

① 73-78

论压力封存箱及其对次生孔隙的保护作用

祝总祺 苗建宇 刘文荣 卢焕勇

(西北大学地质学系, 710069, 西安; 第一作者 63岁, 男, 教授)

P618.130.8

A 摘要 讨论了流体异常压力封存箱的形成和演化特征及其对岩石中孔隙的保护作用。研究表明, 流体异常压力封存箱对孔隙的保护作用主要概括为3个方面: ①压力封存箱的存在不仅可保护次生孔隙也可以保护原生孔隙; ②压力封存箱对次生孔隙的保护是有条件的; ③在压力封存箱的保护下, 深部地层中的孔隙, 特别是次生孔隙不会很快地消失。通过对济阳拗陷下第三系中的压力封存箱与次生孔隙发育带的分析, 提出了箱内的、箱缘的、箱侧的和整合面以下与风化壳有关的4种次生孔隙发育带基本的地质模式。

关键词 流体异常压力封存箱; 次生孔隙; 济阳拗陷

分类号 P618.3

油气勘探

保护作用

在深层油气勘探中, 储集层研究的焦点是什么? 成岩作用的早期研究成果几乎完全排斥了深部储层存在的可能性。Schmidt 和 Medonald 的有关砂岩中次生孔隙的著名论文引起了人们的广泛注意^[1], 并越来越被人们所重视。作者注意到, 在讨论次生孔隙的许多论文中, 人们普遍地钟情于成孔作用, 而对孔隙的保护却有意无意地被忽视了, 据笔者所知, 对次生孔隙的保存问题至今尚未有过专门的论著。其实, 从一定意义上讲, 孔隙的保存问题较之形成更为重要。本文拟从流体异常压力封存箱 (Abnormally Pressured Fluid Compartment) 理论探讨深部储集层孔隙的保护作用, 特别是对次生孔隙的保护作用的有关问题, 并根据胜利油田的资料, 归纳出若干种深部次生孔隙发育带的地质模式。

1 压力封存箱的概念

1.1 流体异常压力封存箱及其特征

随着油气勘探深度的日益加深, 异常压力已经不是孤立的现象了, 它显然是由于封闭的形成, 阻碍了流体穿过其边界进行液压传递才出现的。早在1975年, Bradley 就注意到, 流体封闭是三维上完全被封闭的密封单元。1980年, Powley 第一次提出“流体异常压力封存箱”这一术语。时隔10年之后, J. M. Hunt 把这一思想运用于探讨油气的分布, 并描述了它们的特征^[2]。流体异常压力封存箱(以下简称压力箱)有以下特征。

(1) 在空间上是完全被封闭的密封单元, 箱内流体处于封闭层的严密包围之中, 与周围缺乏充分的液压传递, 呈现出滞流和超压现象。

(2) 箱顶近乎水平, 通常是由沿温跃层分布的矿化带组成。密封层可以是单一岩性(如泥岩), 也可以是非单一岩性, 且可以无选择地切过各种构造、相、组, 具明显的穿时性。

(3) 深层的超压系统与上部地层中的正常压力系统构成盆地内水动力体系典型的双层结构。

1.2 压力封存箱的形成

据统计, 目前已在世界上180多个盆地内发现了非正常压力(Hunt, 1990), 其中虽有异常低的地层压力, 但多数盆地中都表现为超压。综观这些超压现象都形成于有着巨厚的沉积物、沉积速度快的盆地

中。快速沉积是导致沉积物不均衡压实,产生欠压实的直接原因,并把一部分上覆负荷的压力转移到由孔隙内的流体来承担,从而出现超压。岩性的横向变化或断层遮挡(特别是大的同生断层)是构成流体侧向封闭的重要原因。

超压可以发生在含油气盆地内,也可发生在非含油气盆地之中。众多的资料表明在含油气盆地中,处于深部超压状态下的泥质岩往往是富含有机质的烃源岩。烃源岩成烃作用在压力封存箱的形成中有着特殊的意义,主要表现在:①在有机质成熟过程中释放出有机酸和二氧化碳,使邻近砂体发生溶蚀作用,形成部分次生溶孔,并在其上方大体上同一深度重新沉淀形成碳酸盐矿化带,构成封存箱的顶部密封层;②生烃过程中产出的烃类进入邻近砂层后,对砂体内的成岩有抑制作用;③调整箱内的压力分布。控制烃源岩成熟作用的温度还会影响压力箱顶出现的深度。

