

文章编号: 1001-6112(2009)05-0531-06

苏北盆地断层封堵类型及定量评价

刘玉瑞

(中国石油化工股份有限公司 江苏油田分公司 地质科学研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 苏北盆地断层十分发育, 油藏形成与断层通道和封堵多重控制作用密切相关, 油藏以复杂断块圈闭为主。通过解剖油藏和落空断块的断层封闭性数据集特征, 归纳出断层封闭有 4 类基本模式, 即砂泥对接封闭型(A 型)、砂泥混接封闭型(B 型)、时间配置封闭型(C 型)和主压力封闭型(D 型)。在此基础上, 对 B 型、C 型和 D 型按其形成机制和主控因素细化分类, 指出了影响断层封闭性的 4 项主要参数, 据此建立相应的断层封闭性定量评价体系。新认识在油气勘探开发实践中得到广泛应用, 取得了良好的效果和经济效益。

关键词: 断层封堵; 模式分析; 定量评价; 油气运聚; 苏北盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

QUANTITATIVE EVALUATION OF FAULT SEALING MODE AND CAPACITY IN THE SUBEI BASIN

Liu Yurui

(Research Institute of Geological Sciences, Jiangsu Oilfield Branch Company, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Faults are well developed in the Subei Basin. The formation of oil reservoir is closely related to multi-control actions of fault passage and fault sealing. Oil reservoirs are mainly complex fault block reservoirs. Based on the analysis of oil reservoir and characteristic of fault seal data set, 4 types of essential sealing modes are developed in this paper, which include butt joint seal mode of sand and mud layer (type A), mixed seal mode of sandstone and mudstone of layers (type B), time match sealing mode (type C), and principal stress sealing mode (type D). Type B, C, and D are further classified by forming mechanism and controlling factors of sealing. According to the above, 4 parameters controlling fault seal and quantitative evaluation system of fault seal are set up, which are widely used in petroleum exploration and exploitation with immediate effect and economic benefit.

Key words: fault sealing; seal mode analysis; quantitative evaluation; hydrocarbon migration and accumulation; Subei Basin

苏北盆地属新生代含油气后生断陷, 断层发育是构造风格的突出特征, 油藏形成都与断层有关, 断层起通道、封闭多重控制作用, 是决定断块成藏的关键因素之一^[1,2]。本文系统建立了适合该区特点的断层封堵评价体系, 在分析油气运移网络、判别聚集方向和描述圈闭质量中应用效果显著。

1 断层封堵类型

苏北后生断陷发育大量正断层、部分走滑断层和逆断层^[3], 因各条断层的几何要素、力学性质、岩性组合、活动期以及与油气成藏期配套等存在差

异, 对油气运移和封闭成藏具有不同的控制作用。根据采集的断层封闭特征数据集, 结合成因机理, 本文将其归纳为 4 类 8 种基本封闭模式。

1.1 砂泥对接封闭型(A 型)

系指断层封闭性由泥岩遮挡形成, 即控制局部构造的断层两侧, 目标盘储层为砂岩或灰岩、玄武岩; 封挡盘为大套泥岩, 多为区域盖层泥岩(图 1A)。由于渗透性储层与断层对盘非渗透泥岩存在很大的毛细管力差, 油气不能横向运移, 纵向逸散有限^[4], 是盆内断层封闭能力最好的一种模式。

盆地下构造层(K_2t-E_1f)发育 3 套区域盖层,

收稿日期: 2009-04-29; 修订日期: 2009-07-31。

作者简介: 刘玉瑞(1962—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事油气勘探生产、科研和管理工作。E-mail: Liuyr@Joeco.com.cn。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目(P02067)。

