

中国煤层气成藏作用研究进展与述评

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, 徐州 221116

摘要: 中国以成藏作用为核心的煤层气基础地质研究近些年取得显著进展。本源菌条件下褐煤生物气模拟、矿物/元素催化生气作用、无烟煤层重烃极度异常原因、煤层次生生物气等的研究成果,深化了对煤层气多元化成因的学术认识。在更为广泛的盆地和更加深入的层次上探讨了煤层气成藏作用的宏观地质过程及其控制因素,经典煤层气成藏作用理论得到发展。提出了原创性的煤层气成藏效应研究思路,从地层能量角度探讨了煤层气成藏作用的实质,提出了某些新的学术观点,初步探讨了深部煤层气成藏作用的特殊性。我国煤层气地质条件复杂多变,诸多基础地质问题尚待解决,近期探讨的重点在于宏观动力学方面的地应力场效应和深度效应,以及微观动力条件方面的煤级效应和粒度效应,涉及到深部、构造煤、低煤级煤等资源量巨大的煤层气成藏领域。同时,含煤地层非常规气(煤系气)的共生成藏关系以及共采中的基础地质问题,也将是今后的一个重点研究方向。

关键词: 中国;煤层气;成因;成藏作用;成藏效应;进展

中图分类号: P618.11

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2012)03-0405-14

Advances and Reviews on Coalbed Methane Reservoir Formation in China

QIN Yong

Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process (CUMT), Ministry of Education,
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Basic geological research of coalbed methane (CBM) in China, taking the reservoir formation as a key, has made significant progress in recent years. The researches such as the biogenic gas simulation of the lignite samples under the condition of coalbed-derived methanogen, catalytic CBM generation from mineral and element, origin of extremely abnormal heavy hydrocarbons in anthracite seam, and secondary biogenic CBM, deepened greatly the academic understanding of the diverse CBM origins in China. Macro-process and its geological controls of the CBM reservoir formation were discussed in the more basins and deeper level, which promoted the development of the classical CBM reservoir formation theories. Based on the original ideas, the essence of the CBM reservoir formation was studied in the light of the formation energy, some new academic viewpoints were suggested, and the particularity of the deep CBM reservoir formation was investigated. Geological conditions of CBM in China are complex and changeable and many basic geological problems need to be further resolved. It was suggested that the recent exploration should focus on four aspects including the geo-stress field, burial depth, coal-rank and granularity effects. The first two effects belong to the macro-dynamics of CBM reservoir formation and the latter two to the micro-dynamics, which involves to the fields of the deep, tectonically deformed and low-rank coal reservoirs with a huge amount of CBM resources. Meanwhile, the basic geological problems related to the paragenetic reservoiring and co-mining of the unconventional natural gases in coal-bearing strata (coal-measures gas) will also be a focus of the CBM research in the future.

Key words: China; coalbed methane; origin; reservoir formation; reservoiring effect; advance

First author: QIN Yong, Ph.D. & Professor; E-mail: yongqin@cumt.edu.cn

收稿日期: 2012-05-20; 修回日期: 2012-06-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40730422)和国家科技重大专项项目(2011ZX05034)联合资助

作者简介: 秦勇,男,1957年生,博士,教授,煤层气地质研究方向; E-mail: yongqin@cumt.edu.cn

我国2011年煤层气产量突破百亿立方米大关,目前处于从煤层气资源大国向资源开发强国转型的关键阶段。国内先前大量的基础研究工作,为目前时代的到来做出了重要贡献(秦勇,2003,2006;汤达桢等,2003;宋岩等,2005;秦勇和朱旺喜,2006)。近十年来,我国煤层气地质研究进入了新的发展时期,以成藏效应为核心的基础地质研究深化了关于煤层气地质特点的基本认识,以非均质性为核心的煤储层地质研究进一步向精细化方向拓展,以地层能量为核心的勘查地质研究有效提高了煤层气选区成功率,以产能要素为核心的煤层气开采地质研究为研发适应性技术奠定了基础,信息海量,文献量巨大。鉴于此,本文仅以煤层气成藏效应为核心,分析与评述我国近年来煤层气基础地质研究主要进展,简要讨论该领域近期和中期的研究重点及发展方向。

1 关于煤层气多元化成因的进一步探讨

煤层气以热成因为主,但其成因的多元化是客观存在的,如微生物成因、深部气成因、无机质催化成因等,是国际天然气地质界多年来探讨的热点之一(秦勇,2005)。然而,国内外前期关于煤层气生物成因的模拟研究多采用异源菌接种方法,所得认识与地层条件存在差距,难以支撑对相关科学问题的深入理解;煤中矿物/金属元素对煤层气生成的催化作用研究尚处于起步阶段,争议颇多,许多科学问题尚未得到澄清;新发现无烟煤层中存在的重烃浓度极端异常,用现有理论无法解释;低煤级煤层中次生生物气及其对资源的补充效应,在我国得到逐步重视。国内近年来对此开展了较多研究,取得某些新的成果。

1.1 本源菌条件下的褐煤生物气生成行为与机理

美国、澳大利亚等十分重视本源菌条件下的煤层生物气研究,讨论深度达到产甲烷菌基因分析层次(Donald et al., 2008; Li et al., 2008; Michael et al., 2008; Steve et al., 2008)。通过研究,取得了三方面主要认识:其一,证实了煤层中存在活性产甲烷菌,煤层可以作为生物气生

产基质;其二,对比已有系统发育树数据库,确定了含煤地层产甲烷菌的种类和性质;其三,利用培养得到的活性产甲烷菌进行产气模拟实验,讨论了煤层生物气产生的过程和机理。然而,国外研究几乎均是从煤层伴生水中富集培养产甲烷菌,未见直接从煤中分离培养本源菌的研究成果报道。

国内对地质样品厌氧菌培养计数的研究成果并不鲜见,开展过非煤烃源岩本源菌生气模拟实验(丁安娜等,1995;夏遵义和白志强,2004)。前期的煤层生物气研究是基于“异源菌”的生气模拟,利用悬浮接种方法诱导煤层生物气的生成(李明宅和张辉,1998;刘洪林等,2006a),也进行过褐煤样品发酵菌的检测计数(高玲和宋进,1998)。2008年以来,启动了基于本源菌的煤层生物气探讨,从褐煤样品本身富集和扩大培养产甲烷菌群,开展了为期130 d的褐煤生物气生成模拟实验,获得了褐煤生物气生成过程中各种厌氧细菌、微生物酶、中间产物和生物气地球化学特征的变化数据,从本源菌微生物地球化学角度阐释了煤层生物气的形成机理(王爱宽,2010)。

基于本源菌研究的褐煤样品采自滇东昭通盆地新近系煤层,通过研究取得如下主要认识(王爱宽,2010,2012;王爱宽等,2010,2012):

1)发现褐煤样品中存在本源活性厌氧细菌,以厌氧纤维素分解菌为主,硫酸盐还原菌极少,成功富集到以革兰氏阳性杆菌为本源产甲烷菌。本源菌经过适应期后,能够利用褐煤有机质大量生气。发现褐煤在本源菌作用下经历了两个产气周期,第一周期为腐殖组产气,第二周期是惰质组、稳定组产气。认为褐煤中产甲烷菌数量和腐殖组含量直接影响生气潜力,矿物质对生气量影响明显;第一周期甲烷生成机理是乙酸发酵,第二周期有二氧化碳还原作用参与。

2)发现本源菌作用所生成甲烷的碳、氢同位素均处于次生生物气正常范围。碳同位素组成随生物降解时间的延长而变轻,主要受褐煤底物类型和甲烷生成途径控制, $^{13}\text{C}_1$ 有从原煤向生物气中迁移的明显特征,认为母源继承关系和显微组分构成是造成迁移行为差异的重要原因。发现在厌

氧菌降解作用下，褐煤族组分中饱和烃是微生物降解产物的主要成分，厌氧细菌对偶数碳烷烃的降解能力更强，对正构烷烃的降解能力强于对异构烷烃的降解，低碳数正构烷烃受降解的程度高于高碳数烷烃，降解后期长链烷烃才受到明显的生物降解作用。

3) 认为褐煤生物气产出是多种微生物共同作用的结果。随着降解活动的进行，体系中优势微生物、生物酶发生改变和更替，引起pH值和挥发性脂肪酸(VFA)含量变化。在降解初期，发酵细菌为优势菌种，产甲烷菌和辅酶F420活性受到酸性物质的抑制。随后，产氢产乙酸菌成为优势菌种，它们利用发酵细菌代谢产物产生乙酸和氢，两者之间具有食物链关系。辅酶F420活性在静止期后增长迅速，并在产气高峰期达到最大，体现本源产甲烷菌对褐煤本身具有良好的适应性，是评价产气量高低的有效指标。

4) 通过改变生气条件，研究了底物类型、粒度、矿井水和煤矸石对褐煤生物气生成的影响。结果表明，不同配比的酵母浸出液、甲醇和乙酸钠溶液对生物气生成具有抑制或激活作用，较小粒度褐煤有利于提高生气率，不同比例矿井水的添加能够有效增加次生生物气产量，煤矸石本身不能作为基质被厌氧菌利用。

