

文章编号: 1000-0550(2017)05-1032-12

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.014

能源盆地沉积学及其前沿科学问题

刘池洋^{1,2}, 赵红格^{1,2}, 赵俊峰^{1,2}, 吴柏林^{1,2}, 黄雷^{1,2}, 王建强^{1,2}, 张东东^{1,2}, 张少华^{1,2}

1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069
2. 西北大学含油气盆地研究所, 西安 710069

摘要 赋存油、气、煤和(或)铀能源矿物的沉积盆地,称为能源盆地。沉积作用及建造是影响油气煤铀同盆共存、成藏及分布的重要因素和物质基础。能源等沉积矿产及其形成,是沉积学的重要组成部分。通过讨论能源盆地沉积建造与油气煤铀赋存成藏及分布的内在联系,提出成煤建造在盆地演化和空间分布上,总体处于成油气建造和成铀建造的过渡、衔接部位和承前启后的演化阶段。并探讨了厚煤层的初始成煤物质来源与成因,蚀源区物源对盆地沉积建造、油气储层和铀成矿的重要影响。分析认为当前存在重先进技术观测测试,轻露头区精细剖析的倾向;对后期改造的影响程度和原盆古沉积面貌恢复的水平尚需重视和提高。能源盆地沉积学内涵的自然外延领域广阔,与之相关的前沿科学问题颇多。应将沉积学置于盆地形成演化和改造的时空过程中,兼顾地球环境和生物演变进程,进行整体、动态、综合研究。重点讨论了其中部分相关前沿科学问题,如:沉积盆地动力学、地球环境及生命演变对沉积和成矿作用的影响、有机与无机相互作用对能源矿产形成的影响、事件沉积学及深部作用与成矿作用的关联、能源矿产空间分区性及偏富极形成的沉积学环境、沉积建造和沉积矿产年代学等。

关键词 油气煤铀;能源盆地;沉积学;成矿作用;盆地动力学;前沿科学问题

第一作者简介 刘池阳,笔名刘池洋,男,1953年出生,教授,沉积盆地动力学与能源地质学,E-mail: ley@nwu.edu.cn

中图分类号 P618.1 **文献标识码** A

0 引言

油、气、煤和铀为当今世界上最重要的四种不可再生能源矿产。

油、气、煤赋存在沉积盆地中,业已被百余年的勘探和生产实践所证明^[1]。近30多年来,随着盆地中沉积型铀矿勘探的蓬勃进行和砂岩型铀矿的成功地浸开采,国内外已发现砂岩型铀矿的数量和产、储量与年俱增,均已跃居各类铀矿床之首。2013年砂岩型铀矿的产量约占全球铀总产量的56%。表明油、气、煤、铀主要赋存在沉积盆地之中^[2-3],将其统称作能源盆地。

全球已发现的砂岩型铀矿床数量的89%、已探明总铀资源量的93.4%以上与已探明的油气田或煤田同盆共存^[3]。可见,在世界范围内,油气煤铀同盆共存普遍、大型—超大型砂岩型铀矿床主要分布在含油气盆地和聚煤盆地之中。所以,大型含油气、煤盆地将是未来发现新的砂岩型铀矿的主要场所。

油气煤铀藏(矿)的空间分布复杂有序,其含矿层位和分布地区联系密切,总体具有同存俱富、少缺趋贫的特征。这表明,沉积盆地中油气煤铀共存和分

布有着关联的赋存环境、密切的成因联系和统一的动力背景^[2]。能源盆地的沉积作用和建造,是影响油气煤铀同盆共存特征、赋存条件、成藏(矿)作用和分布规律的重要因素和物质基础。包括油气煤铀在内的沉积矿产及其形成,是沉积学的重要组成部分。

1 能源盆地沉积建造与矿产赋存

能源盆地沉积学,与其他盆地或环境的沉积学在基本原理和主控因素诸方面没有质的不同,可相互补充、借鉴,共同发展;若其有特点或个性,主要体现在与能源矿产的赋存、聚集等相关方面。故在此着重讨论和总结能源矿产的储矿层和成矿物质(源岩)的沉积特点等。

对能源盆地沉积作用、沉积环境变迁和演化过程阶段性的分析总结表明,成煤沉积建造在时间演化和空间分布上,总体而言处于成油气建造和成铀建造的过渡、衔接部位和承前启后的演化阶段^[2]。

1.1 成油气及聚煤沉积建造

油和煤不共生的说法由来已久,虽不够全面(已有部分特定的煤可生油),但因二者的初始沉积环境有别,也不无道理。成煤物质和初始沉积环境与油型

收稿日期: 2017-07-06; 收修改稿日期: 2017-08-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330315);西北大学大陆动力学国家重点实验室专项课题[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41330315; the State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University]

烃源岩的沉积环境有较多的联系。因而油型烃源岩和煤层的层位分布在平面和剖面均相距较近,或渐变过渡。在沉积盆地演化过程中,盆地发育的鼎盛阶段深湖—较深湖发育,在此阶段或其他阶段的较深湖区所在部位,常发育油型烃源岩;在水体变浅的时期或湖盆边部地带,可形成含煤建造。所以,在能源矿产赋存的层位上,油型烃源岩常位于煤层之下,或二者呈间互层,或同层异地(盆地中部与边缘)。

油型烃源岩或富烃凹陷的分布位置,直接影响和控制陆相盆地油气藏的分布,如在鄂尔多斯盆地中晚三叠世延长期为盆地发育的鼎盛时期,湖区面积广、水体深,在深湖—较深湖区发育了长7段优质油型烃源岩,富烃凹陷主要分布在延安之西南的盆地南部,沿姬塬—华池—庆阳—铜川一带呈北西向展布。现今所发现的油田均位于盆地南部富烃凹陷内部和附近。到延长期末长1段沉积时,受秦岭造山带隆升的影响,沉积中心向北迁移,水体变浅,沉积了一套含煤地层(瓦窑堡煤系)。该套煤系与下伏地层为连续沉积、整合接触,主体属湖泊三角洲相沉积体系。沉积时地壳升降频繁,导致湖水进退频发,所形成煤层薄、层数多;富煤中心位于长7段油型烃源岩之上,主要分布在富烃凹陷东北及其外子长—蟠龙一带。瓦窑堡煤系是在鄂尔多斯盆地延长期大型湖泊萎缩、沉积中心向北迁移的背景下形成的。故其形成、分布和物质组成与油型烃源岩有较多的关联^[2]。

主要煤资源的沉积,常相对独立于油型烃源岩的沉积环境,煤系分布范围广,如石炭—二叠系和侏罗系煤系沉积。故其时空分布与油型烃源岩没有直接关联。煤本身为重要的烃源岩,特别是主要气源岩。这类分布广的煤型烃源岩,除煤层气外,对离开母岩之后煤成气的运聚、成藏和分布,更多受储层等其他成藏条件和煤系沉积之后盆地演化—改造环境的影响。

以上特征,可以在多重叠合盆地的不同期次盆地分别出现、上下叠置;形成多个相对独立的(如鄂尔多斯盆地),或上下关联的(如四川盆地)油气煤成藏(矿)系统。

对优质烃源岩的确定,已有较系统的石油地球化学判别标准。对其形成条件和环境,也进行了多方面的探索并取得重要进展,但已有认识可用来说明“富”,而难以解释相似条件下的“贫”,因而更难以预测未知盆地的“富”或“贫”。优质烃源岩所在的富烃凹陷,常形成于较活动的构造—热环境,并伴有火山活动或夹有多层凝灰岩,有些富铀(如鄂尔多斯盆地

