

丽水凹陷幔源CO₂充注对油气成藏的影响

马文睿

(中海石油(中国)有限公司上海分公司研究院, 上海 200338)

摘要:丽水凹陷勘探中发现了许多圈闭含CO₂, 同位素分析显示以幔源无机成因为主。凹陷深大断裂附近未发现含CO₂气藏, 而已发现CO₂气藏周边均有岩浆活动发育, 故认为丽水凹陷幔源CO₂运聚与岩浆幕式活动必然存在联系。因此, 油气勘探中为规避风险需开展岩浆活动期次与油气成藏期分析、关注岩浆活动区与圈闭距离、识别CO₂的断裂-砂体运移通道与圈闭的空间接触关系等。结合丽水凹陷烃源岩生排烃关键期和圈闭分布分析, 认为烃源岩生烃高峰(56 Ma)后的第Ⅲ期(23.03 Ma)岩浆活动带来的幔源无机CO₂充注对油气藏可能具有占位和破坏作用, 位于岩浆体纵向上直接与其搭接或与岩浆岩通过断裂间接搭连的圈闭含CO₂风险高。该研究结果对丽水凹陷油气勘探具有指导意义。

关键词:幔源CO₂; 岩浆幕式活动; 断裂-砂体运移通道; 丽水凹陷

中图分类号: TE132 文献标志码: A

Influence of mantle-source CO₂ charging on hydrocarbon accumulation in Lishui Sag

MA Wenrui

(Research Institute of Shanghai Branch of CNOOC (China) Limited, Shanghai 200338, China)

Abstract: During the exploration of the Lishui Sag, many traps containing CO₂ were found, and isotopic analysis showed that mantle-source inorganic genesis was dominant. No CO₂-bearing gas reservoirs were found near the deep fault of the depression, but magmatic activities were found around the CO₂ gas reservoir, so it is believed that there must be a relationship between the mantle-derived CO₂ migration and accumulation and the magmatic episodic activities in the Lishui Sag. Therefore, to avoid risks in oil and gas exploration, it is necessary to carry out the analysis of the magmatic activity stage and hydrocarbon accumulation stage, pay attention to the distance between magmatic activity areas and traps, and identify the spatial contact relationship between CO₂ fault-sand migration channels and traps. Combined with the analysis of the key period of hydrocarbon generation and expulsion of source rocks and the distribution of trap in the Lishui Sag, it is concluded that mantle-derived inorganic CO₂ injection brought by magmatic activities in the third period (23.03Ma) after the peak of hydrocarbon generation (56Ma) may have an occupying and destructive effect on the reservoirs. The traps located in the longitudinal direction of magma bodies that are either directly connected to them or indirectly connected to them by fracture have a high risk of containing CO₂. The research results are of guiding significance for oil and gas exploration in the Lishui Sag.

Key words: mantle-source CO₂; episodic activity; fault-sand migration channel; Lishui Sag

引用格式: 马文睿. 丽水凹陷幔源CO₂充注对油气成藏的影响[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(3): 282-288.

MA Wenrui. Influence of mantle-source CO₂ charging on hydrocarbon accumulation in Lishui Sag[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(3): 282-288.

丽水凹陷古新统钻井油气显示活跃, 揭示凹陷具有良好的油气成藏条件, 已发现一个气田, 是东海陆架盆地重要的含油气构造地质单元。但气田发现之后始终未能再有商业性油气突破, 尤其是丽水西凹钻井中CO₂的出现严重制约了油气勘探进程。对已发现CO₂气藏与岩浆活动、断裂、砂体关系开展研究, 厘清幔源CO₂充注时期、充注方式, CO₂

