

沉积盆地后期改造及对油气赋存成藏的影响

秦阳, 杨丽华, 刘池洋

大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安, 710069



内容提要: 中国大陆由多个块体拼接而成, 结构复杂而不均一, 经历了多幕次构造运动, 活动性强。特殊的构造位置使得中国沉积盆地后期改造强烈而普遍, 这是中国沉积盆地有别于世界其它盆地的显著特点之一。油气作为流体矿产, 后期改造对油气赋存、成藏和分布具有显著的影响。后期改造是研究盆地演化、构造特征和油气资源评价不可或缺的内容。1998年召开的“改造型盆地油气勘探理论、方法及关键技术研讨会”, 推动和引发了我国油气业及学术界对盆地后期改造、改造型盆地及其油气勘探诸方面的研究和关注。笔者等通过对国内外有关后期改造和改造型盆地已有研究成果的梳理和总结, 综述了后期改造、改造盆地的研究进展, 及其对常规油气赋存—成藏的影响、晚期成藏—定位和对非常规油气特殊影响等相关内容。

关键词: 后期改造; 改造盆地; 油气赋存; 晚期成藏—定位; 中国

中国大陆由华北、扬子、华夏、塔里木等多个块体拼接而成, 结构复杂而不均一(骆满生等, 2014); 并受古亚洲构造域、特提斯构造域和太平洋构造域的相互作用影响, 经历了多幕次构造运动(李三忠等, 2011)。中国沉积盆地地质构造复杂、活动性强、后期改造强烈正是对中国大陆活动性强、深部作用活跃的响应(刘池洋等, 2000a)。

后期改造, 顾名思义就是事物在后期由于外界环境发生变化而导致事物本身结构、性质以及原始面貌发生较大的改观。后期改造在大自然中时时刻刻都在进行。据不完全统计, 截止1978年, 在全国各地建立的构造运动已有186个(尹赞勋等, 1978), 构造运动频繁发生致使沉积盆地几乎都遭受了后期改造。改造型盆地在我国分布广、数量多, 如我国的古生代盆地和中西部及南方的盆地均属此类(刘池洋等, 1999); 东北、华北的中小型盆地、东南沿海的前第三纪盆地亦属此类。我国东部和海域的第三纪盆地和松辽盆地, 在盆地发育晚期和之后也遭受了不同程度的改造。

“后期改造”一词在国内地质学研究中的使用相当宽泛, 在不同研究方向内出现的频率都相当高。诸如“矿床(体)后期改造”、“改造成矿”、“盆地的

后期改造”等。对后期改造的研究之所以引起多方关注, 与中国大陆的结构、演化及所处的特殊大地构造位置联系密切。通过对我国不同地域、不同类型盆地的实际研究和盆地后期改造特征及形式等系统总结认为, “后期改造强烈是中国沉积盆地的重要特点之一”(刘池洋, 1991, 1996; 刘池洋等, 1999)。这是中国盆地与世界其它地区沉积盆地相比最具个性化的特征(赵重远, 2000)。张抗(1999)根据沉积盆地的改造情况, 将我国400多个沉积盆地的改造程度进行划分和归类, 其中70%多的盆地都遭受了不同程度的剥蚀和改造, 可谓是无盆地不改造。此外, 后期改造是造成油气多期次运聚、晚期成藏的重要原因。

1 后期改造研究现状及存在问题

对盆地后期改造的研究意义重大, 在理论上有助于揭示盆地演化和改造的动态过程、恢复盆地的原始面貌、探讨盆地成因、演化和改造过程的动力学环境(刘晓祥等, 1999; 刘池洋等, 2000b)。在油气勘探方面, 中国大部分含油气盆地均遭受了不同程度的后期改造, 借鉴国内外早期油气勘探理论指导勘探, 难以达到预期成效。对改造型盆地, 如何科学

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41330315)和西北大学大陆动力学国家重点实验室科学技术部专项资助的成果。

收稿日期: 2022-03-19; 改回日期: 2022-05-17; 网络首发: 2022-06-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.041

作者简介: 秦阳, 男, 1998年生, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业; Email: yangQin202021427@163.com。通讯作者: 刘池洋, 男, 1953年生, 教授, 主要从事盆地动力学与油气勘探教学和科研; Email: lcy@nwwu.edu.cn。

有效的评估油气资源、遴选勘探有利区,是国内外油气行业亟需解决但又久攻未克的科学难题,必需专门研究攻关。鉴此,由西北大学倡议和主办,于1998年在西安召开了全国“改造型盆地油气勘探理论、方法及关键技术研讨会”。大会围绕后期改造、改造型盆地定义、类型、特征和成因及其油气资源勘探展开了热烈讨论,明确了改造盆地在中国存在的普遍性及在油气勘探中的重要性(刘池洋,1996),提出新的理论和思想,认识到对于后期改造、改造型盆地的研究和油气勘探需要更新观念,这标志着后期改造及改造盆地正式列入中国盆地研究和油气勘探的议事日程。

对国内有关盆地后期改造研究的已发表文献统计表明,自1998年“改造型盆地”研讨会之后相关研究和论文开始快速增多,并于2000年开始在中国形成研究热潮。2003年“新构造运动控制油气晚期成藏学术研讨会”在北京召开;同年又在北京举办了“我国喜马拉雅运动对沉积盆地的控制作用与油气晚期成藏研讨会”,后期改造和晚期成藏的研究已经受到行业及学术界的广泛关注和参与(图1)。近20年来,中国进入非常规油气革命发展新阶段,地质学家们被非常规油气吸引了眼球,如致密油气、页岩气和页岩油等,发文量也逐渐呈上升趋势(图1)。学者提出“非常规油气甜点区的形成是全球性或区域性多种地质事件沉积耦合的结果”(Qiu Zhen et al., 2020)和“非常规油气资源沉积富集与重大地质环境突变密切相关”,强调以“地质事件”分析思

维开展非常规油气相关研究(邱振等,2020)。

其次,中国特色的叠合沉积盆地通常发育中、浅层中—新生界以及深层、超深层古生界—元古宇两大沉积构造层,然而大半个世纪的地质研究与油气勘探实践多集中于中、浅沉积构造层,形成了诸多油气地质理论,如“源控论”、“复式油气聚集理论”等(马永生等,2020),但经历几十年的勘探开发,中—浅层油气增储上产难度越来越大,油气储量增长放慢,油气发现难度日益增大。随着中国国民经济和工业的发展需求以及科学技术的进步,科技部在“十二五”科学和技术发展规划中,强调了“深地”、“深空”、“深海”科学考察的重要性,深层油气成为重要的能源勘探的重要战略及接替领域、研究热点,尤其是2019年在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地的深部地层取得了油气多点突破(张东东等,2021)。与中浅层油气相比,强烈的构造活动及多期改造作用使得盆地深部地质条件更为复杂,深层、超深层油气勘探开发面临着深层油气成藏和勘探理论不成熟、勘探开发技术难度大的难题,尚存有许多有关后期改造的科学技术问题需要继续攻关解决,如在对深海相碳酸盐岩的热演化史恢复过程中,不能获取有效的古温标及磷灰石、锆石颗粒极大限制了其热演化史恢复(邱楠生等,2020;刘雨晨等,2020)。

不难看出,盆地后期改造对精确勘探和评价常规与非常规、深层与浅层油气影响颇大。然而,前人对于沉积盆地后期改造的定义及称谓、改造的时期和强度表述以及改造盆地的划分方案存在不一致性,原盆恢复过程、方法是难点且尚存问题(孙肇才等,1980;王英民等,1996;张厚福等,1999;刘池洋等,1999;刘晓祥等,1999;张抗,1999;王定一,2000;任战利等,2008,2014,2020a,b)。基于上述,本文重点对有关后期改造作用类型、过程和对常规与非常规的深—浅层油气成藏作用等已有研究成果进行梳理和总结,旨在对中国沉积盆地后期改造强烈和普遍的特点做出相对系统、全面的总结,提高含油气盆地后期改造对油气赋存成藏的认识和理解,以

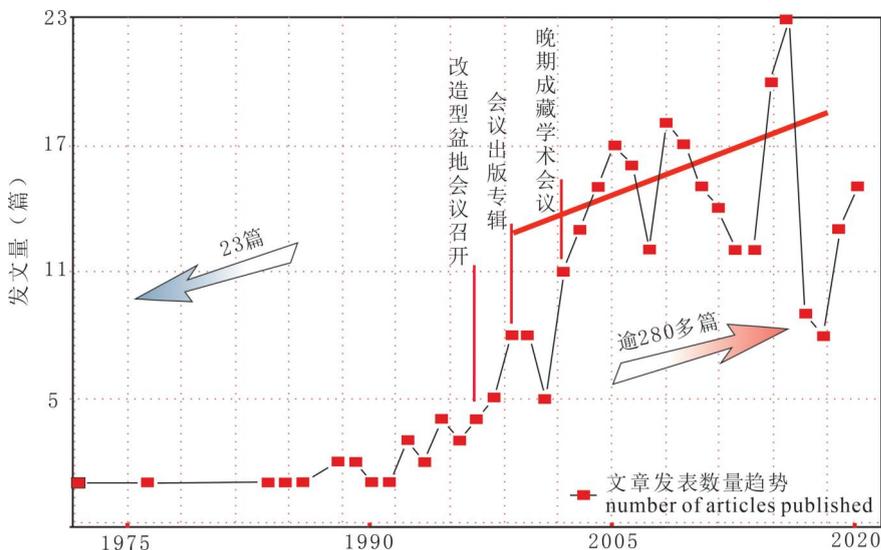


图1 中国国内发表的有关沉积盆地后期改造研究论文统计

Fig. 1 Statistics of the research papers published in China on late reformation of sedimentary basins

期解放思想,推进常规与非常规油气勘探高效持续发展。

2 后期改造与改造盆地

2.1 改造盆地的定义及称谓

在改造型盆地会议召开之前,不同学者对此类盆地的称谓不尽相同,曾被称为残留盆地、残余盆地、构造盆地、反转盆地、叠合盆地和多旋回盆地等(刘池洋等,1999)。如刘光鼎(1997)、王英民等(1996)对残留(余)盆地及其油气勘探重要地位的论述;孙肇才等(1980)以鄂尔多斯盆地为例,对叠合盆地发展特征及其含油气性的讨论等。从广义上说,改造现象存在于沉积盆地发生、发展和消亡任一阶段。当原始盆地地貌发生改观,如被抬升、分割、块断、剥蚀、岩浆侵入或被深埋,即原始盆地经历了后期改造,可称之为改造盆地(刘晓祥等,1999)。

然而,广义上的改造盆地并没有对“后期”这一时间节点给出明确的界定,没有充分体现“后期”这一时间属性。刘池洋等(2003)在充分吸收前人成果基础上,将改造盆地定义为:盆地在演化末期或之后,成盆期的原始面貌遭受较明显改造的沉积盆地。在此定义中,提出了以成盆期的原始面貌是否改造为界限,明确了改造时间和改造程度。尽管盆地在发育过程中也存在改造甚或遭受较明显地改造,如大陆边缘盆地,强烈构造活动伴随盆地演化的整个过程,改造作用很强。但这属盆地自身基本特征的反映,为盆地原始面貌的组成部分,不应划入后期改造之列。相对而言,只有发生在盆地演化末期或之后的较明显改造,才可能改变成盆期的原始沉积盆地地貌。一般而言,盆地演化末期指盆地发生规模性抬升消亡的时期,如鄂尔多斯盆地在白垩纪发生规模性抬升消亡,即白垩纪为鄂尔多斯盆地的演化末期。油气的生、运、聚集和成藏,绝大多数均发生在盆地演化的晚期、末期或之后。只有在此时或之后发生的较明显改造,才更有可能使油气的富集与分布更为复杂,油气勘探难度更大,对其专门研究才有意义和必要。

2.2 中国沉积盆地的后期改造特点

前人对中国沉积盆地的后期改造特点从不同角度、不同侧重点上都做了较为详实的理论总结。通过对中国盆地形成演化和后期改造的系统研究对比和总结,刘池洋(1996)提出中国沉积盆地的后期改造具有4大特征:①波及广,空间上差异明显;②强度大,盆地越老改造越强;③时间新,越新越烈;④