延长组)。这些均显示出无机作用、深部背景对优质烃源岩发育的影响或缺,但对其研究较弱,作用细节目目前知之尚少。

1.2 聚煤与铀成矿沉积建造

形成砂岩型铀矿的良好容矿层为渗透性和连通性较好、展布稳定的中—粗砂岩及砾岩,以温暖潮湿环境下沉积的富含有机质等还原剂的灰色或暗色碎屑建造为佳。此类沉积建造一般形成于盆地演化中晚期,大多位于煤层之上,或呈边部内煤分布,具有临近煤系赋存的特征。如临近湖盆边部形成的辫状河三角洲沉积建造。目前受地浸开采技术所限,砂岩型铀矿的容矿层埋藏较浅,大部浅于500 m。

近煤型铀矿在中东亚能源矿产成矿域广泛存在于中生代煤系之上^[2,4],其中在侏罗系(中国西北和鄂尔多斯盆地)和白垩系(二连盆地、松辽盆地及蒙古国中东部诸盆地)存在普遍、特征典型。中国南方滇西的砂岩型铀矿亦属此类,矿床赋存于多个小型新生代聚煤盆地之中。在美国西部和东欧等地的中生代聚煤盆地中亦分布有近煤型铀矿。在中新生界,特别是中生代地层中普遍存在的上铀下煤空间分布特征,已被勘探实践和发现所证明。重新审视和综合利用前期、早期煤炭勘查资料,评价煤层之上地层的放射性异常和含铀性,已成为铀矿勘查部署的常用程序和经济有效的简捷方法。

这种近煤型铀矿的形成和煤、铀矿层的空间分布关系,为盆地不同演化阶段沉积环境变迁的时序和岩石组合等关系的结果。在我国北方,现今所存留的中下侏罗统煤层可出现在不同构造单元和不同类型地貌区,地层时代、沉积特征和煤层分布在较大区域具可对比性。剔除后期改造的影响,恢复沉积时的原始沉积面貌揭示,早中侏罗世沉积时地表起伏小,广阔地区已准平原化,沼湖遍布,气候温暖,含煤建造分布范围广阔。此广阔的成煤建造和聚煤盆地,经后期强烈而又不均匀的改造后,被肢解分割成多个大小不等、特征各异的改造盆地或残留沉积体,现今散布在不同地貌景观的广阔地区。煤为固体矿产,在这些遭改造分隔的残留盆地或沉积地层中,大部仍有经济可采煤层存在。吐哈盆地所发现的油气藏与侏罗系煤层和煤系地层转化的煤成烃有关^[5-6]。

在中侏罗世晚期,气候趋变干旱,沼湖水系较大范围退缩,沉积地层以砂泥岩为主,煤层在数量、厚度和空间分布上均骤减,且在大部地区不发育。前期广阔区域变化较小的构造—沉积—地貌环境于中侏罗

世晚期开始分化,但所沉积的砂层仍展布较广,粒度相对较均匀,为之后砂岩型铀矿的形成提供了理性的储集条件和砂泥岩沉积组合。因而在煤层和含煤岩系之上,较普遍形成砂岩型铀矿。除此相关的沉积条件外,中侏罗世沉积后,该区总体以抬升为主,中侏罗统砂岩埋深相对较浅、成岩后生作用程度低、孔隙较为发育,也是其成为中国北方砂岩型铀矿重要容矿层的原因。在我国北方石炭—二叠系煤层尚无或之上并不发育近煤型铀矿,与其沉积较早、埋藏后成岩后生作用程度较高、孔隙欠发育等不利成矿条件相关。

1.3 厚煤层的初始成煤物质来源与成因

煤是由古代植物遗骸经过复杂的各类地球化学作用转变而成;泥炭沼泽是成煤的原始物质;并非所有植物遗骸都能以原地生成方式堆积并转变为泥炭^[7-9]。关于原始成煤物质(泥炭)的堆积方式,分为原地和异地堆积(生长)两大类。原地堆积及其衍生增补模式,一般处于主导地位。故认为“具有工业可采意义的煤层大都是原地成因的”^[10]。

对厚煤层的成因颇有争议、认识不一,值得探讨。原地堆积模式有多旋回叠加、长期均衡补偿^[11]、亚原地生长等认识。在这些厚煤层中发现有多种冲刷、流动、再搬运等现象,认为存在异地搬运堆积^[10-13]。

事实上,沉积学特征是判断(厚)煤层属原地生长或异地搬运堆积的直接证据和基本原理。剖析准格尔煤田黑岱沟煤矿太原组6号厚—巨厚煤层露天剖面^[2]可见,1)可分辨的各微小单煤层近等厚展布;2)各层之间呈近平行产状的层状结构特征;3)缺乏植物茎干等化石及其印模。成岩煤层的这种沉积特点和结构,在其他煤矿不同厚度煤层中普遍存在。这是成煤物质由源到汇经过较远距离搬运、分选后再沉积的表现,不可能为原地生成或近源微异地搬运沉积,其原始成煤物质无疑应属异地生成类。

在成煤物质埋藏之后的压实—成岩—成煤过程中,泥炭成煤后的厚度缩减巨大。White^[14]对美国怀俄明州8个露天煤矿的研究,得出由泥炭向煤层转化过程中的厚度缩减比从1.7:1到31:1,平均为7.1:1。据Ryer^[15]统计,不同研究者采用不同方法或依据,得出从泥炭到煤层转化的厚度缩减比从1.4:1到30:1,平均为7:1,与White^[14]的研究结果类似。Ryer^[15]对美国犹他州中部白垩系烟煤的研究,提出此缩减比为11:1。显然,从泥炭到煤层的厚度缩减比受控因素颇多,不可能为一个常数;即使同一套泥炭演化到不同成煤阶段,随煤阶增高,初始泥炭厚度

的缩减比也会明显增大^[16,9]。综合已有资料^[9,14-16]认为,泥炭演化到不同成煤阶段,其厚度缩减比可达5:1(褐煤)~10:1或更大,即成煤后煤层的厚度不到原始成煤物质(泥炭)厚度的1/5~1/10或更少。成煤成岩过程中煤的原始物质厚度缩减量如此巨大,但缩减后仍呈近等厚层状结构。说明沉积时成煤物质在平面上不仅厚度均一,而且物质组成和结构也较均匀。这也只能是经较长距离搬运分选的结果,原地自然堆积和近距离搬运是不可能产生这种结果的。

鄂尔多斯盆地东北部准格尔煤田黑岱沟煤矿太原组6号煤层平均厚达30 m^[1],若按由泥炭演变到褐煤,原始厚度缩减了4/5;由褐煤再转变到烟煤厚度又缩减一半的缩减比^[16]估算,太原组6号煤层原始成煤物质的厚度约达300 m。泥炭的堆积速率与气候条件(如温度、干湿)及地域生态环境有关,文献所记录的每年堆积速率在0.1~2.3 mm之间,大多小于1 mm^[9]。若取泥炭的堆积速率为1 mm/a,300 m的泥炭需要连续不间断堆积 30×10^4 年。在如此长的时间尺度里,某一具体聚煤地域的气候条件、生态环境和地貌、地质特征不可能不发生变化,变化甚小的有利成煤环境是否可持续存在,尚需质疑。

