

doi: 10.12029/gc20210205

毕彩芹,胡志方,汤达祯,陶树,张家强,唐淑玲,黄华州,唐跃,袁远,徐银波,单衍胜,迟焕鹏,刘伟,朱韩友,王福国,周阳. 2021. 煤系气研究进展与待解决的重要科学问题[J]. 中国地质, 48(2): 402-423.

Bi Caiqin, Hu Zhifang, Tang Dazhen, Tao Shu, Zhang Jiaqiang, Tang Shuling, Huang Huazhou, Tang Yue, Yuan Yuan, Xu Yinbo, Shan Yansheng, Chi Huanpeng, Liu Wei, Zhu Hanyou, Wang Fuguo, Zhou Yang. 2021. Research progress of coal measure gas and some important scientific problems[J]. Geology in China, 48(2):402-423(in Chinese with English abstract).

## 煤系气研究进展与待解决的重要科学问题

毕彩芹<sup>1,2</sup>, 胡志方<sup>1,2</sup>, 汤达祯<sup>3</sup>, 陶树<sup>3</sup>, 张家强<sup>1,2</sup>, 唐淑玲<sup>3</sup>, 黄华州<sup>4</sup>, 唐跃<sup>1,2</sup>, 袁远<sup>1,2</sup>,  
徐银波<sup>1,2</sup>, 单衍胜<sup>1,2</sup>, 迟焕鹏<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>5</sup>, 朱韩友<sup>6</sup>, 王福国<sup>7</sup>, 周阳<sup>5</sup>

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局非常规油气地质重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116; 5. 辽宁省能源地质勘查开发研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110013; 6. 四川省煤田地质工程勘察设计院, 四川 成都 610000; 7. 中煤地质集团有限公司, 北京 100049)

**摘要:**煤系气是非常规天然气领域的重要组成部分,也是近年来非常规天然气领域研究的热点。总结煤系气研究进展,明确亟待解决的重要科学问题,对于完善煤系气地质理论、推动煤系气勘探开发具有重要意义。当前煤系气研究进展主要表现在以下 5 个方面:①基于煤系地层沉积特点,总结了煤系气共生成藏的 6 个基本地质特征;②初步划分了煤系气共生组合方式,分析了煤系气 4 大成藏要素及其配置关系的控气作用;③分析了煤系含气系统叠置性地质成因,提出了叠置煤系气系统的识别与评价方法及控制叠置含气系统合采兼容性的地质要素;④总结了煤系“三气”共探合采理论研究、技术方法、产层贡献识别技术及合采产层优化组合与“甜点”评价;⑤在煤系气资源评价与有利区预测方面进行了有效的探索性研究。在对研究现状总结的基础上,提出了煤系气领域亟待解决的重要科学问题:①煤系气储层精细描述及可改造性评价;②煤系气资源评价方法及有利区优选;③煤系气开发甜点区(段)评价技术;④叠置煤系气系统合采兼容性评价。这些问题的解决,将有利于推动煤系气地质理论发展和煤系气资源的高效开发利用。

**关键词:**煤系气;共生成藏;叠置含气系统;资源评价;地质选区;共探合采;兼容性;油气调查工程  
中图分类号:P618.3 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)02-0402-22

## Research progress of coal measure gas and some important scientific problems

BI Caiqin<sup>1,2</sup>, HU Zhifang<sup>1,2</sup>, TANG Dazhen<sup>3</sup>, TAO Shu<sup>3</sup>, ZHANG Jiaqiang<sup>1,2</sup>,  
TANG Shuling<sup>3</sup>, HUANG Huazhou<sup>4</sup>, TANG Yue<sup>1,2</sup>, YUAN Yuan<sup>1,2</sup>, XU Yinbo<sup>1,2</sup>, SHAN Yansheng<sup>1,2</sup>,  
CHI Huanpeng<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>5</sup>, ZHU Hanyou<sup>6</sup>, WANG Fuguo<sup>7</sup>, ZHOU Yang<sup>5</sup>

(1. Oil and gas survey, CGS, Beijing 100083, China; 2. Key laboratory of unconventional oil and gas geology, CGS, Beijing 100083,

收稿日期:2020-10-10; 改回日期:2020-12-16

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“鸡西等含煤盆地煤系气地质调查(2019-2021)”(DD20190101)、“黔西南及东北三江地区煤层气基础地质调查(2016-2018)”(DD20160186)资助。

作者简介:毕彩芹,女,1972年生,硕士,正高级工程师,现主要从事煤层气等非常规油气地质调查与评价工作;

E-mail: bicaiqin@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者:胡志方,男,1966年生,博士,正高级工程师,主要从事油气地质、非常规油气地质与工程技术研究工作;

E-mail: huzhifang@mail.cgs.gov.cn。

China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. Liaoning Province Geology and Minerals Group Energy Geology Co., Ltd., Shenyang 100011, China; 6. Sichuan Institute of Coal Field Geological Engineering Exploration and Designing, Chengdu 610072, China; 7. China coal geology engineering corporation, Beijing 100040, China)

**Abstract:** Coal measure gas is an important part of unconventional natural gas field, and it is also a hot spot of unconventional natural gas research in recent years. Summing up the research progress of coal measure gas and clarifying the important scientific problems to be solved are of great significance for perfecting the geological theory of coal measure gas and promoting the exploration and development of coal measure gas. The current research progress of coal measure gas can be mainly concluded in the following five aspects: a. summary of six basic geological characteristics of paragenic reservoir of coal measure gas based on the sedimentary characteristics of coal measure gas; b. preliminary classification of paragenesis and assemblage mode of coal measure gas, and analysis of four major controlling factors of coal measure gas and their allocation relationship; c. analysis of the genesis of the superimposition of coal measure gas, and raise of identification and evaluation method of the superimposed coal measure gas system and the geological elements controlling the compatibility of the superimposed gas bearing system; d. summary of the theoretical research, technical methods, recognition technology of production contribution, optimal combination of production layers and "desserts" evaluation of co-exploration and co-production in coal measure gas; and e. some exploratory researches in evaluation of coal measure gas resource and prediction of its prospects. Based on the summary of the present research, four important scientific problems to be solved urgently in the study of coal measure gas are put forward as follows: a. the fine reservoir description and reservoir removability evaluation of coal measure gas; b. evaluation of coal measure gas resources and optimization of its prospects; c. the evaluation technology of development sweet areas (sector) of coal measure gas; and d. co-production compatibility evaluation of superimposed coal measure gas system. The solution of these problems will contribute to the efficient development of coal measure gas resources and the development of its geological theory.

