

中国煤系气共生藏作用研究进展

秦 勇

中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室

摘 要 煤系气共生共探与共采受到我国天然气行业的高度关注,勘探与开发试验已经取得了一定的成效。在分析煤系气地质条件特殊性的基础上,从煤系砂岩储层致密化机理、煤系气共生组合及成藏要素配置、煤系含气系统叠置性等方面,评述了我国煤系气共生藏作用的研究进展。研究结果表明:①煤系气地质条件的特殊性表现在3个方面——煤系气赋存态和储层岩石类型具有多样性,其成藏效应与常规砂岩气有所不同;煤系沉积序列旋回性极强,气、水分布关系复杂多变;煤系砂岩储集体在广覆式泥质岩中镶嵌展布。②煤系富有机质特性以及烃源岩生气过程产生的有机酸,是煤系砂岩储层致密化的重要诱因,煤系砂岩气可能具有部分自生自储及吸附气的成藏特点,并可在一定程度上改善砂岩储层的物性。③煤系沉积特点决定了煤系气成藏效应主要取决于生烃强度、运移方式与输导体系、地层流体能量、区域有效盖层等4个方面,特殊的输导体系使得烃源岩生成的天然气在复杂的源储系统中得以重新分配,这是煤系气共生藏的重要基础。④含气系统叠置性是煤系气地质研究的前沿方向之一,近年来发展了测井响应识别技术和含气系统叠置性判别方法,发现煤系存在3种典型流体压力曲线类型,并初步应用于煤系气共采有利层段的优选。

关键词 中国 煤系气 共生共探共采 地质条件 煤系砂岩储集层 成藏要素 叠置含气系统

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.04.003

Research progress of symbiotic accumulation of coal measure gas in China

Qin Yong

(MOE Key Laboratory of CBM Resources and Accumulation Process//China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 4, pp.26-36, 4/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Coal measure gas (CMG), referring to natural gas stored in coal measures, as well as its existence, exploration and production, has been highly concerned recently in natural gas sector in China, and pilot tests of which have been succeeded with some achievements. To provide new geological references, this paper discussed the research progress in CMG co-existence and pooling factors in the respects of the tightening mechanism of coal measure sandstone reservoirs, CMG co-existence and gas pooling assemblages, the superimposed CMG system, and so on. The following findings were obtained. (1) The particularities of CMG geological conditions are shown in three aspects: First, the occurrence and reservoir lithology of CMG are diverse, and the accumulation of sandstone gas in coal measures may be different from that of conventional sandstone gas. Second, the sedimentary environment of coal measures causes the frequent and thin interbedding with various lithologic reservoirs, strong cyclicity and complex gas–water relationship, and the Surat-type CMG is worthy of attention. And third, the sandstone reservoirs in coal measures are embedded in the wide overlying mudstones, the special source–reservoir match and composite gas reservoirs need to develop adaptive co-exploration and co-production technology. (2) The coal measures are rich in organic matters, and a large number of the organic acids are formed during gas generation from the source rocks, which are important factors for the densification of the sandstone reservoirs in coal measures. And the sandstone reservoirs in coal measures may be characteristic of self generating and self storing gas and adsorption to a certain extent, and their physical properties can be improved by organic detritus in the reservoirs. (3) The sedimentology of coal measures defines four generalities for favorable CMG accumulation, but effect of the gas-generating intensity, gas migration system, formation fluid energy and effective regional caprock thickness to the accumulation are variable. The natural gas generated in source rocks is re-allocated with a special migration system in a complex source–reservoir system, which is an important basis of CMG accumulation. (4) The superimposition of the gas-bearing system is one of the leading problems in CMG research. In recent years, the logging response identification technology of key strata and the superposition identification method of the gas-bearing system have been further developed. It is found that there are three typical types of fluid pressure curves in coal measures. At the same time, the CMG co-accumulation in the whole sense requires a certain threshold depth. Based on the progress above, the theory of CMG accumulation has been improved and deepened, which is helpful in providing more pertinent suggestions for the development of the joint CMG exploration and mining technology.

Keywords: China; Coal measure gas; Co-generation, co-exploration and co-production; Geological condition; Coal-measure sandstone reservoir; Organic acids; Pooling factors; Gas-bearing system

基金项目:国家自然科学基金重点项目“深部煤层气系统及其能量动态平衡机理研究”(编号:41530314)、国家科技重大专项(编号:2016ZX05066-01、2016ZX05044-02)。

作者简介:秦勇,1957年生,教授,本刊第八届编委会委员,博士;中国煤炭工业协会非常规天然气专家委员会主任。ORCID:0000-0002-7478-8828。E-mail: yongqin@cumt.edu.cn

早在 20 世纪 80 年代,我国老一辈天然气地质学家就提出了煤系气这一专业术语,十分有远见地指出煤系气在我国未来天然气资源中的重要作用和战略地位^[1-3]。严格来说,煤系气(coal measure gas)泛指煤系中赋存的各类天然气,仅是一个基于储层成因类型或地质载体作出的矿产资源定义。煤系气以煤系内生内储腐殖型气为主,源储同层或源储异层,可概括为内生自储、内生它储两大基本类型,包括煤层气及煤系砂岩气、页岩气等。有关专家和机构初步预测结果显示,我国部分盆地或地区煤系气中煤层气、致密砂岩气、页岩气地质资源量平均占比分别为 36.61%、23.53% 和 39.86%^[4-5]。煤系气共生是煤系各类天然气复合成藏的地质基础,煤系气勘探开发扩展了原来只考虑煤层气的视野,不仅有助于提高单纯煤层气井的产量和经济效益,而且为高效开发煤系天然气资源提供了一条新的技术途径^[6]。煤系气共生共探与共采受到我国天然气界高度关注^[7-8],近年来国家立项开展专项研究,相关企业投入巨资从事勘探与开发试验,成效显著。笔者分析评述了我国近年来的相关研究成果,力图展示我国煤系气成藏作用研究的最新进展,并为煤系气共探共采技术研发提供新的地质依据。

1 煤系气地质条件的特殊性

煤系是形成于一定构造时期,含有煤层或煤线并具有成因联系的一套沉积岩系,主要形成于海陆交互相或陆相环境,赋存在不同构造性质的残留盆地^[6]。煤系气在强调不同储层类型成因关联性的同时,极为重视不同类型储层和气藏的差异性。这种差异性正是起源于煤系气地质条件的特殊性,研究者对此予以了高度关注,认识可概括为 3 个方面。

1.1 煤系气赋存态和储层岩石类型具有多样性

煤系是吸附气、游离气或煤层气、页岩气、砂岩气能够共生成藏的唯一沉积层系。煤系气既有以吸附态为主的煤层气,又有以游离态为主的致密砂岩气和碳酸盐岩气,还有混合态赋存的页岩气。特殊条件下,煤系气可与水分子相结合,形成笼形晶体包络的水合物^[9]。在煤系中,从无机储层(如砂岩、石灰岩等)、混合储层(泥页岩)到有机储层(煤层和油页岩),有机质丰度逐渐增高,形成一个不存在自然界限的储层岩性序列,这是煤系气赋存态多样性的根本原因。赋存态不同,产出机理和开发方式有别,煤系气共探共采技术面临新的挑战和技术难题。