在厚煤层中,30 m是较小的厚度,厚达上百米,或几百米的煤层并非罕见。如在我国内蒙古东部胜利煤田中部下白垩统2号矿的6号煤层,煤层厚度可以达到244.7 m^[17];加拿大哈溪煤田始新统1、2号露天区煤层分别可厚达473 m、510 m^[18]。若按上述方法估算,这些煤层的泥炭堆积厚度要达数千米,其堆积时间需要数百万年,令人生疑。随上覆地层加厚,埋深增大的泥炭会因压实而厚度缩减,但对沉积时间的估算没有影响。

笔者认为,较厚—巨厚煤层原始成煤物质的堆积,一般都经历了较远距离的搬运,较广阔范围内丰茂的成煤物质被搬运汇聚到聚煤盆地,为厚煤层的形成提供了物质基础。只有在适于草本植物茂盛勃发的生态环境(特定地质时期)于较广阔的范围内才可能形成如此巨量的原始成煤物质;才可能使在单位时间堆积的成煤物质数量剧增,从而大大减少单位体积物质堆积所需的时间。仅凭原地生长和近源搬运的成煤物质,数量有限,一般很难形成巨厚煤层。在成煤物质被搬运过程中,促使初经分解的植物遗体进一步遭化学、生物和物理分解,使植物,特别是木本植物的形体和结构遭解体和碎化。植物遗体被搬离原地,也有利于原地后继草本、木本植物的持续再生和

繁茂,进而源源不断地提供更多成煤物质^[2]。

此分析认识与前述厚煤层的沉积特点和层状结构特征相符,可彼此印证。较厚煤层在煤炭资源的份额和煤炭高效开采部分处于重要的地位。由于原始成煤物质所在源区一般位于盆地边部或边缘,侵蚀搬运到他处的成煤物质远多于在原地沉积留存的部分,在盆地演化末期和后期改造阶段这些地区多遭剥蚀削边,同时代地层残留无几,故此厚煤层成因或形成模式(较远距离搬运和较广地域原始成煤物质汇聚),有益于对原始成煤物质形成环境和聚集的全面认识和环境恢复,有助于探讨和深化对成煤与成铀和成油气环境及其时空分布的认识^[2]。

1.4 蚀源区物源与盆地沉积及成矿

蚀源区的岩性和物质组成,对能源矿产的形成有重要影响。砂岩型铀矿为外源外生(表生、后生)型矿床,成矿的铀元素主要来自盆外蚀源区。盆地蚀源区的岩石若富铀,则相邻盆地就有可能形成砂岩型铀矿。中东地区能源矿产成矿域东起中国东北松辽盆地,西止里海,东西延展逾 6 000 km,已探明的砂岩型铀矿资源超过全球总量的一半。该成矿域诸盆地外生铀矿床规模形成和集中分布的重要因素是,在盆地北邻较广阔蚀源区晚古生代中酸性富铀岩体发育,为邻近盆地古生代晚期以来地层中沉积型(含砂岩型)铀矿床和铀异常的形成预备了丰富的矿源^[2,4,19]。若条件具备,对砂岩型铀矿而言,来自蚀源区铀源的成矿作用可发生在沉积、成岩和成岩后生作用的全过程,其中以在盆地演化晚期或之后的成矿作用最为重要。在沉积过程中一般不产生铀矿物,只能形成含分散—吸附状铀的贫矿层或初步富集的矿源层。在成岩过程中,分散于矿源层中的铀发生初步富集,有时能发生铀的成矿,形成沥青铀矿、铀石、含铀胶磷矿和含铀有机质等,但一般都呈贫矿化。多数情况下,单靠沉积物类型和其自身的固铀机制对铀的浓集成矿是不够的^[20]。

盆地的沉积环境及地层富铀,对烃源岩的形成和成烃转化有重要的积极影响^[21-22]。对油气储层评价而言,因蚀源区的岩石类型不同,在相邻沉积区就易于形成富石英类砂岩或富长石类砂岩。石英砂岩为良好的油气储层,其孔渗条件优于长石砂岩。这在鄂尔多斯盆地苏里格气田二叠系产气层表现尤为明显^[23]。

盆地沉降、接受沉积与相邻山体隆升、遭受剥蚀同步发展、密切相关;盆山关系是当今地球动力学研究的热点和前沿问题之一^[24-29]。对盆山关系的研究

涉及领域广泛,可将其归纳为成因耦合、时空相关、物质交换和相互作用方式(即盆山相互作用孰主动)四个方面^[29]。与沉积学相关的盆山物质交换,可分为表浅部和深部两大领域:表浅部主要表现为山体遭受剥蚀,盆地接受沉积。山体剥蚀作用的类型、速率和被剥蚀岩石的性质,与盆地沉积物的粒度、速率和碎屑物质组成有明显的响应关系。盆山深部物质的交换形式和过程十分复杂,更多体现在能量交换和动力过程。将蚀源区分析与盆地沉积学的有机结合,对盆山的消长演变、时空响应及其耦合关系进行统一、整体研究,从而使盆山研究彼此补充、相互印证,是探讨盆山关系及其演化的主要途径和有效方法^[29-35]。

蚀源剥露区的物质组成、盆山间接触关系(断陷或拗陷)和地貌及水系等特征,直接决定盆地沉积体系展布、沉积速率和建造类型。反过来,通过盆地内沉积特征亦可反演和恢复蚀源区的古面貌。由于物源区不断遭受剥蚀和构造活动等地质作用的改造,盆地主要沉积期剥露区的特征常会与时俱变、位置因时而异,甚或古面貌现今已不复存在。故通过对盆地内沉积体系、岩石类型、结构构造、充填特征和沉积环境等时空变化的研究,结合相关测试分析,可探索和反演剥露区不同时期的可能位置和地貌、水系环境,判定其岩石类型、构造背景和相关年龄。

近年来物源分析方兴未艾,已发展成为多学科、多方法技术的综合研究领域。但仍存在一些值得注意的问题,如:1)对物源区构造背景和区域隆升过程的研究欠深入;2)重地球化学和同位素测年等测试分析,轻野外考察和常规岩矿学研究;3)对再旋回物源,特别是沉积岩母岩的多旋回沉积甄别不够;4)对地史上因剥蚀、隆降等地质作用改造而使剥露区的物质组成和位置等发生变化鲜有研究,将今露头区简单地看作古剥露区较为常见;5)随着现代测试分析手段的日益精确,对物源分析更加注重单新方法的精细,而有轻多方法综合分析的趋势。采用多种方法综合对比、相互印证,判断物源区的变迁和构造变动信息^[36];筛分混合物源和多旋回物源的影响,精确确定物源岩性、方向和构造环境,将是沉积物源及其演化—改造研究的趋势^[37-44]。

2 沉积学研究尚需重视的方面

2.1 露头区精细剖析与先进技术观测、测试相结合

野外露头观测和精细解剖是沉积学研究最为传统和常用的手段。良好的露头可以提供丰富、连续、

高精度的2D/3D断面信息,具有广泛的应用价值,可以发挥地震、钻井及岩芯和地球化学测试分析等资料不可替代的作用。通过露头精细解剖,可实现地层岩性识别、沉积水动力条件判别、沉积环境恢复、储集层砂体刻画等目的,为沉积盆地分析、沉积过程重建、储层地质建模等提供直接依据。国内外沉积学领域和油气、煤炭等能源矿产勘探界历来都非常重视对沉积露头剖面的精细观测和解剖。国际沉积学主流刊物 *Sedimentology, Sedimentary Geology* 等,每期都会有相当数量的基于沉积露头精细解剖的研究论文刊出。*AAPG Bulletin* 2017年第4期为纪念美国石油地质学会成立100年,刊出了以“*The Outcrops that Change the Way We Practice Petroleum Geology*”为主题的专辑,足见美国石油地质界对于露头研究的重视。相对而言,国内沉积学界对沉积露头剖面的重视和研究程度尚显薄弱或减弱,随着样品测试分析先进设备仪器的较广泛应用,对野外实际考察和露头剖面实测已显渐行渐远的冷落趋势。这应引起、也已引起学术界和产业部门的关注。