1.2 煤层气生成过程中的矿物/元素催化作用

上世纪80年代以来，学术界在肯定天然气(包括煤层气)热成因和微生物成因的同时，在其矿物/元素催化成因方面做了大量探讨(Dembieki, 1990; 高先志等, 1990; Hunt, 1991; 曹慧缙等, 1991; 李忠, 1992; 张国防等, 1993; Andresen et al., 1993; Lewan, 1993; Price and Schoel, 1995; Mango and Hightower, 1997; 张景廉和张平中, 1996)。随着研究的不断深入，某些研究者肯定了无机质催化作用的重要性(Medina, 2000; 刘文汇, 2000; Butala et al., 2000; Ramaswamy, 2002; 李术元等, 2002; 宁占武等, 2004; 卢红选等, 2007; 肖芝华等, 2008)，但一些学者发现某些矿物对天然气生成起着抑制作用(赵桂瑜等, 2005)，甚至对催化作用做出了全盘否定的结论(Michels et al., 2002)。同时，前人的研究多局限于单一矿物/元

素对煤层气形成的催化效应，对催化生气过程中无机质之间的相互作用极少考虑。

国内近年来以黔西—滇东地区上二叠统煤层为对象，就此方向的现存科学问题进行了模拟研究。选择煤级相对较低、含丰富过渡金属元素且灰分产率较低的贵州水城大河边矿11号煤层的气煤样品作为模拟实验原样，添加化学纯金属钼粉、天然黄铁矿单体矿粉构成4个系列的模拟实验样品，采用黄金管-高压釜模拟装置在两种不同升温速率条件下开展模拟实验，增进了对钼和黄铁矿促进(正催化作用)或抑制(反催化作用)有机质生烃现象的了解，讨论了其催化作用机理(吴艳艳等, 2009; 吴艳艳, 2011; 吴艳艳等, 2012a, b)：

1) 发现黄铁矿对甲烷生成具有显著的促进作用；同时添加黄铁矿和钼时，模拟气含有更多数量的重烃气，并有利于烯烃的产出；钼的添加显著促进了C₇—C₁₄的生成，但同时添加黄铁矿则会使C₇—C₁₄产率降低；黄铁矿和钼的加入，影响到芳烃的产率高峰；较高的过渡金属单质含量对煤本身含有的硫元素转化为硫化氢气体有抑制作用。在中-高温范围内，催化剂对有机质生烃具有催化作用，升温条件能明显影响黄铁矿对芳烃、饱和烃和沥青质的催化效应，反映古地温场条件是催化生烃的一个重要影响因素。

2) 发现催化生烃过程中烃气碳同位素呈规律性演化。大河边气煤样品模拟气甲烷碳同位素组成变化范围与华南煤层气的分布范围一致(秦勇等, 1998)，指示煤层气催化成因可能具有普遍意义。黄铁矿与钼的添加导致甲烷碳同位素组成明显偏重。随模拟温度增加，甲烷同位素经历了先变轻再变重的过程，4个系列样品均表现出Pr/nC₁₇，Ph/nC₁₈和Pr/Ph比值降低的共同特征。同一模拟温度段产生的甲烷及其同系物，具有 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 的特征。

3) 分析了煤中矿物/金属元素催化生烃的动力学过程，建立了由矿物/元素地球化学和油气地球化学指标构成的催化成因煤层气判识模式。计算了催化生气过程中甲烷及总气态烃生成的动力学参数，发现原煤添加矿物/金属元素可降低生气所需要的反应活化能，从而对甲烷生成起到催化作

用。结合黔西—滇东上二叠统煤层埋藏受热史,估算了煤在不同地质时期的催化产气率。

1.3 煤层有机封闭微环境对重烃气演化的迟滞效应

黔西织纳煤田某些向斜的无烟煤层中重烃气浓度极端异常,前人关于煤层重烃气成因的各种学说或假说,如煤岩组分控制论、生烃阶段控制论、煤层气运移分馏论、油型气混入论、地幔气混入论、水-岩作用费托合成(FTT)论等,对其地质成因均无法解释。为此,国内研究者近年来从煤地质学、构造地质学、油气地球化学等方面对此进行考察。其中,对区内钻孔和矿井煤样煤层气解吸按自然、常温、加热、粉碎加热四大阶段密集采收气样,开展常规和稀有气体组分以及烃气单体、二氧化碳、稀有气体同位素检测。分析初步资料,结合煤化作用史以及含煤地层脉体包裹体分析,就织纳煤田煤层重烃异常成因形成了全新认识(秦勇等,2012^①)。

研究发现,随解吸过程的逐渐进行,烃气(包括重烃)浓度显著增高,重烃气主要产出在加热解吸和粉碎加热解吸阶段,尤其是在粉碎加热阶段重烃浓度急剧增高。煤中存在大量呈“孤立”形式产出的死孔或封闭孔,一般占总孔容的60%以上,在高煤级阶段随煤化程度的增高而急剧增高,到无烟煤阶段可达80%以上(Alexeev et al., 1999)。在粉碎之前的自然解吸、常温解吸和加热解吸阶段,所解吸的煤层气应全部来自“开放”连通孔隙,粉碎后解吸的煤层气则来自于互不连通的“死孔”。为此,重烃气浓度在粉碎加热阶段急剧增高的解吸事实揭示,织纳煤田煤层重烃主要赋存于煤中极微孔和死孔,是煤化作用定型或生气作用结束之前的产物。

那么,织纳煤田的煤层重烃有无可能来自于深部无机成因?在天然气中,氦气往往来自于地壳深部,是煤层经受岩浆期后热液作用的标志。气体组分检测结果显示,织纳煤样解吸过程中,氦气浓度与重烃浓度的变化趋势截然相反,指示氦气与重烃之间没有必然的成因联系,煤层重烃并非来源于深部气。煤层中的氮气多来自大气,是煤层气风化作用的标志。织纳煤样解吸过程中

氮气浓度显著降低、二氧化碳浓度变化不大、加热和粉碎解吸阶段氮气浓度较低,煤层甲烷碳氢同位素组成大部分落在有机成因气范畴。也就是说,织纳煤田煤层重烃形成于煤中有机质的降解生气,煤样也基本上没有受到风化作用的影响。

织纳煤田含煤地层碳酸盐岩脉体包裹体形成于两个地质时期。第一期为原位注入,发生在深成变质作用阶段,包裹体重烃气(C_1-C_4)浓度达到20.73%~49.70%,甲烷碳同位素为-32.9‰~-35.1‰,一方面指示煤层重烃形成于生烃高峰期结束之前,另一方面表明煤层气具有有机成因,同时也指示碳酸盐岩包裹体“保护”了重烃免受地质历史中较高地层古温度的影响。第二期脉体包裹体的形成温度和盐度与含煤地层条件不相匹配,其形成与含煤地层下部深部流体有关。

分析认为,与碳酸盐岩包裹体类似,煤中有机孔隙(极微孔和死孔)的封闭性可能对烃类具有极强的“保护”作用,导致这部分烃气演化滞后,这就是织纳煤田煤层重烃气在形成无烟煤的较高古地温作用下仍未完全裂解而保存下来的重要原因。由此,研究者提出了无烟煤层高浓度“重烃异常有机质死孔保护效应”的假说。认为其机理在于两个方面:一是封闭孔隙中较高的微环境压力阻碍重烃发生裂解反应,使得重烃在较高地层温度条件下得以保存;二是煤中封闭空间阻隔了重烃与外界的物质交换,重烃气没有受到稀释,依然保持着较高的浓度及原生成因信息。

1.4 低煤级煤层气次生生物成因与气源补充

我国低煤级煤层气资源量巨大,约占全国煤层气资源总量的50%左右,主要分布在西北和内蒙古东部的中生代盆地(车长波等,2008)。低煤级煤层热成因气量普遍较低,确定其次生生物气及其气源补充特征,成为我国近年来煤层气成因研究的一个重要内容。通过研究,形成了一些有价值的研究成果。如:生物气生成的温度区间主要为25~65℃,pH值最佳区间为6.8~7.8(苏现波等,2011);流体介质含盐度小于400 mg/L时产甲烷菌最活跃,钾、钠离子总量在300~600 mg/L时可促进厌氧细菌繁殖(李本亮等,2003);产甲烷

① 秦勇,汤达幀等. 2012. 黔西—滇东煤层气成藏效应及其地质选择过程. 国家自然科学基金重点项目(40730422)结题验收报告.

