刘汉青,周瑶琪,陈彤彤,等. 日青威盆地桃林地区白垩纪热流体活动特征及其对储层物性的影响[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(2): 38-48. LIU Hanqing, ZHOU Yaoqi, CHEN Tongtong, et al. Characteristics of cretaceous thermofluid activity and its influence on reservoir physical properties in Taolin area, Ri-Qing-Wei Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(2): 38-48.

日青威盆地桃林地区白垩纪热流体活动特征及其 对储层物性的影响

刘汉青^{1,2,3},周瑶琪^{1,2,3*},陈彤彤^{1,2,3},穆宏玉³,刘英杰³ (1页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京102206;2中国石化油气成藏重点实验室,无锡214126; 3中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,青岛266580)

摘 要:山东东部日青威盆地为近年来新发现的裂陷盆地,盆内广泛发育深水重力沉积岩并 且有机质含量丰富,具有非常规油气勘探远景。为了查明盆地内热流体活动的发育特征及其 对储层物性的改造作用,以桃林地区长玢岩及其围岩为研究对象,通过岩相学观察及 X-射线 衍射、流体包裹体、物性测试等实验分析方法,探讨了热流体活动特征及其对储层物性的影响。 研究结果表明:闪长玢岩与围岩的岩性组合主要有 2 种类型:闪长玢岩+砂岩 (下部)、闪长玢 岩+角砾岩+火山碎屑岩+砂岩+粉砂岩 (上部);热流体活动对围岩的影响主要体现在独特的脉 体特征、碎屑颗粒的热液蚀变、黏土矿物出现异常变化、流体包裹体均一温度出现异常高值 4 个方面;桃林地区热流体活动在砂岩储层中以横向运移为主,随着距离侵入体距离的增加,热 流体对储层物性的影响减弱,但在地层中部出现物性相对好的区域,推测是多期次热流体以 及次生断裂作为运移通道的叠加结果。

关键词:日青威盆地;桃林地区;热流体;耦合作用;储层改造 中图分类号:TE122 文献标识码:A **DOI**:10.16028/j.1009-2722.2021.322

0 引言

近十几年来,随着盆地动力学研究的不断开展 和深入,沉积盆地中的深部热流体活动研究已成为 广大专家学者关注的焦点^[1-6]。由于目前对深部热 流体尚未有系统的定义及认识,本文中提及的热流 体是指与岩浆火山活动有关,包括深部地壳热流体 和上地幔热流体在内的高温流体^[7]。岩浆活动在世 界各大含油气盆地中广泛存在^[8-9],与岩浆活动有关

收稿日期: 2021-12-22

的深部热流体活动不仅对盆地的温度场会产生重 要影响(如有机质加速生烃、盆地的地质构造、岩石 演化、油气运移和圈闭的形成等方面)^[10-13],还会对 储层造成影响:一方面,侵入体就位时带来的高温 会持续热烘烤围岩;另一方面,地壳中深部热液流 体沿深部断裂运移到浅部岩层中,由于上部致密岩 层的封堵而侧向运移,进而与围岩发生水岩反应, 导致围岩物性改变。因此,深入研究深部热流体活 动,对深部热流体活动频繁的盆地进行油气分布规 律预测和油气勘探都具有重要的指导作用。

日青威盆地在晚中生代火山活动活跃,盆地内 桃林地区火山岩体发育,主要以闪长玢岩等浅层侵 入体为主。目前,该盆地相关研究主要集中于物源、 沉积环境、构造背景等方面^[14-19],而关于研究区内 热流体活动在围岩中有何特征以及热流体如何影 响储层物性并未进行系统研究。为了全面深入研 究该盆地,本文运用薄片镜下观察、X-射线衍射、 流体包裹体、物性测试等实验分析方法,重点探讨

资助项目:山东省重点研发计划项目(2017CXGC1608);中国石化科技部 独立课题项目(P20028);中国石化油气成藏重点实验室开放基金 (HX20220005)

作者简介:刘汉青(1992-),男,硕士,主要从事油气地质方面的研究工作.E-mail: liuhqupc@126.com

^{*}通讯作者:周瑶琪(1963-),男,博士,教授,主要从事地球化学及盆地动力学等方面的研究工作. E-mail: zhouyq@upc.edu.cn

闪长玢岩侵位后围岩中热流体活动的特征,并探讨 其对碎屑岩储层物性的影响机制,以期为今后深入 研究本区孔隙演化和后期资源勘探开发提供基础 地质信息上的借鉴。

1 区域地质背景

山东东部日青威盆地是苏鲁造山带中段的晚

中生代裂陷盆地,位于华北克拉通和扬子克拉通结合部位^[20]。盆地整体走向呈 NE-SW 延伸,发育受早白垩世大陆裂谷作用和热隆滑脱作用的共同影响^[21-22]。盆地北部被青岛-五莲断裂带与邻近的胶莱盆地所分隔,南至南黄海西北海域,东到海阳凹陷,西临胶南隆起(图 1a)。由于盆地地处东亚大陆边缘,在白垩纪受太平洋板块与欧亚板块相互作用俯冲的影响,因而岩浆活动频繁。