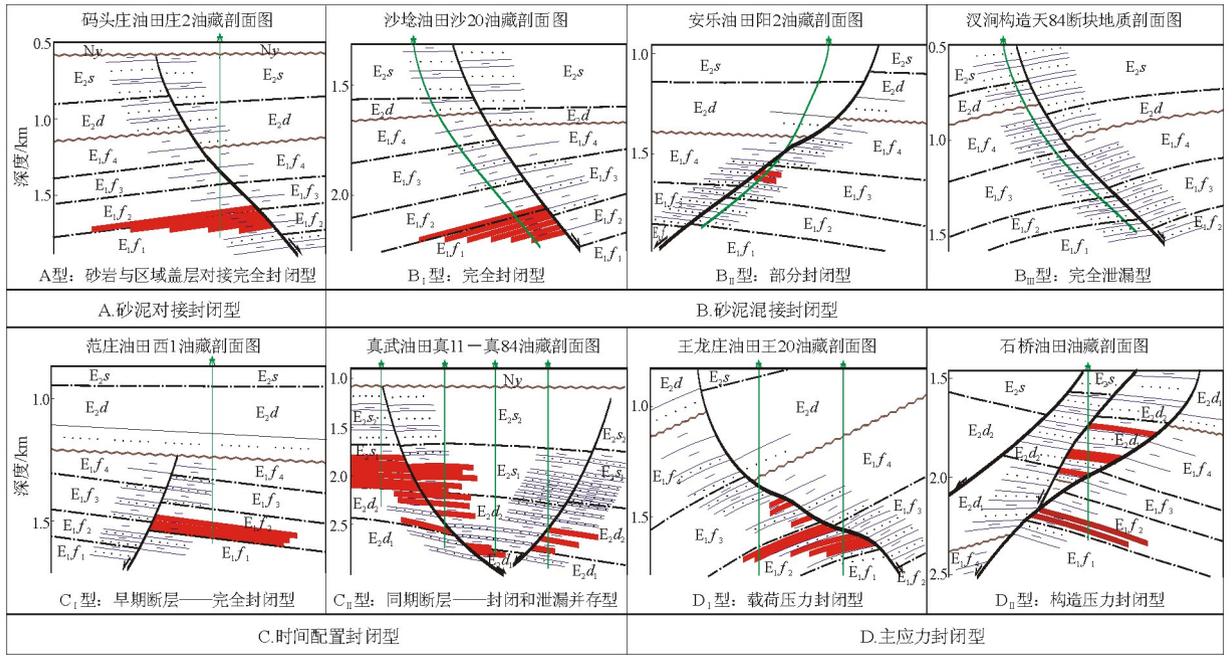


图 1 苏北盆地断层侧向封堵分类

Fig. 1 Types of fault lateral sealing in the Subei Basin

当断层未错开盖层,断距大小与大套泥岩厚度相匹配时,即可构成此类封闭模式,形成了苏北最富集的断块油藏。如高邮凹陷赤码 E_1f_1 油藏,沙埕 E_1f_3 油藏;金湖凹陷崔 8、高 7 块 E_1f_{2+1} 油藏,闵桥 E_1f_3 油藏;溱潼凹陷茅山 E_1f_3 油藏;海安凹陷李堡 K_2t_1 油藏;盐城凹陷朱家墩 E_1f_1 气藏等。

1.2 砂泥混接封闭型(B型)

此类断层封闭性由砂泥岩互层岩性遮挡形成,即控制局部构造的断层两侧,目标盘为储层,封挡盘为砂泥岩互层段,储层既与遮挡层的泥岩对接,又有与渗透性砂岩接触的可能。因遮挡地层段含有渗透性砂岩,并可能与目的盘储层“见面”,且随着砂岩含量增多,见面概率增大,使得断层两侧地层的毛细管力差缩小,油气有可能穿越断面作横向运移和纵向逃逸。

数据集反映,此类断层封闭性与遮挡段砂岩含量密切相关,细分 3 种情况(图 1B): B_I 型为砂泥混接完全封闭式,遮挡段砂岩含量小于 18%; B_{II} 型为砂泥混接部分封闭式,遮挡段砂岩含量介于 18%~37%间,断层封闭具随机性; B_{III} 型为砂泥混接泄漏式,遮挡盘砂岩含量大于 37%,断层基本不封闭。

研究表明,砂泥混接封闭是苏北盆地广泛存在的断层封闭类型。下构造层发育多套区域盖层,泥岩厚度大,多形成 B_I 型封闭,其次是 B_{II} 型封闭。如高邮沙 19 块、沙 20 块、金湖崔 6 块、下 1 块和杨

1 块等 E_1f_{2+1} 油藏都属 B_I 型封闭。中构造层(E_2d — E_2s)发育局部盖层或泥岩相对集中段,多形成 B_{II} 型封闭,也见 B_I 型封闭。如高邮深凹带 E_2d, E_2s 油藏,金湖石港 E_2d_1 油藏。在砂岩含量高、厚度大,泥岩不甚发育的地区,断层以泄漏为主,属于 B_{III} 型。如金湖闵桥 E_2d 断背斜、泥沛断鼻构造带、高邮富民地区的部分断鼻等都没能富集油气^[5]。