煤系烃源岩类型多,如煤层、碳质泥岩、暗色泥岩、油页岩等,累计厚度比例大,生气强度高,气源充足,导致煤系气资源丰度高^[10-12]。2017 年,我国煤层气直井开发试验获得新的突破,以煤层、碳质泥岩、致密砂岩为目标层的黔西杨煤参 1 井日产气量最高达 4 656 m³,连续 50 d 稳产在 3 600 m³/d 以上,创下了西南地区直井日产气量最高纪录;该井所在的杨梅树向斜煤系气地质资源丰度 4.79×10^8 m³/km²,比单纯的煤层气资源丰度提高了 6 倍^[13]。

模拟实验发现,与海相烃源岩相比,煤岩的排气效率很高,在有机质成熟度(镜质组最大反射率)1.0%时可达 75%,在 5.5%时高达 90%,表明煤中生成的天然气绝大部分运移并充注入其他储层,成为煤系气和相邻非煤系气藏的主要气源^[14]。值得关注的是,煤系砂岩往往含有一定数量的有机质,呈煤屑、煤线、煤包体等形式产出,暗示煤系砂岩具有一定生气能力及吸附能力,可能导致煤系砂岩气成藏效应乃至生产特点与常规砂岩气之间存在差异^[15-16]。

1.2 煤系沉积序列明显的旋回性

煤系形成于陆相和海陆交互相沉积环境,岩性和厚度对地质控制因素的响应极为敏感,造成岩层一般相对较薄,岩性多样,砂岩、泥岩、煤层等互层频繁,旋回性极强^[17-18]。这一旋回性特点,一方面是造成煤系气储层岩石类型多样性的根本原因,进而导致赋存态的多样性;另一方面,在垂向上构成多套受层序格架控制、厚度一般不大且结构多变的生储盖组合及多重内幕封盖^[19],造成煤系内部气水分布关系复杂多变^[20],垂向上往往发育多套流体压力系统^[21-25]。

煤系中不同的流体压力系统紧邻或间距较小,系统之间的能量动态平衡关系脆弱,易于受到开采扰动而发生系统间干扰^[8,26-28]。多变的生储盖组合关系,使得同一岩层(如煤层或泥页岩层)兼具源岩、储层和盖层的功能,导致同一组合中天然气既有自生自储性质,又有它生它储特征,是煤系气藏类型多样性的沉积控因^[29-31];煤岩、砂岩垂向组合,决定了煤系致密砂岩气藏的运聚模式,发育“源储接触”的原地匹配型气藏和受储层和运移通道双重控制的异地匹配型气藏^[32]。煤系内部储层的岩性变化大,不同岩性储层的力学性质差异显著,需要创新开发技术对各类储层进行统一且有效的改造^[33]。

澳大利亚苏拉特盆地是近年来世界上煤系气开发最为成功的盆地^[34],单井平均产气量 $2.83 \times 10^4 \sim 5.66 \times 10^4$ m³/d,最高可达 56×10^4 m³/d^[35],其煤系

沉积旋回特点值得高度关注。盆地煤系为中侏罗统 Wallon 亚群, 由一系列向上变细的河流沉积旋回所构成^[36]; 地层厚度一般介于 305 ~ 365 m, 含煤多达 100 余层, 平均 40 层左右, 单层厚度小于 1.0 m 的煤层比例占 70% 以上^[18]。分析认为: 薄而多的煤层与砂岩、碳质泥岩和泥岩频繁互层, 使得含煤层段渗透率高, 介于 5 ~ 5 000 mD, 采用贯穿整套煤系的直井加裸眼完井技术即可实现煤系气高效合采^[37]; 煤层厚度比例与砂岩厚度比例之间相互消长^[18], 意味着在薄煤层为主的条件下互层更为频繁, 煤系气保存条件趋好^[38]; 煤层与砂岩、泥岩的频繁薄互层, 有利于煤层脱水和煤层气解吸产出^[34]。

1.3 煤系砂岩储集体在广覆式泥质岩中镶嵌状展布

煤系主要形成于冲积扇、河流—湖泊、三角洲、潟湖—潮坪等沉积体系, 相变较大^[39]。一般而言, 高位体系域形成以浅海相碳酸盐岩、潟湖—潮坪相和湖相泥岩为主的弱水动力沉积, 分布广泛而连续; 低位体系域有利于强水动力沉积(冲积扇、河流、三角洲相砂岩等)的发育, 砂体在古水流方向上有较好的侧向连续性, 但在垂直乃至斜交古水流方向上的连续性极差, 剖面上多呈似层状、透镜状产出; 两个体系域相互转化的阶段多有利于弱水动力的泥炭沼泽大面积发育^[40], 形成大范围可对比的主煤层。

煤系沉积体的上述几何形态特征, 表现为“泥包砂, 泥包煤, 泥岩层煤层广布, 单个砂体镶嵌在煤系中与泥岩、煤层以沉积相变形式产出”的三维空间展布格局。煤系烃源岩与天然气储层叠置发育, 相邻接触, 近源聚集, 源储互层且往往同层, 具备成藏要素配置的优势^[41]。进一步来说, 煤系中烃源岩和煤储层、页岩储层广覆式展布, 砂岩储层分布相对局限, 但围岩对砂岩储层的封盖性极强, 这是形成致密砂岩气成藏特点的重要致因, 如主要赋存在煤系^[42], 基本特征是以煤系烃源岩为主^[43], 多形成小尺度分割性强且气藏数量多的低丰度大气区^[44], 天然气分布和富集受非均质性连片砂体中物性好的区域控制^[45]等, 也是煤系气以岩性气藏为主的根本地质原因。

总体上, 煤系气属于一种广覆式近源连续性成藏系统^[46], 具有复合成藏性质。从煤系气共生共探共采视角审视, 煤系多类型天然气共生成藏特点, 既与单纯的煤层气、致密砂岩气、页岩气生储盖特点不同, 更与常规天然气存在较大差异。这种特殊的源储配置关系乃至含气系统模式, 需要发展与之相

适应的煤系气共探与共采技术。

2 煤系砂岩储层致密化机理

无论地质认识还是勘探开发技术, 未来 10 年里煤系致密砂岩气比煤系页岩气更为现实, 阐明砂岩储层的沉积与成岩成因, 进而准确预测有利储集空间发育的地质特征, 是当前煤系致密砂岩气勘探与开发的瓶颈, 也是实现煤系气高效共采的地质基础, 而砂岩储层致密化机理是其核心问题^[47]。砂岩储层致密化过程是有机—无机、水—岩—烃复杂相互作用的综合结果^[48]。煤系砂岩致密化的特殊原因, 在于沉积物富塑性组分、富有机质和富有机酸, 结果导致了煤系致密砂岩“先致密, 后充注”的成藏过程。根据目前有限的研究结果及普遍可见的地质现象, 煤系砂岩往往含有一定数量碳质物质, 有机碎屑存在和变化也可能对砂岩气成藏效应产生显著影响。