研究区诸城市桃林地区位于日青威盆地西南 部,青岛-五莲断裂带以东(图 la)。区内出露地层 较齐全,自下而上依次发育有前寒武纪地层基底、 下白垩统莱阳组和青山组地层(图 lb)。其中莱阳 组自下而上可划分为4个岩性段:第一段为砂砾岩 和粉砂岩、硅质岩互层,下部可见穿层侵位的闪长 玢岩侵入体、少量角砾岩和火山碎屑岩;第二段为 厚层砂岩;第三段主要为硅质岩、粉砂岩互层,上部 可见粉砂岩和泥岩互层;第四段为砂岩、粉砂岩,与 上部青山组流纹岩层不整合接触。该剖面自下而 上发育冲积扇相-浊积扇相-扇三角洲相-火山溢流 相,整体表现出水体环境由浅水到深水再到浅水的 变化过程^[23]。

桃林地区发育穿地壳岩浆系统火山机构,这些 机构主要分布在深大断裂及派生断裂带附近,说明 了火山作用与早期构造活动或准同期的构造活动 有着密切的联系。火山作用以青山期后夼组酸性 岩浆爆发和八亩地组中--基性岩浆爆发为主^[24]。

2 火山岩及围岩组合特征

2.1 火山岩岩相学及地球化学特征

桃林地区火山机构整体呈环带状^[24],在主岩体 周围发育有许多脉状的分支岩体(图 1b),岩体与围 岩的交界面沿走向和倾向都有极大的变化。经过 实地踏勘(35°47′39″N,119°31′58″E),对出露火山岩 和碎屑围岩系统取样,岩性组合主要有 2 种类型 (图 2):闪长玢岩+砂岩(下部)、闪长玢岩+角砾岩+ 火山碎屑岩+砂岩+粉砂岩(上部)。闪长玢岩手标本 呈灰白色,具全晶质斑状结构和块状构造(图 3a)。 主要组成矿物为斜长石(55%)和钾长石(20%),次 要矿物为石英(15%)、角闪石(5%)和黑云母(5%) (图 4a)。斑晶以斜长石、角闪石和黑云母为主,其 中斜长石呈半自形板状,可见明显的聚片双晶、卡 钠复合双晶,局部被绢云母及绿帘石交代;角闪石







a.闪长玢岩; b.角砾岩; c.凝灰岩; d.碎屑砂岩 图 3 典型手标本照片 Fig.3 Photos of typical hand specimens

呈半自形柱状,可见绿色、浅黄绿色的多色性,可见

绿泥石交代;黑云母呈片状,发生绿泥石化。基质 以斜长石、钾长石、石英为主,杂乱分布,可见少量 裂隙被铁质矿物充填。

本区莱阳组底部发育闪长玢岩,根据前人研究 表明其属于高钾钙碱性,稀土元素总量较高,显示 出 LREE 富集、HREE 亏损,微量元素表现出富集 Rb、Th、U等大离子亲石元素,其中 Ba 与 Pb 强烈富 集,高场强元素 Nb、Ti 出现强烈亏损, Sr 与 Ta 也 呈现出不同程度的亏损,分析认为不存在明显的地 壳混染作用^[15,22]。据激光剥蚀电感耦合等离子体 质谱(LA-ICP-MS)锆石 U-Pb 定年测试表明闪长玢 岩侵入时间为 120 Ma, 在苏鲁造山带中广泛分布的 早白垩世岩浆岩锆石 U-Pb 年龄为 105~129 Ma^[16]。 由此认为, 桃林地区后期的侵入岩体的活动时期为 白垩纪。

2.2 围岩岩相学特征

角砾岩呈青灰色具有角砾结构、块状构造,由 于紧邻闪长玢岩侵入体,受到高温烘烤,出现热褪 色现象(图 3b)。角砾为黏土质细砂粉砂岩及细粒岩 屑砂岩,棱角状,杂乱分布。砂级碎屑为斜长石、钾 长石、单晶石英、岩屑为主,大小一般 0.01~0.05 mm, 棱角一次棱状为主,少次圆状,定向分布(图 4b)。 填隙物为黏土杂基、钙硅质胶结物。黏土杂基隐 晶一细小鳞片状,直径为 0.001~0.05 mm,定向分布, 重结晶明显,部分变为绢云母等;钙硅质胶结物重 结晶明显,已变为绿帘石等,它形粒状,大小一般 0.01~0.05 mm,填隙状分布。镜下以上各组分、粒 度分布不均匀,构成层状构造,局部可见褶皱,可见 较细小裂隙分布与黏土质细砂粉砂岩内。

凝灰岩呈灰黄色,块状构造,具有凝灰结构 (图 3c)。岩石组分主要为火山角砾和凝灰物 (图 4c)。火山角砾为流纹岩、细中粒长石岩屑砂岩 及黏土质粉砂岩岩屑,棱角状,大小一般 2~5 mm, 星散状分布;晶屑为斜长石、钾长石、石英,棱角状,



a.闪长玢岩镜下照片, TL-0; b.角砾岩中碎屑石英发生应力破裂, TL-1; c.凝灰岩镜下照片, TL-2; d.可见条纹长石和石英次生加大边, TL-10; e.可见方解石脉和斜长石绢云母化, TL-7; f.在石英次生加大边与碎屑颗粒边缘可见绿泥石, TL-11

