

沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统

刘池洋

(西北大学大陆动力学国家重点实验室, 含油气盆地研究所, 陕西 西安 710069)

摘要: 以沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统为主线, 梳理和归纳了笔者在此方面理论研究的部分认识和观点。在地球科学研究和应用的3大领域(科学研究、物质需求、生存环境)中, 沉积盆地均处于极为重要的地位。其中展布面积大、发育时间长的大中型盆地(如含油气盆地)意义更为重要。沉积盆地是地史上地壳或岩石圈较长时间相对沉降、沉积物在其中不断充填过程中的一种负向地壳构造。将沉积盆地动力学定义为: 直接控制和明显影响盆地沉降和沉积充填的地球内、外动力地质作用有机耦合的统一动力学系统和演化过程; 属地球动力学大系统的重要组成部分。根据盆地沉降动力的不同, 将盆地成因划分为热力、应力、重力和复合成因4种类型。从厘定和揭示盆地沉降、沉积和堆积中心的分布位置、演变规律及其相互关系入手, 剔去非沉降作用产生的沉积效应, 有可能揭示沉降作用特征和其与沉积、堆积中心的时空演变关联及原因。活动性强、深部作用活跃、后期改造强烈是中国沉积盆地的重要特点, 这由中国大陆的特性所决定。根据后期改造的主要地质作用及改造形式的不同, 将改造盆地划分为8种类型。剔去后期改造的影响, 系统恢复原始盆地面貌, 为深刻认识和揭示盆地演化-改造过程和油气成藏、定位及分布的重要基础。根据改造盆地的地质实际和笔者的研究实践, 探讨和提出了改造盆地研究和油气评价的思路及程式; 从绝对时间和相对时限两方面, 具体厘定了中国盆地油气晚期-超晚期成藏-定位的时限。探讨了深部作用对油气富集的影响、油气逸散及其地质效应等问题。含油气盆地动力学研究系统可划分为成盆、成藏和评价3大次系统。在盆地演化和改造过程中, 各次系统及子系统之间联系密切、相互作用。倡导沉积盆地研究遵循“整体、动态、综合”的总则。世界已探明的砂岩型铀矿床逾82%与已生产的油气田或煤田同盆共存。这4种主要能源矿产同盆共存富集存在普遍, 但其富集成矿区分布却有明显的分区性, 其中尤以中东地区典型。在中东地区能源矿产成矿域诸盆地中, 多种能源矿产赋存和分布的特点为: 空间分布复杂有序、各含(储)矿层位及地区联系密切、成藏(矿)-定位时期相同或相近、赋存环境和成藏(矿)作用有机相关; 铀成矿过程和主成矿期与区域动力学环境演变有明显地响应关系, 并与所在盆地油气的成藏-定位时期基本一致; 表明其间有着密切的内在联系和统一的地球动力学背景。沉积盆地集多种有机和无机、金属与非金属矿产以及水资源等共存于一盆, 是诸多沉积矿产同盆成生、赋存的基本单元和成藏(矿)的巨型复杂系统, 称之为沉积盆地成藏(矿)系统。该系统中各种沉积矿产的成藏(矿)不是孤立存在和单独出现; 其形成和分布有机关联、相互作用、彼此影响, 内在联系形式多样; 有其自身的成矿特点和成藏(矿)环境, 应将其作为一种独立的成矿系统与其他成矿系统相并列和区别。本文讨论了小型含油气盆地的类型和其油气赋存条件、成熟盆地再研究的必要性和指导思想, 适于中国西部大陆动力学研究的(稳定陆)块、盆(地)、带(各类构造活动带)系统动力学等。地球和盆地均属非常复杂的巨系统, 运用整体和系统的学术思想, 研究地学等复杂性科学是一个有效途径。在复杂系统研究中, 各子系统的相互作用最为重要, 同时要重视研究思想和方法论的嬗变, 揭示研究对象的个性特征。

关键词: 沉积盆地; 沉积盆地动力学; 盆地成因机制; 沉积盆地成藏(矿)系统; 中东地区能源矿产成矿域; 后期改造与改造盆地; 油气逸散; 小型含油气盆地; 中国沉积盆地; 研究系统; 复杂性科学; 方法论

中图分类号: TE122.3⁺1; P618.130.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)01-0001-23

收稿日期: 2008-01-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2003CB214607); 教育部长江学者和创新团队发展计划“能源盆地油气地质”项目(IRT0559); 国家自然科学基金项目(40372096)

作者简介: 刘池洋, 笔名刘池洋(1953-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 国家973项目首席科学家, 从事油气地质与勘探、盆地动力学教学与研究。E-mail: lcy@nwu.edu.cn

Dynamics of Sedimentary Basin and Basin Reservoir(Ore) Forming System

LIU Chi-yang

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Oil and Gas Basin, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract With introduction and discussion of the dynamics of sedimentary basins and basin reservoir (ore) forming systems to be a main line, this paper generalizes and summarizes author's thoughts and viewpoints in this area. Sedimentary basins are significant in three aspects (scientific research, material needs and living environment) of earth science research and application, especially those large and medium-sized basins having a large distribution area and long development history (e. g., oil-gas basins). A sedimentary basin is a negative tectonic unit formed in a depression of crust or lithosphere, in which sediments continuously infill in geologic history. The author defines dynamics of sedimentary basin as: A coupling dynamic system and evolution process of earth internal and external dynamics directly controlling and obviously impacting on basin subsidence and sediments infilling, and it is an important component of geodynamic systems. According to different driven force of basin depression, the origin of basin can be divided into thermal, stress, gravity and composite four types. From redefinition and revealing distribution position, evolution and relationships of basin subsidence centre, depocenter and accumulation centre, ruling out the sedimentary effects generated by non-subsidence processes, it is possible to characterize the role of subsidence and its temporal-spatial correlation and reasons with deposit and accumulation centers. The Chinese sedimentary basins are characterized by their strong tectonic activities, deep processes and intensive late reforming. All these are attributed to tectonic features of China continent. Based on the main geological processes of reforming and reforming fashions, the reformed basins can be divided into eight types. Eliminating impacts of late reforming and recovering original basin can build up a firm basis for recognition of basin evolution-reforming processes and oil-gas reservoir forming, positioning and distribution. According to the geological facts of reformed basin and the research practice of the author, ideas and regulations of study on reformed basin and oil-gas evaluation are explored and proposed. The time limit of oil-gas late-extra late reservoir forming-positioning in Chinese basins is redefined in terms of absolute time and relative time. And also, the influences of deep processes on oil-gas accumulation, oil-gas escape and geologic effects are discussed. The research for dynamics of petroliferous basins can be divided into three major systems of basin forming, reservoir forming and assessment. In the study of basin evolution and reforming, a close correlation and interaction exist between the major systems and the sub-systems. The "whole, dynamic, integrated" principle for research of the basins is promoted to follow. More than 82 percent of proven sandstone-type uranium deposits on the earth coexist with oil-gas or coal fields in the same basins. Association and enrichment of the four main energy minerals within the same basin is common. But, the distribution of enrichment for different minerals is localized especially this is typical in central-east Asia. The characteristics of occurrence of multi-energy mineral deposits in all basins of mineralization domain in central-east Asia show a complex but orderly spatial distribution, close correlation of each (reservoir) ore-bearing stratum and region background, the same or similar timing of reservoir (ore) forming-positioning, related occurrence setting and reservoir (ore) forming. Also, the uranium main mineralization processes and mineralization period is in response to the regional dynamic changes, and basically consistent with the reservoir forming-positioning period of oil-gas in basins, indicating a close inherent relationships and unified geodynamic setting between them. The single sedimentary basin having multi-organic and inorganic, metallic and non-metallic minerals and water resources inside represents a basic unit and a giant complex system for multi-mineral accumulation and reservoir (ore) forming in the same basin. The system is called the reservoir (ore) forming system of sedimentary basin. In the system, the occurrence of various sedimentary minerals is not isolated. Their formation and distribution are closely related, interacting mutually affecting, and intrinsic relationship exhibits in different forms. This system possesses its own characteristics of

ore forming and reservoir (ore) forming setting. Thus, it should be treated as an independent mineralization system differing from and paralleling to other ore-forming systems. This paper discusses types of small-sized petroliferous basins and the conditions of oil-gas accumulation, the necessity and guidance for further study of mature basins. It is suitable for the system dynamics study of (stable continental) block-basin-belt (all types of tectonically active belts) in west China. The earth and basin all belong to the complex giant systems of different classes. It is an effective approach to use integrated and systematic academic thoughts to study complex science such as geosciences. In study of complex systems, the interaction of various sub-systems is the most important. In the mean while, the attention has to be drawn to the evolution of ideology and methodology, and to effort to disclose the individual characteristics of research objects.

Key words: sedimentary basins; dynamics of sedimentary basins; basin formation mechanism; reservoir (ore) forming system of sedimentary basins; mineralization domain of energy minerals in centra-east Asia; late reforming and reformed basin; oil-gas escape; small-sized petroliferous basins; Chinese sedimentary basin; research system; complex science; methodology

0 引言

在30多年的学术生涯中,沉积(能源)盆地及沉积矿产为笔者教学和科研的主要内容和重点研究领域。结合相关科研项目 and 教学的需要,笔者先后对中国20多个重要含油气盆地及沉积盆地和世界主要类型的典型能源盆地(如特提斯构造域数十个克拉通型/聚敛型盆地;苏丹 Muglad 盆地和中非及大西洋诸离散/转换型盆地;美国西部洛杉矶等走滑-转换型盆地;东南亚地区诸俯冲聚敛型盆地;北美与俄罗斯等地内克拉通盆地;中东成矿域多种能源共存盆地等)进行了多种内容较系统的专门研究,并对比总结了不同类型盆地油气等能源矿产的赋存条件、成藏特点、分布规律和形成环境。对中外典型盆地的系统对比和总结,为深入认识和揭示中国盆地的个性特征大有裨益。

与此同时,笔者等发起和主办了3次全国性地研讨论会(全国首届含油气盆地地质研讨会,1992;改造型盆地油气勘探理论方法和关键技术,1997;鄂尔多斯盆地及邻区中生代演化动力学和其资源环境效应,2006)和多次盆地专题讨论会。

本文仅以沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统为主线,将笔者在此方面部分理论研究的认识和观点予以梳理、归纳,请同行、专家讨论、匡正。

1 沉积盆地的重要地位和研究意义

1.1 重要地位

地球表面可分为大陆和大洋两大地貌-构造单元,其中海洋约占地球表面总面积的71%^[1]。从地貌形态和正在接受沉积等方面考虑,大洋似可看作

一种特殊的巨型沉积盆地或由若干个沉积盆地组成的超级盆地(群),故又常称其为大洋盆地。

大陆由沉积盆地(被水体或一定厚度未变质且相对变形较弱的沉积盖层覆盖的地区)、造山带(遭受强烈褶皱和其他变形的狭长带状隆起)和地盾(大面积出露前寒武纪基底变质岩系,仅在局部有薄层沉积物覆盖)3种属性和特征显著不同的构造单元所构成,其中沉积盆地所占面积最大。

据统计,海拔在500 m以下的平原和丘陵,约占陆地总面积的52.2%^[1],大部分为沉积盆地;其中海拔低于200 m的平原约占面积的50%^[1],几乎全为正在沉降、接受沉积的冲积平原或三角洲和湖盆,即正在发育的沉积盆地。在海拔500 m以上的山地和高原,仍有较大面积为沉积盆地所占据。若将经后期改造部分已不具盆地形态、但仍有沉积矿产勘探远景的残留沉积盆地(体)计算在内,盆地面积约占大陆总面积的4/5。加上被水体及沉积物所覆盖的大洋盆地,沉积盆地总面积约占地球表面总面积的94%。

可见,无论是研究世界地质或大陆地质,还是探讨地球动力学和大陆动力学过程,沉积盆地均处于极为重要的地位。

1.2 研究意义

1.2.1 科学研究

盆地内的沉积层(岩)翔实记录了地球最外圈层的演化历史、各种地质构造活动和过程、气候与环境演变,此记录时间连续、信息丰富,其中有些信息是其他构造单元无法替代、大陆或地球动力学研究不可或缺的重要内容。如对全球过去的气候演变、环境变迁、地史上海平面升降和海陆变化、生物演化以及更大区域的板块运动等研究。

随着地球动力学环境的改变, 诸多造山带现今一般仅在地壳中浅层和地表保留其外部形态, 深浅部特征多不协调, 常呈立交桥结构^[2], 因而难以反映其形成演化时的深部地球动力环境。然多数盆地现今仍较好地留存有深、浅部密切相关的深部结构特征。特别是正发育的盆地现今深部作用等信息, 已成为探究地壳隆升与沉降、岩石圈结构和深部过程、地球动力事件发生背景等方面的重要内容。

研究沉积盆地和沉积层所蕴涵的各种记录和信息, 有助于进一步深化诸多具有重要科学意义的地球动力学过程的认识, 并在其中某些领域可望取得突破性进展。沉积盆地动力学已成为当代地学研究的前沿领域和热点议题。

1.2.2 物质需求

沉积盆地是一个聚宝盆, 蕴藏着丰富的人类必需的多种矿产资源, 如水、油、气、煤、膏盐、黏土矿等非金属矿产以及铝土矿、砂岩型铀矿、砂岩型铜矿、沉积钒矿以及铝土型锆矿和煤型镓矿床等金属矿产; 同时也是人类衣食原料的主要生产地。其中油气、煤重要能源完全形成和赋存于沉积盆地中。

1.2.3 生存环境

沉积盆地是人类生息、活动的主要场所。目前世界人口的 90% 集中居住在海拔 400 m 以下的平原、大河中下流域、环湖和沿海附近盆地分布的地域^[1]。在海拔 400 m 以上的地区, 人类主要居住在山间盆地和洼地。这些地区通常为地震、滑坡、泥石流、地裂缝、各种塌陷和海啸等自然灾害的多发区。

人类的活动和集中居住, 也影响局部及区域气候和环境的变化, 同时带来地表和地下不同程度、多种形式的环境污染。这一切对人类生存环境形成威胁的自然现象和人为行为, 其威胁的特点和程度又因盆地地质、地貌特征、所处部位的不同而有别^[3]。