气藏分布特征与油气藏间关系, 避开CO₂成藏区是油气勘探取得成功的重要前提。

收稿日期: 2023-03-20; 改回日期: 2023-05-26。

作者简介: 马文睿(1983—), 工程师、博士, 研究方向为油气成藏。
E-mail: mawr2@cnooc.com.cn。

基金项目: 中海油“七年行动计划”课题(CNOOC-KJ 135 ZDXM 39 SH02)。

1 区域地质概况

丽水凹陷位于东海陆架盆地台北坳陷西南端,呈北东—南西向展布,是在中生代残留盆地基础上发育起来的具有东断西超特点的新生代断陷构造,凹陷面积约为1.4×10³ km²,沉积地层厚近万米^[1-2]。平面上,丽水凹陷被灵峰潜山构造带分割成东、西两个次凹(图1左);纵向上,凹陷元古界片麻岩及中生界花岗岩侵入岩基底之上残留有中生界上白垩统石门潭组地层,之上为新生界地层,自下而上分别为古新统月桂峰组(E_{1y})、古新统灵峰组(E_{1l})、明月

峰组(E_{1m})、始新统瓯江组(E_{2o})、始新统温州组下段(E_{2w})、中新统(N₁),上新统(N₂)及第四系(Q)。凹陷经历了多期构造运动,包括晚白垩世末雁荡运动、古新世末瓯江运动、始新世中晚期至渐新世早期的玉泉运动、渐新世末的花港运动、中新世末的龙井运动及上新世末的冲绳海槽运动;其中玉泉—花港运动使丽水凹陷整体抬升剥蚀,温州组部分缺失,平湖组、花港组全部缺失(图1右)。丽水凹陷自上世纪80年代勘探以来油气显示丰富,已发现一个气田和多个含油气构造,多口探井钻探见CO₂。