深层的超高压系统与浅层的正常压力系统构成了沉积盆地内部水动力体系特定的景观——双层结构。它们分别拥有各自的流体流动特征。

压力封存箱形成所产生的直接效果是:由原来颗粒支撑的一部分地层负荷转移为由地层流体来支撑,减缓了储层的机械压实作用,对孔隙起到了保护作用。显然,这种保护作用不仅仅局限于对次生孔隙,对原生孔隙同样有效。S. A. Dixon(1989)在研究南阿拉巴马州埋深在 6 000 m 以下的上侏罗统诺弗利特(Norphlet)高孔隙度超压砂岩(孔隙度达 20%)时就认为,被保存下来的是原生孔隙,并非次生孔隙。朱国华也认为轮南地区 6 000 m 深处的石炭系砂岩高孔渗储集层的孔隙是原生的。考虑到超压对孔隙的保护作用,不能认为:埋藏深了原生孔隙必遭破坏,而深部发育的高孔隙层一定是次生作用形成的。

1.3 3种压力封存箱与次生孔隙形成模式

从上述可知,压力封存箱的形成是一种简单的物理效应,而次生孔隙的形成则是化学反应,二者之间没有必然的联系。但在含油气盆地中,这两种作用又往往交织在一起。根据它们的形成时间有 3 种可能的情况。

(1)次生溶蚀作用发生在先,而欠压实和地层异常高压形成(或压力封存箱)在后。此种情况主要发生在地温高,沉降速率相对较低的含油气盆地中。在此种情况下,先期形成的次生孔隙可最大限度地保存下来,成为压力封存箱内有利的次生孔隙发育带。

(2)次生孔隙的形成和异常压力同步或差不多同时发生,在箱体上部及顶界上下形成次生孔隙发育带。这种情况多发生在地温条件与沉降速度配合协调的含油气盆地内。

(3)在快速沉降和地温条件又较低的含油气盆地中,利于次生孔隙形成条件的出现将大大滞后于欠压实和流体异常高压带(或压力封存箱)的形成。由于异常高压带(或压力封存箱)对流体的流动有阻碍作用,不利于大型次生孔隙带的形成和保护,箱内压力的局部性调整只能引起内部孔隙的重新分配,除非有断层参与,打破箱内的压力系统,引起压力释放。因此,压力封存箱保护次生孔隙是有条件的。

1.4 压力封存箱内的次生孔隙能否长期获得保存?

有人认为,次生孔隙形成以后仍受压实作用的破坏,深层砂岩的次生孔隙只是一些幸存者,而且,随着埋深的加大,它们连同原生孔隙一起都将达到不可压缩的程度。这种认识显然是忽略了流体异常压力对次生孔隙的积极作用,至少是对此估计不足。笔者认为,正确回答上述问题必须从压力封存箱的演化中去寻求。

在一个连续沉降的含油气盆地中,压力封存箱的孕育和发展将按下列途径进行。

(1)沉积物埋藏初期,这一阶段不会出现欠压实。当埋藏迅速加大,上覆负荷急剧增加,在细粒沉积中将引起排液不平衡,边缘部分因脱水速度快,孔隙度迅速降低,致使沉积物中心部位的孔隙水无法顺利、协调地排出,并把一部分上覆地层的重量转移到由细粒沉积内的流体承担,于是泥岩开始显示出流体压力异常。这是流体异常压力形成的初始阶段。这一阶段的特点是埋深不深(一般 $<1\ 000\text{ m}$),异常压力的幅度不大。

(2)随着埋深的进一步加大,烃源岩步入成熟门限,干酪根开始转化成烃,并向邻近砂岩运移。与此同时,温压的增高促使部分粘土矿物脱水,这部分水也要流向邻近砂岩,于是出现了一方面是排液不畅,另一方面孔隙中流体又在不断地增加的局面,这是孔隙流体压力增大的重要时刻。C. N. Spences(1987)

认为,烃类的生成作用是形成落基山地区大多数盆地内超压储集层的重要原因^[3]。这一阶段的特点是,流体异常压力出现在生油门限以下,强度将由于烃类和粘土层间水的补充而提高,从而使压力封存箱的封闭性得以充分地显示出来。这个过程将持续到生油高峰期。

(3)埋深继续增大,地层温度随之升高,孔隙流体的体积发生膨胀和一部分液态烃向小分子量方向演化引起的流体体积增量都将导致孔隙流体压力增长。这是箱内流体压力第三次增加。该带位置相当深,一般均在3 000 m以下,地层温度高于100℃。