期次多,各期特点有别。刘晓祥等(1999)认为改造盆地具有以下特点:①建造与改造并存;②与区域构造运动对应;③盆地地貌发生改变;④具有多期叠加性。赵重远等(2000)从中国沉积盆地形成的地质特征为出发点,探讨了中国盆地后期改造存在的内因:古、中生代全球构造演化,中国含油气盆地被夹持于周围大洋板块之间,盆地形成、演化始终处于周围板块动力系统应力积聚和消散的制约之中。张抗(1999)从盆地构造环境出发,认为构造环境是盆地演化的根本控制因素,空间上块体的拉张分离与挤压碰撞控制着盆地的形成和改造,拉张期的构造背景控制着原型盆地,而挤压期的构造活动则大多体现在盆地的后期改造上。在实际生产中,中国沉积盆地独有的“后期改造”特点造就了其与世界沉积盆地含油气性、开采、压裂、钻井及地质特征等方面的差别,尤其是在如火如荼的致密油气、页岩气等非常规油气勘探开发方面。

2.3 后期改造的地质作用类型

后期改造的地质作用类型多样,包括各种内、外动力地质作用的各种类型。外动力地质作用主要是由于太阳辐射能及日月引力能为能源并通过大气、水、生物因素所引起。但是外动力地质作用一般会受到内动力地质作用的控制。内动力地质作用,即地球的旋转能、重力能和地球内部的热能、化学能等引起整个岩石圈物质成分、内部构造、地表形态发生变化的地质作用。它是地球内部能源驱动的地质作用,也是沉积盆地变化和改造的根本动力,表现为构造运动、热力作用、岩浆作用和变质作用等。其中构造运动是指由地球内力引起地壳乃至岩石圈变形、变位的机械运动,按其运动方向分为水平运动和升降运动。它是引起地壳升降、岩石变形、变位,以及热力作用、岩浆作用、变质作用乃至地表形态变化的主要因素。对寻找能源等沉积矿产而言,在后期改造中表现强烈、且发生普遍的地质作用主要为构造运动、剥蚀(及搬运)作用、深埋作用、热力作用和水动力作用。其中构造运动最为重要,直接影响或制约着其他地质作用的发生和改造强度(刘池洋,1991;王英民等,1996;刘池洋等,1999)。

后期改造地质作用类型虽多种多样,但由于各种地质作用过程往往并非单一发生而是两种或多种作用过程相伴随,并且某一地质作用过程可能会对盆地产生多种改造作用,改造形式在不同地区以不同强度表现出差异叠加、复合改造的特征,并且在空间上有明显的不均一性(房建军等,2008;张少华,

2019)。因此,盆地改造作用往往由多种具体过程复合、共同作用形成,各个作用过程相辅相成、相互关联、密不可分。

2.4 改造盆地类型划分

在我国和世界各地,沉积盆地一般都经历了复杂的演化—改造过程。所以对沉积盆地类型划分,许多学者都注意到和强调由于后期改造,今古盆地存在显著的差异,对此“需要注意”(甘克文,1982);应关注和区分不同世代盆地原型的不同(朱夏,1986);在盆地分类时应当考虑盆地所遭受的改造作用(陈发景,1986);并将改造(型)盆地作为复合型列入沉积盆地分类之中(刘池洋等,2015)。

中国沉积盆地后期遭受了多期次显著的后期改造,不同学者对于改造盆地类型划分依据及侧重点各有所不同。作为分类依据的已有:盆地后期改造的动力作用、改造形式、改造强度、改造的均一性、改造盆地的时代或地域、烃源岩的改造程度等。国内学者张抗、王定一、刘池洋、王英民、张厚福等在上述研究领域做了大量研究工作,并发表了有关研究文章。在此,择其中几个分类方案列举如下:

如根据后期改造的主要动力作用及改造形式的不同,刘池洋等(2008)将改造型盆地分为以下8种类型:①抬升剥蚀型,根据抬升剥蚀强度的不同,其又可分为抬升裸露型和剥蚀残留型两类;②叠合深埋型;③热力改造型;④构造变形型;⑤肢解残留型;⑥反转改造型;⑦复合改造型;⑧流体改造型(房建军等,2008)。王定一将其分为抬升改造型、块断改造型和冲断、褶皱改造型3类(王定一,2000);刘晓祥等分为逆转型改造盆地、递进型改造盆地和走滑型改造盆地(刘晓祥等,1999)。

再如根据盆地由弱到强后期被改造的程度及盆地保存状况,张抗(1999)将改造型盆地分为I类、II类、III类、IV类、V类。刘晓祥等(1999)地划分为微改造、弱改造、中等改造、强改造和极强改造盆地。王定一(2000)根据改造之后烃源岩的保存状况,将改造盆地或成藏单元分为改造—破坏型、改造—保存型和改造—建设型3类。

此外,根据具体研究的需要,一些研究者对改造盆地中某种类型盆地进一步做了分类和讨论。如对残留(余)盆地,王英民等(1996)基于油气系统特征、演化期次等综合原则,将残余盆地按改造期次分为单期、多期、复杂单期、简单多期和复杂多期5种类型;张厚福等(1999)从历史演化角度划分为残存型、次生型和破坏型3类。刘池洋根据叠合盆地演

化和改造过程,将上叠盆地和下伏盆地的地质特征及两者叠合的时空关系作为一个整体,把叠合盆地划分为易延叠合型、改造叠合型、差异叠合型和多重叠合型4种类型(刘池洋,2007)。从上述划分方案可以看出,虽然他们观察问题角度存在差异,但共同点是突出了“改造强度”这一概念。

2.5 原盆恢复

强烈的后期改造,使盆地的原始沉积面貌发生了较大的改变。剔去后期改造的影响,恢复盆地原始面貌,对盆地形成演化—改造的基础研究和油气勘探、资源评价预测的实际意义均重要。从科学研究和矿产勘查两方面考虑,原始盆地面貌恢复(或原盆恢复)的内容,应包含地史上盆地发育过程中沉积建造及展布、构造属性和变形、水动力、热动力、区域构造背景、地理环境和盆地类型等的原始状况面貌。原始盆地状况还可包括区域动力学背景与深部作用、盆山关系与源汇系统和沉积建造及组合展布等(刘池洋,2008)。同时强调盆地发育鼎盛时期原型的概念,并应将其作为该盆地原型的代表(刘池洋,1993;刘池洋等,1999,2020c)。不可否认的是,原盆恢复恢复难度大且不同盆地的恢复难易程度不同、结论多解性强,加之改造盆地和改造作用复杂多样,尚无可直接借鉴或套用的理论、方法和技术,因而探索性强。

目前,已先后对柴达木(刘池洋,1993;刘池洋等,1999,2020a;赵旭东等,2018;楼谦谦等,2016)、酒泉(刘池洋,1996)、鄂尔多斯(彭恒等,2022;刘池洋等,2006,2020b,c;赵文智等,2006;赵俊峰等,2006)、焉耆(陈建军等,2007)、羌塘(刘池洋等,2016)、临汾—运城(赵俊峰等,2019)、银根—额济纳旗(Peng Heng et al.,2021)等(含油气)盆地原始面貌进行了多种不同内容的恢复,取得了系列新成果和认识,并逐步摸索出了诸多原盆地恢复的理论、技术和方法,如热年代学方法、古构造分析、原始厚度恢复、计算剥蚀厚度、物源分析、层序地层学、古水流等。张光亚(2020)等通过古板块重建定量及定性方法对4091个不同历史时期的大地构造特征和原型盆地性质进行了厘定,对全球原型盆地演化和油气分布做了系统的总结。

在诸多原盆恢复的内容中,多期叠合改造盆地的热演化史恢复难度颇大,且对于沉积盆地构造热事件研究是盆地热演化史恢复研究的前缘问题及难点,尤其是改造叠合型盆地深层、超深层热演化史恢复方面的研究:盆地的演化过程具有长期性、多阶段

性及多期次性等特征,地温场信息改造类型多样,因而热演化史过程复杂(任战利等,2014)。目前,对于盆地热演化史的恢复主要方法包括构造热演化法、有机质古温标法(镜质体反射率法、流体包裹体法)、低温热年代学古温标法和其他古温标法。单一的古温标法可能会导致热史演化恢复结果存在多解性和不确定性,因而需要多种方法结合,同时借助HeFTy、Thermodel、QtQt等热史模拟软件系统(高期等,2017)。

此外,盆地现今地温场研究是盆地古地温恢复的基础(任战利等,2008),但盆地后期改造作用很大可能制约盆地热历史恢复的研究。总的来讲,地层时代越老,经历的构造演化过程越长,对于早期的“热信息”就越难以保存下来(庞雄奇等,2014;任战利等,2020a,b)。对于现今处于最大埋深的盆地,现今地温大部分情况是地层经历的最大地温。现今地温已抹去或重置了盆地演化早期的古地温场信息,特别是深层海相碳酸盐岩地层由于缺乏有效的古温标且难以获得磷灰石和锆石矿物颗粒,而团簇同位素这种新型、有效古温标的出现,为碳酸盐岩地层的热历史恢复提供了可能(刘雨晨等,2020)。因而,扎实的盆地研究及使用新方法精确恢复盆地深层构造热演化史是准确确定深层油气生成期、较好解决成藏历史等油气评价关键问题所在。但后期改造作用对盆地热史恢复研究的影响也不绝对,如抬升型盆地的古地温高于现今地温,地层记录了达到最大埋深的古地温及古地温场信息,是恢复最大埋深期古地温、古地温梯度及古热流的理想地区(任战利等,2014)。

3 盆地改造对油气赋存、成藏的影响

后期改造对于油气赋存—成藏条件的影响是一把双刃剑,一方面,后期改造能够使诸赋存—成藏条件相互之间构成良好的配置和组合关系;另一方面,强烈的后期改造也会破坏已有的良好赋存—成藏条件,使之更为复杂多样,并导致油气发生规模耗散。

3.1 对常规油气赋存条件的影响

3.1.1 对烃源岩、热历史的影响

盆地发育演化时的沉积环境、构造演化、盆地结构和规模决定了烃源岩初始发育和分布特征,且后期改造对烃源岩起双重控制作用。一方面,原先成片分布的烃源岩在后期的差异抬升剥蚀或断层活动的影响而变得“支离破碎”,且地层抬升后地层温度降低,影响烃源岩的热演化;另一方面,局部逆冲或

倒转褶皱又可导致烃源岩的重复叠置,增加烃源岩的厚度(刘池洋等,2020a;王鑫等,2015),如柴达木盆地英雄岭褶断隆起区,古近纪地层缩短约40%,空间上“压缩积聚”了更多烃源岩,单位面积油气资源的丰度提高(刘池洋等,2020a)。意大利南亚平宁盆地烃源岩非均质性强,富有机层厚度薄,后期前陆逆冲推覆改造,使得局部地区的富有机层重复出现,在一定程度上弥补了厚度较薄的缺陷(李全等,2016);四川盆地的叠合演化形成了三叠系河湖相砂泥岩为主的煤系地层、二叠系梁山组、龙潭组的煤系泥岩、泥页岩、大隆组硅质岩、硅质岩和震旦系陡山沱组、灯影组泥质岩和碳酸盐岩三大勘探层系(王学军等,2015)。

烃源岩热演化程度同样也受后期改造的影响,其本质是盆地热历史、地温场受到后期改造的影响。不同类型的盆地由于地温梯度及演化历史的不同,其生油窗温度及深度差异大,总体上埋藏深度越大,含油气盆地地温梯度越大(任战利等,2020c)。沉积盆地的热历史研究对盆地的动力学研究和油气成藏研究都具有重要的意义(高期等,2017)。前人据改造方式的不同将地温场信息划分为:深埋改造型、热事件改造型、应力改造型和热流体改造型(任战利等,2014)。同时,沉积盆地一般都经历过沉降沉积(增温)和抬升剥蚀(降温)等复杂的温度变化过程。不可忽视的是,盆地形态改造不一定意味着地温场的改造(任战利等,2014)。在正常的沉积速率之下,由沉积埋藏所引起的地温增高的幅度为 $1\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$,即升温速率从 $1^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 提高到 $10^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (任战利等,2020b),且后期改造作用对沉积盆地热历史的影响主要体现在构造抬升、叠合深埋及岩浆热作用。由于盆地的多期叠加,早期盆地地温场的信息可因后期盆地的叠加被抹去或重置,早期古地温场的信息保留很少;特别是古生代大型海相盆地古地温场的恢复难度很大,以莺歌海盆地为例,每拉伸一次就热一次,盆地处于逐步升温状态(庞雄奇等,2014;任战利等,2014)。因而,后期改造作用会使盆地热历史恢复的难度增大,尤其是经历过多期构造演化历史的海相盆地和前陆盆地(邱楠生等,2020)。如鄂尔多斯盆地在早白垩世,由于岩石圈热活动增强,深部软流圈物质上涌,岩石圈厚度减薄形成的热事件使得烃源岩大规模成熟、快速生烃(任战利等,2020c)。盆地在后期若经历了叠合深埋,有利于形成多套优质烃源岩和成熟生烃。新生代快速沉降、加热时间短、地温梯度低的塔里木盆

