

文章编号: 1000-0550(2017)05-1004-12

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.012

# 中国能源沉积学研究进展与发展战略思考

朱如凯<sup>1,2,3</sup>, 邹才能<sup>1,2</sup>, 袁选俊<sup>1,2,3</sup>, 吴松涛<sup>1,2,3</sup>, 崔景伟<sup>1,2,3</sup>, 王岚<sup>1</sup>, 林森虎<sup>1</sup>, 苏玲<sup>1,2,3</sup>, 罗忠<sup>1,2,3</sup>

- 1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
- 2. 国家能源致密油气研发中心, 北京 100083
- 3. 中国石油油气储层重点实验室, 北京 100083

**摘要** 沉积学发展与石油、天然气、煤炭、砂岩型铀矿等矿产资源工业化开采紧密相关, 能源沉积学作为沉积学的一个重要应用分支学科, 在资源勘探发现中的地位越来越重要, 已经成为有效发现资源、降低成本的重要途径。近年来, 能源沉积学在技术方法上建立了遥感、雷达、地震、纳米 CT 等六个级别尺度研究方法, 为沉积储层学科发展提供支撑。在理论认识上取得了五方面重要进展: 1) 建立了克拉通台地沉积储层新模式, 为古老含油气系统提供理论指导; 2) 建立海陆相细粒沉积成因模式, 揭示富有机质页岩分布规律, 为烃源岩评价与非常规油气勘探开发提供重要理论依据; 3) 发现非常规致密储集层微纳米级孔喉系统, 指导致密油气和页岩油气储层评价; 4) 研究含煤沉积体系和聚煤作用, 指导煤炭资源评价; 5) 揭示砂岩型铀矿富集机理, 指导铀矿资源评价与开采。展望能源沉积学发展, 源—渠—汇沉积体系、海陆相细粒沉积学、古老小克拉通碳酸盐岩沉积学等将成为能源沉积学的重要内容; 储层非均质性、非常规储层全面表征与深部储层极限将是储层沉积学发展的热点, 砂岩型铀矿、煤系等沉积系统是固体矿产沉积研究的重点领域; 气、液、固不同能源矿藏空间有序沉积与共生规律研究是资源勘探重点方向; 大数据与沉积学方法创新将为能源沉积学发展提供新机遇。

**关键词** 能源沉积学; 细粒沉积成因模式; 聚煤规律; 铀矿资源; 有序沉积与共生

**第一作者简介** 朱如凯, 男, 1968 年出生, 博士, 教授级高级工程师, 沉积储层, E-mail: zrk@petroChina.com.cn

**中图分类号** P618.13 **文献标识码** A

## 0 引言

能源是指自然界中赋存的能够提供热、光、动力和电能等各种形式的能量来源, 可分为一次能源和二次能源<sup>[1]</sup>。从能源利用角度, 人类社会正经历从煤炭时代走向石油时代, 进而迈入天然气时代, 最后过渡到可再生能源时代的发展历程, 这也是从高碳能源向低碳能源, 进而转为无碳能源时代的必经阶段。随着世界经济的持续增长, 能源需求将进一步加大, 与此同时, 能源结构也在相应调整, 短期内化石能源仍为世界主导能源, 占预计能源增加量的约 60%, 天然气将成为增长最快的化石能源(年均增长 1.8%), 在一次能源中的占比逐渐增加, 石油稳定增长(年均 0.9%), 但其占比的下降趋势仍在继续; 煤炭需求的增长可能放缓。在非化石能源中, 可再生能源(包括生物燃料)迅速增长(年均 6.6%), 在一次能源中的占比可能从当前的大约 3% 升至 2035 年的 9% (图

1)<sup>①</sup>。据预测, 22 世纪能源主要为天然气、核能、新能源(图 2)<sup>[2]</sup>。

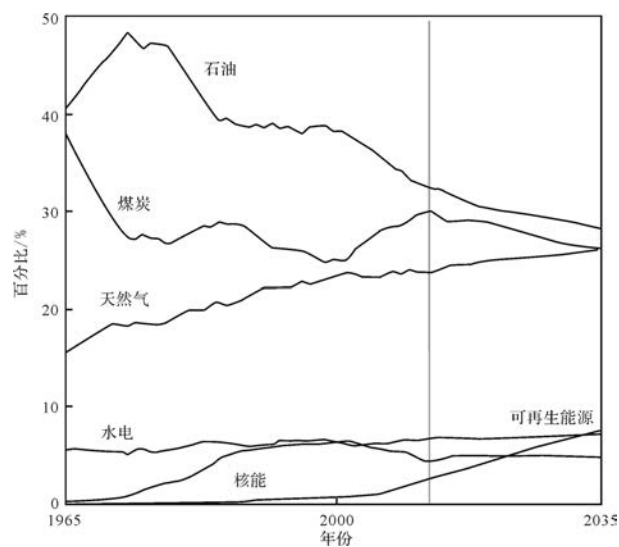


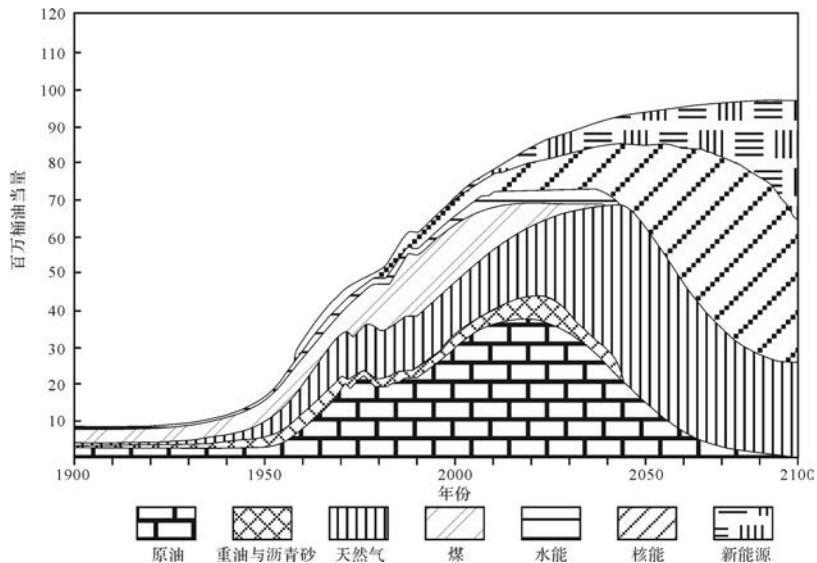
图 1 世界一次能源的占比

Fig.1 The percent of world primary energy

收稿日期: 2016-11-21; 收修改稿日期: 2017-02-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB239000); 国家油气重大专项(2017ZX05001) [Foundation: National Key Basic Research Program of China(973 Program), No.2014CB239000; Major National Science and Technology Project, No.2017ZX05001]

①BP Energy outlook to 2035[R]. 2016: 14

图2 世界能源供给预测(据 Wise *et al.*<sup>[2]</sup>)Fig.2 Estimates of world energy supplies(after Wise *et al.*<sup>[2]</sup>)