近 30 多年来, 从地球科学基础理论研究、矿产及水资源勘探利用、保护和改善人类生存环境 3 方面, 科学家们不约而同地将关注的焦点和研究的热点转向沉积盆地。集地球科学研究和应用这 3 大领域(科学研究、物质需求、生存环境)为一体且均居重要地位者, 惟有盆地。沉积盆地从来没有象今天这样得到学术界、工业界和政府部门的广泛重视。在美国等发达国家的地质研究计划中, 沉积盆地均处于极为重要的位置。随着全球生态环境的渐趋恶化、矿产资源的日益匮乏、自然灾害的不断增多, 人类对生存环境要求的逐步提高, 对沉积盆

地研究的重视程度和热度还将与时俱增。

2 沉积盆地动力学

沉积盆地数量众多, 面积大小差别悬殊, 其中已发现能源矿产的盆地特别是含油气盆地一般面积较大, 是沉积盆地的重要组成部分。油气主要赋存在面积超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 甚或逾 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的大中型盆地中, 几万平方千米的盆地一般属小型盆地。在含油气盆地中, 沉积岩厚度都在 2 000 m 以上, 一般厚度可达 4 000 ~ 6 000 m; 最大厚度逾 8 000 m, 甚至达 $1 \times 10^4 \text{ m}$ 者并不少见。其发育演化时限, 短则几千万年, 长则上亿甚或几亿年。在长达几千万年至上亿年的时间里, 如此广阔的地区发生持续幕式沉降, 无疑应是大陆动力甚或地球动力作用的直接效应和重要表现。可见, 大中型盆地动力学在大陆动力学和地球动力学研究中占有极为重要的地位, 同时因其蕴藏有丰富的沉积矿床而具有重要的经济意义。

2.1 沉积盆地动力学内涵及定义

目前, 对沉积盆地动力学内涵的理解或定义因人而异, 差别较大。有的强调深部作用, 有的突出盆地耦合, 有的侧重于区域板块构造运动或构造环境等。已有的认识和研究, 抓住了沉积盆地动力学主要内容的(某些)重要方面, 促进并深化了此领域的研究。笔者认为, 沉积盆地不是一个简单的构造形迹或几何外形, 而是一个被沉积物所充填的地质实体, 其动力学内涵或定义应包括盆地形成(前述认识大多侧重于此)和沉积充填作用及其过程。

大中型沉积盆地的形成、发展、演化和改造, 总体受地球深部系统内动力地质作用的控制; 而盆地内沉积物的充填、埋藏和成岩, 则是在盆地形成的统一动力学背景下, 总体受地球表层系统外动力地质作用的制约。地球表层系统包括岩石圈浅表层、水圈、大气圈和生物圈及其相互作用; 其外动力地质作用具体表现为风化、生物、剥蚀、搬运、沉积、埋藏、压实固结及成岩、胶结、溶蚀等(图 1)。

沉积盆地将地球深部系统的内动力地质作用和地球浅表层系统的外动力地质作用有机耦合, 自然构成了一个各圈层内、外地质动力相互作用的统一盆地动力学系统(图 1)。该系统的活动虽有其明显的相对独立性, 但总体受地球动力学大系统的控制, 属后者的重要组成部分。故笔者将沉积盆地动力学的内涵理解和定义为: 直接控制和明显影响盆

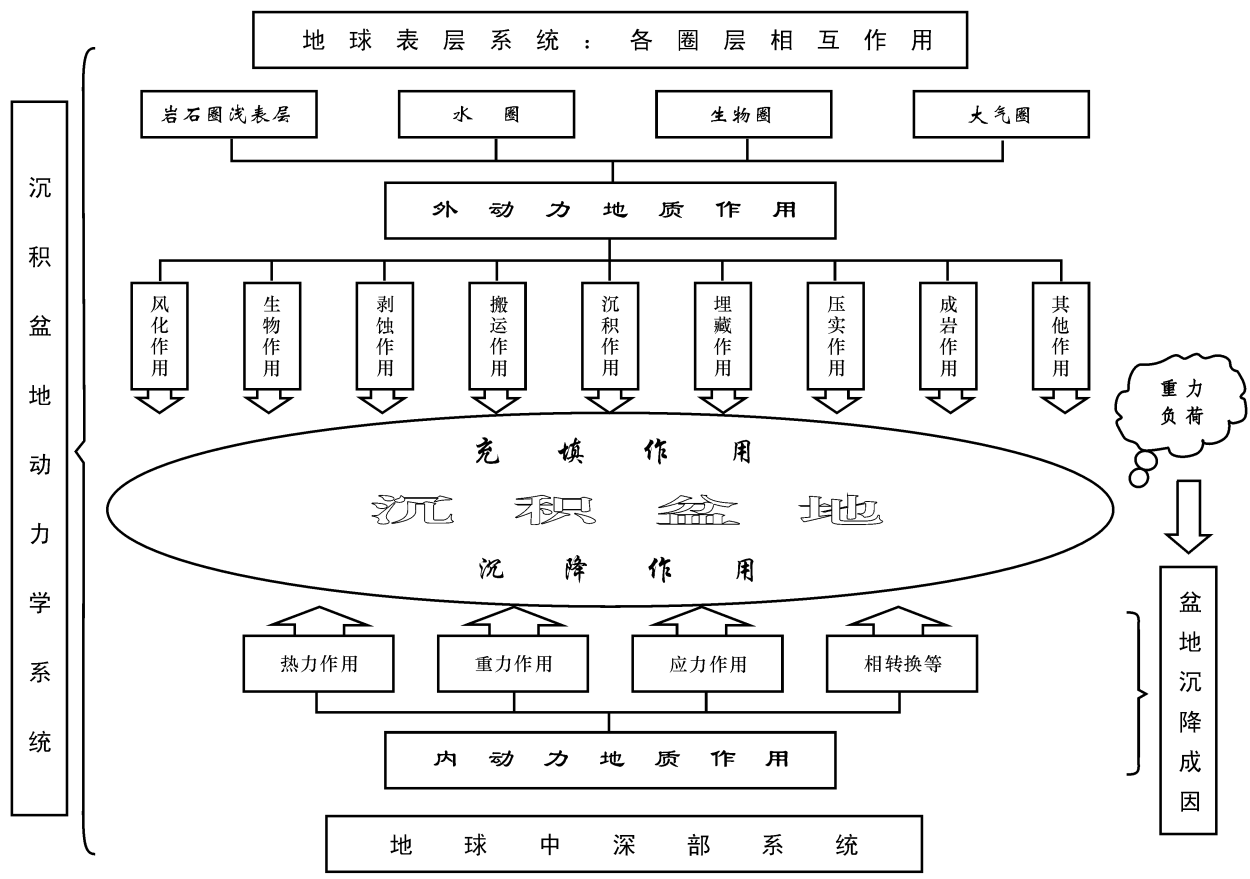


图 1 沉积盆地动力学与各圈层地质作用关系

Fig. 1 Relationship Between Dynamics of Sedimentary Basins and Geological Processes of Various Earth's Layers

地沉降和沉积充填的地球内、外力地质作用有机耦合的统一动力学系统和演化过程,属地球动力学大系统的重要组成部分。

2.2 盆地成因类型

沉积盆地成因,即盆地形成的动力学机制,是当前地球科学讨论热烈、但尚未解决的重大前沿科学问题之一。

2.2.1 沉积盆地定义及成因分类

从盆地形成和动态演化的角度来看,沉积盆地是地史上地壳或岩石圈较长时间相对沉降、沉积物在其中不断充填过程中的一种负向地壳构造。在此定义中,“较长时期”以与强烈构造运动幕短时期形成的较大型负向构造如向斜、复向斜等相区别;“过程”旨在强调持续沉降与不断充填的时空耦合;“相对沉降”是盆地形成的动力,为盆地发展演化甚或赖以维系的根本,系沉积物不断充填的基本前提。地壳或岩石圈的相对沉降若终止,盆地则开始趋向消亡。一言以蔽之,相对沉降是盆地的生命线^①。所以,盆地的沉降机制,即为盆地的成因(图 1)。其形

成和演变过程及特征,一直是盆地动力学研究的核心内容,也是地球动力学研究的前沿领域和热点。

目前,关于沉积盆地成因的分类方案颇多。Boott^[4]、赵重远等^[5]曾先后将盆地形成的基本动力分为热力、应力和重力 3 种类型。在地球运动和演化、盆地等地质构造形成中,这是存在普遍、影响广泛、意义重要的 3 种主要地质动力,对各类矿产资源的赋存、聚散、成藏(矿)和定位都有明显影响;深部相转换等使物质体积减小导致的沉降也与之有关(图 1)。据此,可将盆地成因分为热力成因、应力成因、重力成因^[4]和复合成因 4 种类型^[5]。

中国学者以往多侧重于对应力成因的研究,甚至有些学者将应力成因及其压、张、剪 3 种应力作为盆地形成的唯一动力学条件和类型,致使盆地的热力和重力成因及其作用常被忽视。但后两类成因盆地独具个性,不仅不能被应力成因研究所替代,而且仅从应力分析常会得出与实际情况相差较

①刘池洋. 盆地沉降作用研究及其意义. 第九届全国古地理学及沉积学学术会议报告, 西安, 2006

远甚或相悖的结论,故对热力、应力和重力3种动力的地质作用和效应均应重视。在具体研究时,针对地质对象的不同,应在深入研究的基础上区别其作用的主次,而不是人为的厚此薄彼。由于热力和重力成因盆地特征复杂,研究难度大,在国内外均研究薄弱,以下着重论及与其有关的盆地。

2.2.2 盆地重力成因

盆地重力成因的动力来源为地球物质在不同层次、不同尺度上存在的纵横向上的非均衡性。质量不均衡或重力不稳定在地球演化过程和不同圈层空间广泛存在,因而重力作用在盆地形成和演化过程中普遍发生。根据动力来源和物质性质的不同,可将盆地重力成因分为以下3类^[9]:

(1)狭义盆地重力成因——重力负荷成因:在地质学发展早期,出于对“地槽”沉积物超常厚度形成的解释,提出巨厚沉积物的重力负荷导致“地槽”的形成,这是经典的盆地重力成因观点。其动力来源主要限于地球表浅层沉积物及水体在空间汇聚、分布的不均一产生的重力负荷作用,故也称之为盆地重力负荷成因或狭义盆地重力成因。

在地球表浅层,重力负荷作用的发生需要有初始触发条件,即盆地所在地区若要比周邻地区有更多沉积物充填及水体汇聚,初始发生时需要有负向地形存在。上述认识没有解答此问题。

一般认为,在大陆边缘或山前,不需要触发条件就可发生沉积物的堆积。事实上,大陆边缘或山脉的形成,主要是热力或应力或二者共同作用的结果。在该区地形高差出现的同时,沉积物充填堆积就同步发生。由于这两种地质环境地貌高差大、堆积速度快,一般沉积巨厚。所以,在充填和沉降过程中,相对其他地质环境而言,重力负荷作用盛行。即使在那些地区,重力负荷作用的发生仍然需要也确曾存在初始触发条件。一旦沉积物及水体在局部相对汇聚更多,其重力负荷作用就无时不在、无处不在^[7],其重要性和影响也渐趋明显。

确定重力负荷作用对盆地沉降(机制)的贡献,是近年盆地演化过程和成因研究的重要内容之一。重力负荷包括沉积物和水体两部分。研究中对地史上沉积地层厚度的确定,已考虑了后期压实作用,但对研究层段沉积后的剥蚀改造顾及甚少。在对沉积时盆地的水体主要是古水深的确定尚缺乏有效的直接证据。根据水下微体古生物的生存环境推断古水深是目前常用的方法和依据^[8]。相对而言,用其确

定古水深对海相地层误差较小,对陆相地层难度和误差均较大。充分结合具有沉积环境和相标志的岩矿、地球化学等资料和盆地类型及其演化-改造等研究,将会提高古水深确定的精度。

(2)广义盆地重力成因:多种地球物理探测和地球化学测试结果揭示,岩石圈中下部及其更深处存在明显的各向异性和物质不均一。地壳(地球)均衡现象(作用)^[7],是地球物质运动总体有趋于稳定平衡的基本属性之表现^①,也是重力作用和其动力来源的基础。在使不平衡物质趋于稳定平衡的过程中,所产生的能量是十分巨大的^[9]。地球各层次物质运动的发生及其叠加改造和构造-热力作用的参与,使地球不同层次物质的不平衡经常发生。打破物质稳定平衡和趋于物质稳定平衡这对矛盾的反复发生及其消长变化,是地球较深部重力均衡发生永不息止的动力源泉,无疑也应是盆地重力成因的主要动力和盆地成因的重要动力。

地球中深部的质量不均衡及其重力不稳定,既受深部动力体系的制约,有其相对独立性,又与表浅层重力负荷和重力不稳定有较密切联系和复杂的响应关系,二者共同促进了盆地的发展演化。所以,将二者相结合,才能够全面认识和系统表述盆地重力沉降成因的动力来源,称其为广义盆地重力成因。

毋庸讳言,对地球均衡作用的过程和其对非均衡现象(如盆地沉降、山脉隆升等)响应或调整的时序及时间等关系,目前均不清楚。在部分论及的论著中,或浅尝辄止,或将深部均衡作用与表浅层重力负荷产生的效应混为一体。此现状在短时期内也难有明显改变。目前亟需明确的定性问题,即理论研究的重点是深部均衡作用对地壳上部大范围、大规模升降的响应和调整:①在时间上是同步还是滞后,若为后者,大致滞后多长时间;②在作用关系上,对地壳上部的沉降或隆升作用是促进还是抑制;③在作用方式上,是主动参与还是被动调整。这3个问题,特别是前2个问题,对盆地重力沉降机制与演化过程及其主控因素的研究、对盆地沉降过程定量模拟和不同动力机制分别产生的沉降量的确定等,均有根本的影响,对盆地动力学研究的深化和思路,有重要地指导和导向意义^[6]。

(3)特殊的盆地重力成因——天体撞击作用:

①刘池洋.趋于稳定平衡是物质运动的基本属性.西北大学研究生交流论文,1980.