沉积作用是储层致密化的先天因素, 控制了原始孔隙性特征^[49-50]。致密砂岩储层沉积控制具有某些共性特点, 沉积速率相对较缓慢, 水动力条件弱而稳定, 以海陆交互环境为主, 多与三角洲沉积有关, 具有明显砂泥岩夹煤层的互层结构^[47]。就此而言, 陆相和海陆交互环境铸就了煤系砂岩孔渗性质的先天不足。在这样的沉积控制条件下, 煤系砂岩的结构成熟度可能较高, 但成分成熟度一般较低, 原生黏土填隙物及易成岩转化的岩屑、长石类等含量较高, 不利于原生孔隙的保存。鄂尔多斯盆地东北缘上古生界煤系砂岩以岩屑石英砂岩和岩屑砂岩为主, 岩屑含量为 5% ~ 50%, 长石含量为 0 ~ 25%; 黏土矿物是重要的胶结物之一, 以伊利石、高岭石和绿泥石为主, 含量一般为 5% ~ 15%, 最高可达 35%^[51]。塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统煤系储层主要为岩屑砂岩, 部分为长石岩屑砂岩, 总体上砂岩储层成分成熟度较低, 结构成熟度中等; 粒间黏土矿物含量约为 7%, 主要为高岭石及伊利石; 颗粒分选中一好, 以次棱—次圆为主, 接触关系以点—线接触及线接触为主, 部分地区层段为凹凸接触^[52]。

根据成岩影响程度, 可将致密砂岩储层分为压实型、胶结型、其他成因 3 种类型^[47]。机械压实是早期成岩阶段砂岩致密化最重要的因素, 对整个成岩过程中砂岩孔隙度的衰减都有贡献。砂岩致密化的有机成因, 近年来受到研究者的高度关注。煤系烃源岩生烃过程产生的大量有机酸进入邻近砂岩, 酸性成岩流体环境致使早期碳酸盐矿物胶结不发育, 主要

形成石英颗粒次生加大硅质沉淀,原生孔隙损失大,砂岩变得致密^[50,53]。成岩作用后期,在较高的地层温度压力条件下,有机酸成岩环境导致明显的硅质胶结和高岭石胶结;同时,地层流体pH值增高,形成晚期碳酸盐胶结物,残余孔隙进一步损失,砂岩更加致密化^[54]。煤系有机质生气过程中产生的CO₂体积可达烃类气的50%~70%,远远超过现今煤系气CO₂含量(0~5%),缺失的气态CO₂相当一部分以固态碳酸盐形式在储层孔隙中沉淀下来,理想条件下1 m³的CO₂完全转化可形成0.32 m³的碳酸盐胶结物;煤生成烃气和CO₂的动力学过程不同步,在弱成岩阶段和高过成熟阶段存在两期CO₂集中生成期,与多期烃类气规模生气有所区别^[48]。煤系烃源岩的生气行为,多使得砂岩储层在成岩早期严重致密化,导致致密砂岩气具有“先致密,后成藏”的规律^[12,44]。

煤系砂岩沉积场所紧邻富有机质沉积场所,先期形成的富有机质沉积往往被河道同生或准同生冲刷,形成的有机质碎屑混入砂质沉积中保存下来。由此,煤系砂岩的一个重要岩石学特点,就是往往含有较多的有机质碎屑。例如,吐哈盆地、鄂尔多斯盆地煤系含气致密砂岩含有大量煤屑或碳质泥岩颗粒,多者可占视域面积的30%~40%,少者也在5%以上,一般介于10%~20%^[15-16,55]。这些有机质碎屑明显影响到砂岩的物性:①有机质碎屑提高了砂岩储层的孔比表面积,由1 m³煤破碎为直径1 mm有机碎屑,比表面积可增大到600倍^[55];②有机质碎屑含量增高,砂岩孔隙度和渗透率明显增大^[16]。由此得到两个方面的启示:①煤系砂岩气可能具有部分自生自储的成藏特点,产气方式及排采制度可能与常规砂岩储层存在一定差异;②有机质碎屑在一定程度上改善了煤系致密砂岩储层的物性,探测、改造方法及采气方式需要与此相适应。

3 煤系气共生组合及成藏要素配置

梁宏斌认为,煤系游离气藏与煤层气藏相伴生,游离气藏也和吸附气藏一样具有大面积“连续”分布特征,从而扩展了煤系游离气藏空间展布范围^[30]。基于这一认识,他率先提出了煤系气共生组合的概念,根据煤层与煤系其他岩层之间关系,将煤系气共存系统划分为煤岩—顶板、煤岩—底板、煤岩围限3种组合类型;认为煤岩—顶板型系统中游离气与吸附气常伴生出现,两者具有相近的温压条件,可视为存在于统一的吸附气—游离气共存系

统;在系统内部,煤层吸附气—煤层游离气—围岩游离气之间可发生动态交换作用,形成一个动态平衡体系,温压条件改变,吸附气与游离气发生不对称迁移。自此之后,不同作者根据源储关系或特定研究区具体地质条件,先后提出了不同的煤系气共生组合类型划分方案^[12,19-20,31-32,56-59]。

煤系沉积特点决定了煤系气有利成藏要素具有一定的普遍性:①内幕盖层多,自封盖条件好,如多数地区煤层气风化带深度较浅,甚至不到100 m^[60-61];②储层致密且类型多样化,即使是砂岩也可能具有一定的生气和吸附能力^[15,55];③吸附气储层(煤层、泥页岩等)大面积连续式含气,国内外对此已有诸多讨论;④煤系致密砂岩气甜点分布局限,砂体发育几何特征、类型和非均质性控制了致密砂岩气的局部富集^[62]。扣除这些共生有利因素,则煤系气共生成藏效应主要取决于古今构造控制之下的生烃强度、运移方式与输导体系、地层流体能量、区域有效盖层4个方面。其中,地层流体能量纵向分布影响到煤系气共采方式,区域有效盖层条件决定了煤系气共生成藏的深度上限。

戴金星院士等曾经指出,致密气成藏的生烃强度门限低于常规天然气成藏^[63-64]。进一步而言,对于以吸附气为主的煤层气和吸附气占较大比例的页岩气成藏,只要生气量达到和超过煤储层、页岩储层的储集能力,则理论上就可形成较高饱和度的非常规气藏,这个生气条件在煤系烃源岩生烃早期阶段就可满足^[10,60,65]。类比此理,煤系气共生成藏的生烃强度门限低于常规天然气成藏。鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气勘探实践揭示,生气强度大于 20×10^8 m³/km²的区域一般为气区,小于 10×10^8 m³/km²的区域为含气水区,介于两者之间的区域为气水关系复杂区,指示生气强度大于 10×10^8 m³/km²的地区就可以形成致密气大规模聚集^[44]。四川盆地须家河组煤系致密气成藏效应也表现出相似的规律^[66]。同时,煤系天然气聚集系数极高,如苏里格地区本溪组—山西组烃源岩排出的天然气,80%充注在石炭二叠纪煤系和下石盒子组砂岩^[67]。

煤系气源储关系复杂,特殊的输导体系使烃源岩生成的天然气得以重新分配,这是煤系气共生成藏的重要基础。致密砂岩没有优势运移通道,主要为弥漫式运移充注^[31]。煤系中,决口扇砂体对煤层排烃及随后向砂岩储层的运移具有“烟囱”效应^[15-16,55]。煤系缺乏天然气大规模侧向运移的条件,天然气主要在异常压力驱动下以幕式涌流方式运移,表现为