地,原油液态窗深度分布范围大大扩展,原油埋藏深度甚至可超过 1000 m(张光亚等,2015)。塔北地区在低地温梯度、晚期快速埋藏及加热时间短的背景下原油开始裂解的深度为 7500~8000 m,对应的储层温度在 210~220 °C 之间,9000 m 处液相石油消失(朱光有等,2018)。

此外,一些局部的热源对烃源岩的热演化及盆地热演化史也起到重要作用,如岩浆侵入和热液活动作用等。峨眉山超级地幔柱活动构成四川盆地古生代热体制的主控因素,对中二叠统之下茅口组烃源岩热演化有着十分重要的影响:在地幔柱影响区的烃源岩生烃期早,不利于油气的保存;在地幔柱影响区以外的地区,烃源岩在晚二叠世以来仍可二次生烃,如果成藏条件具备,应具有较大勘探潜力(朱传庆等,2010)。同时,盆地改造所留存的烃源岩总体上决定了该地区石油资源规模和分布,如柴达木盆地发现的 10 多个不同规模油藏和油气田,集中分布在现今盆地西南部古富烃凹陷残留区(刘池洋等,2020a)。

3.1.2 对储层的影响

后期改造对储层的影响主要体现在储层物性的变化上,改造作用主要为构造变动及叠合深埋。构造变动对储层物性的影响主要表现在以下几方面。①盆地抬升:对碳酸盐岩而言,开放体系是埋藏溶孔规模发育的关键,在大气水淋滤、岩溶作用下形成大量溶蚀孔、洞和缝,有利于优质储层发育。在我国油气勘探中,与不整合有关的碳酸盐岩古风化壳、古岩溶储层普遍发育,如塔里木盆地奥陶系、鄂尔多斯盆地奥陶系、四川盆地上震旦统、石炭系、二叠系及中一下三叠统和渤海湾盆地奥陶系及任丘迷雾山组(陈学时等,2002);在川中古隆起和泸州—开江古隆起,五峰组沉积前的构造事件导致志留纪末到二叠纪梁山组沉积前遭受长期隆升剥蚀,岩溶作用使碳酸盐岩成为隆起区海相气藏重要的岩溶储层(王学军等,2015)。②构造变形:地层的变形、错断,产生大量断裂及构造裂缝,如黄骅拗陷千米桥潜山奥陶系碳酸岩在印支—早燕山期遭受强烈的构造改造,发育大量张性断裂和裂缝,形成了良好的储层(李剑英等,2001);顺北油田 I 号主干断裂带上 SHB1-1H 井,测试产能高,稳产时间长,累计产油 6.38×10^4 t、产气 2868×10^4 m³(焦方正,2018);其次断层和裂缝中的热液流体通常含大量的 CO₂、F 和 H₂S 等成分,直接作用于碳酸盐岩,促进溶蚀作用的发育,进一步扩充储层的储集空间(李剑英等,2001)。

但后期流体也可能造成严重的充填作用,使储层孔隙空间减少,如在黄桥地区 CO₂ 分压低的区域有大量碳酸盐沉淀,造成储层原始孔隙的损失(张月霞等,2018)。此外,在断陷盆地中,裂缝以构造缝和超压裂缝为主,岩浆侵入活动及冷却活动不仅会产生一些原生孔缝,还会造成高温和压力,使周围页岩产生多种裂缝,改变泥页岩的储集性(张旗等,2016)。

盆地沉降埋深作用和岩浆侵入活动对于储层成岩的影响也不可小觑。通常情况下,沉降埋深对储层原生孔隙改造明显,降低储层的物性(聂保锋等,2008;卢红霞等,2009)。在鄂尔多斯盆地北部上古生界气藏,以低孔渗、特低孔渗为特征,其砂岩储集体孔隙度分布在 4%~8%,渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$ μm(刘伟新等,2008)。研究显示,导致储层致密化的主要原因是强烈的沉降压实使储层中原生孔隙基本消失,压实压溶形成的缝合线和后期的次生溶孔为最主要的孔隙类型,然而这一认识并不绝对。在四川盆地等地区深层—超深层发现物性较好的碳酸盐岩储层,研究认为 TSR(Thermochemical Sulphate Reduction)效应对于改善深部海相碳酸盐岩储层具有较好的促进作用,而该过程常在 160°C 以上的环境中触发,沉降埋深反而改善了储层物性(朱光有等,2006,2012;张水昌等,2008;Cai Chunfang et al.,2013)。因此,对于这一地质作用过程,需要以辩证的思维去审视其与成藏的关系。

岩浆侵入活动对砂岩作用改造明显,包括已固结成岩的脆性破裂和未固结砂的压溶作用,同时热流体促进或导致中间矿物间反应。Summer 和 Ayalon(1995)对以色列 Makhtesh Ramon 的 Inmar 组砂岩研究发现,原生自生矿物远离侵入体的脆性沉积物中,而侵入体附近的砂岩则被改造成石英岩。

3.1.3 对盖层的影响

抬升剥蚀、断裂和裂缝是影响盖层封闭能力的关键因素(马永生等,2006;付晓飞等,2018)。前者使盖层上覆地层减薄、压力降低而使其封闭性能降低,甚或使盖层直接遭受剥蚀;而后者可破坏盖层的连续性和完整性,断裂使盖层封闭性变差从而导致大气水下渗而形成富氮天然气,可为其实例和证据(陈安定,2005)。由于盖层的破坏,其下的油气藏也不可避免受其影响,或被破坏发生油气逸散,或重新运聚形成次生油气藏。此外,岩浆的上拱也会使盖层处于拱张状态,产生一系列张性断裂及裂缝,降低盖层的封闭能力(李明诚等,1997)。泥岩盖层在

深埋过程中,成岩作用使泥岩黏土矿物成分改变,泥岩脆性增加,也会使盖层的封闭性变差(李明诚等,1997;付晓飞等,2018)。然而流体的后期改造对盖层系统的封盖能力也具有一定的促进作用,在苏北盆地黄桥地区富 CO_2 流体连续的活动导致泥岩盖层发生方解石沉淀,充填了盖层的裂缝,提高了盖层的封盖能力(周冰等,2020)。

3.2 常规中—浅层油气运聚与晚期成藏

3.2.1 对油气运聚的影响

目前国内发现的大多数油气田普遍经历了多期的改造,(如四川盆地油气田、柴达木油气田等),油气富集区后期改造形式(如抬升剥蚀、构造变形、热力、流体改造、叠合理深、反转改造等)、强度、期次和过程及结果直接影响着油气藏的类型、特征、分布和成藏模式及资源规模,故可称为“改造控藏”(刘池洋等,2020a)。

油气作为流体矿产,具有从构造低部位向构造高部位、从高压区向低压区运移的特点。抬升剥蚀对于油气藏起到一定的破坏作用,抬升造成地层压力降低,压力降低会破坏原有的压力封闭能力和烃浓度封闭能力。同时,地层抬升过程中流体温度降低及孔隙扩容可造成地层降压,有利于油气从源岩和水体中析出,并为油气运聚提供动力,孔隙扩容还可为油气聚集提供空间(田丰华等,2007)。此外还会导致断层面所受到的正压力减小、垂向封闭性减弱甚至开启,造成油气的垂向运移(沈安江等,2015)。若油气藏抬升至地表受剥蚀改造,直接造成油气的垂向逸散。若未抬升至地表,也会发生油气藏的再分配甚至逸散的过程,鄂尔多斯盆地北部侏罗系延安组发现了砂岩型高岭土矿层,这是由于上古生界天然气流体逸散至浅层与岩石发生流岩蚀变作用的结果,而天然气的大量散失是气藏的构造抬升造成(刘池洋等,2008;杨华等,2015)。此外,抬升剥蚀作用层位本身或紧邻其下的层位就是储层,且地层抬升剥蚀期多为油气聚集的时期,剥蚀量的多少决定了油气藏遭受破坏的程度(田丰华等,2007)。

由岩浆、热液侵入和喷出为特征的热力改造与油气成藏的关系几乎是全方位的,它参与了油气生成、演化的全过程(张旗等,2016),一方面在油气大量生成和运移时期前所发生的热力改造对油气藏保存并无明显破坏作用,油气生成运移期或其以后的热力改造则有可能对油气藏起明显的破坏作用。新形成的高温热场可能吞噬和破坏储油层及其结构,

使油气向上散逸(霍志鹏等,2013),塔里木盆地在晚海西期,塔中西部发生强烈岩浆侵入及火山喷发活动,早期形成圈闭被改造,如塔中18、21、22等井油气显示很差(苒衡等,2003;张水昌等,2011)。高温岩浆侵入生油层后,还会对烃源岩及生成的油气进行烘烤使之炭化(万从礼等,2014)。另一方面,岩浆侵入地层后可以形成火山锥油气藏、岩浆岩遮挡油气藏、岩浆岩刺穿油气藏等(谢继荣等,2021),黄骅拗陷第三系火成岩分布广泛,火成岩可加速烃源岩的演化,引起围岩蚀变并改变围岩储集性能,为油气聚集提供有利空间(万从礼等,2014),同时岩浆岩本身还可能是很好的油气储层并且火山机构和喷发旋回影响火山岩储层的平面及纵向展布(万从礼等,2014;周立宏等,2000;谢继荣等,2021)。受到加里东期运动影响,川西地区下古生界受到强烈剥蚀,二叠系与下寒武统沧浪铺组不整合接触,且下寒武统的沉积中心位于德阳—安岳台内裂隙内部,成都—简阳地区的火山岩位于裂隙之上,所以火山岩气藏具有近源充注的优势(谢继荣等,2021)。

对于沉积盆地来说,除受古地貌和同沉积构造外,大部地区的沉积地层起伏不大,近水平展布。后期改造作用将原始地层改造成褶皱、断裂发育的复杂构造样式。在成藏过程及成藏期后发育的断裂、褶皱对于油气藏的形成、聚散均具有不同程度的控制作用。如“多层楼式”复杂构造的英西—英东油田以及通过断裂疏导、动态聚集,在浅层源上形成的油气丰度较高的英东油田(刘池洋等,2020a)。反转构造与油气藏的关系密切,虽然因有机质热演化程度偏高,成藏高峰早于构造反转期,反转导致油气散失,但区域性扭扭背景下的构造反转,可以捕集重新分配的油气(陈昭年等,1995)。从区域上来讲,反转改造可直接控制油气成藏。例如我国东部今渤海湾盆地地区,在古—中生代为挤压性质,而在新生代发生了正反转从而形成隆—凹相间的断陷盆地群,并形成任丘古潜山“新生古储”油气藏(夏斌等,2006)。与此同时,在柴达木盆地内部由于烃源岩并未抬升至地面、改造发生时期晚且时间短,原富烃拗陷由负向单元改造演化为隆起—斜坡—断阶等复杂构造单元,使得油气向各类正向构造和有利聚集区带相对定向运聚成藏,提高了油藏油气规模与丰度(刘池洋等,2020a)。

3.2.2 晚期成藏—定位普遍

受中国大陆所处大地构造环境的控制,中国沉积盆地后期改造的特点是波及广、期次多、强度大、

时间新(刘池洋,1996)。因此,油气多期聚散、晚期成藏一定位是中国含油气盆地的重要特点(刘池洋等,2003)。由于沉积盆地发育和演化的时限不同,油气的成生、运聚成藏时期和期次必然有别。如古生代早期形成的烃源岩所产生的油气,可能在古生代晚期已运聚成藏。但对一个含油气盆地而言,总是最晚一期较强烈改造,改变和调整了流体矿产油气的成藏,并决定了油气藏的最终分布位置。确定油气藏的位置才是油气勘探的目标。所以,刘池洋将油气成藏与定位“捆”在一起,称之为晚期成藏一定位。“这既使以往在油气晚期成藏方面分歧较大的认识渐趋统一,又与油气勘探的实际需求密切结合”(刘池洋等,2003,2008)。