沉积学的发展历程与石油、天然气、煤炭、砂岩型铀矿等资源工业化开采紧密相关;能源沉积学是指对各种能源的矿源层(或烃源岩)、含矿岩系(或储层)和含水层等进行沉积作用、成岩作用和古地理研究,进而了解成矿地质背景、成矿条件、成矿过程并预测矿产时空分布规律的一个沉积学分支。本文通过对近年来能源沉积学在理论发展、技术创新和应用方面取得的进展进行总结,分析了存在的不足或待深入研究的问题,并提出了今后重点研究方向。

## 1 能源分布规律新认识与新进展

### 1.1 油气分布规律新认识与新进展

全球常规与非常规油气资源总量大约  $5 \times 10^{12}$  t, 常规与非常规油气资源比例大约为 2:8; 形成中东、俄罗斯、北美、南美四大常规油气分布区, 北美、亚太、南美、俄罗斯四大非常规油气分布区<sup>[1]</sup>。全球板块构造经历了罗迪尼亚、潘加亚 2 个超大陆的形成与裂解, 控制了全球 6 类沉积盆地的形成与演化以及油气资源分布<sup>[3]</sup>。从全球油气资源分布看, 志留系、泥盆系、二叠系、侏罗系、白垩系、古近纪—新近纪油气资源占 90% 以上; 侏罗纪以来碳酸盐岩、碎屑岩 2 类储层中发现了全球 95% 以上油气储量<sup>[3]</sup>。

### 1.2 煤炭资源分布规律新认识

全球煤探明储量主要分布在欧洲及欧亚大陆、亚太地区与北美洲, 约占总探明储量的 94.8%, 中东、非洲与中南美洲的煤探明储量仅占约 5%<sup>[4]</sup>。截止

2013 年底, 全球探明煤储量  $8.92 \times 10^4$  亿吨, 可满足全球 113 年生产, 美国、俄罗斯、中国拥有最大探明储量。截止 2014 年底, 中国探明煤储量  $1.53 \times 10^4$  亿吨<sup>[5]</sup>。

不同聚煤时期主要煤田或煤产地的煤储量在地理上呈带状分布。主要聚煤期有石炭纪、二叠纪、晚三叠世至中侏罗世、晚侏罗世、晚白垩世到始新世、渐新世到现代六个时期, 不同地域范围内有不同的聚煤期<sup>[6]</sup>。

中国聚煤作用从震旦纪到第四纪均有发生<sup>[7]</sup>。晚古生代以来, 经历了海西、印支、燕山和喜马拉雅四期构造运动, 各期构造运动的性质、方向、强度均不同, 导致各成煤期形成的成煤盆地遭受不同程度改造、破坏, 形成不同赋煤构造单元, 各单元煤炭资源的赋存状态和储量规模也有较大差异<sup>[8-9]</sup>。华北地区的晚古生代含煤地层煤层稳定, 多层富集, 资源丰富。晚三叠世时期, 主要在中国南方的四川、云南、江西等地发生成煤作用, 资源较丰富。侏罗纪是中国最重要的成煤时代之一, 在中国中西部地区, 发育有多个大型、超大型的聚煤盆地, 如鄂尔多斯早、中侏罗世特大型陆相聚煤盆地, 煤层分布稳定, 厚度大。早白垩世时期, 在东北三江盆地、海拉尔和二连盆地群发生了主要的聚煤作用。古近纪时期, 主要在中国东北形成了抚顺、梅河口等成煤盆地; 在中国西南部形成了多个新近纪小型断陷盆地, 盆地面积小, 成煤作用不稳定, 局部有巨厚煤层赋存<sup>[8-9]</sup>。

世界各地广泛存在着厚度巨大的巨厚煤层(单层煤厚度超过60 m),石炭纪至新近纪,各时期都有超厚煤层发育,如澳大利亚的吉普斯兰盆地煤层总厚700多米,单层煤厚230 m;中国胜利煤田胜利东二号露天煤矿6煤层厚244.7 m,3个煤层在聚煤中心区近于合并,煤层最厚处达320.65 m。古近—新近纪巨厚煤层发育,其次在侏罗纪也有分布,巨厚煤层主要分布在北半球,煤变质程度普遍较低。超厚煤层成因机制有三方面:泥炭沼泽水面上升速度与植物遗体堆积速度长期处于均衡补偿状态、异地堆积和多煤层叠加<sup>[10]</sup>。

### 1.3 砂岩型铀矿资源分布规律新认识

砂岩型铀矿床是指工业铀矿化主要产于砂岩(包括含砾砂岩、粉砂岩、泥岩)中的铀矿床。据国际原子能机构(1996)对全球528个铀矿床统计,砂岩型铀矿250个,占总数的42.90%,主岩时代(砂岩的形成时代)跨度大,从中元古代一直延续到新生代,其中以中、新生代为主,占82%,前寒武纪和古生代矿床总数占2%和14%<sup>①,11-14]</sup>。

从地质背景看,中亚地区铀成矿受次造山带控制,各大砂岩型铀矿几乎都产在天山造山带和土伦地台夹持的次造山带内。在美国,砂岩型铀矿主要分布于古老的富铀地台内、外边缘中生代活化区,如北美地台西缘科罗拉多高原中生代盆地。从矿床规模看,大型、特大型砂岩型铀矿占比例较高<sup>[11-14]</sup>。

中国已探明砂岩型铀矿床有50余个(截止2015年),约占总矿床数的14.5%,资源量占总探明资源量的43.1%<sup>[13]</sup>。在北方大型沉积盆地中已探明了多个砂岩型铀矿,如新疆伊犁盆地、吐哈盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地西缘,在鄂尔多斯盆地北部东胜地区、二连盆地、巴音戈壁盆地、松辽盆地等也有发现。有卷状、板状矿体形态,以板状为主;有古河道(谷)型、沉积成岩型、层间氧化型、潜水氧化型、复合成因型等成因类型<sup>[11-14]</sup>。

## 2 能源沉积学研究新认识

随着油气勘探向岩性地层油气藏、非常规油气和深层勘探目标发展,煤炭、铀矿等向更深层、更隐蔽方向发展,能源沉积学在资源勘探发现中的地位越来越重要,已经成为有效发现资源、降低成本的重要途径。近年来,随着资源勘探开发的不断推进和突破,能源

沉积学在研究方法、理论认识、服务资源勘探等方面均取得了重要进展。

### 2.1 能源沉积学研究方法的创新与集成

沉积储层研究尺度包括了公里、米、厘米、毫米、微米、纳米六级,特别是一些高精度仪器在地质学上的广泛应用,如高分辨率遥感资料的分析应用、场发射扫描电子显微镜在识别微纳米孔隙方面的应用等(表1),各研究单位已开始建立基于大量现代沉积考察、露头剖面实测、岩芯精细表征等信息的大数据库<sup>[15]</sup>。