笔者将小行星、陨石等天外来物撞击地球所形成的负向构造(泛称撞击构造或陨石坑),也归入重力成因之列^[9]。这是一种发生在地球表层但不需初始触发条件的特殊盆地类型,应具有特别的地质构造特征和成矿条件,值得重视和专门研究。

小行星和陨石撞击星球的频率较高,已使月球、火星等星体表面遍体鳞伤,撞击地球的频率与其大小成反比。如直径75~350 m的陨石,分别每隔100 a、 1.6×10^4 a撞击地球1次^[10]。据统计,在过去的 10×10^8 Ma,直径超过1 km的陨石坑在地球上多达 13×10^4 个。目前科学家已在地球表面找到近200个陨石坑,其形态近似圆形,大小不等,约有1/3直径大于10 km。在墨西哥东南沿海石油公司探测时发现的65 Ma BP前形成的陨石坑,直径达198 km,深900 m^[10],面积约 3×10^4 km²,即撞击出了一个中型盆地。澳大利亚北部Gosses Bluff陨石坑,内外圈直径分别为5 km和22 km;撞击时间发生在 1.4×10^8 a前^[10]。

地球上已发现的近200个陨石坑,形成于各主要地质时代,遍布世界各大洲,其中以北美和西欧最多^[10],迄今在中国境内尚未发现一例。这种分布显然是勘查和研究程度不同所致。在中国,也许与研究难度还有一定关联。中国大陆活动性强,且随时间变新愈频更烈,后期的构造变动破坏或掩盖了前期可能存在的陨石坑。中国大部分国土都有人类长期活动的踪迹,人类活动使可能曾存在的陨石坑的地貌特征、相关岩矿和地球化学组合及分布发生了改变,从而增加了研究和识别的难度。笔者相信,随着调研程度、勘探技术及测试水平的进一步提高,在中国大陆一定会发现证据确凿的天体撞击构造及其相关矿产。

2.2.3 盆地热力成因

热力沉降成因的动力来源为地球中深部(中下地壳—地幔或其下)热力作用的明显非均一性。

热力成因盆地的显著共性是盆地具有较高的热演化经历,至少在盆地发生和演化的早期阶段是如此。典型的如美国的密执安(Michigan)等古生代盆地^[11]、中国的南襄新生代盆地^[12]。盆地较高的热演化经历,对油气等沉积矿产的赋存、富集条件和成藏(矿)有特别而重要地影响。

热力盆地特征复杂、类型多样,在此仅以具代表性的热鼓胀成因形成的塌陷型盆地为例。

塌陷型热力盆地一般经历了早、晚2个特征不

同的发育阶段^[13,6]。

(1)早期深部热力-岩浆作用上拱并喷溢,地壳表浅层遂隆升,沉积厚度减薄甚或未沉积并遭受较强剥蚀。

(2)晚期深部热力衰减、冷却收缩,表浅层塌陷、发生快速沉降,接受较(巨)厚沉积。

此过程使在同一地区发生的2种隆拗性质截然相反、沉积-构造特征完全不同的发育阶段和地质现象,在时间上前后相随,在空间上上下叠置。这种特别的盆地及其演化过程和特征,为热力作用形成的盆地所特有^[13,6]。

上述2期差别较大的复杂构造,在同一位置上下叠加和改造,使塌陷型热力盆地的构造特征复杂多变。其共同特点是在平面上盆地形状多呈放射状或准同心圆状^[6,13-11]。但断层的平面展布和剖面结构常杂乱无序,缺乏明显的区域方向性。如断层的走向和倾向多变,垂向上断层两盘的相对升降关系复杂,断距变化快,“正”、“逆”断层相伴共生,甚至在同一条断层的不同部位,上下(剖面)、前后(平面)具“正”、“逆”断层表象的部分同存、相邻。同时还可能伴生不同特征的褶皱变形、滑覆构造和变质核杂岩等热穹隆构造。这些断层等构造形迹,在平、剖面上多难以组合成统一的体系和划分为相关的序次^[9]。

这种热力盆地特有的演化过程和构造特征,在盆地成因及演化和区域构造研究中常令人困惑,在力学性质上鲜有统一的规律性,体现不同力学性质的构造表象共生同存,一般用任一种应力成因的统一模式均难以圆满解释,也不可能深刻揭示其成因机制与形成过程。

对中国东部中晚侏罗世—早白垩世的构造动力学环境,一直存在有(走滑)伸展和(走滑)挤压两种截然相反的认识^[14-15]。二者均有其为数不少的直接证据,因而各有其理,各执一词,莫衷一是。这两种力学性质相反的构造变形证据,有时还出现在同一地区。于是又有伸展和挤压变形交替转换、多期次发生或伸展构造属后期叠加、改造等解释。众所公认,晚侏罗世—早白垩世是中国东部岩浆活动和热力作用最强烈的时期。笔者认为,上述盆地属性或构造现象的形成,热力作用起了主导作用。可将该期确定为热-构造动力环境^①。不要再禁锢在

①刘池洋.中国东部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境探讨.中生代以来中国大陆块体作用过程学术研讨会论文摘要集,合肥,2005.

应力构造环境中争论和寻求答案。“方枘圆凿”常会得出差别较大甚或相悖的认识。

有必要指出,在塌陷型热力盆地研究和确定中,上述特征多为表象和重要线索,最终确定仍需重、磁、电、热、地震和地质及钻井等资料的综合研究与相互印证,其中盆地较高的热演化经历和显示深部作用的基底深部结构是重要和必需的^[6,13]。

2.2.4 盆地的复合成因

大中型盆地的形成,通常并非单一动力作用所致,一般都是两种或多种动力作用复合的结果。在盆地演化过程中,也常存在动力类型转化和强度的变化^③。所以,多种动力复合形成的盆地更为多见。如裂陷盆地,在初期形成和早(中)期演化阶段,主要受伸展应力和热力作用的控制。随着时间的推移,热力作用减弱,由深部均衡调整和浅层重力负荷联合构成的重力作用渐为明显和重要。如松辽盆地(J-K)、渤海湾等中国东部新生代裂陷盆地等。

2.3 盆地沉降、沉积和堆积中心及其关系

2.3.1 由沉积结果探讨沉降过程

沉降作用主宰盆地的生命,然导致沉降的动力来自深部,发生于已逝的地史中,对其研究只能依赖于该过程所产生的结果,即沉积物(岩)。但由结果探原因、溯过程,一般难度较大,且常有多解性。

沉积物(岩)所含的地质、环境等信息极为丰富,但其形成受控因素颇多。盆地沉降及其类型通过对可容空间变化的一级控制,在宏观上制约着沉积作用和沉积物(岩)的总体特征。此外,沉积岩的岩石特征、矿物组合、厚度、沉积体系和相带展布等,还要受水动力(水系、海或湖平面变化等)、物源(物源区性质及远近等)、古地理和气候等因素的明显制约。所以,要通过沉积物(岩)所提供的各种信息来探讨盆地的沉降作用及其特征,首先要剔除由其他非沉降作用所产生的沉积效应^①。

2.3.2 3 个中心的定义和关系

在沉积盆地研究中,沉降、沉积和堆积中心的词语常被述及和应用。但在目前的文献中,这 3 种概念的内涵不尽一致,称谓尚不统一,且常分作 2 种而非 3 种情况描述,一般对最大沉降区及其成因论及甚少。笔者对这 3 种中心的认识和定义为^②:

(1)沉降中心:在沉积过程中,下伏岩层或基底顶面在盆地内沉陷最深的地区,主要受沉降作用控制。在沉降速度大于或等于堆积速度时,该区的沉积界面最低,水体最深;沉降中心与沉积中心在分

布位置上一致。沉降中心内含盆地成因和动力环境的诸多信息。盆地的沉降幅度是衡量盆地生命力(活动性)和划分盆地演化阶段的重要标志。

(2)沉积中心:盆地或拗陷最细沉积物分布区,为中心沉积相发育区,主要受沉降作用及物源等因素控制,该区水体一般最深,常形成生烃洼陷。

(3)堆积中心:盆地或拗陷沉积物堆积最厚的地区,主要受物源、水动力和沉降作用的控制。

沉积、堆积与沉降中心在成因上密切相关,在位置上互有联系,但其概念、地质意义和主控因素仍有区别,不能简单替代^{[16-18]②}。因此,厘定和揭示盆地 3 个中心的分布位置、演变规律及其相互关系具有重要的盆地动力学和能源地质意义(表 1)。

表 1 盆地沉降、沉积和堆积中心可能分布关系对比

Tab. 1 Contrasting of Inferred Distribution Relationship of Basin Subsidence Deposit and Accumulation Centre

盆地	分布关系类型				
沉降中心 S	①S=D=A		③S=D, ≠A ④S=A, ≠D		
沉积中心 D	三位一体		②S≠D≠A ⑤D=A, ≠S		
堆积中心 A	三位分离		④A=S, ≠D ⑤A=D, ≠S		

随盆地类型及边界条件的不同,3 个中心之间的分布关系可能有多种,去掉彼此重复的类型只可能存在 5 种(表 1)。由上述定义可知,沉降中心的形成和变化,在宏观上制约着沉积或堆积中心的分布和迁移^[16-18],所以,不可能存在表 1 中的类型⑤,即盆地中水体最深和堆积最厚的地区位置相同,但却不受沉降中心控制。在可能存在的 4 种类型(见表 1)中,一般较为常见的是沉降中心与后两者(类型①,图 2a)或其中之一(类型③、④,图 2c、d)的分布位置大体一致。3 个中心完全分离的情况(类型②)可能存在,但并不常见。这种类型在盆地一侧物源充足的地区,如受低角度正断层或逆掩断层控制的箕状断陷或前陆盆地(图 2b)有可能存在;更多的情况是与类型④相过渡,也可视为类型④的端元或特例。如在地貌高差大、物源充足的前陆盆地(图 2d)以及箕状断陷盆地,沉积物堆积最厚的地区或在沉降较深的洼陷靠物源区一侧(图 2b、c),或位于较深洼陷之中(图 2d)。在这种情况下,定性分析

①刘池洋.盆地沉降作用研究及其意义.第九届全国古地理学及沉积学学术会议大会报告,西安,2006.

②刘池洋.沉积中心、堆积中心和沉降中心.第二届全国岩相古地理学术会议论文集,徐州,1990.

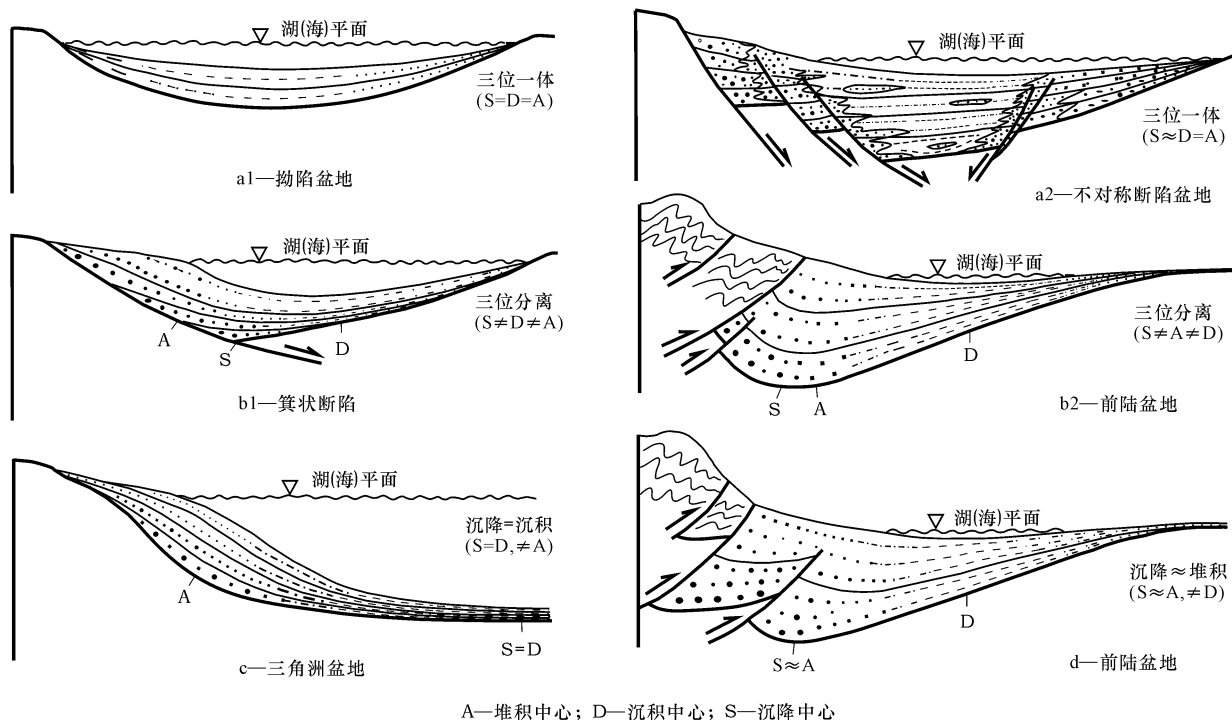


图 2 盆地沉降、沉积和堆积中心关系示意图

Fig. 2 Relationship of Basin Subsidence Deposit and Accumulation Centre

时可将类型②视为类型④。

由上述可知,在直接确定地史上盆地的沉降中心困难较多的情况下,可通过沉积、堆积中心间接确定或近似地代替沉降中心进行研究。如断陷盆地和前陆盆地等。但需注意的是,这类盆地巨厚堆积的重力负荷可能产生的较明显沉降效应。对稳定构造背景的大型海相克拉通盆地,沉积中心与沉降中心的分布大多一致,但大型陆相克拉通盆地的沉积,3个中心的分布及其相互位置关系的演变就要复杂的多,应在区域构造背景、影响沉积作用的各种因素综合分析的基础上确定。

如在鄂尔多斯盆地,长期以来一直将地层堆积较厚的盆地西部视为盆地的沉降中心。且不说随着勘探和研究程度的提高,原地层厚度及展布的资料已有较大改变,仅盆地西部的沉积体系和水流方向均指向今盆地东部延安一带就与其西部沉降中心的位置相矛盾。陷入此误区,除没有考虑盆地西部临近物源区这一对沉积厚度有重要控制的因素外,将不同时期堆积的沉积物顶面或抽象的基准面^[19],简单地视为水平面也是主要原因(图 3b)。类似的做法在盆地分析、构造演化剖面编制等研究中屡有发生,值得注意。