图 4 桃林地区闪长岩侵入体和围岩镜下照片

Fig.4 Micrograph of diorite intrusions and surrounding rocks in the Taolin area

大小一般 0.2~0.5 mm, 星散状分布。玻屑弧面棱 角状, 杂乱分布, 均脱玻、重结晶, 已变为霏细一微 晶状长英质, 呈假象产出, 界限多模糊不清或消失。 岩屑为蚀变流纹岩及蚀变安山岩、流纹质凝灰岩等, 棱角状, 大小一般 0.5~1 mm, 杂乱分布。岩石轻碎 裂, 沿裂隙有绿泥石、不透明矿物充填交代。岩石蚀 变弱, 蚀变矿物为绢云母、高岭土、方解石、绿泥石。

砂岩呈青灰色,具有块状构造(图 3d)。碎屑组 分中长石含量 30%~40%,长石类型以斜长石为主 (图 4d)。岩屑含量 40%~50%,主要为火山岩岩屑, 呈星点状、纤维状分布,部分发生绢云母化或绿泥 石化(图 4e、4f)。石英含量为 10%~30%,可见溶蚀 及次生加大现象。砂岩粒度较细,以细砂为主;杂 基支撑为主要支撑类型,接触类型以缝合线接触为 主,分选较好,磨圆度为次棱角一次圆,裂缝虽然发 育但被方解石脉体充填(图 4e)。岩性以长石岩屑 砂岩(图 5)为主,砂岩的平均组分为 Q_{18.46}F_{34.23}R_{47.31}, 成分成熟度(Q/F+R)为 22.64%,成熟度较低。

3 围岩中热流体活动的特征

3.1 脉体特征

脉体的发育一般是热流体活动的产物,是证明 热流体存在最直接的证据^[25]。桃林地区围岩中发



Fig.5 Triangle diagram of terrigenous clastic composition of sandstone in the Taolin area

育多种脉体,主要类型为方解石脉(图 6a)、石英脉 (图 6b)和蚀变的高岭石脉(图 6c)。根据脉体之间 的切割穿插关系,可以确定脉体形成的先后顺序为: 方解石脉→石英脉。方解石脉体中央一般发育平 行于脉壁的"中央"线,脉体中矿物生长方向由两边 脉壁向中间垂直生长。这些特征表明它们是典型 的张性水力破裂的直接产物^[26],而这种脉体也被认 为是超压体系的结晶作用产物^[27]。

3.2 碎屑颗粒的热液蚀变

深部岩浆总是寻找薄弱之处(例如构造应力场



a.方解石脉,脉壁内部可见呈枳壳状生长的绿泥石,TL-5;b.石英脉,TL-4;c.高岭石脉切割石英脉,TL-8;d.碎屑石英颗粒多组破裂缝,TL-3; e.碎屑石英单组破裂缝,TL-9;f.杂基绢云母化,TL-4;g.斜长石绢云母化,TL-6;h.岩屑绿泥石化并可见两期石英次生加大边,TL-10; i.碎屑石英边缘可见绿泥石薄膜,也可见绿泥石胶结充填粒间孔隙,TL-11

图 6 围岩中热流体活动镜下照片



低值区、剪切应力集中区、深大断裂等)进入盆地, 并且岩浆向浅部地层运动的过程中,由于热流体体 积的膨胀和机械贯入作用会产生异常高压,势必会 导致围岩受到挤压应力的影响^[28-29],在这种挤压应 力的作用下,围岩中脆性石英颗粒会改变其碎屑颗 粒的物理形态,导致碎屑颗粒致密排列,当外部压 力超过碎屑颗粒自身的最大应力极限时颗粒还会 发生破裂(图 4b、6d、6e)。

碎屑岩中绢云母的形成往往与异常热流体有 关,主要由岩石中黏土矿物或者长石高温蚀变形成, 形成温度通常为 250~300 ℃^[29]。绢云母化作用广 泛出现在桃林地区围岩中,并且绢云母化现象有 2 种类型:一种呈灰黄色细晶鳞片状产出,一般沿着 碎屑颗粒分布,是由黏土矿物在高温作用下蚀变形 成(图 6f);另一种为黄绿色,呈细鳞片状,主要分布 在斜长石内部,大多沿着斜长石解理缝生长(图 4e、 6g)。这 2 类绢云母化现象都分布在热流体附近, 主要受到热液作用的影响。

绿泥石化作用一般认为是在碱性环境下热流 体蚀变的产物^[30]。岩屑或杂基在富集 Fe²⁺、Ca²⁺等 离子的碱性水介质条件下,可在地层中形成较高含量的绿泥石^[31]。根据前人研究表明闪长玢岩侵入体属于高钾钙碱性,为绿泥石的大量形成提供了充足的物质来源,导致研究区围岩中普遍发育绿泥石化现象(图4f、6h、6i)。