1.3 时间配置封闭型(C型)

系指断层封闭性受其活动期与含油系统关键时刻的配置关系控制,即成藏期前停止活动的断层封闭性好;反之,断层可能成为油气运移通道。分析表明,盆内数百条不同性质、规模和活动期的断层,若按活动期与油气运聚成藏期关系,可分早期和同期断层 2 类,形成 2 种封闭模式(图 1C)。

早期断层多数分布在下构造层 K_2t — E_1f_4 中,消亡于 E_1f_4 末,少部分生长在中构造层下部 E_2d 中,消亡于 E_2d_2 末;它们的活动性均早于 E_2s 末油气成藏时刻,且多为 3~5 级断层,是构成圈闭的重要边界条件,对油气运聚具很好的封闭能力,构成时间配置封闭式。如金湖阳 1 块 E_1f_3 油藏,西 1、高 7 和高 6 块 E_1f_{2+1} 油藏;高邮陈 2 块 E_1f_{3+1} 油藏,花 17 块 E_1f_3 油藏,富 126 块 E_2d 油藏;盐城朱家墩 K_2t_1 — E_1f_{1+2} 油气藏等。

同期断层按照发育时间和层位可为 2 类,一类生长于下构造层、一直活动至 E_2s 末(3,4 级断层)或

消亡于 N_{y1} 早期(1,2级断层),属长期断层;另一类发育于中构造层 E_2d 期,消亡于 E_2s 末,属3~5级的中期断层。这2类断层的活动性贯穿于油气运聚期,对油气成藏具有遮挡和沟通双重性作用,一般是高级次断层封闭性好于低级次的,边界断层好于内部断层^[6];其封闭性取决于各种因素匹配关系,将在后面定量评价中进一步阐述。

1.4 主应力封闭型(D型)

此类断层封闭能力受控于所承载的应力特征,即受主应力性质、延伸方向、强度及岩石抗压强度控制。根据控制断层封闭性的力学性质和封闭机制,可分为2种封闭类型(图1D)。

载荷压力封闭式:由上覆地层重力载荷大于断层带岩石抗压强度,使得断面闭合的封闭型式。此类封闭在低缓倾角断层中最常见。

构造应力封闭式:由区域构造压应力使得断面闭合的封闭型式。此类封闭发育于压性、扭性或压扭性的断裂,如石港、吴堡、铜城走滑断裂和崔程逆断层。这些断裂带已在多层系发现富集油藏,其形成与构造压应力产生的封闭因素直接有关^[3]。譬如石港带石4块 E_1f_2 油藏、桥12块 E_2d 油藏,吴堡带陈3块 K_2t 、 E_1f 油藏,崔程带 E_1f 油藏。

2 断层封堵定量评价

目前,国内外尚无定量评价断层封堵的统一方法和标准。究其原因,一是影响因素众多;二是成因机理复杂;三是不同盆地的断层差异性大,定量门槛值不好直接套用。根据苏北盆地多年勘探,本文提出该区断层封堵定量评价4项主要参数。经实践检验,该认识应用效果十分显著。

2.1 砂泥岩含量与断层封闭性关系

实践表明,断层两盘岩性配置关系是影响其封闭性的首要因素。若目标盘被非渗透泥岩遮挡,则断层完全封闭,即便断层处于活动期,仍能有效捕获油气聚集成藏,这也是苏北、渤海湾、北部湾盆地由区域盖层泥岩遮挡的同期断层圈闭普遍成藏的重要原因。当遮挡体为砂泥岩互层时,同期断层封闭性的高低与遮挡体砂岩含量成反相关,即砂岩含量越高、物性好,封闭能力越低;反之,封闭性高。经大量数据统计(图2),获得同期断层不同封闭能力与砂岩含量门槛值关系如下。