垂向近距离快速成藏^[68]。沁水盆地煤系游离气运移通过两类途径：①宏观输导体系，包括断层、不整合面和陷落柱；②微观输导体系，主要为煤层和顶板砂岩中的微孔隙及微裂隙^[69]。在郑庄—樊庄区块，由于煤层气藏与顶板砂岩气藏之间的共生性和单向转换性，构成了断层、煤层大面积“层状蒸发式”面状排烃、陷落柱组成的微观输导体系，形成了原生型、调整型、改造型 3 种煤系气成藏模式^[65]。相似材料模拟实验结果显示，砂体渗透率级差控制了天然气聚集的有效性、速率和含气饱和度，渗透率非均质性越大，致密砂岩气的有效聚集潜力越大，分流通道等物性较好的砂体被物性较差的砂体或泥岩围限，有利于天然气有效聚集和保存^[62]。

煤系宏观赋存形态往往表现为一个巨大“箱体”，如鄂尔多斯盆地北部大牛地大型致密气田^[70]。该气田受上石盒子组区域盖层物性和异常压力的双重封盖，工业气藏的发育被严格限制在该箱体内部，多层大型岩性圈闭叠合发育，构成“近源箱型”成藏模式。这种成藏模式具有主源定型、储层相控、高压封闭、近源成藏的地质要素配置特点，构造不是主要的控藏条件。煤系气勘探取得重大突破的鄂尔多斯盆地北部边缘杭锦旗地区，也是该方面的典型实例^[46]。分析煤层气富集与封隔层（包括区域盖层、区域底板和直接顶底板）、后期构造调整、地层产状等地质要素的匹配关系，发现煤层气易于在区域性泥岩盖层及底板分布稳定、成藏期后构造抬升一回返幅度小、地层平缓且处于均势状态的地区富集^[56]。在此基础上，研究者进一步提出了封闭体系的概念，认为封闭体系环境中不仅富集煤层气，而且其他类型煤系气也可以富集成藏。

4 煤系含气系统的叠置性

煤系不同物性岩层的频繁互层，必然导致隔层阻气层或内幕封盖层在纵向上反复出现，进而在煤系不同地层段形成相互独立的含气系统^[71]。同一煤系中，两个及两个以上独立含气系统在垂向上相互叠置的现象，被称为叠置含气系统^[4,6]。同一口井煤系不同层位流体压力系数不一致的普遍现象^[19,21-25,28,30,44]，实质上就是叠置含气系统的具体表现。叠置含气系统之间由于储层物性及流体能量的差异，使得煤系气合采过程中出现系统间干扰，共采地质条件复杂化，限制了煤系气产能的充分释放^[8]。为此，含气系统叠置性成为近年来煤系气地质研究的前缘方向之一。

前期研究就煤系含气系统叠置性地质成因取得了初步认识^[72-73]。层序地层格架奠定了叠置含气系统形成的物性基础，煤系与上覆下伏含水层之间缺乏水力联系而构成了该类系统产生的水文地质基础，叠置含气系统是沉积—水文—构造条件耦合控气作用的产物^[71]。发现含气系统叠置性受沉积环境及其控制下的层序地层结构所影响，河流—三角洲—湖泊相煤系在垂向上多表现为“统一含气系统”，三角洲—湖坪—潟湖相煤系可形成“叠置含气系统”，层序地层结构对煤系储层含气性和物性具有控制作用^[21,74]。发现沉积于最大海泛面附近且与海相泥岩伴生的低渗透岩层，对煤层气垂向渗流具有分划性阻隔作用，认为这是形成叠置含气系统的根本地质原因^[75]。这种低渗岩层被称为“关键层”，从三角洲平原相区至三角洲前缘相区，关键层发育程度逐渐增强，导致含气系统垂向结构渐趋复杂，含气系统叠置性渐趋显著^[74-75]。叠置含气系统理论在煤系气勘探中得到初步应用，促进了西南地区上二叠统煤系气共采试验的突破^[23,76]。

近年来，含气系统叠置性研究随着煤系气共探共采力度加强而不断深入，取得了如下 3 个方面的主要进展。

1) 关键层具有特定的岩石学和物性特征，根据测井响应能够予以识别。宏观上，关键层多为含不规则团块状菱铁矿和（或）黄铁矿的薄层泥岩，垂向上发育泥岩—菱铁质泥岩—含黄铁矿泥岩—煤层—石灰岩、泥岩—菱铁质泥岩—含黄铁矿泥岩—煤层—泥岩等 6 种沉积组合^[77]。微观上，关键层中菱铁矿呈胶状、微晶—粉晶状、球粒状产出，结合微量元素及稳定同位素组成特征，发现关键层形成于弱氧化—弱还原的水介质条件，主要为潟湖—湖坪—三角洲前缘环境，沉积于最大海泛面附近^[28,74,77]。与一般的煤系泥岩相比，关键层以微孔和过渡孔为主，孔隙度和渗透率更低，突破压力更高，突破时间更长，具有四高（自然伽马、声波时差、补偿中子、光电吸收截面指数）两低（深、浅双侧向电阻率）的测井曲线响应特点^[77-80]。据此，建立了基于测井响应的关键层识别方法，对黔西、鄂尔多斯盆地东北部煤系叠置含气系统进行了划分^[28,40,81]。

2) 不同含气系统流体地球化学特征有所差异，据此可判识含气系统的叠置性或封闭性。分析煤田勘探钻孔水化学数据，识别出煤系水离子由两个主成分构成：第一主成分以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等为主，与 pH 值显著负相关，是地层环境开放性的敏感性因子；第二主成分以 Na^+ + K^+ 、 HCO_3^- 等为主， Cl^- 、

CO_3^{2-} 也有较大贡献,与矿化度显著正相关,是地层环境封闭性的敏感性因子。据此,建立了评价地下水环境封闭指数,即为 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{HCO}_3^-)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})^{[78,82-83]}$ 。显然,特定地层段的封闭指数越大,地层封闭性越强,地下水与外界气、水交换的能力越弱,含气系统的叠置性越强;反之,含气系统的统一性可能越强。应用封闭指数评价了黔西、滇东地区煤系含气系统的叠置性,初步应用于煤系气合采层段优选实践^[84-85]。

3) 煤系存在3种典型流体压力曲线类型,指示煤系地下水动力条件存在相应的垂向分异。分析黔西地区织纳区块钻孔流体压力剖面,发现不同次级构造单元煤系流体压力系数随埋深增大出现3类典型变化:①稳定型,压力系数在埋深150 m以浅离散性大,随后收敛并十分稳定,流体压力状态几乎没有变化;②衰减型,埋深增大,压力系数线性减小,流体压力状态减弱,但离散性相对较大;③增强型,压力系数随埋深的增大而持续稳定增大,表明流体压力状态随之增强。稳定型剖面指示煤系气、水垂向联系较强,几乎不存在含气系统的叠置,上下属于同一含气系统,适合于煤系气跨层段合采;衰减型和增强型剖面显示煤系不同层段气、水垂向联系微弱,含气系统叠置性显著,有利于合采的层段分别为中—上部和中—下部含气系统^[84]。

5 结论

我国老一辈天然气地质学家早在20世纪90年代就指出了煤系气在未来天然气资源中的重要地位,近年来勘探开发力度的加大,促进了煤系气共生成藏作用和成藏效应研究的进展。

煤系气地质条件具有自己的特殊性,特殊的源储配置及气藏复合模式需要发展适应的共探共采技术,苏拉特型盆地煤系气开发前景值得关注。煤系砂岩储层致密化的有机成因受到关注,含有较多有机质碎屑的煤系砂岩可能在一定程度上具有自生自储及吸附气的成藏特点。煤系气有利共生富集具有4方面共性特点,成藏效应主要取决于生烃强度、运移方式与输导体系、地层流体能量、区域有效盖层4个方面,特殊的输导体系使得天然气在复杂源储系统中得以重新分配,构成煤系气共生成藏的重要基础。含气系统叠置性作为煤系气地质研究的一个前沿方向,近年来进一步深化了对关键层岩石学和物性、含气系统流体地球化学、煤系流体压力剖面的地质

