

# 渤海湾盆地深部 CO<sub>2</sub> 来源与热液活动对储层的改造作用

晏宇<sup>1</sup>, 刘全有<sup>1</sup>, 李朋朋<sup>1</sup>, 高宇<sup>1</sup>, 刘佳润<sup>1</sup>, 朱东亚<sup>2</sup>, 金之钧<sup>1</sup>

(1. 北京大学能源研究院, 北京 100871; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

**摘要:** 渤海湾盆地是中国东部重要的含油气盆地之一, 其复杂的成储特征与深部 CO<sub>2</sub> 注入和富 CO<sub>2</sub> 热液活动的改造密切相关。对 CO<sub>2</sub> 含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值和  $R/R_a$  相关性的综合分析表明, 盆地中 CO<sub>2</sub> 主要是深部幔源岩浆活动所释放的 CO<sub>2</sub>。通过含 CO<sub>2</sub> 流体包裹体数据统计发现均一温度呈现“双峰型”, 表明研究区储层经历了多期热液改造过程。此外, 岩石矿物学和地球化学等多种证据也揭示了热液活动对储层的影响。研究区发育铁白云石、黄铁矿、绿泥石、片钠铝石等典型热液矿物。在渤中坳陷、济阳坳陷等地区, 储层中的方解石具有较低的氧同位素值和稀土元素 Eu 正异常的特征, 表明其为热液成因。进一步分析发现, 深部热液流体对储层的改造表现为明显的空间差异, 靠近深部热液活动区域的储层通过富 CO<sub>2</sub> 热液通过溶蚀作用和热烘烤作用显著改善了储层的孔隙度, 而远离深部热液活动区域, 自生白云石、方解石、石英等沉淀胶结作用导致孔隙度和渗透率降低。

**关键词:** 渤海湾盆地; 富 CO<sub>2</sub> 热液; 幔源来源 CO<sub>2</sub>; 储层改造; 矿物沉淀

中图分类号: P618.130.2<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2026)01-0123-15

## The deep CO<sub>2</sub> source and the reservoir-modifying role of hydrothermal activity in the Bohai Bay Basin

YAN Yu<sup>1</sup>, LIU Quan-you<sup>1</sup>, LI Peng-peng<sup>1</sup>, GAO Yu<sup>1</sup>, LIU Jia-run<sup>1</sup>, ZHU Dong-ya<sup>2</sup> and JIN Zhi-jun<sup>1</sup>

(1. Energy Research Institute, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The Bohai Bay Basin is one of the important hydrocarbon-bearing basins in eastern China, and its complex reservoir-forming characteristics are closely related to modification by deep CO<sub>2</sub> injection and CO<sub>2</sub>-rich hydrothermal activity. A comprehensive analysis of the correlations among CO<sub>2</sub> content,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ , and  $R/R_a$  indicates that the CO<sub>2</sub> in the basin is primarily derived from CO<sub>2</sub> released by deep mantle-derived magmatic activity. Statistical analysis of CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusion data reveals a bimodal pattern in homogenization temperatures, suggesting that the study area reservoirs have undergone multiple episodes of hydrothermal modification. Additionally, this study summarizes various lines of evidence from petrology-mineralogy and geochemistry regarding the impact of hydrothermal activity on reservoirs. Petrological-mineralogical evidence includes typical hydrothermal minerals such as ankerite, pyrite, chlorite, and dawsonite. In regions like the Bozhong Depression, Jiyang Depression, calcite in reservoirs exhibits lower oxygen isotope values and positive Eu anomalies in rare earth elements, indicating a hydro-

收稿日期: 2024-12-25; 接受日期: 2025-11-21; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42141021)

作者简介: 晏宇(2000-), 男, 硕士研究生, 地质学(石油地质学)专业, E-mail: 2466614255@qq.com; 通讯作者: 刘全有(1975-), 男, 教授, 从事石油天然气地球化学方向的研究与教学, E-mail: liuqy@pku.edu.cn。

thermal origin. The modification of reservoirs by deep hydrothermal fluids shows significant spatial differences. Near areas of deep hydrothermal activity, CO<sub>2</sub>-rich hydrothermal fluids significantly improve reservoir porosity and permeability through dissolution and thermal baking effects, with the peak of dissolution-induced improvement occurring at the leading edge of hydrothermal activity. In contrast, in areas far from deep hydrothermal activity, precipitation and cementation of authigenic minerals (*e. g.*, dolomite, calcite, quartz) lead to reduced porosity and permeability.

**Key words:** Bohai Bay Basin; CO<sub>2</sub>-rich hydrothermal fluid; mantle-derived CO<sub>2</sub>; reservoir modification; mineral precipitation

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (42141021)

国内外多个盆地中存在深部来源 CO<sub>2</sub> 的聚集和深部富 CO<sub>2</sub> 热液流体的活动,例如美国二叠盆地 (Ballentine *et al.*, 2000)、中国东部一系列裂谷盆地 (松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地等)等 (戴金星等, 1994)。松辽盆地地区古龙凹陷地区,受热流体活动影响较强的储层中普遍 CO<sub>2</sub> 含量较高、碳酸盐胶结物含量较低、次生孔隙与页理缝/层理缝及纹层较发育,有利于形成良好储集层 (谈泽等, 2025)。苏北盆地黄桥地区富 CO<sub>2</sub> 流体对储层的改造作用表现为边溶蚀边沉淀的现象,富 CO<sub>2</sub> 流体作用下长石发生显著的溶蚀作用,形成丰富的次生溶蚀孔隙;溶蚀的同时,伴随有石英的次生加大和自生高岭石充填,并且在高 CO<sub>2</sub> 分压作用下形成了少量片钠铝石次生矿物。

渤海湾盆地受多期深大断裂、岩浆火山活动等深部地质作用的影响,深部 CO<sub>2</sub> 广泛产出。渤海湾盆地幔源无机二氧化碳气 (藏) 的分布与断裂具有密切的联系 (胡安文等, 2023), 由基底深大断裂垂向疏导至浅部的幔源 CO<sub>2</sub> 在浅部断裂中运移至有利圈闭处成藏,例如济阳坳陷、黄骅坳陷、渤中坳陷。在东营凹陷西部下古生界,富 CO<sub>2</sub> 热液流体的溶蚀作用形成了大量孔洞、微孔以及裂缝,显著改善了碳酸盐岩储层的物性,成为优质储层的典型代表 (侯中帅等, 2019; 曾溅辉, 2000)。莱州湾 W16 构造沙河街组较高的包裹体均一温度和镜质体反射率揭示了与火山活动相关的热事件,热事件促使深部富 CO<sub>2</sub> 热液活动,改善了凝灰质混积岩储层的物性;但改造效果不均,部分储层因热液矿物沉淀而物性降低,总体增强了储层非均质性 (杜晓峰等, 2024)。尽管针对渤海湾盆地深部 CO<sub>2</sub> 的活动及富 CO<sub>2</sub> 热液流体对储层影响已经得到学界和产业界的关注,但针对富 CO<sub>2</sub> 热液流体活动的证据及其对储层溶蚀改造特征和机理等缺少全面的梳理总结和系统的认识。

本文通过汇总统计渤海湾盆地不同地区的 CO<sub>2</sub> 含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  ( $R/R_a$ ), 深入分析了深部 CO<sub>2</sub> 的成因来源、通过收集统计储层中的热液相关特征矿物、方解石碳氧同位素、稀土元素等,明确了深部富 CO<sub>2</sub> 流体与储层围岩相互作用的岩石矿物学和地球化学证据;通过收集热液对储层物性的改造的相关数据,揭示了富 CO<sub>2</sub> 流体对储层溶蚀改造的机理。

## 1 地质背景

渤海湾盆地位于华北克拉通东部,西邻太行山隆起,东接鲁东隆起和辽东隆起,南靠鲁西隆起区,北为燕山褶皱带 (李三忠等, 2004, 2011; 张功成等, 2024) (图 1a)。渤海湾盆地构造复杂,划分为 7 个坳陷和 3 个隆起,其中冀中、黄骅、渤中、辽河、济阳和临清等 6 个坳陷为相对独立的重要油气勘探开发区 (张功成等, 2024)。渤海湾盆地受控于印支期、燕山期和喜山期的构造演化 (郭令智等, 1983; 池英柳等, 2000; 李三忠等, 2004)。燕山期构造横向上总体可分为 3 个构造带,西部为向西逆冲的薄皮逆冲带,中部为冲断-走滑带,东部为厚皮褶皱-冲断带,主体由两期挤压方向皆为 NW-SE 向的褶皱-逆冲变形形成 (王德英等, 2022; 高雁飞等, 2023)。喜山期构造运动以来受到大洋板块差异运动的影响,渤海湾地区下地幔发生上拱,沿 NW-SE 向流动 (侯贵廷等, 2001; 李三忠等, 2011; 胡志伟等, 2023), 并带动上地壳形成 NW-SE 向伸展,这种伸展作用控制了渤海湾盆地单断箕状的演化特征,主要形成古近系断陷湖盆。