**Key words:** Coal measure gas; paragenesis and accumulation; superimposed gas bearing system; resource evaluation; optimization of prospects; co-exploration and co-production; geological compatibility; oil-gas survey engineering

**About the First author:** BI Caiqin, female, born in 1972, Master's degree, professor-level senior engineer, engaged in geological investigation, evaluation and research of unconventional oil & gas and petroleum geology, E-mail: bicaiqin@mail.cgs.gov.cn.

**About the corresponding author:** HU Zhifang, male, born in 1966, doctor, professor-level senior engineer, engaged in petroleum geology, unconventional oil & gas geology and engineering technology research; E-mail: huzhifang@mail.cgs.gov.cn.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Project(No.DD20190101, No.DD20160186).

## 1 引言

煤系是在一定构造时期形成的、含有煤层或煤线并具有成因联系的一套沉积岩系,主要沉积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(秦勇等,2016)。煤系气是由整个煤系中的生烃母质在地质演化过程中生成并保存在各类岩层中的、以甲烷为主的天然气资源,根据储层岩性差异可区分为煤层气、煤系页岩气、煤系致密砂(灰)岩气及天然气水合物等(傅雪海等,2016,2018)。严格来说,煤系气是一个基于储层成因类型或地质载体给出的矿产资源定义。

煤系气泛指煤系中赋存的各类天然气,包括煤

层气、煤系页岩气、煤系致密砂岩气、煤系灰岩气等,其中煤层气、煤系页岩气和煤系致密砂岩气通常被称为煤系“三气”或“煤系非常规气”,是非常规天然气领域的重要组成部分,也是近年来非常规天然气领域研究的热点(曹代勇等,2014;王佟等,2014;秦勇等,2016;朱炎铭等,2016;梁冰等,2016;李靖等,2017;欧阳永林等,2018;秦勇,2018a;宋儒等,2019;邹才能等,2019)。中国煤系分布范围广、厚度大,煤系气资源占全国天然气地质资源总量的60%以上,其中,评价2000 m以浅煤层气地质资源量约为 $29.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (2016年原国土资源部油气资源动态评价),估算2000~3000 m煤层气资源量约为 $18.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,估算3000 m以浅煤系致密砂岩气与页岩气资源

约 $52.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (不含东北地区)(傅雪海等,2016)。

全球煤系气开发以美国怀俄明州粉河盆地、澳大利亚苏拉特盆地为成功典范。近年来,中国鄂尔多斯盆地东缘、准噶尔盆地东部、黔西、川南、鸡西盆地等煤系气共探合采试验相继取得成功,预示着我国煤系气勘查前景良好。然而,中国目前以单一气藏勘探开发为主,煤系气共探合采尚处于探索阶段,深度大于1000 m的煤系气勘查基本空白。针对多煤层发育区或煤层群发育区,将煤层、煤系泥质岩、煤系砂岩互层段作为统一目标层段进行综合评价和立体勘探开发,将极大地拓展资源评价领域和空间,增大潜在资源量与资源丰度,提高煤系气合采井的产能。因此,厘清煤系气概念,跟踪煤系气地质研究与勘探开发和技术进展,明确亟待解决的重要科学问题,对于完善煤系气地质理论、推动煤系气勘探开发具有重要意义。

## 2 国内外煤系气勘探开发现状

全球煤系气资源丰富,俄罗斯、加拿大、中国、美国、澳大利亚、德国、波兰、英国、乌克兰、哈萨

克斯坦、印度、南非等国是主要的煤系气资源国家(图1,表1)(邹才能等,2019;李勇等,2020)。煤系气的勘探开发可以追溯到20世纪40—50年代,德国西北盆地和西荷兰盆地煤系气田的发现(史训知等,1985),目前,美国、澳大利亚、中国和加拿大等国家已实现煤系气商业化开发(Vinson et al., 2019; Jamieson Michael et al., 2019; Tao et al., 2019; Cheung Katrina et al., 2019)。2001—2002年,美国在Piceance盆地白河隆起开展了煤层气与致密砂岩气合采先导性试验,在怀俄明州粉河盆地对富含煤层气、致密砂岩气层段进行分压合采,三套煤层间距约100 m,数十米至上百米厚的煤层-砂岩同时开发,多口直井单井日产气量达到数万 $\text{m}^3$ ,最高达 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上(Oison et al., 2002)。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,单井平均产气量 $(2.83 \sim 5.66) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,最高可达 $56 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,其煤系沉积旋回特点值得高度关注。