桃林地区碎屑围岩热液蚀变强度较弱,发育的 热液蚀变类型除了上述的几种类型外,还可见高岭 石化(图 6c)和硅化(图 4d、6h)等现象。碎屑围岩 中热液蚀变主要发生在岩石构造裂缝和碎屑颗粒 间隙,这是因为热液总是沿着优势通道流动。

3.3 黏土矿物异常变化特征

岩浆侵入会造成地层局部温度升高,加速围岩 的成岩作用或者变质作用进程,从而出现特殊的 黏土矿物变化特征^[32]。对所采砂岩样品进行全岩 XRD分析(表1),随着与侵入体距离的增加黏土矿 物含量逐渐上升(图7),这种趋势的出现推测是由 于高温侵入体侵位会持续烘烤附近的围岩,使其中 的黏土矿物发生变质,转换成其他变质矿物;随着

			x-ray diffraction	n clay analysis	of sandstone in	the raoin area	a		
	成分含量/%								
件品编号 ·	岩性	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	阳起石	黏土矿物	
TL-3	砂岩	21.2	15.7	63.1	0	0	0	0	
TL-4	砂岩	6.3	12.2	76.8	0	0	4.7	0	
TL-5	砂岩	9.6	8.5	68.3	4	0	9.6	0	
TL-6	砂岩	9	13.1	63.8	0	0	14.1	0	
TL-7	砂岩	11.3	8.2	67.8	0	0	12.7	0	
TL-8	砂岩	16.9	6.7	56.1	0	0	17.3	3	
TL-9	砂岩	21.1	8.6	57.4	0	0	9.9	3	
TL-10	砂岩	34.7	16.7	29.2	0	0	14.5	4.9	
TL-11	砂岩	23.8	9.9	55.3	0	0	2.9	8.1	
TL-12	砂岩	19.3	29.8	25.3	0	0	11.8	13.8	

表 1 桃林地区砂岩全岩 X 射线衍射分析 Table 1 X-ray diffraction clay analysis of sandstone in the Taolin are

远离侵入体,温度逐渐降低,这种热接触变质作用 越来越不明显。



Fig.7 Distribution trend of clay minerals in the sandstone in the Taolin area

对样品进行黏土矿物 XRD 分析(表 2), 黏土矿 物以绿泥石为主, 其次为高岭石、伊利石和蒙脱石。 在桃林地区围岩中黏土矿物转化出现异常演化, 高 岭石和绿泥石含量增加, 伊利石含量减少(图 8)。 高岭石在酸性环境下相对稳定, 可以作为酸性环境 的一种指示物^[33], 而伊利石的形成需要富含 K⁺的 碱性环境^[34,35]。这种黏土矿物异常演化现象可能 与有机质热解过程中释放出来的有机酸和岩浆活 动携带的 H₂S、SO₂、CO₂ 等酸性气体进入围岩有关,

打破了原有的水岩平衡,将砂岩中的钾长石、钠长 石等骨架颗粒蚀变成高岭石并抑制伊利石的生成, 形成有利于高岭石形成的酸性成岩环境^[3]。此外, 岩浆侵入体中含有 Fe²⁺、Mg²⁺等离子会促进绿泥石 的生成^[22],因此,研究区地层中出现了高岭石和绿 泥石同时存在的现象。测试还发现,样品中伊/蒙混 层比<15%并且出现混层消失带(表 2)。根据应凤 祥等^[36]成岩阶段划分标准,研究区碎屑围岩的成 岩演化阶段为中成岩 B 期一晚成岩阶段。岩浆侵 入产生的异常高温为化学反应提供必须的活化能 和能量,能够促进黏土矿物的转化,其中伊/蒙混层 对于介质环境温度的变化非常敏感^[37]。随着温度 的升高,伊/蒙混层形态也会发生相应的变化,形态 变化趋势为:片状→片状+短丝状→丝片状→絮 状^[38]。根据扫描电镜观察,样品中伊/蒙混层形态 呈絮状分布(图 9),反映围岩处在异常高温的介质 环境中。

3.4 流体包裹体均一温度

流体包裹体测得的均一温度可以视为岩石经 历最大温度的有用记录,是热流体活动的直接证据,

	表 2	桃林地区砂岩 X 射线衍射黏土分析	
Table 2	X-ray dif	fraction clay analysis of sandstone in the Taolin area	

	_									/ 70
投口炉口			乔尔	占土矿物含量	伊/蒙混层比		绿/蒙混层比			
件前姍丂	蒙脱石(S)	伊利石(I)	高岭石(K)	绿泥石(C)	伊/蒙混层(I/S)	绿/蒙混层(C/S)	蒙皂石层(S)	伊利石层(I)	蒙皂石层(S)	绿泥石层(C)
TL-8	8	42	2	43	5	0	5	95	-	-
TL-9	0	0	11	84	5	0	5	95	-	-
TL-10	27	0	10	63	0	0	-	-	-	-
TL-11	0	0	9	91	0	0	-	-	-	-
TL-12	0	0	24	76	0	0	-	-	-	-