认识,发展了相应的测井响应识别技术和判识方法,并初步应用于煤系气共采有利地层段优选。

应该指出,游离气作为煤系气的重要组成部分,依靠区域盖层物性和异常压力才能得以保存。也就是说,煤系游离气与吸附气的共生富集或具有工业性共采价值的煤系气成藏需要较大的埋藏深度,不同地区的深度门限有所变化^[20,86]。否则,可能仅有单纯的煤层气富集成藏,而非整体意义上的煤系气。

参 考 文 献

- [1] 黄籍中. 四川盆地天然气地球化学特征[J]. 地球化学, 1984, 13(4): 307-321.
Huang Jizhong. Geochemical characteristics of natural gases in the Shichuan Basin[J]. Geochimica, 1984, 13(4): 307-321.
- [2] 黄籍中, 宋家荣, 刘国瑜, 王昆益. 一种不具煤系气标志的煤系气——四川盆地南部上二叠统天然气成因分析[J]. 新疆石油地质, 1991, 12(2): 107-117.
Huang Jizhong, Song Jiarong, Liu Guoyu & Wang Kunyi. A coal gas without coal gas indicators: Gas origins and accumulation in the Upper Permian strata in the southern Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1991, 12(2): 107-117.
- [3] 戚厚发. 华北地区石炭—二叠系天然气资源、成藏特征及勘探策略[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6): 23-28.
Qi Houfa. Resources, trapping characteristics and exploration strategies of the C-P natural gas in Huabei region[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(6): 23-28.
- [4] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min & Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [5] 傅雪海, 德勒恰提·加娜塔依, 朱炎铭, 申建, 李刚. 煤系非常规天然气资源特征及分隔合采技术[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 36-40.
Fu Xuehai, Deleqati Janatayi, Zhu Yanming, Shen Jian & Li Gang. Resources characteristics and separated reservoirs' drainage of unconventional gas in coal measures[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 36-40.
- [6] 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性——煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14-23.
Qin Yong, Shen Jian & Shen Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems: A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 14-23.
- [7] 曹作华, 范亚芳, 王健, 孔威. 我国十年来煤层气研究热点分布转换与产业发展[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 5-9.
Cao Zuohua, Fan Yafang, Wang Jian & Kong Wei. Transformation and industrial development of coalbed methane study hot

- point distribution in passed ten years of China[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 5-9.
- [8] 秦勇. 中国煤层气成藏作用研究进展与述评[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 405-418.
- Qin Yong. Advances and reviews on coalbed methane reservoir formation in China[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 405-418.
- [9] 曹代勇, 王丹, 李靖, 豆旭谦. 青海祁连山冻土区木里煤田天然气水合物气源分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1364-1368.
- Cao Daiyong, Wang Dan, Li Jing & Dou Xuqian. Gas source analysis of natural gas hydrate of Muri coalfield in Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1364-1368.
- [10] 秦勇, 韦重韬, 张政, 王存武, 杨兆彪, 梁建设, 等. 沁水盆地中—南部煤系及其上覆地层游离天然气成藏的地质控制[J]. 地质前缘, 2016, 23(3): 24-35.
- Qin Yong, Wei Chongtao, Zhang Zheng, Wang Cunwu, Yang Zhaobiao, Liang Jianshe, et al. Geological controls of free natural gas reservoirs in coal measures and overlying strata in the central and southern Qinshui Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 24-35.
- [11] 张洁. 鄂尔多斯盆地东部上古生界烃源岩评价[D]. 西安: 西安石油大学, 2012.
- Zhang Jie. Source rock evaluation of the Upper Palaeozoic in eastern Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2012.
- [12] 刘洁琪. 煤系烃源岩天然气成藏过程研究——以鄂尔多斯盆地东部山西组为例[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
- Liu Jieqi. Researching of gas accumulation process of coal-bearing source rock—A case of Shanxi Formation in eastern Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2017.
- [13] 中国地质调查局. 贵州六盘水地区煤系气调查实现重大突破 [EB/OL]. (2017-07-25). http://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201707/t20170725_436242.html.
- China Geological Survey. A major breakthrough in the survey of coal measures and gas in Liupanshui, Guizhou[EB/OL]. (2017-07-25). http://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201707/t20170725_436242.html.
- [14] 胡国艺, 张水昌, 田华, 陈建平, 田兴旺, 王飞宇, 等. 不同母质类型烃源岩排气效率[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 45-52.
- Hu Guoyi, Zhang Shuichang, Tian Hua, Chen Jianping, Tian Xingwang, Wang Feiyu, et al. Gas relative expulsion efficiency of source rocks with different types of kerogen[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 45-52.
- [15] 钟建华, 王书宝, 孙玉凯, 吴琼玲, 汤晶, 邵珠福, 等. 煤系致密砂岩气藏的一种可能成藏机理: 自生自储——以延长和吐哈气田为例[C]//第十二届全国古地理学及沉积学学术会议论文集. 青岛: 中国地质学会, 2012.
- Zhong Jianhua, Wang Shubao, Sun Yukai, Wu Qiongleng, Tang Jing, Shao Zhufu, et al. A possible mechanism of reservoir formation in tight sandstone gas reservoirs of coal measures: Self generating and self storing—Taking Yanchang and Tuha gas fields as an example[C]//12th National Conference of Palaeogeography and Sedimentology Qingdao: Geological Society of China, 2012.
- [16] 杨玉平, 钟建华, 孙玉凯, 王劲松, 范莉红, 倪良田, 等. 吐哈盆地水西沟群“近生近储”型致密砂岩气藏特征及其成藏机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 34-41.
- Yang Yuping, Zhong Jianhua, Sun Yukai, Wang Jinsong, Fan Lihong, Ni Liangtian, et al. Discussion on characteristics and accumulation mechanisms of 'proximal generation and proximal-storage' type tight sandstone gas accumulations in Shuixigou Group, Turpan-Hami Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 34-41.
- [17] 杨兆彪, 秦勇, 高弟, 王斌. 煤层群条件下的煤层气成藏特征[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 22-26.
- Yang Zhaobiao, Qin Yong, Gao Di & Wang Bin. Coalbed methane (CBM) reservoir-forming character under conditions of coal seam groups[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 22-26.
- [18] Zhou FD, Shields D, Titheridge D, Tyson S & Esterle J. Understanding the geometry and distribution of fluvial channel sandstones and coal in the Walloon Coal Measures, Surat Basin, Australia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 573-586.
- [19] 郑书洁. 临兴地区煤系生储盖组合及其层序地层格架控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- Zheng Shujie. Source-reservoir-cap rock assemblages and sequence stratigraphic framework control in coal measures of Linxing area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [20] 秦勇, 梁建设, 申建, 柳迎红, 王存武. 沁水盆地南部致密砂岩和页岩的气测显示与气藏类型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1559-1565.
- Qin Yong, Liang Jianshe, Shen Jian, Liu Yinghong & Wang Cunwu. Gas logging shows and gas reservoir types in tight sandstones and shales from Southern Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1559-1565.
- [21] 袁学旭. 多煤层含气系统识别研究——以黔西上二叠统为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- Yuan Xuexu. Recognition of multi-coalbed methane bearing system: A case study of coal-bearing strata of Upper Permian in western Guizhou[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [22] 杨光. 临兴区块石炭二叠纪煤系流体压力系统及其沉积层序控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- Yang Guang. Fluid pressure system and sequence control of Permo-Carboniferous coal series in Linxing Block[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [23] 易同生, 包书景, 陈捷, 付炜. 黔北煤田林华矿煤系气成藏特征及开发方式[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(9): 23-30.
- Yi Tongsheng, Bao Shujing, Chen Jie & Fu Wei. Coal measures gas reservoiring features and exploitation pattern in Linhua coalmine, Qianbei Coalfield[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(9): 23-30.
- [24] Wang G, Qin Y, Xie YW, Shen J, Han BB, Huang B, et al. The division and geologic controlling factors of a vertical superimposed coalbed methane system in the northern Gujiao blocks, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 379-