中国煤系气资源丰富,主要分布在鄂尔多斯、沁水、滇东黔西、黔北—川南等石炭—二叠系含煤盆地以及准噶尔、塔里木、吐哈、二连、海拉尔、三江

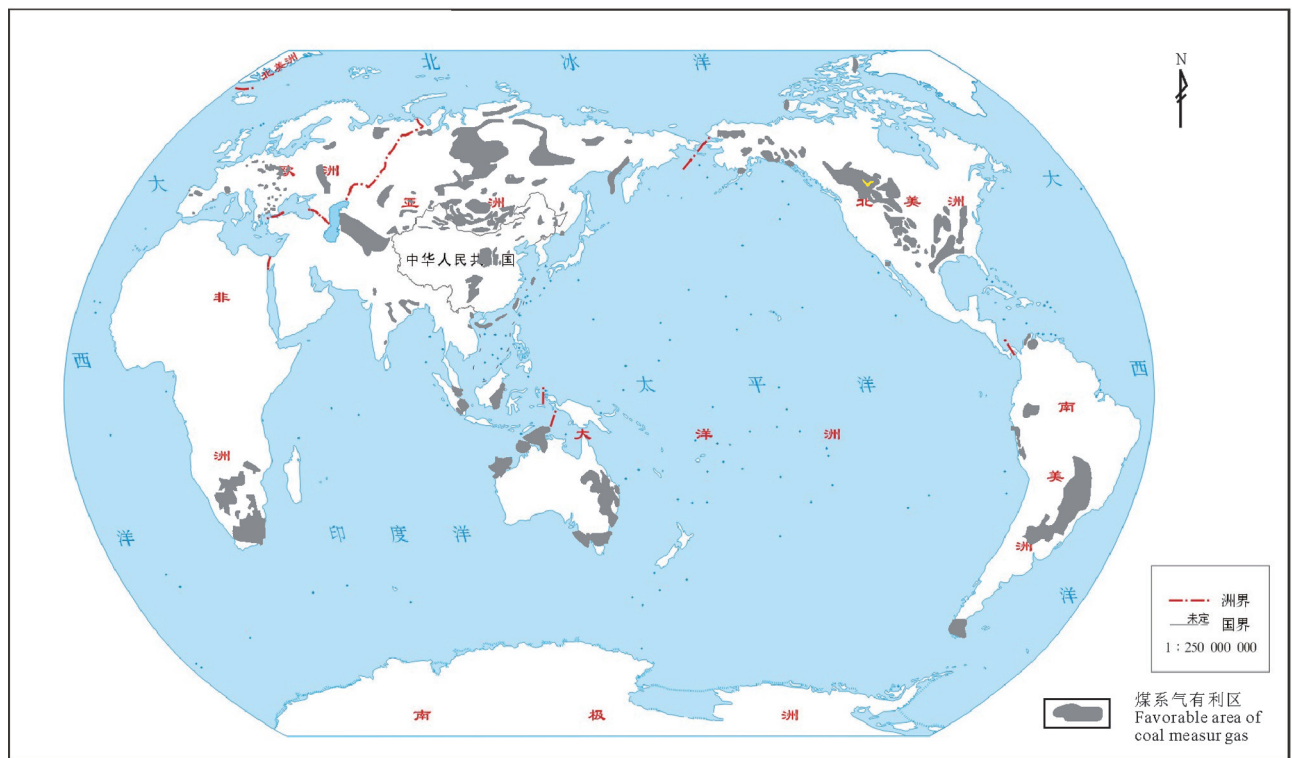


图1 全球煤系天然气有利区分布(据邹才能等,2019)

Fig.1 Distribution of prospects of global coal measures natural gas resources (after Zou Caineng et al., 2019)

表1 国内外典型含煤盆地煤层气地质条件及赋存特征(据李勇等, 2020)  
Table 1 Geological conditions and occurrence characteristics of coalbed methane in typical coal-bearing basins at home and abroad (after Li Yong et al., 2020)

国家	盆地/地区	煤层时代	开采深度/m	煤质组最大反射率/%	煤系沉积环境	煤层含气量/m <sup>3</sup> /t	渗透率/10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup>	压力梯度/(MPa/100m)	煤层气单井日产气/万m <sup>3</sup>	煤厚m/层数	其他气藏类型
美国	San Juan	K	150~800	0.4~1.2	三角洲体系	8.5~20.0	1~50	0.80~1.36	0.7~5.0	9~30/1~5	致密气、页岩气
	Black Warrior	C	500~1200	0.7~1.9	三角洲体系	10~17	1~25	0.88~0.95	0.28~0.33	4~8/5~15	致密气
	Appalachian	C	400~853	1.1~2.0	三角洲沉积	11~22	1~15	0.86~0.95	0.28~0.30	2~6/5~10	致密气
	Powder River	E	120~366	0.3~0.4	河流三角洲	0.6~5.0	10~20	0.70~0.97	0.2~0.4	12~30/2~5	致密气
	Surat	K <sub>2</sub> -E	150~800	0.3~0.6	河流-湖泊相	3~9	2~10	0.90~1.00	0.21	10~30/5~10	页岩气、致密气
澳大利亚	Bowen	P	150~600	0.7~1.0	河流-三角洲	1~15	1~10	0.98	0.15~4.08	2~3/2~6	致密气
加拿大	Alberta	K	200~800	0.3~0.8	河流-滨岸	2~14	20~30	0.90~1.00	0.25	10~25/5~10	致密气、页岩气
中国	鄂尔多斯盆地东缘	C-P	400~1000	0.6~2.2	障壁潟湖、三角洲	6~20	0.1~10.0	0.70~0.90	0.1	1~20/3~10	致密气、页岩气
	沁水盆地	C-P	300~1500	1.5~4.2	湖畔-障壁砂坝-潟湖	10~35	0.5~1.6	0.76~0.93	0.1~0.5	3.65~18.50	致密气、页岩气
	黔西滇东	P	400~1200	1.1~2.5	湖畔-潟湖相	4.4~16.0	0.005~0.5	0.66~1.43	0.1~0.5	0.2~3.0/17~73	致密气、页岩气
	阜新盆地	K	100~1200	0.3~0.7	河流-沼泽相	8.7~10.6	0.7~6.0	0.55~1.25	0.2~1.5	0.7~20/10~30	致密气
准噶尔盆地南缘	J	400~1200	0.4~1.2	冲积扇-扇三角洲-河流-沼泽相	2~15	0.2~20.0	0.51~0.96	0.1~1.5	25~187/3~39	致密气	
二连盆地	K	200~900	0.3~0.6	扇三角洲-湖泊沉积	0.4~4.0	<1	0.95~1.05	0.2	60~220/6	—	
吉林噶朗图											

—穆棱河等侏罗—白垩系等含煤盆地(群)(图2)。现阶段以单一煤层气勘探开发为主,至2019年底累计探明煤层气地质储量约 $7175 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,2008年地面开发煤层气产量达到最高,约 $55 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,2018年地面开采煤层气产量 $51.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,资源探明率和利用率总体偏低(Qin et al., 2017; Lau et al., 2017; Men et al., 2017; Hou et al., 2018; Mu et al., 2018; 张文浩等,2019)。中联煤层气有限公司副总经理吴建光在2013年第十三届国际煤层气暨页岩气研讨会提出“三气合采”的概念,宋岩等(2017)也认为煤系气立体勘探开发是未来我国煤层气开发技术攻关的方向。近年来,我国在鄂尔多斯盆地东缘临兴、神府、横山堡南等区块取得煤层气、致密砂岩气勘查突破,多口合采井在煤层、砂岩层段压裂试气获得高产,最高产气量达 $5.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (曹代勇等,2016);而煤系页岩气尚处于评价和勘查起步阶段(Li et al., 2019)。2017年以来,中国地质调查局在东北三江地区鸡西盆地地下白垩统城子河组钻获煤系气显示

活跃,鸡煤参1井煤层气、煤系(高碳泥岩)页岩气、致密砂岩气“三气”合采产气量突破 $2387 \text{ m}^3/\text{d}$ ,显示了区域煤系气良好的勘探开发潜力(毕彩芹等,2018)。