通过对中国大陆和海域盆地与区域地质构造的研究对比,提出(20±2~4)Ma(早中新世早期)是中国绝大多数盆地油气成藏一定位的重要转折期(刘池洋等,2003)。在此转折期之后,即中新世早期以来形成定位的油气藏,为晚期;其中第四纪以来形成一定位者,属超晚期。同时,根据中国含油气盆地的实际和特点,提出了与此成藏一定位绝对时间相对应的相对时限:烃源岩形成与油气成藏一定位的时间间隔长达100 Ma,或200 Ma以上的油气藏,分别属晚期、超晚期成藏一定位(刘池洋等,2003;刘池洋等,2008)。

中国含油气盆地的油气藏普遍具有晚期成藏一定位的特征,即油气藏现今的位置和状态形成于中新世以来。在我国大陆和海域不同地域的含油气盆地,第四纪以来成藏一定位的油气藏,甚至大油气田不在少数。如渤海湾盆地渤中凹陷的蓬莱19-3大油田、南海莺歌海盆地的东方1-1大气田、塔里木盆地库车坳陷克拉2大气田、柴达木盆地的东部大气区和西部部分大油田等,其中部分油气田正在运聚成藏中(戴金星,2003)。

3.3 对非常规油气的特殊影响

非常规油气革命进入了新阶段(邹才能等,2021),其油气储量非常巨大,逐渐成为常规油气的替代物,包含致密油、煤层气、沥青砂和页岩气等。目前,对于国内“陆相—海相”非常规油气的研究,更多是与美国“海相”非常规油气地质条件的相似性和成藏的特殊性等方面,忽略了常规与非常规油气成藏的关系。整体上,盆地后期改造对非常规油气的影响与常规油气相似,具有很多共性,尤其是源—储—盖方面。即上述盆地后期改造对常规油气各方面的影响、地质认识也较好地适用于非常规油

气。但限于文章篇幅,在此仅以盆地后期改造对页岩气富集、逸散调整、吸附方面的特殊影响为例展开说明。

首先,对于经历过多期构造演化与长期隆升剥蚀的页岩气,构造与保存条件往往是其富集高产的首要条件。四川盆地东南部龙马溪组的页岩气勘探成效不一,由于盆内与盆缘的构造差异导致油气显示存在差异。焦石坝、阳高寺构造位于盆内,背斜构造主体没有被断裂破坏,油气富集高产。而位于齐岳山断裂东部的渝页1井和位于向斜构造一翼的彭页1井,由于地层埋藏浅、缺少反向断层的侧向遮挡,油气耗散严重、低产(郭彤楼等,2014)。另外,通过对焦石坝构造的研究发现,燕山晚期的北西向挤压及其后的南北向走滑作用有利于超压的形成、保存,这对于该区油气晚期成藏、形成良好圈闭至关重要。断裂形成过程中有众多立体网状裂缝相伴生,改善储层物性,而微裂缝相对不发育段起盖层作用,与顶底板一起构成箱状封闭体系,为页岩气富集高产提供保障(郭彤楼等,2014)。其次,断裂两侧地层出露、保存情况对页岩气的保存意义重大,齐岳山断裂两侧地层保存存在差异:断裂以西地区,龙马溪组保存完整且其它地层保存较好,即实测地层压力系数达1.5以上;而在断裂以东地区,龙马溪组被断层、褶皱破坏,地层埋深小,故实测地层压力系数基本为1.0,甚至更低(郭彤楼等,2014)。同时,构造抬升与生排烃时间的先后也是页岩气富集保存的关键因素,如彭页1井大约在160 Ma就开始了抬升,此时烃源岩还未达到生干气阶段,即抬升是在生烃之后开始;而焦页1井在100 Ma才开始抬升,处于其生烃之后,即抬升是在生烃之前就开始了,因此后期的构造抬升造成了气体的散失,保存条件变差(翟刚毅等,2017)。因而,后期构造抬升往往会造成气体散失、封盖条件变差(张梦琳等,2022),且后期构造作用强度、时间也控制页岩气的逸散方式、程度及残留丰度(翟刚毅等,2017)。众所周知,页岩气动态调整是一个必经过程。美国Barnett页岩气藏由于受到多期构造运动的影响,使得游离气动态调整、平衡,因而在多期裂缝活动发育区,产能较低(Kent,2007)。不容忽视的是,地层倾角大小往往是影响页岩气动态调整速率的重要因素(地层倾角愈大,逸散速度愈快),且地层倾角的变化受后期改造作用影响较大,即后期改造作用间接控制页岩气动态调整速率(魏力民等,2020)。

岩浆热场温度与页岩气的吸附能力、气体压缩

率存在正相关关系。其中,高温场一方面有利于泥质烃源岩的成熟和聚集,使其具有良好的生烃潜力,另一方面可促使泥页岩层段形成大量构造孔缝(Jarvie et al., 2007),提高了页岩气的吸附能力(Chalmers et al., 2008)。因此岩浆高热温场内的泥页岩生烃强度、储集性能(Shkolin et al., 2009)、吸附能力都是优选,可作为页岩气的有利勘探区(张旗等,2016)。热活动还会使页岩气的有效孔隙度和吸附力提高,如Jarvie等(2007)认为泥页岩孔隙与烃类转化率呈正相关关系;Raut等(2007)也认为,压力与地层吸附气所需的结合能也存在正相关关系;Chalmers和Bustin(2008)研究了Cordondale地层样品不同压力下气体的吸附能力发现,压力由2.9 MPa增至17.6 MPa,页岩气吸附能力也在增强。Shkolin等(2009)也指出压力增大,气体压缩率也在增大。总而言之,盆地后期改造对非常规油气藏的形成、保存及破坏具有显著影响。

3.4 对深层—超深层油气藏成藏的影响

深层、超深层是中国油气勘探开发未来最重要的接替领域之一(马永生等,2020;任战利等,2020a, b;张东东等,2021)。目前,中国深层油气藏不仅在勘探实践领域获得了一系列重大突破,主要分布在塔里木、四川和鄂尔多斯三大盆地中(马永生等,2020;张东东等,2021),而且在勘探开发上也对早期经典的中—浅层油气地质认识及理论提出了挑战,如干酪根晚期生油理论的温度和压力界限(孙龙德等,2013)。对于深层油气藏类型的划分方案相对较多,张东东等(2021)按照油气藏的形成主因、演化历程以及成藏特征将深层油气藏成因类型划分为3类:浅成深埋型、浅备深成型和深层成藏,该划分方案相对更为完备、系统,常规与非常规油气并重。浅成深埋型是由于油气早期在浅层形成,而后快速沉降深埋,储盖条件不发生较大变化,烃类物质发生一定的相态、组分变化;浅备深成型即早期浅层成烃和储备条件不足,后期随着地层沉降、温压提升及成岩作用的改造,不同类型烃源可以生烃且在改造储层中成藏;深层成藏主要是深部构造作用、热液作用以及热力作用等大量无机物质和能量的强烈交换与改造下,并在有机—无机相互作用的参与中,在盆地内或者边缘以及构造活动区的深部地层中成藏。不难看出,上述划分方案中的3类油气藏均体现出了后期改造作用对深层油气藏类型的影响。

浅成深埋型油气藏发育在较为稳定的中—大型沉积盆地或拗陷中,构造抬升与叠合深埋改造作用

对其影响显著,可用常规、传统的技术方法对其进行评价,如顺北油气田、安岳气田、轮探1井所发现的圈闭等。轮探1井附近圈闭的油气聚集与成藏发生在海西期,为简单背斜油气藏,而在三叠纪以来一直处于连续沉降埋深状态,至喜马拉雅晚期埋深增加至2500 m以上,形成现今深层油气藏(朱光友等,2018)。而对于中国沉积盆地多数经历了后期抬升和叠置改造,深层油气藏的保存条件较难保持稳定,能够满足浅成—深埋型深层油气藏地质演化条件的盆地数量较少。

浅备深成型油气藏主要发育在中—大型改造盆地中,其中多元生烃、储层保持和保存条件优化是该类油气成藏的关键。随着盆地演化,地层在深埋过程中地层温度和压力增大,同时伴随着热液流体及外源氢等深部物质的参与反应,烃源岩中原本在浅层难以生烃的有机质在高温、高压下发生了生、排烃作用(刘文汇等,2012;贾承造,2017)。在深埋过程中,碳酸盐岩层系中富含脆性矿物的储层因流体活动和压实作用等发生溶蚀和断裂,改善和提升了储层的孔隙空间和储藏能力;同时在深埋过程中,上部盖层以及侧向断层的保存条件因压力的增强而进一步提升。该类油气藏包含了常规与非常规,对于其相关评价方法正在形成,是目前现实的油气交替领域,油气潜力巨大,如鄂尔多斯盆地中东部的盐下气藏、四川盆地深部页岩气气藏(何治亮等,2020;张金川等,2021),该类油气藏资源前景评价方法需要创新,成藏理论是关键。油气地质—地球化学是识别该类油气的主要方法,但对深层多元生烃进行资源评价现今仍未有较为行之有效的标准方法。深部多元生烃的客观事实对传统的生烃理论提出挑战,而储层随深度而发生的改变(溶蚀—缝洞)如何进行有效表征(微米—纳米级别孔隙结构)与反演(原始结构恢复及演化)亦是勘探家需面对的难题(何治亮等,2021;刘永立等,2021)。

值得注意的是,深层油气主要来源于深部无机物质。深层无机油气藏总体上分布于构造活跃地区,如活动大陆边缘、深大断裂、岩浆热液活动频繁地区、洋中脊与海沟处等,如渤海湾盆地郯庐断裂带两侧部分油气藏(张东东等,2021),主体属于深层油气。地层在深部受到较为强烈的构造改造、沉降深埋及热力交换作用,同时沉积地层、岩浆岩和变质岩在温压变化的过程中,伴随着结构变化及物质迁移改造(张东东等,2021)。该类油气藏存在与否不能给出定论,但仍是远景目标。在中国松辽盆地地

幔上隆、地壳减薄且发育火山活动以及深大断裂,地质背景非常活跃,沿主要深大断裂所发现的一些气藏被认为存在无机成因的可能(戴金星等,2001)。传统的油气资源评价体系完全不适用于此类深层油气藏。对其相关勘探开发需要全新的油气理论、评价技术的支撑,评价体系需要重建。

中国改造盆地热演化历史复杂,深层、超深层不同油气相态及油气生成、成藏历史有明显的差异(任战利等,2020a)。显然在成藏过程中,热演化历史对油气相态及成藏历史具有明显控制作用。前人基于不同盆地沉降及抬升过程、地温梯度,加热时间存在差异等,将深层热演化史划分为后期快速沉降增温低地温梯度型、后期快速沉降增温高地温梯度型、中后期快速增温晚期抬升降温型、前期大幅度沉降快速增温中后期大幅度抬升剥蚀降温型4种类型(任战利等,2020b)。其中,对于(古)地温梯度不同的盆地,其油气藏破坏的深度也不同,如塔里木盆地油藏受热破坏的起始深度为4500m,埋深下限大于7500m;准噶尔盆地油藏受热破坏起始深度为3250m,埋深下限5400m到大于6500m(朱光有等,2012)。因而不同古地温热演化史类型盆地的深层、超深层油气相态及成藏期早晚与油气前景不同。

4 结语与展望

改造型盆地是我国今后油气勘探的重要对象,勘探前景广阔,现几成共识。但由于后期改造和改造盆地的复杂多样性,目前可用于改造盆地的理论技术方法体系尚需继续发展、完善,对各类改造盆地的研究和动态成藏过程的认识仍需进一步深化。鉴此,认为今后对改造型含油气盆地研究和油气勘探,以下几方面仍需重视和加强:

(1)油气成藏。中国沉积盆地所处的复杂、活跃的构造环境决定了在对于原始盆地恢复不仅需要“将今论古”这一地质学基本原则,“动态”这一思路更是举足轻重。事物都是处在不停运动变化之中,对于盆地中赋存的油气等流体矿产亦是如此,油气藏的生、运、聚、存与盆地演化过程阶段息息相关,多期次的生成与运聚成藏、改造再分配及破坏在油气成藏的过程中极为寻常。深入研究油气多期动态聚散过程、成藏机理、赋存条件和主控要素。在认识和总结改造盆地共性特征的同时,剖析和总结其个性也举足轻重,个性特征通常体现着某个盆地油气赋存和成藏效应的关键环节。重视多源油气的形成、成藏模式、分布机理和资源规模等,突破单一模式,

天然气的成因丰富多样:常规与非常规,成熟与非成熟,无机与有机,浅层、深源和超深层,均可能出现或同存。

(2)评价思路。改造盆地遭受多次构造变动、演化历史复杂,具有多次生、排烃和多期成藏等特征。其油气成藏机理复杂且油气分布特征受多种因素控制。因而改造盆地的油气评价,整体上需要以构造演化为主线,系统研究成烃、成藏及保存条件。中国中、古生界沉积盆地大都经历了多期叠加与改造,不同的地质时期发育了多种类型的生储盖组合,经历了多期油气生成、运移、聚集成藏和破坏调整的过程,盆地中的油气聚集、分布规律极其复杂。针对中、古生界复杂的油气演化历史,还需要具有“整体、动态、持续演化”的评价思路。首先,从构造演化入手,揭示盆地演化阶段及后期改造期次、形式、强度,分析构造与油气生排聚的关系,预测有利聚集区。其次,从现今保存单元和成藏单元分析入手,分析现今构造在定型期以后是否具有油气成藏、保存、多次再运移和聚集等地质条件,确定有利勘探区。而后揭示烃源岩生烃过程与时空演化,主要构造期油气运聚方向及油气系统的动态演化。不容忽视的是,用常规方法计算油气资源量及对其评价已经不能精准有效的刻画出改造后盆地油气的逸散量和现今该盆地剩余油气资源量。其中,对现今盆地进行原始盆地恢复,精确刻画盆地主发育期和演化阶段的原始面貌是客观评价油气资源量的基础。

(3)勘探目标。对于改造盆地而言,改造盆地受到改造的程度越严重,油气运移、聚集的规律也就更加难以掌握,从而会增加对油气勘探工作的难度。对于经过后期改造过后的沉积盆地,油气成藏期及成藏位置在时间的进程中是一个变量。简而言之,不但改造现象存在于沉积盆地发生发展消亡任一阶段,而且改造作用也是繁杂、相互叠加的。要以“动态”的思维去反演后期改造作用过程,“整体”、“综合”、“系统性”的分析后期改造对油气成藏的正、反两方面作用,或能避免勘探的失利、提出新的勘探思路,从而取得勘探成果、理论创新,以期解放思想,并推进油气勘探高效持续发展。同时要因地分类,注意差异改造,构建不同的油气成藏模式,为油气富集区整体部署以及有序勘探提供科学依据和建议。区域性不整合面作为一个特殊的地质体,它是改造盆地研究的一个重要方面,在改造盆地分阶段演化研究具有重要的意义。同时,不整合面一般形成一定厚度的风化壳,它也具有油气储藏的作用,是重

要的油气勘探目标。在加强已经探明的盆地持续勘探的基础上,需要对勘探程度较低的盆地加大勘探力度,从而发现更多油气储藏丰富的改造盆地,提高我国油气资源的储备量。聚焦常规深层—超深层油气、非常规油气,明确后期改造作用对二者的影响。

(4)新的技术与方法。在改造盆地内进行油气勘探、油藏描述和油气资源量的估算和评价等方面以往的理论、技术方法已不能完全满足目前科研和勘探工作的要求。针对中国海相深层碳酸盐岩油气勘探面临低信噪比、低分辨率、低成像精度及低保真度等地球物理问题,宽频、保幅、高精度及信息综合应是重点攻关方向。精确恢复盆地热演化史对于指导油气勘探开发极为重要。热史重建要在扎实、实际的盆地研究资料基础上,结合多种古温标耦合反演和地球动力学正演方法进行相互补充、验证,以解决因盆地的多期叠加,早期盆地地温场的信息可因后期盆地的叠加被抹去或重置等问题。深层—超深层古老层系的恢复要借助低温热年代学以及相关热史模拟软件,而海相碳酸盐热史恢复还可利用团簇同位素新技术。基于我国页岩气地质条件及工业勘探实践,“体积开发”新理论为陆相、海陆过渡相页岩气等非常规油气资源的整体利用提供理论依据和技术支持,如井网优化设计、水平井钻井、水平井段体积压裂改造等。油气田开发由常规转向非常规领域,非常规储层孔隙的精细评价已经成为热点,但其孔隙尺寸小、孔隙结构复杂、非均质性强,因而发射扫描电镜、聚焦离子束场发射扫描电镜、透射电镜、CT扫描、高压压汞、气体吸附、小角X射线散射、同步辐射、高分辨FIB-SEM三维页岩储层数字成像表征和大数据等相关技术应运而生。此外,在宏观上进行定性分析(半定量)的同时,还应注重微观量化的评价表征,采用定性定量相结合的方法研究不同尺度沉积盆地后期改造的成因、过程、模式和结果,从而更加系统的认识沉积盆地后期改造对油气赋存、成藏的影响。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

裴衡, 龚奇, 欧阳睿, 黄俊峰, 杨学武. 2003. 塔中地区火成岩特征及其石油地质意义. 石油物探, 42(1): 49~53.
陈安定. 2005. 氮气对海相地层油气保存的指示作用. 石油实验地质, 27(1): 85~89.
陈发景. 1986. 我国含油气盆地的类型、构造演化和油气分布. 地球科学, 11(3): 221~230.

陈建军, 刘池阳, 姚亚明, 陈建中, 何明喜, 余培湘. 2007. 新疆焉耆盆地中生代原始面貌探讨. 沉积学报, 24(4): 518~525.
陈学时, 易万霞, 卢文忠. 2002. 中国油气田岩溶与油气储层. 海相油气地质, 7(4): 13~25.
陈昭年, 陈发景. 1995. 反转构造与油气圈闭. 地学前缘, 2(3): 96~102.
戴金星. 2003. 中国大气田及其气源. 北京: 科学出版社, 175~180.
戴金星, 石昕, 卫延召. 2001. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略. 石油学报, 22(6): 5~10.
房建军, 刘池洋, 王建强, 邱欣卫, 马艳萍, 赵俊峰. 2008. 流体改造及地貌高差:含油气盆地分析和评价的重要内容. 石油与天然气地质, 29(3): 297~302+311.
付晓飞, 吴桐, 吕延防, 柳少波, 田华, 卢明旭. 2018. 油气藏盖层封闭性研究现状及未来发展趋势. 石油与天然气地质, 39(3): 454~471.
甘克文. 1982. 世界含油、气盆地的基本类型及其远景评价. 石油学报, 3(S1): 24~33.
高棚, 胡圣标, 姜光政, 李春荣, 王裔, 张超, 胡迪, 王一波, 王朱亭. 2017. 沉积盆地热历史研究方法的基本原理与进展. 地学前缘, 24(3): 65~78.
郭彤楼, 张汉荣. 2014. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式. 石油勘探与开发, 41(1): 28~36.
何治亮, 李双建, 刘全有, 杨天博, 张英. 2020. 盆地深部地质作用与深层资源—科学问题与攻关方向. 石油实验地质, 42(5): 123~135.
霍志鹏, 庞雄奇, 杜宜静. 2013. 含油气盆地油气藏破坏的油气显示及其地质意义. 石油与天然气地质, 34(4): 5~14.
贾承造. 2017. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义. 石油勘探与开发, 44(1): 1~11.
焦方正. 2018. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景. 石油与天然气地质, 39(2): 207~216.
李建英, 卢刚臣, 孔凡东, 李廷辉. 2001. 千米桥潜山奥陶系储层特征及孔隙演化. 石油与天然气地质, 22(4): 367~371.
李明诚, 李伟, 蔡峰, 孙大明. 1997. 油气成藏保存条件的综合研究. 石油学报, 18(2): 41~48.
李全, 杜向东, 康洪全, 李进波, 夏世强. 2016. 南亚平宁地区构造对油气成藏要素的控制作用. 西南石油大学学报(自然科学版), 38(2): 20~28.
李三忠, 张国伟, 周立宏, 赵国春, 刘鑫, 索艳慧, 刘博, 金宠, 戴黎明. 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. 地学前缘, 18(03): 79~107.
刘池洋. 1991. 后期改造与古地质构造恢复. 西北大学学报(自然科学版), 21(S): 1~8.
刘池洋. 1993. 盆地动态演化研究的基础:原始盆地恢复——以柴达木盆地为例. 赵重远, 刘池洋, 姚远. 含油气盆地地质学研究进展. 西安:西北大学出版社, 26~32.
刘池洋. 1996. 后期改造强烈——中国沉积盆地的重要特点之一. 石油与天然气地质, 17(4): 255~261.
刘池洋, 孙海山. 1999. 改造型盆地类型划分. 新疆石油地质, 20(2): 3~6+92.
刘池洋, 赵重远, 杨兴科. 2000a. 活动性强、深部作用活跃——中国沉积盆地的两个重要特点. 石油与天然气地质, 21(1): 1~6.
刘池洋, 杨兴科. 2000b. 改造盆地研究和油气评价的思路. 石油与天然气地质, 21(1): 11~14.
刘池洋, 赵红格, 杨兴科, 陈建军. 2003. 油气晚期—超晚期成藏定位——中国含油气盆地的重要特点. 中国工程院, 环太平洋能源和矿产资源理事会, 中国石油学会. 21世纪中国暨国际油气