- 389.
- [25] Zhang Z, Qin Y, Fu XH, Yang ZB & Guo C. Multi-layer superposed coalbed methane system in southern Qinshui Basin, Shanxi Province, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(3): 391-398.
- [26] 傅雪海, 葛燕燕, 梁文庆, 李升. 多层叠置含煤层气系统递进排采的压力控制及流体效应[J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 35-39.
- Fu Xuehai, Ge Yanyan, Liang Wenqing & Li Sheng. Pressure control and fluid effect of progressive drainage of multiple superposed CBM system[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(11): 35-39.
- [27] 杨兆彪, 秦勇, 陈世悦, 刘长江. 多煤层储层能量垂向分布特征及控制机理[J]. *地质学报*, 2013, 87(1): 139-144.
- Yang Zhaobiao, Qin Yong, Chen Shiyue & Liu Changjiang. Controlling mechanism and vertical distribution characteristics of reservoir energy of multi-coalbeds[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(1): 139-144.
- [28] Shen YL, Qin Y, Wang GGX, Guo SJ, Shen J, Gu JY, et al. Sedimentary control on the formation of a multi-superimposed gas system in the development of key layers in the sequence framework[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 268-281.
- [29] 王鹏. 沁水盆地石炭一二叠系煤系地层游离气多赋存类型依存关系定量分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- Wang Peng. Quantitative analysis of free gas occurrence types in coal seams in the Permo-Carboniferous in Qinshui Basin[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [30] 梁宏斌, 林玉祥, 钱铮, 刘建军, 于腾飞. 沁水盆地南部煤系地层吸附气与游离气共生成藏研究[J]. *中国石油勘探*, 2011, 16(2): 72-78.
- Liang Hongbin, Lin Yuxiang, Qian Zheng, Liu Jianjun & Yu Tengfei. Study on coexistence of absorbed gas and free gas in coal strata south of Qinshui Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2011, 16(2): 72-78.
- [31] 王江涛. 鄂尔多斯盆地靖边地区上古生界致密气成藏机理与富集规律[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
- Wang Jiangtao. Accumulation mechanism and enrichment regulation of Upper Paleozoic tight gas reservoirs in Jingbian area, Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [32] 谢英刚, 秦勇, 叶建平, 潘新志, 高丽军, 段长江. 临兴地区上古生界煤系致密砂岩气成藏条件分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 181-191.
- Xie Yinggang, Qin Yong, Ye Jianping, Pan Xinzhi, Gao Lijun & Duan Changjiang. Accumulation conditions of tight gas in the Upper Paleozoic of Linxing Block[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 181-191.
- [33] 孟尚志, 侯冰, 张健, 谭鹏, 熊振宇. 煤系“三气”共采产层组压裂缝扩展物模试验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 221-227.
- Meng Shangzhi, Hou Bing, Zhang Jian, Tan Peng & Xiong Zhenyu. Experimental research on hydraulic fracture propagation through mixed layers of shale, tight sand and coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 221-227.
- [34] Van As D, Bottomley W & Furniss JP. The characterisation of differential depletion in a thinly layered coal seam gas reservoir using packer inflation bleed off tests PIBOTs[C]//SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, 17-19 October 2017, Jakarta, Indonesia. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/186909-MS>.
- [35] 魏娟, 王朋飞. 澳大利亚昆士兰州煤层气的开发概况(一)[J]. *非常规能源信息*, 2017(3): 6-11.
- Wei Juan & Wang Pengfei. Coalbed methane development of Queensland in Australia (1)[J]. *Non-conventional Energy Information*, 2017(3): 6-11.
- [36] Martin MA, Wakefield M, MacPhail MK, Pearce T & Edwards HE. Sedimentology and stratigraphy of an intra-cratonic basin coal seam gas play: Walloon Subgroup of the Surat Basin, eastern Australia[J]. *Petroleum Geoscience*, 2013, 19(1): 21-38.
- [37] Mazumder S, Jiang J, Sharma V & Sugiarto I. Production data analysis of CBM wells in Surat Basin[C]//SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition—Asia Pacific, 11-13 November 2013, Brisbane, Australia. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/167076-MS>.
- [38] Damien R, Andrew H, Leon E & Paul W. The Walloon coal seam gas play, Surat Basin, Queensland[J]. *The APPEA Journal*, 2012, 52(1): 273-290.
- [39] 秦勇. 化石能源地质学导论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017.
- Qin Yong. Introduction to fossil energy geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2017.
- [40] Shen YL, Qin Y, Guo YH, Yi TS, Yuan XX & Shao YB. Characteristics and sedimentary control of a coalbed methane-bearing system in Lopingian (Late Permian) coal-bearing strata of western Guizhou Province[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 8-17.
- [41] 陆加敏, 刘超. 断陷盆地致密砂砾岩气成藏条件和资源潜力——以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统沙河子组为例[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(2): 53-60.
- Lu Jiamin & Liu Chao. Accumulation conditions and resource potential of tight glutenite gas in fault depression basins: A case study on Lower Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(2): 53-60.
- [42] 童晓光, 郭彬程, 李建忠, 黄福喜. 中美致密砂岩气成藏分布异同点比较研究与意义[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(6): 9-15.
- Tong Xiaoguang, Guo Bincheng, Li Jianzhong & Huang Fuxi. Comparison study on accumulation & distribution of tight sandstone gas between China and the United States and its significance[J]. *Engineering Science*, 2012, 14(6): 9-15.
- [43] 李建忠, 郭彬程, 郑民, 杨涛. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 607-615.
- Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min & Yang Tao. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 607-615.
- [44] 杨华, 刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J]. *石油*