在晚侏罗世-早白垩世 (燕山中期), 研究区火山活动频繁 (单玄龙等, 2023)。华北克拉通东缘渤海海域双峰式火山岩的出现,表明了大规模克拉通岩

石圈移除和克拉通破坏峰期大约在 115 Ma 之后结束(傅锚, 2023)。古近纪以来, 渤海湾盆地逐步迈入裂陷发育的初期阶段, 这一时期以强烈的构造火山活动为显著特征, 火山岩沿着盆地内的大型断裂带呈裂隙式广泛分布, 喜山期古近纪至第四纪火山活动有 5 期, 分别为孔店-沙四期、沙三期、沙二-东营期、馆陶期和第四纪(毛翔等, 2020)。火山活动通常发生在地壳板块交界处或热点地区, 由于岩浆的上升和喷发, 地下深处的高温高压环境被打破, 导

致岩浆中的挥发性组分(如 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 等)迅速释放, 在盆地油气藏中富集, 形成富 CO<sub>2</sub> 热液流体(刘全有等, 2019)。

在持续挤压隆升背景下, 渤海西部整体缺失三叠系沉积, 上古生界石炭-二叠系及至下古生界寒武-奥陶系遭受剥蚀, 与上覆中生界形成角度不整合(周立宏等, 2003)。渤海湾盆地地层可分为 4 大套(图 1b): 太古宇变质岩、古生界碳酸盐岩、中生界火山岩和碎屑岩以及新生界沉积岩(王蔚, 2023)。

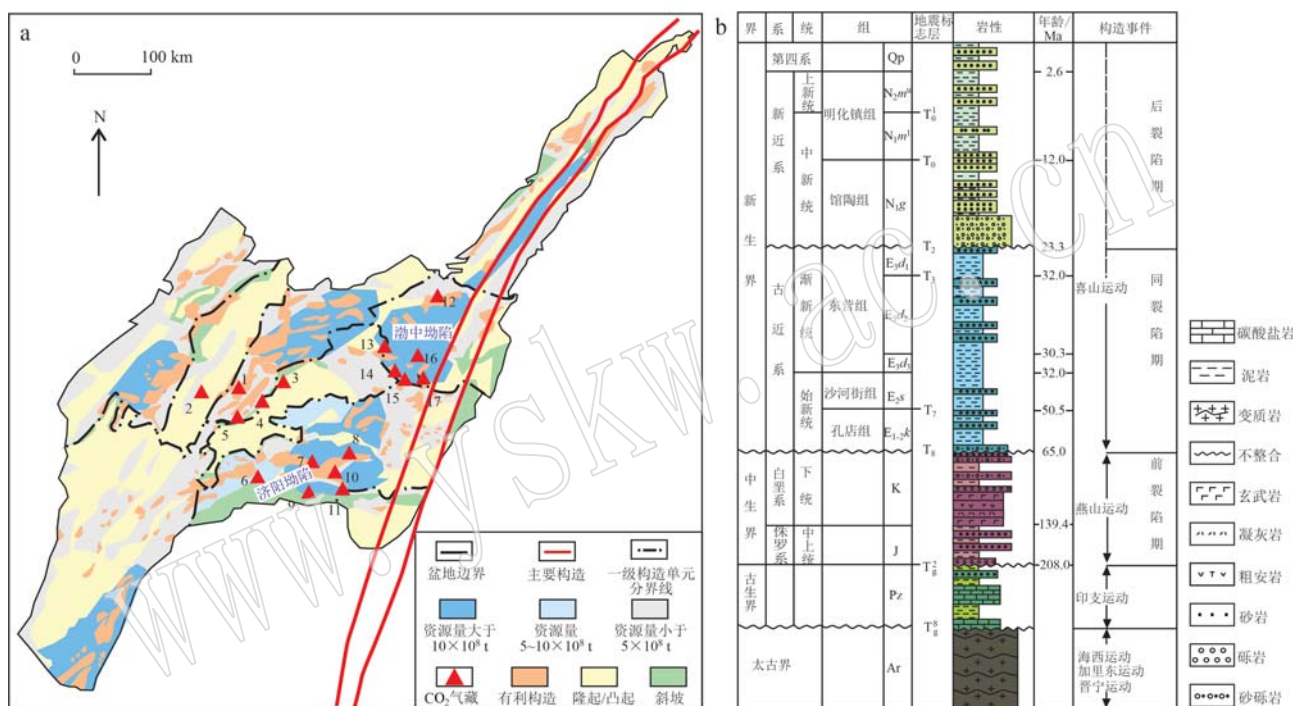


图 1 渤海湾盆地区域构造纲要图(a, 据赵斐宇等, 2017; Miao *et al.*, 2020; 张功成等, 2024)与地层柱状图(b, 据王蔚, 2023)

Fig. 1 Tectonic outline map of the Bohai Bay Basin (a, after Zhao Feiyu *et al.*, 2017; Miao *et al.*, 2020; Zhang Gongcheng *et al.*, 2024) and stratigraphic column (b, after Wang Wei, 2023)

## 2 热液流体来源与分布

### 2.1 渤海湾深部 CO<sub>2</sub> 的来源

渤海湾盆地内 CO<sub>2</sub> 气田主要沿郯庐断裂带分布, 产气层主要位于始新世沙河街组(赵斐宇等, 2017)。这些气田 CO<sub>2</sub> 含量主要在 79.17% ~ 98.16%, 属于 CO<sub>2</sub> 气田, 氦同位素值(<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He)为 2.00~3.62, 指示气体为幔源气(赵斐宇等, 2017)。

通常 CO<sub>2</sub> 分为有机成因和无机成因, 有机 CO<sub>2</sub> 是由有机物质热解产生的, 其碳同位素比值

( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ) 较轻, 通常低于 -10‰, 大多数情况下在 -30‰至-10‰的范围内。相反, 无机来源的 CO<sub>2</sub>, 例如通过变质作用或地幔脱气过程产生的 CO<sub>2</sub>(戴金星, 1993), 其同位素比值较大, 通常在 -8‰至+3‰的范围内。如果 CO<sub>2</sub> 来源于碳酸盐岩石发生的变质作用, 那么其  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值将接近碳酸盐岩的值, 即  $0 \pm 3\text{‰}$ 。而岩浆和地幔来源的 CO<sub>2</sub> 其  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值主要分布在  $(-6 \pm 2)\text{‰}$  范围内。从图 2a 中可以看出, 不同地区的 CO<sub>2</sub> 含量和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值分布不同, 这可能反映了它们在地质构造、沉积环境和油气生成过程中的差异(戴金星, 1993)。例如, 渤海湾盆地样品 CO<sub>2</sub>



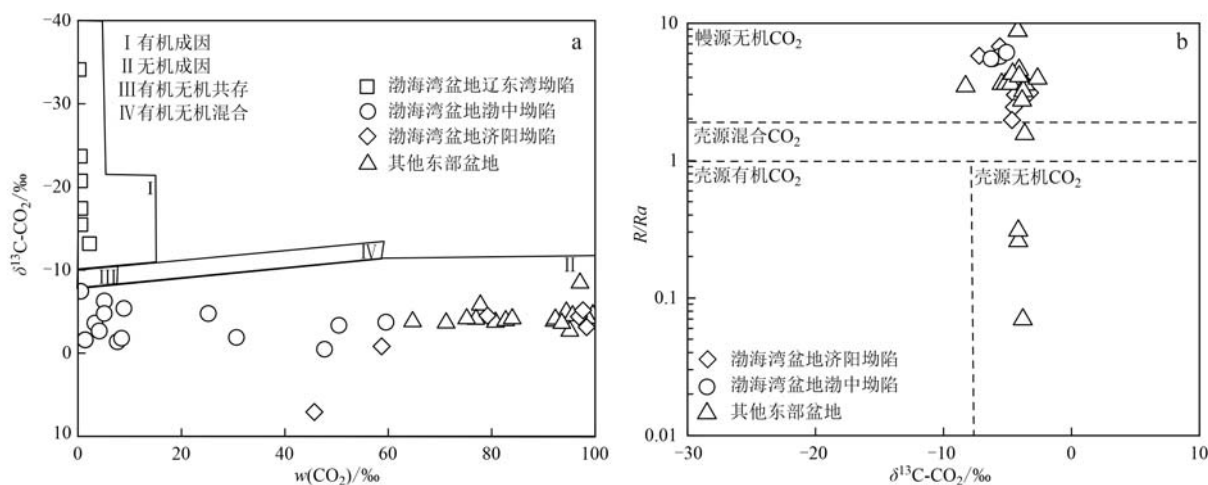


图2 渤海地区  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ - $\text{CO}_2$  含量图(a)和  $R/Ra$ - $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  图(b) (据戴金星等, 1994; 戴金星, 1995; 田立新等, 2013;

赵斐宇等, 2017; Miao *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020; 张藜等, 2021; 胡安文等, 2023; 朱士波, 2024)

Fig. 2 Diagrams of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ - $\text{CO}_2$  content (a) and  $R/Ra$ - $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  (b) of Bohai area (after Dai Jinxing *et al.*, 1994; Dai Jinxing, 1995; Tian Lixin *et al.*, 2013; Zhao Feiyu *et al.*, 2017; Miao *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020; Zhang Li *et al.*, 2021; Hu Anwen *et al.*, 2023; Zhu Shibo, 2024)

含量较高,最高的  $\text{CO}_2$  含量达 98.61% (戴金星等, 1994; 戴金星, 1995; 赵斐宇等, 2017),其中渤中坳陷  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值较高,为  $-3.77\text{‰}$ ,表明  $\text{CO}_2$  主要来源于无机成因(张藜等, 2021);辽东湾坳陷  $\text{CO}_2$  含量较低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值低,表明这些地区的  $\text{CO}_2$  主要为有机成因(Miao *et al.*, 2020)。