事实上,基准面是一个动态平衡面,其纵向位

置和平面产状及形态常随沉积环境和所处盆地位置的不同而变化,并不简单地等同于湖(或海)平面。在盆地边部的冲积、洪积环境中,基准面一般高于湖(海)平面,且常常受递降水流剖面 and 地形的影响而呈向盆地倾斜的斜面(图 3a)。所以,将盆地边部基准面或沉积物顶面视为平面或与湖(海)平面等同,就大大歪曲了沉积时的古地貌,所得结论与实际情况自然相差甚远(见图 3b)^[18]。

由此可见,将沉降等 3 个中心单列并存的必要性和对岩相古地理、盆地动力学等研究的重要性。

陆相盆地的沉积中心多为生烃凹陷,沉积中心的迁移,常总体控制着油气的成生、运聚、成藏和分布。在中国,中生代盆地或其拗陷的沉积和堆积中心,多随着时间的推移而发生有规律或方向性地迁移^[16-18]。从研究沉降中心的形成和演化入手,有可能揭示沉积、堆积中心在空间上分布和随时间迁移的规律与原因。

2.4 盆地后期改造

沉积盆地演化到晚期或末期,常随引起盆地沉降的区域动力学机制和条件的减弱、改变或反转,盆地的沉降-沉积作用渐趋衰减消亡或演化快速终结,主要成盆期的原始面貌开始遭受不同程度地改造。后期改造强烈而普遍,为中国沉积盆地的重要特点

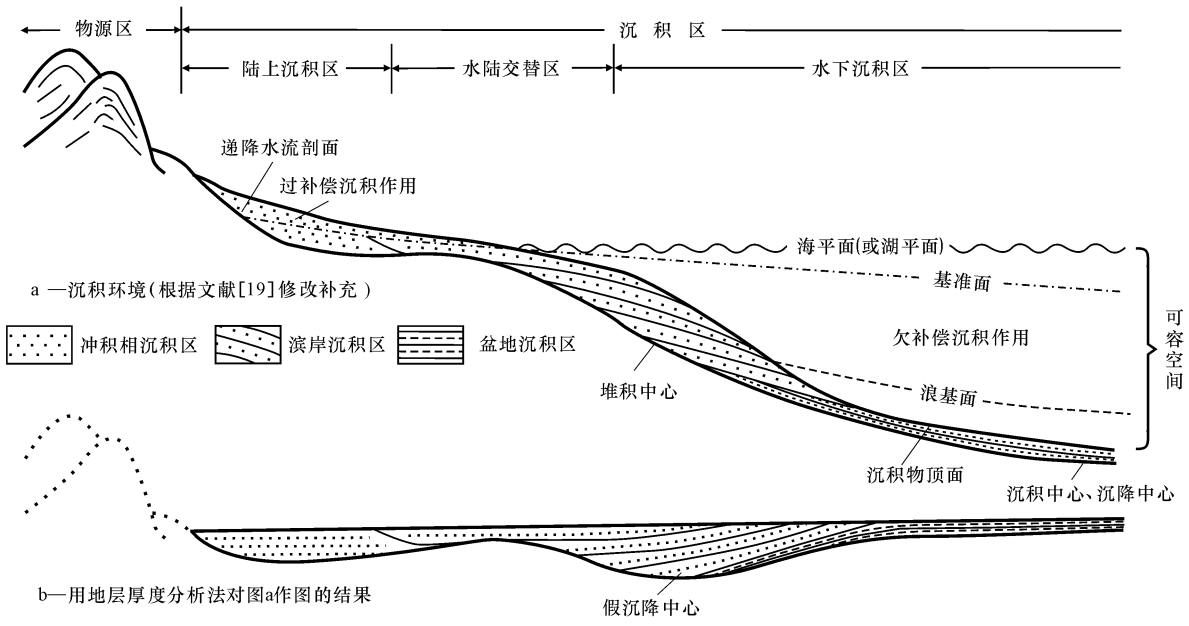


图 3 盆地沉积环境与地层厚度分析结果对比

Fig. 3 Analysis and Comparison of Basin Sedimentary Setting and Sedimentary Thickness

之一^[20]。这由中国大陆本身的特性和所处的特殊大地构造位置所决定, 为其研究的重要组成部分。

2.4.1 后期改造强烈的形成原因和发育背景

中国大陆具有以下显著特征:

(1)由众多面积较小、形状不一、稳定性差的小陆块群彼此镶嵌。

(2)环绕和焊接众多小陆块的边缘活动带, 规模大、活动性强。

(3)在显生宙, 先后主要受古亚洲、特提斯—青藏和古—今太平洋 3 大动力学体系作用影响, 依次形成主构造运动时代不同、强烈变形地区有别, 但新老叠加、彼此影响、特征复杂的 3 大构造域。

(4)地史上经历了多期次重大的构造运动, 中生代以来, 构造运动频繁而强烈。

(5)现代中国大陆周邻受限, 被活动强度和性质明显不同、发展演化历史极为复杂的太平洋板块、印度板块和西伯利亚板块及哈萨克斯坦(陆缘)板块等所挟持。

由于中国大陆内部分割性强, 结构严重不均一, 加之各板块动力体系的作用彼此叠加、复合和改造, 其影响因地而异, 随时消长, 致使中国大陆的活动性和深部作用极为复杂多变。集这些特征于一体的大陆在全球尚无他例。

中国沉积盆地在中国大陆演化过程中发育、发展, 遂消亡、改造, 深深地留下了中国大陆特殊性的

印记^[20-24]。因此, 活动性强、后期改造强烈而普遍是中国盆地, 特别是中生代盆地的本源属性和重要特点^[20-21]。它直接决定着中国沉积盆地的基本性质、总体面貌、演化过程及后期改造的特点等, 从正反两方面深刻影响和制约着中国中、新生代陆相和古生代海相两大类盆地的油气赋存环境、成藏特点、分布规律和资源规模, 从而形成了中国陆相盆地油气资源丰富、海相盆地特征复杂这些与世界沉积盆地总特征截然相反的显著的中国特色。

中国沉积盆地研究中许多令中外地质学家困惑的问题, 大多与中国盆地活动性强、后期改造强烈等有着直接的联系^[20-26]。

2.4.2 后期改造的作用、特点和结果

对盆地后期改造的地质作用, 可包括内外动力地质作用的各种类型。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^[25]。

对中国不同类型沉积盆地的研究揭示, 其后期改造具有以下显著特点: 波及广, 在空间上差异明显; 强度大, 盆地越老改造越强; 时间新, 改造强度与时俱增; 期次多, 不同期次特点有别^[20]。

根据盆地后期改造的性质、特点和强度以及可能恢复的程度等不同, 可大致将后期改造的形式和

结果分为初始面貌改观、增添新的内容、构造性质转化或反转、相对方位改变、初始面目全非 5 种类型^[25]。各类型之间既有明显的区别,也有一定的联系和过渡,其改造的强度依次增强,恢复的难度相应增大。

2.5 改造盆地定义和类型

2.5.1 改造盆地定义

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^[22]。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, 但这属盆地自身基本特征的反映, 属盆地原始面貌的组成部分, 不应划入后期改造之列。

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面貌。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。

2.5.2 改造盆地的类型

对改造盆地的分类, 随分类依据的不同可有多种方案^[22]。如可作为分类依据的有: 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、叠合盆地的组合结构^[26]、改造盆地的时代或所处地域、烃源岩的改造程度等(表 2)。

笔者按后期改造的主要动力作用及改造形式的不同, 将改造盆地分为 8 种类型(表 2)^[22, 27]。

事实上, 这些改造作用彼此影响, 改造形式有机相联, 一般很难截然分开。因而盆地的改造大多不同程度地表现出复合改造的特点, 甚至在同一较大类型盆地的不同地区, 同时发生的改造形式和动力作用常因地而异, 这是值得注意的。表 2 分类主要根据其中相对更为重要的改造作用作为代表进行划分。

烃源岩的改造程度, 对含油气盆地的资源规模和勘探前景评价至关重要。根据遭受改造后烃源岩的残存程度及其可能生烃潜能, 将(拟)进行油气勘探的改造盆地划分为 4 种类型(表 2)。

2.6 原始盆地恢复

后期强烈而不均匀的改造, 使中国沉积盆地的原始沉积面貌大为改观, 对研究带来了极大困难。对改造盆地而言, 剔除后期改造的影响, 系统恢复

表 2 改造盆地类型划分

Tab. 2 Classification of Reformed Basin

依据	类型	亚类或说明
改造的主要动力作用及改造形式	抬升剥蚀型	整体抬升-剥蚀裸露型, 差异抬升-剥蚀残留型
	叠合深埋型	易延叠合型 差异叠合型, 改造叠合型 多重叠合型
	热力改造型	热力差异改造型(点式、带式), 热力区域改造型(面式)
	构造变形型	断裂改造型 块断差异升降型, 褶皱改造型 断褶改造型
	肢解残存型	走滑平移型 块断肢解型
	反转改造型	正反转型, 负反转型
	流体改造型	地表起伏梯度较大, 水动力活跃, 浅表层与中深部流体交换较明显
	复合改造型	以上 2 种或多种改造作用综合改造的复合结果
烃源岩的改造程度	改造破坏型	烃源岩剥蚀殆尽, 或几近完全抬升到地表, 或普遍遭受了过高热演化或已变质
	改造残留型	烃源岩剥蚀后大部残留, 盆地差异升降、较高热力改造空间不均一
	改造保存型	烃源岩主体保存, 盆地抬升不强烈, 较高热力改造较弱或局部
	改造建设型	烃源岩主体保存, 较高热力改造较弱或局部 盆地抬升不强烈后期又大部沉降

原始盆地面貌, 为深入研究盆地动力学和揭示盆地动态演化的基础, 是客观评价改造盆地油气资源和科学预测有利地区的前提, 系深刻揭示油气的成藏机理、过程与分布规律必不可少的重要内容^[23-25]。

原始盆地(或称原盆地)恢复的内容, 包含地史上盆地发育过程中的沉积建造及展布、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)^[23]。以上恢复的内容不只限于盆地的原始类型(即盆地原型)^[28]。因仅分析盆地的原型是否改造, 或只恢复盆地的原型, 有重要的基础理论意义, 但难以满足沉积矿产形成及分布的研究和勘探的需求。故笔者没有用原型盆地或盆地原型一词。

对改造盆地原始面貌的恢复意义重大, 但研究难度大、探索性强, 结论或然性较多, 加之迄今尚无成熟的理论、方法和技术, 故一直是盆地研究的难点^⑨。笔者先后对柴达木、酒泉、鄂尔多斯、焉耆、楚雄、南华北、羌塘等(含油气)盆地原始面貌进行了多种不同内容的恢复, 取得了系列创新成果和认识, 并逐步构建了原盆地恢复的理论体系和方法。

例如, 笔者以 20×10⁴ 多个重矿物鉴定数据(9 911 个样品, 171 口井或剖面资料点)为主线, 结

合轻矿物、地球化学、沉积环境、岩相古地理、地震剖面、地表出露地层等资料和后期改造及盆山关系等研究,恢复了古柴达木盆地的沉积边界。在古近纪,古柴达木盆地包括现今盆地西邻阿尔金山主体和西南邻昆仑山及库木库里、库拉盆地,面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,远大于今盆地 $9.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的沉积岩分布范围^[23]。此研究揭示出:柴达木盆地西南隅石油最丰地区不是位于山前,而是居于古盆地中部;盆地西油东气格局形成的背景和过程及古构造控油的原因;从盆地研究山脉,厘定了祁曼塔格山、阿尔金山和祁连山的隆起时限,为青藏高原演化特征和阶段研究提供了典型实例;对库木库里盆地的油气远景评价提供了新的依据和思路^[23, 29]。

2.7 块-盆-带系统动力学——大陆动力学的核心

大陆动力学是当今地球科学研究的前沿领域。大陆岩石圈的成分、热状态和结构等在时空上存在严重的不均一,与大洋岩石圈根本不同。所以,大陆岩石圈变形和深部地质作用更为复杂多变^[30]。对其深入研究,将会发展、补充和完善板块构造理论。

2.7.1 块-盆-带系统动力学

中国大陆特别是西部地区,以显著的盆山结构而独具特色。在这种盆山结构格局和其形成演化过程中,尽管盆山耦合及其相互作用意义重大、表现明显,但相对稳定的陆块在其中起了隐性但具关键意义的“砥柱”作用,代表了大陆动力学的“核心”。在这些地区,由于“块”的存在,“盆”与“山”的地质特征、构造性质、地貌景观和分布位置已没有明显界线。在构造性质和分布位置上对“造山带”取而代之的是兼各种特征于一体的“构造活动带”。如不同时期的裂谷带、造山带、断裂构造带及岩浆活动带等。所以,仅仅研究盆山关系是不全面的,只有将陆块(克拉通或地块)、沉积盆地与构造活动带有机结合、统一考虑、整体解剖,才可能从深层次探讨大陆动力学及其演化。

现代大陆动力学,特别是在中国中西部地区,应是相对稳定的陆块(克拉通或地块)、沉积盆地与构造活动带(裂谷带、造山带、断裂构造带及岩浆活动带等)系统动力学,简称块-盆-带系统动力学^[31, 9]。

2.7.2 块-盆-带相互关系和盆地类型

在中国西部及邻区,构造活动带与相对稳定的地块和沉积盆地三位一体,相互依存、彼此影响;其发展演化密切相关、有机相联,但仍各有特色。

稳定地块以构造活动带为边界,被不同性质的

构造活动带分割或围限。在空间分布上,二者相间并存、条块镶嵌,相对位置较为明晰。而沉积盆地则不同,其与稳定地块和构造活动带的空间分布关系甚为复杂,表现为盆寓带内(如裂谷盆地)、盆融其间(如陆缘盆地)、盆覆块上(如陆棚沉积、克拉通盆地)、盆位块中(如残留盆地、前陆盆地)等多种主要类型^[6, 31]。