- 勘探展望. 北京: 中国石化出版社, 57~60.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 岳乐平, 赵俊峰, 王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. 地质学报, 80(5): 617~638.
- 刘池洋. 2007. 叠合盆地类型及其特征和油气赋存. 石油学报, 28(1): 1~7.
- 刘池洋. 2008. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统. 地球科学与环境学报, 30(1): 1~23.
- 刘池洋, 马艳萍, 吴柏林, 刘超. 2008. 油气耗散——油气地质研究和资源评价的弱点和难点. 石油与天然气地质, 29(4): 517~526.
- 刘池洋, 王建强, 赵红格, 张东东, 邓煜, 赵晓辰. 2015. 沉积盆地类型划分及其相关问题讨论. 地学前缘, 22(3): 1~26.
- 刘池洋, 郑孟林, 杨兴科, 何碧竹, 任战利, 郭佩. 2016. 羌塘中生代海相盆地演化与后期改造及油气赋存. 地质学报, 90(11): 3259~3281.
- 刘池洋, 付锁堂, 张道伟, 陈琰, 黄雷, 石亚军. 2020a. 柴达木盆地巨型油气富集区的确定及勘探成效——改造型盆地原盆控源、改造控藏之范例. 石油学报, 41(12): 1527~1537.
- 刘池洋, 王建强, 邱欣卫, 张东东, 赵俊峰, 赵红格, 邓煜. 2020b. 鄂尔多斯盆地延长期富烃拗陷形成的动力学环境与构造属性. 岩石学报, 36(6): 1913~1930.
- 刘池洋, 王建强, 赵晓辰, 黄雷, 张东东, 赵俊峰, 邓煜, 马兔兔. 2020c. 盆地“原型”及其相关外延称谓与研究. 石油实验地质, 42(5): 720~727.
- 刘光鼎. 1997. 试论残留盆地. 中国石油勘探, (3): 1~4.
- 刘文汇, 王杰, 腾格尔, 秦建中, 饶丹, 陶成, 卢飞龙. 2012. 中国海相层系多元生烃及其示踪技术. 石油学报, 33(S1): 115~125.
- 刘伟新, 王延斌, 张文涛. 2008. 鄂尔多斯大牛地气田上古生界储层成岩作用与产能关系研究. 石油实验地质, 30(6): 557~563.
- 刘晓祥, 刘池阳, 赵重远, 何娟. 1999. 盆地后期改造阶段与应力场演化. 石油与天然气地质, 20(3): 199~202.
- 刘永立, 尤东华, 李海英, 高利君, 蒋宏, 张卫峰, 鲍芳. 2021. 超深层碳酸盐岩层系硅质岩储层表征与评价——以塔里木盆地塔深6井为例. 石油与天然气地质, 2(3): 547~556.
- 刘雨晨, 邱楠生, 常健, 贾京坤, 李慧莉, 马安来. 2020. 碳酸盐团簇同位素在沉积盆地热演化中的应用——以塔里木盆地顺托果勒地区为例. 地球物理学报, 63(2): 597~611.
- 骆满生, 卢隆桥, 贾建, 王盛栋, 徐亚东, 何卫红. 2014. 中国中生代沉积盆地演化. 地球科学: 中国地质大学学报, 39(8): 954~976.
- 楼谦谦, 肖安成, 钟南翀, 吴磊. 2016. 大型陆相拗陷型沉积盆地原型恢复方法——以新生代柴达木盆地为例. 岩石学报, 32(3): 892~902.
- 卢红霞, 陈振林, 高振峰. 2009. 碎屑岩储层成岩作用的影响因素. 油气地质与采收率, 16(4): 57~59+118.
- 马永生, 楼章华, 郭彤楼, 付晓悦, 金爱民. 2006. 中国南方海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨. 地质学报, 80(3): 406~417.
- 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 徐旭辉, 胡东风, 曲寿利, 李根生, 何登发, 肖贤明, 曾义金, 饶莹. 2020. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题. 石油与天然气地质, 41(4): 655~672+683.
- 聂保锋, 于炳松, 朱金富. 2008. 巴楚地区碳酸盐岩中深层侵入岩特征及其对储层发育的影响. 地学前缘, 15(2): 90~99.
- 庞雄奇, 姜振学, 黄捍东, 陈冬霞, 姜福杰. 2014. 叠复连续油气藏成因机制、发育模式及分布预测. 石油学报, 35(5): 795~828.
- 彭恒, 刘显阳, 刘池洋, 惠潇, 全晓园, 张天兵, 赵红格, 王建强. 2022. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代中晚期构造体制转化过程及其动力学背景. 地质学报, 96(2): 387~402.
- 邱楠生, 何丽娟, 常健, 朱传庆. 2020. 沉积盆地热历史重建研究进展与挑战. 石油实验地质, 42(5): 790~802.
- 邱振, 邹才能. 2020. 非常规油气沉积学: 内涵与展望. 沉积学报, 38(1): 1~29.
- 任战利, 刘丽, 崔军平, 肖晖, 高胜利. 2008. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用. 石油与天然气地质, 29(4): 502~506.
- 任战利, 田涛, 李进步, 王继平, 崔军平, 李浩, 唐建云, 郭科. 2014. 沉积盆地热演化史研究方法 with 叠合盆地热演化史恢复研究进展. 地球科学与环境学报, 36(3): 1~21.
- 任战利, 崔军平, 祁凯, 杨桂林, 陈占军, 杨鹏, 王琨. 2020a. 深层、超深层温度及热演化历史对油气相态与生烃历史的控制作用. 天然气工业, 40(2): 22~30.
- 任战利, 祁凯, 杨桂林, 崔军平, 杨鹏, 王琨. 2020b. 沉积盆地深层热演化历史与油气关系研究现状及存在问题. 非常规油气, 7(3): 1~7+15.
- 任战利, 祁凯, 刘润川, 崔军平, 陈志鹏, 张圆圆, 杨桂林, 马骞. 2020c. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用. 岩石学报, 36(4): 1213~1234.
- 沈安江, 余敏, 胡安平. 2015. 海相碳酸盐岩埋藏溶孔规模与分布规律初探. 天然气地球科学, 26(10): 1823~1830.
- 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 张云辉, 张水昌, 张宝民, 朱光有, 高志勇. 2013. 中国深层油气形成、分布与潜力分析. 石油勘探与开发, 40(6): 641~649.
- 孙肇才, 谢秋元. 1980. 叠合盆地的发展特征及其含油气性——以鄂尔多斯盆地为例. 石油实验地质, 2(1): 13~21.
- 田丰华, 姜振学, 张晓波. 2007. 地层抬升剥蚀对油气成藏贡献初探. 地质学报, 81(2): 273~279.
- 万丛礼, 金强, 李钰源. 2014. 裂谷盆地岩浆活动控制油气概论. 油气地质与采收率, 21(1): 1~5.
- 王定一. 2000. 改造型含油气盆地类型及研究思路. 石油与天然气地质, 21(1): 19~23.
- 魏力民, 王岩, 张天操, 周桦, 温真桃, 董翱. 2020. 页岩气富集与高产主控因素——以川南地区五峰组—龙马溪组为例. 断块油气田, 27(6): 700~704.
- 王鑫, 蒋有录, 刘华, 王晓瑞. 2015. 济阳拗陷构造演化特征及其对烃源岩的控制作用. 第八届中国含油气系统与油气藏学术会议论文摘要汇编//. 中国石油学会石油地质专业委员会, 557~565.
- 王学军, 杨志如, 韩冰. 2015. 四川盆地叠合演化与油气聚集. 地学前缘, 22(3): 161~173.
- 王英民, 钱奕中. 1996. 残余盆地的特征及其油气资源评价方法的发展方向. 海相油气地质, 1(1): 15~21.
- 夏斌, 刘朝露, 陈根文. 2006. 渤海湾盆地中新代构造演化与构造样式. 天然气工业, 26(12): 11~12+85~88.
- 谢继容, 李亚, 杨跃明, 张本健, 刘冉, 何青林, 王尉, 王宇峰. 2021. 川西地区二叠系火山碎屑岩规模储层发育主控因素与天然气勘探潜力. 天然气工业, 41(3): 48~57.
- 杨华, 刘新社, 闫小雄, 张辉. 2015. 鄂尔多斯盆地神木气田的发现与天然气成藏地质特征. 天然气工业, 35(6): 1~13.
- 尹赞勋, 张守信, 谢翠华. 1978. 论褶皱幕. 北京: 科学出版社, 46~67.
- 翟刚毅, 王玉芳, 包书景, 郭天旭, 周志, 陈相霖, 王劲铸. 2017. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测. 地球科

- 学, 42(7): 1057~1068.
- 张东东, 刘文汇, 王晓锋, 罗厚勇, 王庆涛, 李忆宁, 李凤娇. 2021. 深层油气藏成因类型及其特征. 石油与天然气地质, 42(5): 1169~1180.
- 张光亚, 马锋, 梁英波, 赵喆, 秦雁群, 刘小兵, 张可宝, 客伟利. 2015. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展. 石油学报, 36(9): 1156~1166.
- 张光亚, 温志新, 刘小兵, 黄彤飞, 王兆明, 于炳松, 童晓光, 李曰俊, 辛仁臣, 陈汉林, 马锋, 刘红, 罗贝维. 2020. 全球原型盆地演化与油气分布. 石油学报, 41(12): 1538~1554.
- 张厚福, 孙红军, 梅红. 1999. 多旋回构造变动区的油气系统. 石油学报, 20(1): 38~44.
- 张抗. 1999. 改造型盆地及其油气地质意义. 新疆石油地质, 20(1): 65~70.
- 张梦琳, 李郭琴, 何嘉, 衡德. 2022. 川西南缘天官堂构造奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素. 岩性油气, 34(2): 141~151.
- 张旗, 金维浚, 王金荣, 陈万峰, 李承东, 焦守涛, 邵国良. 2016. 岩浆热场对油气成藏的影响. 地球物理学进展, 31(4): 1525~1541.
- 张少华. 2019. 银额地区石炭—二叠纪盆地地质特征与后期改造. 导师: 刘池洋. 西安: 西北大学博士学位论文; 1~155.
- 张水昌, 帅燕华, 朱光有. 2008. TSR 促进原油裂解成气: 模拟实验证据. 中国科学: 地球科学, 38(3): 307~311.
- 张水昌, 朱光有, 杨海军, 苏劲, 杨德彬, 朱永峰, 张斌, 崔洁. 2011. 塔里木盆地北部奥陶系油气相态及其成因分析. 岩石学报, 27(8).
- 张月霞, 胡文瑄, 姚素平, 俞昊, 康逊, 吴海光, 胡忠亚. 2018. 苏北盆地黄桥地区富 CO₂ 流体对二叠系龙潭组砂岩储层的改造与意义. 地质通报, 37(10): 1944~1955.
- 张金川, 陶佳, 李振, 王锡伟, 李兴起, 姜生玲, 王东升, 赵星旭. 2021. 中国深层页岩气资源前景和勘探潜力. 天然气工业, 41(1): 15~28.
- 赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 梁积伟, 黄雷. 2006. 鄂尔多斯盆地中侏罗世直罗—安定期原始面貌恢复. 石油与天然气地质, 27(2): 159~166.
- 赵俊峰, 盛双占, 王栋, 芦建军, 张建伍, 刘刚, 崔海栋. 2019. 临汾—运城盆地上古生界演化、改造及油气资源潜力分析. 地质论评, 65(1): 168~180.
- 赵文智, 王新民, 郭彦如, 刘化清, 白云来. 2006. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世原型盆地恢复及其改造演化. 石油勘探与开发, 33(1): 6~13.
- 赵旭东, 赵俊峰, 郭泽清, 曾旭, 田继先, 王迪, 胡超. 2018. 苏干湖地区与柴北缘侏罗系原始沉积关系探讨. 地质论评, 2018, 64(5): 1105~1117.
- 赵重远, 周立发. 2000. 成盆期后改造与中国含油气盆地地质特征. 石油与天然气地质, 21(1): 7~10.
- 周冰, 金之钧, 刘全有, 伦增珉, 孟庆强, 朱东亚. 2020. 苏北盆地黄桥地区富 CO₂ 流体对油气储—盖系统的改造作用. 石油与天然气地质, 41(6): 1151~1161.
- 周立宏, 吴永平, 肖敦清, 韦阿娟, 王桂芝. 2000. 黄骅拗陷第三系火成岩与油气关系探讨. 石油学报, 21(6): 29~34+128.
- 朱传庆, 田云涛, 徐明, 饶松, 袁玉松, 赵永庆, 胡圣标. 2010. 峨眉山超高级地幔柱对四川盆地烃源岩热演化的影响. 地球物理学报, 53(1): 119~127.
- 朱光有, 曹颖辉, 闫磊, 杨海军, 孙崇浩, 张志遥, 李婷婷, 陈永权. 2018. 塔里木盆地 8000m 以深超深层海相油气勘探潜力与方向. 天然气地球科学, 29(6): 755~772.
- 朱光有, 杨海军, 苏劲, 何坤, 韩剑发, 顾礼敬, 朱永峰, 张保涛. 2012. 塔里木盆地海相石油的真实勘探潜力. 岩石学报, 28(4): 1333~1347.
- 朱光有, 张水昌, 梁英波. 2006. TSR 对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式. 岩石学报, 22(8): 72~84.
- 朱夏. 1986. 论中国含油气盆地构造. 北京: 石油工业出版社.
- 邹才能, 邱振. 2021. 中国非常规油气沉积学新进展——“非常规油气沉积学”专辑前言. 沉积学报, 39(1): 1~9.
- Cai Chunfang, Zhang Chunming, He Hong, Tang Youjun. 2013. Carbon isotope fractionation during methane dominated TSR in East Sichuan Basin gas fields, China: A review. Marine and Petroleum Geology, 48: 100~110.
- Chalmers G R L, Bustin R M. 2008. Lower Cretaceous gas shales in northeastern British Columbia, Part II: Evaluation of regional potential gas resources. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 56(1): 22~61.
- Chang Heng, Gong Qi, Ou Yangrui, Huang Junfeng, Yang Xuewu. 2003. Characteristics of igneous rocks in the Taichung area and their petroleum geological significance. Geophysical Prospecting for Petroleum, 42(1): 49~53.
- Chen Anding. 2005. Nitrogen as an index of oil—gas preservation conditions in marine strata. Petroleum Geology and Experiment, 27(1): 85~89.
- Chen Fajing. 1986. Types, tectonic evolution and hydrocarbon distribution of hydrocarbon-bearing basins in China. Earth Science, 11(3): 221~230.
- Chen Jianjun, Liu Chiyang, Yao Yaming, Chen Jianzhong, He Mingxi, Yu Peixiang. 2007. Discussion on Primary Morphology of Yanqi Basin, Xinjiang in Mesozoic. Acta Sedimentologica Sinica, 24(4): 518~525.
- Chen Xueshi, Yi Wangxia, Lu Wenzhong. 2002. The paleo-karst reservoirs of oil/gas fields in China. Marine Origin petroleum geology, 7(4): 13~25.
- Chen Zhaonian, Chen Fajing. 1995. Inversion structure and hydrocarbon trap. Earth Science Frontiers, 2(3): 96~102.
- Dai Jinxing, Shi Xin, Wei Yanzhao. 2001. Summary of the abiogenic origin theory and the abiogenic gas pools (fields). Acta Petroli Sinica, 22(6): 5~10.
- Dai Jinxing. 2003. Atmospheric fields, and its sources in China. Beijing: Science Press, 175~180.
- Fang Jianjun, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Qiu Xinwei, Ma Yanping, Zhao Junfeng. 2008. Topographic relief and fluid modification: the important content of petroliferous basin analysis and evaluation. Oil and Gas Geology, 29(3): 297~302+311.
- Fu Xiaofei, Wu Tong, Lu Yanfang, Liu Shaobo, Tian Hua, Lu Mingxu. 2018. Research status and development trend of the reservoir caprock sealing properties. Oil and Gas Geology, 39(3): 454~471.
- Gan Kewen. 1982. Basic types of oil- and gas-bearing basins in the world and evaluation of prospects. Acta Petroli Sinica, 3(S1): 24~33.
- Gao Peng, Hu Shengbiao, Jiang Guangzheng, Li Chunrong, Wang Yi, Zhang Chao, Hu Di, Wang Yibo, Wang Zhuting. 2017. Principles and progress of research methods for thermal history of sedimentary basins. Earth Science Frontiers, 24(3): 65~78.
- Guo Tonglou, Zhang Hanrong. 2014. Formation and enrichment model of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin. Petroleum Exploration and Development, 41(1): 28~36.
- He Zhiliang, Li Shuangjian, Liu Quanyou, Yang Tianbo, Zhang Ying.