2.1.1 砂岩含量小于18%可构成完全封闭

如图2所示,当遮挡盘砂岩含量小于18%时,圈闭全充满,且含油段连续、油柱高度大,圈闭面积等于或接近构造面积,即构造有效性高,反映断层能

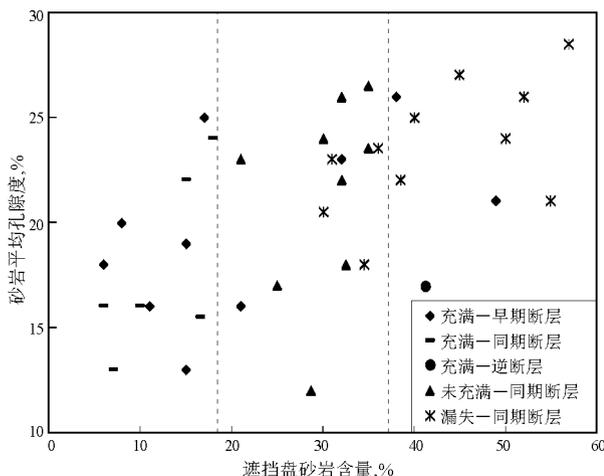


图2 苏北盆地断层封闭性与砂岩含量关系

Fig. 2 Relation between fault sealing and sandstone content in the Subei Basin

有效封闭油气成藏,形成 B_I 型砂泥混接完全封闭。如崔6,卞1,杨1,闵18,沙20断块等,就属此类封堵形成的富集油藏。表明同期断层圈闭,遮挡体砂岩含量是影响圈闭有效性和油气充满度的重要因素之一。

2.1.2 砂岩含量18%~37%可形成部分封闭

当遮挡盘砂岩含量介于18%~37%时,同期断层控制的圈闭面积均小于构造面积,即便圈闭处于油源丰富的地区,圈闭充满度依然低于前者,且油层段常不连续,油水层间互,油柱高度较小,即构造有效性属中等—低下。反映断层部分层段封闭,部分层段开启,封闭性具不确定性,构成 B_{II} 型砂泥混接部分封闭式;且随砂岩含量增高、物性变好,断层封闭能力下降,含油带变窄。

2.1.3 砂岩含量大于37%成为泄漏通道

当遮挡盘砂岩含量大于37%时,同期断层基本成为泄漏通道,断块捕获油气成藏的能力很低,多属无效构造,构成断层 B_{III} 型砂泥混接泄漏式。

需要说明,以上砂岩含量门槛值不是绝对界限,而是统计估计值。

2.2 断层活动史与断层封闭性关系

断层封闭性与活动性密切相关早已为国内外所证实。定量评价两者关系,可通过断层生长史和油气运聚史配置关系来考察。根据地震资料反映,盆地发育 K_2t_1 — E_1f_4 期、 K_2t_1 — E_2d 期、 K_2t_1 — E_2s_2 期、 K_2t_1 — N_1y_1 期、 E_2d 期、 E_2d — E_2s 期和 E_2s 期等不同生长史的断裂体系,与成藏期构成了不同配置关系。

地化指标和生烃史研究证实,盆地拗陷期建造了 K_2t_2 、 E_1f_2 和 E_1f_4 3套优质烃源岩,其成熟演

化生烃主要受控于后生断陷期 E_2d 、 E_2s_2 的沉积埋藏史。地化和数百个有机包裹体资料反映,3 套烃源岩成烃史和运聚成藏期有差异,同套烃源岩也有先后,如次凹早、斜坡晚^[2,7];但 3 个含油系统成藏期分布在 43~25 Ma 之间,主要在 41~28 Ma,相当于 E_2s_2 沉积期至三垛事件期。

可见,按成藏时刻下限 43 Ma 为界,断层此前结束活动的,如 K_2t_1 — E_1f_4 期、 K_2t_1 — E_2d 期、 E_2d 期断裂体系都属早期断层;其后仍活动的,如 K_2t_1 — E_2s_2 期、 K_2t_1 — N_1y_1 期、 E_2d — E_2s 期和 E_2s 期断裂体系则属同期断层。这 2 类断层表现出明显不同的封闭性和通道性能力,具体差异如下。

