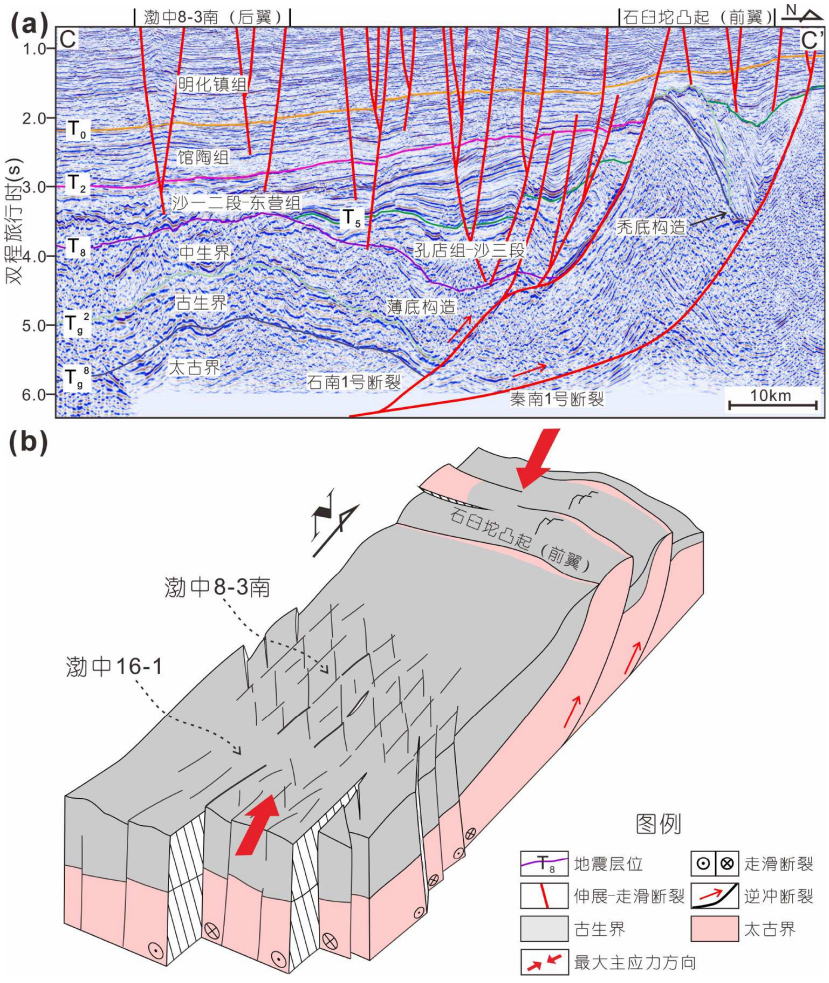


图 10　渤海印支期挤压逆冲构造特征(a)(剖面位置见图1)及共轭断裂发育模式图(b)

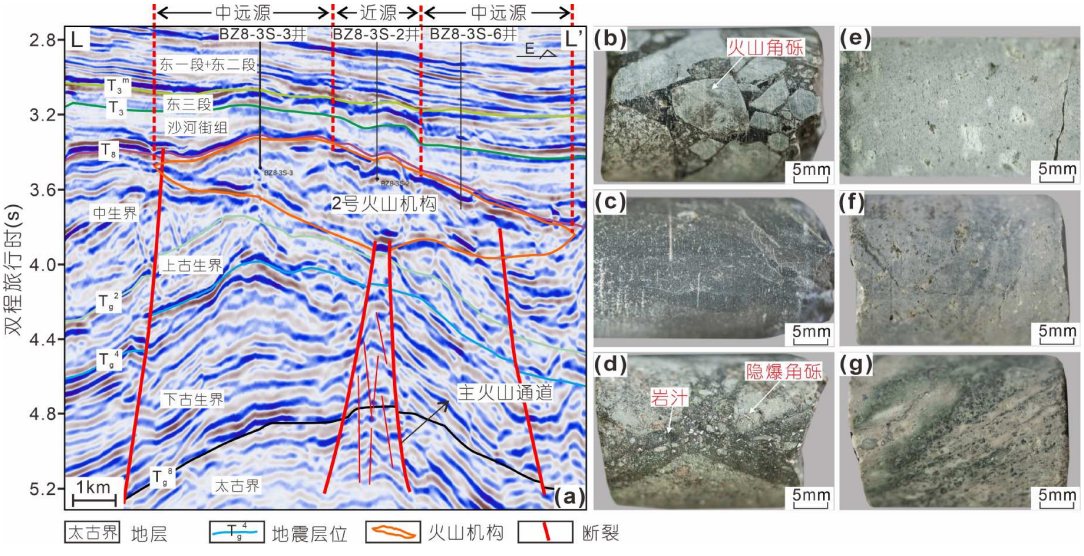


图 11　2号火山机构地震地质特征及岩性特征(剖面位置见图4)。(a) 2号火山机构地震地质特征；(b) BZ8-3S-2井，5005.7 m，流纹质火山岩角砾岩，堆砌结构，爆发相；(c) BZ8-3S-2井，4936.5 m，蚀变流纹质凝灰岩，爆发相；(d) BZ8-3S-2井，5149.80 m，流纹质隐爆角砾岩，火山通道亚相；(e) BZ8-3S-3井，5076.1 m，流纹质块状熔岩，溢流相；(f) BZ8-3S-3井，5477.7 m，流纹质块状熔岩，溢流相；(g) BZ8-3S-3井，5360.0 m，流纹质块状熔岩，溢流相