#### 2.1.1 遥感技术应用于现代沉积微相划分与演化规律分析

应用遥感技术可持续观察现代湖泊、河流、三角洲沉积演化,精细刻画各期河道走向、改道、分流变化规律,湖盆岸线迁移变化,砂体形态与变化等沉积特征及演化过程。如通过对鄱阳湖赣江三角洲中支前缘朵叶体中河道和砂体的多时相遥感影像解译及定量统计分析,发现三角洲朵叶体面积由1973年到现在扩大了约一倍,分流河道距离向湖中心推进了约3.1 km,是生长发育较为迅速的建设型三角洲朵叶体。空间上,赣江南北向主河道西侧的分支河道以NW向入湖,呈树枝状分布,局部呈现圈带状;主河道东侧的分支河道以NE和NEE向入湖,整体呈圈带状,少量呈现树枝状;时间上,分支河道在入湖口多形成树枝状,后期被改造为圈带状。三角洲生长要素定量分析结果表明,1973—2013年,赣江三角洲中支前缘朵体向湖盆中心方向推进了3 km,面积由6 km<sup>2</sup>增加到25 km<sup>2</sup>;中支右翼河道和朵体在2007—2013年间向湖盆中心推进600多米,为近6年来生长最为迅速的分支。

#### 2.1.2 激光雷达、探地雷达等技术应用于沉积地层与地质体精细刻画

通过应用激光雷达、探地雷达、元素伽马、X射线荧光光谱仪等分析露头及岩石样品的沉积特征,能源沉积学在宏—微观结合、定量化研究方面取得了重大进展;如应用激光雷达、探地雷达技术,可对露头剖面进行自动岩性识别、储集体结构分析,为建立三维储层地质模型提供定量数据;通过X射线荧光光谱仪,可实现精度小于年的短周期沉积过程研究;通过3D X-ray分析,可开展细粒沉积岩厘米—毫米级纹层结构研究<sup>[15-16]</sup>。

①BP Energy outlook to 2035[R]. 2016: 14



表 1 沉积学六个级别尺度研究方法

Table 1 The six-scaled studying method on sedimentology

研究尺度	学科名称	研究内容	关键仪器/方法	实例	实例来源
公里/km	遥感沉积学 层序地层学 地震沉积学	沉积储层区域演化、分布特征	遥感图像解译, 地层对比法, 探地雷达		鄱阳湖赣江三角洲遥感影像
米/m	细粒沉积学 测井沉积学	沉积储集体, 三维空间特征	激光雷达 地球物理预测 测井解释		四川盆地须家河组激光雷达扫描图
厘米/cm	细粒沉积学 旋回地层学	层理构造, 层间非均质性	激光雷达 元素捕获仪 元素伽马仪		典型岩芯照片
毫米/mm	沉积岩石学 储层地质学	沉积作用与过程, 矿物岩石特征, 成岩作用与演化, 孔隙结构	实体显微镜, 放大镜, 工业 CT		典型岩芯纹层构造显微照片
微米/μm			偏光显微镜, 扫描电镜, 微米 CT		典型岩芯显微照片
纳米/nm	非常规储层地质学	致密储层纳米孔隙, 结构及油气赋存状态	场发射扫描电镜, 纳米 CT、FIB-SEM		页岩有机质孔隙场发射扫描电镜照片

2.1.3 场发射扫描电镜及 CT 成像等高分辨率测试技术应用于储层孔喉结构精细表征

针对致密储层以微纳米孔喉系统为主的特点,应用场发射扫描电子显微镜、聚焦离子束扫描电子显微镜及微—纳米 CT 成像等高分辨率测试技术,结合压汞、气体吸附、薄片分析等常规测试分析,可实现致密储层微米—纳米多尺度孔隙、喉道的精细识别与定量表征。在此基础上,建立了新的致密储层分类评价标准和方法,综合表征储层非均质性<sup>[15,17-18]</sup>。

2.2 能源沉积学理论研究新进展

2.2.1 建立克拉通盆地台地沉积储层新模式,为全球古老含油气系统提供理论指导

中国海相沉积主要发育在古生代及前寒武纪,在四川盆地及青藏高原沉积盆地中,中生界也有海相沉积广泛发育,叠合盆地经过多期改造,油气分布规律

复杂,特别是深层碳酸盐岩层系储集层较致密,非均质性强。

克拉通盆地台地边缘发育环带状大型礁滩体,如塔里木盆地塔中奥陶系礁滩体、四川盆地二叠—三叠系开江—梁平礁滩体,储层厚度大,规模分布;相邻的台缘斜坡、陆棚及台内凹陷烃源岩发育,构成良好的生储盖组合,具备油气充注的优越条件,其上稳定分布膏盐岩盖层,形成大型礁滩油气田群。缓坡型台地发育内缓坡、中缓坡、外缓坡、盆地相带,内缓坡发育颗粒滩碳酸盐岩储层,经过后期建设性成岩作用的改造,可形成有利的储集体,缓坡腹部发育蒸发潟湖与蒸发潮坪,发育大量膏盐岩,封盖作用强,储盖组合条件好,如四川盆地寒武系龙王庙组缓坡型台地中内缓坡具“水下三隆两凹”特征,水下隆起控制有利储集体的发育规模<sup>[19]</sup>。

礁滩、白云岩、风化壳型储集层是碳酸盐岩中最重要的储集层,次生孔隙与溶洞发育,同时受构造作用影响,裂缝发育,储渗能力强<sup>[20]</sup>。除沉积相、古气候和古地貌外,控制深层规模有效储集层发育的主要因素有层间及层内溶蚀—溶滤作用、埋藏白云石化作用及热液作用、构造破裂作用等<sup>[21]</sup>。

2.2.2 建立海陆相细粒沉积成因模式,揭示富有机质页岩分布规律,为烃源岩评价与非常规油气勘探开发提供重要理论依据

细粒沉积岩指粒度  $62.5 \mu\text{m}$  的颗粒含量大于 50% 的沉积岩,主要由黏土、粉砂碎屑颗粒、有机质等组成,包含少量盆地内生碳酸盐矿物、生物硅质、磷酸盐等颗粒<sup>[1]</sup>;富有机质页岩一般含丰富有机质与细粒、分散状黄铁矿等,有机质含量通常为 1%~15% 或更高<sup>[1]</sup>。

中国陆上含油气盆地富有机质页岩类型多、时代广、分布范围大,按沉积环境可分为海相页岩、海陆过渡相—湖沼相煤系页岩和湖相页岩三大类。按构造—岩相可进一步细分为:海相克拉通内拗陷、边缘半深水—深水陆棚相、克拉通边缘过渡相—沼泽相煤系、前陆盆地湖沼相煤系、裂谷盆地断(坳)陷湖相、大型陆内拗陷盆地半深—深湖相等 6 种成因类型。

### (1) 细粒沉积岩分类

细粒沉积岩可以形成于海相、海陆过渡相和陆相沉积环境中;细粒沉积岩粒径小,受物源、火山岩、热液等影响,岩石组成变化大,类型复杂,非均质性强,目前尚缺乏系统、科学的岩石学分类标准。本文基于粒度与纹层结构、有机碳 (TOC) 含量、矿物含量,建立了三级划分方案;一级分类基于粒度和纹层结构,分为粉砂岩与泥页岩;二级分类基于有机碳 (TOC) 含量,以有机碳 (TOC) 含量 2% 和 4% 为界,分为高、中、低三个级别;三级分类基于矿物含量,包括石英与长石、方解石与白云石、黏土矿物。基于这一方案,将细粒沉积岩石类型划分为 16 类,常见有富黏土硅质泥岩、富黏土钙质泥岩、富钙硅质泥岩、富硅钙质泥岩、混积泥岩、混积硅质泥岩、混积钙质泥岩及碳酸盐岩 7 类(图 3)。