- 2020&. Deep geological processes and deep resources in basins; scientific issues and research directions. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(5): 123~135.
- Huo Zhipeng, Pang Xiongqi, Du Yijing. 2013&. Oil—gas shows from destruction oil/gas reservoirs in the petroliferous basins of China and their geological significance. *Oil and Gas Geology*, 34(4): 5~14.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems; The Mississippian Barnett shale of north—central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91(4): 475~499.
- Jia Chengzao. 2017&. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 1~11.
- Jiao Fangzheng. 2018&. Significance and prospects for discovery of oil and gas reservoirs in the Shunbei ultra-deep carbonate fault solution in the Tarim Basin. *Oil and Gas Geology*, 39(2): 207~216.
- Kent A B. 2007. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin; Issues and discussion. *AAPG Bulletin*, 91(4): 523~533.
- Li Jianying, Lu Gangchen, Kong Fandong, Li Tinghui. 2001&. Reservoir characteristics and pore evolution of Ordovician in qianmiqiao buried hill. *Oil and Gas Geology*, 22(4): 367~371.
- Li Mingcheng, Li Wei, Cai Feng, Sun Daming. 1997&. Integrative study of preservation conditions of oil and gas pools. *Acta Petrolei Sinica*, 18(2): 41~48.
- Li Quan, Du Xiangdong, Kang Hongquan, Li Jinbo, Xia Shiqiang. 2016&. The structural control effect on petroleum accumulation elements in southern Apennine region. *Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition)*, 38(2): 20~28.
- Li Sanzhong, Zhang Guowei, Zhou Lihong, Zhao Guochun, Liu Xin, Suo Yanhui, Liu Bo, Jin Chong, Dai Liming. 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. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 79~107.
- Liu Chiyang. 1991&. Later transformation and paleo geotectonic recovery. *Journal of Northwestern University (Natural Science Edition)*, 21(S): 1~8.
- Liu Chiyang. 1993&. Foundation of the study of the dynamic evolution of basins; Reconstruction of original basins. Zhao Zhongyuan, Liu Chiyang, Yao Yuan. *Developments in Oil and Gas Basin Geology*. Xi'an; Northwest University Press, 26~32.
- Liu Chiyang. 1996&. Strong late-reformation; one of the important characteristics of sedimentary basins in china. *Oil and Gas Geology*, 17(4): 255~261.
- Liu Chiyang. 2007&. Types, characteristics and petroleum accumulation in Superimposed basins. *Acta Petrolei Sinica*, 28(1): 1~7.
- Liu Chiyang. 2008&. Dynamics of sedimentary basin and basin reservoir (ore)forming system. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 30(1): 1~23.
- Liu Chiyang, Fu Suotang, Zhang Daowei, Chen Yan, Huang Lei, Shi Yajun. 2020a&. Determination of giant oil and gas enrichment areas and exploration results in Qaidam Basin; an example of source control and reservoir control in reformed basin. *Acta petrologica Sinica*, 41(12): 1527~1537.
- Liu Chiyang, Ma Yanping, Wu Bolin, Liu Chao. 2008&. Oil and gas dissipation —— the weakness and difficulty of oil and gas geological research and resource evaluation. *Oil and Gas Geology*, 29(4): 517~526.
- Liu Chiyang, Sun Haishan. 1999&. Classification transformation type basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(2): 3~6+92.
- Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Qiu Xinwei, Zhang Dongdong, Zhao Junfeng, Zhao Hongge, Deng Yu. 2020b&. Geodynamic environment and tectonic attributes of the hydrocarbon-rich sag in Yanchang Period of Middle—Late Triassic, Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1913~1930.
- Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhao Hongge, Zhang Dongdong, Deng Yu, Zhao Xiaochen. 2015&. The classification of sedimentary basins and discussion on relevant issues. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 1~26.
- Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhao Xiaochen, Huang Lei, Zhang Dongdong, Zhao Junfeng, Deng Yu, Ma Huanhuan. 2020c&. The prototype basin and its nomenclatures and research. *Petroleum Geology and Experiment*, 42(5): 720~727.
- Liu Chiyang, Yang Xingke. 2000b&. Thinking for researches and oil—gas assessment of reformed basins. *Oil and Gas Geology*, 21(1): 11~14.
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, Yue Leping, Zhao Junfeng, Wang Jianqiang. 2006&. Space—time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617~638.
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Yang Xingke, Chen Jianjun. 2003#. The late and latest stage pool-forming and orientation of Hydrocarbon; the important features of Chinese sedimentary basins. Chinese academy of engineering, Energy and mineral resource council around Pacific Ocean, Chinese petroleum society. The 21st Chinese and International oil and gas exploration. Beijing; China Petrochemical Press, 57~60.
- Liu Chiyang, Zhao Zhongyuan, Yang Xingke. 2000a&. Strong activity and active deep action; two important features of Chinese Sedimentary Basins. *Oil and Gas Geology*, 21(1): 1~6.
- Liu Chiyang, Zheng Menglin, Yang Xingke, He Bizhu, Ren Zhanli, Guo Pei. 2016&. Evolution and late modification of Mesozoic marine Qiangtang basin and its hydrocarbon occurrence. *Acta geologica Sinica*, 90(11): 3259~3281.
- Liu Guangding. 1997&. Discussion on residual basin. *China Petroleum Exploration*, (3): 1~4.
- Liu Wenhui, Wang Jie, Tenger, Qin Jianzhong, Rao Dan, Tao Cheng, Lu Longfeng. 2012&. Multiple hydrocarbon generation of marine strata and its tracer technique in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(S1): 115~125.
- Liu Weixin, Wang Tingbin, Zhang Wentao. 2008&. Reservoir sandstones and the production capacity in daniudi gas field, the Ordos basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(6): 557~563.
- Liu Xiaoxiang, Liu Chiyang, Zhao Zongyuan, He Juan. 1999&. Post alteration stages and stress field evolution of basins. *Oil and Gas Geology*, 20(3): 199~202.
- Liu Yongli, You Donghua, Li Haiying, Gao Lijun, Jiang Hong, Zhang Weifeng, Bao Fang. 2021&. Characterization and evaluation of chert reservoirs in ultra-deep carbonate rock formations— A case study on Well TS 6 in the Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(3): 547~556.
- Liu Yuchen, Qiu Nansheng, Chang Jian, Jia Jingkun, Li Huili, Ma Anlai. 2020&. Application of clumped isotope thermometry to thermal evolution of sedimentary basins; A case study of Shuntuoguole area of Tarim Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(2): 597~611.
- Luo Mansheng, Lu longqiao, Jia Jian, Wang Shengdong, Xu Yadong, He Weihong. 2014&. Evolution of Sedimentary Basins in China during Mesozoic. *Earth Science; Journal of China University of Geosciences*, 39(8): 954~976.

- Lou Qianqian, Xiao Ancheng, Zhong Nanchong, Wu Lei. 2016&. Prototype restoration method of large continental depression-type sedimentary basins: A case study of Cenozoic Qaidam Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 892~902.
- Lu Hongxia, Chen Zhenlin, Gao Zhenfeng. 2009&. Influencing factors of diagenesis of clastic reservoirs. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 16(4): 57~59+118.
- Ma Yongsheng, Lou Zhanghua, Guo Tonglou, Fu Xiaoyue, Jin Aimin. 2003&. An Exploration on a Technological System of Petroleum Preservation Evaluation for Marine Strata in South China. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 406~417.
- Ma Yongsheng, Fan Maowen, Cai Xunyu, Xu Xuhui, Hu Dongfeng, Qu Shouli, Li Gensheng, He Dengfa, Xiao Xianming, Zeng Yijin, Rao Ying. 2020&. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems. *Oil and Gas Geology*, 41(4): 655~672+683.
- Nie Baofeng, Yu Bingsong, Zhu Jinfu. 2008&. The characteristics of intrusive rocks and their influence on carbonate reservoir development in the Bachu area, Tarim basin. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 90~99.
- Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, Huang Handong, Chen Dongmei, Jiang Fujie. 2014&. Formation mechanisms, distribution models, and prediction of superimposed, continuous hydrocarbon reservoirs. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 795~828.
- Peng Heng, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhang Shaohua, Zhao Xiaochen, Ma Ming, Li Keliang, Feng Xiaolin, Guan Yuzhao. 2021. Discovery of Multiple Tectonic Reformation of the Eastern Yingen—Ejinaqi Basin: Evidence from Detrital Chronology. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 693~695.
- Peng Heng, Liu Xianyang, Liu Chiyang, Hui Xiao, Quan Xiaoyuan, Zhang Tianbing, Zhao Hongge, Wang Jianqiang. 2022&. Spatial—temporal evolution and the dynamic background of the translation of Mid—Late Mesozoic tectonic regimes of the southwest Ordos basin margin. *Acta Geologica Sinica*, 96(2): 387~402.
- Qiu Nansheng, He Lijuan, Chang Jian, Zhu Chuanqing. 2020&. Research progress and challenges of thermal history reconstruction in sedimentary basins. *Petroleum geology & experiment*, 42(5): 790~02.
- Qiu Zhen, Zou Caineng. 2020&. Unconventional Petroleum Sedimentology: Connotation and prospect. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 1~29.
- Qiu Zhen, Zou Caineng. 2020. Controlling factors on the formation and distribution of “sweet-spot areas” of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 194.
- Raut U, Famá M, Teolis B D, Baragiola R A. 2007. Characterization of porosity in vapor-deposited amorphous solid water from methane adsorption. *The Journal of Chemical Physics*, 127.
- Ren Zhanli, Liu Li, Cui Junping, Xiao Hui, Gao Shengli. 2008&. Application of tectonic—thermal evolution history to hydrocarbon accumulation timing in sedimentary basins. *Oil and Gas Geology*, 29(4): 502~506.
- Ren Zhanli, Cui Junping, Qi Kai, Yang Guilin, Chen Zhanjun, Yang Peng, Wang Kun. 2020a&. Control effects of temperature and thermal evolution history of deep and ultra-deep layers on hydrocarbon phase state and hydrocarbon generation history. *Natural Gas Industry*, 40(2): 22~30.
- Ren Zhanli, Qi Kai, Liu Ruichuan, Cui Junping, Chen Zhipeng, Zhang Yuanyuan, Yang Guilin, Ma Qian. 2020c&. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 36(4): 1213~1234.
- Ren Zhanli, Qi Kai, Yang Guilin, Cui Junping, Yang Peng, Wang Kun. 2020b&. Research status and existing problems of relationship between deep thermal evolution history and oil—gas in sedimentary basins. *Unconventional Oil & Gas*, 7(3): 1~7+15.
- Ren Zhanli, Tian Tao, Li Jinbu, Wang Jiping, Cui Junping, Li Hao, Tang Jianyun, Guo Ke. 2014&. Research methods of geothermal evolution history of sedimentary basin and research progress of geothermal evolution history restoration of superimposed basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(3): 1~21.
- Shen Anjiang, She Min, Hu Anping. 2015&. Scale and distribution of marine carbonate burial dissolutional pores. *Natural Gas Geoscience*, 26(10): 1823~1830.
- Shkolin A V, Fomkin A A. 2009. Deformation of AUK microporous carbon adsorbent induced by methane adsorption. *Colloid Journal*, 71(1): 119~124.
- Summer N S, Ayalon A. 1995. Dike intrusion into unconsolidated sandstone and the development of quartzite contact zones. *Journal of Structural Geology*, 17(7): 997~1010.
- Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, Zhang Yunhui, Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Zhu Guangyou, Gao Zhiyong. 2013&. Formation, distribution, and potential of deep hydrocarbon resources in China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(6): 641~649.
- Sun Zhaocai, Xie Qiuyuan. 1980#. Developmental characteristics of stacked basins and its oil- and gas-bearing properties—the Ordos Basin as an example. *Petroleum Geology and Experiment*, 2(1): 13~21.
- Tian Fenghua, Jiang Zhenxue, Zhang Xiaobo. 2007&. Preliminary study on contribution of rift—erosion to oil and gas accumulation. *Acta geologica Sinica*, 81(2): 273~279.
- Wang Congli, Jin Qiang, Li Juyuan. 2014&. Outline on magmatic activities controlling oil—gas theory in rift basins. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 21(1): 1~5.
- Wang Dingyi. 2000&. Research thinking and types of reformed petroliferous basins. *Oil and Gas Geology*, 21(1): 19~23.
- Wei Limin, Wang Yan, Zhang Tiancao, Zhou Ye, Wen Zhentao, Dong Ao. 2020&. Main control factors of enrichment and high production of shale gas: a case study of Wufeng—Longmaxi Formation in Southern Sichuan. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 27(6): 700~704.
- Wang Xin, Jiang Youlu, Liu Hua, Wang Xiaorui. 2015&. Structural evolution characteristics of jiyang depression and its controlling effect on source rocks. *The 8th China Petroleum System and Reservoir Academic Conference Paper Abstract Collection//Petroleum Geology Professional Committee of China Petroleum Society*, 557~565.
- Wang Xuejun, Yang Zhiru, Han Bing. 2015&. Stacked evolution and hydrocarbon accumulation in the Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 161~173.
- Wang Yingmin, Qian Yizhong. 1996#. The characteristics of residual basins and the development direction of oil and gas resource evaluation methods. *Marine Origin Petroleum Geology*, 1(1): 15~21.
- Xia Bin, Liu Zhaolu, Chen Genwen. 2006&. Meso—Cenozoic tectonic evolution and tectonic styles in the Bohai bay basin. *Natural Gas Industry*, 26(12): 11~12+85~88.
- Xie Jirong, Li Ya, Yang Yueming, Zhang Benjian, Liu Ran, He Qinlin, Wang Wei, Wang Yufeng. 2021&. Main control factors and natural