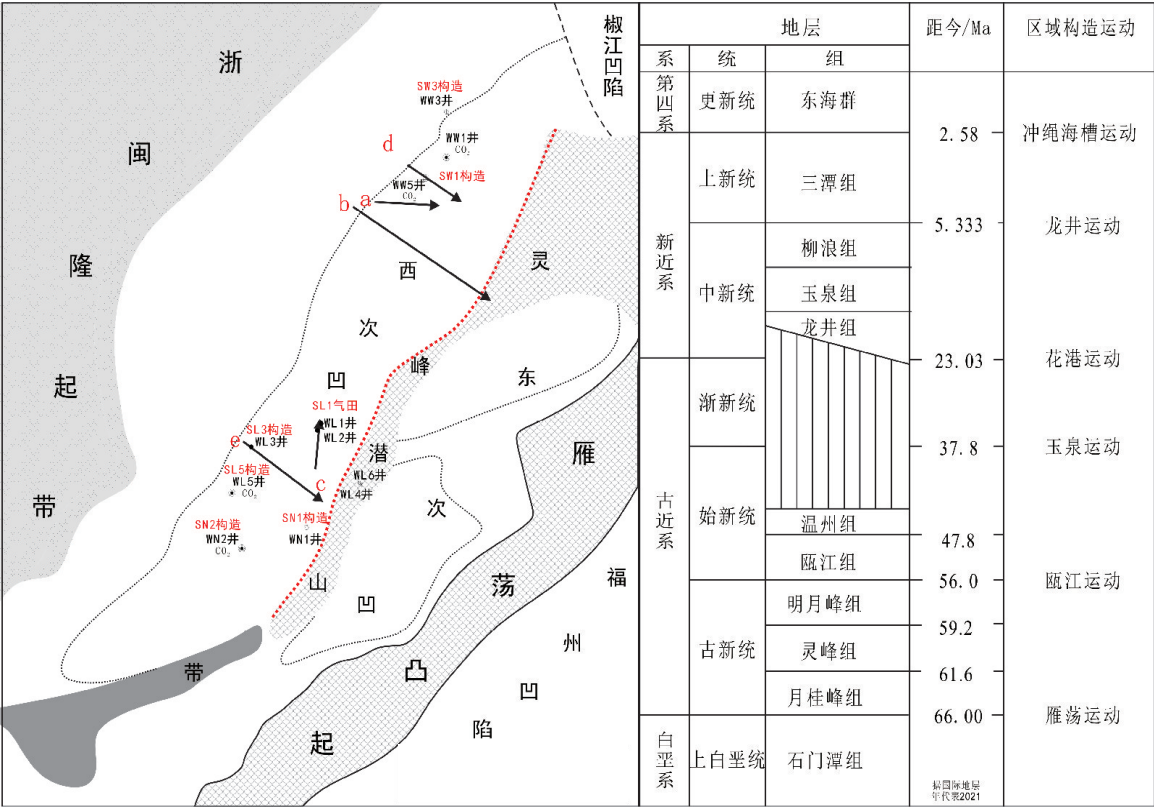


图1 丽水凹陷构造单元及地层、构造运动

2 幔源CO₂时空分布和充注路径

2.1 丽水凹陷CO₂时空分布和特征

丽水凹陷内含CO₂构造有丽水SL1气田和SN2构造、SL5构造、SW1构造(图1)。平面上,含CO₂构造分布在丽水凹陷斜坡带及凹中隆SL1气田、灵峰潜山带SL2构造中,除灵峰潜山带SL2构造上WL4井及WL6井发现的微量CO₂气体经证实为有机成因外,其余CO₂碳同位素大于-8‰(表1),同时³He/⁴He>10⁻⁵判别为幔源无机成因^[3-9]。纵向上,

CO₂气层分布在古新统各地层中,其中月桂峰组和灵峰组为高含CO₂气藏,明月峰组为含CO₂气藏(SL1气田)。丽水凹陷中有高含CO₂气藏(WN2井、WW1井、WL5井等);有含CO₂气藏(WL1井、WL2井);也有低CO₂气藏(WL4井、WL6井等)(表1)。

2.2 丽水凹陷含CO₂气藏与深大断裂、岩浆活动关系

丽水凹陷深大断裂主要分布在丽水西凹灵峰潜山带西侧陡断带附近(图1红虚线),为凹陷主要的控凹断裂,凹陷基底断裂在地震剖面上最深可至6 000 ms附近,相当于10 km左右深度,相较于东海

陆架盆地的莫霍面 30 km 的深度^[10]未能沟通幔源岩浆;其附近的钻井,如灵峰潜山构造带上的 WL4 井、WL6 井以及 SN1 构造近年新钻探的 WN1 井等均未见有 CO₂。

凹陷内古新世—中新世岩浆活动频繁,尤其是丽水西凹内钻井和地震剖面上均留有岩浆喷发或侵入体证据,位于岩浆活动区的钻井,如丽水凹陷西南部 WN2 井、WL5 井,中央反转带 WL1 井、WL2 井及西北斜坡带高部位 WW1 井、WW5 井周边均见有顺断裂的岩浆侵入或中心式喷发证据。故认为深大断裂并不是丽水凹陷幔源 CO₂ 运移的通道。岩浆活动区附近的圈闭多见高含量 CO₂ 高压气藏。

3 岩浆活动期次对油气成藏的影响

3.1 丽水凹陷岩浆活动期次

结合 CO₂ 碳同位素(表 1)及钻井周边岩浆活动,认为凹陷 CO₂ 气体来自幔源岩浆热液上涌携带的 CO₂。丽水凹陷地震剖面 and 钻井均有岩浆活动(喷发及侵入)证据,井上可依据钻遇岩性特征来识别岩浆活动,如钻遇安山岩、凝灰岩层;地震剖面上可依据具有杂乱反射特征的纵向或高角度斜交的火山通道、喷发后呈中心塌陷沉降式的破火山口、火山口附近的锥丘状喷溢相、横向具层状强反射特征的火山溢流相组合识别火山喷发相,或正常沉积岩层中突然出现的斜交(顺层)强反射—中低频反射识别岩浆侵入体。