在研究  $\text{CO}_2$  的来源时,通过比较  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值 ( $R/Ra$ ) 与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值可以进一步来区分其成因。 $R/Ra$  值是判断  $\text{CO}_2$  来源的关键指标之一(戴金星等, 1994; 戴金星, 1995),高比值通常指示  $\text{CO}_2$  来源于地幔,而低比值则可能来自地壳。地壳中的  $\text{CO}_2$ ,无论是无机还是有机成因,其  $R/Ra$  值通常小于 0.1,这是因为地壳中的  $^4\text{He}$  主要来源于放射性衰变,而  $^3\text{He}$  的贡献相对较小。渤海湾盆地  $R/Ra$  值大于 2,表明受地幔释放的  $\text{CO}_2$  影响显著。在对东部盆地的  $\text{CO}_2$  来源进行分析时,发现除了莺歌海盆地的  $\text{CO}_2$  显示出壳源无机  $\text{CO}_2$  的特征外,其他盆地的  $\text{CO}_2$  均表现为幔源无机  $\text{CO}_2$ 。特别是渤海湾盆地的渤中坳陷和济阳坳陷含  $\text{CO}_2$  天然气的  $R/Ra$  值大于 2(图 2b),表明渤海湾盆地无机  $\text{CO}_2$  为火山地幔来源。

## 2.2 $\text{CO}_2$ 充注过程

富  $\text{CO}_2$  流体注入储层时,会形成以  $\text{CO}_2$  为主的多相热流体环境。深部断裂活动和火山作用对无机

$\text{CO}_2$  的充注过程具有关键影响,结合基底断层活动分析与流体包裹体的岩石学特征,揭示了地幔来源  $\text{CO}_2$  的充注历史及其对储层演化的影响(Miao *et al.*, 2020; Cui *et al.*, 2024)。在渤中地区,晚期断裂活动为  $\text{CO}_2$  迁移提供了关键通道,断裂带中自生石英中发现的  $\text{CO}_2$  包裹体为这一过程提供了直接证据(Wang T *et al.*, 2024)。

在渤中坳陷的 QHD29-2 构造中发现了两种典型的含  $\text{CO}_2$  流体包裹体(图 3a、3b):纯  $\text{CO}_2$  气体包裹体(类型 A)和  $\text{CH}_4$ - $\text{CO}_2$  混合包裹体(类型 B)。类型 A 为单相气态  $\text{CO}_2$ ,呈球形或椭圆形,直径 4~14  $\mu\text{m}$ ;类型 B 为气液混合包裹体,包含  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  及少量液态  $\text{H}_2\text{O}$ ,气液比例约为 2%~7%,形态多样,直径 2~32  $\mu\text{m}$ (Miao *et al.*, 2020)。通过分析含水包裹体的均一化温度,发现至少存在两个阶段的热液活动。QHD29-2 构造的均一温度在 95~110℃和 120~135℃之间(图 3e),表明沙河街组储层的第一、二段  $\text{CO}_2$  活动始于约 200 万年前并持续至今(Miao *et al.*, 2020),BZ19-6 构造的均一温度在 120~210℃之间(图 3f),都显示了晚期的富  $\text{CO}_2$  热液流体的活动。

莱州湾 W16-2 井 936.0~989.5 m 深度段的储层砂岩中存在丰富的流体包裹体,主要包括气液两相盐水包裹体和气液两相烃类包裹体(杜晓峰等, 2024)。通过显微测温分析,发现储层中的盐水包裹



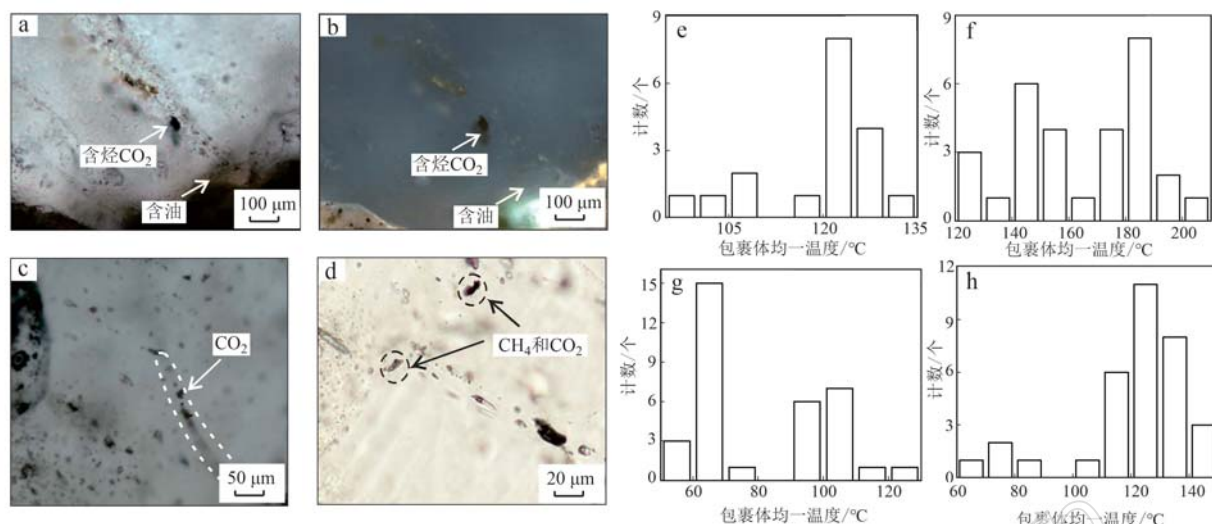


图3 渤海湾盆地储层中含烃CO<sub>2</sub>流体包裹体特征(a~d)及均一温度特征(e~h)(据 Miao *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2021; 张黎等, 2021; 杜晓峰等, 2024)

Fig. 3 Characteristics of hydrocarbon-bearing CO<sub>2</sub> fluid inclusions (a~d) and their homogenization temperatures (e~h) in the Bohai Bay Basin reservoirs (after Miao *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2021; Zhang Li *et al.*, 2021; Du Xiaofeng *et al.*, 2024)

a、b、c、d—渤海湾盆地 QHD29-2 储层含烃 CO<sub>2</sub> 流体包裹体特征; e—QHD29-2 流体包裹体均一温度直方图; f—BZ19-6 流体包裹体均一温度直方图; g—莱州湾凹陷 W16-2 井流体包裹体均一温度直方图; h—渤南洼陷流体包裹体均一温度直方图

a, b, c, d—photomicrographs of hydrocarbon-bearing CO<sub>2</sub> fluid inclusions in the QHD29-2 reservoir, Bohai Bay Basin; e—homogenization-temperature histogram of fluid inclusions from QHD29-2; f—homogenization-temperature histogram of fluid inclusions from BZ19-6; g—homogenization-temperature histogram of fluid inclusions from Well W16-2, Laizhouwan Sag; h—homogenization-temperature histogram of fluid inclusions from the Bonan Sag

体均一温度主要分布在两个温度区间: 55~75℃ 和 90~125℃ (图 3h)。后者的温度区间远高于该地区地质历史上记录的最高地温, 这表明 W16 构造区域至少经历了一次热液流体事件。这一发现不仅为理解储层中热流体活动及其与储层演化的联系提供了关键证据, 而且突显了热液流体充注在储层形成和演化过程中的重要作用。

在济阳坳陷的渤南洼陷沙河街组砂岩储层中的白云石-铁白云石胶结物和方解石胶结物中的流体包裹体揭示了热液流体的多阶段演化特征 (Ma *et al.*, 2021)。含烃包裹体的均一温度分别为 67.0~83.5℃ 和 104.5~113.8℃, 而两相盐水包裹体的均一温度更高 (图 3e), 分别为 117.8~131.8℃ 和 126.7~148.8℃ (图 3g), 还检测到含 CH<sub>4</sub> 的盐水包裹体 (其均一温度为 124.6℃)。这些研究表明, 济阳坳陷和渤中坳陷区域的热液活动与 CO<sub>2</sub> 和烃类流体的充注密切相关, 伴随深部热液与烃类的混合作用, 不但显著影响了储层, 也影响了成藏过程。通过分析流体包裹体的相态及分布规律, 进一步确认了地幔来源 CO<sub>2</sub> 和烃类气体的同步充注过程, 为深部热

液与储层耦合机制提供了重要依据。

渤中坳陷的 QHD29-2 构造、BZ19-6 构造、济阳坳陷的渤南洼陷、莱州湾凹陷的 W16-2 井的流体包裹体均一温度统计直方图均呈现“双峰型”分布, 这一特征表明研究区储层经历了多期热液充注过程。低温峰值区间通常代表了早期的热液充注或低温流体注入, 而高温峰值区间则反映了晚期的热液活动, 可能与深部流体的迁移和热液作用相关 (Lei *et al.*, 2025)。

### 3 热液作用证据

#### 3.1 矿物学证据

在渤海湾盆地, 热液流体的强烈化学活动性导致其与围岩反应, 形成热液矿物, 并且随着温压条件的变化, 这些矿物也可以直接从溶液中沉淀形成。本研究通过文献调研, 在研究区内识别出多种热液矿物及其组合类型, 包括铁白云石、黄铁矿和绿泥石等, 这些矿物的形成和变化记录了热液流体的化学特征, 影响储层结构和性能。