- 勘探与开发, 2014, 41(2): 129-137.
- Yang Hua & Liu Xinshe. Progress of Paleozoic coal-derived gas exploration in Ordos Basin, West China[J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(2): 129-137.
- [45] 陶士振, 邹才能, 陶小晚, 黄纯虎, 张响响, 高晓辉, 等. 川中须家河组流体包裹体与天然气成藏机理 [J]. 矿物岩石地球化通报, 2009, 28(1): 2-11.
- Tao Shizhen, Zou Caineng, Tao Xiaowan, Huang Chunhu, Zhang Xiangxiang, Gao Xiaohui, et al. Study on fluid inclusion and gas accumulation mechanism of Xujiahe Formation of Upper Triassic in the central Sichuan Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(1): 2-11.
- [46] 郝蜀民, 李良, 张威, 齐荣, 马超, 陈敬轶. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系一二叠系大型气田形成条件 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 149-154.
- Hao Shumin, Li Liang, Zhang Wei, Qi Rong, Ma Chao & Chen Jingyi. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 149-154.
- [47] 于兴河, 李顺利, 杨志浩. 致密砂岩气储层的沉积—成岩成因机理探讨与热点问题 [J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 1-13.
- Yu Xinghe, Li Shunli & Yang Zhihao. Discussion on deposition-diagenesis genetic mechanism and hot issues of tight sandstone gas reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(1): 1-13.
- [48] 帅燕华, 张水昌, 高阳, 卢鸿, 陈建平, 米敬奎, 等. 煤系有机质生气行为对储层致密化的可能影响及量化评价 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2013, 43(7): 1149-1155.
- Shuai Yanhua, Zhang Shuichang, Gao Yang, Lu Hong, Chen Jianping, Mi Jingkui, et al. Effect and quantitative evaluation of CO₂ derived from organic matter in coal on the formation of tight sandstone reservoirs[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(7): 756-762.
- [49] 杨霄宇. 鸡西盆地致密油气形成条件及资源潜力分析 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- Yang Xiaoyu. The forming condition and resource potential analysis of tight oil and gas in Jixi Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [50] 赵佳楠, 姜文斌. 鄂尔多斯盆地延长气田山西组致密砂岩储层特征 [J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(5): 22-28.
- Zhao Jianan & Jiang Wenbin. Characteristics of tight sandstone of Shanxi formation reservoir in the Yanchang gas field, Ordos Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(5): 22-28.
- [51] 郑书洁, 秦勇, 孙泽飞, 杨光. 鄂尔多斯盆地东北缘上古生界煤系致密砂岩储层岩石学特征 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2015, 45(增刊 1): 1515-1516.
- Zheng Shujie, Qin Yong, Sun Zefei & Yang Guang. Petrology of tight sandstone reservoirs in the Upper Paleozoic coal series from the northeastern margin of Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(S1): 1515-1516.
- [52] 秦红, 戴琦雯, 袁文芳, 刘洛夫, 曹少芳, 苏天喜, 等. 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统煤系地层致密砂岩储层特征 [J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(5): 67-77.
- Qin Hong, Dai Qiwen, Yuan Wenfang, Liu Luofu, Cao Shaofang, Su Tianxi, et al. Reservoir bed characteristics of tight sandstones within coal measure strata of the Lower Jurassic in the eastern Kuqa Depression, Tarim Basin, China[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(5): 67-77.
- [53] 闫新义. 砂岩致密化形成机理探讨——以鄂尔多斯盆地东部山西组为例 [D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- Yan Xinyi. The discussion of mechanism of tight sandstone's formation—by Shanxi Formation of the eastern part of the Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
- [54] Marley NA, Bennet P, Janecky DR & Gaffney JS. Spectroscopic evidence for organic diacid complexation with dissolved silica in aqueous systems—I. oxalic acid[J]. Organic Geochemistry, 1989, 14(5): 525-528.
- [55] 钟建华. 煤系砂页岩储层特征及有利区带评价 [R]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2018.
- Zhong Jianhua. Sandstone and shale reservoir characteristics and favorable zone evaluation of coal measures[R]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [56] 欧阳永林, 孙斌, 王勃, 田文广, 赵洋, 曹海霄. 煤层气封闭体系及其与煤层气富集的关系 [J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 19-27.
- Ouyang Yonglin, Sun Bin, Wang Bo, Tian Wenguang, Zhao Yang & Cao Haixiao. CBM sealing system and its relationship with CBM enrichment[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 19-27.
- [57] 朱炎铭, 侯晓伟, 崔兆帮, 刘刚. 河北省煤系天然气资源及其成藏作用 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 202-211.
- Zhu Yanming, Hou Xiaowei, Cui Zhaobang & Liu Gang. Resources and reservoir formation of unconventional gas in coal measure, Hebei Province[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 202-211.
- [58] 曹代勇, 刘亢, 刘金城, 徐浩, 李靖, 秦国红. 鄂尔多斯盆地西缘煤系非常规气共生组合特征 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 277-285.
- Cao Daiyong, Liu Kang, Liu Jincheng, Xu Hao, Li Jing & Qin Guohong. Combination characteristics of unconventional gas in coal measure in the west margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 277-285.
- [59] 姚海鹏. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代煤系非常规天然气耦合成藏机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- Yao Haipeng. Study on the accumulation mechanism of the unconventional natural gas in Late Paleozoic coal bearing strata of the northern part of the Ordos Basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [60] 秦勇, 傅雪海, 韦重韬, 侯泉林, 姜波. 煤层气成藏动力条件及其控藏效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- Qin Yong, Fu Xuehai, Wei Chongtao, Hou Quanlin & Jiang Bo. The dynamic conditions of coalbed methane accumulation and its controlling effect[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [61] 秦勇, 高弟, 吴财芳. 贵州省煤层气资源潜力及其预测及其评价 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
- Qin Yong, Gao Di & Wu Caifang. Coalbed methane resources potential and prediction evaluation of Guizhou Province[M]. Xu-