针对沉积露头的研究,国际上普遍采用 Miall^[45-46] 提出并倡导的构型单元(或要素)与界面等级的概念与研究方法。该方法最初针对河流沉积体系提出,现已广泛应用于三角洲、深水沉积等其他环境分析和储层表征研究中,其主要优点是突出了沉积作用的产物与过程的因果关系。以往露头信息的获取主要通过剖面实测、照片拼接等手段,这些传统操作方法受剖面出露情况、可接近程度等的限制,因而也具有明显的局限性,其精度也难以满足储层非均质性精细表征和地质建模的需要。

计算机技术和现代观测技术的发展,为沉积露头研究由定性向定量发展创造了条件。数字露头模型便是一系列先进观测技术的集成,这些技术包括:地面扫描激光雷达(Terrestrial scanning lidar (light detection and ranging)、遥感图像、高精度灰度照片、探地雷达(GPR)、无人机(UAV)等^[47-50]。将这些先进观测手段与传统露头调查数据相结合,可实现沉积露头剖面的三维定量化,建立基于多种地质特征综合解释与测量的数字露头模型,将沉积露头研究带入新的发展阶段。另外,通过大量的现代沉积调查与古代沉积露头研究和相关测试分析等结合,可建立定量或半定量的地质知识库,为不同类型盆地、不同沉积体系的地下储集砂体规模、烃源岩展布的预测提供了有效途径^[51],进而有效指导能源矿产的勘探和资源评价。

2.2 后期改造与原盆古沉积面貌恢复

中国大陆活动性强,盆地后期改造强烈而普遍。这是中国大陆和沉积盆地的重要特点之一^[52]。

中国沉积盆地在形成演化末期或之后,大多遭受了多期、多种形式、不同强度的后期改造,致使不少盆地或地区鼎盛期的原始沉积面貌大为改观^[52-55]。这对盆地古沉积特征认识和油气等矿产赋存成藏有重要影响。盆地后期改造的主要动力和作用形式多样,据其不同可将改造型盆地分为抬升剥蚀、叠合深埋、热力改造、构造变形、肢解残留、流体改造、反转改造和复合改造8种类型^[56-57]。各类改造作用均不同程度地影响沉积—成岩作用及其特征。

沉积盆地在演化末期和之后,即开始遭受区域抬升和剥蚀等改造。此时期正是多数盆地油气生成、聚散和成藏—定位的关键时刻,为铀矿形成的最重要阶段,又是水资源现今分布格局的调整—定位时期。在此时期盆地的抬升在空间上是不均匀的,致使剥蚀等改造的强度因地而异。这种差异抬升和剥蚀等改造,直接控制或显著影响上述诸流体矿产资源的聚散、成藏(矿)—定位和分布。目前,对含油气盆地演化末期以来的差异抬升和剥蚀等改造的研究还不够深入和全面,但已开始重视,并在四川盆地常规、非常规天然气勘探方面取得了显著成效^[58]。

强烈断褶活动较少参与,主要由区域差异抬升引起的后期剥蚀改造,仍可使大中型拗陷型盆地的古沉积范围大为缩小。如中生代鄂尔多斯盆地的东部及周边,后期遭受了强烈的剥蚀等改造,致使残存的今盆地面积尚不到盆地鼎盛期沉积范围的一半^[59]。其下伏晚古生代和早古生代大华北盆地后期所遭受的剥蚀等改造更为强烈。大型拗陷型盆地各类沉积相带的展布相对较宽阔,且大都具有渐变的特点。根据现存沉积相带和厚度变化,似可大致判断今盆地边界是否为古沉积边界及其可能遭受剥蚀改造的程度,但恢复失去沉积地层地区的原始沉积面貌难度就较大。

后期受大断层两盘强烈升降而发生的改造,常使上升盘沉积地层剥蚀殆尽,下降盘地层存留。将此类断裂误认为同沉积边界断层的实例并不鲜见。如渤海湾盆地的石臼坨凸起和牛驼镇凸起,在古近纪早中期为各拗陷较大湖盆接受沉积的地域;到始新世沙三期末,随石南、牛东正断裂的强烈活动,上升盘沉积地层遭剥蚀殆尽,成为缺失古—始渐新世地层的凸起^[60]。尽管在这两个凸起的斜坡地带,地震剖面显示的较大角度削截特征明显,表明凸起高部位曾遭受

了强烈剥蚀。但要接受此凸起的抬升始于渐新世的新认识,剔去古凸起的既成看法,部分人仍有情感或专业障碍。

在盆地演化和沉积学研究中,以今当古、据今论古的思想和做法并不少见。研究盆地后期改造的形式、过程和强度,剔去后期改造的影响,恢复盆地原始沉积面貌,为深入研究和揭示盆地动态演化和沉积学特征的基础,是客观评价改造盆地油气等资源 and 科学预测有利地区的前提,系深刻揭示油气等矿产成藏机理、过程与分布规律必不可少的重要内容^[52-56]。

3 沉积学内涵的外延与前沿科学问题

沉积作用发生在沉积盆地之中,总体受盆地属性、构造特征和形成演化的控制,又不同程度受地球环境(含气候)和生物演变的影响。沉积建造不仅是盆地特征及其演化,而且是地球环境和生物演变的记录仪和年历谱。所以,应将沉积学置于盆地形成演化和改造的时空过程中,同时兼顾地球环境和生物演变进程,进行整体、动态、综合研究。即使剖析的对象是盆地较小范围的局部或一口井或剖面,也应有盆地整体观、综合多种地质作用和动态演变的思想;切忌无视盆地整体的沉积体系分布,仅据局部就事论事。

3.1 沉积盆地动力学

大中型沉积盆地的形成和演化,是沉降与充填耦合、响应和共同作用的结果,二者缺一不可。盆地沉降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,进而埋藏和成岩,则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,还不同程度受地球之外宇宙天体的影响。其外动力地质作用表现为风化、生物、剥蚀、搬运、沉积、埋藏、压实固结及成岩、胶结、溶蚀等;在外动力地质作用控制下的水体汇聚、沉积充填和埋藏压实过程中,水体和沉积物的重力负荷作用会促进和加强盆地进一步沉降^[57](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^[57]。

沉积盆地的沉积作用和成矿作用主要发生在最活跃、最广阔的地壳表浅层层圈作用带,有岩石圈、水圈、大气圈、生物圈等相互作用,还直接受到来自地球深部和宇宙天体物质和能量交换等影响。因此,发生在地壳浅表环境、赋存于沉积建造中的常温—低温表生成矿作用形式多样、地域广阔、种类繁多、资源丰富^[57,61-62];称其为盆地成藏(矿)系统^[61]。