图 8 桃林地区砂岩中黏土矿物发育特征





a.可见有机质充填粒间孔隙,TL-9;b.粒间孔隙中充填絮状伊/蒙混层、 叶片状绿泥石,TL-9;c.长石颗粒溶蚀形成的粒内溶孔中发育高岭石 与绿泥石,TL-9;d.高岭石相互叠置排列,TL-9;e.裂缝中充填黏土矿 物,TL-11;f.绿泥石、絮状伊/蒙混层填充裂缝,TL-11

图 9 黏土矿物扫描电镜照片

Fig.9 Scanning electron microscope of clay minerals

它直接记录了热流体活动期次和温度范围^[39-40]。 除少数为大气水渗滤成因外,脉体多数是热流体活 动的产物。因此,脉体矿物常常是与热流体活动有 关的包裹体的宿主矿物。其次,有些碎屑矿物的成 岩愈合微裂隙中的流体包裹体也与热流体活动有 关。此外,石英次生加大边、方解石等胶结物或自 生矿物多为成岩作用的产物,若它们在形成过程中 有热流体活动,其中赋存的流体包裹体可能为热流 体活动的依据。

样品中石英愈合裂隙中串珠状包裹体(图 10a) 比较发育,为气液两相的次生包裹体,直径较大,易 观察;而方解石中的包裹体不发育,不易观察。对 样品中17个石英颗粒愈合裂缝中流体包裹体进行 观察,流体包裹体类型主要为盐水包裹体,形状大 多呈粒状(图 10a、10c)或长条状(图 10b),大小多 集中于 3~10 μm,气液比介于 5%~15%(表 3)。



图 10 流体包裹体镜下照片 Fig.10 Micrographs of fluid inclusions

表 3 桃林地区流体包裹体均一温度与冰点数据

 Table 3
 The homogenization and freezing temperatures of fluid inclusions in the Taolin area

	nun	a menusion	s in the raoin	arca	
序号	宿主矿物	气液比/%	包裹体长径 大小/µm	均一温度 /℃	冰点温度 /℃
1	石英脉体	5	3	250.2	-4.3
2	石英脉体	10	3	189.2	-1.8
3	石英脉体	5	5	190.1	-3.0
4	石英脉体	15	5	230.0	-3.1
5	石英脉体	10	4	254.9	-10.0
6	石英脉体	10	3	210.0	-8.6
7	石英脉体	5	5	243.1	0.1
8	石英脉体	5	10	185.0	0.0
9	石英脉体	15	10	212.9	-0.3
10	石英脉体	15	5	214.9	-2.8
11	石英脉体	10	4	218.0	-2.9
12	石英脉体	10	10	230.9	-9.8
13	石英脉体	5	5	233.6	-3.6
14	石英脉体	5	3	250.0	-10.3
15	石英脉体	10	4	264.1	-5.3
16	石英脉体	10	4	274.0	-12.5
17	石英脉体	15	5	300.0	-14.8

通过测试,包裹体均一温度最高 300 ℃,最低 185 ℃,平均 232.4 ℃。温度变化范围大且温度值 高,主要集中在 230~260 ℃(图 11),推测是由不同 期次岩浆上涌,携带深部热流体脉冲式上升导致的。 需要说明的是,在样品测定过程中发现一些冰点 >0℃的盐水包裹体,这类包裹体可能是由于含溶 解的轻烃导致的^[41],因此计算盐度时剔除这些异常 值。本文根据 BODNAR 冷冻温度-盐度换算表^[42] 对盐度进行求取,依据均一温度-盐度交会图(图 12) 分为盐度和均一温度相对富集变化的 2 个区域: ①高温低-中盐度包裹体(I、II);②高温高盐度 包裹体(III)。







Fig.12 Diagram of homogenization temperature of fluid inclusions vs. salinity

这种均一温度异常对于识别研究区热流体活动的存在具有重要的指示意义,研究区围岩中发育裂缝,为热流体活动提供有利通道,裂缝中脉体的多期充填也反映了热流体活动的幕式特征。

4 热流体活动对储层物性的影响

热流体侵入到储层中后,其高温高压和引起的 酸性效应会对储层进行一定程度的改造,同时,热 流体携带的金属阳离子也会参与水岩反应,从而改 变原有的成岩环境^[43]。桃林地区热流体以活动性 较强的垂向深大断裂为运移的主要通道,在进入砂 岩层后发生侧向顺层流动,同时热流体具有多期次 活动的特点。热流体沿断裂上涌过程中经裂缝、不 整合面、孔隙渗透等进入围岩,并与之发生反应,通 常在断裂附近这种作用强烈,且在裂缝发育或孔隙 联通好的条件下,可延伸很远,导致非常显著的原 岩改造作用^[44]。

桃林地区莱阳组砂岩储层发育超低孔--超低渗储层,孔隙度分布在 0.7%~3.0%,平均为 1.42%,渗透率变化在(0.06~1.03)×10⁻³ μm²,平均为 0.183×