表 1 丽水凹陷探井 CO₂ 体积百分数和碳同位素

构造(气田)	井号	井深/m	层位	CO ₂ 体积百分数/%	δ ¹³ C _{CO2} /‰
SL1	WL1	2 250~2 283	E ₁ m ₁	34.15	-5.03
		2 250~2 283		34.5	-4.67
	WL2	2 315~2 336	E ₁ m ₂	37.5	-9.2
		2 238~2 260	E ₁ m ₁	30.9	-4.6
SL5	WL5	3 370	E ₁ l ₂	88	-7.95
SW1	WWZ1	3 335~3 345	E ₁ l ₁	94.47	-4.0
		3 405~3 412	E ₁ l ₂	98.59	-4.2
		3 641~3 666		99.87	-4.2
	WW5	3 597	E ₁ y ₂	95.6	-5.27
SN2	WN2	2 571~2 589	E ₁ l ₁	95.65	-4.51
		2 635~2 642		99.42	-4.19
SL2	WL6	2 162~2 175	E ₂ o	2.45~3.45	-22.2

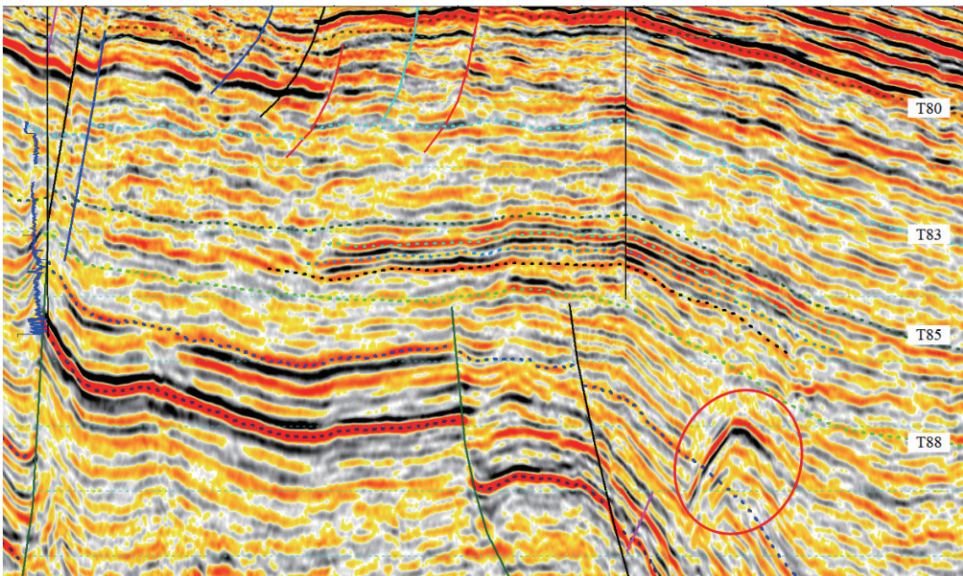


图 2 过丽水凹陷岩浆侵入现象(位置见图 1 中 a 线)

岩浆上涌受能量大小不同及上覆地层差异的影响,分为侵入和喷发两种模式。侵入的时间晚于被侵入地层形成时间,如丽水凹陷主洼内T88界面之下存在高角度斜交(顺层)岩浆侵入强反射体(图2中红圈处)不能代表其活动时期;在无沉积间断的情况下喷发-溢流相出露地表的时间可近似等同于地层形成的时间^[11],代表该期岩浆活动时间,如地震剖面上见多条岩浆通道反射自基底沿先存断裂薄弱面垂直或斜列式上涌,终止于渐新统与中新统界面(T20)附近,结合花港运动期不整合面形成时间,确定喷发时间约为23.03 Ma左右(图3)。

将火山喷发期次与主要构造活动、地质界面对应,将本区岩浆活动划分为4期(图4):Ⅰ期为古新世晚期,约56 Ma,岩浆喷发相零星发育,主要分布在西次凹南部和潜山中南段;Ⅱ期为始新世,约为47.8 Ma,岩浆活动向北迁移至丽水凹陷边缘西北高部位;Ⅲ期为始新世—渐新世,约为37.8—23.03 Ma,在西次凹北部广布式发育;Ⅳ期为中新世末,约为5.33 Ma,火山活动区向南迁移,主要集中在西次凹南端及近斜坡带,且数量变多。四期火山喷发分别为雁荡运动期、瓯江运动期、花港运动期、龙井运动期四幕。