- gas exploration potential of Permian volcanic clastic scale reservoir development in West Sichuan. *Natural Gas Industry*, 41(3): 48~57.
- Yang Hua, Liu Xinshe, Yan Xiaoxiong, Zhang Hui. 2015&. Geological characteristics of gas formation and discovery of Shenmu gas field in Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 35(6): 1~13.
- Yin Zanzun, Zhang Shouxin, Xie Cuihua. 1978#. On the fold curtain. Beijing: Science Press, 46~67.
- Zhai Gangyi, Wang Yufang, Bao Tianjing, Guo Tianxu, Zhou Zhi, Chen Xianglin, Wang Jinzhou. 2017&. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in Southern China. *Earth Science*, 42(7): 1057~1068.
- Zhang Dongdong, Liu Wenhui, Wang Xiaofeng, Luo Houyong, Wang Qingtao, Li Yining, Li Fengjiao. 2021&. Genetic types and characteristics of deep oil and gas plays. *Oil and Gas Geology*, 42(5): 1169~1180.
- Zhang Guangya, Ma Feng, Liang Yingbo, Zhao Zhe, Qin Yanqun, Liu Xiaobing, Zhang Kebao, Ke Weili. 2015&. Domain and theory technology progress of global deep oil & gas exploration. *Acta Petroli Sinica*, 36(9): 1156~1166.
- Zhang Guangya, Wen Zhixin, Liu Xiaobing, Huang Tongfei, Wang Zhaoming, Yu Bingsong, Tong Xiaoguang, Li Yuejun, Xin Renchen, Chen Hanlin, Ma Feng, Liu Hong, Luo Niwei. 2020&. Evolution of global prototype basin and petroleum distribution. *Acta Petroli Sinica*, 41(12): 1538~1554.
- Zhang Houfu, Sun Hongjun, Meihong. 1999#. The petroleum system in the region of polycyclic tectonic movement. *Acta Petroli Sinica*, 20(1): 38~44.
- Zhang Kang. 1999&. Reformed basin and its significance in petroleum geology. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(1): 65~70.
- Zhang Menglin, Li Guoqin, He Jia, Heng De. 2022&. Main controlling factors of the Ordovician Wufeng Formation—Silurian Longmaxi Formation shale gas enrichment in the Tiangongtang structure in the southwestern Sichuan. *Lithologic Reservoirs*, 34(2): 141~151.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Wang Jinrong, Chen Wanfeng, Li Chengdong, Jiao Shoutao, Shao Guoliang. 2016&. Influence of magma thermal field on hydrocarbon accumulation. *Progress in Geophysics*, 31(4): 1525~1541.
- Zhang Shaohua. 2019&. Geological characteristics and later transformation of the Carboniferous—Permian basin in Yin'e area. Xi'an: Northwest University, Mentor: Liu Chiyang; Xi'an: Doctoral dissertation of Northwestern University; 1~155.
- Zhang Shuichang, Shuai Yanhua, Zhu Guangyou. 2008&. TSR promotes cracking of crude oil into gas; evidence from simulation experiments. *Science China: Earth Sciences*, 38(3): 307~311.
- Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Yang Haijun, Su Jin, Yang Debin, Zhu Yongfeng, Zhang Bin, Cui Jie. 2011&. The Ordovician oil and gas phase state and its origin in the northern Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8).
- Zhang Yuexia, Hu Wenxuan, Yao Suping, Yu Hao, Kang Xun, Wu Haiguang, Hu Zhongya. 2018&. The interaction of CO₂-rich fluid with sandstone and its significance for sandstone reservoirs of Permian Longtan Formation in Huangqiao area, Subei Basin. *Geological Bulletin*, 37(10): 1944~1955.
- Zhang Jinchuan, Tao Jia, Li Zhen, Wang Xiwei, Li Xiqi, Jiang Shengling, Wang Dongsheng, Zhao Xingxu. 2021&. Prospect of deep shale gas resources in China. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 15~28.
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Yu Lin, Liang Jiwei, Huang Lei. 2006&. Restoration of the original appearance of Zhiluo—Anding in the Middle Jurassic of Ordos Basin. *Oil and Gas Geology*, 27(2): 159~166.
- Zhao Junfeng, Sheng Shuangzhan, Wang Dong, Lu Jianjun, Zhang Jianwu, Liu Gang, Cui Haidong. 2019&. Analysis on Evolution, Modification and Hydrocarbon Resources Potential of the Upper Paleozoic in the Linfen—Yuncheng Basin. *Geological Review*, 65(1): 168~180.
- Zhao Wenzhi, Wang Xinmin, Guo Yanru, Liu Huaqing, Bai Yunlai. 2006&. Restoration and tectonic reworking of the Late Triassic basin in western Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(1): 6~13.
- Zhao Xudong, Zhao Junfeng, Guo Zeqing, Zeng Xu, Tian Jixian, Wang Di, Hu Chao. 2018&. Discussion on the Original Sedimentary Relationship between Suganhu Area and Northern Qaidam Basin during Jurassic Period. *Geological Review*, 64(5): 1105~1117.
- Zhao Zhongyuan, Zhou Lifa. 2000&. Post-reformation and geological features of China's petroliferous basins. *Oil and Gas Geology*, 21(1): 7~10.
- Zhou Bing, Jin Zhijun, Liu Quanyou, Lun Zengmin, Meng Qingqiang, Zhu Dongya. 2020&. Alteration of reservoir—caprock systems by using CO₂-rich fluid in the Huangqiao area, North Jiangu Basin. *Oil and Gas Geology*, 41(6): 1151~1161.
- Zhou Lihong, Wu Yongping, Xiao Duiqing, Wei Ajuan, Wang Guizhi. 2000#. Exploring the relationship between tertiary igneous rocks and oil and gas in the Huanghua Depression. *Acta Petroli Sinica*, 21(6): 29~34+128.
- Zhu Chuanqing, Tian Yuntao, Xu Ming, Rao Song, Yuan Yusong, Zhao Yongqing, Hu Shengbiao. 2010&. The effect of Emeishan super mantle plume to the thermal evolution of source rocks in the Sichuan basin. *Acta Geophysica Sinica*, 53(1): 119~127.
- Zhu Guangyou, Cao Yinghui, Yan Lei, Yang Haijun, Sun Conghao, Zhang Zhiyao, Li Tingting, Chen Yongquan. 2018&. Petroleum exploration potential and favorable areas of ultra-deep marine strata deeper than 8000 meters in Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 29(6): 755~772.
- Zhu Guangyou, Yang Haijun, Su Jin, He Kun, Han Jianfa, Gu Lijing, Zhu Yongfeng, Zhang Baotao. 2012&. True exploration potential of marine oil in Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1333~1347.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. 2006&. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR; an important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan basin. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 72~84.
- Zhu Xia. 1986#. On the tectonics of oil and gas-bearing basins in China. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Zou Caineng, Qiu Zhen. 2021&. Preface: New advances in unconventional petroleum sedimentology in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 1~9.

Later reformation of sedimentary basin and its influence on hydrocarbon accumulation

QIN Yang, YANG Lihua, LIU Chiyang

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

Objectives: Chinese continent, made up of several blocks, is structurally complex and heterogeneous, and has experienced multiple episodes of tectonic movements and high activity. Due to its special tectonic position, the later reformation of the Chinese sedimentary basins is intense and widespread, which is one of the distinctive features of the Chinese sedimentary basins apart from other basins in the world. As hydrocarbons are fluid minerals, later reformation has a significant influence on the reservoir, formation, and distribution of the hydrocarbon. Later reformation is integral to the study of basin evolution, tectonic characteristics, and the evaluation of hydrocarbon resources. The Symposium on the theory, methods and key technologies of Oil and Gas Exploration in Reformed Basins, held in 1998, has promoted and triggered studies and concerns in the oil and gas industry and academic circles in China towards the later reformation of basins, reformed basins and its oil and gas exploration. In this work, we review the advanced research on later reformation and reformed basins, a general account of the progress of research on later reformation and reformed basins, and its implications for conventional hydrocarbons occurrence—accumulation, later accumulation-positioning, and special influence on unconventional hydrocarbons through a review of the available research results on later reformation and reformed basins at home and abroad.

Keywords: later reformation; reformed basin; hydrocarbon occurrence; later accumulation-positioning; China

Acknowledgement: This paper is the research results of the National Natural Science Foundation of China (No. 41330315) and the special funding of the Department of Science and Technology of the State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwestern University.

First author: QIN Yang, male, born in 1998, master student, major in mineral census and exploration; Email: yangQin202021427@163.com

Corresponding author: LIU Chiyang, male, born in 1953, professor, is mainly engaged in basin dynamics and oil and gas exploration teaching and research; Email: lcy@nwu.edu.cn

Manuscript received on: 2022-03-19; Accepted on: 2022-05-17; Network published on: 2022-06-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.041

Edited by: LIU Zhiqiang