(4)当埋深很大,进入高温高压的情况下,烃类发生裂解大量产生甲烷,使气体体积增加,孔隙内流体压力再度升高。据Colin Barker(1990)测算,1桶原油可以转化成85~113 m³的甲烷,并能产生很高的过剩压力^[4],使封闭系统中拥有极高的超压。

由此可见,地质体内形成的流体异常高压在垂向上可以不止一次地实现,不同条件下引起流体压力增大的机制也不相同。在含油气盆地内,第二、三、四次高压的形成有着成因上的内在联系,它们都是与烃类的演化相关联的。这一点与非含油气盆地是有差别的。此外,含油气盆地内异常高压形成的多阶段性也是显而易见的,因此,只要具备上述有利条件,深部地层中的孔隙,特别是次生孔隙不会因压实而很快消失,至少在烃类甲烷化结束之前,它们都将获得有效的保护。

1.5 断层的作用

同生断层具有两重性。它既能作为流体运移的通道,又能起遮挡作用,这一点早为一些学者所认识(Chapman 1981, Seeburger 1981, Hooper 1991)。大型同生断层的特点是同生性和继承性,断面上陡下缓,呈犁式,最终消失在塑性地层中。因此,尽管它们都是正断层,但在力学机制上,上部具张性,下部则为压性。断层上部可以是开启的,到深部可能转变为封闭的。这一特性对深部形成压力封闭,浅层产生次生溶孔极为有利。就一条断层而言,当断层活动时,它的开启程度将变得好起来,有利于流体的流动;当有酸性溶液进入上部地层时,在断层附近将产生次生孔隙;当断层进入间歇期,开启程度降低,地层内的流体重新处于滞流状态,积累能量,直至断层再次活动;新的酸性溶液再次注入,溶解作用重新活跃起来。因此,如此周而复始,长期活动的同生断层附近发育的次生孔隙可能不是一次性成岩事件的产物,而是多期累积的最终结果。同时,断层在压力封存箱和次生孔隙形成中的作用也可能是相互消长的。即开启时,压力释放,流体外流,压力箱暂时受到破坏,但有利于次生孔隙的形成;一旦断层闭合,地层内流体流动受阻,能量重新积累,压力箱得到恢复,但次生孔隙亦因溶蚀作用中止而停止发育。L. F. Jansa (1990)将这种机制称之为“动态的成岩封闭机制”^[5]。

2 济阳拗陷下第三系中的压力封存箱与次生孔隙

济阳拗陷是我国东部在中生界基础上发育起来的一个大型复式箕状断陷盆地,凹陷最深处第三系厚度可达7 000~8 000 m。沉积物主要为陆源砂泥岩,个别层段见有碳酸盐岩, E₃下部及 E₁上部在局部地区发育有膏盐沉积,沉积速率0.4~1.0 mm/a。E₃段是本区的主力生油层系, E₂, E₃上和 E₃也具有一定的生油潜力,地温梯度较高(3.0~3.8℃/100 m), E₃烃源岩的生油门限在东营凹陷为2 200 m,沾化、车镇为2 400 m,惠民为2 500 m。生油岩的热解模拟实验和有机酸溶解实验证明有乙二酸、乙酸等多种有机酸产生^[6],对长石、碳酸盐具有明显的溶解效应。这种地质条件对次生孔隙和压力箱的发育十分有利。

声波时差和实测压力资料显示,济阳拗陷内部存在着一个宏大的异常高压带。其范围涉及东营、沾化、车镇凹陷和惠民凹陷的南部,隆起的分隔使他们彼此不沟通,各自拥有独立的压力体系。以研究最详的东营凹陷为例,异常高压带的顶界一般在2 300~2 400 m上下,大体上与覆盖在 E₃湖相泥岩之上的 E₃¹⁺²大型三角洲砂岩体底界相一致。由于砂岩底部是一条穿时的岩性界线,故异常高压带的顶界亦具有穿时性,而且从盆缘向盆内顶界层位有所抬高。据少数钻穿高压带的钻井资料,斜坡前缘的高压带厚度一般为300~500 m,深凹部位厚度增至4 000 m,陡坡一侧常为同生的盆倾断层所限。所以异常高压带实际是一流体异常压力封存箱,这一分布特点显然是盆地不对称性的反映。箱内地层包括 E₃中一下、