 $10^{-3} \mu m^2$ (表 4)。以侵入体为原点,按照距离侵入体远 近的方式绘出图 13。孔隙度曲线呈现出近似抛物 线特征(图 13),随着距离闪长玢岩侵入体的距离增 加,孔隙度先由距侵入体 1.3 m 处的 0.9% 增加到距 侵入体 8.3 m 处的 3.0%,再降低到距侵入体 11.3 m 处的 0.7%;渗透率先由距侵入体 1.3 m 处的 0.06× $10^{-3} \mu m^2$ 增加到距侵入体 8.3 m 处的 1.03×10⁻³ μm^2 , 再降低到距侵入体 11.3 m处的 0.10×10⁻³ μm^2 。研

表 4 桃林地区砂岩物性数据

Table 4	Physical property of sandstone in the Taolin area						
层位	采样编号	岩性	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ µm ²)			
莱阳组	TL-3	砂岩	0.9	0.06			
莱阳组	TL-4	砂岩	1.0	0.07			
莱阳组	TL-5	砂岩	1.1	0.11			
莱阳组	TL-6	砂岩	1.2	0.12			
莱阳组	TL-7	砂岩	1.7	0.07			
莱阳组	TL-8	砂岩	1.8	0.08			
莱阳组	TL-9	砂岩	1.8	0.12			
莱阳组	TL-10	砂岩	3.0	1.13			
莱阳组	TL-11	砂岩	1.0	0.07			
莱阳组	TL-12	砂岩	0.7	0.10			

45



Fig.13 Trend of porosity and permeability of sandstone in the Taolin area

究表明:在距闪长玢岩侵入体近处和远端,储层物 性较差,而中间层位储层物性较好。

推测区内热流体在热对流作用下携带 CO₂ 等 酸性气体沿着深大断裂等通道向上进入地层,形成 酸性热流体,加速有机质热演化,释放大量有机酸, 溶蚀储层中的不稳定矿物,形成次生孔隙。次生溶 孔从成岩作用的角度上属于晶溶孔的范畴,是指矿 物在蚀变之后形成的溶蚀孔^[40],这类溶孔边部可见 明显的次生矿物和交代边,由于形成时间较晚,能 够较完整的保存而且未被其他矿物充填(图 14a)。 其次,由于绿泥石包膜在碎屑颗粒边缘广泛发育, 可以有效抑制石英颗粒的次生加大^[45],使原始粒间 孔隙得以保存(图 14b)。然而,距离侵入体的近端 和远端分别由于压溶作用和黏土矿物的填充使得 储层物性不如中部(图 14c、14d)。



a.长石发生溶蚀,产生次生溶孔,TL-9;b.绿泥石包膜抑制次生加大, 使残余粒间孔保存下来,TL-10;c.黏土矿物进一步蚕食残余粒间孔, TL-12;d.石英颗粒受挤压发生压溶作用,TL-7 图 14 桃林地区砂岩孔隙特征

Fig.14 Pore characteristics of sandstone in the Taolin area

桃林地区闪长玢岩侵入体对储层物性的影响 范围约是自身厚度(2.5 m)的 3.72 倍。由于中性闪 长玢岩围岩储层相关研究较少,可参考资料不足, 而前人关于基性侵入体对围岩的影响范围做了大 量研究:影响范围由于地区差异,浮动范围较大,约 是侵入体自身厚度的 1/3~2.72 倍^[29,46]。显然,研究 区内闪长玢岩侵入体对围岩的影响范围远大于前 人得出的结论。

本文认为桃林地区侵入体对储层影响范围大 于其他地区主要有如下4点原因:①围岩的岩性不 同。前人的研究内容主要针对侵入体对泥岩或者 页岩的影响;而桃林地区围岩的岩性以砂岩为主。 相对于泥岩或者页岩,砂岩具有较高的孔隙度和渗 透率,热流体流动的空间也较大,进而增大了与热 流体的有效反应面积^[3],因此研究区侵入体对围岩 的影响范围也会相应扩大。②岩浆侵入体特征的 差异。岩浆的温度一般随着岩浆的成分不同而变 化,桃林地区闪长玢岩属于中性侵入岩,侵位温度 一般为 900~1 000 ℃,虽然不及基性侵入岩的侵位 温度(1000~1300℃)^[47]。但黏度是岩浆的另一个 重要物理性质,会极大的影响岩浆作用过程,岩浆 上升的速度与黏度呈反比关系^[48-49]。中性岩浆的 黏度比较大,上升速度较慢,因此,与围岩接触的时 间较长也会增加影响范围。③多期次热液的影响。 桃林地区热液期次至少为两期,多期次热流体活动 的叠加作用也会使影响范围扩大。④次生断裂作 为热流体活动通道的影响,断裂两侧可形成一定范 围的改造区。

5 结论

(1)闪长玢岩侵入体与围岩的岩性组合主要 有2种类型:闪长玢岩+砂岩+砾岩(下部)、闪长玢 岩+角砾岩+凝灰岩+砂岩+粉砂岩(上部)。

(2) 热流体活动在桃林地区是客观存在的,与 早白垩世火山活动密切相关。热流体活动体现 在独特的脉体类型、碎屑颗粒的热液蚀变、黏土矿 物异常转化、流体包裹体均一温度异常增高4个 方面。