可见,在不同演化阶段,盆地与块、带的相互关系和空间位置及其中的盆地类型是变化的。沉积盆地的演化、特征及分布,主要受构造活动带与陆块各自运动的特点、相互关系及深部作用等制约。因而,沉积盆地又是记录块、带活动特征和演化史的忠实“自动记录员”和“信息库”。所以,研究沉积盆地的形成背景、分布位置和其演化-改造过程,是揭示稳定陆块和构造活动带演化、探讨大陆动力学特征的重要途径和内容。

3 盆地油气赋存条件和油气成藏系统

3.1 含油气盆地研究系统和研究总则

赵重远教授较早的将油气地质学与沉积盆地地质学相结合,创建了含油气盆地地质学新学科,并将其作为一门独立的课程建设,延续至今已有近 50 年^[32]。随后,赵重远等又将含油气盆地地质学研究作为一项系统工程进行,建立了研究系统^[32],进而凝炼、提出和倡导含油气盆地研究应遵循“整体、动态、综合”的总则^[33]。至此,含油气盆地地质学新学科的理论体系框架已初步构建。

3.1.1 含油气盆地动力学系统与成盆动力学系统

沉积盆地是油气生成、赋存的基本地质单元和成藏系统^[32-36],“没有盆地,便没有石油”^[37]。这是含油气盆地动力(地质)学作为一门独立学科或研究系统建立的理论基础和进行专门研究的基本前提。

在含油气盆地地质学多年的应用实践和理论发展中,沉积盆地动力学一词已被中外学者常用和熟知,也与含油气盆地地质学及其研究系统的学术思想一脉相承。笔者将其改称为含油气盆地动力学,从易于理解和便于应用的角度,目前将其研究系统划分为成盆动力学、成藏动力学和油气资源评价 3 大次系统。将成盆动力学次系统进一步细划分为 8 个子系统(表 3)。

成盆动力学是地球动力学的重要组成部分,对其研究应置于地球多圈层内外地质动力相互作用的大环境中。在此研究系统中,包括了成盆期前的

表 3 含油气盆地动力学研究系统结构

Tab. 3 Structure of Research System of Petroliferous Basin Dynamics

次系统	子系统	
成盆动力学系统	1 盆地发生和演化的背景与区域环境	
	2 盆地成因与深部作用	
	3 构造性质与变形	
	4 热动力学及其演化	
	5 流体动力学与流岩作用	
	6 沉积充填与成岩动力学	
	7 盆地演化过程和阶段	
	8 后期改造与原盆地恢复	
成藏动力学系统	1 赋存条件	2 组合模式
	3 成藏机理	4 分布规律
油气资源评价系统	1 盆地模拟	2 区带评价
	3 圈闭描述	4 单井评价与油藏描述
	5 勘探-资源数据库	

区域环境和盆地的发生背景(子系统 1)、盆地形成-演化过程中发生的各种地质作用及区域环境(子系统 1~7)和成盆期后的后期改造(子系统 8)3 大阶段。各子系统是盆地动力学系统的有机组成部分,在盆地演化和改造过程中,各子系统之间密切关联,彼此影响和相互作用,而不是孤立存在。

3.1.2 成藏动力学系统

油气成藏动力学系统包括赋存条件、组合模式、成藏机理和分布规律 4 个子系统(见表 3)。

(1)赋存条件,主要包括构成油气藏的烃源岩、输导层、储集层、盖层和各类圈闭等地质要素及其环境。

(2)组合模式,即源、输、储、盖、圈各地质要素的时空配置关系和组合形式及其序列与类别。

(3)成藏机理,即油气藏(田)形成的动力、条件和环境、期次与动态过程、正反主控因素及演变。

(4)分布规律,即油气藏(田)空间位置、组合关系、系列类型和其空间分布主控因素及演变过程。

以上主要述及各子系统的研究内容,对其具体研究的技术路线、方法和资料剖析等因人而异、各有千秋。尚需强调指出的是:这 4 个子系统是一个密切相关、不可分割的整体,研究时应将其交叉综合融为一体,而不能孤立分开单独分析;对油气成藏动力学次系统的研究,应置于含油气盆地动力学大系统之中,要充分考虑成盆动力学次系统各子系统的影响和其间的相互作用及响应。

3.1.3 含油气盆地研究总则

对“整体、动态、综合”3 项研究总则,赵重远教授已有专文讨论^[33],笔者曾对其内涵和意义作过以下概括性的论述:

“含油气盆地是油气生成、运移和聚集的基本单位。只有从盆地的整体出发,动态研究盆地演化过程中的各种地质作用,综合分析油气成藏和分布的主控因素及最佳配置方式,才可能揭示其最基本的内在联系和规律。……对含油气盆地进行整体、动态、综合研究和全面总结,不只是对盆地单项研究成果的简单汇集,也不只是从大区域对已有资料的重新组合,而是在此基础之上更高层次的研究和升华。其中“整体”是前提,“动态”是核心,“综合”是途经。理论的深化和方法的更新是研究水平提高的基础。否则,研究就可能是同水平的重复”^[35]。

3.2 改造盆地油气评价和研究程式及内容

改造盆地在中国分布广、数量多。中国未来新发现的油气资源将主要来自这类盆地和地区。所以,无论是地学理论研究,还是油气等沉积矿产的勘探,均应将其放在足够重要的地位进行专门研究。

油气为流体矿产,极易随所处环境的变化而发生流动,改变其分布状态和位置。所以,油气的聚散、成藏、定位和分布等既严格受成盆期和成盆期前构造格局的控制,又明显受成盆期后每一次构造运动和任一种改造形式的影响。即油气成藏及其分布位置是动态的,往往随时间的变化和所处环境的改变,可能会发生规模、位置等方面的变化甚至消失。

含油气盆地后期遭受明显或强烈改造,必然使油气的赋存条件、成藏过程和分布规律更为复杂多变。现有的油气地质理论和勘探经验,主要是在对无明显改造或改造较弱盆地油气勘探实践中产生和总结的,用于改造盆地或盆地中明显遭改造的地区常难奏效。近年兴起的油气成藏系统对改造盆地也多不适用。对改造盆地油气研究和评价,是当今国内外油气工业共同面临、亟待解决的重大科技难题,目前尚无系统的理论和公认的标准,亦缺乏有效方法和成熟技术。

根据改造盆地的实际和笔者的研究实践,提出以下改造盆地研究和油气评价的思路及程式^[24]:

- (1)厘定盆地属性,分析动力环境。
- (2)恢复原始盆地,回归今盆位置。
- (3)揭示改造过程,明确几个时期。

应明确盆地主烃源岩的形成期和成熟、排烃期,盆地最高热演化期,主要油气聚集-成藏期,主改造期和最晚较强改造期及各期的时序和空间变化。

- (4)确定改造程度,划分保存单元。
- (5)探讨聚散特点,评价资源规模。

对改造盆地油气聚、散、失 3 种不同赋存方式的资源规模作出较为客观的估算。

- (6)重视多源油气,突破单一模式。
- (7)多期动态聚散,突出晚期成藏。
- (8)注意差异改造,切忌以点代面。
- (9)遴选突破区带,总结勘探成效。

这些研究探索性强、难度颇大,已有某些可供借鉴的成功经验,也常有其地区或类型的局限性,不应简单套搬。改造盆地构造复杂、特征多样,对其研究、认识和评价不可能一次完成。其认识程度和研究深度也明显受勘探程度的限制。上述研究和评价需结合实际、勇于探索、多次反复、不断实践,才可能取得科学、客观地认识,从而提高改造盆地的研究水平和油气勘探成效。

3.3 油气晚期-超晚期成藏与定位及其时限

中国盆地后期遭受的改造不仅次数多、强度大,而且愈新更烈。这必然导致油气等流体沉积矿产多期次生、运、聚、散和成藏;同时造就了中国盆地的另一个重要特点:油气晚期-超晚期成藏和定位^[38]。明确认识和深刻揭示这一重要特点,对中国进一步的油气勘探和发现有重要意义。

笔者根据改造型盆地油气的赋存特点,在对中国不同地区、不同类型、不同时代含油气盆地油气成藏-定位的特点进行对比和总结的基础上,将油气成藏的“时期”与油气藏的“定位”相联系。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。

全球新生代最宏伟的地球动力学运动和最大的地学事件,为青藏高原的形成演化。中国特别是中西部大陆的活动性和盆地后期改造强度,随时代变新呈明显增强趋势均与之直接有关。青藏高原演化具有明显的阶段性,从其对周邻地域的影响来看,可分为印度板块与亚欧板块之间的软碰撞、硬碰撞^[39]和青藏地区相对整体变形 3 大阶段^{①、⑥}。软碰撞阶段[(65~45)Ma BP 或(60~45)Ma BP]的变形和岩石圈缩短较弱,影响范围主要限于雅江碰撞缝合带及其附近;硬碰撞阶段[(45~20±2)Ma BP]汇聚缩短显著增强,变形逐步波及整个高原,但仅对今高原周邻地区局部产生明显影响。青藏地区镶嵌焊接、高原相对整体变形始于中新世中晚期[(20±2)Ma BP]以来^[6,38]。此后,青藏高原的演化才开始对周邻广大地域产生较强烈的中远程效应^{[38]②};在东南亚和中亚形成了有直接响应关

系、十分广阔的喜马拉雅构造域,其影响波及东亚、西亚、北亚和周邻海域等更广阔地区。(8~5)Ma BP 以来,喜马拉雅构造域才开始发生较强烈挤压变形。中国西部山系强烈隆升,陆内前陆盆地快速沉降、鼎盛发展,即是对青藏高原整体强烈活动的直接响应。青藏高原整体强烈隆升,主要发生在 5 Ma BP 特别是 3.4 Ma BP 以来。该构造域油气类流体矿产的聚散、成藏和定位应主要发生在(5~8)Ma 之后^[38]。

中国大陆现今地貌景观主要形成于第四纪。许多盆地现今的构造特征和总体面貌在第四纪甚或于更新世中晚期才形成,其中不少油气田的成藏过程和定位目前仍在进行或变动着^[20,38]。

通过对中国的中西部与东部及海域盆地和区域地质构造的研究对比,并结合青藏高原演化对周邻区域地球动力学环境、盆地改造及成藏(矿)作用的重大影响和其响应的时间关系等最新研究成果,提出(20±2)Ma BP(早中新世早中期)是中国大陆和青藏高原演化的一个重要转折时期,具有划时代意义^{[6]、①}。中国绝大多数盆地油气的成藏-定位主要发生在此转折期之后,即早中新世中晚期以来。

在上述研究的基础上,从绝对时间和相对时限两方面,具体厘定了中国沉积盆地油气晚期-超晚期成藏-定位的时间含义(表 4)。

绝对时间:油气成藏-定位时间晚,主要发生在新世中晚期以来。

相对时限:烃源岩形成与油气成藏-定位的时间间隔长,达 1×10^8 a 以上,即为晚期成藏-定位。

表 4 油气晚期-超晚期成藏-定位时限划分

Tab. 4 Time Division of Late-Extra Late Period Oil-Gas Reservoir Forming and Positioning

时间类型	晚期	超晚期
绝对时间: 油气成藏-定位	N ₁₋₂ 以来	第四纪
相对时限: 烃源岩形成与 油气成藏-定位间隔时间	$> 1\times 10^8$ a	$> 2\times 10^8$ a

相对而言,后者间隔时间超过 2×10^8 a(如源于古生代烃源岩的油气,在新生代才成藏-定位),或油气主要在第四纪成藏-定位,可视为“超晚期”。

①刘池阳,杨兴科.青藏羌塘盆地构造演化.“青藏高原形成演化及其环境资源环境效应”973 项目年会,北京,2002.

②刘池阳.青藏高原周邻沉积盆地新生代演化.中国科学院地球环境研究所学术研讨会报告,西安,2002.

3.4 小型含油气盆地类型和其油气赋存条件

3.4.1 油气勘探现状

中国小型盆地数量众多,但具商业价值的油气发现甚少。探讨小型含油气盆地的类型和油气赋存条件,对小型盆地油气远景评价和勘探意义重大。

近年来,中国油气勘探具有重要突破和进展的小型盆地首推酒西盆地。该盆地位于河西走廊西部,面积2 700 km²。1939年发现老君庙油田,近年在南缘窟窿山冲断带之下,发现并基本探明储量近亿吨的青西油田。在有60多年勘探开发历史的老油区仍有重大发现,引起人们诸多的困惑和思考。

通过对多种资料的综合研究和原盆地恢复揭示,现今酒西、酒东、花海等盆地和其间及周邻露头的广阔地区(含祁连山北缘掩覆区)的下白垩统,为早白垩世同一盆地统一沉积的组成部分。笔者称其为酒泉盆地群^①,其面积逾 $(4\sim5)\times 10^4$ km²。即今酒西盆地属残留盆地,在早白垩世沉积时为中型酒泉盆地群的一部分。若按上述认识去思考,酒西盆地油气丰富和勘探时有突破就在常理之中。

除酒西残留盆地外,在中国已发现油气田或钻遇不同级别油流的盆地还有:西北的焉耆、三塘湖、潮水、民和等盆地,西藏的伦坡拉盆地,西南的百色、景谷等盆地,东北的佳伊(佳木斯—伊通)、海拉尔盆地,东秦岭的南襄盆地等^[40]。

3.4.2 小型含油气盆地类型及特征

通过对中国小型含油气盆地的成因机制、演化-改造过程和油气赋存条件的研究和总结,并与世界典型盆地对比,将其油气丰度高,即所谓“小而富”的盆地(或地区)划分为3种类型^{[40]、②}:

(1)残留盆地:在资源规模上,对这类盆地不应依今盆大小论富贫。应在原盆恢复的基础上,确定现存小盆在原盆地中所处的部位。若处在油气赋存条件优越的部位,其单位面积的油气丰度远高于一般未遭明显改造的含油气盆地,如酒西、焉耆、三塘湖等盆地。若处在油气赋存条件不利的部位,则油气贫乏甚至无油气勘探前景。

(2)走滑转换盆地:这类盆地的长度远大于宽度,盆地结构和地质特征在走向上分段性明显;盆地面积小而沉降深、沉积厚(即小而深或小而厚);建造与改造同步,构造特征复杂;一般为热盆,但地热场因时随地多变,如佳伊、百色、伦坡拉盆地等。