E_5^1 和 E_4^1 段上部杂色膏盐段。压力系数在 1.4 以上,个别层段可达 1.8~2.0。

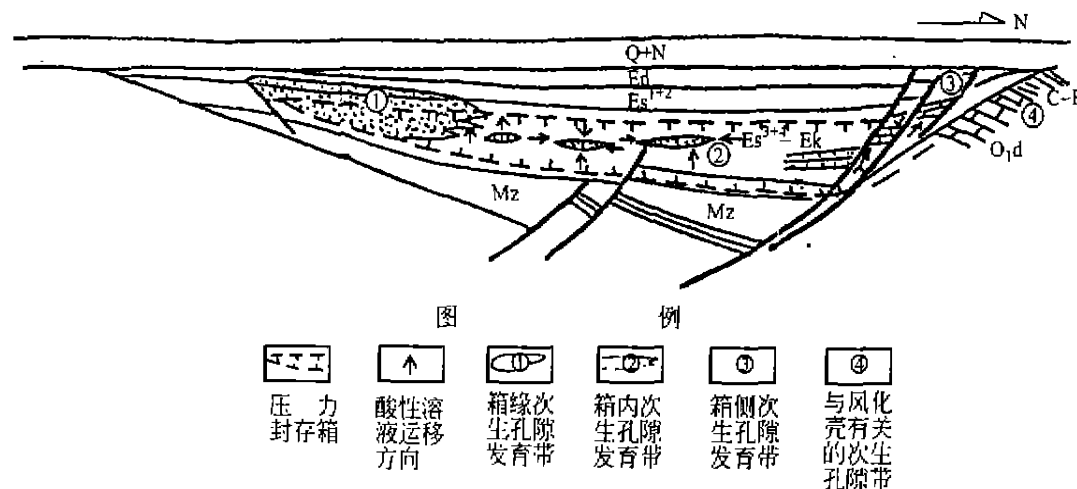
沾化凹陷由于渐新世晚期—新第三纪早期继续大幅度地沉降,所以高压带的分布几乎遍及整个凹陷的深洼区,顶界在 2 500 m 左右,层位比东营凹陷新。 $E_5^1, E_5^2, E_5^3, E_4^1, E_4^2, E_4^3$ 甚至部分中、古生界潜山也被卷入异常高压体系。惠民凹陷的异常高压带只发育于凹陷西南的临南地区,其他地方或因后期沉降幅度小(如里则镇洼陷)或因缺乏有效的密封层(如磁镇、阳信洼陷),故未形成异常高压。

济阳拗陷储集层中次生孔隙发育相当广泛,碎屑岩次生孔隙发育带一般出现在 2 000 m 以下,集中在 2 000~3 000 m 井段,但 4 000 m 以下的砂岩中仍可见到次生孔隙的存在(如渤深 4、义 115、新东风 10 井)。碳酸盐岩储集层似乎不受此深度的严格限制。埋深在 1 500~2 000 m 的 E_5^1 碳酸盐岩储集层中次生溶孔亦很普遍,最深的见于桩古 1 井 3 960 m 的奥陶系中。从层位上看,次生孔隙主要发育于 E_5^1, E_5^2-3 和 E_4^1 段上部, E_4^1 组可能也有一定的发育,而在东营组以上的地层中则以原生孔隙为主。古潜山带区次生孔隙的发育层位可下延至中生界,乃至下古生界和太古界。

拗陷内次生孔隙类型十分丰富,其中,下第三系的储层内以有机反应所形成的次生溶孔占主导地位。

综上所述,济阳拗陷次生孔隙发育带出现的最浅深度基本上与生油门限深度、异常高压带的起始深度相一致。可以推想,它们的形成在时间上是同步的。次生孔隙带、生油门限和异常高压三位一体是济阳拗陷含油气区的一个重要特色。这种同步性正如前述对次生孔隙的形成和保护都是十分有利的。