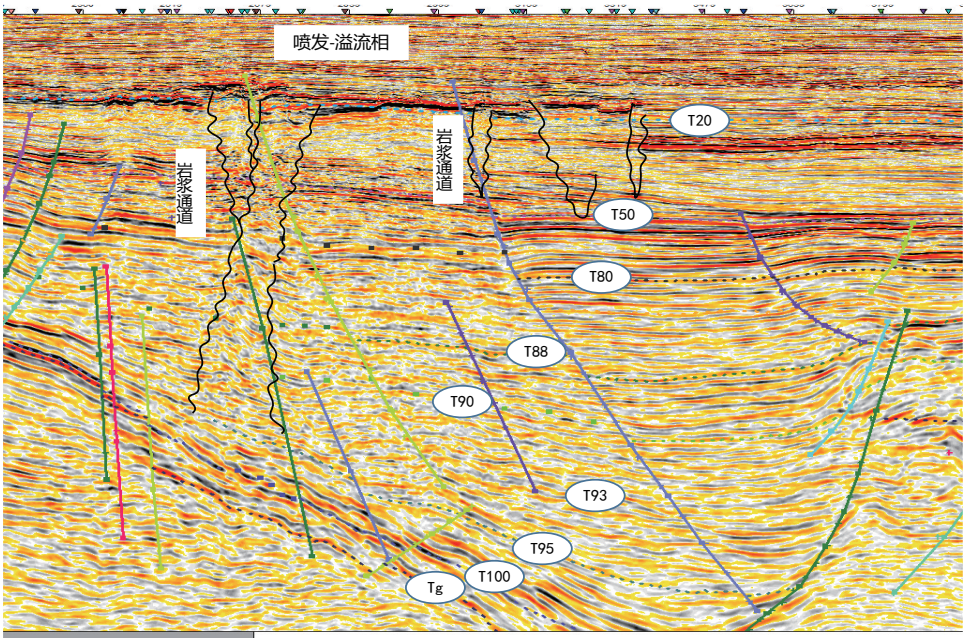


图3 过丽水凹陷主洼岩浆通道和刺穿层位(位置见图1中b线)