世界上单位面积或体积油气产储量最丰富的盆地为走滑转换型盆地。美国西部洛杉矶盆地位

居其首,中国渤海湾盆地辽河拗陷可归此列。

(3)热力盆地:盆地的成因主要为热力作用,其地质构造特征前已述及。在盆地形成和演化阶段(早中期)属热盆,较高的地温场有利于微生物的繁盛、优质烃源岩的形成和转化。这是热力盆地油气赋存条件优越的关键所在,如南襄、景谷盆地。

可见,油气勘探前对小型盆地评价和遴选,首先要确定盆地后期改造强弱,进而厘定其类型。若属改造强烈的残留盆地,应根据其在原盆地的位置,特别是与主生烃洼陷的空间关系和改造程度等,评价预测现今盆地的资源规模和成藏条件及分布。

3.5 深部作用与油气富集

中国沉积盆地活动性强,深部作用活跃,致使地球各圈层相互作用和深部物质向上迁移更为普遍,盆地地热梯度相对较高。这对盆地的油气特征和资源规模有至关重要的影响,表现在3方面:

3.5.1 非烃类气体显示和富集成藏

中国所发现的与深源有关的气体或气藏,几乎全分布在东部裂陷盆地中:北起松辽盆地,经渤海湾和苏北盆地,南至南海北部陆架盆地^[41-42]。

发现幔源氦气储集的地区有:松辽盆地万金塔气田、渤海湾盆地辽河拗陷界3井、苏北盆地黄桥气田和三水盆地。在这些气田(井),幔源氦占天然气中氦的比例达43%或65%,其中比例最小者也可达到工业品位。这些地区氦部分或大部分为幔源,二氧化碳气藏主要与幔源有关^[41-42](如万金塔、黄桥、三水),氮也有幔源加入(界3井、三水)^[42]。在渤海湾盆地济阳拗陷气藏区发现了高含量的金,显示出二氧化碳气藏与金矿化之间的联系^[43]。

东部盆地的裂陷伸展、地壳减薄、地幔上拱、成盆期岩浆活动频繁、深大断裂切割并持续活动等特征^[44],是该盆地活动性强、深部作用活跃的重要表现^[21]。这些幔源挥发分的脱气向上运移,或与深部作用有关的非烃类气体的普遍显示和富集成藏,与之有着直接的成因联系,二者可彼此印证。

3.5.2 对生烃母质生存环境和繁盛程度的影响

对在盆地发育、沉积充填过程中,深部物质和地热场在生烃母质生存环境和繁衍程度这一关键

①刘池阳、任战利、张小会,等.河西走廊地区区域诸盆地第二次油气资源评价.中国石油天然气总公司八五重点项目,1993.

②刘池洋.中国小型含油气盆地类型与油气赋存.第二届中国石油地质年会,北京,2006.

问题中的作用, 由于研究难度大和以往缺乏有意识地探索等原因而鲜有人议。

对深海海底的调查揭示, 大洋深处生物丰富、种类繁多。在海底沉积物中含有细菌超过 1×10^7 个/ cm^3 。以往关于大洋深处没有阳光, 因而毫无生机的认识已被否定。这些生物主要生活在水温高达 $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 的热泉和火山口或火山活动区。深海微生物通过获取来自地球内部的热量、能量以及海洋死亡生物残骸来维持生命^[45]。热液产地的生物密度高出周围 $(1 \sim 10) \times 10^4$ 倍^[46]。这表明, 较高的温度和来自地球深部的物质, 为生物特别是微生物的生存、繁衍甚至极度繁盛创造了极为有利的生态环境。此现象在湖盆的类似环境中也应存在。

酒西盆地以“小而富”著称, 勘探和开发已证实, 其油气几乎全部来自青西洼陷。该洼陷含被祁连山掩覆的部分, 有效烃源岩分布面积仅 460 km^2 ; 即使考虑后期改造的影响, 所残存部分已发现油气的丰度也远高于一般富油洼陷。研究揭示, 在早白垩世烃源岩发育期间, 古地温梯度高达 $(3.75 \sim 4.50)^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ^[47]; 伴有热水沉积^[48]和玄武岩喷发^[49], 表明烃源岩形成时深部活动明显。但在研究酒西盆地何以“小而富”或青西洼陷烃源岩为何如此优质、高效时, 却很少探究深部作用的影响。

对地史上盆地演化过程中深部作用是否参与及其表现形式, 若缺乏岩浆活动, 一般较难确定。要探讨深部作用对生烃母质类型、生存环境和繁衍程度等的影响和其间的响应关系, 难度就更大。

在形成和空间分布上, 活跃的深部作用通常与盆地的沉降作用密切相关。后者一般控制着沉积中心, 即生烃凹(洼)陷的展布和迁移。在陆相盆地, 生烃洼陷存在与否和富油洼陷的规模及特征, 直接决定盆地油气的有无和富贫; 而盆地沉积过程中生物的生存环境和繁盛程度, 为其中具决定意义的关键因素。简言之, 含油气盆地中意义重要的生烃凹(洼)陷, 可能蕴含着相对更丰富的深部信息, 可作为窥探深部过程及其影响和效应的窗口。

中国陆相盆地发育时限相对较短, 沉积环境多变, 沉积中心常发生迁移, 一般不利于有机质的富集。由上述可知, 较高的地温和频繁的深部物质上涌, 使生物的集中群居生存和在相对较短时间里繁盛、富集并及时埋藏、保存成为可能。这也许是中国陆相盆地油气较为丰富而与世界陆相盆地含油气性相对较差这一总特征有别的根本原因。对其

研究有着极为重要的科学理论和生产实际意义。

3.5.3 对有机质埋藏后成烃转化条件和过程的影响

以往对盆地地热场的变化与有机质成熟和生烃的影响, 给予了足够的重视; 对岩浆活动在烃源岩成熟和油气成藏、赋存方面的正反作用, 也有一定讨论。对来自深部的热液或气体, 在有机质演化 and 生烃过程中的催化作用及合成生烃机制, 也曾论及, 但又常将其作为油气无机成因的证据^[50]。

有必要指出, 根据目前勘探现状和研究结果, 无机生成的烃类规模有限。一些可能为无机成因的证据, 如油气中常含或伴生有多种可能来自地球深部的气体或元素^[50-51]等, 是否有可能为生物在上述生存、繁衍环境中, 体内含有大量来自地球深部的元素, 遂转化为烃类时溶入石油。即可能来自深部的各类热液流体或元素, 为生烃母质的生存和繁盛提供了(极为)有利的环境和营养; 同时进入留存在生物体内, 而并非直接形成或转化为油气。这确是值得进一步探讨、具有重要科学意义的问题。

尚需强调指出, 来自深部的各类热液流体或元素, 对有机质演化条件和生烃过程中的促进或抑制作用及其机理, 目前研究薄弱, 知之甚少。新近研究揭示, 铀元素的存在对烃源岩的生烃有明显地促进作用和积极的影响^[3]。中国陆相含油气盆地大多油气煤铀同益共存; 地层一般富铀^[3, 52-53], 有些盆地优质烃源岩明显含铀高(如鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组 7 段)。所以, 探讨铀等相关元素对烃源岩的生烃环境、过程及阶段的变化和生烃量及其组分等的影响, 在基础科学与油气地质研究、资源量估算、油气评价及勘探等方面有可能产生观念性的改变, 有着重要的意义和应用前景。

3.6 成熟盆地再研究的必要性和指导思想

成熟盆地, 即目前已进入(较)高勘探、(较)高开发阶段的产油气盆地。在有些含油气盆地内部, 常有类似勘探、开发程度的成熟地区^[54]。

这类盆地和地区的石油产量和储量, 在中国分别约占总产量、储量的 80%和 90%。

近 10 多年来, 世界新增探明石油储量的 70% 来自相对成熟的盆地。在世界未来待发现的油气资源量中, 48.5%的油和 41.4%的气来自已发现储量的产油气盆地或地区^[55]。这表明, 在成熟盆地继续发现更多的剩余资源量仍有可能, 这也是保持这类盆地油气稳产或缓解产量递减的关键环节。

中国成熟盆地地质构造复杂、油气成藏条件多

样,目前要有新的重大发现难度颇大。石油工业的发展史表明,对成熟盆地的油气勘探,仅凭勘探工作量的增加或研究的精雕细刻一般只会有小的发现,理论的突破和观念的更新才可能有大发展。

成熟盆地油气勘探和发现的特点及规律一般是:理论—认识—发现—发展—徘徊—困惑—重新审视、整体研究—新理论、新认识—新发现、新发展……如此反复,不断前进和持续发展。

再研究是产生新认识、新思想的基础,新认识和新思想是大发现、大发展的前提。一般情况下,用一种新的勘探思路和成藏模式指导某一盆地(或地区)的油气勘探,其有效期常常只有5~10 a。这也大致决定和代表了油田波浪状发展每一阶段和油气发现、发展、兴旺、徘徊一个周期的时限。

勘探和研究实践表明,对成熟盆地每5~8 a应该进行一次整体综合研究。研究应在新的、先进的科学理论指导下,突破习惯思维和传统观念,不拘泥于已有的认识,对盆地或较大区域丰富的勘探资料和研究成果重新审视、整体分析、综合评价。

研究内容一般侧重2个方面:

(1)对盆地结构、构造、沉积、古今地热场、流体等整体特征、相互作用及其演化和改造的再认识。

(2)重新总结油气藏(田)形成与分布的总体规律、主控因素和时空变化。

这2方面内容虽各有侧重,但有机相联,应深刻揭示两者的内在联系和响应关系。研究的目标是深刻揭示盆地新的或多系列油气藏类型和成藏模式及其分布规律。

在盆地勘探早、中期,为了借鉴勘探卓有成效盆地的成功经验,研究自觉、不自觉地多从“类比”出发,寻找盆地和油气赋存条件的共同点和相似处。进入成熟盆地阶段,科学研究的思路和油气勘探的指导思想,应在“寻同”的基础上转为“求异”。突出与同类其他盆地的不同之处及其形成原因;盆地的诸多个性与油气赋存、成藏的内在联系等。从成熟盆地的这些“个性”本质出发,才能深刻揭示油气赋存条件和发现新的油气藏类型,才可能有油气勘探的新突破和大发展,才可能丰富和发展盆地动力学和油气地质学理论。

4 多种能源矿产同盆共存成藏(矿)

4.1 世界多种能源矿产同盆共存的表现

沉积盆地不仅为油气赋存的基本单元^[32-36],重

要能源矿产煤炭也完全赋存在沉积盆地中。随着砂岩型铀矿在铀矿资源中地位迅速提高,油、气、煤和铀最重要的4种能源矿产主要赋存在沉积盆地中已成为不争的事实。所以,沉积盆地为不可再生能源矿产赋存的基本单元和成藏系统^[3,52]。

砂岩型铀矿常常与油、气、煤产在同一盆地中,其空间分布关系密切。据国际原子能机构(IAEA)2003年资料,世界已探明的砂岩型铀矿床共有333个^[59],对其进一步统计对比发现,主要分布在94个盆地中。通过对这些盆地油气、煤勘探开发现状的调研和对比揭示,其中274个砂岩型铀矿床与已经探明的油气田或煤田同盆共存,占砂岩型铀矿床总个数的82%。以上调研对比尚未统计已有不同形式油气显示、有望发现新的油气藏,或曾发生油气聚集成藏、然现今已遭改造或破坏的盆地。这类盆地为数不少,若统计之,与油、气、煤同盆共存的砂岩型铀矿床和盆地所占比例会更高。可见,4种主要能源矿产同盆共存富集存在普遍^[3,52-53]。

已发现的砂岩型铀矿遍布全球,但其富集成矿区的集中分布却有明显的分区性。无论砂岩型铀矿床的数量还是总资源量,北半球(北纬20°~50°)均占主导地位。多种能源矿产共存盆地约80%位于北半球。其中尤以中东地区诸能源盆地典型,该地区油气、煤资源丰富,已查明的铀资源量占全球已查明铀资源总量的56.2%。

中国大陆主体在全球砂岩型铀矿集中分布的纬度(北纬20°~50°)带内,但中国目前已探明的砂岩型铀矿,95%以上的资源量却在北纬35°以北的北方中生代陆相盆地,且常与油、气、煤等能源矿产同盆共存富集。如松辽、二连、鄂尔多斯、吐哈、伊犁等盆地。在中国南方,尽管蚀源区铀源丰富,但迄今为止,除四川含油气盆地川北地区和滇西个别小盆地外,众多中生代陆相盆地尚未发现砂岩型铀矿床,甚至良好的铀矿化异常也较少见。这与已经探明和证实的中国内生铀矿床和储量南多北少正好相反,却与中生代陆相盆地的油气北富南贫、煤炭北多南少惊人的一致。这表明,铀成矿物质的贫富是能否形成外生铀矿床的重要因素和必要条件,但不是决定因素和唯一条件;铀成矿物质只有在特定的环境和条件下,才可能富集成矿床。

4.2 中东地区能源矿产成藏(矿)域特征和形成环境

中东地区巨型能源矿产成矿域东起中国松辽盆地,西止里海,地域跨中、蒙和中亚诸国,东西连绵

逾 6 000 km。在该成矿域分布有数十个(特)大型油田、气田、煤田和砂岩型铀矿,其中多数盆地这 4 种能源矿产共存富集。

根据大地构造特征、区域演化和成矿条件等差异,自东而西将该成矿域划分为松辽—鄂尔多斯、阿拉善—河西走廊、新疆和中亚 4 个成矿区。前 3 个地区主体位于中国北方,向北跨入蒙古境内。

对中亚成矿域各国主要能源盆地系统剖析、对比和总结揭示,该成矿域诸盆地多种能源矿产的赋存和分布具有以下特点^[53]:空间分布复杂有序、各含(储)矿层位和地区联系密切、成藏(矿)-定位时期相同或相近、赋存环境和成藏(矿)作用有机相关,并共具丰富的矿源物质背景,表明其间有着密切的内在联系和统一的地球动力学背景。在蚀源区铀源较充分但无(贫)油气煤的盆地,却很少发现砂岩型铀矿床。这从反面佐证了各能源矿产同盆共存成藏似有着密切的深层次内在联系。