### (2) 海相富有机质页岩形成机制与发育模式

富有机质页岩形成需具备两个重要条件:一是表层水中浮游生物发育,生产力高;二是具备有利于有机质保存、聚积与转化的条件。富有机质页岩主要形成于缺氧、富  $\text{H}_2\text{S}$  的闭塞海湾、潟湖、湖泊深水区、欠补偿盆地及深水陆棚等沉积环境中。富有机质页岩沉积模式,海相主要有海侵模式、门槛模式、水体分层模式、洋流上涌模式 4 种类型<sup>[1]</sup>。

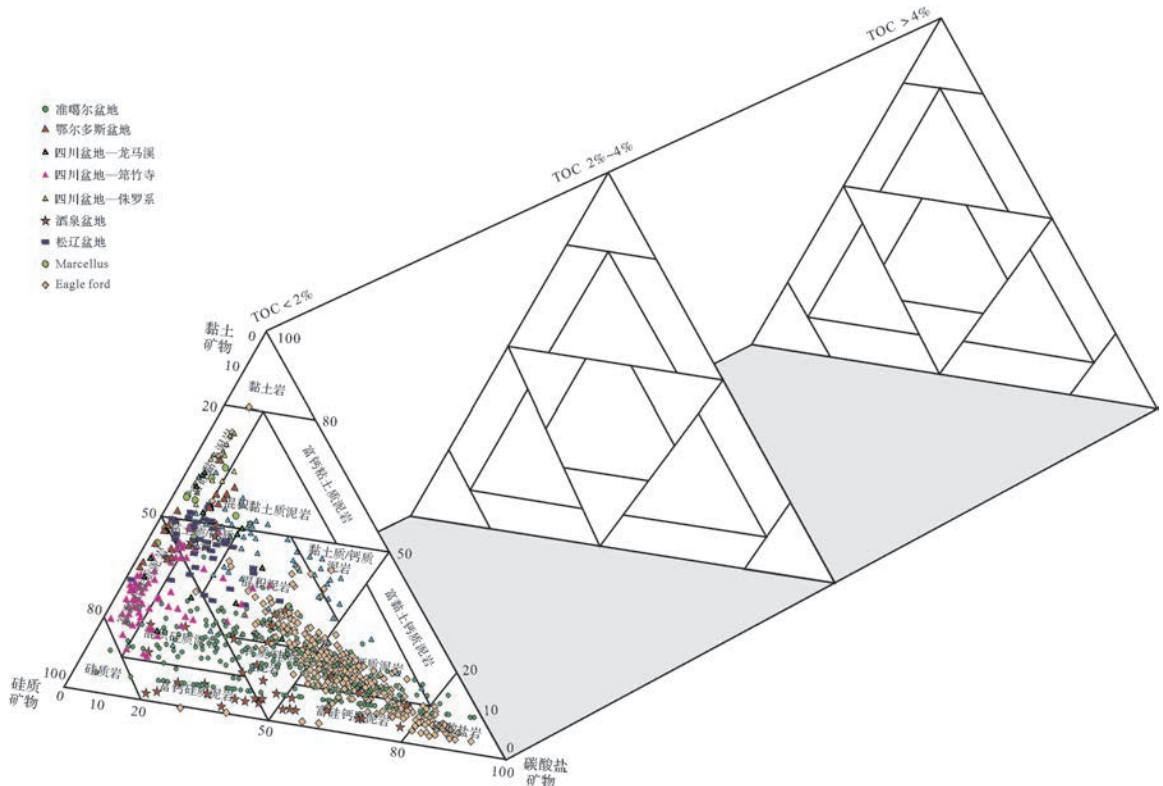


图 3 细粒沉积岩四端元分类图

Fig.3 The 4 end-member classification map of fine-grained sedimentary rocks

中国南方古生界上奥陶统五峰组( $O_3w$ )一下志留统龙马溪组( $S_1l$ )页岩发育,在上扬子区大面积分布。五峰组沉积早期,气候温暖湿润,海平面上升至高位,海底出现大面积缺氧环境,表层水体营养物质丰富,放射虫、藻类、笔石等浮游生物出现高生产力,生物碎屑颗粒、有机质和黏土矿物等复合体以“海洋雪”方式缓慢沉降,沉积硅质页岩、钙质硅质混合页岩和黏土质硅质混合页岩三种优质岩相。五峰组沉积中晚期,海平面快速下降,海水温度降低,海水中 $SiO_2$ 、P等营养物质浓度剧增,以浮游生物为食物的笔石大量灭绝,水中营养物质浓度剧增,表层浮游生物勃发,底层有机质埋藏率高,形成富含有机质和生物硅的硅质页岩、钙质硅质页岩,TOC值为2.7%~8.4%。龙马溪组沉积早期,海平面再次快速上升,川南—川东—川东北坳陷区出现大面积缺氧的深水陆棚环境,放射虫、笔石、藻类等浮游生物出现大繁盛,以硅质页岩和钙质硅质页岩为主,TOC值为2.1%~8.4%,坳陷周缘主体为浅水陆棚—滨岸相,发育贫有机质黏土质页岩、钙质黏土质页岩和泥灰岩。龙马溪组沉积晚期,沉积中心向川中和川北迁移,海平面下降,四川盆地及邻区为浅水—半深水陆棚,海水封闭,深水水域面积大幅度缩小<sup>[1]</sup>。

### (3) 淡水湖盆细粒沉积形成机理与发育模式

陆相湖盆沉积水体局限,水体循环能力弱,湖盆细粒沉积岩主要有黑色页岩与暗色泥岩,有机母源以湖生藻类为主,富有机质页岩以分层和湖侵两种沉积模式为主<sup>[1,22-23]</sup>,淡水湖盆细粒沉积岩以松辽盆地青山口组页岩为例。

松辽盆地属中—新生代大型陆相坳陷盆地。白垩系青山口组发育完整,自下而上划分为青一段、青二段、青三段;湖相泥岩及油页岩最大厚度达550 m,优质烃源岩厚度达200 m,主要分布在青山口组一段和青山口组二段中下部,是盆地内重要的烃源岩。

青山口组泥(页)岩由陆源碎屑、有机质和化学沉淀物组成,石英含量22%~40%,平均30.9%;长石含量4%~22%,平均14.5%;黏土含量11%~56%,平均45.8%;方解石、铁白云石含量0~31%,平均5.4%。青山口组一段有机质类型以I~II<sub>1</sub>型为主,TOC含量0.73%~8.68%,平均2.13%; $R_o$ 为0.4%~2.0%。青山口组三段烃源岩有机质类型为I型,TOC含量0.12%

~6.56%,平均0.9%, $R_o$ 小于0.7%。青山口组二段各项指标介于一段和三段之间,下部生油能力好,上部生油能力较差。

松辽盆地在白垩纪总体上属亚热带气候,青山口组沉积时期,湖水分层显著,深湖区湖底温度季节性变化很小,常年在8℃以下。青山口组沉积时期平均水深在30 m以上,最大水深在70 m以上;上部变温层空间四季分明,为水生生物的发育提供了宽阔的场所,其表层17℃~25℃的较高温度既有利于大多数浮游生物的繁衍,更是水生藻类发育的理想温度;下部恒温层由于水深大,湖底水体安静,水温基本常年不变,上下水体交换不畅,形成缺氧环境,有利于有机质保存。生油母质是由藻类和经过细菌强烈改造的陆生高等植物迭合而成,且具有很高的有机质丰度。