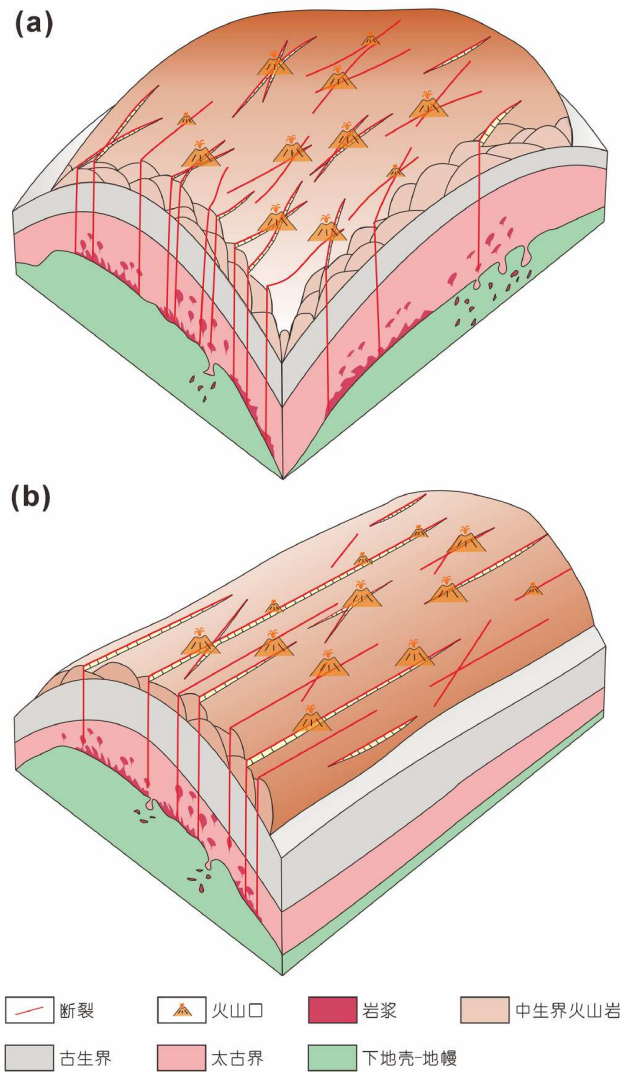


图 12　渤中隆起带穹隆背斜(a)和短轴背斜(b)横弯褶皱发育模式

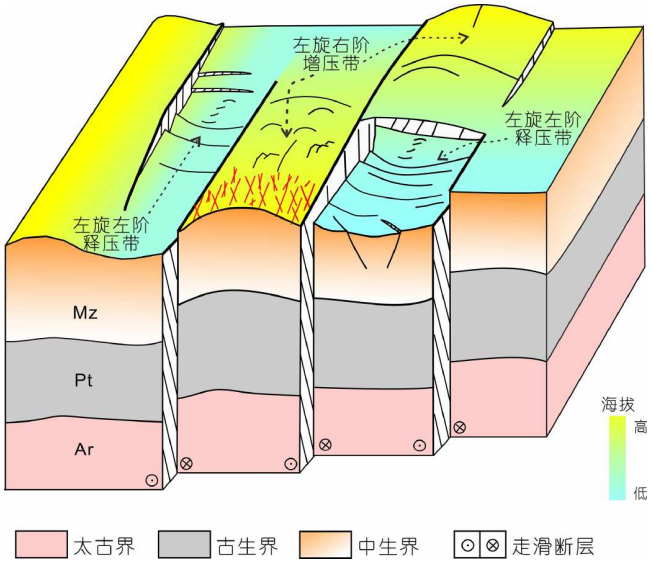


图 13　走滑断裂增释压带地层形变模式图

带(图11a)，主要发育爆发相火山凝灰岩(图11b)、火山角砾岩(图11c)及火山通道相隐爆角砾岩(图11d)。BZ8-3S-3井与BZ8-3S-6井则位于远离火山口的中-远源相带，距离火山口分别为3.7 km与2.5 km(图11a)，以溢流相流纹质块状熔岩为主(图11e–11g)。

经典火山机构相控储层模式认为，近源相带中喷溢相上部亚相与火山通道相控制原生气孔和裂缝的发育，而中-远源相带中喷溢相上部亚相比例降低、爆发相增多，储层条件通常变差(Wang和Chen，2015；单玄龙等，2023b；徐长贵等，2024a)。然而，钻井揭示BZ8-3南构造为贫气孔的大型酸性熔岩火山机构，无论近源或中-远源相带，原生气孔均不发育；取而代之的是，各相带均发育由密集网状裂缝与溶蚀孔隙构成的“缝-溶体”，形成优质储集空间。这一特征使得中-远源相带仍能形成全井段有效储层，表现为“走滑断裂次生改造控储”的新模式，明显区别于传统以近源相带为主的相控储层发育模式。

5.4　强连通缝网体系沟通多源酸性流体，协同实现溶蚀增孔扩缝

壁心与铸体薄片分析结果表明，渤中隆起带火山岩中原生孔隙不发育，难以形成原生型储层。该区有效的储集空间以次生孔隙为主，主要包括斑晶溶孔、基质溶孔及溶蚀缝等。目前普遍认为，渤海基岩潜山中的溶蚀孔隙主要有两种成因：一是长期风化淋滤作用，二是在埋藏阶段受多种酸性流体溶蚀改造形成(王德英等，2019；刘鹏程等，2025)。本区早白垩世火山岩顶部被沙河街组或东营组三段覆盖，经历了约70–80 Ma的风化作用，岩体受到强烈改造。同时，燕山晚期深切火山岩体的大规模走滑断裂持续活动，形成密集的构造裂缝，导致岩石破碎。这些裂缝构成流体的优势输导通道，显著增强了风化流体的下渗能力，从而增大了有效风化壳的厚度。在此背景下，BZ8-3S-2、BZ8-3S-3与BZ8-3S-6等井在距火山岩顶面250 m以内的层段展现出显著的风化淋滤与溶蚀特征：自顶界面向下连续发育大量溶蚀裂缝与孔隙，裂缝宽度明显增大，局部可见溶蚀沟槽(图14a–14b，图15a–15b，图16a–16b)；溶蚀孔隙以斑晶溶孔为主，部分斑晶甚至被完全溶蚀形成铸模孔(图14e–14f，图15e–15f，图16e–16f)。值得注意的是，在距顶面超过250 m的火山岩内幕区，仍常见碎裂带及伴生溶蚀孔隙，构成多层不连续分布的裂缝-溶蚀型储层。例如，BZ8-3S-3井在286 m与347 m处的壁心可见裂缝及伴生溶蚀孔