### 3 国内外煤系气研究进展

国内外学者基于煤系“三气”成藏机理研究,认为煤系“三气”具有“同源共生”的特点(Law, 2002; Laubach & Gale, 2006; 曹代勇等, 2014; 王佟等, 2014; 秦勇等, 2016; 傅雪海等, 2016; 朱炎铭等, 2016; 梁冰等, 2016; 秦勇, 2018a; 宋儒等, 2019; 邹才能等, 2019)。其中,具有成因联系的煤层和炭质泥页岩是煤系气的主要烃源岩(Law, 2002; 姜文利, 2010; 据宜文等, 2011),煤系烃源岩所具有的广覆式生烃、持续性充注特点,为煤系气藏的形成提供了气源保障(杨华等, 2012)。煤系气“同源共生、多层共存”的特征,在沁水、鄂尔多斯、鸡西等诸多盆地中都有体现,为我国煤系气地质研究和综合开发

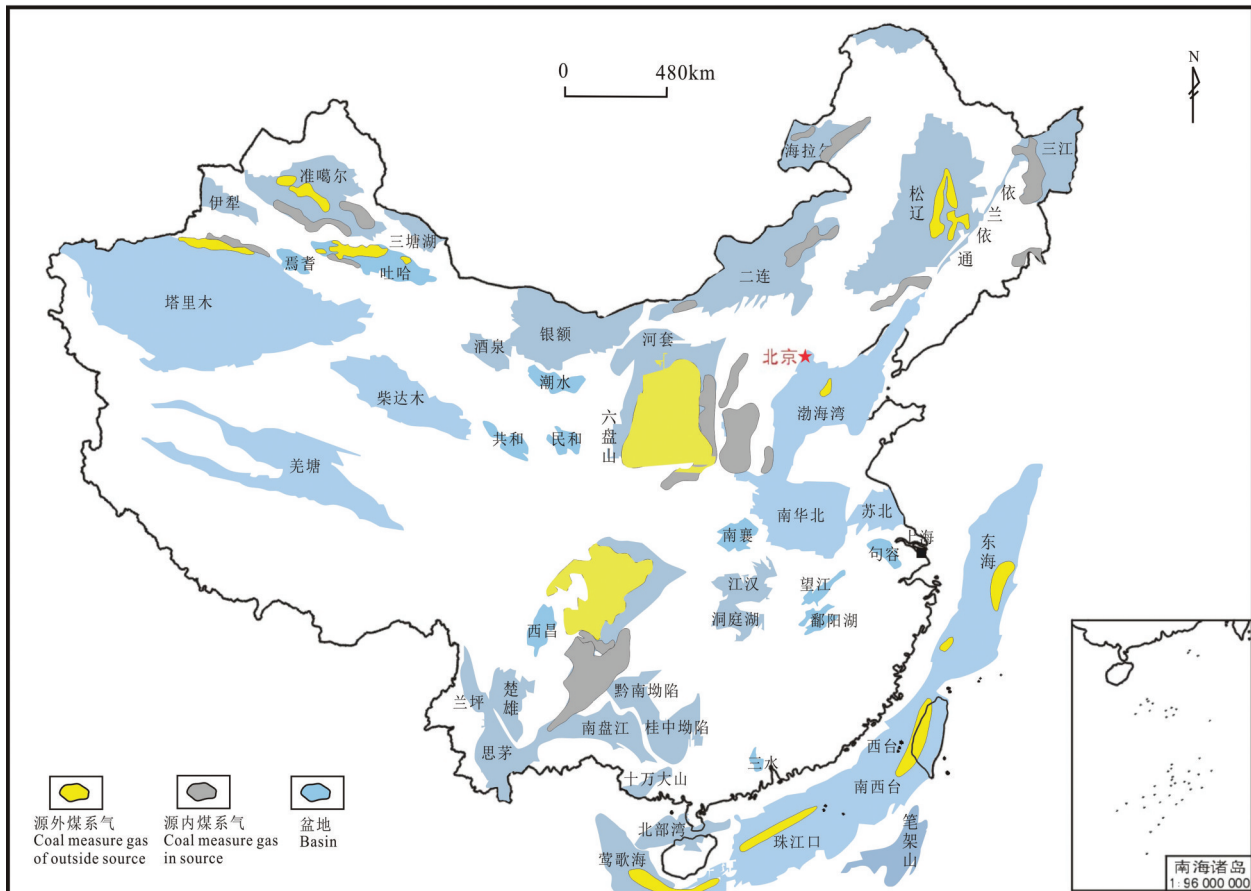


图2 中国煤系天然气有利区分布(据邹才能等,2019)

Fig.2 Distribution of natural gas prospects in coal measures in China (after Zou Caineng et al., 2019)

利用提供了有价值的参考。

### 3.1 煤系气基本地质特征

煤系形成于海陆交互或陆相三角洲、瀉湖-潮坪、河流-湖泊、冲积扇等沉积体系(秦勇,2017),具有沉积物源丰富、岩石类型多、单层薄、互层频繁、旋回性强、有机质含量高等特点(图3),为煤系气共生成藏创造了条件。归纳而言,煤系气具有以下六大基本地质特征。

#### 3.1.1 生烃量大,持续充注能力强

煤系烃源岩主要指煤系中的煤层和炭质泥页岩,总厚度大,有机质含量较高,干酪根类型以Ⅲ型为主,生烃能力强,具有持续生烃和充注能力,因此煤系气资源丰度普遍较高(李建忠,2012;曹代勇等,2014;秦勇等,2016;刘洁琪,2017)。2017年以来,中国煤层气直井开发试验取得新突破,其中,黔西杨煤参1井以煤层、煤系炭质泥页岩和致密砂岩为目标层,最高日产气量达到5011 m<sup>3</sup>、稳定日产气量4000 m<sup>3</sup>以上,创下西南地区单井直井日产气量

和稳产气量最高纪录;估算该井所在的杨梅树向斜煤系气资源丰度5.66×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,比单纯的煤层气资源丰度提高了9倍(Bi et al., 2020)。

#### 3.1.2 多相态气体共存,气藏类型多样

煤系天然气储层类型、赋存状态多样(杨兆彪等,2011;陆加敏等,2016;秦勇,2018a),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,还有混合态的页岩气以及特殊条件下形成的天然气水合物。同一岩层(如煤层、高碳泥页岩)可兼具源岩、储层和盖层的功能,同一组合中的天然气既具自生自储性质,又有它生它储特征,气藏类型具多样性。煤系气赋存态的多样性导致气体产出机理和气藏开发方式差别较大,煤系气共探合采技术面临极大的挑战。