菌生长需要有足够的孔隙空间,较活跃的地水动力条件是煤层生物气生成的重要条件之一(王勃等,2008;刘洪林等,2008);产甲烷菌通过地表水带入地层,煤层生物气生成需要具备高渗透的特点(王爱宽和秦勇,2010)。

阜新盆地是我国东北较有代表性的一个小型低煤级煤盆地,煤层气地面商业化开采已有十年历史。盆地内煤层气表现为干气性质,甲烷碳同位素组成偏轻,在 -58.00‰ ~ -44.70‰ 之间;晚中生代孙家湾期盆地整体隆升,原生生物气大多散失;成煤后发育两期岩浆活动,现今保存的次生生物气、二次热成因生气共同弥补了煤层深成热解气源的不足(朱志敏等,2007)。盆地内构造断裂和采煤活动中产生的采动断裂构成复杂的断裂网络,随着煤炭资源的开采,煤层气原始平衡状态不断被打破,解吸的气体通过断裂网络发生新的运移和汇聚,形成人工干扰意义上的“次生混合气藏”,为煤层气生产创造了条件(张铁刚等,2007)。

鄂尔多斯盆地东北缘的保德地区是我国目前低煤级煤层气勘探效果相对较好的区块之一,煤层巨厚,含气量低一中等,煤层气成因尚未形成系统认识,影响到对区内煤层气资源潜力的进一步认识。田文广等(2012a)基于煤层气化学组分和稳定同位素测试结果,对该区煤层气成因进行了分析。结果显示,该区煤层气组分以甲烷为主,重烃浓度极低;甲烷碳同位素组成明显偏轻,部分样品甲烷碳、氢同位素组成落入热成因与二氧化碳还原生物气的过渡区间;二氧化碳碳同位素组成相对较重,且与甲烷碳同位素组成之间存在负相关关系。区内含煤地层地下水活跃,煤层产出水具有低矿化度的特点,富含钙、镁、碳酸氢根离子,贫硫酸根离子,pH值一般在7.3~7.8之间,地层温度一般为30~35℃,煤层孔隙度较高,渗透性好。分析认为,该区煤层气具有混合成因,以热成因气为主,兼具生物成因气的特征,生物甲烷形成于二氧化碳还原途径,煤层水的地球化学和动力条件以及煤层孔渗条件有利于产甲烷菌的大量繁殖。

准噶尔盆地广泛发育低煤级煤层,煤层气资源丰富。其中,淮南地区煤层分布稳定,厚度

大,埋深适中,含气性较好,但近年来的煤层气勘探却不甚理想。孙钦平等(2012)认为,对煤层气富集主控因素认识不足,是造成该区这种勘探现状的一个主要原因。进一步研究发现,淮南地区煤层吸附能力较强,含气量较高;煤层气以甲烷占绝对优势,甲烷碳同位素在 -41.9‰ ~ -64.6‰ 之间,组成偏轻,显示出生物成因气的特点(王静等,2008);地层含水性较好,地下水为 NaHCO_3 类型,矿化度为100~400 mg/L,可能有利于产甲烷菌的繁盛和生物气的生成。认为淮南地区水文条件较好,有煤层次生生物气及深部热解气的补充,气源充足,富集条件好。

2 基于经典理论的煤层气成藏宏观机理研究

基于传统地质理论,煤层气成藏效应在宏观上受控于沉积、构造、地热场、水文条件等地质要素,微观上与煤层的物质组成、物质结构和物理性质密切相关,两方面因素及其地质选择过程共同控制着煤层的含气性、渗透性、储层能量和可采性。这些因素,在三维空间上表现为煤层气成藏的静态特征,在地质历史上表现为成藏的动态过程,在地质选择过程中体现为不同关键要素之间的相互匹配关系。

2.1 煤层气成藏效应的宏观静态控制因素

构造样式及区域构造格架是控制煤层气成藏效应的根本要素。不同层次的构造对煤层气成藏特点具有不同的控制作用:就盆地层次而言,区域构造背景是控制煤层气聚集区带形成和分布的根本要素;就盆内次级构造层次而言,不同构造样式是控制煤层气赋存富集的主导因素;从储层层次来看,构造通过对煤层孔隙-裂隙系统的影响控制了煤层渗透率及其非均质特性(方爱民等,2005;据宜文等,2011)。含煤地层多赋存于向斜构造,向斜中地下水具有向心流动的机制,这种基本机制与煤层气向上逸散的特性相耦合,决定了煤层气往往在盆地斜坡带、大型向斜翼部以及小型次级向斜的轴部富集(李贵中等,2005)。挤压应力场作用下,强变形带中心及其附近局部形成糜棱煤,较大范围内形成脆性变形系列构造煤的地区是煤层气勘探有利区带,拉张

构造应力场条件下的大部分区域内有利于形成煤层裂隙而易造成煤层气散失,剪切构造应力场条件下煤层的赋存状态、煤体结构和物性都存在一定的差异(姜波等,2005)。在黑龙江鸡西盆地,二级凹陷构造单元、逆冲断裂及其衍生的入字形褶曲有利于煤层气富集(历艳君,2010)。

沉积作用通过聚煤特征、含煤岩系的岩性、岩相组成及其空间组合在一定程度上控制着煤层气的保存条件(秦勇等,2000)。沁水盆地盖层与煤层含气量的关系显示,厚度大、泥质含量高、突破压力高和有一定埋深的盖层,有利于煤层气保存(洪峰等,2005)。鄂尔多斯盆地东南缘大宁—吉县地区下二叠统山西组煤层顶底板的岩性与厚度变化大,造成煤层气富集的影响因素较为复杂,三角洲背景下形成的煤层其渗透性发育相对较好(孙钦平等,2006)。河北省太行山东麓石炭—二叠系中形成于三角洲环境的含煤地层,为煤层气的生成、储集、封盖、运移提供了较好条件(陈莉等,2009)。鄂尔多斯盆地西南部彬长地区中侏罗统厚煤层形成于基准面上升旋回的末端,不同沉积相带和沉积微相相对煤层发育控制特征有所不同,以泥岩为顶底板的厚煤层为煤层气富集提供了有利条件(邓春苗等,2011)。

煤级高低是影响煤层气成藏特征和开发潜力的重要因素。赵群等(2007)、王勃等(2008)和甘华军等(2010)分析了高、低煤级煤层气成藏的差异性,认为它们各有其特点和主要控制因素,需采用不同的技术方法进行勘探开发。傅小康等(2006)认为,影响低煤级煤层气富集的关键因素是封堵,这种封堵可以是构造、岩性成因的,也可能由水动力所形成,由此进一步提出了5种低煤级煤层气富集模式。高煤级煤层气解吸效率较低,开发难度较大,低煤级煤层气开发相对容易,构造热事件对高煤级煤层的改造有助于煤层气开发(陈振宏等,2008)。重庆地区上二叠统煤化作用以深成变质作用为主,煤级达到焦煤—无烟煤,吸附能力强,是造成该区煤层含气量高的主要原因(杨明显等,2011)。淮北卧龙湖井田岩浆侵入体附近煤的吸附性和甲烷放散初速度较低,含气量较高(Jiang et al., 2011)。辽宁阜新盆地王营—刘家井田辉绿岩墙的侵入,促

使煤层大量二次生气,也使阜新组底部油页岩成熟生气,结果是不仅存在煤层吸附气,还存在大量的游离气,使得天然焦分布带成为该区煤层气开发的首选目标区(雷怀玉等,2010)。

含煤地层水文地质特征涉及煤层气保存条件,往往也是煤储层能量的重要来源。甲烷在地下水中具有一定溶解性,流动的地下水不断带走溶解气而导致煤层气逸失,存在煤层气的滞留水控制作用(秦胜飞等,2005)。重庆沥鼻峡矿区中—深部煤层气由于底板水网络封闭作用而富集,上部逆断层的断层水对煤层气具有压力封堵作用(李志强等,2008)。鄂尔多斯盆地西南部彬长矿区中侏罗统延安组含水层与其他含水层之间不具明显水力联系,地下水来源于区外侧向径流补给,水势低洼的东南部是煤层气富集区(田冲等,2012)。在鄂尔多斯盆地东缘,中部的柳林泉以西、中南部的北段及西南部的韩城地区西北段的地下水动力条件有利于煤层气保存(姜波等,2012);三交地区以北的山西组水动力强于太原组,三交—吉县地区太原组水动力强于山西组,导致前者地区山西组煤层含气量低于太原组,后者地区则相反(田文广等,2012b)。高、低煤级煤层气成藏的地下水化学特征存在一定差异,高矿化度有利于高煤级煤层气保存;类比美国粉河盆地情况,活跃的低矿化度地层水有利于次生生物气的生成,是低煤级煤层气富集的有利条件(刘洪林等,2006a;王勃等,2007;吴鲜等,2011)。

2.2 煤层气成藏的宏观地质过程及其控制因素

煤层气成藏的前提是煤层气富集,宏观上受沉积埋藏史、构造演化史、煤化作用史、地下水活动史和有机质生气史“五史”配置关系的控制,实质上是构造应力场、热力场、流体化学场、流体动力场“四场”互动的过程。配置关系的地质选择过程不同,成藏宏观动力学机制存在极大差异,必然形成不同的煤层气成藏效应。我国晚古生代以来构造运动对含煤盆地的多期叠加与改造,导致煤层气成藏条件异常复杂(秦勇,2003)。我国学者在此方面开展了持续不懈的研究探讨。

从大地构造背景及其演化历史分析,划分

出5种聚煤盆地类型和9种改造盆地类型，进而采用“聚煤盆地原型+改造类型”双层次分类的原则，将我国64个煤层气盆地划分为23种盆地组合类型（赵靖舟等，2008；宋立军和赵靖舟，2009）。基于西北地区构造背景及其演化，认为鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地南缘、吐哈盆地南部等有利于煤层气开发，其它区（如塔里木盆地等）因多期构造破坏而导致地质条件过于复杂，对煤层气开发不利（周铁金和姚艳斌，2006）。在区块尺度上，认为沁水盆地樊庄区块存在原生型、调整型和改造型三类煤层气成藏模式，改造型又分为原生改造型和调整改造型，不同成因的气藏宜采用相应的勘探开发策略（梁宏斌等，2012）。认为韩城地区整体上为一单斜式煤层气成藏模式，聚煤作用和后期沉积对煤层气藏的形成演化非常有利，3号煤层的煤层气成藏及开发条件优于11号煤层（张培河，2008）。

构造抬升对煤层渗透性和吸附性具有重要影响。构造抬升使地层压力降低，高煤级煤层裂缝开启，渗透率显著增强，但造成气体大量散失，对煤层气富集不利；低煤级煤层物性受构造抬升的影响较弱，地层压力降低导致煤层气运移速率增大，对煤层气开采有利（陈振宏等，2007）。