铁白云石：铁白云石通常形成于与中低温热液流体有关的流体-岩石相互作用中 (Yang *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2021)。这些热液流体可能携带大量的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  离子, 热液流体在运移过程中与所经断裂/裂缝中的绿泥石、白云

石反应如公式(1),  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  在碳酸化条件下共同沉淀, 形成铁白云石, 形成铁白云石的温度范围通常在 100℃ 到 300℃ 之间, 热液脉矿床 (如 Pb-Zn 矿床) 中常见铁白云石与多种类型其他矿物 (如方解石、白云石、石英等) 共生 (图 4a、4c、4e)。

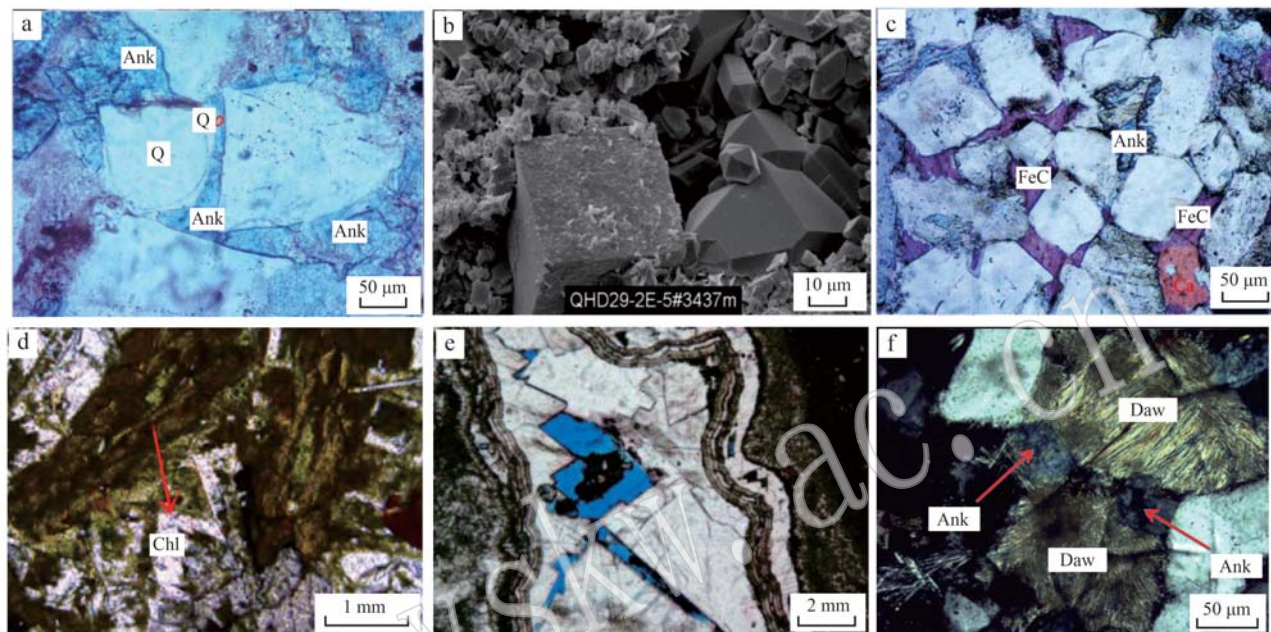


图 4 渤海湾盆地储层中典型热液矿物特征 (据 Li and Li, 2017; Yang *et al.*, 2020; 张藜等, 2021; 胡安文等, 2023; Li *et al.*, 2024)

Fig. 4 Typical hydrothermal mineral characteristics in the Bohai Bay Basin reservoirs (after Li and Li, 2017; Yang *et al.*, 2020; Zhang Li *et al.*, 2021; Hu Anwen *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024)

a—Shang 850 井, 2 997.60 m, 孔隙充填铁白云石 (正交偏光); b—QHD29-2 井, 3 437 m, 热液黄铁矿扫描电镜照片; c—Shang 547 井, 3 344.09 m, 孔隙充填方解石、铁方解石、铁白云石 (正交偏光); d—Chun102 井, 2 399 m, 火山矿物绿泥石化; e—渤中 21/22-A 井, 古生界潜山, 4 408.6 m, 鞍形白云岩; f—Bin 52, 1 498.2 m, 铁白云石部分替代片钠铝石; Q—石英; Ank—铁白云石; FeC—铁方解石; Chl—绿泥石; Daw—偏钠铝石

a—pore-filling ferroan dolomite crystals, well Shang 850, 2 997.60 m (cross-polarized light); b—hydrothermal pyrite aggregates, well QHD29-2, 3 437 m (SEM image); c—pore-filling calcite, ferroan calcite and ferroan dolomite, well Shang 547, 3 344.09 m (cross-polarized light); d—chloritized volcanic detritus, well Chun 102, 2 399 m; e—saddle dolomite, well Bozhong 21/22-A, Paleozoic Buried-hill section, 4 408.6 m; f—ferroan dolomite partially replacing dawsonite, well Bin 52, 1 498.2 m; Q—quartz; Ank—ankerite (ferroan dolomite); FeC—ferroan calcite; Chl—chlorite; Daw—dawsonite

$\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$  (含铁绿泥石) +  $2\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  +  $\text{SiO}_2$  +  $2\text{Ca}^{2+}$  +  $4\text{CO}_2$  +  $2\text{H}_2\text{O}$  =  $4\text{Ca}(\text{Fe}_{0.5}\text{Mg}_{0.5})(\text{CO}_3)_2$  (铁白云石) +  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  (高岭石) +  $4\text{H}^+$  (1)

黄铁矿：黄铁矿在热液条件下广泛形成, 尤其在中低温热液系统中自生黄铁矿较为常见 (Cheng *et al.*, 2024; Falkenberg *et al.*, 2024; Yao *et al.*, 2024)。热液流体携带  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{HS}^-$  或  $\text{S}^{2-}$ , 当流体温度和压力适当降低时,  $\text{Fe}^{2+}$  和硫离子结合形成黄铁矿 (2), 自形黄铁矿通常在 150~300℃ 的温度和适当的压力下形成, 这些条件有助于晶体形态的良好发育

(图 4b)。

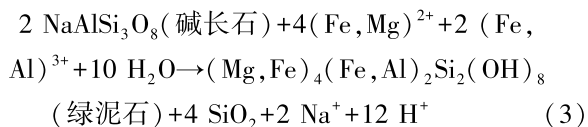
$1.75\text{H}_2\text{S} + 0.25\text{SO}_4^{2-} + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{FeS}_2$  (黄铁矿) +

$\text{H}_2\text{O} + 1.5\text{H}^+$  (2)

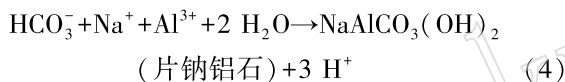
绿泥石：绿泥石是一种常见的蚀变矿物, 其热液成因主要涉及低至中温的热液流体与围岩的相互作用。热液成因的绿泥石在多种矿床中广泛存在, 尤其是与中低温热液矿床和蚀变带有关。热液流体中的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与围岩相互作用, 导致围岩中的碱性长石的蚀变如 (3), 生成针叶状绿泥石, 蚀变作用通



常发生在热液脉周围或热液活动强烈的区域(图4d)。



片钠铝石[NaAlCO<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>]与白云石组合是富含CO<sub>2</sub>热流体与富长石或岩屑砂岩相互作用后常见的热液矿物组合类型(Li and Li, 2017)。CO<sub>2</sub>与铝硅酸盐矿物反应后,导致孔隙水中富含Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等离子,并促进白云石的沉淀。在高CO<sub>2</sub>分压环境中,富CO<sub>2</sub>热流体与长石作用形成片钠铝石。片钠铝石通常呈现杂乱毛发状、束状、菊花状和放射状,常与颗粒或杂基交代(图4f)。该热液矿物组合在渤海湾盆地,特别是在东营凹陷北部胜北断裂带和西部高青-平南断层附近的钻井中有明显的发育(Li et al., 2017)。



### 3.2 碳氧同位素证据

渤海湾盆地的热液流体对储层岩石中的长石、碳酸盐胶结物等矿物产生显著的蚀变。深部热流体侵入地层时,会导致地层温度升高,进而增强氧同位素的热力学分馏作用。这一过程会导致从热液流体中沉淀出来的方解石具有较低的δ<sup>18</sup>O值,通常小于-10‰。相对地,那些未受热液流体影响的方解石则具有大于-10‰的δ<sup>18</sup>O值。

在图5中,可以看到不同地区 and 不同成因的方解石在δ<sup>18</sup>O和δ<sup>13</sup>C值上的分布差异。渤中坳陷(渤中凹陷)、济阳坳陷(渤南洼陷、临南洼陷、东营凹陷): 这些数据点可能代表了热液成因的方解石。热液成因通常与深部热液流体活动有关,这些流体在上升过程中与地层中的岩石发生相互作用,导致方解石的沉淀(朱东亚等, 2012)。热液流体通常具有高温和高盐度的特征,这些条件有利于热液方解石的形成,并且可能导致方解石具有较低的δ<sup>18</sup>O值(小于-10‰)和负的δ<sup>13</sup>C值。

渤中坳陷、济阳坳陷的数据点可能代表了有机还原成因的方解石。有机活动形成的CO<sub>2</sub>及相关的方解石通常产生较轻的碳同位素δ<sup>13</sup>C(刘全有等, 2009a)。代表性的反应过程为热化学硫酸盐还原作用(TSR)如式(5)(刘全有等, 2009b)或有机酸脱羧作用(Ye et al., 2024)。