#### 3.1.3 源储相依、储盖交互、多重封闭

煤系岩石类型多,互层频繁,旋回性极强,同一岩层兼具生储盖功能,垂向上构成多套与层序地层格架有关、厚度不大、类型多变的生储盖组合及多

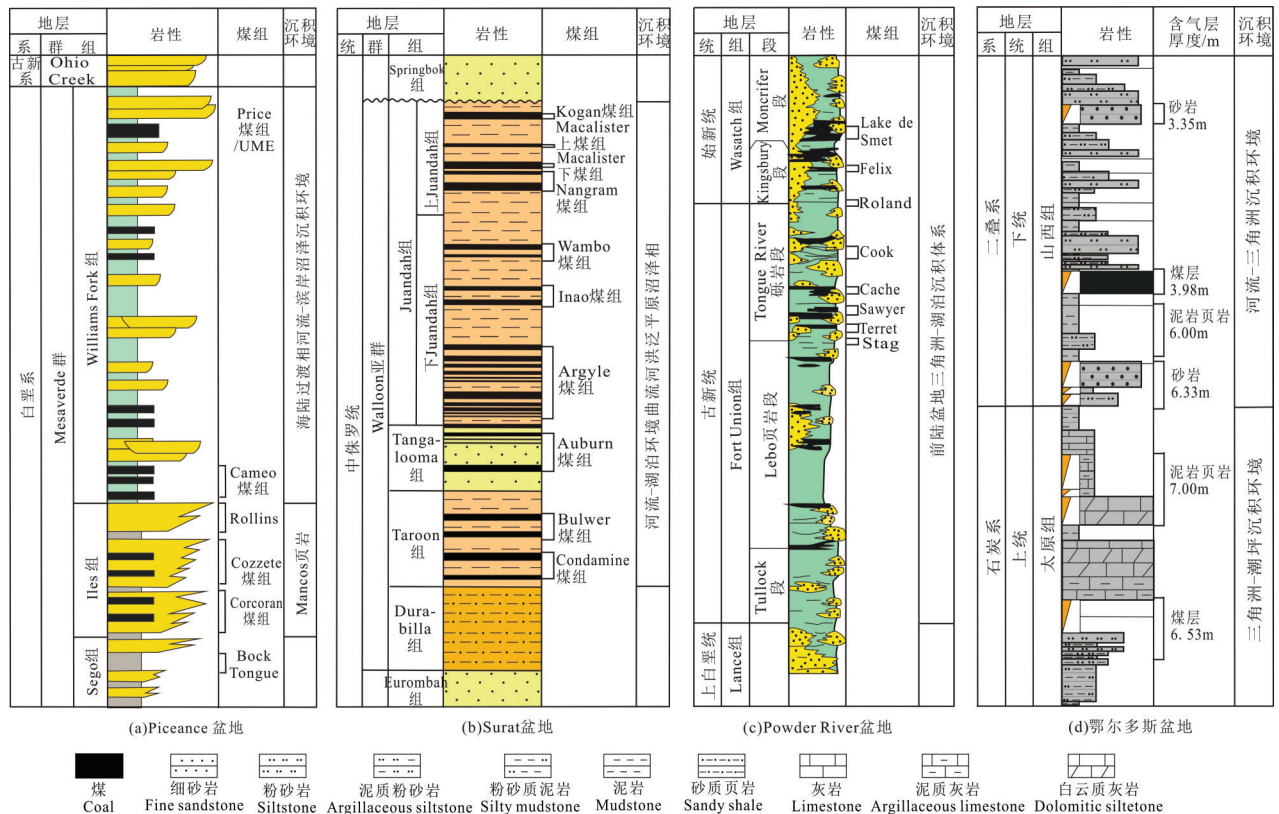


图3 国内外典型盆地煤系地层柱状图(据俞益新等,2018;李勇等,2020修改)  
Fig.3 Coal measure strata column of typical coal-nearing basins at home and abroad  
(modified from Yu Yixin et al., 2018; Li Yong et al., 2020)

重内幕封闭(郑书洁,2016)。如鄂尔多斯盆地东缘临地区石炭二叠系煤系非常规气生储盖组合类型可划分为源储一体型、源储紧邻型和源储混合型,一套生储盖组合往往可跨越数个三级层序。

### 3.1.4 气水分布关系复杂

煤系气“源储相依、储盖交互、多重封闭”的成藏特点,导致煤系内部气水分布关系复杂,垂向上往往发育多套流体压力系统,气显示强烈且形式多变(袁学旭,2014;杨兆彪等,2015)。在多煤层地区,多层叠置独立含气系统的发育具有广泛性;在多层叠置独立含气系统广泛发育的区域,储层超压状态更为普遍。如黔西地区各煤层的压力系数分布特征显示出相近煤层压力系数差距较大,表明相近煤层处于不同的压力系统(图4);部分煤层渗透率较低而压力系数较高,超压的出现使得相邻煤储层压力状态发生突变,形成独立的含气系统。

### 3.1.5 系统间动态平衡关系脆弱

煤层群发育区煤系多个独立的叠置含气系统紧邻或间距较小,易受到开采扰动而造成含气系统间相互干扰,进而破坏系统间的动态平衡与气藏合层开发效果(傅雪海等,2013;杨兆彪等,2013)。傅雪海等(2013)根据地质参数、储层参数、试井参数,采用常规煤储层数值模拟方法和COMET3数值模拟软件预测了织纳煤田比德—三塘矿区的煤层气1

井的单系统排采流体效应和多系统合层排采流体效应(图5),结果表明多含气系统合层排采时,由于各系统压力不同,系统间存在干扰,并非所有含气系统都有产能贡献。

### 3.1.6 储层改造难度大

同一含气系统内部储层岩性变化大,储层物性及力学性质差异显著,各类储层难以进行统一有效的改造(表2,吴建光等,2016)。此外,由于多个储层垂向间距小甚至紧邻,分层改造的技术难度大。

## 3.2 煤系气共生组合方式及成藏要素

### 3.2.1 煤系气共生组合方式

煤系沉积分异作用明显,旋回性强,储盖性能差异显著,形成多类型生储盖组合时空配置关系。纵向上,煤层、高碳泥岩、致密砂岩依据叠置关系的差异形成不同的生储盖组合,如:华北地区太原组表现为页岩气与煤层气多层叠置,山西组为煤层气与致密气多层叠置夹页岩气,上、下石盒子组多为致密砂岩气;华南地区龙潭组表现为煤层气、页岩气、致密砂岩气多层叠置;西北地区侏罗系、东北地区白垩系表现为煤层气与致密砂岩气或常规油气多层叠置,夹页岩气(傅雪海等,2016)。