构造抬升过程中，若温度作用占主导地位则煤的吸附量增加，若压力作用占主导地位则吸附量减少，高煤级煤吸附量的变化大于低煤级煤吸附变量；抬升过程中会出现煤层气的吸附或解吸，当温度作用效果大于压力作用效果时，抬升作用易导致煤储层含气欠饱和（马行陟等，2012）。

热历史和生烃历史是煤层气成藏过程的一个重要方面。根据包裹体热力学特征和产状，划分了鄂尔多斯盆地东缘柳林地区山西组和太原组古流体类型；结合盆地热史分析，认为第一期烃类注入发生在中-晚三叠世，第二期烃类注入发生在早白垩世，后者气态烃包裹体数量多，生烃强度大，是本区主要的生烃阶段（李勇等，2012）。豫西荊巩煤田谷山井田燕山期异常热事件作用下发生的二次生烃，奠定了煤层高含气量的基础；喜山早期地壳不断隆升，浅部煤层气在地下水作用下向深部运移聚集，地下水动力条件控制着该期煤层气的运移富集；新近纪滑动构造使煤体破

坏严重，储层渗透性降低，但阻止了煤层气扩散，有利于富集（林晓英等，2008）。

煤体结构是煤层气成藏过程的产物，构造煤制约着我国许多地区煤层气的低成本高效开发。通过高温高压变形实验，发现镜质组反射率光性异常是构造煤化学结构演化在物理性质上的具体体现，不同类型构造煤由于物理和化学结构上的不同，导致煤层含气量和渗透性出现重大差异（姜波等，2009）。构造煤形成的应力-应变环境分为脆性碎裂变形、韧性变形和剪切变形三类，弱和中等脆性碎裂变形作用对煤芳香结构单元影响不大，韧性和剪切变形过程中温度作用有利于煤中杂原子团脱除和芳环生长，定向应力有助于煤中分子结构有序化，均可促进芳香结构单元发生变化（屈争辉等，2012）。发现黔西青龙矿压性断层附近的构造煤具有分带现象，自断层面向外，构造煤从韧性系列向脆性系列过渡，认为构造煤结构与构造应力场在时间上的耦合形成脆性-韧性变形构造煤，在空间上耦合导致了构造煤发育的分带性（汪吉林等，2009）。

完整地再现煤层气成藏过程，必须借助于数值模拟手段。在前期基础上，近年来进一步建立了多煤层煤层气扩散逸失模型，就沁水盆地进行实例研究，定量刻画了未知区山西组煤层含气性、储层压力等在时空上的分阶段演化特征（韦重韬和周荣福，2003；韦重韬等，2004）。同时，进一步将模拟技术应用到华北晚古生代盆地其他区域，发现淮北宿南向斜煤层气成藏过程经历了低水平聚集的第一阶段和第二阶段、大量聚集且散失作用较强的第三阶段、以散失作用为主的第四阶段（韦重韬等，2007）；柳林区块晚侏罗世至早白垩世的高峰阶段和晚白垩世至今的散失阶段奠定了区内煤层气分布格局，西南部有利于煤层气聚集（郭建等，2008）。总结了华北晚古生代残留盆地煤层气成藏演化历程，划分出活跃、微弱和过渡三种煤层气成藏类型，认为活跃和过渡类型具有较好的勘探开发前景（韦重韬等，2008）。最近，进一步开发成功多层叠置含煤层气系统数学模型，初步实现了对西南地区上二叠统煤层气成藏过程的数值模拟（曹佳等，2012）。

2.3 煤层气成藏效应的关键宏观控制因素

煤层气成藏效应受控于诸多宏观地质因素。一般而言,构造控制贯穿着整个煤层气成藏过程,其他因素则往往在某一特定成藏阶段起着主导作用,不同地区相同成藏阶段往往存在不同的控制因素组合。例如,宋岩等(2007, 2009)认为,保存阶段是成藏的关键,构造演化和水动力条件是中国煤层气保存的两大关键地质因素。开平向斜赵各庄井田、鄂尔多斯盆地东南缘延川南区块的煤层气赋存特征,可能服从这一控制规律(王怀勳等, 2011; 张可铭等, 2011)。再如,我国低煤级盆地一般只经历了一个沉降—抬升旋回,地下水动力对煤层气富集格局的调整和改造起到决定性作用(陈振宏和宋岩, 2007; 王勃等, 2008); 黑龙江依兰褐煤矿区煤层厚度较大,顶板发育的巨厚油页岩为煤层气保存创造了条件(王春莲, 2011)。

构造动力条件涵盖诸多要素,如构造演化、构造应力场、构造分异、煤层变形等。对于沁水盆地,燕山期是控制煤层气成藏效应的关键时期,奠定了盆地煤层气赋存规律的总体格局;构造动力通过煤层改造程度对煤储层渗透性发育特点的控制,使得中等程度的构造主曲率可能提供最有利于煤层气渗流的构造条件,导致现代构造应力场主应力差决定着煤层渗透率的发育特征(秦勇等, 2008, 2012a)。林晓英和苏现波(2007)在强调煤层生气历史的同时,认为煤层顶底板岩性、边界断层、地下水动力条件是控制沁水盆地南部煤层气富集高产的直接因素。进一步分析,沁水盆地可划分为6种煤层气富集类型,每个类型煤层气有利富集区分别显现出不同的地质主控因素特征(闫宝珍等, 2008)。王生维等(2008)通过煤层气井压裂效果的矿井观测,结合地应力场分析,认为构造控制之下的煤层大裂隙系统对沁水盆地南部晋城地区煤层气封闭保存条件具有至关重要的影响。左银卿等(2011)总结沁水盆地南部煤层气开发经验,发现地下水滞留区的构造翼部是煤层气富集高产的有利区域。

鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县地区煤层气富集规律主要受沉积环境、煤层渗透性、现今地应力以及水动力环境等的影响,间湾沼泽相、构造

宽缓部位以及地应力低值区最有利于煤层气富集(李五忠等, 2011)。晋北宁武盆地南部的煤层气富集受构造部位、应力场及煤层顶底板封闭条件控制,构造上斜坡带煤层气富集高产,构造应力低值区煤层渗透性好(田文广等, 2010)。在辽宁省铁法盆地,煤层埋深以及后期岩浆侵入是影响本区煤层含气量的主要因素(彭金宁和傅雪海, 2007)。黔西织纳煤田少普井田体现出褶皱控气的特点,煤层含气量受煤层厚度和煤层埋深的影响比较明显,地下水条件对煤层气也具有良好的封闭作用,井田中部构造发育、煤层厚度大、埋藏深度大、地下水动力弱的地段有利于煤层气富集(王聪等, 2011)。

刘洪林等(2007)从甲烷风化带这一独特角度,论证了我国低煤级地区煤层气成藏的特点,发现我国西北地区煤层甲烷风化带远远深于美国粉河盆地,认为水文地质条件是最重要的控制条件之一,导致中美两国在低煤级煤层气富集成藏方面的巨大差异,我国西北地区煤层气开发潜力总体上小于美国粉河盆地。吐哈盆地南缘沙尔湖洼陷中侏罗统西山窑组发育巨厚煤层,具备形成煤层生物气的地质条件,洼陷斜坡下倾部位易形成较高饱和度的煤层气藏(杨珍祥和李巧梅, 2008)。在鄂尔多斯盆地西部黄陵矿区,煤层气富集主要受煤层发育特征与深部地层水动力条件的控制(郑贵强等, 2009)。内蒙东部的海拉尔盆地和霍林河盆地内部次级凹陷与隆起决定着煤层的发育位置和埋藏深度,基底整体抬升决定了甲烷风化带的位置,煤层厚度和埋藏深度较大、顶底板岩性为泥岩的地带有利于煤层气成藏(孙斌等, 2007; 韩兵等, 2012)。

3 基于原创性思维的煤层气成藏效应探讨

含煤层气系统是一个能量动态平衡系统,成藏过程是一个流体压力系统逐渐调整的地质选择过程,宏观上受控于应力场、地温场、地下水动力场等外能因素,微观上与储层弹性能量场这一内能因素密切相关。换言之,煤层弹性能量场是联结宏观动力学因素与煤层气成藏效应的纽带(秦勇和朱旺喜, 2006)。然而,传统思维是直

接采用宏观动力学因素来分析煤层气成藏效应，忽视了煤层弹性能量场这一“中间环节”以及煤储层这一成藏载体，导致煤层气成藏动力学研究难以深入开展。基于这一新的思维，我国近年来进一步探讨了煤层气成藏效应的内涵特征，建立了煤层弹性能的表征模型，分析了弹性能与煤层气成藏效应之间的因果关系。由此，进一步向多煤层叠置和深部煤层气成藏效应等方面拓展，取得了更为深入的新认识。

3.1 含煤层气系统弹性能及其耦合控藏效应

煤储层是一种比常规储层具有更大弹性的地质体，其弹性能包括煤基块弹性能、水体弹性能和气体弹性能，弹性能在地层条件下的变化规律服从于特定的数学模型，可用来描述煤层气成藏过程中能量的传递和动态平衡过程（吴财芳，2004；吴财芳等，2005a）。煤层气成藏过程中，地层压力和应力（包括热应力）系统的变化导致煤层气吸附或解吸，引起煤基块弹性变形，造成裂隙闭合或拉张，对煤层气保存和渗流条件产生影响。因此，煤层弹性能对成藏效应控制的核心，是由煤基块在外能和内能综合作用下收缩膨胀所诱导的煤基块弹性自调节效应，同样可用受地质边界条件限制的数学模型加以表征（Qin et al., 2005；秦勇等，2012a）。