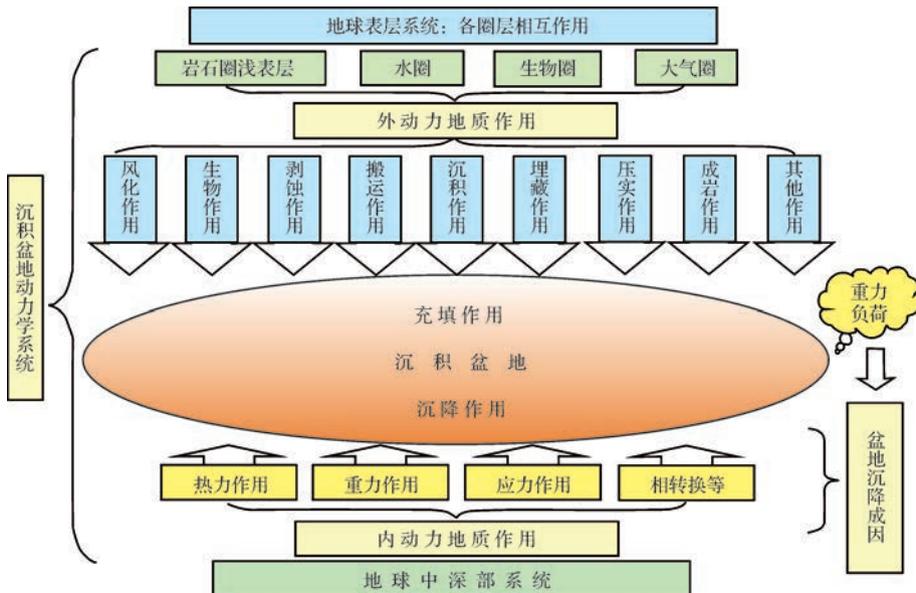


图1 沉积盆地动力学与地球各圈层地质作用关系图(据刘池洋,2008^[57])

Fig.1 Relations of dynamics of sedimentary basin and geological processes in earth circles (Liu, 2008^[57])

3.2 地球环境、生命演变对沉积和成矿作用的影响

盆地的沉积作用和成矿作用,直接受地球表层水圈、大气圈和生物圈演化及其环境演变的影响。在地球环境演化的不同阶段,形成类型不同、特征有别的沉积建造和矿产。

有机矿产油气、煤的形成及富集程度,受地球生物演化和气候环境变迁的影响明显,主要形成和赋存在古生代以来发育的沉积盆地中。如在陆生植物大量繁衍的石炭—二叠纪和侏罗纪,为全球的两大主要聚煤期。全球油气储量的91.5%来自显生宙6个时期(S、D₂₊₃、C₂-P₁、J₂₊₃、K和E₃-N₁)的烃源岩^[63]。其中在生物繁衍鼎盛的白垩纪,油气储量最为丰富。

近年来,国内外对中上元古界的油气勘探和研究均取得了重要进展,已发现规模原生气油储量,并投入开发生产^[63]。这同时需要从中—新元古代生物演化和沉积作用特征诸方面给出应答。

铀元素属亲氧元素。外生铀矿床的形成和类型,与地球表生环境的演变关系密切。国内外铀矿的勘探和发现已经表明,前寒武纪和古生代以来外生铀矿的类型和成矿作用差别颇大。在早中元古代高CO₂和少O₂环境中^[64],盛行物理风化,形成石英卵石砾岩型铀矿床。到中元古代中期—晚元古代,大气和水中游离氧含量增多(多于现代20%),CO₂相对减少,气候从潮湿温暖转变为炎热干旱,形成不整合面型铀矿床。这两类铀矿床资源丰富,占全球已探明低成本铀资源量的5%,但仅形成于元古代,已探明铀资源量的99%以上分布在加拿大和澳大利亚^[3]。对这类超常富集、时空分布局限的铀矿床,只能从其特别的赋存环境去揭示其形成条件和机理。

对中国成矿体系的综合研究和系统总结揭示,在元古代仅发育胶体化学沉积型(Fe、Mn)、生物化学沉积型和热水沉积型,到古生代及中生代还发育有机沉积成岩型(油气、煤、油页岩等)、蒸发沉积型、黑色页岩型、风化型、机械沉积型、砂岩型(铀、铜等)等^[65]。可见,随地球演化历史的变新和时间发展,沉积矿床的成因类型遂逐渐增多,趋于多样化。

由上述可见,不仅应将沉积学和盆地成藏(矿)系统置于盆地形成演化和改造的时空过程中,进行整体、动态、综合研究;而且亦需置于地球气候、环境和生物演变的时空进程中,进行剖析、对比和总结。

3.3 其他前沿科学问题

能源盆地沉积学内涵的自然外延领域广阔,与之相关的前沿科学问题颇多。限于篇幅,摘要简述以下

部分问题:

(1) 有机与无机相互作用对能源矿产形成的影响

前已述及,油气煤铀同盆共存总体具有同存俱富、少缺趋贫的特征。形成此特征的主控因素可能较多,有机与无机能源矿产的相互作用和彼此影响无疑是主要因素之一^[2,66-67]。但对其细节尚不清楚。

优质烃源岩常夹有多层凝灰岩,且多有较高铀异常(如鄂尔多斯盆地延长组七段),不少形成于咸化环境。铀元素和火山灰以及咸化物质的加入如何影响优质烃源岩的形成和向烃类转化^[2],是无机元素本身的作用,还是提供这些物质的地质环境的影响,尚待查明和深入探讨。

在强调有机矿产的有机成因时,亦应重视无机作用对有机矿产形成的贡献和难以替代的积极影响。

(2) 事件沉积学、深部作用与成矿作用

沉积作用和沉积矿产形成及其物质来源,同时受深部内动力地质作用和深部物质的影响。如富烃凹陷常形成于构造较活动、地温场较高、深部作用活跃的地质环境中^[68]。

地球演化的重要阶段和演化中发生的重大地质事件,如超大陆的裂解,大规模岩浆活动等,会使地球表层系统发生重大变革,同时也伴有大规模成矿作用^[65,69]。例如,晚元古代—中寒武世,中国和澳洲、印度、越南大量磷矿床的形成,与当时生命大爆发,即海洋中菌、藻类微生物的空前繁茂及小壳化石第一次出现有关^[70-71]。

(3) 能源矿产空间分区性及偏富极形成的沉积学环境

目前国内外矿产勘探和开发的实践已经揭示,包括油气在内的几乎所有矿产资源,在空间分布上贫富相差悬殊,具有明显的分区性、偏极性或偏富极^[61]。笔者称其为自然界矿产资源成生分布中的“二八法则(或现象)”^[72]。

对大型、超大型油田或矿床的赋存条件和成矿机理的探索,长期以来人们乐此不疲,但迄今尚无实质性突破。已有研究所总结的成矿条件、环境和控矿因素等,并不足以揭示其矿产资源如此超常富集;也不能说明同样具备这些条件和因素的矿区,为什么却没有巨量的储量。显然,这其中必定隐藏着目前各类矿产地质理论尚未认识、勘探家还不清楚、但对矿产资源成生却十分重要的主控因素或地质作用有待进一步揭示。沉积作用为其中重要的主控因素之一,应注

重和加强此方面的研究。

(4) 沉积建造和沉积矿产年代学

沉积作用的发生和沉积矿产的形成,是在物质和流体有进有出的开放体系中进行的;成矿物质一般都经历了多期聚散、多源聚集和最终富集成矿的漫长过程。此特点和过程决定了沉积岩和沉积矿藏形成年龄的精确厘定为一大难题^[2]。