- zhou: China University of Mining and Technology Press, 2012.
- [62] 陶士振, 李昌伟, 黄纯虎, 曾溅辉, 张响响, 杨春, 等. 煤系致密砂岩气运聚动力与二维可视化物理模拟研究——以川中地区三叠系须家河组致密砂岩气为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(10): 1767-1777.
- Tao Shizhen, Li Changwei, Huang Chunhu, Zeng Jianhui, Zhang Xiangxiang, Yang Chun, et al. Migration and accumulation impetus and two-dimension visual physical simulation research of coal-measure tight sandstone gas: A case study from tight sandstone gas in the Upper Triassic Xujiahe Formation, central Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(10): 1767-1777.
- [63] 戴金星, 陈践发, 钟宁宁. 中国大气田及其气源[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Dai Jinxing, Chen Jianfa & Zhong Ningning. China's large gas fields and gas source[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [64] 戴金星, 邹才能, 陶士振, 刘全有, 周庆华, 胡安平, 等. 中国大气田形成条件和主控因素[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 473-484.
- Dai Jinxing, Zou Caineng, Tao Shizhen, Liu Quanyou, Zhou Qinghua, Hu Anping, et al. Formation conditions and main controlling factors of large gas fields in China[J]. Natural Gas Geosciences, 2007, 18(4): 473-484.
- [65] 杨海星. 沁水盆地煤系地层游离气输导体系研究——以沁南地区为例[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
- Yang Haixing. Research on migration system of free gas of coal-bearing strata in Qinshui Basin—An example from southern Qinshui area[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [66] 魏国齐, 李剑, 张水昌, 谢增业, 杨威, 王东良, 等. 中国天然气基础地质理论问题研究新进展[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 6-14.
- Wei Guoqi, Li Jian, Zhang Shuichang, Xie Zengye, Yang Wei, Wang Dongliang, et al. New progress in the studies on basic geological theories of natural gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 6-14.
- [67] 郑海桥. 鄂尔多斯盆地中部上古生界天然气充注能力评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- Zheng Haiqiao. Gas charging ability evaluation of the Upper Palaeozoic Group in the middle of Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [68] 王倩. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界天然气成藏动力研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
- Wang Qian. The Study on gas accumulation dynamics of Upper Paleozoic in the southwestern area of Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.
- [69] 赵黎明, 刘建军, 刘晓贵, 魏宁, 林玉祥, 吴玉琛. 沁水盆地煤系地层游离气的运移途径分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2015, 12(23): 17-21.
- Zhao Liming, Liu Jianjun, Liu Xiaogui, Wei Ning, Lin Yuxiang & Wu Yuchen. Analysis of migration ways of free gas in the coalbed strata of Qinshui Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(23): 17-21.
- [70] 郝蜀民, 惠宽洋, 李良. 鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 762-768.
- Hao Shumin, Hui Kuanyang & Li Liang. Reservoiring features of Daniudi low-permeability gas field in Ordos Basin and its exploration and development technologies[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 762-768.
- [71] 秦勇, 熊孟辉, 易同生, 杨兆彪, 吴财芳. 论多层叠置独立含煤层气系统: 以贵州织金—纳雍煤田水公河向斜为例[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 65-70.
- Qin Yong, Xiong Menghui, Yi Tongsheng, Yang Zhaobiao & Wu Caifang. On unattached multiple superposed coalbed-methane system: In a case of the Shuigonghe Syncline, Zhijin-Nayong Coal Field, Guizhou[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 65-70.
- [72] Qin Y, Moore TA, Shen J, Yang ZB, Shen YL & Wang G. Resources and geology of coalbed methane in China: A review[J]. International Geology Review, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2017.1408034>.
- [73] 杨兆彪. 多煤层叠置条件下的煤层气成藏作用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- Yang Zhaobiao. Coalbed methane reservoiring process under condition of multi-coalbed overlay[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [74] 沈玉林, 秦勇, 郭英海, 任海鹰, 魏展航, 谢国梁. 黔西上二叠统含煤层气系统特征及其沉积控制[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 427-432.
- Shen Yulin, Qin Yong, Guo Yinghai, Ren Haiying, Wei Zhanhang & Xie Guoliang. The Upper Permian coalbed methane bearing system and its sedimentary control in western Guizhou, China[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 427-432.
- [75] 沈玉林, 秦勇, 郭英海, 易同生, 邵玉宝, 金洪波, 等. “多层叠置独立含煤层气系统”形成的沉积控制因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(3): 573-579.
- Shen Yulin, Qin Yong, Guo Yinghai, Yi Tongsheng, Shao Yubao, Jin Hongbo, et al. Sedimentary controlling factor of unattached multiple superimposed coalbed-methane system formation[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(3): 573-579.
- [76] 易同生, 周效志, 金军. 黔西松河井田龙潭煤系煤层气一致密气成藏特征及共探共采技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 212-220.
- Yi Tongsheng, Zhou Xiaozhi & Jin Jun. Reservoir formation characteristics and co-exploration and concurrent production technology of Longtan coal measure coalbed methane and tight gas in Songhe Field, western Guizhou[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 212-220.
- [77] 沈玉林, 秦勇, 李壮福, 金军, 魏展航, 郑俊, 等. 黔西上二叠统龙潭组菱铁矿层的沉积成因及地质意义[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 152-161.
- Shen Yulin, Qin Yong, Li Zhuangfu, Jin Jun, Wei Zhanhang, Zheng Jun, et al. The sedimentary origin and geological significance of siderite in the Longtan Formation of western Guizhou Province[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 152-161.

- [78] 郭晨. 多层叠置含煤层气系统及其开发模式优化——以黔西比德—三塘盆地上二叠统为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- Guo Chen. A multi-layer superimposed CBM bearing system and its development mode optimization: Taking the Upper Permian of Bide-Santang Basin in western Guizhou as an example[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [79] 肖骞, 沈玉林, 秦勇, 申建, 顾娇杨, 张春良. 鄂尔多斯盆地东北缘叠置含气系统中菱铁质泥岩测井识别及地质意义[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(4): 590-601.
- Xiao Qian, Shen Yulin, Qin Yong, Shen Jian, Gu Jiaoyang & Zhang Chunliang. The logging identification and the geological significance of the mudstone containing siderite in multiple superposed coalbed-methane system in northeastern area of the Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(4): 590-601.
- [80] 肖骞. 黔西盘关—土城向斜龙潭组含菱铁矿层测井识别及封盖性评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- Xiao Qian. Logging identification and sealing evaluation of siderite-bearing layers in Longtan Formation from Panguan-Tucheng syncline, western Guizhou[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [81] 沈玉林. 叠置含煤层气系统关键层高分辨识别[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- Shen Yulin. High resolution identification for the key layer of superimposed CBM system[R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [82] 张政. 沁水盆地南部太原组含煤层气系统及其排采优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- Zhang Zheng. Coalbed methane system and drainage optimization of Taiyuan Formation in southern Qinshui Basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [83] 汪岗. 古交区块石炭二叠系含煤层气系统[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- Wang Gang. Coalbed methane system in the Permo-Carboniferous strata from Gujiao Block, Shanxi, China[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [84] 秦勇. 叠置煤层气系统描述与适应性开发方式[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- Qin Yong. Description and adaptive development pattern of superimposed coalbed methane system[R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [85] 杨兆彪. 叠置含煤层气系统富水性及流体压力分布特征[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- Yang Zhaobiao. Water richness and fluid pressure distribution in superimposed CBM system[R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [86] 李辛子, 王运海, 姜昭琛, 陈贞龙, 王立志, 吴群. 深部煤层气勘探开发进展与研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 24-31.
- Li Xinzi, Wang Yunhai, Jiang Zhaochen, Chen Zhenlong, Wang Lizhi & Wu Qun. Progress and study on exploration and production for deep coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 24-31.

(收稿日期 2018-02-25 编辑 韩晓渝)

上海石油天然气交易中心天然气保供预售将启动

上海石油天然气交易中心将于近日推出天然气预售交易和 LNG 冬季窗口期第三方开放业务, 以此保障冬季天然气市场供应。

据悉, 上海石油天然气交易中心自 2016 年 11 月正式运行以来, 通过市场化运作, 积极探讨解决制约石油天然气行业发展的深层次矛盾和问题, 促进石油天然气行业持续健康发展。2017 年下半年, 交易中心进行了部分天然气竞价交易, 在发现价格的同时, 也暴露出供需矛盾, 促使上下游用户及早签订保供合同, 调动上游企业积极签订海外采购合同的积极性和预见性。

2018 年, 交易中心将继续做大做强天然气现货交易业务, 拟在今年 4 月推出天然气产能预售和 LNG 冬季窗口期向第三方开放业务。产能预售类似中远期交易, 主要对接现货贸易的年度合同和月度合同, 上下游客户可以为未来某个时段的天然气供需确定合同, 提前锁定冬季的天然气供应量; 但预售交易目前暂不能转手, 需在未来时机成熟时再开通这一功能。

同时, 石油天然气行业也正加快弥补仓储的短板。近日, 中国石油流通协会宣布成立仓储物流专业委员会, 旨在搭建业务对接、信息交易平台, 进一步促进行业的健康发展。

目前, 上海石油天然气交易中心已跻身亚洲最大的天然气现货交易中心。2017 年, 上海石油天然气交易中心的天然气交易量达到 512 亿立方米, 交易中心的会员数量已突破 1 600 家。

(天工 摘编自《中国石油报》)