青山口组沉积由早到晚,水体逐渐变浅,底水含氧量逐渐增高,由较强的还原环境演化为弱还原环境,由于沉积环境差异,形成不同的岩石组构和显微构造,纵向上有机质含量非均质性强。如哈14井青山口组(1 952.4~2 081 m)页岩TOC含量0.51%~5.47%,显示出强烈的非均质性;青一段底部2 081~2 063 m发育厚度18 m的富有机质页岩,TOC最高值为5.47%,纹层发育;青二段2 030.5~2 012 m发育厚度18.5 m的富有机质页岩,TOC最高值为3.02%,纹层发育;青三段顶部TOC普遍小于2%,最小值为0.54%,生物扰动构造发育。

松辽盆地青山口组黑色页岩沉积可划分4个相带,深湖相以细粒悬浮沉降为主,岩相为黏土质页岩和少量粉砂质页岩,黄铁矿含量高(5%),TOC平均值大于3%,水平纹层和波状纹层发育。半深湖斜坡相底流活动较强,岩性为粉砂质黏土岩和生屑粉砂质页岩,黄铁矿含量低,TOC平均值2.21%,波状纹层发育;湖湾相水体安静,岩性为粉砂质页岩和黏土质页岩,黄铁矿含量高,TOC平均值3.03%;前三角洲相潮流发育,岩性为粉砂质泥岩、生屑粉砂质泥岩和少量粉砂质页岩,TOC平均1.88%。

### (4) 咸水湖盆细粒沉积形成机理与发育模式

咸化湖通常指水体盐度大于0.5‰的湖泊,其中盐度为0.5‰~35‰的称为半咸水湖,盐度40‰~50‰的称为咸水湖,盐度大于50‰的称为盐湖<sup>①</sup>。中国广泛发育咸化湖相沉积,包括准噶尔盆地二叠系、

①Kaufman R L. Gas chromatography as a development and production tool for fingerprinting oils from individual reservoirs: Applications in the Gulf of Mexico[C]//Gulf Coast Section of the Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists Foundation Ninth Annual Research Conference Proceedings. 1990. 263-282.



渤海湾盆地第三系、柴达木盆地柴沟组、河套盆地临河组、泌阳凹陷的核桃园组、苏北盆地阜四段与阜二段、江汉盆地潜江组等。由于水体、气候、物源的频繁变化,咸化湖盆细粒沉积组分复杂且非均质性强。

准噶尔盆地中二叠世沉积期,海水由东南方向退去,形成了面积大、水域宽的大型内陆咸化湖盆,盐度约12‰。湖盆演化在芦苇沟组沉积期达到鼎盛阶段,形成了以油页岩、白云质页岩和页岩为主的厚层细粒沉积,沉积中心厚度超过1 000 m。芦苇沟组页岩富含有机质,TOC 介于2%~15%,平均为6%。芦苇沟组发育富有机质的白云石泥岩和纹层状富方解石泥岩两类富有机质细粒沉积;富有机质的白云石泥岩主要形成环境为炎热气候,生物多样性丰富,生产力高,水体盐度较高,容易产生分层,使得下部水体缺氧(发育黄铁矿),有机质大量保存;纹层状富方解石

泥岩形成条件为温暖气候,微咸水环境,水体稳定,生物活动很弱,有机质遭受破坏较少。

2.2.3 发现非常规储集层微纳米级孔喉系统,指导致密油气和页岩油气储层评价

非常规储集层以微—纳米级孔喉系统为主,局部发育毫米级孔隙。纳米级孔喉系统主体孔径为20~500 nm,其中页岩气储集层孔径为5~200 nm,页岩油储集层孔径为30~400 nm,致密灰岩油储集层孔径为40~500 nm,致密砂岩油储集层孔径为50~900 nm,致密砂岩气储集层孔径为40~700 nm(图4)。以鄂尔多斯盆地长<sub>6</sub>油层组含油细砂岩为例,高压压汞(压力高达300 MPa)实验分析表明,直径小于1微米的nm级孔喉占储集空间比例达80%以上,微米级孔隙仅占5%~20%<sup>[1,18]</sup>。孔隙类型包括原生粒间孔、晶间孔、粒间溶蚀孔、粒内孔及有机质孔(表2)。

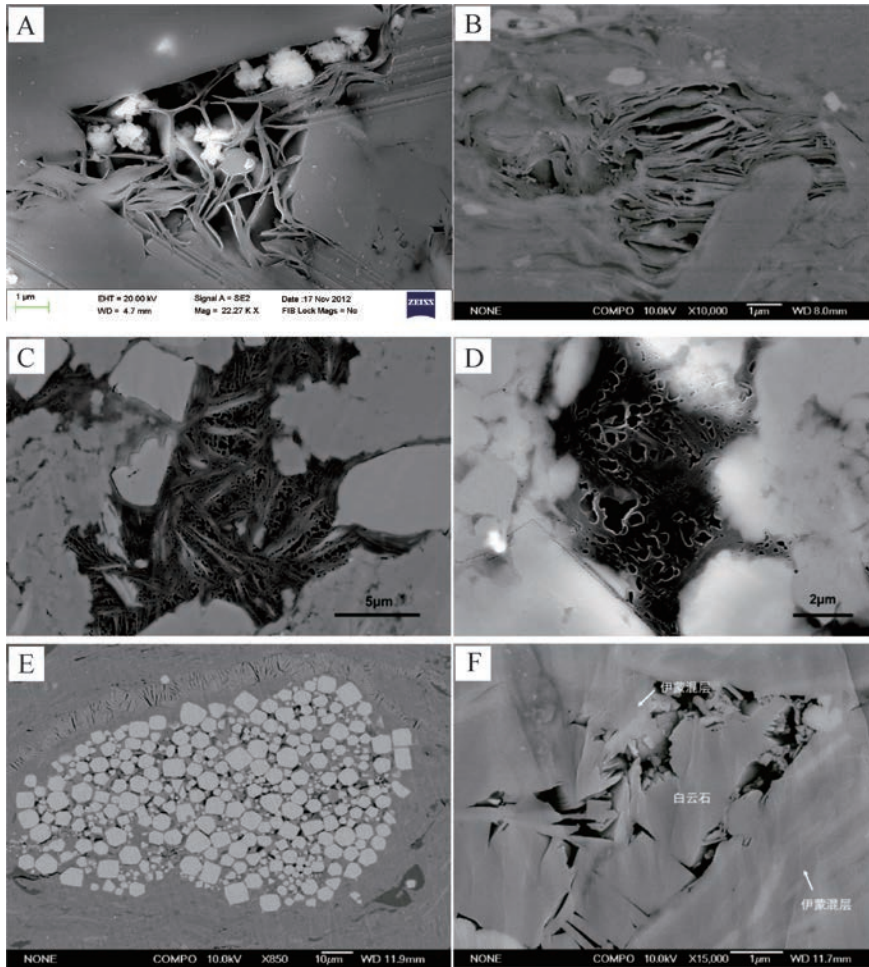


图4 泥页岩储层典型微观照片

A.准噶尔盆地吉174井,3 132.50 m,二叠系芦苇沟组灰色泥岩中绿泥石粒内孔,内部发育黄铁矿晶体,B.鄂尔多斯盆地张2井,960 m,页岩中有有机质孔与伊蒙混层粒内孔,C,D.四川盆地威201井,1 531.5 m,志留系龙马溪组页岩有机质孔,E.四川盆地公4井,2 427 m,下侏罗统大安寨组页岩黄铁矿晶间有机质及石膏晶间纳米级孔隙;F.四川盆地平昌1井,3 225.3 m,下侏罗统大安寨组白云石粒内纳米级孔隙