(3)桃林地区深部的热流体沿深大断裂上侵, 通过微裂缝等通道在砂体中横向运移,主要通过溶 蚀作用,改善储层物性。横向上,随着距离侵入体 距离的增加,热流体对储层物性的改善作用减弱, 但在地层中部出现物性相对好的区域,推测是多期 次热流体以及次生断裂作为运移通道的叠加结果。

参考文献:

- ANDERSON R N. Sedimenary basin as thermo-chemical reactors[R]. 1990 and 1991 Report of Lamont-Doherty Geologic Observatory, 1992.
- [2] 解习农,成建梅,孟元林.沉积盆地流体活动及其成岩响应[J].
 沉积学报,2009,27(5):863-871.
- [3] 于志超,刘立,孙晓明,等.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),2012, 42(3):1-13.
- [4] SPYCHER N, PEIFFER L, SONNENTHAL E L, et al. Integrated multicomponent solute geothermometry[J]. Geothermics, 2014, 51(7): 113-123.
- [5] 时志强, 王毅, 金鑫, 等. 塔里木盆地志留系热液碎屑岩储层: 证据、矿物组合及油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 903-913.
- [6] 龙华山,向才富,牛嘉玉,等.歧口凹陷滨海断裂带热流体活动 及其对油气成藏的影响[J].石油学报,2014,35(4):673-684.
- [7] 金之钧,杨雷,曾溅辉,等.东营凹陷深部流体活动及其生烃效 应初探[J].石油勘探与开发,2002,29(2):42-44.
- [8] OTHMAN R, AROUR K R, WARD C R, et al. Oil generation by igneous intrusions in the northern Gunnedah Basin, Australia[J]. Organic Geochemistry, 2001, 32(10): 1219-1232.
- [9] WU C, GU L, ZHANG Z, et al. Formation mechanisms of hydrocarbon reservoirs associated with volcanic and subvolcanic intrusive rocks: Examples in Mesozoic-Cenozoic basins of eastern China [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(1): 137-147.
- [10] DOW W G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 7(2): 79-99.
- [11] SIMONEIT B R T, BRENNER S, PETERS K E. Thermal alteration of Cretaceous black shale by basaltic intrusions in the eastern Atlantic [J]. Nature, 1978, 273(5663); 501-504.
- [12] SILLITOE R H. Gold deposits in Western Pacific island arcs: The magmatic connection[J]. Economy Geology Monography, 1989, 6: 274-291.
- [13] LEIF R N, SIMONEIT B R T. Ketones in hydrothermal petroleum and sediment extracts from Guaymas Basin, Gulf of California[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23: 889-904.
- [14] 许汉华. 山东东部近海晚中生代莱阳组硅质岩成因及沉积环境研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- [15] 张振凯. 日青威盆地的构造--岩浆演化序列及岩石圈动力 学[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.

- [16] 刘菲菲.山东东部近海日青威盆地的构造格局与演化研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
- [17] 袁静,谢君,董志芳,等.山东省灵山岛早白垩世莱阳组沉积
 特征及演化模式[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(5):53-64.
- [18] 岳会雯. 山东东部近海晚中生代裂陷盆地莱阳期沉积地球化 学研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- [19] 周瑶琪, 辜洋建, 周腾飞, 等. 山东东部白垩系莱阳组沉积地 层与有机质特征 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 109-122.
- [20] ERNST W G, LIOU J G. Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts[J]. Geology, 1995, 23; 253-256.
- [21] LEECH M L, WEBB L E. Is the HP-UHP Hong'an-Dabie-Sulu orogen a piercing point for offset on the Tan-Lu fault?[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 63: 112-129.
- [22] ZHANG Z K, ZHOU Y Q, ZHOU T F, et al. Geochemistry of siltstones of the Early Cretaceous Laiyang Group in Taolin area, Shandong Province, Eastern China: Implications for provenance, source weathering, palaeo-environment, and tectonic setting[J]. Geological Journal, 2020, 55: 133-146.
- [23] 刘菲菲,周瑶琪,张振凯,等.山东东部近海地区日青威盆地 晚中生代地层沉积特征[J].海洋地质前沿,2021,37(3):22-32.
- [24] 周瑶琪,周腾飞,马昌前,等.山东东部早白垩世青山期穿地 壳岩浆系统与热隆滑脱成盆[J].地球科学,2018,43(10): 3373-3390.
- [25] ATILLA A. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(7): 797-814.
- [26] BEACH A. Numerical modes of hydraulic fracturing and the syntectonic veins[J]. Structual Geology, 1980, 2(4): 425-438.
- [27] PARNELL J, HONGHAN C, MIDDLETON D. Significance of fibrous mineral veins in hydrocarbon migration; fluid inclusionstudies[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69-70: 623-627.
- [28] NEIL S S, AVENR A. Dike intrusion into unconsolidated sandstone and the development of quartzite contact zones[J]. Pergamon, 1995, 17(7): 997-1010.
- [29] 刘超,谢庆宾,王贵文,等.岩浆侵入作用影响碎屑围岩储层的研究进展与展望[J].地球科学进展,2015,30(6):654-667.
- [30] 王琪, 史基安, 薛莲花, 等. 碎屑储集岩成岩演化过程中流体 岩石相互作用特征——以塔里木盆地西南坳陷地区为例[J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 584-590.
- [31] 李春柏,张新涛,刘立,等.布达特群热流体活动及其对火山 碎屑岩的改造作用--以海拉尔盆地贝尔凹陷为例[J].吉林大 学学报(地球科学版),2002,36(2):221-226.
- [32] 叶绍东,郑元财,卢黎霞.高邮凹陷辉绿岩变质带储集条件分析[J].复杂油气藏,2010,3(1):20-22.
- [33] 田夏荷,屈红军,刘新社,等.鄂尔多斯盆地东部上古生界致 密气储层石英溶蚀及其机理探讨[J].天然气地球科学,2016, 27(11):2005-2012,2069.