2.2.1 43 Ma 前消亡的早期断层纵横向完全封闭

主要证据有:①断层起油气运移分隔槽作用,即断层一侧可能出现无油气运移的盲区。如高集早期断层东侧油气显示十分活跃,油藏富集,其西侧构造更高,钻探却不见显示,说明油气不能跨断层横向运移。②圈闭油柱高度与控藏断层规模无关(图 3),如高 11 油藏最大断距 110 m、油柱 290 m,阳 1 油藏断距 90 m、油柱 35 m;也与遮挡层砂岩含量关系不明显,如图 2 所示。③油藏富集程度受控于断块幅度,小断层可高富集油气,圈闭充满度高。如图 3 早期断层油藏油柱高度普遍大于断距,而同期断层则全部小于断距;陈 2 块断距 500 m、构造幅度 140 m,西 1 块断距 40 m、构造幅度 97 m,这两圈闭都满充。④油藏油砂层或油砂组油水系统不一,分布复杂,反映油气是自圈闭低部位注入,单砂体独立成藏,断层纵向欠连通性,封闭性好。

由此表明,早期断层纵横向具良好封闭能力。

2.2.2 43 Ma 后仍活动的同期断层具封通双重性

数据集反映,贯穿油气运聚期断层具典型的相对封闭和通道双重性。封闭性体现为:一是断层活动时期很多断块照样捕获油气聚集成藏。譬如,1,2 级边界断裂和许多 3 级断裂既作油源通道,又是控制油藏圈闭的边界。二是断层纵横向呈现局部有限封闭,如断块油气显示段长,而油柱高度较小,都不大于控藏断距,如图 3 所示。油柱受构造幅度、断距、溢出点和遮挡共控,若构造幅度小于断距,断层属 A 型、 B_1 型封闭的,油柱可接近于幅度。如韦 2 油藏为 A 型封闭,断距 150 m,油柱 150 m;崔 6 油藏为 B_1 型封闭,断距 180 m,油柱 160 m;若构造幅度大于断距,断层为 B_0 型封闭,油柱介于断距最大值与最小值之间。同时,纵向又能形成原生油藏叠置富集区,如图 1C_{II} 所示。三是封闭与通道具脉动式转换特征,断层在活动强烈期纵向具突发开启

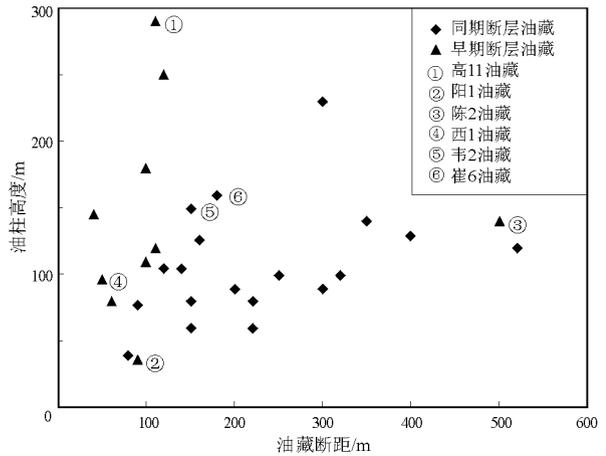


图 3 苏北盆地油藏油柱高度与断层活动性关系

Fig. 3 Relation between oil column height and fault activity in the Subei Basin

性,或者油藏浮力超过断层带排驱压力临界值,断面可突发性开启,油气沿油藏顶部溢出;当断层活动强度降低或油藏的剩余浮力又达到封盖平衡时,断面纵向重新封闭。反映在叠置油藏区下部原生油藏密度重,上部次生油藏密度轻的正常聚集规律,说明溢出点在油藏顶部,溢出上部轻质组分,如下东油田下伏 E_1f_{2+1} 油藏重,上覆 E_1f_3 油气藏轻。

通道性表现为:一是断层起油气运移纵向通道和横向沟通作用,如油气沿斜坡穿越阶梯状断层,横向运达 25 km 之外成藏,沿断层面可在垂向数千层段内分布,如图 1C_{II} 型;若断层属 B_{III} 泄漏式,断块难聚集油气;二是断块油藏存在 3 处溢出点,构造低部位、断面低点和断面顶点,可形成 2 类油水系统油藏。若属 A 型或 B_1 型封闭圈闭,无论油气自构造低部位或断面注入,层状或块状储层皆形成统一油水系统油藏,含油带宽;如杨 1、庄 2 油藏等,说明断层起循环通道使得分隔的层状储层变成同一压力和流体的圈闭体系;这点与早期断层圈闭层状储层,只能形成多油水系统的层状油藏不同。若属 B_{II} 或 C_{II} 型封闭圈闭,存在横向溢出点时,则形成多油水系统层状油藏,含油带较窄,如沙 26、沙 19 块油藏,以及大量的 E_2d 、 E_2s 油藏。