对大部分沉积岩和沉积矿藏而言,对其本身的精确定年在理论上是不可能的,流体矿产尤甚。

对固体沉积矿产,如铀矿而言,相对于开放系统中铀成矿的漫长过程,单个铀矿物的形成时间相对要短得多。对单矿物的微区测年,可获得该矿物相对较精确的年龄,可较准确地反映某一成矿期的时限。在对较多铀矿物样品测试获得诸多测年结果统计和综合分析的基础上,有可能确定该矿藏的形成时限^[2]。

对沉积岩、流体沉积矿产和缺乏可用于测年矿物的固体沉积矿产,形成年龄或时限仍是困惑深入研究和区域对比的难题,亟待从理论和技术方法上突破。

参考文献 (References)

- [1] 刘池洋,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[M]//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,2005:1-16. [Liu Chiyang, Tan Chengqian, Sun Wei, et al. The formational mechanism, accumulation and distribution patterns for multi-energy mineral deposits coexisting in the same basin[M]//Liu Chiyang. Advances in the accumulation and formation for multi-energy mineral deposits coexisting in the same basin. Beijing: Science Press, 2005: 1-16.]
- [2] 刘池洋,吴柏林,王飞飞,等. 油气煤铀同盆共存成藏(矿)与分布理论及进展[M]//刘池洋,吴柏林. 油气煤铀同盆共存成藏(矿)机理与富集分布规律;上册. 北京:科学出版社,2017:73-176. [Liu Chiyang, Wu Bolin, Wang Feifei, et al. Metallogenic mechanism, distribution law and related advances of co-existed oil, gas, coal and uranium deposits within the same basin[M]//Liu Chiyang, Wu Bolin. Accumulation (mineralization) mechanism and spatial enrichment law of oil/gas, coal and uranium coexisting in the same basin: Part 1. Beijing: Science Press, 2017: 73-176.]
- [3] 王飞飞,刘池洋,邱欣卫,等. 全球油气煤铀藏(矿)同盆共存特征与分布规律[M]//刘池洋,吴柏林. 油气煤铀同盆共存成藏(矿)机理与富集分布规律(上册). 北京:科学出版社,2016:3-45. [Wang Feifei, Liu Chiyang, Qiu Xinwei, et al. The Characteristics about co-existence and distribution of deposits of oil, gas, coal and uranium in the world[M]//Liu Chiyang, Wu Bolin. Accumulation (mineralization) mechanism and spatial enrichment law of oil/gas, coal and uranium coexisting in the same basin: Part 1. Beijing: Science Press, 2016: 3-45.]
- [4] 刘池洋,邱欣卫,吴柏林,等. 中—东亚能源矿产成矿域基本特征及其形成的动力学环境[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2017,37(增刊1):1-15. [Liu Chiyang, Qiu Xinwei, Wu Bolin, et al. Characteristics and dynamic settings of the Central-East Asia multi-energy minerals metallogenetic domain[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2017, 37(Suppl.1): 1-15.]
- [5] 黄第藩,秦匡宗,王铁冠,等. 煤成油的形成和成烃机理[M]. 北京:石油工业出版社,1995:1-82. [Huang Difan, Qin Kuangzong, Wang Tieguan, et al. The formation and mechanism of coal-derived oil[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 1-82.]
- [6] 代世峰,钟宁宁,刘池洋,等. 煤成油研究现状及存在的问题[M]//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,2005:83-95. [Dai Shifeng, Zhong Ningning, Liu Chiyang, et al. Research status and existing problems of coal-derived oil[M]//Liu Chiyang. Advances in the accumulation and formation for multi-energy mineral deposits coexisting in the same basin. Beijing: Science Press, 2005: 83-95.]
- [7] 杨起,韩德馨. 中国煤田地质学[M]. 北京:煤炭工业出版社,1979. [Yang Qi, Han Dexin. Chinese coal geology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1979.]
- [8] Stach E, Mackowsky M T, Teichmüller M, 等. 斯塔赫煤炭学教程[M]. 杨起,译. 北京:煤炭工业出版社,1990. [Stach E, Mackowsky M T, Teichmüller M, et al. Stach's textbook of coal petrology[M]. Yang Qi, Trans. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1990.]
- [9] 焦养泉. 聚煤盆地沉积学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2015:218-237. [Jiao Yangquan. Sedimentology of coal-bearing basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2015: 218-237.]
- [10] 李增学,魏久传,刘莹. 煤地质学[M]. 北京:地质出版社,2005. [Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Liu Ying. Coal geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.]
- [11] 庄军. 鄂尔多斯盆地南部巨厚煤层形成条件[J]. 煤田地质与勘探,1995,23(1):9-13. [Zhuang Jun. Formation conditions of extra-thick coal seam in southern Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 1995, 23(1): 9-13.]
- [12] 吴冲龙,李绍虎,王根发,等. 陆相断陷盆地超厚煤层异地堆积的新模式[J]. 地球科学,2003,28(3):289-296. [Wu Chonglong, Li Shaohu, Wang Genfa, et al. New evidence and new model about the allochthonous accumulation of extra-thick coalbeds in continental fault basin, China[J]. Earth Science, 2002, 28(3): 289-296.]
- [13] 王华,吴冲龙, Courel L, 等. 法国、中国断陷盆地厚煤层堆积机制分析[J]. 地学前缘,1999,6(增刊1):157-166. [Wang Hua, Wu Chonglong, Courel L, et al. Analysis on accumulation mechanism and sedimentary conditions of thick coalbeds in Sino-French faulted coal basins[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(Suppl. 1): 157-166.]
- [14] White J M. Compaction of Wyodak coal, Powder River Basin, Wyoming, U.S.A.[J]. International Journal of Coal Geology, 1986, 6(2): 139-147.
- [15] Ryer T A, Langer A W. Thickness change involved in the peat-to-