综合本区的次生孔隙,可归结为以下 4 种基本的地质模式(图 1)。



附图 有利次生孔隙发育带地质模式图

Fig. Geological Model of Favorable Secondary Pore Zones

2.1 箱内次生孔隙发育带模式

此种次生孔隙发育带广泛存在于 E_5^1 中、下。以深湖—半深湖相沉积为特征的 E_5^1 , 在巨厚的泥岩中夹有大量的浊积砂体。该砂体是烃源岩成熟过程中释放出大量有机酸的优先接受者,并发生溶蚀作用。当沉积物的埋深尚小,封存箱的密封体系尚未建立完善时,被溶物质尚允许外逸。但由于这些砂体基本上是一些孤立的、横向上缺乏联系的小砂体,所以,外逸只能是部分的,有限度的。密封系统一旦建立,它们与外界的沟通将被割断,砂体内的次生溶解作用将随着溶液日趋饱和而终止,随之以胶结物的形式重新析出,形成系统内部孔隙的再分配。此时,砂体内孔隙量不会产生大幅度的增长。一旦烃类进入,并在储集层内发生聚集,次生溶蚀作用将被抑制。另一方面,由于孔隙砂体四周的湖相泥岩同样处于欠压实和异常高压的状态之下,对砂体构成有效的封闭,保证砂体中充满高压流体的孔隙空间免遭进一步压实。只有在发生断层的情况下,孔隙内流体才局部与外界沟通,压力释放。

属于这一类的如牛庄油田的 E_5^1 中、下油气藏、渤南和梁家楼 E_5^1 中浊积扇油气藏、营 11 断块 E_5^1 中深水浊积砂油藏等。

2.2 箱缘次生孔隙发育带模式

此种模式以东营凹陷 E_3^s 上部最为典型。东营凹陷在经历了 E_3^s 早期的湖相沉积发展鼎盛时期后普遍接受了三角洲沉积,随着沉积物的逐渐埋藏, E_3^s 中、下的烃源岩不断地将干酪根中所含的氧以有机酸和二氧化碳的形式脱出与沉积水一起被压入上覆地层,使上覆地层中的酸溶性物质发生溶解。这种情况并不能持久,因为下伏的厚层泥质岩很快进入了欠压实状态。随着烃源岩的进入生油门限,干酪根开始转化生成烃类,一部分粘土矿物亦开始脱水,逐渐在泥岩中形成流体异常高压,驱使烃类、水以及有机酸再次向上覆三角洲砂体排放。由于该三角洲砂体分布面积广,且拥有良好的孔渗性,流体可以大规模地运动,把被溶物质带出反应系统,因而,砂岩中形成的次生孔隙带不仅范围大,而且孔隙个体大,孔隙内极少有新生矿物沉淀。如胜坨油田 E_3^s 上砂岩储集层。此种次生孔隙发育带往往发育于压力封存箱的顶部。由于它的形成受岩性组合关系的严格限定,主要在深水湖盆转化为砂体侧向进积的特定环境之中。渤海洼陷内由于缺乏这种组合,因而不可能出现这种类型的次生孔隙发育带。

2.3 箱侧次生孔隙发育带模式

此类次生孔隙发育带通常发育于构成压力封存箱侧向封闭的同生断层的外侧,由水下扇或浅水滩相组成的断阶带上。巨大的断层落差必然在断层两侧造成沉积物性质、厚度和埋藏条件诸方面的巨大差异,因此,位于外侧的储集岩体在地质发展的进程中有机会与内侧的多套生油层系依次相遇,形成次生孔隙。多期性和阶段性是此类次生孔隙带的明显特点,它的规模除了受下降盘一侧生油层系发育程度的制约外,储集岩体本身的孔隙性亦有很大的影响。断层附近的破碎带可为次生孔隙的发育增添新的空间,但由于这类次生孔隙发育带多位于压力箱的外侧,不受压力封存箱的直接保护,所以形成的次生孔隙不可避免地会受压实作用不同程度的损害。

沾化凹陷的义东油田和东营凹陷的平方王油田 E_3^s 上油气藏可作为此类次生孔隙发育带的典型例子。

2.4 不整合面以下与风化壳有关的次生孔隙发育带模式

此类次生孔隙发育带主要见之于下古生界碳酸盐岩中(古表生作用是产生各种溶孔的主要途径),上面被石炭—二叠系地层覆盖。中生代以来,强烈的燕山运动使华北地台解体,形成了高低不一的一系列块断山,在低洼地区接受了第三系沉积,形成古潜山。

这种次生孔隙发育带不同于前三类都与烃源岩的成熟作用有关,所以,它们能否成为下第三系油气聚集的有效场所将取决于它们与烃源岩之间是否能建立某种联系。如通过断层或不整合面把它们沟通起来,则不仅可为油气,而且也可为酸性溶液进入储集体提供通道。它们的进入,必将产生新一轮溶解作用,并产生新的次生孔隙。这类次生孔隙带不仅规模大,而且层系多、产量高,目前仅在义和庄、桩西、滨南、垦利等少数几个油田见到。桩西油田已被证实为一个亿吨级的大型油气田。考虑到加里东运动在整个华北地台上是一次极重要的区域性次生孔隙发育期,它应是济阳拗陷深部寻找油气资源的一个重要领域。