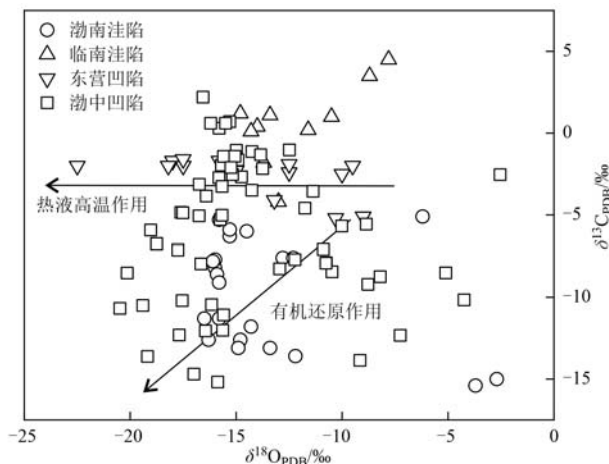


图5 渤海湾盆地储层方解石碳氧同位素比值(据李继岩等, 2016; 侯中帅等, 2019; Yang et al., 2020; 张黎等, 2021; 朱士波, 2024; Ye et al., 2024; Xu et al., 2024)

Fig. 5 Carbon and oxygen isotopic ratios of calcite cements in reservoir rocks of the Bohai Bay Basin (after Li Jiyan et al., 2016; Hou Zhongshuai et al., 2019; Yang et al., 2020; Zhang Li et al., 2021; Zhu Shibo, 2024; Ye et al., 2024; Xu et al., 2024)



### 3.3 稀土元素证据

热液流体的作用会导致微量元素Eu出现正异常(Wang W Z et al., 2024)。在济阳坳陷的临南洼陷的研究中,通过储层中的铁白云石稀土元素配分曲线(图6a)分析发现,从Xia 601井和Shang 850井到Shang 548井,稀土元素和微量元素的含量逐渐降低(Yang et al., 2020)。铁白云石的REE的分布在与后前寒武纪澳大利亚页岩(PAAS)标准化后,显示出明显的Eu正异常。

在东营凹陷的研究中,通过对下古生界奥陶系中七块脉体发育的碳酸盐岩样品进行稀土元素分析(侯中帅等, 2019),揭示了该区域稀土元素的特征(图6b)。研究表明,样品的稀土元素质量分数较低,范围从 $13.29 \times 10^{-6}$ 到 $33.55 \times 10^{-6}$ ,平均为 $20.58 \times 10^{-6}$ 。稀土元素分配曲线普遍呈右倾特征,表现出轻稀土元素的富集和重稀土元素的亏损。根据稀土元素的分配曲线, Eu异常将样品分为2组: 第1组表现出明显的Eu负异常(δEu值小于1), 第2组表现为明显的Eu正异常(δEu值大于1)。Eu的正异常是由于样品与含Eu<sup>2+</sup>的流体发生水岩作用有关。在常规条件下, Eu以Eu<sup>3+</sup>存在,但在极端还原和中碱性流体条件下, Eu<sup>3+</sup>可以还原为Eu<sup>2+</sup>(侯中



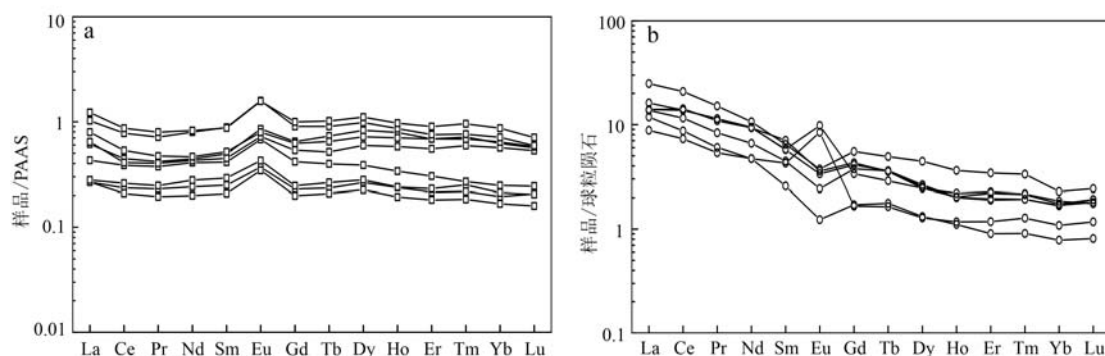


图6 临南洼陷铁白云石(a, 据侯中帅等, 2019; PAAS标准据 Anders and Grevesse, 1989)和东营凹陷灰岩(b, Yang *et al.*, 2020; 球粒陨石标准据 McLennan, 2001)稀土元素配分曲线

Fig. 6 Distribution of the rare earth elements and trace elements in ankerite from the Linnan Sag (a, modified from Hou Zhongshuai *et al.*, 2019; PAAS standard after Anders and Grevesse, 1989) and limestone from the Dongying Sag (b, modified from Yang *et al.*, 2020; chondrite standard after McLennan, 2001)

帅等, 2019)。

综上所述,渤海湾盆地的临南洼陷及东营凹陷地区的研究表明,热液流体的活动常导致Eu的正异常,这一现象与热液流体与岩石的水岩作用及流体的还原环境密切相关。

## 4 深部热液对储层改造作用

### 4.1 深部热液溶蚀作用

在盆地裂陷阶段,盆地内的岩浆活动十分活跃,伴随的热液流体活动沿着活动的张性断裂和基岩不整合面发生了广泛的垂向运移(Maciell *et al.*, 2024),进而进入储层并引发强烈的热液蚀变。特别是在富含碳酸盐储层中,热液流体的溶蚀作用显著改善了储层的物性(朱东亚等, 2015; 杜晓峰等, 2024)。在上部和断裂远端的储层中,反应生成的大量 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 迁移至此,形成铁白云石、黄铁矿、绿泥石、片钠铝石等热液矿物堵塞孔隙(Menezes *et al.*, 2019),导致储层物性进一步降低。

在莱州湾凹陷W16构造的研究证实了这一点,硅化砂岩下方的凝灰质砾岩和中生界的凝灰岩、火山角砾岩等岩石,物性表现出显著差异,孔隙度从5%到35%不等,显示出强烈的非均质性(图7a)。该现象表明,深部热液流体的上涌溶蚀作用不仅改善了凝灰质砾岩的局部物性,还在向上迁移过程中沉淀了硅质(Fox-Powell *et al.*, 2018; Bezerra *et al.*, 2021; palhano *et al.*, 2023),导致细砂岩中的硅化作用更为强烈,极大降低了储层的物性。

在岐口凹陷的研究也表明随着距离侵入体距离的增加,储层物性在逐渐变差,即侵入体对储层物性起到了改善的作用(于志超等, 2012)。随着距离侵入体的增加,孔隙度从20%迅速下降至约15%,渗透率从 $25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降至 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图7b),其原因在于,侵入体脱气释放的 $\text{CO}_2$ 进入储层砂岩后,一方面溶蚀溶解长石、石英等骨架碎屑颗粒形成次生孔隙;另一方面,生成的碳酸盐矿物会抑制压实作用及石英次生加大。

### 4.2 深部热液烘烤作用

对渤海湾盆地(南堡凹陷、廊固凹陷)及邻区苏北盆地(溱潼凹陷、高邮凹陷)侵入体与接触变质带储层分布统计研究表明,热液烘烤作用对储层改造具有关键作用(李文科等, 2024)。这种作用不仅改变了储层的孔隙度,还促进了岩石中裂缝的形成,从而显著提升了储层的渗透性(Xu *et al.*, 2024)。特别是在侵入体附近的区域,由于岩浆温度较高,热液对储层的改造作用更为显著,裂缝的发展也更有利于变质带储层的形成。随着岩浆从通道向外扩散,温度逐渐降低,热液对储层的影响也随之减弱,导致变质带的厚度减小。在侵入接触变质系统中,深部热液烘烤作用的影响是显著的。例如,侵入体的辉绿岩储集空间通常较差,孔隙度较低,如廊固凹陷和南堡凹陷的辉绿岩岩心孔隙度分别为5.1%和3.5%(李文科等, 2024),它们通常作为隔层存在。在烘烤变质作用影响下,粉砂岩和泥岩的孔隙度明显提高,变质后的粉砂岩孔隙度可达11.5%以上,渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (李文科等, 2024)。