- coal transformation for a bituminous coal of Cretaceous age in central Utah[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1980, 50(3): 987-992.
- [16] Press F, Siever R, Grotzinger J, et al. *Understanding earth*[M]. 4th ed. New York: WH Freeman & Company, 2004.
- [17] Dai J X, Li J, Luo X, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(12): 1617-1635.
- [18] 胡社荣, 蔺丽娜, 黄灿, 等. 超厚煤层分布与成因模式[J]. *中国煤炭地质*, 2011, 23(1): 1-5. [Hu Sherong, Lin Lina, Huang Can, et al. Distribution and genetic model of extra-thick coal seams[J]. *Coal Geology of China*, 2011, 23(1): 1-5.]
- [19] 陈祖伊. 亚洲砂岩型铀矿区域分布规律和中国砂岩型铀矿找矿对策[J]. *铀矿地质*, 2002, 18(3): 129-137. [Chen Zuyi. Regional distribution regularity of sandstone uranium deposits in Asian continent and prospecting strategy for sandstone uranium deposits in China[J]. *Uranium Geology*, 2002, 18(3): 129-137.]
- [20] 余达淦, 吴仁贵, 陈培荣. 铀资源地质学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005. [Yu Dagan, Wu Rengui, Chen Peirong. *Uranium resource geology*[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005.]
- [21] 毛光周, 刘池洋, 张东东, 等. 铀对(II型)低熟烃源岩生烃演化的影响[J]. *地质学报*, 2012, 86(11): 1833-1840. [Mao Guangzhou, Liu Chiyang, Zhang Dongdong, et al. Effects of uranium (Type II) on evolution of hydrocarbon generation of source rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(11): 1833-1840.]
- [22] 毛光周, 刘池洋, 张东东, 等. 铀在III型烃源岩生烃演化中作用的实验研究[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2014, 44(8): 1740-1750. [Mao Guangzhou, Liu Chiyang, Zhang Dongdong, et al. Effects of uranium on hydrocarbon generation of hydrocarbon source rocks with type-III kerogen[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(6): 1168-1179.]
- [23] 杨华, 魏新善. 鄂尔多斯盆地苏里格地区天然气勘探新进展[J]. *天然气工业*, 2007, 27(12): 6-11. [Yang Hua, Wei Xinsan. New progress achieved by natural gas exploration in Sulige area[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(12): 6-11.]
- [24] 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 等. 中国东部中—新生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 477-486. [Liu Hefu, Liang Huishe, Li Xiaoqing, et al. The coupling mechanisms of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 477-486.]
- [25] 王清晨, 李忠. 盆山耦合与沉积盆地成因[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 24-30. [Wang Qingchen, Li Zhong. Basin-orogen coupling and origin of sedimentary basins[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 24-30.]
- [26] 刘少峰, 张国伟. 盆山关系研究的基本思路、内容和方法[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 101-111. [Liu Shaofeng, Zhang Guowei. Fundamental ideas, contents and methods in study of basin and mountain relationships[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 101-111.]
- [27] 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式: 以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例[J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 177-186. [Liu Shugen, Luo Zhili, Zhao Xikui, et al. Coupling relationships of sedimentary basin-orogenic belt systems and their dynamic models in west China—A case study of the Longmenshan orogenic belt-west Sichuan foreland basin system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(2): 177-186.]
- [28] 张国伟, 郭安林, 姚安平. 关于中国大陆地质与大陆构造基础研究的思考[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(10): 1210-1215. [Zhang Guowei, Guo Anlin, Yao Anping. Reflections on the basic research of Chinese continental geology and continental tectonics[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(10): 1210-1215.]
- [29] 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. [Liu Chiyang. The weakness, difficulty and key point in the study of basin tectonic dynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 113-124.]
- [30] Yang X F, He D F, Wang Q C, et al. Provenance and tectonic setting of the Carboniferous sedimentary rocks of the East Junggar Basin, China: evidence from geochemistry and U-Pb zircon geochronology[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 567-584.
- [31] 李忠, 彭守涛. 天山南北麓中—新生代碎屑锆石 U-Pb 年代学记录、物源体系分析与陆内盆山演化[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 739-755. [Li Zhong, Peng Shoutao. U-Pb geochronological records and provenance system analysis of the Mesozoic-Cenozoic sandstone detrital zircons in the northern and southern piedmonts of Tianshan, Northwest China: responses to intracontinental basin-range evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 739-755.]
- [32] 李忠, 高剑, 郭春涛, 等. 塔里木块体北部泥盆—石炭纪陆缘构造演化: 盆地充填序列与物源体系约束[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 35-52. [Li Zhong, Gao Jian, Guo Chuntao, et al. Devonian-Carboniferous tectonic evolution of continental margins in northern Tarim block, Northwest China: constrained by basin-fill sequences and provenance systems[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 35-52.]
- [33] 赵雪松, 高志勇, 冯佳睿, 等. 库车前陆盆地三叠系—新近系重矿物组合特征与盆山构造演化关系[J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 68-77. [Zhao Xuesong, Gao Zhiyong, Feng Jiarui, et al. Triassic-Neogene heavy minerals' assemblages characteristics and basin-orogen tectonic evolution relationship in the Kuqa foreland basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 68-77.]
- [34] 朱民, 陈汉林, 周静, 等. 上扬子西南盐源盆地早三叠世物源体系及构造意义[J]. *地球科学*, 2016, 41(8): 1309-1321. [Zhu Min, Chen Hanlin, Zhou Jing, et al. Provenance of early Triassic in Yanyuan Basin, upper Yangtze and its implication for the tectonic evolution[J]. *Earth Science*, 2016, 41(8): 1309-1321.]
- [35] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 409-415. [Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 409-415.]

- [36] Carter A, Moss S J. Combined detrital-zircon fission-track and U-Pb dating: a new approach to understanding hinterland evolution [J]. *Geology*, 1999, 27(3): 235-238.
- [37] Meinhold G, Reischmann T, Kostopoulos D, et al. Mineral chemical and geochronological constraints on the age and provenance of the eastern Circum-Rhodope Belt low-grade metasedimentary rocks, NE Greece [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 229(4): 207-223.
- [38] Nie J S, Horton B K, Saylor J E, et al. Integrated provenance analysis of a convergent retroarc foreland system: U-Pb ages, heavy minerals, Nd isotopes, and sandstone compositions of the Middle Magdalena Valley basin, northern Andes, Colombia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 110(1/2/3/4): 111-126.
- [39] Shen C B, Donelick R A, O'Sullivan P B, et al. Provenance and hinterland exhumation from LA-ICP-MS zircon U-Pb and fission-track double dating of Cretaceous sediments in the Jiangnan Basin, Yangtze block, central China [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 281: 194-207.
- [40] Witt C, Brichau S, Carter A. New constraints on the origin of the Sierra Madre de Chiapas (South Mexico) from sediment provenance and apatite thermochronometry [J]. *Tectonics*, 2012, 31(6), doi: 10.1029/2012TC003141.
- [41] Zattin M, Andreucci B, Thomson S N, et al. New constraints on the provenance of the ANDRILL AND-2A succession (western Ross Sea, Antarctica) from apatite triple dating [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(10), doi: 10.1029/2012GC004357.
- [42] Lužar-Oberiter B, Mikes T, Dunkl I, et al. Provenance of Cretaceous synorogenic sediments from the NW Dinarides (Croatia) [J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 2012, 105(3): 377-399.
- [43] Xie X Y. Provenance and sediment dispersal of the Triassic Yanchang Formation, southwest Ordos Basin, China, and its implications [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 335: 1-16.
- [44] Wu L L, Mei L F, Liu Y S, et al. Multiple provenance of rift sediments in the composite basin-mountain system: constraints from detrital zircon U-Pb geochronology and heavy minerals of the early Eocene Jiangnan Basin, Central China [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 349: 46-61.
- [45] Miall A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. *Earth-Science Reviews*, 1985, 22(4): 261-308.
- [46] Miall A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3/4): 233-240, 247-262.
- [47] Bellian J A, Kerans C, Jennette D C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning Lidar technology in stratigraphic modeling [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(2): 166-176.
- [48] Hodgetts D. Laser scanning and digital outcrop geology in the petroleum industry: a review [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 46: 335-354.
- [49] Chesley J T, Leier A L, White S, et al. Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: an example from the Morrison Formation, Utah, USA [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 354: 1-8.
- [50] 朱如凯, 白斌, 袁选俊, 等. 利用数字露头模型技术对曲流河三角洲沉积储层特征的研究 [J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 867-877. [Zhu Rukai, Bai Bin, Yuan Xuanjun, et al. A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of meandering channels sandbodies within a delta plain setting using digital outcrop models: upper Triassic Yanchang tight sandstone formation, Yanhe outcrop, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 867-877.]
- [51] Colomera L, Mountney N P, McCaffrey W D. A quantitative approach to fluvial facies models: methods and example results [J]. *Sedimentology*, 2013, 60(6): 1526-1558.
- [52] 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. [Liu Chiyang. Strong late-reformation: one of the important characteristics of sedimentary basins in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 1996, 17(4): 255-261.]
- [53] 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): 1-8. [Liu Chiyang. Later reformation and restoration of paleo-structure [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 1991, 21(Suppl.1): 1-8.]
- [54] 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. [Liu Chiyang, Yang Xingke. Thinking for researches and oil-gas assessment of reformed basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(2): 11-14.]
- [55] 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, 23. [Liu Chiyang, Zhao Zhongyuan, Yang Xingke. Strong activity and active deep action: two important features of Chinese sedimentary basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(1): 1-6, 23.]
- [56] 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. [Liu Chiyang, Sun Haishan. Classification of reformed basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1999, 20(2): 79-82.]
- [57] 刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统 [J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(1): 1-23. [Liu Chiyang. Dynamics of sedimentary basin and basin reservoir (Ore) forming system [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2008, 30(1): 1-23.]
- [58] 韩克猷, 孙玮. 四川盆地海相大气田和气田群成藏条件 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(1): 10-18. [Han Keyou, Sun Wei. Conditions for the formation of large marine gas fields and gas field clusters in Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(1): 10-18.]
- [59] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应 [J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617-638. [Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617-