近十年来，围绕“含煤层气系统弹性能及其耦合控藏效应”这一科学问题开展探索，取得了某些有理论和实践价值的研究进展。

1) 从能量动态平衡系统及其地质选择过程角度，阐释了动力学条件耦合关系及其对煤层气富集高渗条件的控制规律。研究重点在于科学描述有效压力系统中能量传递、汇聚和分配的过程，阐明地层弹性能在整个过程中的作用机理和作用特征，进而揭示能量平衡系统形成演化的机制（秦勇等，2012a）。发现沁水盆地煤层气富集高渗差异性受控于四个方面，即现代构造应力场的构造应力能、构造分异导致的煤储层埋藏重力能、受构造控制的地下水动力能以及受深部热结构特征控制的燕山期古热场热应力能（秦勇等，2008）。

2) 系统研究了含煤层气系统地层弹性能及其演化行为，并对其控藏效应开展了有效探讨。

提出煤储层弹性能是联系外部动力学条件与煤层气成藏效应之间纽带的学术观点，探讨了煤层弹性能的控藏特征及其作用机理，发现不同热演化阶段煤层弹性能对煤层气成藏的相对贡献有所不同，主煤层弹性能在不同演化阶段发生过不同规律的分异（秦勇等，2012a）。沁水盆地晚侏罗世一早白垩世阶段地层能量动态平衡及聚散过程，决定了煤层气成藏效应的现今规模和区域分布格局（Wu et al., 2007）。

3) 建立了煤层气成藏类型三元判识模式，提出了煤层气成藏“弹性自封闭效应”的学术观点。提出了有效运移系统和有效压力系统的概念，建立了三元参数对其内涵予以表述，初步实现了对成藏过程中能量分配特征和演化规律的定量描述；发现地层弹性能控藏作用的实质，是通过压力系统发育程度、裂隙发育程度和裂隙开合程度演化发展的控制而实现的，其作用机制可以概括为应力-应变耦合机制（吴财芳，2004；吴财芳等，2008）。在此基础上，建立了煤基块弹性自调节综合效应模式，提出了煤层气成藏“弹性自封闭效应”的学说，研究了其具体的显现形式，探讨了其内涵及对煤层气聚散作用的控制机理，认为弹性自封闭效应可能是高煤级煤储层含气量普遍较高的关键内在动力条件（Qin et al., 2005）。

4) 建立了煤层气能量聚散模式，揭示出能量平衡系统与煤层气成藏效应之间的关系，建立了基于该模式的煤层气有利区带定量预测方法，并对国内某些盆地煤层气成藏效应进行了评价。认为沁水盆地最有利的煤层气成藏地带发育在盆地南部，呈NNW向条带状展布（吴财芳等，2005b，2007；吴财芳和秦勇，2012；Wu et al., 2007）；鄂尔多斯盆地东缘中-南部的煤层气富集高渗动力条件，具有“南北较好，中部较差，中南部最好；东部较好，西部较差，东南部最好”的分布格局（秦勇等，2012a）；在黔西织纳煤田比德—三塘向斜，煤层弹性能呈“西高东低、南高北低、西南部显著较高”的分布格局，在垂向上随煤层层位的降低而趋于增大，有利于煤层气富集高渗的动力条件主要发育在向斜的西南部地带（姜玮和吴财芳，2011）。

3.2 多层叠置独立含煤层气系统

根据吸附原理,在一个统一的储层压力系统中,煤层埋深加大或层位降低,煤储层压力随之增高,煤层含气量呈现出递增或递减(在临界饱和深度之下)的规律。然而,黔西织纳煤田水公河向斜上二叠统单一煤层平均含气量及相邻主煤层之间含气量梯度均呈波动式变化,煤层埋深-压力系数关系在垂向上分为截然不同的多套系统,地层格架中三级层序与含气量梯度的独立分段高度吻合。由此,提出了“多层叠置独立含煤层气系统”的概念,认为层序地层格架奠定了该类系统形成的物性基础,含煤地层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,该类含气系统是沉积-水文-构造条件耦合控气作用的产物,认为该类含气系统在以三角洲-湖坪-泻湖沉积体系为主的多煤层含煤地层中可能具有普遍意义(秦勇等,2008)。

进一步考察,这一与“吸附原理”相悖的现象在国内晚古生代含煤地层中并不鲜见。由此,进一步选择黔西80余口钻孔开展层序地层学对比研究,在典型钻孔中按地层层序密集采集煤和岩石样品,开展煤质煤岩、微量元素、孔渗特征、吸附性等分析,充实了“多层叠置独立含煤层气系统”的内涵,对其控制因素取得了更进一步的认知。

1) 多煤层条件下的煤层气成藏特征,受沉积环境及其控制下的层序地层结构所影响。陆相的河流-三角洲-湖泊相煤层群在垂向上多表现为“多层统一含气系统”,海陆过渡相的三角洲-湖坪-泻湖相煤层群可形成“多层叠置独立含气系统”;煤层群内部各煤层之间由于“烃浓度封闭效应”及煤层本身低渗透性对流体存在的“叠加封闭”作用,使煤储层存在超压的可能性(杨兆彪等,2011a, b)。上述两类含气系统在比德-三塘盆地均有发育,以煤层层位方向上含气量波动性强弱和含气量梯度大小得以体现,在空间上具有一定的配置关系,水公河、三塘等向斜中发育4套以上的多层叠置独立含气系统(杨兆彪等,2011c)。

2) 发育在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,这是形成“多层叠置独立含煤层气系统”的根本地质原因(沈玉林等,2012)。这种分划性隔水阻气岩层从三角洲平原相区至三角洲前缘相区渐趋发育,导致含气系统垂向结构渐趋复杂,“多层叠置独立含煤层气系统”特征渐趋显著。三角洲平原相区偏于氧化环境,不利于准同生成岩一早成岩作用阶段菱铁矿和黄铁矿的形成,最大海侵面附近泥岩的封堵性能相对减弱,使得包括煤层气在内的地层流体易于在垂向上渗流交换,含煤层气系统垂向结构相对简单。三角洲前缘相区低孔渗隔水阻气层相对发育,导致含煤层气系统垂向结构较为复杂。

3) 层序地层结构对多煤层条件下的煤层含气性和物性具有控制作用,这是多层叠置独立含煤层气系统形成的微观地质学基础(杨兆彪,2011)。从煤层气成藏意义而言,三级层序海侵体系域为一个相对封闭层,高位体系域是一个相对开放层,多层叠置独立含气系统的形成取决于这一物质基础。认为发育于最大海泛面附近的煤层有利于镜质组分的富集,也易于煤化过程中产生更多的裂隙,形成优质的煤层气储层。耦合分析层序地层结构与煤层含气性、孔渗性和吸附性,提出了层序地层结构的控气模式,认为在垂向上可形成与三级层序相对应的独立含气系统,煤层含气量在层序边界附近发生突变,封闭层的封闭性是独立含气系统发育的基础。

3.3 深部煤层气成藏作用的特殊性

深部煤层气是我国煤层气地质领域研究的一个新方向。近两年来,国内从盆山演化角度对华北深部煤层气赋存的地质因素做过探讨(据宜文等,2011),对深部煤层含气性、渗透性、可改造性进行了研究(申建,2011;王宝文,2011;杨松,2011;赵丽娟,2011)。实质上,深部煤层气成藏过程是含气系统的有形载体煤基块和地下流体(煤层气及地下水)在温度场与地应力场耦合作用下的动态平衡过程(秦勇等,2005)。基于此,影响深部煤层气成藏效应的特殊地质条件主要包括深部地应力场、地温场以及两者耦合控制之下的煤岩力学性质(秦勇等,2012b)。

秦勇等(2005)以济阳凹陷为对象,研究了深部煤层的吸附效应。发现地层条件下的煤饱和

吸附量随埋藏深度增大而变化的趋势在一定深度发生反转, 存在一个“吸附饱和临界深度”, 临界深度随煤级的变化而有所不同, 认为这是地热场增温效应与煤储层自身特性共同作用的必然结果; 深部较高地层温度与较高地层压力的配置关系可能有利于煤层气的开采, 存在实现深部煤层气资源与常规油气资源共采的可能性; 深部较高流体压力和较高受热温度的“双重”控制效应, 可能是导致深部煤储层吸附性与浅部存在较大差异的根本原因。对滇东盆地群、鄂尔多斯盆地的研究, 进一步验证了关于深部煤层气存在“吸附饱和临界深度”的认识(赵丽娟等, 2010, 2012; 陈刚和李五忠, 2011; 赵丽娟, 2011)。

为了实现对深部煤层含气量的定量预测, 以鄂尔多斯盆地东部主煤层为对象, 从吸附常数影响因素分析入手, 开展了30~100℃温度条件下的甲烷高压等温吸附实验(赵丽娟, 2011; 赵丽娟等, 2012)。选取温度、镜质组反射率、水分含量、灰分产率、镜质组含量和惰质组含量6个因素进行主成分分析, 建立了朗格缪尔体积、朗格缪尔压力与三个主成分之间的多元一次函数关系, 进而重构了朗格缪尔吸附方程, 并结合含气饱和度和建立了深部煤层含气量预测模型。对鄂尔多斯盆地东部主煤层含气量的预测表明, 不同煤级煤层含气量的“临界深度”变化于750~1200 m之间, 煤级增高, 临界深度变浅。