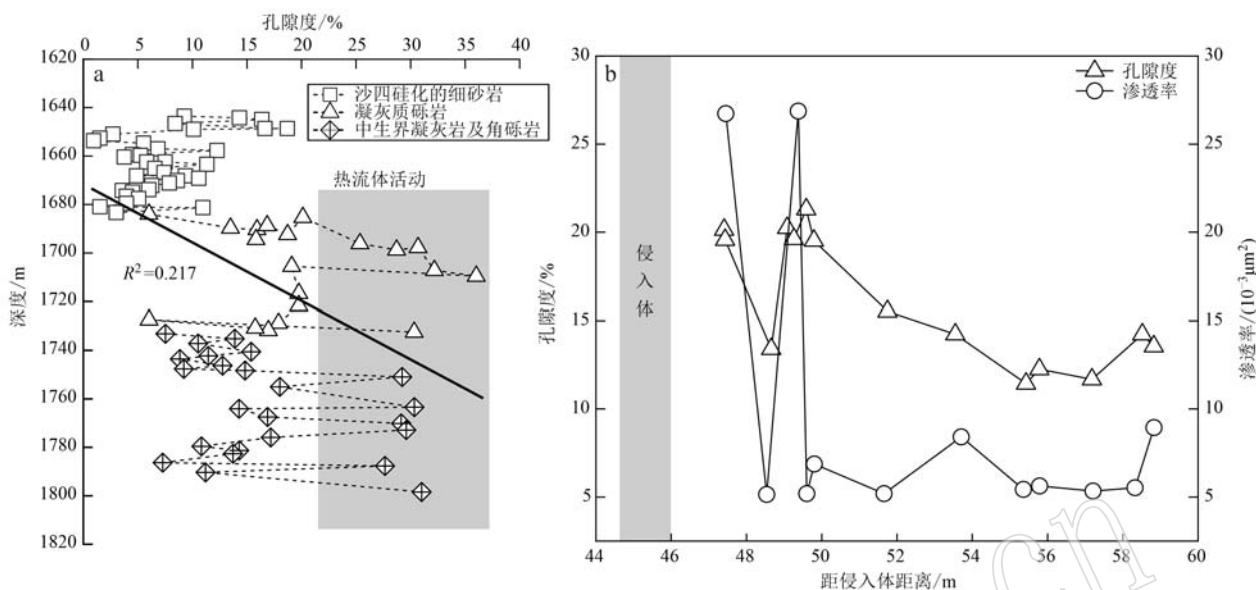


图7 W16-7井沙四段硅质砂岩和凝灰质砾岩以及中生界凝灰岩和火山角砾岩的实测孔隙度(a)和侵入体对储层影响综合对比图(b)(据于志超等, 2012; 杜晓峰等, 2024)

Fig. 7 Measured porosity of E<sub>3s4</sub> siliceous sandstone and tuffaceous conglomerate, as well as Mesozoic tuff and volcanic breccia, in well W16-7(a) and comprehensive comparison of intrusive-body effects on reservoir quality (b) (after Yu Zhichao *et al.*, 2012; Du Xiaofeng *et al.*, 2024)

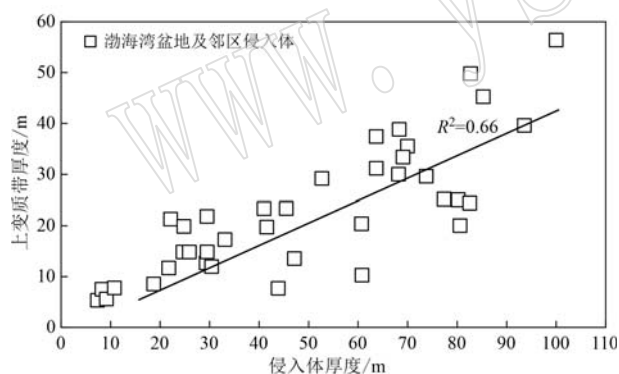


图8 渤海湾盆地及邻区侵入体厚度与上变质带厚度关系图(据李文科等, 2024)

Fig. 8 Relationship diagram of intrusive body thickness and upper metamorphic zone thickness in the Bohai Bay Basin and adjacent areas (after Li Wenke *et al.*, 2024)

侵入体的烘烤作用主要取决于其体积、与周围岩石的间隔以及与岩浆通道的邻近性。侵入体释放的热液流体通过加热周围的岩石,引起变质带内储层的显著变化。具体而言,侵入体的厚度越大(图8),其烘烤效应越显著,变质带的发展也越成熟。当侵入体的厚度超过30 m时,其烘烤效应尤为突出,对储层进行深度改造,使其成为油气勘探的潜在有利区域。对于厚度介于10~30 m的侵入体,热液烘

烤作用相对较弱,对储层的改造作用有限。而当侵入体的厚度小于10 m时,烘烤效应对储层的影响几乎可以忽略不计。

### 4.3 深部热液作用模式

渤海湾盆地中深部CO<sub>2</sub>主要是来自地幔,地幔来源的CO<sub>2</sub>与岩石圈的构造活动密切相关,特别是渤中坳陷的地幔发生隆起,莫霍面深度小于30 km,是地幔CO<sub>2</sub>的主要分布区域(Miao *et al.*, 2020)。这一现象与软流圈内部的流动和热地幔物质的上涌紧密相连,促使地幔中的CO<sub>2</sub>释放到岩浆系统中。研究显示,华北克拉通下方存在地幔对流作用,这些对流作用导致地幔物质上升并释放热液CO<sub>2</sub>。

CO<sub>2</sub>的迁移路径主要受深层构造和断层活动的影响。在渤中地区,地幔流动导致热地幔物质的上涌,并通过郯庐断裂带及张家口-蓬莱断裂带的岩浆系统上升,大量CO<sub>2</sub>从岩浆中脱气并沿着岩石圈尺度的断层带迁移至上地壳(图9a),或者通过低速带内的拆离断层传输,再由活跃的基底断层进一步输送(Miao *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2024)。

深部富CO<sub>2</sub>热液流体经由深大断裂带、盆地基

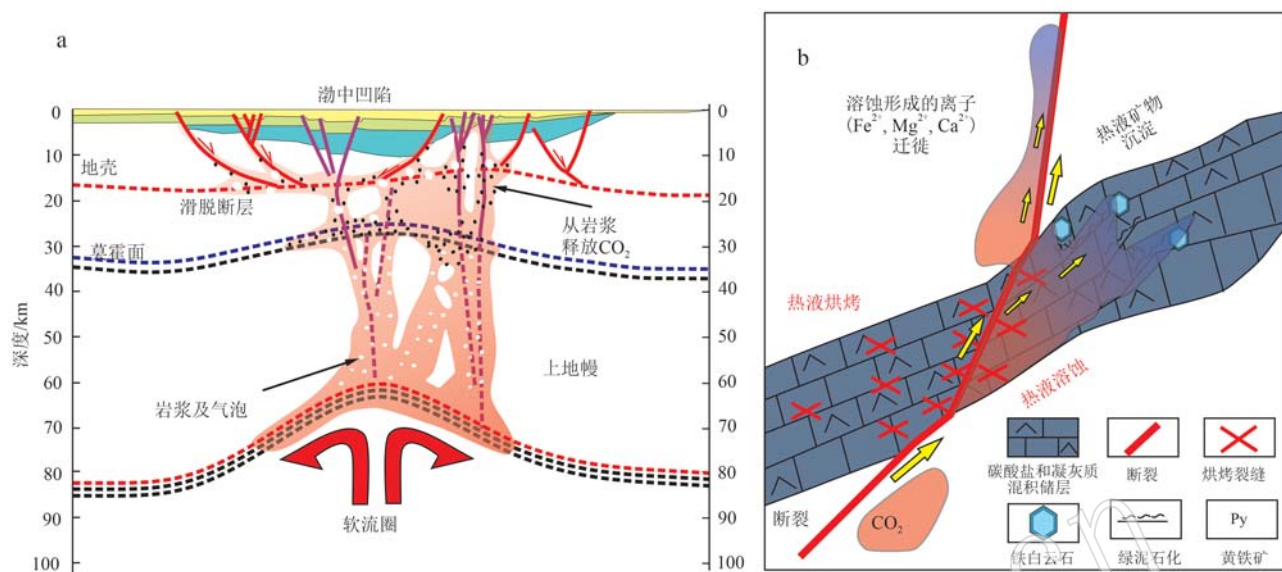


图9 深部构造背景下幔源CO<sub>2</sub>形成的剖面模型(a)和热液对储层的改造机制模式(b) (据 Miao *et al.*, 2020; 杜晓峰等, 2024)

Fig. 9 Profile model of mantle-derived CO<sub>2</sub> formation in deep tectonic settings (a) and conceptual model of hydrothermal alteration of reservoir quality (b) (after Miao *et al.*, 2020; Du Xiaofeng *et al.*, 2024)

底断裂及盆内不整合面等通道体系广泛向浅部储层运移(Miao *et al.*, 2020)。富CO<sub>2</sub>热液通过溶蚀作用增强储层的孔隙度和渗透性(杜晓峰等, 2024); 通过热液烘烤作用促进岩石脆性增加和裂缝发育(李文科等, 2024)。

深部热液溶蚀-烘烤双重作用机制通过次生孔隙再造与裂隙网络优化, 最终导致储层孔隙度和渗透率发生显著改变。随着热液活动强度的降低、温度压力的降低及CO<sub>2</sub>含量的降低, 逐渐会形成自生白云石、方解石、石英等矿物的沉淀胶结, 使储层物性有所降低。因此深部热液改造强度在热液活动前锋带达到峰值(图9b)。

## 5 结论

(1) 渤海湾盆地CO<sub>2</sub>来源分为两组,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值-8‰至2‰的无机来源主要集中在济阳坳陷和渤中坳陷, 另一组的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值位于-34‰至-12‰, 主要在辽东湾坳陷分布, 为有机来源。济阳坳陷和渤中坳陷的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值(*R/Ra*) 普遍大于2, 也证实其CO<sub>2</sub>为岩浆活动释放的地幔来源。

(2) 储层中孔隙和裂缝中充填有铁白云石、自形黄铁矿、石英、方解石、绿泥石等特征矿物支持深部热液流体作用, 热液流体的较高温度导致在储层

中沉淀的方解石 $\delta^{18}\text{O}$  值小于-10‰, 稀土元素出现 $\delta\text{Eu}$  正异常的特征。储层中的流体包裹体均一温度呈现“双峰型”, 表明了地层受到了多次深部热液流体活动的影响。

(3) 渤海湾盆地中深部热液流体活动通过断裂带进入储层, 显著改变了储层的矿物组成和孔隙结构, 靠近富CO<sub>2</sub>热液流体的储层被溶蚀和高温烘烤改善了物性, 远离富CO<sub>2</sub>热液流体的储层由于热液矿物沉淀导致储层物性下降。

## References

- Anders E and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements; Meteoritic and solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 197~214.
- Ballentine C J, Schoell M, Coleman D, *et al.* 2000. Magmatic CO<sub>2</sub> in natural gases in the Permian Basin, West Texas: Identifying the regional source and filling history[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 69~70: 59~63.
- Bezerra F H, Balsamo F, Corsi G, *et al.* 2021. Hydrothermal silicification in the intraplate Samambaia seismogenic fault, Brazil: Implications for fault loss of cohesion and healing in rifted crust[J]. *Tectonophysics*, 815: 229002.