- 638.]
- [60] Zhao J F, Liu C Y, Huang L, et al. Original sedimentary pattern of an inverted basin; a case study from the Bozhong depression, offshore Bohai Bay basin[J]. *Acta Geologica Sinica; English Edition*, 2016, 90(6): 2163-2181.
- [61] 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. [Liu Chiyang, Zhang Fuxin, Gao Fei. Sedimentary basin reservoir-forming/mineralization system[J]. *Geology in China*, 2007, 34(3): 365-374.]
- [62] 翟裕生,彭润民,邓军,等. 成矿系统分析与新类型矿床预测[J]. *地学前缘*, 2000, 7(1): 123-132. [Zhai Yusheng, Peng Runmin, Deng Jun, et al. Metallogenic system analysis and new-type ore deposits forecast[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(1): 123-132.]
- [63] 孙枢,王铁冠. 中国东部中、新元古界地质学与油气资源[M]. 北京:科学出版社,2016:371-397. [Sun Shu, Wang Tieguan. *Geology and Hydrocarbon resources of the middle-upper Proterozoic in East China*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 371-397.]
- [64] Holland H D. The oxygenation of the atmosphere and oceans[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2006, 361(1470): 903-915.
- [65] 陈毓川,汤中立,薛春纪,等. 中国成矿体系与区域成矿评价:上[M]. 北京:地质出版社,2007:439-449. [Chen Yuchuan, Tang Zhongli, Xue Chunji, et al. *Metallogenic System and Regional Metallogenic Evaluation in China; Volume 1*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 439-449.]
- [66] 刘池洋,邱欣卫. 无机作用对油气的贡献[M]//“10000个科学难题”地球科学编委会. 10000个科学难题;地球科学卷. 北京:科学出版社,2010:281-285. [Liu Chiyang, Qiu Xinwei. Contribution of inorganic process influencing hydrocarbon generation [M]//Editorial Board of Earth Science of 10000 Selected Problems in Sciences. 10000 selected problems in sciences; earth science. Beijing: Science Press, 2010: 281-285.]
- [67] 刘池洋,毛光周,邱欣卫,等. 有机—无机能源矿产相互作用及其共存成藏(矿)[J]. *自然杂志*, 2013, 35(1): 47-55. [Liu Chiyang, Mao Guangzhou, Qiu Xinwei, et al. Organic-inorganic energy minerals interactions and the accumulation and mineralization in the same sedimentary basins[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(1): 47-55.]
- [68] 刘池洋,赵俊峰,马艳萍,等. 富烃凹陷特征及其形成研究现状与问题[J]. *地学前缘*, 2014, 21(1): 75-88. [Liu Chiyang, Zhao Junfeng, Ma Yanping, et al. The advances and problems in the study of the characteristics and formation of hydrocarbon-rich sag [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 75-88.]
- [69] 刘玄,范宏瑞,胡芳芳,等. 沉积岩型层状铜矿床研究进展[J]. *地质论评*, 2015, 61(1): 45-63. [Liu Xuan, Fan Hongrui, Hu Fangfang, et al. Research progresses on sediment-hosted stratiform copper deposit[J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 45-63.]
- [70] 叶连俊. 生物成矿作用的思考、论据与展望[M]//叶连俊. 生物成矿作用研究. 北京:海洋出版社,1993:1-5. [Ye Lianjun. Thinking, evidence, and prospect of bio-mineralization processes [M]//Ye Lianjun. *Bio-mineralization processes*. Beijing: Ocean Publishing Company, 1993: 1-5.]
- [71] 翟裕生. 地史中成矿演化的趋势和阶段性[J]. *地学前缘*, 1997, 4(3/4): 197-203. [Zhai Yusheng. Metallogenic evolution and megastages in earth's history[J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(3/4): 197-203.]
- [72] 刘池洋. 矿产资源成生分布的偏富极;自然界的“二八法则”[J]. *地质学报*, 2013, 87(增刊1): 187. [Liu Chiyang. Polarity effect in formation and distribution of mineral resources-Pareto principle in nature[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(Suppl.1): 187.]

Sedimentology of Energy Basins and the Frontier Scientific Problems

LIU ChiYang^{1,2}, ZHAO HongGe^{1,2}, ZHAO JunFeng^{1,2}, WU BaiLin^{1,2}, HUANG Lei^{1,2},
WANG JianQiang^{1,2}, ZHANG DongDong^{1,2}, ZHANG ShaoHua^{1,2}

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Institute of Petroleum Basin of Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: Energy sedimentary basins refer to the sedimentary basins which can contain energy mineral deposits as oil, gas, coal and/or uranium. Sedimentation and sedimentary formation are the important factors and material basis influencing the occurrence, accumulation and distribution in a certain basin. The sedimentary energy deposits and the formation consist of the key section of sedimentology. It is discussed that the inner relations of the sedimentary formation and the occurrence, accumulation and distribution of the oil, gas, coal and uranium deposits, and proposed that the coal formation is in the transition, cohesion, and the evolutionary stage of past and future during the basin evolution and spatial distribution. It shows that the material source and origin of the initial coal-forming material of the thick coal seam, and indicates that the source area has important influence on sedimentary formation, oil and gas reservoir and uranium mineralization. Two weak points exist in energy basin's sedimentology field. One is the inclination of emphasizing the advanced technology observation test and ignoring detailed analysis of outcrop area. Another is the need to pay attention to and improving the influence degree of later reformation and the restoration level of the paleo sedimentary features of the original basin. Energy basins sedimentology has broadly extensional field and various frontier scientific problems. Therefore, comprehensive, dynamic, integrated research is needed through putting the sedimentology in the space-time evolution of basin formation and reformation together with the evolution of the earth's environment and biological processes. Partial relative frontier scientific problems are focused in this paper, which are dynamics of sedimentary basins, influence of earth's environment and biological processes to sedimentation and mineralization, organic and inorganic effects on the formation of energy minerals, event sedimentology, deep action and mineralization, spatial distribution of energy minerals and sedimentary environment of lack-rich-extreme rich deposit formation, sedimentary formation and geochronology of sedimentary minerals.

Key words: oil, gas, coal, uranium; energy basin; sedimentology; mineralization; dynamics of sedimentary basins; the frontier scientific problems