综合研究和对比中亚成矿域诸含铀盆地的含矿地层和成矿作用及年龄,将区域铀成矿过程以 100 Ma BP、(50±2)Ma BP、(20±2)Ma BP、(8~5)Ma BP 为界划分为 4 个时期。该成矿域不同成矿区的能源盆地,起始成矿时间和主成矿期不尽相同,一般具有东部早、西部晚的特点。这种差异,与区域大地构造演化有明显的响应关系,总体受区域地球动力学环境演变控制并与所在盆地油气的成藏-定位时期和期次基本一致。如中国西北和中亚成矿区诸能源盆地,受青藏-特提斯构造域强烈活动的影响明显,油气、铀的成藏(矿)-定位时期较晚,主要发生在(20±2)Ma BP 以来,特别是(8~5)Ma BP^[38, 53]。

在中亚成矿域盆地演化和改造的不同阶段,多种能源矿产的共存及其相互联系的特点不同。从工业利用和商业开采考虑,油、气、煤、铀共存、成藏和定位及其相互作用密切联系的重要时期,发生在盆地演化晚(末)期和之后。

对中亚和中国诸能源盆地的成矿环境综合研究揭示,相对稳定的区域构造背景和适度(较弱)的构造变动,是大中型砂岩型铀矿、油气田(区)和煤田形成与保存,亦即油气煤铀共存的必要条件;适于 4 种能源矿产同盆共存成藏、且资源甚丰的盆地类型,主要为内克拉通盆地和中间地块盆地及其相关的改造盆地。后者现今一般为小型残留盆地,位于与原始沉积环境和构造背景密切相关的大中

型内克拉通盆地和中间地块盆地外围。

4.3 油气逸散及其地质效应和判识标志

4.3.1 研究现状和意义

油气生成后发生的运移,不论其途径、期次、动力、相态及其模式和过程等多么复杂多变,其结果只有 3 种:聚集成藏、散于地下的岩层及流体中,暴露地表和大气而损失(即逸散)。对前者,讨论最多,直接用于认知油气藏的形成,并影响油气勘探及资源评价。对其二,研究颇弱,在油气资源评价中,仅在选取综合参数中略有间接体现。对后者,探讨甚少,在油气地质研究与勘探中常很少顾及;在油气资源评价和储量计算中鲜有涉及^①。盆地中所发现的煤成气储量,一般远少于预测资源量中的预期比值^[57],是否与此有关,值得进一步研究。

油气为流体矿产,其聚集成藏是动态的:即其存在是暂时和相对的,而其运动和变化是长期的、绝对的。在油气运移的“聚”、“散”、“失”3 部分中,损失的部分最为活跃,所处的地质环境和所经的途径也最有利于流体运移,应为油气运移和成藏条件研究的重要内容和剖析对象。

对全球 350 个大油田的研究发现,这些油田的寿命均较短暂,其中值年龄平均为 35 Ma。这些油田均处于动态变化之中,破坏率很高,其中有 1/3 的油田存在聚集成藏后遭破坏的证据^[58]。可见,油气逸散损失的部分与聚集成藏的部分联系最为密切。前者可视作本应聚集成藏的油气,然却类同殊途,各得其果。所以,在油气勘探部署和资源评价以及资源量探明程度估算中,对油气损失部分应高度重视和充分考虑。

流体油气在其经过的途中,除同时代形成的极为有限的包裹体可能偶然捕获极为有限的油气外,一般在浅表层常很少有油气原物残留,甚至可能曾存在的古油气藏(田)也会消失。在地表也许会遗留分布有限、产状各异的油苗,然而天然气(藏)的散失几乎不留任何残余。因此,对油气逸散研究,特别是对其逸散规模的确定难度颇大,是迄今国内外尚无重要进展的国际性研究难题。

4.3.2 地质效应与判识标志

在油气经过和逸散的浅表层,应存在油气与周邻流岩相互作用形成的各种还原蚀变等后生产物,

①刘池洋. 油气逸散——油气地质研究和资源评价的弱点和难点. 第六届全国油气运移学术研讨会报告, 西安, 2007.

这是确定油气是否曾存在、经过及其逸散规模的重要依据,甚至是主要证据。将其与直接显示的油气逸散结果(如各类油气苗、沥青、稠油等)相结合,追根溯源,为探讨和解决油气逸散及其规模这一国际难题开辟了一条新的重要途径。

如鄂尔多斯盆地,在已探明天然气储量巨大的北部大气田区之北的广阔范围,近年的多项研究揭示,存在上古生界天然气明显逸散的多种证据。

如在乌兰格尔古隆起南坡东西长 100 km、南北宽 13 km 的范围内,已发现 45 处白垩系油苗。多种资料综合分析表明,油苗为来自该区南部成熟度较高的上古生界煤型气所成的凝析油^[59]。

在上古生界天然气经过和逸散的浅表层,与周邻流岩相互作用同时形成了各种还原蚀变等后生产物。如在直罗组地层中形成了长逾 300 km,宽 2~35 km 的大规模绿色化蚀变带^[60];在延安组顶部地层中形成了大规模漂白现象^[59]。

根据盆地东北部山西组不同成岩序列包裹体的均一温度、捕获压力等参数初步估算,累计天然气的散失量约 39.7%^[61]。

在鄂尔多斯盆地东北部,上古生界大气田区、天然气逸散的直接显示地带和其各种还原蚀变后生产物分布区与东胜大型铀矿床之间,构成了有序的空间分布组合,显示出密切的成因联系。大规模的天然气逸散在盆地北东部形成了一个范围广阔的强还原性环境,为东胜大型铀矿床富集、保存和定位提供了有利的成矿环境。

上述与油气逸散及其蚀变作用有关的矿物学、岩石学、地球化学和矿床学等表现,自然成为油气逸散及其地质效应的判识标志体系。

5 沉积盆地成藏(矿)系统

5.1 沉积矿产与盆地成藏(矿)系统及环境

沉积盆地集油气、煤、膏盐、黏土矿等非金属矿产和砂岩型铀矿、砂岩型铜矿、沉积钒矿、铝土矿、煤型锆矿和煤型镓矿床等金属矿产以及水资源共存于一盆。这些有机和无机、金属与非金属矿产同盆共存,共同构成了一个矿产资源丰富、类型多样、相对独立、成矿作用有不同程度的成因联系与耦合关系、和谐统一的矿产赋存单元和成藏(矿)大环境,称之为沉积盆地成藏(矿)系统^[62]。

沉积盆地是诸多沉积矿产同盆成生、赋存的基本单元和成藏(矿)的巨型复杂系统,盆地动力学系

统为沉积矿产赋存-成藏(矿)的统一大环境和动力学背景。所以,盆地的形成演化-改造过程,自然就构成了一个统一地球动力学环境演变→各圈层内、外地质动力相互作用→多种沉积矿产同盆共存、富集成藏(矿)的关系链。各链节又自然显示出级别不同、因果有关、联系密切、彼此响应制约的复杂互动大系统(图 4)。

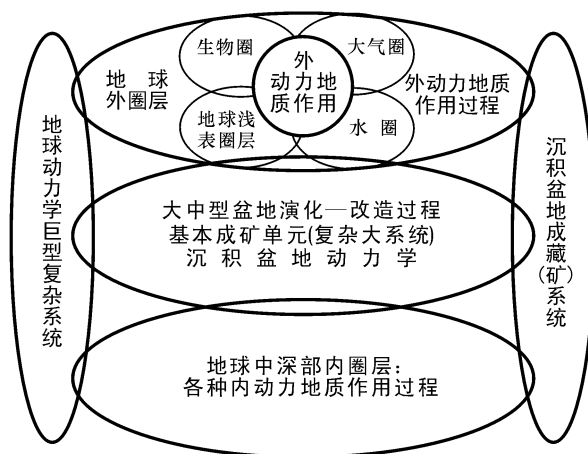


图4 盆地成藏(矿)系统与沉积盆地动力学和地球动力学关系

Fig. 4 Basin Mineralization System vs.

Geodynamics and Sedimentary Basin Dynamics

5.2 成矿环境和成矿作用及过程

沉积盆地成矿系统的成矿环境及影响因素具有如下特点:处于①低温低压环境(温度一般低于 200 °C 或 250 °C,在特定环境和特别的矿床可达 350 °C)和②开放体系中,③成矿流体和④生物-有机质(流体)在其中起着极为重要的作用,且⑤常受温度变化的明显影响,⑥成矿作用一般与岩浆活动无直接成因联系^[62]。

沉积盆地成矿系统的成矿作用和过程具有以下特点:

- (1)成矿物质初始赋存大多呈分散状。
- (2)成矿物质从其初始聚集到成矿作用发生和矿藏形成,所处环境发生了显著变化。
- (3)成矿过程一般都经历了原始成矿物质聚集→转化成矿→富集成藏及改造定位 3 个阶段。
- (4)成矿物质运移的动力多样,运移途径主要为各种成因的孔隙、断裂、微裂隙及不整合面等。
- (5)矿源岩与储集层的时代关系组合多样。
- (6)沉积矿产的聚集成矿场所,一般为渗透性差的泥岩、膏盐层等封盖的圈闭构造(背斜、断层、

岩性等),或处于地球化学环境、构造特征、岩性岩相等突变的边界转化带。

(7)原始成矿物质聚集与矿藏形成-定位间隔的时间一般可较长,时差甚或可达几亿年。

(8)沉积矿藏形成通常具动态成矿过程,一般具有成矿的多期性和叠加性。

(9)后期改造影响明显。

(10)以上特点决定了沉积矿藏的形成,特别是其定位时代相对较晚。

(11)盆地内沉积矿产类型多样,不同类型矿产之间有着重要的内在联系和直接或间接的依存关系。如具亲和性、同存共荣者或彼此依存者居多;也有具排他性、有此无彼、互不同存者,等。对这些关系的梳理、厘定和其形成环境的揭示,无疑对各类矿产形成的机理和分布及预测提供了科学依据,为盆地内多种沉积矿产兼顾,全方位、立体式、科学高效、协同勘探和综合预测奠定了理论基础。

5.3 盆地成矿系统的类型及时空演化

根据地球构造动力学环境的不同,可将盆地成矿系统分为裂陷伸展、聚敛、转换、克拉通等类型,各类系统中矿产的成矿特点、类型和分布组合等有别。受地史上地球表层水圈、大气圈和生物圈演化及其不可逆性的明显影响,盆地外生沉积矿藏的形成及特征一般具有明显的阶段性,并随时间发展矿种更为复杂多样。同时,沉积矿产的富集成矿也具有明显的空间分区性及偏富极的特点。

沉积盆地成藏(矿)系统有其自身的成矿特点和成藏(矿)环境,应将其作为一种独立的成矿系统与造山带和地盾等成矿系统相并列和区别。研究时,应强调盆地中不同类型、不同成因沉积矿产的成藏(矿)不是孤立存在和单独出现,其形成和分布有机关联、相互作用、彼此影响。某一种矿产的发现,本身就可能隐含着其他沉积矿产存在与否或其特征等有关重要信息。这有利于更深刻理解和认识盆地成藏(矿)系统的特点和成矿规律,促进人们期盼已久的一叶知秋、见微知著、举一反三、由此及彼、探深找盲的资源预测和综合勘探成为可能。

有必要指出,沉积岩和沉积盆地分别是副变质岩和造山带早期的物质形成和演化阶段。与之类似,盆地成矿系统的成矿物质聚集和成矿作用,也是高、较高温压环境中层控等相关矿床形成过程不可分割的有机组成部分。若无前者,后期各种内动力地质作用引发的高、较高温压成矿作用也未必都

能形成矿床。沉积盆地演化阶段矿产的(预)富集或分散成矿物质的聚集作用,是全面认识层控等金属、非金属矿床形成过程、环境和深刻揭示其成矿机理不可或缺、不能替代的关键环节之一;是对盆地成矿系统研究的另一方面重要意义。

6 讨论和体会

以上认识和观点,是笔者对部分有关盆地理论研究的系统化梳理和小结,尚需今后进一步深化、完善和发展。

地球是一个非常复杂的巨系统,由多个复杂系统构成,盆地为其中之一。复杂性科学(系统)有诸多与传统科学不同的个性特征,决定其研究思想和方法论的嬗变。“我们被迫在一切知识领域中运用‘整体’或‘系统’概念来处理复杂性问题”^[63]。

6.1 整体、系统的学术思想

从盆地整体出发研究和思考相关地质问题与矿产形成,就会自觉不自觉地运用系统科学思想。

笔者对沉积盆地动力学内涵及定义、含油气盆地研究系统和研究总则、多种能源矿产同盆共存成藏(矿)、沉积盆地成藏(矿)系统、块-盆-带系统动力学以及油气逸散的地质、成矿效应等的研究,均不同程度地运用和体现了整体观和系统论的思想。

一般认为,系统科学中组成系统需要以下 3 个要素:可分性或层次性(即系统的整体由多个部分或子系统组成)、相关性、整体性(由各部分构成的系统为具有某种功能的整体)^[63-65]。笔者认为,其中相关性最为重要。相关性即系统内部各子系统之间相互关联、相互作用、彼此影响;系统中不存在与其他子系统无关的独立组分或单方面的影响。在地球或盆地这种复杂巨系统中,整体作用不同于部分作用之和;在系统及其子系统与外部环境之间,随时随地存在着物质、能量和信息的交换。

笔者在前人认识^[32-37]的基础上,先后提出了多种能源矿产同盆共存富集的观点^[3],继而提出和初步构建了盆地是沉积矿产共存富集、成藏(矿)的基本单元的沉积盆地成藏(矿)系统^[62]。强调诸多矿产“共存”的核心是,在成矿、赋存和分布诸方面之间的相互作用、彼此影响、有机相关^[3,62]。上述认识的变化,显然不是一个简单的继承和矿种数量的增加,而是理论的发展、创新和认识的飞跃。

有必要指出,对复杂系统的整体把握和认识,只有建立在对其局部(不同层次子系统)或微观的

精细分析和深入研究的基础上才更具体、科学,也才可操作。在复杂性科学研究中,其整体论与传统科学的还原论不是对立而是互补关系。随着探测手段的进步和科技、社会的需要及潮流,目前地学、生物学^[6]和社会、经济等复杂性科学的研究和实践,都更多的趋向于更小尺度的局部或微观层次,致使对微观的了解越来越精细,而对整体或宏观全貌的认识反倒越来越模糊。在这种情况下,强调整体观、系统论是及时而必要的。