申建(2011)从理论上分析了深部煤层气成藏的特殊性。认为受地应力机制转换的影响, 深部煤层天然裂隙的产状和组合模式存在垂向分带, 影响到深部煤层渗透率发育状况。基于温压条件下的流固耦合模拟实验, 初步揭示了深部煤岩力学性质和渗透性的特殊性及其地质影响因素, 构建了耦合温压条件下吸附变形、热膨胀、地应力等效应的深部煤层渗透率数学模型。建模分析了地应力场、地温场及煤基质收缩膨胀效应对煤储层压力状态的控制作用, 发现深部煤层与浅部煤层的成压因素差异显著。发现埋深增大, 煤级对煤吸附性的影响减小, 验证了深部煤层含气量与埋深之间的“临界深度”关系。构建了深部煤层气成藏效应预测的三元指标体系和模型, 并对鄂尔多斯盆地东部的深部煤层气成藏效应进

行了预测分析。

秦勇等(2012b)从深部地应力状态转换、深部煤层吸附能力地温场负效应、深部温压条件下煤岩物理性质特殊性三个方面, 进一步分析了深部煤层气成藏的地质条件及基本原理, 论证了深部煤层气成藏条件的特殊性。发现深部地应力状态发生转换的临界深度与水平最大主应力有关, 可能对转换临界深度以深的煤储层渗透率造成不利影响; 深部地温场对煤层吸附能力影响的负效应大于地层压力的正效应, 深部煤层含气量不能简单采用浅部梯度予以推测; 围压是影响深部煤岩力学性质的主要因素, 温度和流体压力对煤岩力学性质的影响更为复杂, 它们不同程度地影响到煤储层的孔隙性、渗透性和吸附性。由于煤层围岩渗流能力的差异, 深部煤层流体压力系统明显受含煤地层沉积格架的控制, 可能导致同一套含煤地层中煤层与非煤储层分属于不同的含气系统。在此基础上, 进一步提出了“四步递阶”的深部煤层气成藏效应耦合分析思路, 为深部煤层气有利区带优选提供了方法基础。

4 结语与展望

我国近年来以成藏作用为核心的煤层气基础地质研究取得显著进展。开展了本源菌条件下褐煤生物气模拟、矿物/元素催化生气作用、无烟煤层重烃极度异常原因、煤层次生生物气与气源补充等的研究, 深化了对我国煤层气多元化成因的认识。在更为广泛和深入的层面上探讨了煤层气成藏效应的宏观地质过程及其控制因素, 经典煤层气成藏理论研究得到深化发展。提出了原创性的煤层气成藏效应研究思路, 深化了对我国煤层气成藏作用内涵和实质的认识, 提出和论证了多层叠置独立含煤层气系统等学术观点, 初步探讨了深部煤层气成藏作用的特殊性。

我国幅员辽阔, 盆地地质背景和煤层气地质条件复杂多变, 不同地质背景条件下的煤层气资源均极为丰富, 成藏作用研究尚待深化, 诸多基础地质问题尚待探讨解决。近期探讨的重点在于四个效应: 其一, 影响煤层渗透性发育的地应力效应; 其二, 关系到深部煤层气成藏动力条件的深度效应; 其三, 涉及低煤级煤层气成藏动力条

件的煤级效应；其四，与构造煤条件下煤层气成藏作用密切相关的粒度效应（秦勇等，2012a）。同时，含煤地层中不仅煤层气资源十分丰富，致密砂岩气和页岩（泥岩）气资源潜力也较为巨大，含煤地层非常规气（煤系气）的共生成藏关系以及共采中的基础地质问题，也将是今后研究的重点方向之一。

参考文献（References）：

- 曹慧缙, 张义纲, 徐翔, 等. 1991. 碳酸盐岩生烃机制的新认识[J]. 石油实验地质, 13(3): 223-237.
- 曹佳, 韦重韬, 鲍园. 2012. 多层叠置含煤层气系统成藏模拟技术及实例研究[J]. 中国煤炭地质, 24(3): 17-19, 24.
- 车长波, 杨虎林, 李富兵, 等. 2008. 我国煤层气资源勘探开发前景[J]. 中国矿业, 17(5): 1-4.
- 陈刚, 李五忠. 2011. 鄂尔多斯盆地深部煤层气吸附能力的影响因素及规律[J]. 天然气工业, 31(10): 47-49.
- 陈莉, 傅雪海, 彭伦, 等. 2009. 太行山东麓石炭—二叠纪沉积环境与煤层气开发的关系[J]. 中国煤层气, 6(5): 3-7.
- 陈振宏, 贾承造, 宋岩, 等. 2007. 构造抬升对高、低煤阶煤层气藏储集层物性的影响[J]. 石油勘探与开发, 34(4): 461-464.
- 陈振宏, 宋岩. 2007. 高、低煤阶煤层气成藏过程及优势地质模型[J]. 新疆石油地质, 28(3): 275-278.
- 陈振宏, 王一兵, 宋岩, 等. 2008. 不同煤阶煤层气吸附、解吸特征差异对比[J]. 天然气工业, 28(3): 30-32.
- 邓春苗, 汤达祯, 许浩, 等. 2011. 彬长地区延安组沉积作用对煤层气赋存的影响[J]. 洁净煤技术, 17(2): 82-85.
- 丁安娜, 连莉文, 张辉, 等. 1995. 1845-2608 m气源岩中产甲烷菌的富集培养和发酵产气实验研究[J]. 沉积学报, 13(3): 117-125.
- 方爱民, 侯泉林, 琚宜文, 等. 2005. 不同层次构造活动对煤层气成藏的控制作用[J]. 中国煤田地质, 17(4): 15-20.
- 傅小康, 霍永忠, 叶建平. 2006. 低阶煤煤层气富集模式初探[J]. 中国煤层气, 3(3): 24-27.
- 甘华军, 王华, 严德天. 2010. 高、低煤阶煤层气富集主控因素的差异性分析[J]. 地质科技情报, 29(1): 56-60.
- 高玲, 宋进. 1998. 云南保山盆地生物气生成模拟实验及生物气资源预测[J]. 成都理工学院学报, 25(4): 487-494.
- 高先志, 张万选, 张厚福. 1990. 矿物质对热解影响的研究[J]. 石油实验地质, 12(2): 201-205.
- 郭建, 张志庆, 韦重韬. 2008. 柳林矿区煤层气演化史数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报, 27(1): 27-31.
- 韩兵, 张明, 刘旺博. 2012. 二连盆地群低煤阶煤层气成藏模式——以霍林河盆地为例[J]. 煤田地质与勘探, 40(1): 24-28.
- 洪峰, 宋岩, 赵孟军, 等. 2005. 沁水盆地盖层对煤层气富集的影响[J]. 天然气工业, 25(12): 34-36.
- 姜波, 秦勇, 琚宜文, 等. 2009. 构造煤化学结构演化与瓦斯特性耦合机理[J]. 地学前缘, 16(2): 262-271.
- 姜波, 秦勇, 琚宜文, 等. 2005. 煤层气成藏的构造应力场研究[J]. 中国矿业大学学报, 34(5): 564-569.
- 姜波, 许进鹏, 朱奎, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地东缘构造—水文地质控气特征[J]. 高校地质学报, 18(3): 438-446.
- 姜玮, 吴财芳. 2011. 织纳煤田煤储层弹性能及其对有利选区的控制作用[J]. 煤炭学报, 36(10): 1674-1678.
- 琚宜文, 卫明明, 薛传东. 2011. 华北盆山演化对深部煤与煤层气赋存的制约[J]. 中国矿业大学学报, 40(3): 390-398.
- 雷怀玉, 陈振宏, 杨焦生, 等. 2010. 火山岩侵入对低煤阶煤层气藏的影响[J]. 石油钻采工艺, 32(4): 99-102.
- 李本亮, 王明明, 冉启贵, 等. 2003. 地层水盐度对生物气运聚成藏的作用[J]. 天然气工业, 23(5): 16-20.
- 李贵中, 王红岩, 吴立新, 等. 2005. 煤层气向斜控气论[J]. 天然气工业, 25(1): 26-30.
- 李明宅, 张辉. 1998. 煤的厌氧降解产气作用[J]. 天然气工业, 18(2): 10-14.
- 李术元, 林世静, 郭绍辉, 等. 2002. 无机盐类对干酪根生烃过程的影响[J]. 地球化学, 31(1): 15-19.
- 李五忠, 陈刚, 孙斌, 等. 2011. 大宁—吉县地区煤层气成藏条件及富集规律[J]. 天然气地球科学, 22(2): 352-360.
- 李勇, 汤达祯, 许浩, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地柳林地区石炭—二叠纪含煤地层流体包裹体特征及成烃演化历史[J]. 高校地质学报, 18(3): 419-426.
- 李忠. 1992. 试论油气生成过程中粘土矿物催化作用[J]. 石油实验地质, 14(1): 59-63.
- 李志强, 鲜学福, 欧成华, 等. 2008. 沂鼻峡背斜煤层气富集的水文地质控气特征[J]. 重庆大学学报, 31(2): 191-196.
- 厉艳君. 2010. 鸡西盆地煤生烃历程与煤层气运移与保存特征[J]. 煤炭技术, 29(5): 151-153.
- 梁宏斌, 张璐, 刘建军, 等. 2012. 沁水盆地樊庄区块构造对煤层气富集的控制作用[J]. 山东科技大学学报, 31(1): 1-9.
- 林晓英, 苏现波, 颜少权. 2008. 荣巩煤田谷山井田构造演化与煤层气含量的关系[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 27(2): 168-172.
- 林晓英, 苏现波. 2007. 沁水盆地南部煤层气成藏机理[J]. 天然气工业, 27(7): 8-11.
- 刘洪林, 李景明, 李贵中, 等. 2007. 浅议我国低煤阶地区煤层气的成藏特点——从甲烷风化带的角度[J]. 天然气地球科学, 18(1): 125-129.
- 刘洪林, 李景明, 王红岩, 等. 2008. 水文地质条件对低煤阶煤层气成藏的控制作用[J]. 天然气工业, 28(7): 20-22.
- 刘洪林, 李景明, 王红岩, 等. 2006b. 水动力对煤层气成藏的差异性研究[J]. 天然气工业, 26(3): 35-39.
- 刘洪林, 刘春涌, 王红岩, 等. 2006a. 西北低阶煤中生物成因煤层气的成藏模拟实验[J]. 新疆地质, 24(2): 149-153.
- 刘文汇, 王万喜. 2000. 烃类的有机(生物)与无机(非生物)来源——油气成因理论思考之二[J]. 矿物岩石地球化学通报, 19(3): 179-186.
- 卢红选, 孟自芳, 李斌, 等. 2007. 微量元素Mo对褐煤有机质热解成烃的影响[J]. 天然气地球科学, 18(1): 104-106.
- 马行陟, 宋岩, 柳少波. 2012. 构造抬升过程中煤储层吸附能力的耦合效应及控制因素[J]. 地学前缘, 19(3): 1-8.
- 宁占武, 王卫华, 温美娟, 等. 2004. 过渡金属对有机质热解生烃过程的影响[J]. 天然气地球科学, 15(3): 317-319.
- 彭金宁, 傅雪海. 2007. 铁法矿区煤层气含量及其控制因素分析[J]. 中国煤层气, 4(3): 43-46.
- 秦胜飞, 宋岩, 唐修义, 等. 2005. 水动力条件对煤层气含量的影响——煤层气滞留水控气论[J]. 天然气地球科学, 16(2): 149-152.
- 秦勇, 傅雪海, 韦重韬, 等. 2012a. 煤层气成藏动力条件及其控藏效应[M]. 北京: 科学出版社.
- 秦勇, 傅雪海, 岳巍, 等. 2000. 沉积体系与煤层气储盖特征之关系探讨[J]. 古地理学报, 2(1): 77-84.
- 秦勇, 姜波, 王继尧, 等. 2008. 沁水盆地煤层气构造动力条件耦合控