流体异常压力封存箱理论有利于了解箱内的油气生成和运移形式,对次生孔隙的形成与保存从理论上得到了合理的解释,并为预测深部次生孔隙发育带提供了一种途径。

参 考 文 献

- 1 Schmidt V, McDonald D A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. SEPM Specpub., 1979, 25, 209~225
- 2 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormal pressured fluid compartments. AAPG, 1990, 74 (1), 1~12
- 3 Spencer C W. Hydrocarbon generation as a mechanism for overpressuring in rocky mountain region. AAPG, 1987, 71 (4), 368~388
- 4 Barker C. Calculated volume and pressure changes during the thermal cracking of oil gas in reservoirs. AAPG, 1990, 74(8), 1 254~1 261
- 5 Janas L F, Urrea V H N. Geology and diagenetic history of overpressured sandstone reservoirs, Venture Gas Field,

Offshore Nova Scotia, Canada. AAPG, 1990, 74 (10): 1 640~1 657

6 袁佩芳, 卢焕勇, 祝总祺等. 济阳拗陷下第三系烃源岩的热解实验. 科学通报, 1996, 41(8): 728~730

责任编辑 张银玲

The Pressured Fluid Compartment and Its Preserving to Secondary Pores

Zhu Zongqi Miao Jianyu Liu Wenrong Lu Huanyong

(Department of Geology, Northwest University, 710069, Xi'an)

Abstract The formation and evolution feature of abnormally pressured fluid compartment discussed as well as its preserving to secondary pores in rocks are discussed. The study demonstrates that the preservations resulted from the compartment sum up three aspects as follows: ①The compartment keep not only primary pore, but also secondary pore; ②It is in specific conditions that the compartment can preserve secondary pore; ③Under protecting of the compartment, the pores in buried deeply rocks are kept from disappearing rapidly, especially secondary pore. It is suggested that the basic geological models be classified into four types: inter-compartmental, margin-compartmental, side-compartmental secondary pore zones and zone of secondary pore relating with weathering crust.

Key words abnormally pressured fluid compartment; secondary pore; Jiyang Depression

· 学术动态 ·

“综合地质物化探多参数直接探测油气理论与方法 与效果”获国家教委科技进步二等奖

由我校地质系姜洪训教授等人完成的“综合地质物化探多参数直接探测油气理论与方法与效果”科研成果最近荣获 1996 年度国家教委科技进步二等奖。该项成果已完成应用性重要科技项目 9 项, 公开发表论文 10 余篇, 正式出版专著 1 部。其中以专著《综合地质物化探多参数直接探测油气理论与方法》为代表, 是姜洪训教授及其合作者在多年从事“综合地质物化探直接找油”理论研究与应用实践的基础上完成的, 书中系统全面地论述了综合运用地质、物探、化探多参数直接探测油气藏的理论、方法和勘探效果, 着重阐述论证了石油地质、油气非常规物探、化探和核探在直接找油方面的内在联系、勘探原理、存在问题及实现二维与三维预测的方法、途径等, 建立了多参数直接找油的综合解释方法和步骤。将地质、地球物理、地球化学结合起来综合论证研究直接找油问题, 在我国尚属首次。

早在 80 年代, 姜洪训教授就提出了“综合地质、物探、化探多参数直接找油”的新思路, 并在六大含油气盆地投入了较大规模的勘探实践, 均取得良好的效果, 在石油地质界产生了较大影响。近两年来, 他们在以往研究的基础上, 及时总结了近年来的科研成果, 进行了大量的调查研究、资料收集、理论探讨和方法试验, 进一步发展和完善了这一新兴学科, 完成了这本专著的撰写工作, 其中主要论据均来自他们的一手资料。该书内容丰富, 资料新颖, 研究方法独特, 其理论体系符合当代石油地质科学发展趋势, 且具有重要的理论意义和良好的勘探效果, 受到同行专家的一致好评。北京石油勘探开发研究院副院长田在艺教授在该书的序言中称其为“一本难得的好书, 其哲学思想之严密、理论方法之新颖独到, 技术上的创新和应用效果之显著, 在国内外同类著作中居领先地位。”

目前, 以该书为代表的这项科研成果在石油及天然气系统各科研和生产单位受到广泛的欢迎和运用。

(隆 平)