Fig.4 The typical picture of porosities in mudstone reservoirs

表2 致密储层孔隙系统分级评价表(据文献[18]修改)

Table 2 The grading evaluation criteria of pore system for tight reservoirs(modified from the reference[18])

孔隙级别	毫米孔	微米孔			亚微米孔	纳米孔
		微米大孔	微米中孔	微米小孔		
孔隙直径	>1 mm	1 mm~62.5 μm	62.5 μm~10 μm	10 μm~1 μm	1 μm~100 nm	100 nm~2 nm
孔隙成因	次生为主	原生与次生	原生与次生	原生与次生	次生为主	次生为主
发育位置	粒间为主	粒间、粒内为主	粒内、粒间为主	粒内为主	粒内为主	粒内、晶间、有机质内
连通性	差	差—中等	中等	中等	中等	中等—好
流体流动	紊流	紊流	渗流,符合达西定律		层流	扩散,不符合达西定律
作用力	重力	重力、毛管力	毛管力、重力	毛管力、重力	毛管力	分子力
流体赋存	游离态	游离态	游离态	游离态	游离态	凝聚—吸附
储层类型	碳酸盐岩缝洞储层、 火山岩风化壳储层等	常规砂岩与 碳酸盐岩	常规砂岩与 碳酸盐岩	常规砂岩与 碳酸盐岩	致密砂岩与致密碳酸 盐岩、泥页岩	泥页岩

2.2.4 研究含煤沉积体系和聚煤作用,指导煤炭资源评价和煤层气选区评价

煤的形成是古气候、古植物、古地理和古构造等诸多地质因素共同作用的结果。泥炭沼泽环境主要发育于水域和陆地过渡带。在空间尺度上,在潮坪、三角洲、河流等多种沉积体系中均可发育泥炭沼泽,分带性特征明显。在时间尺度上,泥炭沼泽一般出现在海(湖)平面下降时期,但随时间变化,其发育位置和类型会发生迁移或交替。传统观点认为在陆相海(水)退环境成煤作用有利;但近年来,随着研究程度的不断深入及一些新的成因类型的发现,不少学者提出了新的成煤富集理论,如海侵过程成煤、幕式成煤、海侵事件成煤、风暴异地煤、聚煤型式的多样性、海相层滞后时段成煤等<sup>[24-27]</sup>。

近年来,含煤沉积体系的研究范围不断扩展,如对煤中矿物质、微量元素及与煤伴生的石油、天然气、页岩气的研究,同时一些新的研究方法不断应用<sup>[26]</sup>。如应用同位素地球化学、煤岩学等理论和方法,分析煤层煤岩组分、有机碳同位素组成( $\delta^{13}C$ )及其古气候意义<sup>[28]</sup>。

2.2.5 揭示砂岩型铀矿富集机理,指导铀矿资源评价与开采

在稳定克拉通盆地和介于相对活动褶皱造山带之间的克拉通边缘活动带是砂岩型铀矿形成的主要构造背景环境,从构造活动程度看,有利地质构造背景为主岩沉积时相对稳定的构造背景和成矿时相对活动的构造背景。炎热干旱、半干旱的交替气候有利于后生铀矿床的形成。砂岩型铀矿化的沉积相带有河流相、滨浅湖三角洲相和滨浅海三角洲相,重要矿化环境多数为河流相。砂体规模、砂体渗透性、砂体间连通性、砂体成层性是以后生成矿作用为主体的砂

岩型铀矿形成的重要条件<sup>[11-14,29]</sup>。在铀矿成矿理论创新方面,查明了中国北方重点盆地砂岩铀矿床的地质—地球化学特征、控矿因素和成矿机理,创新建立了产铀盆地“叠合成矿模式”、“层间渗入—越流成矿模式”、“油气还原铀成矿模式”、“三位一体控矿模式”、“砂岩型铀矿断隆(块)成矿模式”等<sup>[13-14]</sup>。

3 能源沉积学战略新展望

中国陆相沉积层序和经过多期改造的叠合盆地深层海相沉积层序中蕴藏着丰富的油气、煤、铀等资源,需要不断应用新技术,创新地质认识,应用于地下资源的勘探开发。

3.1 源—渠—汇沉积体系、海陆相细粒沉积学、古老小克拉通碳酸盐岩沉积学等将成为能源沉积学的重要内核

海陆相细粒沉积、古老小克拉通碳酸盐台地、陆架边缘海沉积是中国特色的沉积类型,也是优质烃源岩发育、规模储层形成的重要沉积环境。应开展构造背景约束的沉积体系研究,如前陆盆地陡坡带、缓坡带沉积动力条件与沉积相带分布的差异性,大型坳陷盆地基底断裂对沉积相带的控制作用;研究古气候、古物源对沉积作用的影响,研究源—渠—汇沉积体系分布,预测有利相带和储集体分布规律。应建立行之有效的细粒沉积岩研究方法体系,研究海(湖)盆水动力条件和底形对细粒沉积发育和分布的控制作用,重建古环境,揭示有机质富集机理,建立不同成因类型富有机质细粒沉积岩成因模式,预测烃源岩与有利储集相带空间展布。应综合分析古裂陷槽对古老小克拉通碳酸盐台地发育的控制作用,明确礁滩体分布规律和有利微相带;研究微生物碳酸盐岩的矿物组成、生物类型、岩石结构与沉积构造,分析不同相序组



合特征,建立沉积模式,指出储层有利相带<sup>[30]</sup>。

### 3.2 储层非均质性、非常规储层全面表征与深部储层极限将是储层沉积学发展的热点

常规与非常规储层评价重点是常规储层精细化研究,非常规储层精确表征与评价。储层非均质研究应着重发展数字露头三维地质建模及精细表征技术,开展成岩演化序列与成岩相类型划分、储层非均质成因机理与有利储层评价预测研究。非常规储层孔隙尺寸小、孔隙结构复杂、非均质性强,应加强样品代表性尺度、技术有效适用范围和多尺度定量数据融合,静态表征与动态演化结合,实现孔隙结构的全面表征,准确预测规模有效储集体<sup>[31]</sup>。

深部储层包括碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩等,深层碎屑岩在长期浅埋、晚期快速深埋背景下利于孔隙保持,溶蚀与裂缝作用改善了储集层物性;发育原生型和次生风化型两类储集层<sup>[16]</sup>。深层—超深层储层研究重点是形成机制、物性下限与规模有效储层分布评价预测,应着重研究深层碎屑岩储层孔隙成因类型与非均质性(微裂缝、微纳米孔等),深部成岩过程与孔隙发育保持机理(原生孔与正常压实作用、欠压实与油气早期进入、沉积相/速率、溶蚀作用等),深部储层演化成岩物理模拟,深层低孔渗—致密裂缝性储层形成机制与评价预测,深层规模储层物性下限与规模有效储层分布评价预测。