2.3 断面闭合压力与断层封闭性关系

断层面紧闭程度、微裂缝发育程度和充填状况是判别断层封闭与否的主要参数。对第三纪盆地而言,岩性塑性大,裂缝易于闭合。因此断层面闭合度成为判别断层封闭性的关键参数。若断面紧闭,则断层纵向封闭,可阻挡油气纵向运移;否则,断面开启,成为流体运动通道。断面闭合度可用断面所受正压力大小来衡量,若正压力大于岩石抗压

3 结论

苏北后生断陷油气藏以断鼻、断块型为主,次有断层一岩性型,断层作用对成藏至关重要。通过解剖已钻目标和油藏,系统分析了断层封闭性和通道性对油气成藏作用的主要特征,首次建立了适合苏北盆地特点的断层封堵 4 类 8 种基本模式和定量评价体系,成果在油田勘探开发中广泛应用,取得显著效果:一是明显提高了圈闭描述质量,断层封闭性评价准确率提高了 16%,降低了目标钻探风险;二是利用它精细刻画油气运移网络,指导老区资源挖潜,特别是为建立苏北它源隐蔽圈闭勘探选区、成藏机理奠定理论基础,取得数千万吨石油探明储量的硕果;三是根据早期断层封闭性好的特点,提出早期小断层或隐蔽断层圈闭可富集成藏的新观点,经实践取得花 17,富 126,天 79 等一批新发现,培养出油田勘探接替重大新亮点。

断层封闭性的影响因素很多,要准确判别断层对成藏控制作用是一项十分复杂的工作,它既没有放之四海的标准,也没有一成不变的模式。因

此,多种因素综合分析,定性和定量兼顾,结合本地不断实践、深化机理认识,并建立适合本地的数据集和封堵模式,是提高断层封闭性评价水平和复杂断块油藏勘探成功率和开发效果的关键。

参考文献:

- 1 钱基. 苏北盆地油气田形成与分布[J]. 石油学报, 2001, 22(3):12~16
- 2 毛凤鸣. 苏北盆地复杂小断块成藏特征及地震识别技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6):827~839
- 3 刘玉瑞, 刘启东, 杨小兰等. 苏北盆地走滑断层特征与油气聚集关系[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3):279~283
- 4 王建国. 烃类垂向微渗漏近地表显示与运移通道的关系[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3):302~306
- 5 肖秋生. 岩样核磁共振分析方法及其在油田勘探中的应用[J]. 石油实验地质, 2009, 31(1):97~99
- 6 俞凯. 苏北盆地溱潼凹陷草舍油田 CO₂ 混相驱技术研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2):212~216
- 7 侯建国, 任丽华, 董春梅等. 有机包裹体技术在油气运移与聚集中的应用研究[J]. 石油实验地质, 2005, 27(4):409~41
- 8 马立祥. 断层封闭性在油气系统边界划分中的应用[J]. 石油实验地质, 2001, 23(1):78~82

(编辑 黄娟)

(上接第 530 页)

间,大于普光气井。因此,推测建南气田天然气藏形成早于普光气田。

4 结论

1)自制天然气中稀有气体纯化富集装置,并与四极杆质谱计联机使用,建立了天然气中⁴He 丰度的分析方法。结果表明该方法具有较好的准确性和重复性。在以上工作的基础上,通过实验室间样品分析比对,进一步证实了该套方法的适用性。

2)应用该方法分析了普光和建南气田部分天然气样品,结果表明,天然气中放射性成因的⁴He 丰度对天然气源岩时代和气藏形成年代研究具有

一定的指示意义。

参考文献:

- 1 刘文汇,陈孟晋,关平等. 天然气成藏过程的三元地球化学示踪体系[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(7):908~915
- 2 孔令昌. NG-1 型全金属稀有气体纯化和质谱分析系统[J]. 质谱学报, 1992, 13(1):50~56
- 3 孙明良. 影响烃类天然气中稀有气体同位素准确测量的干扰因素与消除途径[J]. 质谱学报, 2001, 22(2):46~52
- 4 徐永昌,沈平,刘文汇等. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1998
- 5 刘光祥,陶静源. 川东北及川东区天然气成因类型探讨[J]. 石油实验地质, 2002, 4(6):512~516

(编辑 韩或)