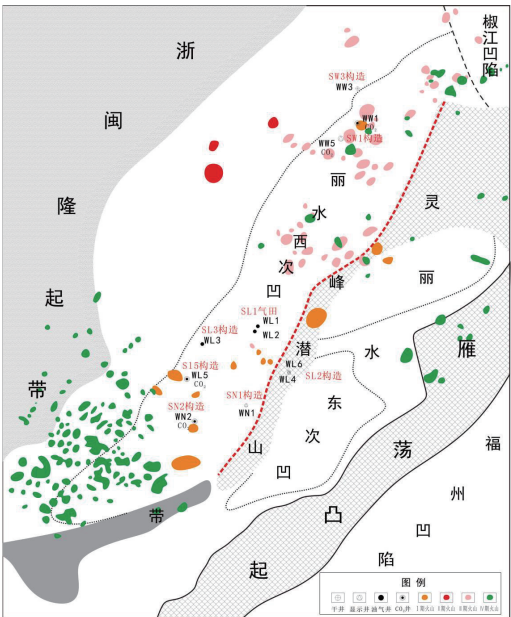


图4 丽水凹陷喷发相火山活动分期平面分布

3.2 丽水凹陷油气成藏时间

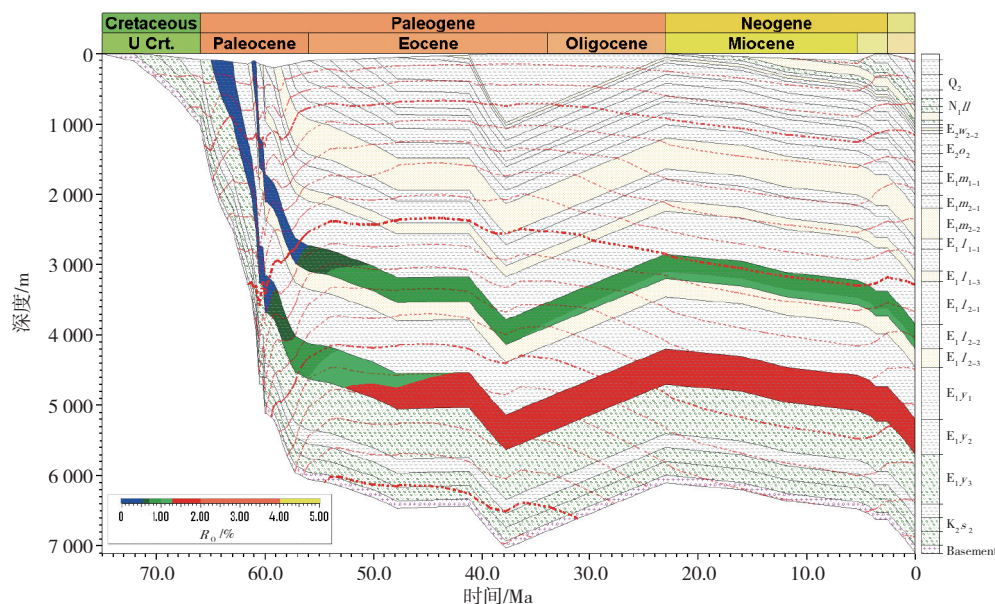
前人对丽水凹陷的油气成藏史做过分析,认为丽水凹陷在裂谷盆地断陷期高地热流和快速埋深的作用下,于古新世末期干酪根进入成熟阶段,开始大量生烃,整体具有早期成藏的特征^[12-15],后期凹陷经历平湖运动—花港运动发生整体抬升,在始新世末—渐新世发生第二次油气运聚。通过对凹陷中央的SL1气田埋藏生烃分析史可知,构造在埋藏作用后,渐新世发生过挤压抬升反转,具有两期成藏的特征,SL1气田古新世末进入生排烃高峰(图5),在古新统下部发生大规模油气运聚成藏;SL1构造在始新世末—渐新世发生抬升反转,原先形成的油气藏发生调整,在古新统上部成藏。

3.3 CO₂气体充注对油气成藏影响

根据前文所述,丽水凹陷深大断裂附近未见有

含幔源无机CO₂气藏,主要与幔源岩浆活动相关^[16-17],因此厘清岩浆活动和油气生排烃高峰的时间空间关系对分析幔源岩浆相关CO₂气具有重要作用。通过凹陷生排烃高峰分析可知,丽水凹陷第一次生排烃高峰期后(56 Ma)的岩浆活动中(第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ期

岩浆活动)CO₂充注对油气藏可能带来较大的影响,甚至对油气进行驱替和破坏。根据前述几期火成岩的发育部位可知,仅发育在凹陷内部的岩浆活动区可能对油气成藏具有破坏作用,故第Ⅲ、Ⅳ期岩浆活动对油气藏产生的风险相对较大。