梁宏斌等(2011)认为煤系游离气藏和吸附气藏一样具有大面积“连续”分布特征,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的关系,将煤系气共存系统划分为煤岩-顶板、煤岩-底板、煤岩-围岩3种组合类型,认为煤岩-顶板型系统中游离气与吸附气具有相近的温压条件,可视为统一的吸附气-游离气共存系统。根据源储关系,煤系气共生组合类型可划分为源储一体型、原储紧邻型和源储混合型3种组合形式(郑书洁,2016),或划分为远源型、自源型和自源+他源型3种组合形式(图6,朱炎铭等,2016),该划分方法基本涵盖了前人关于煤系地层、煤系气的地质概念,有利于分析、确定产气层,避免了遗漏含气层;结合研究区储盖层发育特征,可进一步划分煤系气共生组合类型,如:六盘水煤田上二叠统含煤地层中发育“源储一体型”独立煤系页岩气藏、“源储紧邻型”煤系“三气”组合气藏、“下生上储型”煤系“两气”组合气藏共3种气藏类型(易同生等,2018)。

### 3.2.2 煤系气成藏要素

煤系气成藏的4个主控因素,即:生烃强度、运

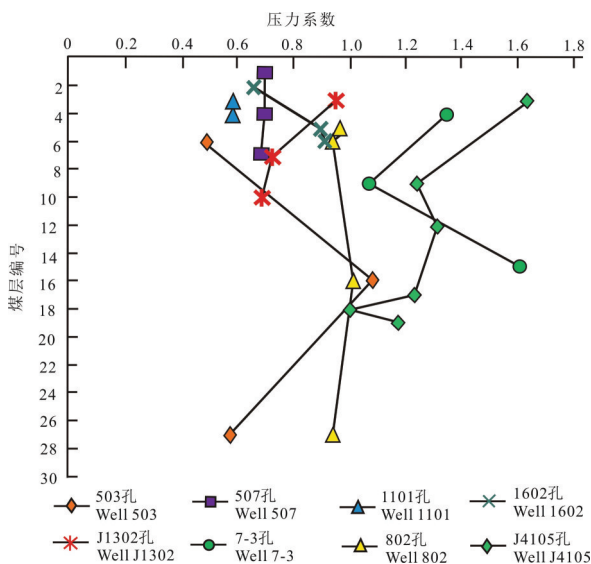


图4 黔西地区各煤层压力系数分布特征(据杨兆彪等,2015)

Fig.4 Pressure coefficient distribution of each coal seam in Western Guizhou (after Yang Zhaobiao et al., 2015)

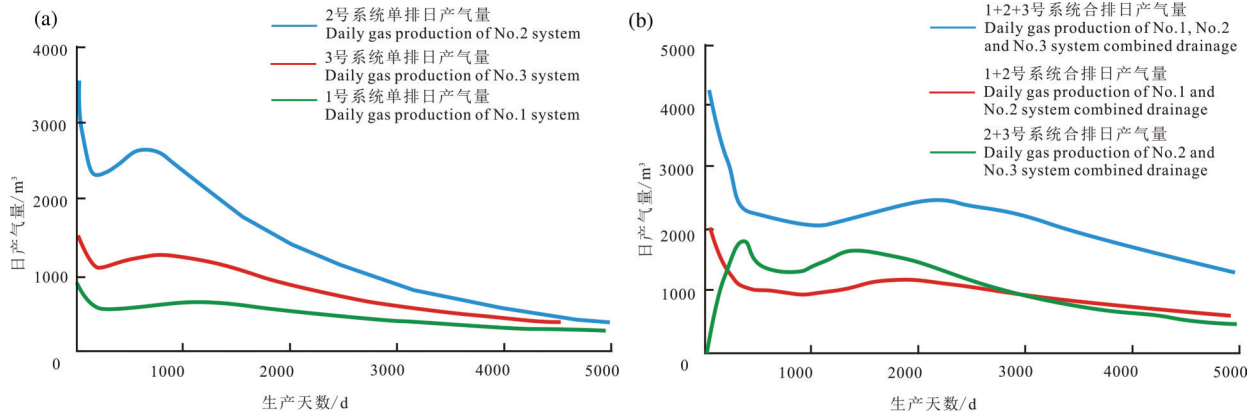


图5 煤层气1井单系统排采(a)与多系统合排(b)日产气量变化曲线图(据傅雪海等,2013)

Fig.5 Variation curve of daily gas production of single system drainage (a) and multi-system combined drainage (b) of coalbed methane well 1(after Fu Xuehai et al., 2013)

移方式与输导体系、地层流体能量、区域有效盖层,其合理配置决定了煤系气开发的经济价值。其中,生烃强度决定了煤系气资源丰度,运移方式与输导体系决定了煤系气藏类型和分布,地层流体能量纵向分布影响煤系气合采方式,区域有效盖层条件决定了煤系气共生成藏的深度上限(秦勇,2018a)。

煤系气共生成藏的生烃强度门限低于常规天然气成藏,聚集系数极高(秦勇,2018a)。煤系中不同烃源岩生烃贡献率存在差异。煤有机碳含量高,生烃贡献率大,对煤系天然气藏起决定作用;煤系炭质泥页岩有机质丰度亦相对较高,生烃贡献率可观;暗色泥页岩有机质虽低于炭质泥页岩,但发育更为稳定,绝对的厚度优势可弥补有机质“欠缺”(朱炎铭等,2016)。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藏,只要生气量达到或超过煤、页岩的储集能力,理论上就可形成较高含气饱和度的非常规气藏,且在煤系烃源岩生烃早期阶段就可满足(秦勇等,2012,2016;邹才能等,2019)。

煤系气源储关系复杂,煤、高碳泥页岩都可为致密砂岩气藏烃源岩,致密砂岩与烃源岩之间往往

相互叠加形成“三明治”型储盖配置,互为盖层。除了作为烃源岩和储气层外,高碳泥页岩还是煤层气藏很好的盖层(梁冰等,2016)。特殊的输导体系使煤系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。煤系气大规模运移的疏导体系包括断层、煤内外生裂隙、节理、层理及煤系中渗透性砂体等;缺乏大规模运移通道时,煤系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(王倩,2015)。其中,经短距离活塞式运移聚集在与烃源岩大面积紧密接触的致密砂岩中,并主要以游离气形式形成致密砂岩气藏。

受区域盖层物性和异常压力的双重作用,煤系气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、杭锦旗地区大型致密气田为“近源箱体”成藏模式。该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(郝蜀民等,2007,2016)。基于此,欧阳永林等(2016)提出了“封闭体系”的概念,封闭体系中煤层气、其他类型煤系气均

表2 煤系气储层地质特点与开发技术比较(据吴建光等,2016)