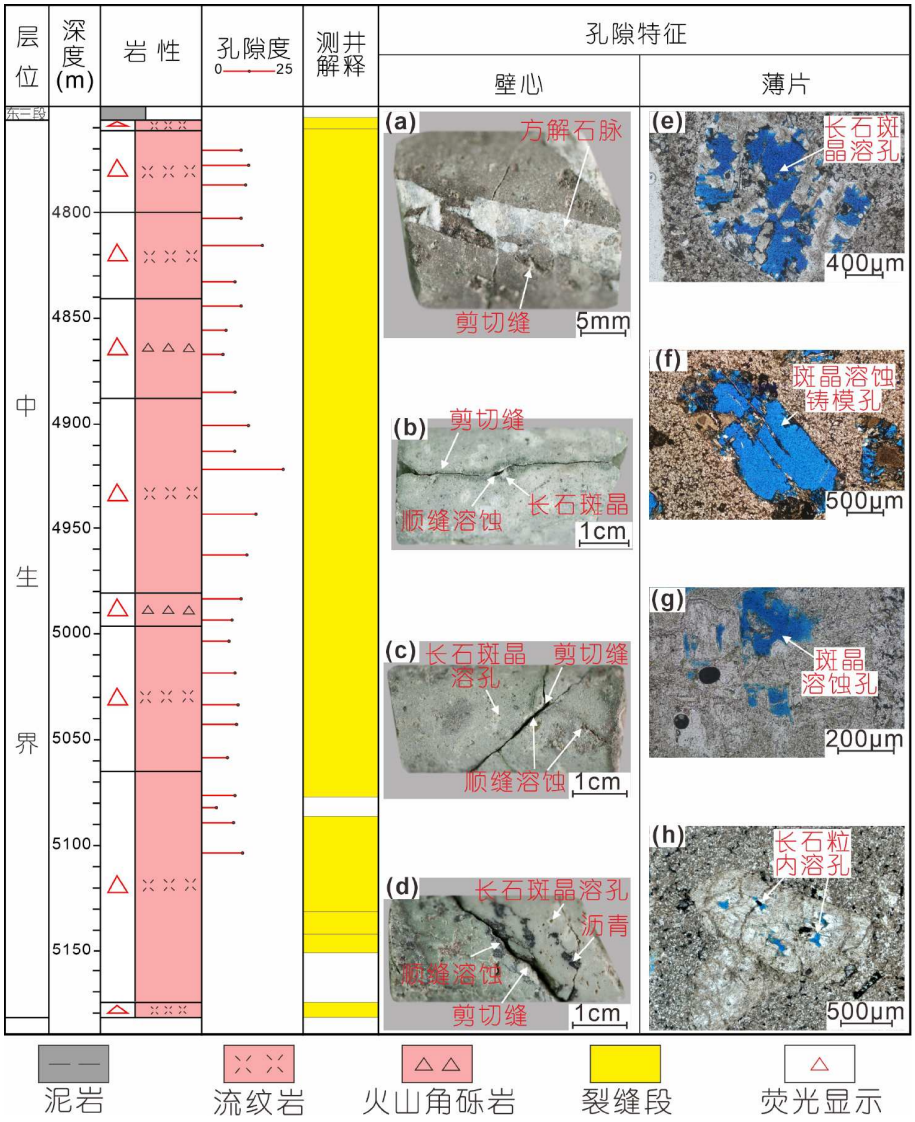


图 14 BZ8-3S-3井火山岩储层综合柱状图。(a) 4777.10 m，流纹质断层角砾岩；(b) 5057.9 m，块状流纹岩；(c) 5042.00 m，块状流纹岩；(d) 5103.00 m，块状流纹岩；(e) 4866.3 m，单偏光，长石溶孔；(f) 4900.1 m，流纹岩，单偏光，斑晶溶蚀铸模孔；(g) 5057.9 m，流纹岩，单偏光，斑晶溶蚀孔；(h) 5103 m，流纹岩，单偏光，长石的粒内溶蚀孔

隙(图14c–14d)，在302 m与346 m处的薄片中仍观察到长石斑晶溶蚀孔(图14g–14h)；BZ8-3S-2井与BZ8-3S-6井同样在潜山内幕的壁心与薄片中识别出顺缝溶蚀及长石斑晶溶蚀现象(图15c和15d，图15g，图16c和16d，图16g和16h)。这些现象一致说明，断裂系统为流体运移与溶蚀作用提供了关键通道。

通过对风化壳与内幕裂缝带中伴生的黄铁矿(图17a–17c)和方解石(图17b，图17d)开展微区元素与同位素分析，对溶蚀流体类型进行了判别. 电子探针分析表明，黄铁矿的Co/Ni比值为1.00–2.29(>1)，指示其为热液成因。此外，渤中凹陷BZ19-6、BZ25-1、BZ21-2、QHD29-2/2E等多个构造区钻井不同层系天然气中CO_2的同位素分析结果，也证实存在大量无机成因CO_2，表明该区幔源无机CO_2流体活动活跃(Zhou等，2012；田立新等，2013；Miao等，2020；张藜等，2021；Tang等，2022；Wang等，2022)。进一步对研究区BZ8-3S-2井天然气样品进行分析，结果显示其CO_2含量为6.7%，碳同位素组成$\delta^{13}C$为−7.9‰，也证实研究区存在无机成因CO_2。上述证据共同指示，该区曾存在深部含CO_2的热液活动。研究表明，深部CO_2热液在高温高压下属于活跃的酸性流体，通过断裂沟通，对储层溶蚀孔缝的形成具有重要作用(刘全有等，2019；Liu等，2023；Zhu等，2024)。因此推测，研究区深部含CO_2热液对中生界火山岩储层的形成也具有重要促进作用。方解石的C-