6.2 研究抓住地(质)学的三大要素

地(质)学及其相关学科的研究内容丰富、领域广泛、种类多样,其共性可归结为研究难度依次增加的三大要素:空间变化、演化过程和成因机制。相对而言,研究对象个性特征的空间变化,以现存的静态现象为主,可直接观测的实物、现象和可利用的第一性探测资料较多,是研究的基础。演化过程需剔除后期改造叠加的内容,恢复损失的成分,再现地史上主要时期的原始面貌,才可能深刻揭示其动态演化-改造过程,一般可直接利用的资料较前者要少。成因机制主要是在前二者研究的基础上进行,是研究的最终目的和最高层次,但研究中推理、升华成分较前二者要多,结论或然性较大。

研究有关盆地沉降的重力、热力和应力成因,盆地沉降中心、沉积中心和堆积中心及其关系,中国盆地后期改造强烈的形成原因和发育的动力环境,小型含油气盆地类型和其油气赋存条件、深部作用与油气富集的关系,中东地区能源矿产成藏(矿)域特征和其形成的动力学环境等方面的研究,均试图探讨和揭示其形成原因与动力机制。

6.3 同异共求,突出求异,揭示个性的研究思路

在科学研究中,求同或类比较多,求异相对较少。应将二者同等对待,并在求同的基础上突出求异,才可能认知研究对象的个性。只要客观地揭示其本源个性特征,就开辟了一个相关的研究新领域;持续探究,其创新成果自会接踵而来。如笔者率先提出或较早进行深度研究的“后期改造”、“改造盆地”的概念及其定义和分类,原(始)盆地恢复、晚期-超晚期油气成藏-定位及时限、改造盆地研究和油气评价及预测的程式和理论等概念、观点和创新思想,就是在揭示中国大陆和沉积盆地活动性强、深部作用活跃、后期改造强烈个性特点的基础上进行的。这方面研究,深刻揭示盆地的动态演化-改造过程和油气动态成藏-定位过程及其分布

规律,并为探讨成因机制奠定了良好基础。这一系列新的理念、概念、认识和学术思想,在石油行业不仅得到广泛赞同和响应,而且已得到较广泛应用。

对成熟盆地再研究的思路和油气勘探的指导思想,强调应在“寻同”的基础上转为“求异”,突出与同类其他盆地的重要不同之处,即个性本质。

6.4 既要重视研究方法,更要重视方法论

在地质学研究中,通常对具体研究方法,特别是新方法较为重视,但对其方法论却重视不够。方法论为方法建立和应用的基础,是连结方法和其所用学科之间有效耦合性的桥梁。研究方法和方法论因学科不同而有异。

在复杂系统中,各子系统间具非线性特征,不满足叠加原理;系统的整体功能(行为或特征)不能由其子系统的功能来获得。其数学模型是高维的,具有多输入多输出特征。系统的参数存在多方面(如系统整体结构、各子系统间耦合作用和外部系统影响等)的不确定性或时变性。某一参数的微小变化,就可能涌现突变现象,这种突变性用该参数的变化幅度是无法衡量的。一般复杂系统在随时间演变过程中具不可逆性等^[64]。

这些复杂系统特有的典型特征,为地球或盆地复杂系统所常见,其科学方法论自有其鲜明特性。如对盆地这类复杂系统,不能用对其某一子系统功能的研究来替代盆地动力系统的整体功能;单一方法所得的结论或然性较大;仅用概率统计的方法对系统整体给出的结论有时隐藏有误区;只用定量模拟来再现或预测复杂系统的演化过程和长远发展趋势,有其自身的缺陷;高维的数学模型和各类参数的不确定性,使试图用于定量计算或描述的精确实数学模型难以建立,致使许多计算不作为等。

所以,应紧密结合地球科学复杂巨系统的实际,重视对其方法论的研究,从而有效指导具体方法的建立、遴选、应用和促进其应用效果。

复杂性科学还处于初创期^[64],方法论尚不成熟。综合有关研究^[63-65],笔者认为,地球复杂性科学(系统)的研究思想和方法论应体现以下原则:

(1)定量计算应在定性判断的框架中进行:定性判断把握质的变化、发展方向和宏观特征;定量计算(描述)使定性判断更具体、更精确。

(2)局部或微观的具体性研究,应置于系统的整体性和宏观之中,如“胸有成竹”类绘画,似“庖丁解牛”式剖析。否则,就如瞎子摸象、井蛙观天,对

局部和微观观察精细, 然不知整体或宏观之全貌。

(3) 确定性描述与不确定性描述相结合。

(4) 渐变论与突变论(涌现)相结合。

(5) 科学推理与哲学思辨相结合。

(6) 计算机模拟与专家智能相结合, 即将计算机强大的数据处理能力和领域专家智能相结合^[64]。

行笔至此, 草“科研感悟”一首, 作为本文结语:

方向慎选道优辨, 跋足不迷胜步健。^①

地学核心三要素, 成因过程时空变。

研究重视方法论, 整体解析系统观。

同异共求揭个性, 龟兔赛跑恒领先。

此文框架构思于 2005 年, 初稿草成于 2006 年, 拟为庆贺赵重远教授 80 岁华诞而写。是年正值笔者主持的国家“973”项目中期评估, 因事多时紧而搁放留憾。本文在原初稿基础上作了较大篇幅的修改和补充。对学人和老师的庆贺或纪念, 莫过于学术思想和学风的探讨与传承。借拙作发表之际, 谨祝赵重远教授健康长寿。

参考文献:

- [1] 刘德生, 段绍伯, 唐小妹, 等. 世界地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [2] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 刘池洋, 赵红格, 谭成仟, 等. 多种能源矿产赋存与盆地成藏(矿)系统[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 131-142.
- [4] Boot M H P. Formation of Sedimentary Basins of Graben Type by Extension of the Continental Crust[J]. Tectonophysics, 1976, 36(1-4): 77-86.
- [5] 赵重远. 沉积盆地的成因和演化及其赋存的大地构造环境和油气资源[M] // 赵重远. 石油地质学进展. 北京: 地质出版社, 1988.
- [6] 刘池洋. 盆地构造动力学研究的弱点、难点及重点[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 113-124.
- [7] 赵重远. 沉积盆地成因与地球均衡作用[J]. 石油与天然气地质, 1981, 2(1): 37-46.
- [8] Watts A B. Lithospheric Flexure Due to Prograding Sediment Loads: Implications for the Origin of Offlap/Onlap Patterns in Sedimentary Basins[J]. Basin Research, 1989, 2: 133-144.
- [9] 位梦华, 王桂梁, 王维襄, 等. 重力作用与构造运动[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [10] 夏丹, Carbis. 来自太空的撞击[J]. 中国国家地理, 2003(12): 24-40.
- [11] Leighton M W. 内克拉通盆地[M]. 刘里斌, 于福华, 杨时榜, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [12] 刘池洋, 魏永佩, 赵红格. 造山带研究中值得注意的几个问题

[C] // 马宗晋, 杨主恩, 吴正文. 构造地质学—岩石圈动力学研究进展. 北京: 地震出版社, 1999.

- [13] 刘池洋, 杨兴科, 任战利, 等. 羌塘盆地雀莫错沉降-堆积中心成因: 热力衰减塌陷沉降[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 147-154.
- [14] 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转换峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 285-297.
- [15] 赵重远. 中国东部中生代含油气盆地形成和发育的构造背景[C] // 赵重远, 刘池洋, 姚远. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存. 西安: 西北大学出版社, 1990.
- [16] 刘池洋. 含油气盆地沉积-沉降中心迁移的形成机制探讨[C] // 王宜林. 第五届全国沉积学及岩相古地理学学术会议论文集. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1997.
- [17] 刘池洋. 河套盆地呼和坳陷沉降-堆积中心转移及其形成机制[C] // 赵重远, 刘池洋, 姚远. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存. 西安: 西北大学出版社, 1990.
- [18] 赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 等. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义[J]. 地质学报, 2008, 82(4): 待刊.
- [19] 郑荣才, 尹世民, 彭军. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 369-375.
- [20] 刘池洋. 后期改造强烈——中国沉积盆地的重要特点之一[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(4): 255-261.
- [21] 刘池洋, 赵重远, 杨兴科. 活动性强、深部作用活跃——中国沉积盆地的两个重要特点[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 1-6.
- [22] 刘池洋, 孙海山. 改造型盆地类型划分[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(2): 79-82.
- [23] 刘池洋. 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[C] // 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, 1993.
- [24] 刘池洋, 杨兴科. 改造盆地研究和油气评价的思路[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 11-14.
- [25] 刘池洋. 后期改造与古地质构造恢复[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1991, 21(增刊): 1-8.
- [26] 刘池洋. 叠合盆地类型及其特征和油气赋存[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 1-7.
- [27] 房建军, 刘池洋, 王建强, 等. 地貌高差与流体改造: 含油气盆地分析和评价的重要内容[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 待刊.
- [28] 张渝昌. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京: 南京大学出版社, 1997.
- [29] 刘池洋. 柴达木盆地近南北向古构造带的发现及其地质意义[C] // 成都地质矿产研究所. 中国西部特提斯构造演化及成矿作用. 成都: 电子科技大学出版社, 1991.
- [30] 赵重远, 刘池洋. 大陆地质构造特点及其研究方法的思考[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1991, 21(2): 55-63.
- [31] 刘池洋, 杨兴科, 王定一, 等. 羌塘旋回——青藏构造域形成演化的新模式[C] // 周光召. 西部大开发, 科技先行与可持续

① 跋足而不迷路的人, 能够赶上虽健步如飞却误入歧途的人——培根.

- 发展. 中国科协 2000 年学术年会文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.
- [32] 赵重远, 刘池洋, 任战利. 含油气盆地地质学及其研究中的系统工程[J]. 石油天然气地质, 1990, 11(1): 108-113.
- [33] 赵重远. 论含油气盆地的整体动态综合分析[C] //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, 1993.
- [34] 西北大学地质系石油地质教研室. 石油地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [35] 刘池洋. 前言[C] //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, 1993.
- [36] 朱 夏. 我国中生界含油气盆地的大地构造特征及有关问题[C] //《中国大地构造问题》编委会. 中国大地构造问题. 北京: 科学出版社, 1965.
- [37] Perrodon A. 石油地质动力学[M]. 冯增模, 邬立言, 王殿凯. 译. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [38] 刘池洋, 赵红格, 杨兴科, 等. 油气晚期、超晚期成藏定位——中国含油气盆地的重要特点[C] //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. 北京: 中国石化出版社, 2003.
- [39] Tung-Yi Lee, Lawver L. A. Cenozoic Plate Reconstruction of Southeast Asia[J]. Tectonophysics, 1995, 251(1/4): 85-138.
- [40] 刘池洋. 中国小型含油气盆地类型与油气赋存[J]. 石油勘探与开发, 2008, 29(4): 待刊.
- [41] 戴金星, 秦胜飞, 陶士振, 等. 中国天然气工业发展趋势和天然气地质理论重要进展[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 127-142.
- [42] 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.
- [43] 赫 英, 王定一, 廖胜利. 胜利油田火山岩类、盆地演化及其 CO₂-Au 成藏效应[J]. 地质科学, 2001, 36(4): 454-464.
- [44] 周荔青, 刘池阳. 深大断裂与中国东部新生代盆地油气资源分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [45] 林昌铤. 大洋深处的生命奇观[N]. 中国科学报, 1995-07-19(2).
- [46] 陈 颢, 史培军. 自然灾害[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007.
- [47] 任战利, 刘池阳, 张小会, 等. 酒泉盆地群热演化史恢复及其对比研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 635-645.
- [48] 郑荣才, 文华国, 高红灿, 等. 酒西盆地青西凹陷下沟组湖相喷流岩稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2006, 26(4): 41-47.
- [49] 杨经绥, 孟繁聪, 张建新, 等. 重新认识阿尔金断裂东段红柳峡火山岩的时代及构造意义[J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(增刊): 83-89.
- [50] 郭占谦, 杨兴科. 中国含油气盆地的多种生烃机制[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 50-52.
- [51] 郭占谦, 徐文发, 彭 威. 中国西部陆壳与含油气系统基本特征[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(5): 365-370.
- [52] 刘池阳, 谭成仟, 孙 卫, 等. 多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律研究[C] //刘池洋. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展. 北京: 科学出版社, 2005.
- [53] 刘池洋, 邱欣卫, 吴伯林, 等. 中东亚成矿域多种能源矿产同盆共存特征和其形成的动力学环境[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(专辑): 1-15.
- [54] 刘池洋, 杨道庆, 杨斌谊, 等. 成熟盆地构造及结构再研究方法[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(1): 9-12.
- [55] 张 抗, 周总瑛, 周庆凡. 中国石油天然气发展战略[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [56] OECD(NEA)/IAEA. Uranium 2003: Resources, Production and Demand[M]. Paris: OECD, 2004.
- [57] 钟宁宁, 陈恭洋. 煤系气油比分配控制因素及其与大中型气田的关系[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [58] Mac Gregor D S. Factors Controlling the Destruction or Preservation of Giant Light Oil Fields[J]. Petroleum Geoscience, 1996, 2: 197-217.
- [59] 马艳萍, 刘池阳, 王建强, 等. 盆地后期改造中油气运散的效应——鄂尔多斯盆地东北部中生界漂白砂岩的形成[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 233-238.
- [60] 吴柏林, 刘池阳, 张复新, 等. 东胜砂岩型铀矿后生蚀变地球化学性质及其成矿意义[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 740-747.
- [61] 冯 乔, 张小莉, 王云鹏, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界油气运聚特征及其铀成矿意义[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 748-752.
- [62] 刘池洋, 张复新, 高 飞. 沉积盆地成藏(矿)系统[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 365-374.
- [63] 贝塔朗菲. 一般系统论: 基础、发展和应用[M]. 林康义, 魏宏森. 译. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [64] 李士勇, 田新华. 非线性科学与复杂性科学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [65] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3-10.
- [66] 袁建胜. 生命科学学科人才培养再次转向[N]. 科学时报, 2007-12-11(大学周刊 B1 版).