Table 2 Comparison of geological characteristics and development technology of coal measure gas reservoir (after Wu Jianguang et al., 2016)

储层岩性	差异性					相似性
	赋存态	成藏	敏感性	开发原理	关键技术	
煤层	吸附态占绝对优势	自生自储自保	强压敏、快速敏	排水降压解吸	压裂/分支水平井	低孔低渗毛管压力大,启动压力高,储层剪敏感性,单井产气量低
致密砂岩	游离态	生储盖组合	强水敏,水锁伤害严重	自然降压开采	压裂,解堵,防水锁	
泥页岩	吸附态与游离态共存	自生自储自保	强水敏、强盐敏等	自然/排气降压解吸	体积压裂,连续油管压裂	



可富集成藏,封闭体系控制成藏类型及规模。

煤系气共生成藏受构造、沉积和成岩作用的多重影响。构造控制着煤系形成和赋存特征,煤系“三气”共生成藏过程受控于不同构造阶段煤系埋藏、受热生烃和天然气运移充注之间的配置关系,体现为构造动力能和热动力能的动态演化与气体赋存相态和储层物性的耦合(李俊等,2018)。沉积控制煤系烃源岩(煤、煤系泥页岩)的生烃组分、有机质类型从而控制其生烃潜力,控制储盖层分布特征从而控制煤系气聚集成藏(邵龙义等,2017),河流-三角洲沉积体系是煤系气共生成藏的最有利沉积相带(欧阳永林等,2018)。成岩作用对煤系气的影响,主要体现在煤系有机酸溶蚀致密砂岩和页岩储层形成大量的次生溶蚀孔隙,为煤系气提供了储集空间。

### 3.3 叠置煤系气系统

煤系中不同岩性、物性特征的岩层频繁互层,导致纵向上隔水阻气层或内幕封盖层反复出现,从而在煤系不同层段形成相互独立的含气系统(秦勇等,2008)。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,称为叠置含气系统(秦勇等,2016),通常表现为同一口井不同含气单元流体压力系数不一致(梁宏斌等,2011;袁学旭,2014;杨兆彪等,2015;杨光,2016)。

### 3.3.1 叠置煤系气系统地质成因

叠置含气系统是沉积-水文-构造条件耦合控气作用的产物(秦勇等,2008)。含气系统叠置性受沉积环境及其控制下的层序地层结构影响,层序地层结构对煤系储层含气性和物性具有控制作用,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”。

沉积于最大海泛面附近且与海相泥岩伴生的钙质、菱铁质低渗透岩层(也叫“关键层”)对煤层气垂向渗流具有分划性阻隔作用,是形成叠置含气系统的根本地质原因,从三角洲平原相至三角洲前缘相,关键层发育程度逐渐增强,含气系统垂向结构渐趋复杂,含气系统叠置性渐趋显著(沈玉林等,2012)。

### 3.3.2 叠置煤系气系统识别与评价

目前有3种方法识别、评价煤系含气系统的分隔性。

(1)关键层测井响应识别法。关键层形成于最大海泛面附近、弱氧化-弱还原的水介质条件下潟湖-湖坪-三角洲前缘环境,具有特定的岩石学和物性特征,与一般的煤系泥岩相比,测井曲线响应具有“四高两低”(自然伽马高、声波时差高、补偿中子高、光电吸收截面指数高、深浅双侧向电阻率低)的

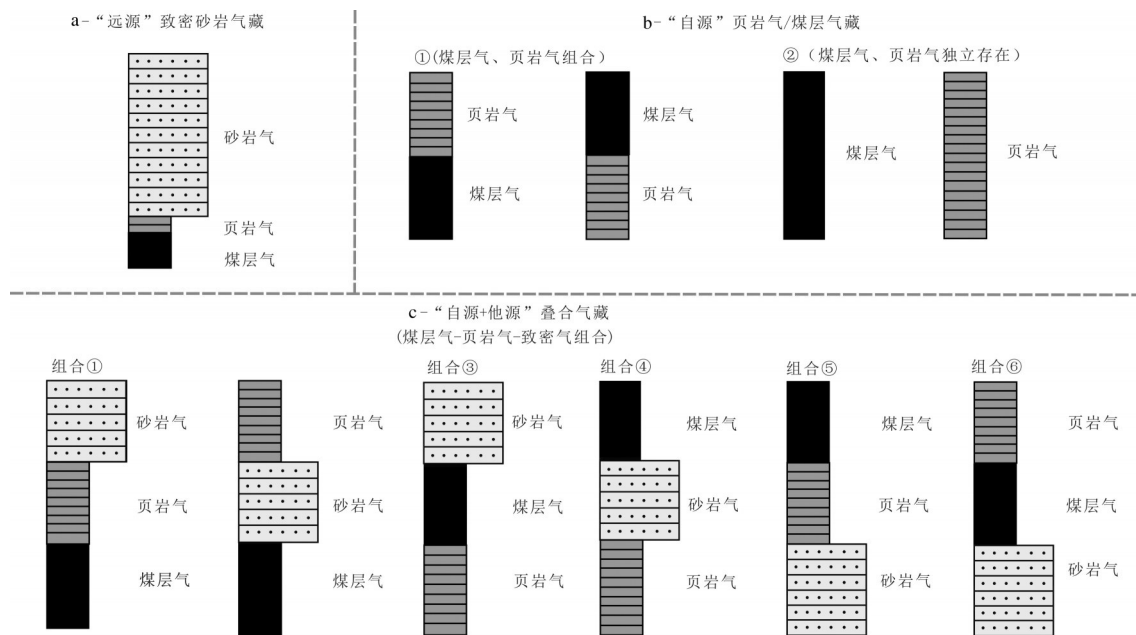


图6煤系天然气藏类型(据朱炎铭等,2016)

Fig.6 Types of natural gas reservoirs in coal measures (after Zhu Yanming et al., 2016)

特点(杨兆彪等,2013;肖骞,2017)。

(2)地下水化学性质差异性。根据煤系水中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等地层环境开放性的敏感性因子、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等地层环境封闭性的敏感性因子,建立评价地下水环境封闭指数,即为(Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)/(Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>),识别评价含气系统的叠置性(张政,2014;郭晨,2015;秦勇,2018a;杨兆彪,2018)。

(3)流体压力曲线法。煤系存在稳定型、衰减型、增强型3种典型流体压力曲线,指示煤系地下水动力条件的垂向分异。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;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,含气系统分隔性显著(秦勇,2018a)。