### 3.3 砂岩型铀矿、煤系等沉积系统是固体矿产沉积研究的重点领域

砂岩型沉积铀矿仍需从控矿因素与成矿条件两方面研究构造作用、沉积体系、古气候、成岩环境等对铀矿富集的控制作用;关注“预富集”、板状矿体成因、深部油气与铀成矿作用关系等问题<sup>[13]</sup>。

煤系沉积学应结合构造学、古地理学、古土壤学、古生物学、层序地层学等多个学科,研究聚煤盆地形成与演化、泥炭沼泽环境演化及堆积样式、煤与其伴生矿产的共生机理,揭示聚煤作用过程,寻找聚煤规律<sup>[27]</sup>。

### 3.4 气、液、固不同能源矿藏空间有序沉积与共生规律研究是资源勘探重点方向

随着社会对能源需求的不断增加,多种能源综合勘探开发越来越受到重视。在沉积盆地中,经过多年的勘探实践和研究,发现多种能源共生现象非常普遍,并呈有序共生规律,如在煤炭、油气的勘探开发实践中,往往发现煤与油页岩、煤与石油及天然气、煤与石油、油页岩、铀矿等共生,盆地中煤、石油、天然气、

铀矿4种能源的相互关系自然成了研究热点。

在同一沉积盆地中,油、气、煤和铀矿经过多期演化,最终聚集成藏(矿),其成因和分布相互关联,应突出煤层气、致密砂岩气、页岩气的一体化攻关,研究其有序共生机理与分布规律。某一种能源矿产的发现,本身就可能隐含着其他能源矿产存在与否等有关重要信息。研究盆地中气、液、固不同能源矿藏共生机制及其富集规律,为盆地内多种能源矿产多层系立体式协同勘探奠定理论基础,节约成本<sup>[32-37]</sup>。

### 3.5 大数据与沉积学方法创新将为能源沉积学发展提供新机遇

现阶段社会已进入大数据时代,各沉积盆地经过多年的勘探开发研究,积累了大量露头、钻井、实验分析资料,一些典型盆地已有数据系统,应从全球范围内建立沉积盆地大数据库,分析揭示气、液、固不同能源矿藏空间有序聚集规律。

沉积学方法上,近年来已取得了很大发展,特别是纳微观尺度的分析手段不断引入沉积地质学的研究,如应用微纳米CT直接观测页岩储层、煤储层微纳米孔喉系统,下一步应重点解决宏观—微观结合的尺度问题,研究矿物的纳米颗粒效应等。

### 参考文献 (References)

- [1] 邹才能. 非常规油气地质学[M]. 北京:地质出版社,2014:5. [Zou Caineng. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 5.]
- [2] Wise H M, Campbell M D. State of the Uranium Industry in the U S & the World[R]. Houston, Texas, USA: AAPG 2011.
- [3] 邹才能,翟光明,张光亚,等. 全球常规—非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发,2015,42(1):13-25. [Zou Caineng, Zhai Guangming, Zhang Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 13-25.]
- [4] 毛翔,李江海. 全球石炭纪煤的分布规律[J]. 煤炭学报,2014,39(增刊1):198-203. [Mao Xiang, Li Jianghai. Global distribution of Carboniferous coal[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (Suppl.1): 198-203.]
- [5] 中华人民共和国国土资源部. 中国矿产资源报告(2015)[M]. 北京:地质出版社,2015:3-9. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. China mineral resources (2015) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 3-9.]
- [6] 邵震杰. 全球煤聚集规律的研究[J]. 矿业世界,1994(1):15-19. [Shao Zhenjie. Study on global coal accumulation[J]. World Mining Industry, 1994(1): 15-19.]
- [7] 邵龙义,李英娇,张超,等. 中国含煤岩系层序地层及聚煤规律研究[C]//第十三届全国古地理学及沉积学学术会议论文摘要

- 集. 北京:中国矿物岩石地球化学学会, 2014. [Shao Longyi, Li yingjiao, Zhang Chao, et al. Study on sequence and coal accumulation of coal-bearing strata in China[C]//Abstract of the 13th Palaeogeography and sedimentology Conference. Beijing: Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014.]
- [8] 张泓, 张群, 曹代勇, 等. 中国煤田地质学的现状与发展战略[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4): 343-352. [Zhang Hong, Zhang Qun, Cao Daiyong, et al. Status and development strategy of coal geology in China[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(4): 343-352.]
- [9] 曹代勇, 郭爱军, 陈利敏, 等. 煤田构造演化新解——从成煤盆地到赋煤构造单元[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(1): 1-8, 16. [Cao Daiyong, Guo Aijun, Chen Limin, et al. New interpretation of coalfield tectonic evolution: from coal-forming basins to coal-bearing tectonic units[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(1): 1-8, 16.]
- [10] 王东东, 邵龙义, 刘海燕, 等. 超厚煤层成因机制研究进展[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1487-1497. [Wang Dongdong, Shao Longyi, Liu Haiyan, et al. Research progress in formation mechanisms of super-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1487-1497.]
- [11] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 1051-1069. [Cai Yuqi, Zhang Jindai, Li Ziyang, et al. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 1051-1069.]
- [12] 陈路路, 聂逢君, 严兆彬, 等. 北方中新生产铀盆地山演化与砂岩型铀成矿作用分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(5): 163-171. [Chen Lulu, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, et al. The analysis of basin-mountain evolution and sandstone-type uranium mineralization of Meso-Cenozoic U-productive basins in northern China[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(5): 163-171.]
- [13] 张金带. 我国砂岩型铀成矿理论的创新和发展[J]. 铀矿地质, 2016, 32(6): 321-332. [Zhang Jindai. Innovation and development of metallogenetic theory for sandstone type Uranium deposit in China[J]. Uranium Geology, 2016, 32(6): 321-332.]
- [14] 李子颖, 秦明宽, 蔡煜琦, 等. 铀矿地质基础研究和勘查技术研发重大进展与创新[J]. 铀矿地质, 2015, 31(增刊1): 141-150. [Li Ziyang, Qin Mingkuang, Cai Yiqi, et al. Great progress on uranium geology and technology innovation of uranium exploration [J]. Uranium Geology, 2015, 31(Suppl.1): 141-150.]
- [15] 孙龙德, 方朝亮, 李峰, 等. 油气勘探开发中的沉积学创新与挑战[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 129-136. [Sun Longde, Fang Chaoliang, Li Feng, et al. Innovations and challenges of sedimentology in oil and gas exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 129-136.]
- [16] 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.]
- [17] 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 615-623. [Zhu Rukai, Bai Bin, Cui Jingwei, et al. Research advances of microstructure in unconventional tight oil and gas reservoirs[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 615-623.]
- [18] 朱如凯, 吴松涛, 崔景伟, 等. 油气储层中孔隙尺寸分级评价的讨论[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 133-144. [Zhu Rukai, Wu Songtao, Cui Jingwei, et al. Classification and evaluation of pore size in oil & gas reservoir rocks[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(3): 133-144.]
- [19] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293. [Zou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.]
- [20] 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 641-649. [Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.]
- [21] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12. [Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China [J]. Petroleum exploration and development, 2012, 39(1): 1-12.]
- [22] 蒲秀刚, 周立宏, 韩文中, 等. 细粒相沉积地质特征与致密油勘探: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 24-33. [Pu Xiugang, Zhou Lihong, Han Wenzhong, et al. Geologic features of fine-grained facies sedimentation and tight oil exploration: A case from the second Member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 24-33.]
- [23] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式: 以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 34-43. [Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 34-43.]
- [24] 李增学, 吕大炜, 周静, 等. 含煤系统理论及其模式[J]. 地球学报, 2011, 32(6): 659-667. [Li Zengxue, Lü Dawei, Zhou Jing, et al. Theory and model of coal-bearing system [J]. Acta Geoscientia