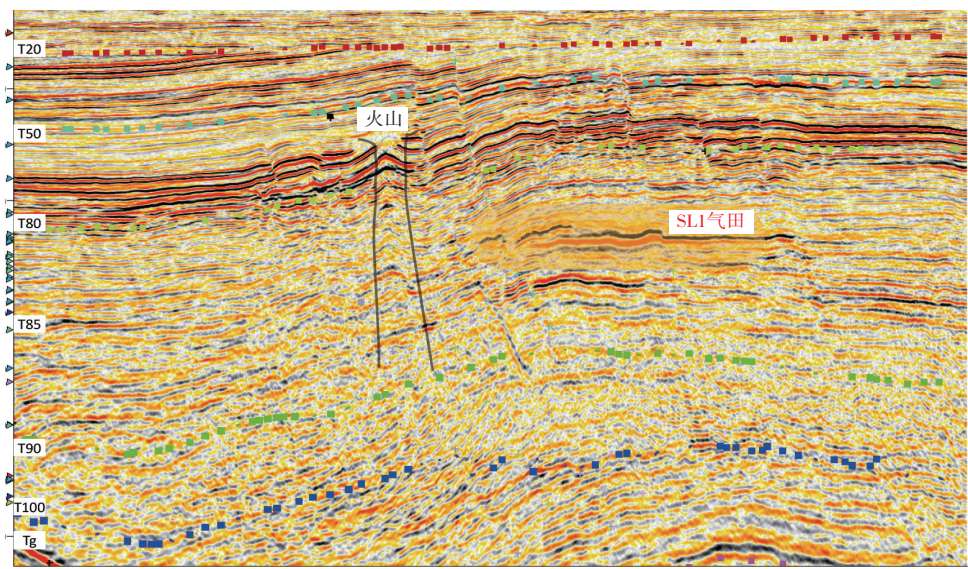


图7 过SL1气田南部岩浆通道剖面(位置见图1中c线)

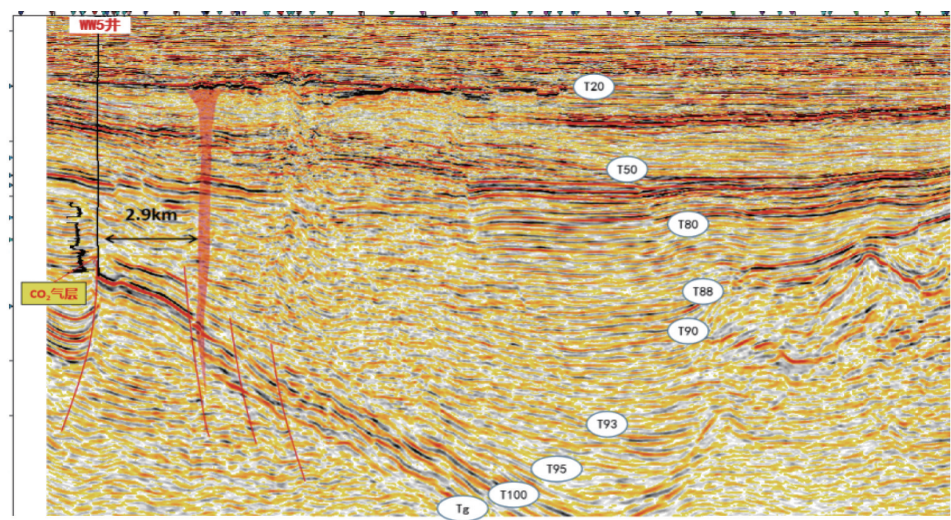


图8 过WW5井地震剖面(位置见图1中d线)

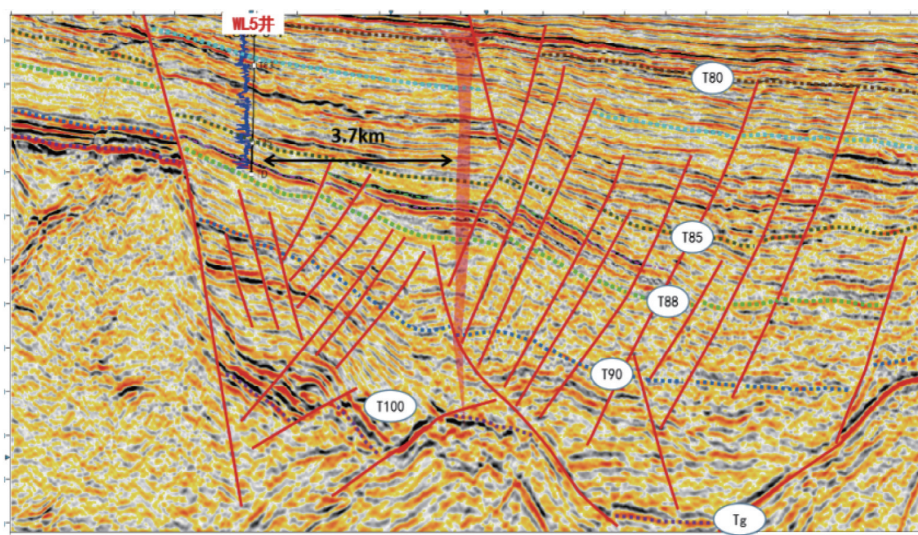


图9 过WL5井地震剖面(位置见图1中e线)