- 藏效应[J]. 地质学报, 82(10): 1355–1362.
- 秦勇, 申建, 王宝文, 等. 2012b. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J]. 石油学报, 33(1): 48–56.
- 秦勇, 宋全友, 傅雪海. 2005. 煤层气与常规油气共采可行性探讨——深部煤储层平衡水条件下的吸附效应[J]. 天然气地球科学, 16(4): 492–498.
- 秦勇, 唐修义, 叶建平. 1998. 华北上古生界煤层甲烷稳定碳同位素组成与煤层气解吸-扩散效应[J]. 高校地质学报, 4(2): 127–132.
- 秦勇, 朱旺喜. 2006. 中国煤层气产业发展所面临的若干科学问题[J]. 中国科学基金, (3): 148–152.
- 秦勇. 2003. 中国煤层气地质研究进展与述评[J]. 高校地质学报, 9(3): 339–358.
- 秦勇. 2005. 国外煤层气成因与储层物性研究进展[J]. 地学前缘, 12(3): 289–298.
- 秦勇. 2006. 中国煤层气产业化面临的形势与挑战(I)——当前所处的发展阶段[J]. 天然气工业, 26(1): 4–7.
- 屈争辉, 姜波, 汪吉林, 等. 2012. 构造煤结构演化及其应力-应变环境[J]. 高校地质学报, 18(3): 453–459.
- 申建. 2011. 论深部煤层气成藏效应[D]. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文.
- 沈玉林, 秦勇, 郭英海, 等. 2012. 黔西上二叠统含煤层气系统及其沉积控制[J]. 高校地质学报, 18(3): 427–432.
- 宋立军, 赵靖舟. 2009. 中国大陆煤层气盆地双层次类型划分[J]. 煤炭科学技术, 37(10): 100–104.
- 宋岩, 柳少波, 赵孟军, 等. 2009. 煤层气藏边界类型、成藏主控因素及富集区预测[J]. 天然气工业, 29(10): 5–11.
- 宋岩, 秦胜飞, 赵孟军. 2007. 中国煤层气成藏的两大关键地质因素[J]. 天然气地球科学, 18(4): 545–553.
- 宋岩, 张新民, 柳少波. 2005. 中国煤层气基础研究和勘探开发技术新进展[J]. 天然气工业, 25(1): 1–8.
- 苏现波, 徐影, 吴昱, 等. 2011. 盐度、pH对低煤阶煤层生物气生成的影响[J]. 煤炭学报, 36(8): 1302–1306.
- 孙斌, 邵龙义, 赵庆波, 等. 2007. 海拉尔盆地煤层气成藏机理及勘探方向[J]. 天然气工业, 27(7): 12–15.
- 孙钦平, 孙斌, 孙粉锦, 等. 2012. 准噶尔盆地东南部低煤阶煤层气富集条件及主控因素[J]. 高校地质学报, 18(3): 460–464.
- 孙钦平, 王生维. 2006. 大宁—吉县煤区含煤岩系沉积环境分析及其对煤层气开发的意义[J]. 天然气地球科学, 17(6): 874–879.
- 汤达祯, 秦勇, 胡爱梅. 2003. 煤层气地质研究进展与趋势[J]. 石油实验与地质, 25(6): 644–647.
- 田冲, 汤达祯, 周志军, 等. 2012. 彬长矿区水文地质特征及其对煤层气的控制作用[J]. 煤田地质与勘探, 40(1): 43–46.
- 田文广, 汤达祯, 孙斌, 等. 2012a. 鄂尔多斯盆地东北缘保德地区煤层气成因[J]. 高校地质学报, 18(3): 479–484.
- 田文广, 汤达祯, 孙斌, 等. 2012b. 鄂尔多斯盆地东缘含煤地层水动力条件及其控气作用[J]. 高校地质学报, 18(3): 433–437.
- 田文广, 汤达祯, 孙斌, 等. 2010. 宁武盆地南部煤层气富集的主控因素[J]. 天然气工业, 30(6): 22–26.
- 汪吉林, 姜波, 陈飞. 2009. 构造煤与应力场耦合作用对煤与瓦斯突出的控制[J]. 煤矿安全, (11): 94–97.
- 王爱宽, 秦勇, 兰凤娟. 2012. 基于本源菌的褐煤生物气生成过程与可能途径[J]. 高校地质学报, 18(3): 485–489.
- 王爱宽, 秦勇, 林玉成, 等. 2010. 褐煤中天然产甲烷菌富集培养与生物气产出模拟[J]. 高校地质学报, 16(1): 1–6.
- 王爱宽, 秦勇. 2010. 生物成因煤层气实验研究现状与进展[J]. 煤田地质与勘探, 38(5): 23–27.
- 王爱宽. 2010. 褐煤本源菌生气特征及其作用机理(D). 徐州: 中国矿业大学博士学位论文.
- 王爱宽. 2012. 褐煤本源菌生气特征及其作用机理[J]. 煤炭学报, 37(2): 355–356.
- 王宝文. 2011. 深部煤层渗透性发育机制与预测方法[D]. 徐州: 中国矿业大学硕士学位论文.
- 王勃, 巢海燕, 郑贵强, 等. 2008. 高、低煤阶煤层气藏地质特征及控气作用差异性研究[J]. 地质学报, 82(10): 1396–1401.
- 王勃, 李瑾, 张敏. 2007. 煤层气成藏地层水化学特征研究[J]. 石油天然气学报, 29(5): 66–69.
- 王春莲. 2011. 黑龙江省依兰矿区煤层气储藏条件分析[J]. 煤炭技术, 30(11): 140, 144.
- 王聪, 吴财芳, 欧正, 等. 2011. 黔西织纳煤田少普矿区16号煤层气富集的地质控制因素[J]. 煤炭学报, 36(9): 1486–1489.
- 王怀勖, 朱炎铭, 李伍, 等. 2011. 煤层气赋存的两大地质控制因素[J]. 煤炭学报, 36(7): 1129–1133.
- 王静, 乔文龙, 祖丽菲亚, 等. 2008. 生物气成藏条件分析及准噶尔盆地生物气探究[J]. 新疆地质, 21(4): 450–454.
- 王生维, 章泽军, 乌效鸣, 等. 2008. 晋城煤层气成藏机制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 33(6): 807–813.
- 韦重韬, 姜波, 傅雪海, 等. 2007. 宿南向斜煤层气地质演化史数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 28(1): 54–57.
- 韦重韬, 秦勇, 傅雪海, 等. 2004. 煤层气地质演化史数值模拟[J]. 煤炭学报, 29(5): 518–522.
- 韦重韬, 秦勇, 姜波, 等. 2008. 华北残留盆地煤层气成藏动力学过程研究——以沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 地质学报, 82(10): 1363–1367.
- 韦重韬, 周荣福. 2003. 煤层气多煤层扩散逸失地质历史模型及数值模拟[J]. 高校地质学报, 9(3): 390–395.
- 吴财芳, 秦勇, 傅雪海, 等. 2005a. 煤基块弹性能及其与地质控制因素之间的关系[J]. 中国矿业大学学报, 34(5): 636–639.
- 吴财芳, 秦勇, 傅雪海, 等. 2007. 沁水盆地煤储层地层能量演化历史研究[J]. 天然气地球科学, 18(4): 557–560.
- 吴财芳, 秦勇, 傅雪海, 等. 2005b. 山西沁水盆地煤层气成藏的微观动力条件研究[J]. 现代地质, 19(3): 449–457.
- 吴财芳, 秦勇, 韦重韬, 等. 2008. 沁水盆地南部煤层气藏的有效压力系统研究[J]. 地质学报, 82(10): 1372–1375.
- 吴财芳, 秦勇. 2012. 煤储层弹性能及其控藏效应：以沁水盆地为例[J]. 地学前缘, 19(2): 248–255.
- 吴财芳. 2004. 煤层气成藏能量动态平衡及其地质选择过程[D]. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文.
- 吴鲜, 廖冲, 叶玉娟, 等. 2011. 水文地质条件对煤层气富集的影响[J]. 重庆科技学院学报, 13(5): 78–81.
- 吴艳艳, 秦勇, 刘金钟, 等. 2012a. 矿物/金属元素在煤成烃过程中的作用——以黔西滇东上二叠统大河边煤矿煤样为例[J]. 天然气地球科学, 23(1): 141–152.
- 吴艳艳, 秦勇, 刘金钟, 等. 2012b. 煤在钼作用条件下的气态烃生成与演化[J]. 高校地质学报, 18(3): 474–478.
- 吴艳艳. 2011. 煤层气生成过程中的矿物/金属元素催化作用(D). 徐州: 中国矿业大学博士学位论文.
- 夏遵义, 白志强. 2004. 利用产甲烷菌进行CO₂地质固定在中国生物气田的应用初探[J]. 石油勘探与开发, 31(6): 72–74.
- 肖芝华, 胡国艺, 钟宁宁, 等. 2008. 矿物中的微量元素对有机质产气的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 32(1): 33–36.
- 闫宝珍, 王延斌, 丰庆泰, 等. 2008. 基于地质主控因素的沁水盆地煤层气富集划分[J]. 煤炭学报, 33(10): 1102–1106.
- 杨明显, 李大华, 陈飞. 2011. 重庆地区二叠系上统龙潭组/吴家坪组煤变质规律及其对煤层含气量的影响[J]. 中国煤炭地质, 23(11):