- Sinica, 2011, 32(6): 659-667.]
- [25] 李增学, 吕大伟, 王东东, 等. 多元聚煤理论体系及聚煤模式[J]. 地球学报, 2015, 36(3): 271-282. [Li Zengxue, Lü Dawei, Wang Dongdong, et al. The multiple coal-forming theoretical system and its model[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(3): 271-282.]
- [26] 鲁静, 杨敏芳, 邵龙义, 等. 陆相盆地古气候变化与环境演化、聚煤作用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1788-1797. [Lu Jing, Yang Minfang, Shao Longyi, et al. Paleoclimate change and sedimentary environment evolution, coal accumulation: A middle Jurassic terrestrial[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1788-1797.]
- [27] 宋党育, 袁镭, 白万备, 等. 煤地质学研究进展与前沿[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(4): 1-7. [Song Dangyu, Yuan Lei, Bai Wanbei, et al. Advance and frontier of coal geology[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(4): 1-7.]
- [28] 李宝庆, 庄新国, 赵仕华, 等. 近海含煤岩系层序地层学研究现状[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 1-7. [Li Baoqing, Zhuang Xinguo, Zhao Shihua, et al. Sequence stratigraphy of paralic coal-bearing strata[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 1-7.]
- [29] 陈戴生, 李晓翠. 我国砂岩型铀矿多阶段成矿成因探讨[J]. 世界核地质科学, 2012, 29(4): 203-208. [Chen Daisheng, Li Xiaocui. Discussion on the genesis on multi-stage ore formation of sandstone-type uranium deposit in China[J]. World Nuclear Geoscience, 2012, 29(4): 203-208.]
- [30] 罗平, 王石, 李朋威, 等. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 807-823. [Luo Ping, Wang Shi, Li Pengwei, et al. Review and prospective of microbial carbonate reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 807-823.]
- [31] 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1323-1336. [Zhu Rukai, Wu Songtao, Su Ling, et al. Problems and future works of porous texture characterization of tight reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1323-1336.]
- [32] 秦鹏, 孟志强, 李彦恒, 等. 国外多种能源矿产同盆共存富集规律初探[J]. 河北建筑科技学院学报, 2005, 22(3): 76-78. [Qin Peng, Meng Zhiqiang, Li Yanheng, et al. Relationship of energy ore deposits in a same basin[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science & Technology, 2005, 22(3): 76-78.]
- [33] 杨明慧, 刘池洋. 鄂尔多斯中生代陆相盆地层序地层格架及多种能源矿产聚集[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 563-570. [Yang Minghui, Liu Chiyang. Sequence stratigraphic framework and its control on accumulation of various energy resources in the Mesozoic continental basins in Ordos[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(4): 563-570.]
- [34] 王东东, 李增学, 吕大伟, 等. 陆相断陷盆地煤与油页岩共生组合及其层序地层特征[J]. 地球科学, 2016, 41(3): 508-522. [Wang Dongdong, Li Zengxue, Lü Dawei, et al. Coal and oil shale paragenetic assemblage and sequence stratigraphic features in continental faulted basin[J]. Earth Science, 2016, 41(3): 508-522.]
- [35] 曹代勇, 秦国红, 张岩, 等. 含煤岩系矿产资源类型划分及组合关系探讨[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2150-2155. [Cao Daiyong, Qin Guohong, Zhang Yan, et al. Classification and combination relationship of mineral resources in coal measures[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2150-2155.]
- [36] 唐跃刚, 贺鑫, 程爱国, 等. 中国煤中硫含量分布特征及其沉积控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 1977-1988. [Tang Yuegang, He Xin, Cheng Aiguo, et al. Occurrence and sedimentary control of sulfur in coals of China[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 1977-1988.]
- [37] 王毅, 杨伟利, 邓军, 等. 多种能源矿产同盆共存富集成矿(藏)体系与协同勘探: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. 地质学报, 2014, 88(5): 815-824. [Wang Yi, Yang Weili, Deng Jun, et al. Accumulation system of cohabitating multi-energy minerals and their comprehensive exploration in sedimentary basin—a case study of Ordos Basin, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 815-824.]



# Research Progress and Development Strategic Thinking on Energy Sedimentology

ZHU RuKai<sup>1,2,3</sup>, ZOU CaiNeng<sup>1,2</sup>, YUAN XuanJun<sup>1,2,3</sup>, WU SongTao<sup>1,2,3</sup>, CUI JingWei<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Lan<sup>1</sup>, LIN SenHu<sup>1</sup>, SU Ling<sup>1,2,3</sup>, LUO Zhong<sup>1,2,3</sup>

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2. National Energy Tight Oil and Gas R&D Center, Beijing 100083, China

3. Oil and Gas Reservoir Key Laboratory PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract:** The development of sedimentology depends on industrial exploration of mineral resources such as oil, gas, coal, sandstone type uranium deposit. Energy Sedimentology which becomes an important way for discovering resources and reducing cost is more and more important for resources exploration.

Recently, the development of oil and gas sedimentary reservoir is supported by Energy Sedimentology, which obtained six significance progresses, established six grade measures such as remote sensing, seism and Nano-CT. Energy Sedimentology established new model of craton platform sedimentary reservoir and provided theoretical direction for global ancient hydrocarbon-bearing system. Genetic models of marine and continental facies fine-grained sedimentation were established, regularities of distribution of organic-rich shale were revealed, and important theoretical foundations of source rock evaluation and unconventional oil & gas exploration were provided by energy sedimentology. And discovering micro-nanoscale pore throat system of unconventional tight reservoir, guiding assessment of shale and tight reservoirs, studying coal-bearing stratum and guiding evaluation, revealing uranium mine gathering mechanism in sandstone and guiding evaluation, all these achievements can rely on energy sedimentology.

Source-to-Sink Approach, marine and continental fine-grained sedimentology and ancient small craton carbonate sedimentology will become significant contents in the development of energy sedimentology. Reservoir heterogeneity, characterization of unconventional reservoir and limit of deep-reservoir will be a hotspot in the development of hydrocarbon sedimentology. Sequential deposition and mutualism regular research of different energy storage space, like gas, liquid and solid, are the key direction of resource exploration. Big data and technique innovation of sedimentology will provide new opportunity for energy sedimentology.

**Key words:** energy sedimentology; genetic model of fine-grained sedimentation; coal-accumulation regularity; sequential deposition and mutualism of uranium resource