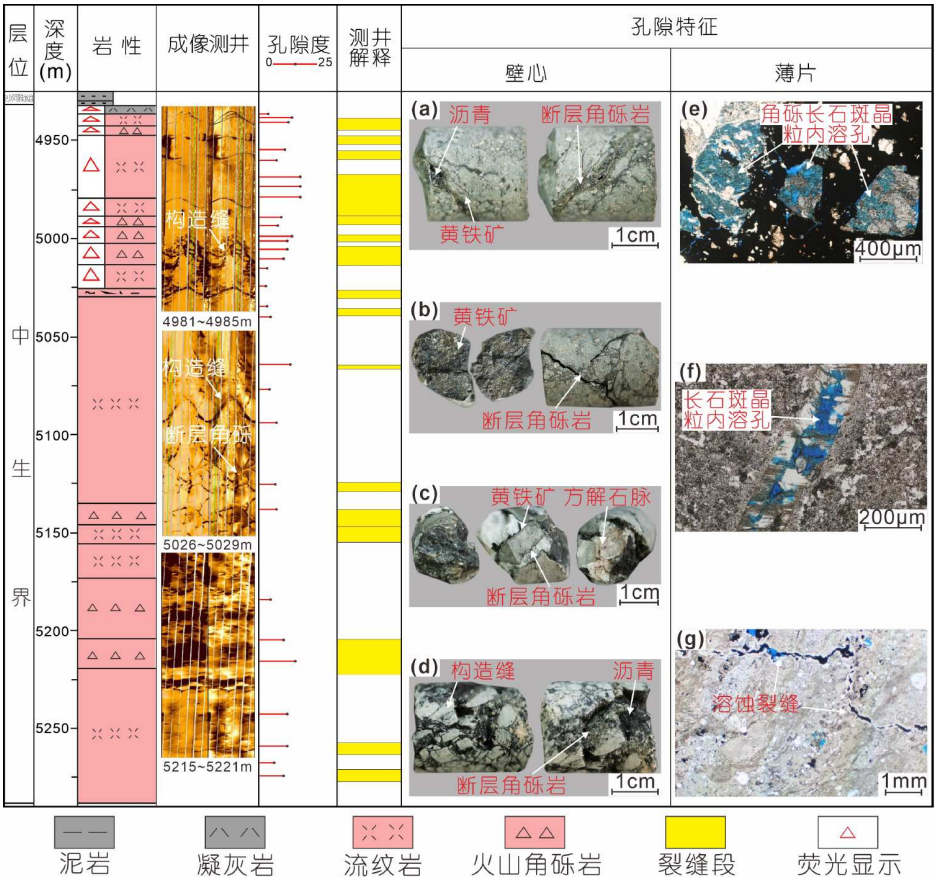


图 15　BZ8-3S-2井火山岩储层综合柱状图。(a) 4988.90 m，流纹质断层角砾岩；(b) 5010.20 m，流纹质断层角砾岩；(c) 5149.80 m，流纹质断层角砾岩；(d) 5215.70 m，流纹质断层角砾岩；(e) 4993.7 m，流纹岩，单偏光，角砾长石斑晶的粒内溶蚀孔；(f) 5040.3 m，流纹岩，单偏光，长石斑晶粒内溶孔；(g) 5149.8 m，流纹岩，单偏光，溶蚀裂缝

O同位素数据全部落在与有机酸脱羧作用相关的区域内(图17e；曹家鑫等，2018)，说明还存在有机酸流体的溶蚀贡献(徐长贵等，2025b)。综上，本区火山岩溶蚀孔隙是大气淡水、有机酸和深源CO_2热流体三类流体共同作用的产物。

薄片观察进一步揭示，部分黄铁矿脉或由其充填的颗粒周缘的火山岩基质，被后期流体完全溶蚀，致使黄铁矿呈孤立状产出(图17a–17c)。这些溶蚀孔隙常与未受溶蚀的有机酸成因方解石共生(图17b，图17d)，表明有机酸相关的溶蚀作用发生于幔源CO_2热液活动之后。结合区域地质背景分析，深大断裂伴随的大规模火山活动结束后，深部热液作用虽可长期延续，但其主要活动期集中于燕山期-喜山早期(杨海风等，2025b)；而有机酸溶蚀则与烃源岩成熟阶段相对应，即发生于古近纪晚期-新近纪(远光辉等，2013；陈启林和黄成刚，2018)。该时期先存隐伏走滑断裂的再次活动，导致早期裂缝活化并产生新裂缝(图17d)，从而有效促进了有机酸流体的渗入与溶蚀作用。上述薄片观察结果与流体构造时序判断高度吻合，进一步支持了“幔源CO_2热液溶蚀在前，有机酸溶蚀在后”的演化模式。

5.5　“优势岩性岩相、走滑断裂叠加改造、多类流体溶蚀增孔”三元耦合成储模式

综上所述，渤中隆起带的共轭走滑断裂控制了大面积厚层流纹岩的发育。这类岩性易受酸性流体、构造应力等后期次生作用的改造，进而形成大量次生孔隙，成为火山岩储层的优质岩性。走滑断裂之间的分段叠覆形成了两种类型的构造带：一是“左行右阶”增压带，二是“左行左阶”释压带。它们控制了大量张性和压扭性构造裂缝的发育，主干断裂与构造裂缝交织形成了强连通的立体缝网体系，为大气淡水、有机酸和深源CO_2热流体提供了高效的输导和渗流通道。此缝网体系大大拓展了流体溶蚀的空间维度，火山岩表层及深部均可见到明显的次生溶蚀扩孔和增缝现象，从而形成规模性火山岩优质储层(图18)。基于上述认识，优质规模性火山岩储层的展布规律得以明确：有利储层主要发育于渤中隆起带内