- Cheng X H, Ling M X, Li X J, *et al.* 2024. Chlorite, quartz and pyrite trace element behavior during Cu mineralization in the Hongshi deposit, NW China: Implications for hydrothermal fluid evolution and ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 169: 106100.
- Chi Yingliu and Zhao Wenzhi. 2000. Strike-slip deformation during the Cenozoic and its influence on hydrocarbon accumulation in the Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 21(2): 14~20 (in Chinese with English abstract).
- Cui G S, Bao Z W, Li Q, *et al.* 2024. Origin of hydrothermal dolomitization in the Huize Zn-Pb ore district, SW China: Insights from in situ U-Pb dating, fluid inclusion, and C-O-Sr-Mg isotope analyses[J]. *Ore Geology Reviews*, 173: 106250.
- Dai Jinxing. 1993. Carbon and hydrogen isotope characteristics of natural gas and identification of various types of natural gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2(Z1): 1~40 (in Chinese).
- Dai Jinxing. 1995. Abiogenic gas in oil-gas bearing basins in China and its reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 15(3): 22~27, 106 (in Chinese with English abstract).
- Dai Jinxing, Song Yan, Hong Feng, *et al.* 1994. Inorganic carbon dioxide gas reservoirs and their characteristics in east past China[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 8(4): 3~10 (in Chinese with English abstract).
- Du Xiaofeng, Zhang Shangfeng, Guan Dayong, *et al.* 2024. Effect of thermal fluid activity on reservoirs in W16 structure of Laizhou Bay Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 49(10): 3 459~3 470 (in Chinese with English abstract).
- Falkenberg J J, Keith M, Haase K M, *et al.* 2024. Pyrite trace element proxies for magmatic volatile influx in submarine subduction-related hydrothermal systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 373: 52~67.
- Fox-Powell M G, Channing A, Applin D, *et al.* 2018. Cryogenic silicification of microorganisms in hydrothermal fluids[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 498: 1~8.
- Fu Mao. 2023. The Genesis, Distribution, and Tectonic Processes of Buried Volcanoes in the Late Mesozoic Around the Bozhong Depression, Bohai Bay Basin [D]. Changchun: Jilin University (in Chinese).
- Gao Yanfei, Wang Deying, Yang Haifeng, *et al.* 2023. Classification and its differential reservoir control effects of structural transition zone in the southeastern Bohai sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 35(6): 23~34 (in Chinese with English abstract).
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen and Ma Ruishi. 1983. Formation and evolution of active continental margins and island arcs in the Western Pacific during the Mesozoic and Cenozoic[J]. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 11~21 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Qian Xianglin and Cai Dongsheng. 2001. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic Time[J]. *Peking University Journal (Natural Science Edition)*, 37(6): 845~851 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zhongshuai, Chen Shiyue, Liu Huimin, *et al.* 2019. Hydrothermal fluid activity and its hydrocarbon geological significance in Dongying depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 48(5): 1 090~1 101 (in Chinese with English abstract).
- Hu Anwen, Wang Feilong, Wang Guangyuan, *et al.* 2023. The origin of CO<sub>2</sub>, and its influence on oil and gas accumulation in Bozhong 21-22 structure in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 34(12): 2 151~2 159 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zhiwei, Lü Dingyou, Wang Deying, *et al.* 2023. Deformation characteristics of critical tectonic periods during pre-Cenozoic and significance of buried hill hydrocarbon accumulation in the Bohai sea area [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 35(1): 50~62 (in Chinese with English abstract).
- Lei W Z, Chen D X, Cheng M, *et al.* 2025. Combined use of petroleum inclusion analysis, PVT simulation, and basin modeling for reconstruction of deep fluid phase evolution in condensate gas reservoirs [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 171: 107210.
- Li C M, Zeng J H, Wang M Y, *et al.* 2024. Influence of magmatic intrusion on abnormal hydrocarbon generation and expulsion of source rock: A case study of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, 98(5): 1 322~1 337.
- Li F L and Li W S. 2017. Petrological record of CO<sub>2</sub> influx in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin, NE China[J]. *Applied Geochemistry*, 84: 373~386.
- Li Jiyan, Wang Yongshi, Liu Chuanhu, *et al.* 2016. Hydrothermal fluid activity and the quantitative evaluation of its impact on carbonate reservoirs: A case study of the Lower Paleozoic in the west of Dongying sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(3): 359~366 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Liu Jianzhong, Zhao Guochun, *et al.* 2004. Key geochronology of Mesozoic deformation in the eastern block of the North Chi-

- na Craton and its constraints on regional tectonics: A case of Jiaodong and Liaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 633~646 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Zhang Guowei, Zhou Lihong, *et al.* 2011. The opposite Meso-Cenozoic intracontinental deformations under the super-convergence: Rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 79~107 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenke, Wu Xiaozhou, Li Yandong, *et al.* 2024. Igneous intrusion contact metamorphic system and its reservoir characteristics: A case study of Paleogene Shahejie Formation in Nanpu sag of Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(2): 285~298 (in Chinese with English abstract).
- Liu C Y, Li H Y, Shan X L, *et al.* 2023. Development mechanism of metamorphic fractured reservoirs in the Bozhong area, Bohai Bay Basin: Implications from tectonic and magmatic hydrothermal activities [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 229: 212030.
- Liu Quanyu, Dai Jinxing, Jin Zhijun, *et al.* 2009a. Geochemistry and genesis of natural gas in the foreland and platform of the Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 107~114 (in Chinese with English abstract).
- Liu Quanyu, Jin Zhijun, Gao Bo, *et al.* 2009b. Origin of sour gas in the Northeastern Sichuan Basin and fate action of thermochemical sulfate reduction (TSR) to Natural Gas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 195~202 (in Chinese with English abstract).
- Liu Quanyu, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, *et al.* 2019. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction[J]. *Science China Earth Sciences*, 49(3): 499~520 (in Chinese with English abstract).
- Ma P J, Lin C Y, Jahren J, *et al.* 2021. Cyclic zoning in authigenic saddle dolomite-ankerite: Indications of a complex interplay between fault-rupturing and diagenetic alteration [J]. *Chemical Geology*, 559: 119831.
- Maciel I B, Balsamo F, Bezerra F H R, *et al.* 2024. Hydrothermal silicification along rift border faults in the Rio do Peixe basin, Brazil[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 168: 107025.
- Mao Xiang, Luo Lu, Wang Xinwei, *et al.* 2020. Distribution characteristics of Cenozoic volcanic rocks and its geothermal exploration potential in Bohai Bay Basin[J]. *Modern Geology*, 34(4): 858~864 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M. 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4): 154~155.
- Menezes C P, Bezerra F H R, Balsamo F, *et al.* 2019. Hydrothermal silicification along faults affecting carbonate-sandstone units and its impact on reservoir quality, Potiguar Basin, Brazil [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 198~217.
- Miao Q Y, Xu C G, Hao F, *et al.* 2020. Roles of fault structures on the distribution of mantle-derived CO<sub>2</sub> in the Bohai Bay basin, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 197: 104398.
- Palhano L C, Nogueira F C C, Marques F O, *et al.* 2023. Influence of hydrothermal silicification on the physical properties of a basin-boundary fault affecting arkosic porous sandstones, Rio do Peixe Basin, Brazil[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 148: 106062.
- Shan Xuanlong, Wang Wei, Zhang Xintao, *et al.* 2023. Geological model and construction process of the Mesozoic volcanic edifices in Bozhong Sag, Bohai Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 44(3): 675~688 (in Chinese with English abstract).
- Tan Ze, Luo Jinglan, Zhao Yan, *et al.* 2025. Hydrothermal fluid activity in the Gulong sag, Songliao basin, and its geological significance: Evidence from the shale of the Qingshankou Formation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 99(2): 551~567 (in Chinese with English abstract).
- Tian Lixin, Yang Haifeng, Wang Deying, *et al.* 2013. Study on genesis of high contents of CO<sub>2</sub> and hydrocarbon accumulation period in Paleogene, Bohai Sea: An example in Q oil-gas field of Qinnan Sag [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(2): 673~678 (in Chinese with English abstract).
- Wang Deying, Liu Xiaojian, Deng Hui, *et al.* 2022. Characteristics of the Meso-Cenozoic tectonic transformation and its control on the formation of large-scale reservoirs in the Archean buried hills in Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 43(6): 1334~1346 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Zhang Y M, Zhang Y S, *et al.* 2024. Quartz fluid inclusions and trace elements in the Lailisigaoer porphyry Mo deposit, Western Tianshan, Xinjiang: Fluid evolution and metallogenic mechanism in magmatic-hydrothermal system [J]. *Ore Geology Reviews*, 169: 106081.
- Wang Wei. 2023. Research on the Tectonic Evolution and Fracture Development Characteristics of the Proterozoic Metamorphic Rock Buried Hills in the Bohai Sea Area [D]. Changchun: Jilin University (in Chinese).