- [34] 包书景,何生. 泌阳凹陷地质流体对砂岩储集层中黏土矿物 形成和分布的控制作用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 51-56.
- [35] 孟万斌, 吕正祥, 冯明石, 等. 致密砂岩自生伊利石的成因及 其对相对优质储层发育的影响——以川西地区须四段储层 为例[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 783-790.
- [36] 应凤祥, 罗平, 何东博, 等. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成 岩作用与成岩数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [37] 刘立,彭晓蕾,高玉巧,等.东北及华北含油气盆地岩浆活动 对碎屑岩的改造与成岩作用贡献[J].世界地质,2003,22(4): 319-325.
- [38] 董春梅,马存飞,林承焰,等.一种泥页岩层系岩相划分方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):1-7.
- [39] 卢焕章. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [40] 张映红,朱筱敏,吴小洲,等. 侵入岩及其外变质带岩相与储 集层模型[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 22-26.
- [41] 赵迎冬. 流体包裹体中盐度分析与应用: 以福山凹陷为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(5): 1261-1269.
- [42] BONDAR R J. Reviced equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solution[J]. Geochim

Cosmochim Acta, 1993, 57: 683-684.

- [43] 侯中帅,周立宏,金凤鸣,等.歧口凹陷热液流体活动及其对 储集层的改造[J].地球科学,2021,46(1):200-214.
- [44] 李朋,任建业,阳怀忠,等.巴楚地区断裂带内热液流体活动 及对碳酸盐岩改造的特征分析[J].大地构造与成矿学,2011, 35(3):378-385.
- [45] 陈国松, 孟元林, 郇金来, 等. 自生绿泥石对储集层质量影响的定量评价: 以北部湾盆地涠西南凹陷涠洲组三段为例[J]. 古地理学报, 2021, 23(3): 639-650.
- [46] 陈荣书,何生,王青玲,等. 岩浆活动对有机质成熟作用的影响初探:以冀中葛渔城-文安地区为例[J]. 石油勘探与开发, 1989,1:31-37.
- [47] 王民, 卢双舫, 刘大为, 等. 岩浆侵入体热传导模型优选及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 71-78.
- [48] 李学军.峨眉山大火成岩省锾铁质岩体显微结构、物理化学 条件及深部岩浆作用研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2019.
- [49] 赵海玲. 岩浆物理性质和流体动力学研究[J]. 地学前缘, 1994, 1(1/2): 104-110.

Characteristics of cretaceous thermofluid activity and its influence on reservoir physical properties in Taolin area, Ri-Qing-Wei Basin

LIU Hanqing^{1,2,3}, ZHOU Yaoqi^{1,2,3*}, CHEN Tongtong^{1,2,3}, MU Hongyu³, LIU Yingjie³

(1 State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China;
 2 SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi 214126, China;
 3 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Ri-Qing-Wei Basin in the eastern Shandong Province is a newly discovered rift basin in recent years; it is widely developed in deep-water gravity-flow sedimentary rocks and rich in organic matter. This basin has a potential for unconventional oil and gas exploration. To examine the developmental characteristics of thermal fluid and its effect on reservoir physical properties, diorite porphyrite and its surrounding rock in the Taolin area were selected and studied in experimental analysis methods including thin-section mirror observation, X-ray diffraction, fluid inclusion. Results show that thermal fluid had a strong effect on reservoir remolding. There are two lithological assemblages of diorite porphyrite and surrounding rock: diorite porphyrite + sandstone (lower) and diorite porphyrite + breccia + pyroclastic + sandstone + siltstone (upper). The characteristics of thermal fluid activity are mainly reflected in the unique characteristics of veins, hydrothermal alteration of clastic particles, abnormal changes of clay minerals, and abnormal high homogenization temperature of fluid inclusions. The thermal fluid movement in the Taolin area is mainly lateral migration in sandstone reservoir. With the increase of the distance from the intrusion, the influence from thermal fluid is weakened, but the area with relatively good physical property appeared in the middle of the formation, which is believed to be the superposition result of multi-stage thermal fluid activities and secondary fractures as migration channel.

Key words: Ri-Qing-Wei Basin; Taolin area; thermal fluid; coupling effect; reservoir remolding