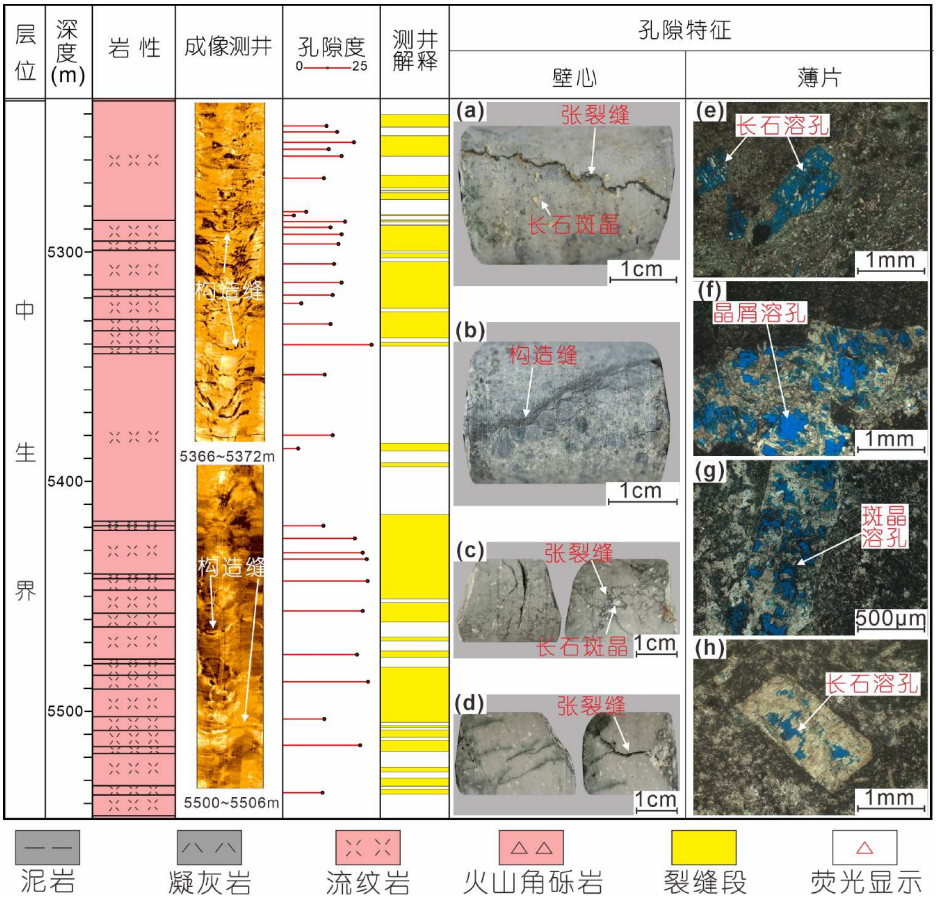


图 16 BZ8-3S-6井火山岩储层综合柱状图。(a) 5369.00 m，块状流纹岩；(b) 5432.40 m，块状流纹岩；(c) 5522.00 m，块状流纹岩；(d) 5550.00 m，块状流纹岩；(e) 5302.00 m，流纹岩，单偏光，长石溶蚀；(f) 5480.50 m，流纹岩，单偏光，晶屑溶孔；(g) 5533.80 m，流纹岩，单偏光，晶屑溶孔；(h) 5582.00 m流纹岩，单偏光，长石晶间溶孔

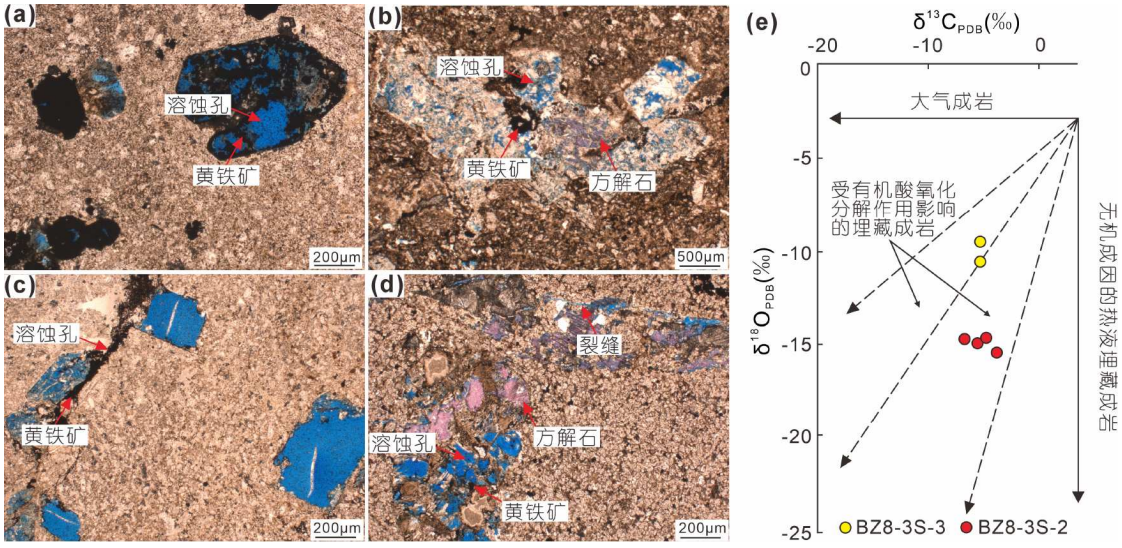


图 17 渤中8-3南构造区典型钻井流纹岩溶蚀-充填特征与流体来源(据曹家鑫等，2018)。(a) BZ8-3S-3井，4777 m，铸体薄片单偏光，显示长石斑晶受晚期溶蚀作用影响，致使早期充填的黄铁矿孤立残留；(b) BZ8-3S-3井，4802 m，铸体薄片单偏光，溶蚀孔洞中可见自形方解石及因基质溶蚀而孤立产出的黄铁矿；(c) BZ8-3S-3井，4844 m，铸体薄片单偏光，黄铁矿脉体边缘长石被强烈溶蚀，导致其一侧完全被熔离；(d) 新生裂缝及伴生溶蚀孔隙，部分被方解石充填；(e) 不同成因流体的碳氧同位素组成判别图解