- 27-31.
- 杨松. 2011. 深部煤层孔渗特征可改造性及其地质控制因素——以鄂尔多斯盆地东部为例[D]. 徐州: 中国矿业大学硕士学位论文.
- 杨兆彪, 秦勇, 高弟, 等. 2011a. 煤层群条件下的煤层气成藏特征[J]. 煤田地质与勘探, 39(5): 22-26.
- 杨兆彪, 秦勇, 高弟. 2011b. 黔西比德—三塘盆地煤层群发育特征及其控气特殊性[J]. 煤炭学报, 36(4): 593-597.
- 杨兆彪, 秦勇, 高弟. 2011c. 黔西比德—三塘盆地煤层群含气系统类型及其形成机理[J]. 中国矿业大学学报, 40(2): 215-221.
- 杨兆彪. 2011. 多煤层叠置条件下的煤层气成藏作用[D]. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文.
- 杨珍祥, 李巧梅. 2008. 吐哈盆地沙尔湖洼陷煤层气成藏地质特征[J]. 新疆石油地质, 29(6): 713-715.
- 张国防, 吴德云, 马金钰. 1993. 盐湖相石油的早期生成[J]. 石油勘探与开发, 20(5): 42-52.
- 张景廉, 张平中. 1996. 黄铁矿对有机质成烃的催化作用讨论[J]. 地球科学进展, 11(3): 282-286.
- 张可铭, 蔡益栋, 何志勇, 等. 2011. 延川南煤层气控气地质特征分析[J]. 煤炭技术, 30(4): 129-134.
- 张培河. 2008. 煤层气成藏条件分析方法——以韩城地区为例[J]. 中国煤层气, 5(3): 12-16.
- 张铁刚, 崔洪庆, 李银真. 2007. 阜新盆地次生混合气特征[J]. 中外能源, 12(2): 33-36.
- 赵桂瑜, 李术元, 刘洛夫. 2005. 碳酸盐岩干酪根催化降解生烃过程及动力学研究[J]. 地质科学, 40(1): 47-54.
- 赵靖舟, 宋立军, 时保宏. 2008. 中国大陆区煤层气盆地划分原则与方案探讨[J]. 地质学报, 82(10): 1402-1407.
- 赵丽娟, 秦勇, 林玉成. 2010. 煤层含气量与埋深关系异常及其地质控制因素[J]. 煤炭学报, 35(7): 1165-1169.
- 赵丽娟, 秦勇, 申建. 2012. 深部煤层吸附行为及含气量预测模型[J]. 高校地质学报, 18(3): 553-557.
- 赵丽娟. 2011. 深部煤层含气量预测及其地质控制——以鄂尔多斯盆地东部为例[D]. 徐州: 中国矿业大学硕士学位论文.
- 赵群, 王红岩, 李景明, 等. 2007. 我国高低煤阶煤层气成藏的差异性[J]. 天然气地球科学, 18(1): 129-133.
- 郑贵强, 王勃, 李景明, 等. 2009. 陕西黄陵矿区煤层气富集主控特征与富集规律研究[J]. 中国煤层气, 6(1): 19-21.
- 周铁金, 姚艳斌. 2006. 西北地区构造活动对煤层气成藏的控制作用[J]. 渤海大学学报, 27(2): 136-141.
- 朱志敏, 沈冰, 崔洪庆, 等. 2007. 阜新盆地煤层气成因分析[J]. 地质科技情报, 26(3): 67-70.
- 左银卿, 孟庆春, 任严, 等. 2011. 沁水盆地南部高煤阶煤层气富集高产控制因素[J]. 天然气工业, 31(11): 11-13.
- Alexeev A D, Vasilenko T A and Ulyannova E V. 1999. Closed porosity in fossil coals [J]. Fuel, 78(5): 635-638.
- Andresen B, Barth T and Irwin H. 1993. Yields and carbon isotopic composition of pyrolysis products from artificial maturation processes [J]. Chemical Geology, 106(1): 103-119.
- Butala S J M, Medina J C, Taylor T Q, et al. 2000. Mechanisms and kinetics of reactions leading to natural gas formation during coal maturation [J]. Energy and Fuels, 14(2): 235-259.
- Dembieki J H. 1990. Mineral matrix effete during analytical pyrolysis of source rocks [J]. Association Petroleum Geochemistry Exploration Bull, 6(1): 78-105.
- Donald A K, Romeo M F, Christophe V, et al. 2008. Molecular sequences derived from Paleocene Fort Union Formation coals vs. associated produced waters: implications for CBM regeneration [J]. International Journal of Coal Geology, 76(1): 3-13.
- Hunt J M. 1991. Modeling oil generation with time-temperature index graphs based on the Arrhenius equation [J]. AAPG Bull, 75(6): 795-807.
- Jiang Jingyu, Cheng Yuanping, Wang Lei, et al. 2011. Effect of magma intrusion on the occurrence of coal gas in the Wolonghu coalfield [J]. Mining Science and Technology, 21(6): 737-741.
- Lewan M D. 1993. Laboratory simulation of petroleum formation: Hydrous pyrolysis. In: EngelMH, Macko S A. Organic Geochemistry: Principles and Applications [M]. New York: Plenum Press: 419-442.
- Li D, Hendry P and Faiz M. 2008. A survey of microbial populations in some Australian coalbed methane reservoirs [J]. International Journal of Coal Geology, 76(1): 14-24.
- Mango F D and Hightower J W. 1997. The catalytic decomposition of petroleum into natural gas [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61: 5347-5350.
- Medina J C, Butala S J, Bartholomew C H, et al. 2000. Low temperature iron- and nickel-catalyzed reactions leading to coalbed gas formation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(4): 643-649.
- Michael S G, Keith C F and Patrick C G. 2008. Characterization of a methanogenic consortium enriched from a coalbed methane well in the Powder River Basin, USA [J]. International Journal of Coal Geology, 76(1): 34-45.
- Michels R, Enjelvin-Raoult N, Elie M, et al. 2002. Understanding of reservoir gas compositions in a natural case using stepwise semi-open artificial maturation [J]. Marine and Petroleum Geology, 19(5): 589-599.
- Price L C and Schoel M. 1995. Constrains on the origins of hydrocarbon gas from compositions of gases at their site of origin [J]. Nature, 378: 368-371.
- Qin Yong, Fu Xuehai, Wu Caifang, et al. 2005. Self-adjusted elastic action and its CBM pool-forming effect of the high rank coal reservoir [J]. Chinese Science Bull, 50(Z1): 99-103.
- Ramaswamy G. 2002. A field evidence for mineral-catalyzed formation of gas during coal maturation [J]. Oil and Gas Journal, 100(38): 32-36.
- Steve H H, Richard L S and Charles E B. 2008. Microbial and chemical factors influencing methane production in laboratory incubations of low-rank subsurface coals [J]. International Journal of Coal Geology, 76(1): 46-51.
- Wu Caifang, Qin Yong and Fu Xuehai. 2007. Stratum energy of coalbed gas reservoir and their control on the coal-bed gas reservoir formation [J]. Science in China (D), 50(9): 1319-1326.