- Wang W Z, Huang X, Chen S, *et al.* 2024. Geochemical characteristics of sediments in the southern Mid-Atlantic Ridge indicate hydrothermal activity: Evidence from rare earth elements[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 168: 107041.
- Xu C G, Wang Q B, Zhu H T, *et al.* 2024. Hydrothermal alteration mechanisms of an Archaean metamorphic buried hill and the models for reservoir zonation, Bozhong depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 164: 106843.
- Yang T, Cao Y C, Liu K Y, *et al.* 2020. Formation of zoned ankerite in gravity-flow sandstones in the Linnan Sag, Bohai Bay Basin, eastern China: Evidence of episodic fluid flow revealed from in-situ trace elemental analysis[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104139.
- Yao Z X, Ren Z, Han W W, *et al.* 2024. Non-magmatic sulfur source of hydrothermal colloform pyrite: Insights from the Jinshandian iron skarn deposit, Daye district, Eastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 259: 105907.
- Ye T, Chen A Q, Yang H F, *et al.* 2024. Tectonism and fracture-related dissolution induced the formation of the large-scale metamorphic granite reservoir: Implications from Bozhong 26-6 Precambrian bedrock trap, offshore Bohai Bay basin, Northern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106593.
- Yu L, Wu K Q, Liu L, *et al.* 2020. Dawsonite and ankerite formation in the LDX-1 structure, Yinggehai basin, South China Sea: An analogy for carbon mineralization in subsurface sandstone aquifers [J]. *Applied Geochemistry*, 120: 104663.
- Yu Zhichao, Liu Li, Sun Xiaoming, *et al.* 2012. Evidence of Paleogene thermal fluid activities and their impact on porosity-permeability of reservoir in Qikou Sag [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(S3): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Jianhui. 2000. Thermal fluid activities and their effects on water-rock interaction in Dongying sag [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(2): 133~136, 142 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Gongcheng, Tong Dianjun, Chen Kai, *et al.* 2024. Tectonic evolution and source rocks development of the super oil-rich Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 1 008~1 023 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Zhang Xintao, Liu Yimeng, *et al.* 2021. Evidence of deep fluid and its influence on gas reservoiring in Bohai Sea: Case study of QHD29-2/2E Oilfield [J]. *Natural Gas Geoscience*, 32(5): 633~644 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Feiyu, Jiang Suhua, Li Sanzhong, *et al.* 2017. Correlation of inorganic CO<sub>2</sub> reservoirs in East China to subduction of (Paleo-) Pacific Plate [J]. *Earth Science Frontiers*, 24(4): 370~384 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lihong, Li Sanzhong, Liu Jianzhong, *et al.* 2003. The Yanshanian structural style and basin prototypes of the mesozoic Bohai Bay Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 18(4): 692~699 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Jin Zhijun, *et al.* 2012. Carbonate reservoir rock of composite genesis and its dynamic developing process: An example from Tahe carbonate reservoir [J]. *Natural Gas Geoscience*, 23(1): 26~35 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dongya, Zhang Dianwei, Liu Quanyou, *et al.* 2015. Dynamic development process and mechanism of dolomite reservoir under multi-fluid alterations [J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(11): 2 053~2 062 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Shibo. 2024. Characteristics of hydrothermal fluid activity and its petroleum geological significance in Jiyang Depression [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 11(2): 21~28 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 池英柳, 赵文智. 2000. 渤海湾盆地新生代走滑构造与油气聚集 [J]. *石油学报*, 21(2): 14~20.
- 戴金星. 1993. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别 [J]. *天然气地球科学*, 2(Z1): 1~40.
- 戴金星. 1995. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏 [J]. *天然气工业*, 15(3): 22~27, 106.
- 戴金星, 宋岩, 洪峰, 等. 1994. 中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征 [J]. *中国海上油气(地质)*, 8(4): 3~10.
- 杜晓峰, 张尚锋, 官大勇, 等. 2024. 渤海湾盆地莱州湾凹陷 W16 构造热流体活动对储层改造作用 [J]. *地球科学*, 49(10): 3 459~3 470.
- 傅锚. 2023. 渤海湾盆地环渤中凹陷地区晚中生代埋藏火山的成因与分布及其构造过程 [D]. 长春: 吉林大学.
- 高雁飞, 王德英, 杨海风, 等. 2023. 渤海海域东南部构造转换带分级及其差异控藏作用 [J]. *中国海上油气*, 35(6): 23~34.
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1983. 西太平洋中、新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化 [J]. *地质学报*, 57(1): 11~21.
- 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[J]. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 845~851.
- 侯中帅, 陈世悦, 刘惠民, 等. 2019. 东营凹陷热液流体活动及其油气地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 48(5): 1 090~1 101.
- 胡安文, 王飞龙, 王广源, 等. 2023. 渤海湾盆地渤中凹陷渤中21-22构造区 CO<sub>2</sub> 成因及其对油气成藏的影响[J]. 天然气地球科学, 34(12): 2 151~2 159.
- 胡志伟, 吕丁友, 王德英, 等. 2023. 渤海海域前新生代关键构造期变形特征与潜山油气成藏意义[J]. 中国海上油气, 35(1): 50~62.
- 李继岩, 王永诗, 刘传虎, 等. 2016. 热液流体活动及其对碳酸盐岩储集层改造定量评价——以渤海湾盆地东营凹陷西部下古生界为例[J]. 石油勘探与开发, 43(3): 359~366.
- 李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等. 2004. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例[J]. 岩石学报, 20(3): 633~646.
- 李三忠, 张国伟, 周立宏, 等. 2011. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲[J]. 地学前缘, 18(3): 79~107.
- 李文科, 吴小洲, 李艳东, 等. 2024. 渤海湾盆地火成岩侵入接触变质系统及其储层特征——以南堡凹陷古近系沙河街组为例[J]. 石油勘探与开发, 51(2): 285~298.
- 刘全有, 戴金星, 金之钧, 等. 2009a. 塔里木盆地前陆区和台盆区天然气的地球化学特征及成因[J]. 地质学报, 83(1): 107~114.
- 刘全有, 金之钧, 高波, 等. 2009b. 川东北地区酸性气体中 CO<sub>2</sub> 成因与 TSR 作用影响[J]. 地质学报, 83(8): 1 195~1 202.
- 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[J]. 中国科学: 地球科学, 49(3): 499~520.
- 毛翔, 罗璐, 汪新伟, 等. 2020. 渤海湾盆地新生代火山岩分布特征及其地热勘探潜力[J]. 现代地质, 34(4): 858~864.
- 单玄龙, 王蔚, 张新涛, 等. 2023. 渤海海域渤中凹陷中生界火山机构地质模式及建造过程[J]. 石油与天然气地质, 44(3): 675~688.
- 谈泽, 罗静兰, 赵燕, 等. 2025. 松辽盆地古龙凹陷热流体活动及其地质意义——来自青山口组页岩中的证据[J]. 地质学报, 99(2): 551~567.
- 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<sub>2</sub> 的成因及成藏期研究: 以秦南凹陷 Q 油气田为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 44(2): 673~678.
- 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[J]. 石油与天然气地质, 43(6): 1 334~1 346.
- 王蔚. 2023. 渤海海域太古宇变质岩潜山构造演化及其裂缝发育特征研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 于志超, 刘立, 孙晓明, 等. 2012. 歧口凹陷古近纪热流体活动的证据及其对储层物性的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(S3): 1~13.
- 曾澍辉. 2000. 东营凹陷热流体活动及其对水-岩相互作用的影响[J]. 地球科学, 25(2): 133~136, 142.
- 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[J]. 石油勘探与开发, 51(5): 1 008~1 023.
- 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[J]. 天然气地球科学, 32(5): 633~644.
- 赵斐宇, 姜素华, 李三忠, 等. 2017. 中国东部无机 CO<sub>2</sub> 气藏与(古)太平洋板块俯冲关联[J]. 地学前缘, 24(4): 370~384.
- 周立宏, 李三忠, 刘建忠, 等. 2003. 渤海湾盆地燕山期构造特征与原型盆地[J]. 地球物理学进展, 18(4): 692~699.
- 朱东亚, 孟庆强, 金之钧, 等. 2012. 复合成因碳酸盐岩储层及其动态发育过程——以塔河地区奥陶系碳酸盐岩为例[J]. 天然气地球科学, 23(1): 26~35.
- 朱东亚, 张殿伟, 刘全有, 等. 2015. 多种流体作用下的白云岩储层发育过程和机制[J]. 天然气地球科学, 26(11): 2 053~2 062.
- 朱士波. 2024. 济阳坳陷热液流体活动特征及其油气地质意义[J]. 非常规油气, 11(2): 21~28.