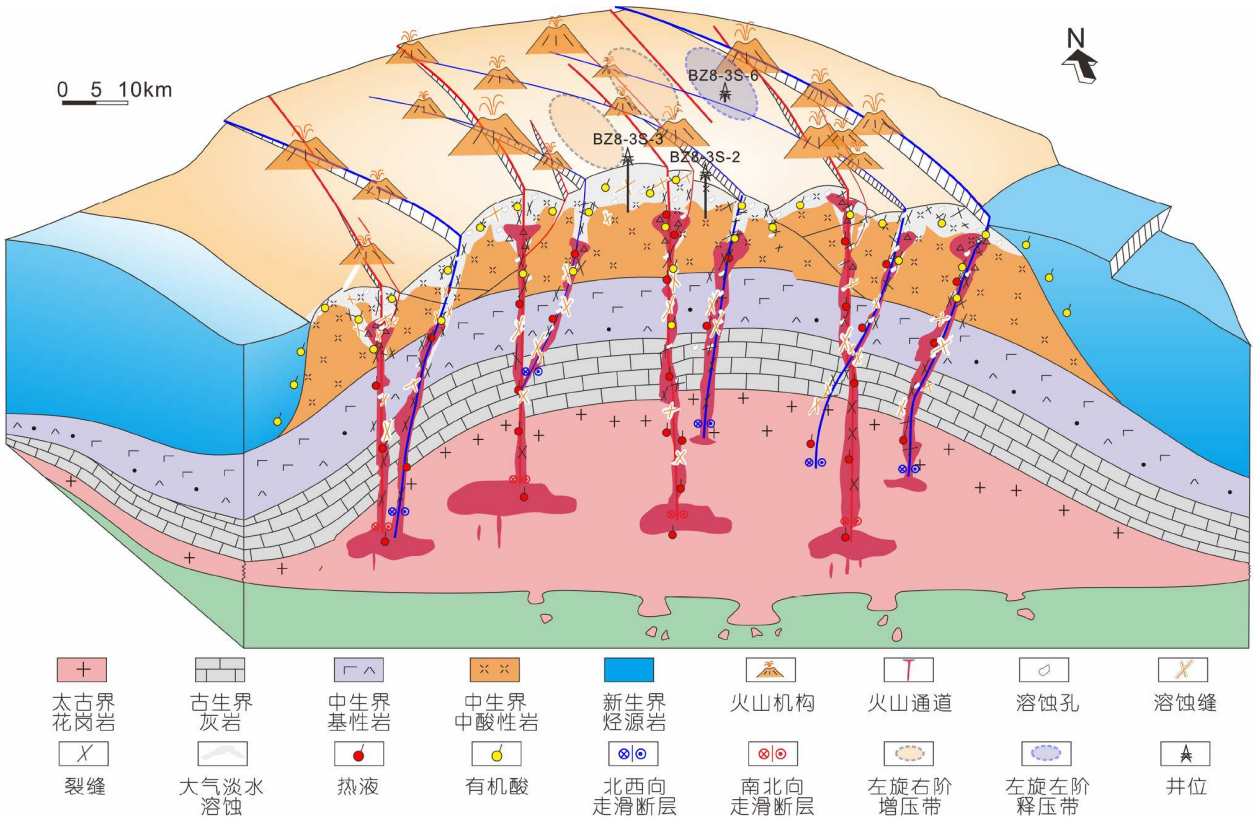


图 18　渤中隆起中生界火山岩高孔渗规模性储层发育模式图

的大型酸性熔岩火山机构中，尤其集中于南北向与北西向走滑断裂交叉部位所形成的“左行右阶”增压带和“左行左阶”释压带区域。受风化和后期流体活动影响，有利储层多分布于火山机构群西侧高部位，面向渤中凹陷生烃中心的有机酸优势运移通道沿线，以及北东向大型走滑断裂周缘的深部流体活跃区，整体沿断裂系统展布(图4)。

6　结论

（1）渤中隆起带发育SN向、NW向和NE向三组走向断裂体系，其中SN向和NW向为印支期共轭走滑断裂，经历了印支期成型、燕山期强活化、喜马拉雅期弱活化三大演化阶段，NE向则为燕山末期弱走滑断裂，喜马拉雅期活动性则表现为东西分段。

（2）渤中隆起中生代火山岩喷发时期为早白垩世，SN和NW向共轭走滑断裂体系控制火山岩喷发就位，火山通道均沿SN和NW共轭走滑断裂体系展布，中-高丘状酸性火山岩覆盖整个渤中隆起带。

（3）主干走滑断裂之间沿走向分段叠覆发育“左行右阶”增压带和“左行左阶”释压带，增释压带内构造应力强释放，使得火山岩中发育大量构造缝和断层角砾岩，构建了强联通缝网体系。

（4）建立了“优势岩性岩相、走滑断裂叠加改造、多类流体溶蚀增孔”三元耦合的火山岩储层新模式。明确在大型中酸性喷溢相熔岩火山机构中，受“左行右阶”增压带与“左行左阶”释压带控制，并与大气淡水、有机酸及深源CO_2热流体高效输导-渗流通道相叠合的区域，是优质储层发育的有利部位。在成储模式指导下，在机构中远源相带发现规模性优质储层，极大拓展了火山岩勘探空间。

参考文献

曹家鑫, 何方方, 朱蓉, 等. 2018. 梨树断陷营城组砂岩方解石胶结物碳、氧同位素特征. 地质科技情报, 37: 75–80
陈启林, 黄成刚. 2018. 沉积岩中溶蚀作用对储集层的改造研究进展. 地球科学进展, 33: 1112–1129
邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 等. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程. 地学前缘, 10: 41–50
邓尚, 邱华标, 刘大卫, 等. 2024. 克拉通内走滑断裂成因与控藏机制研究进展——以塔里木盆地北部为例. 石油与天然气地质, 45: 1211–1225
宫亚军, 张奎华, 王金铎, 等. 2025. 沉积碎屑岩断裂带结构特征、渗透性及流体运移规律. 地球科学, 50: 1968–1986
郭涛, 张江涛, 王鑫, 等. 2021. 渤海海域辽北潜山中新生代差异演变与形成机制. 中国海上油气, 33: 39–47
何辉, 李顺明, 孔垂显. 2020. 火山岩油藏储层评价与高效开发. 北京: 石