先充注,CO₂后充注,CO₂气体大量驱替烃类气体,CO₂含量高。二是圈闭距离岩浆通道较远(>5 km),CO₂含量低,烃类含量高。具体有以下几种情况:同时充注CO₂和油气,CO₂充注距离远,能量衰减快,充注亦少;CO₂先充注,油气后充注,捕获少量CO₂,烃类气体为主;油气先充注,CO₂后充注,捕获烃类多,受运移距离影响,CO₂含量低。

4 结论与认识

(1)丽水凹陷内已发现的CO₂气藏为幔源无机成因,包括低含、中含和高含CO₂三种类型,中、高含CO₂圈闭气源与岩浆上涌活动相关。

(2)丽水凹陷油气主成藏期为56 Ma,油气成藏高峰期后的第Ⅲ、Ⅳ期岩浆活动集中在洼陷内部,对早先形成的油气藏具有一定的破坏性,油气成藏具有CO₂充注风险;

(3)CO₂充注风险与圈闭形成及岩浆活动先后关系、圈闭与岩浆通道空间距离、岩浆活动区运移通道沟通圈闭关系密切,距离火山通道越近、有断裂搭接圈闭或与岩浆活动通道沟通的圈闭存在较高的CO₂充注风险,反之,则风险越小。

参考文献:

- [1] 葛和平,陈建平,陈晓东,等.东海盆地丽水凹陷天然气类型及其成因探讨[J].中国科学(D辑:地球科学),2007(S2):104-110.
- [2] 田杨,叶加仁,杨宝林,等.东海陆架盆地丽水凹陷油气成藏规律及区带优选[J].天然气地球科学,2016,27(4):639-653.
- [3] 程有义.含油气盆地二氧化碳成因研究[J].地球科学进展,2000,15(6):684-687.
- [4] GUAN X R.Genesis of carbon dioxide with high purity in east China[J].Petroleum Geology & Experiment,1990,12(3):248-258.
- [5] 戴金星.中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J].天然气工业,1995,15(3):22-27.
- [6] 李先奇,戴金星.中国东部二氧化碳气田(藏)的地化特征及成因分析[J].石油实验地质,1997,19(3):215-221.
- [7] 陶士振,刘德良,杨晓勇,等.无机成因二氧化碳气的类型分布和成藏控制条件[J].中国区域地质,1999,18(2):218-222.
- [8] 戴金星,胡国艺,倪云燕,等.中国东部天然气分布特征[J].天然气地球科学,2009,20(4):471-487.
- [9] 黄志龙,姜亮,郝石生.东海盆地丽水凹陷天然气成因类型[J].天然气工业,2003,23(3):29-31.
- [10] 徐德琼,李全兴,蒋家祯.东海莫霍面及其地质意义[J].海洋通报,1983(5):34-41.
- [11] 文瑞霞.火山岩体识别与刻画及其在徐深气田的有效应用[J].西部探矿工程,2019,31(9):62-63,68.
- [12] 孙玉梅,席小应.东海盆地丽水凹陷油气源对比与成藏史[J].石油勘探与开发,2003,30(6):24-28.
- [13] 崔敏,赵志刚.东海盆地丽水凹陷油气成藏制约因素分析[J].特种油气藏,2015,22(2):18-21.
- [14] 郭永华,于水,葛玲.东海盆地丽水凹陷LS36-1构造成藏机理研究[J].石油勘探与开发,2003,30(6):29-31.
- [15] 苏奥,陈红汉,曹来圣,等.东海盆地丽水凹陷油气成因、来源及充注过程[J].石油勘探与开发,2014,41(5):523-532.
- [16] 高阳东,林鹤鸣,刘培,等.珠江口盆地阳江东凹新生代岩浆活动特征与期次[J].成都理工大学学报(自然科学版),2021,48(2):154-164.
- [17] 郭栋,王兴谋,张金功.山东济阳坳陷二氧化碳气成藏模式分析[J].现代地质,2006,20(3):441-448.

(编辑 刘义梅)