油工业出版社. 274
侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2000. 渤海中、新生代构造活动与沉积作用的时空关系. 石油与天然气地质, 21: 201–206
侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2001. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. 北京大学学报(自然科学版), 37: 845–851
胡贺伟, 李慧勇, 肖述光, 等. 2022. 沙垒田凸起西段走滑断裂发育特征及其对油气的控制作用. 海洋地质前沿, 38: 36–44
胡志伟, 徐长贵, 王德英, 等. 2019. 渤海海域走滑断裂叠合特征与成因机制. 石油勘探与开发, 46: 254–267
黄少英, 宋兴国, 罗彩明, 等. 2021. 塔北隆起X型走滑断裂成因机制的新解释. 现代地质, 35: 1797–1808+1829
匡立春, 吕焕通, 王绪龙, 等. 2010. 准噶尔盆地天然气勘探实践与克拉美丽气田的发现. 天然气工业, 30: 1–6
李瑞磊, 杨立英, 朱建峰, 等. 2023. 松辽盆地南部断陷层火山岩储层特征及油气成藏主控因素. 地学前缘, 30: 100–111
李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. 地学前缘, 17: 64–89
李玮, 柳益群, 董云鹏, 等. 2012. 新疆三塘湖地区石炭纪火山岩年代学、地球化学及其大地构造意义. 中国科学: 地球科学, 42: 1716–1728
刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩, 等. 2010. 试论火山岩油气藏成藏机理. 岩石学报, 26: 1–13
刘鹏程, 吕丁友, 衣健, 等. 2025. 渤海湾盆地渤中凹陷太古宇潜山变质岩的岩性特征、成因及储层意义——以渤中19-6构造区和安子岭地区为例. 石油学报, 46: 320–334
刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 2019. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵. 中国科学: 地球科学, 49: 499–520
马兵山, 王家木, 唐浩, 等. 2025. 四川盆地川中地区走滑断裂带特征及成因机制. 地质学报, 99: 3303–3319
牛成民, 于海波, 单玄龙, 等. 2024. 渤海海域锦州25-A构造区中生界火山岩有利储层成因. 吉林大学学报(地球科学版), 54: 1788–1800
单玄龙, 牟汉生, 刘玉虎, 等. 2023a. 湖盆水下喷发火山岩相类型、特征与储集意义: 以松辽盆地南部查干花地区白垩系为例. 石油勘探与开发, 50: 719–730
单玄龙, 王蔚, 张新涛, 等. 2023b. 渤海海域渤中凹陷中生界火山机构地质模式及建造过程. 石油与天然气地质, 44: 675–688
孙圆辉, 沈平平, 阮宝涛, 等. 2008. 松辽盆地长岭断陷长深1号气田火山岩岩性及储渗特征研究. 天然气地球科学, 19: 630–633
唐华风, 王璞珺, 李瑞磊, 等. 2012. 松辽盆地断陷层火山机构类型及其气藏特征. 吉林大学学报(地球科学版), 42: 583–589
田立新, 杨海风, 王德英, 等. 2013. 渤海海域古近系油气藏高含量CO_2的成因及成藏期研究: 以秦南凹陷Q油气田为例. 中南大学学报(自然科学版), 44: 673–678
万桂梅, 汤良杰, 金文正. 2010. 辽东湾JZ27-33区块伸展型右行走滑双重构造系统. 中国地质, 37: 1584–1591
王德英, 王清斌, 刘晓健, 等. 2019. 渤海湾盆地海域片麻岩潜山风化壳型储层特征及发育模式. 岩石学报, 35: 1181–1193
王德英, 刘晓健, 邓辉, 等. 2022. 渤海湾盆地渤中19-6区中-新生代构造转换特征及其对太古宇潜山大规模储层形成的控制作用. 石油与天然气地质, 43: 1334–1346
王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 2003. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. 吉林大学学报(地球科学版), 33: 449–456
王昕, 陈磊, 高雁飞, 等. 2025. 渤海海域龙口7-1火山岩潜山油气勘探发现及成藏新认识. 中国海上油气, 37: 14–26
卫平生, 潘建国, 谭开俊, 等. 2015. 世界典型火成岩油气藏储层. 北京: 石油工业出版社. 223
吴智平, 李伟, 任拥军, 等. 2003. 济阳坳陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨. 地质学报, 77: 280–286
吴智平, 侯旭波, 李伟. 2007. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨. 大地构造与成矿学, 31: 385–399
夏庆龙, 周心怀, 薛永安. 2012. 渤海海域油气藏形成分布与资源潜力. 北京: 石油工业出版社. 268
徐春强, 张新涛, 王晨杰, 等. 2022. 渤中凹陷中生界火山岩特征及优质储层控制因素. 吉林大学学报(地球科学版), 52: 1027–1036
徐春强, 王晨杰, 王蔚. 2024. 渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及油气成藏条件. 吉林大学学报(地球科学版), 54: 1801–1804
徐嘉炜. 1995. 论走滑断层作用的几个主要问题. 地学前缘, 2: 125–136
徐开礼, 朱志澄. 1989. 构造地质学(第二版). 北京: 地质出版社. 270
徐长贵. 2016. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用. 地球科学, 41: 1548–1560
徐长贵. 2022. 渤海海域大型伸展-走滑复合断裂特征与控藏作用. 中国海上油气, 34: 1–13
徐长贵. 2024. 渤海湾盆地天然气勘探新进展、未来方向与挑战. 天然气工业, 44: 72–85
徐长贵, 加东辉, 宛良伟. 2017. 渤海走滑断裂对古近系源-汇体系的控制作用. 地球科学, 42: 1871–1882
徐长贵, 张功成, 黄胜兵, 等. 2024a. 渤海湾盆地海域白垩系大中型火山岩油气藏形成条件. 石油勘探与开发, 51: 467–477
徐长贵, 周家雄, 杨海风, 等. 2024b. 渤海海域油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 45: 163–182
徐长贵, 杨海风, 王清斌, 等. 2025a. 火山岩油气藏勘探进展. 地球科学, 50: 363–376
徐长贵, 王昕, 杨海风, 等. 2025b. 渤海海域渤中凹陷中生界超深层火山岩潜山天然气勘探发现及意义. 石油学报, 46: 843–856, 908
徐长贵, 杨海风, 陈磊, 等. 2025c. 渤海湾盆地渤东低凸起中生界火山岩勘探突破及油气成藏条件. 石油勘探与开发, 52: 537–550
许志琴, 王勤, 李忠海, 等. 2016. 印度-亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换. 地质学报, 90: 1–23
杨海风, 吕丁友, 孙永河, 等. 2021. 渤海湾盆地黄河口凹陷东洼断裂体系发育特征及其变形过程的构造物理模拟. 地球科学, 46: 2391–2402
杨海风, 叶涛, 燕歌, 等. 2025a. 渤中凹陷及周边地区中生界大中型火山岩油气田成藏条件及模式. 中国海上油气, 37: 1–12
杨海风, 房舟, 王飞龙, 等. 2025b. 渤海湾盆地沙河街组-东营组深部热液对有机质富集的影响及模式. 石油学报, 46: 1089–1107
杨森楠. 1985. 秦岭古生代陆间裂谷系的演化. 地球科学, 10: 53–62
叶洪. 1988. 断块构造理论在研究走滑转换构造中的应用. 北京: 科学出版社. 360
叶涛, 韦阿娟, 鲁凤婷, 等. 2019. 渤海海域西南部前新生代反转构造特征及成因机制. 地质学报, 93: 317–328
衣健, 李慧勇, 单玄龙, 等. 2022. 渤海湾盆地渤中凹陷太古宇变质岩潜山储集层垂向结构单元划分与识别. 石油勘探与开发, 49: 1107–1118
远光辉, 操应长, 杨田, 等. 2013. 论碎屑岩储层成岩过程中有机酸的溶蚀增孔能力. 地学前缘, 5: 209–221
张功成, 佟殿君, 陈凯, 等. 2024. 渤海湾超级油盆构造演化及其烃源岩发育. 石油勘探与开发, 51: 1008–1023
张国伟, 董云鹏, 赖绍聪. 2003. 秦岭-大别早山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 1121–1135
张藜, 张新涛, 刘艺萌, 等. 2021. 渤海海域深部热流体存在的证据及其对油气成藏意义——以秦皇岛29-2/2E油气田为例. 天然气地球科学, 32: 633–644
张岳桥, 赵越, 董树文, 等. 2004. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段. 地学前缘, 11: 11
张长厚, 吴淦国, 徐德斌, 等. 2004. 燕山板内造山带中段中生代构造格局与构造演化. 地质通报, 23: 864–875
张正涛, 林畅松, 李慧勇, 等. 2019. 渤海湾盆地沙垒田地区新近纪走滑断裂发育特征及其对油气富集的控制作用. 石油与天然气地质, 40: 778–788
张志军, 张笑桀, 徐德奎. 2021. 黄河口凹陷中洼古近系火山岩发育特征及其对油气成藏的控制作用. 中国海上油气, 33: 32–41
赵海玲, 黄薇, 王成, 等. 2009. 火山岩中脱玻化孔及其对储层的贡献. 石油与天然气地质, 30: 47–52
周家雄, 徐春强, 黄志, 等. 2025. 渤海湾盆地渤中凹陷BZ8-3S大型构造规模型火山岩储层形成条件. 地球科学, 50: 388–404
周琦杰, 刘永江, 王德英, 等. 2022. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成. 地学前缘, 29: 147–160

Brandes C, Tanner D C, Igel J, et al. 2025. Lithological control on the geometry of strike-slip faults—Insight from ground-penetrating radar (GPR) survey and analogue modelling. Tectonophysics, 917: 230944

Dahlstrom C D A. 1970. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. Bull Can Pet Geol, 18: 332–406

Dooley T, McClay K. 1997. Analog modeling of strike-slip pull-apart basins. AAPG Bull, 81: 804–826

Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. Geol Soc Am Spec Pap, 206: 1–60

Faulds J E, Varga R J. 1998. The role of accommodation zone and transfer zone in the regional segmentation of extended terranes. In: Faulds J E, Stewart J H, eds. Accommodation Zones and Transfer Zones: The Regional Segmentation of the Basin and Range Provinces. The Geology Society of America, 323: 1–45

Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, et al. 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. J Struct Geol, 32: 1557–1575

Hawlader H M. 1990. Diagenesis and reservoir potential of volcanogenic sandstones—Cretaceous of the Surat Basin, Australia. Sediment Geol, 66: 181–195

Huang L, Liu C Y. 2014. Evolutionary characteristics of the sags to the east of Tan-Lu Fault Zone, Bohai Bay Basin (China): Implications for hydrocarbon exploration and regional tectonic evolution. J Asian Earth Sci, 79: 275–287

Hunter B E, Davies D K. 1979. Distribution of volcanic sediments in the Gulf Coastal Province—Significant to petroleum geology. Gulf Coast Assoc Geol Soc Trans, 29: 147–155

Kawamoto T. 2001. Distribution and alteration of the volcanic reservoir in the Minami-Nagaoka gas field. J Jpn Assoc Pet Technol, 66: 46–55

Li S, Xiao Y, Liou D, et al. 1993. Collision of the North China and Yangtse Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. Chem Geol, 109: 89–111

Liu Q Y, Zhu D Y, Jin Z J, et al. 2023. Carbon capture and storage for long-term and safe sealing with constrained natural CO_2 analogs. Renew Sustain Energy Rev, 171: 113000

Mann P, Gordon M. 1996. Tectonic uplift and exhumation of blueschist belts along transpressional strike-slip fault zones. In: Bebout G, Scholl D, Kirby S, et al., eds. Dynamics of Subduction Zones, Geophysical Monographs, 96. American Geophysical Union, Washington, DC. 143–154

Miao Q, Xu C, Hao F, et al. 2020.Roles of fault structures on the distribution of mantle-derived CO_2 in the Bohai Bay basin, NE China. J Asian Earth Sci, 197: 104398

Mitchell T M, Faulkner D R. 2009. The nature and origin of off-fault damage surrounding strike-slip fault zones with a wide range of displacements: A field study from the Atacama fault system, northern Chile. J Struct Geol, 31: 802–816

Morley C K, Nelson R A, Patton T L, et al. 1990. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. AAPG Bull, 74: 1234–1253

Pola A, Crosta G, Fusi N, et al. 2012. Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. Tectonophysics, 566-567: 67–86

Polyansky O P, Reverdatto V V, Khomenko A V, et al. 2003. Modeling of fluid flow and heat transfer induced by basaltic near-surface magmatism in the Lena-Tunguska petroleum basin (Eastern Siberia, Russia). J Geochem Explor, 78-79: 687–692

Seemann U, Scherer M. 1984. Volcaniclastics as potential hydrocarbon reservoirs. Clay miner, 19: 457–470

Sordi R, Hartley A, Saltapidas S, et al. 2025. The Triassic rift event in the northern north Sea, a new tectonic model for the Utsira high area. Basin Res, 37: e70055

Sruoga P, Rubinstein N. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. AAPG Bull, 91: 115–129

Sruoga P, Rubinstein N, Hinterwimmer G. 2004. Porosity and permeability in volcanic rocks: A case study on the Serie Tobífera, South Patagonia, Argentina. J Volcanol Geotherm Res, 132: 31–43

Tang H F, Tian Z W, Gao Y F, et al. 2022. Review of volcanic reservoir geology in China. Earth-Sci Rev, 232: 104158

Tang H, Zhao X, Liu X, et al. 2020. Filling characteristics, reservoir features and exploration significance of a volcanostratigraphic sequence in a half-graben basin—A case analysis of the Wangfu Rift Depression in Songliao Basin, NE China. Mar Pet Geol, 113: 104128

Wang P J, Chen S M. 2015. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China. AAPG Bull, 99: 499–523

Wang Q, Hao F, Xue Y A, et al. 2022. Geochemistry and origin of the Bozhong 19-6 condensates: Implications for deep gas accumulation in the Bohai Bay Basin. AAPG Bull, 106: 869–896

Woodcock N H, Fischer M. 1986. Strike-slip duplexes. J Struct Geol, 8: 725–735

Wu G H, Yuan Y J, Huang S Y, et al. 2018. The dihedral angle and intersection processes of a conjugate strike-slip fault system in the Tarim Basin, NW China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 92: 74–88

Xu J W, Zhu G, Tong W X, et al. 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. Tectonophysics, 134: 273–310

Yan D P, Zhou M F, Song H L, et al. 2006. Mesozoic extensional structures of the Fangshan tectonic dome and their subsequent reworking during collisional accretion of the North China Block. J Geol Soc, 163: 127–142

Yin A, Nie S R. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam Fault Systems, eastern Asia. Tectonics, 12: 801–813

Yu L, Yu Y X, Jiang Y M, et al. 2024. Development of arcuate faults and controls on hydrocarbon accumulation in the Tiantai slope, Xihu Depression, East China Sea basin. J Asian Earth Sci, 276: 106362

Zhang J Q, Yu F S, Wang Y F, et al. 2024. Multi-phase deformation and analogue modelling of the Junggar Basin, NW China. Pet Sci, 21: 3720–3741

Zhou X H, Wang Q B, Li J P, et al. 2012. Impact of late-accumulated mantle-derived CO_2 on quality of Paleogene clastic reservoir at Actic Area, Qin Nan Sag. Energy Explor Exploitation, 30: 295–309

Zhu D Y, Liu Q Y, Wang J B, et al. 2024. Differential fault-fluid alterations and reservoir properties in ultra-deep carbonates in the Tarim Basin, NW China. Appl Geochem, 170: 106084

（责任编委：刘全有）