### 3.4 煤系气共探合采

与单纯的吸附气或游离气开采相比,煤系气合采是不同相态、不同岩性储层中天然气共同开采。受游离天然气保存条件的限制,煤系游离气与吸附气共生富集或具有工业合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,煤系气合采的有利深度一般大于1000 m(秦勇等,2014)。多含气系统叠置共存使得煤系气产气过程中的兼容性差异明显、层间矛盾突出,合采技术难度加大(吴建光,2013;孟艳军等,2013)。煤系气合采技术可行性受制于合采产层地质条件的兼容性、气井工程技术的适应性以及排采管理制度的针对性(秦勇等,2016)。

#### 3.4.1 煤系气共探合采理论研究

实现煤系气高效合采的基础是深刻理解合采兼容性的相关地质问题,对煤系气共生特性及其合采地质动态的深入阐释是贯穿煤系“三气”合采工艺优化和技术创新的主线。煤系气合采工艺优化和创新,需要以充分释放产能为目标、以叠置含气系统合采兼容性为约束条件,其中的关键在于合采地质条件的量化分析(秦勇等,2016,2018b)。

煤系气合采兼容性(即煤系气合采产层的层间矛盾)起源于合采产层能量状态、产层物性之间的差异,含煤地层的“沉积序列与层序格架、含气系统间流体能量差异、系统内不同储层力学性质”是控制煤系叠置含气系统合采兼容性的3个地质要素

(图7,秦勇等,2016)。叠置含气系统及其兼容性是煤系多类型非常规天然气合采可行性的判识基础,可采用生产数据统计分析、数值模拟、物理模拟等方法予以识别。申建等(2018)根据地层压力梯度差异、产层的天然气甲烷同位素差异及天然气生产曲线差异,识别划分了鄂尔多斯盆地东缘临兴区块山西组与石盒子组煤系独立含气系统,提取了地层压力梯度、气层厚度、渗透率及可动水量等影响合采兼容性关键因素,采用最优分割分类方法,确定研究区含气系统兼容性最佳分类数,优选了叠置含气系统合采兼容性较好层段。

郭本广等(2012)在查明临兴地区煤系气成藏配置条件的基础上,对不同层位、不同构造位置上煤层气、致密砂岩气和页岩气的合探合采方案提出了产层组合原则。傅雪海等(2013)针对贵州省织纳煤田煤系“三气”合采出现的排采次序与压力控制下的流体效应问题,提出了多层叠置含煤层气系统递进排采的压力控制方法,通过逐步降压方式控制多层叠置含煤层气系统递进排采的压力,依此递进排采所有含煤层气系统。高为等(2014)以贵州省为例,对近距离叠置的煤层气与页岩气藏提出了合层压裂、合层排采的开发方式,对远距离叠置的煤层气与页岩气藏提出了分层压裂、合层排采的开发方式,但气藏之间的压力差异、渗透差异等因素

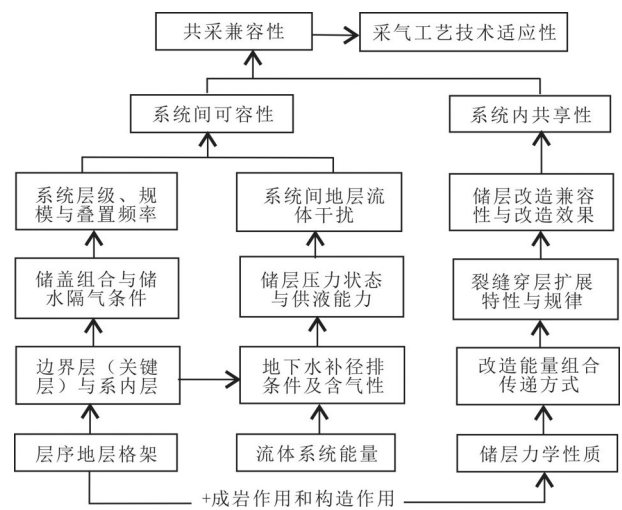


图7 叠置含气系统共采兼容性的关键地质控制 (据秦勇等,2016)

Fig.7 Key geological control of co-production compatibility of superimposed gas bearing system (after Qing Yong et al., 2016)

仍是制约开发模式成功应用的关键。杨兆彪等(2018,2019)基于煤层气井产能方程提出了多煤层产层优化组合“三步法”及多层合采有利区优选定量评价指标与方法。

#### 3.4.2 煤系气合采产层组合优化

合采门限问题是煤系气合采无法回避的问题。目前建立了以产气贡献为目标函数的煤系气合采产层组合优化与甜点区预测方法,并初步应用于工程示范实践。

煤系气合采产层组合优化取决于两个方面:一是由地质条件决定的煤、煤系泥页岩、致密砂岩等不同产层垂向分布序列和组合方式,二是现有工程技术制约下的合采门限值。产层组合方式决定了合采层段和合采工艺;合采门限值随着技术工艺进步逐渐降低,不同地区略有不同。

目前,煤系气合采产层优化组合主要遵循以下步骤:①含气层精细描述、含气系统的初步识别与划分;②明确含气层物性、力学性质;③明确合层开采关键参数门限值;④“一票否决+递阶优选”得到不同级别的组合方案和最优方案。

煤系气合采门限值指当前技术条件下可多层开采的岩层地质条件匹配值,其随合采技术发展逐渐降低,原本不适合合采的层位可重新组合开采。国内对不同地区煤层气合采的层间跨度、储层压力梯度、储层渗透率、产层临界解吸压力、供液能力、厚度等取得了一定的认识(表3),而煤系“三气”合采地质问题研究较少。

此外,基于煤系气合采产层组合的煤系气开发模式与工艺、合采产层排采地质动态诊断等技术也已提上研发日程。这些进展表明,中国煤系气地质评价技术体系正在形成,技术内涵正在不断丰富和深化,并将在煤系气规模性开发中发挥重要作用。

#### 3.4.3 煤系气共探合采技术方法

##### (1) 水力压裂

水力压裂是提高煤系储层渗透性,增加气井产量的通用手段。与原位渗透率相比,合采效果更多地取决于压裂改造后的渗透率。煤系储层的能量状态、物性差异较大,统一的压裂改造措施可能导致产层组各产层属性差异拉大,从而抑制产层组整体产气潜力的充分释放。如:黔西杨梅树向斜杨煤参1井龙潭组5<sup>-2</sup>号煤层、7号煤层、13<sup>-2</sup>号煤层分压

合采,是西南地区迄今产气效果最好的直井,该井产层组3个煤层原始渗透率分别是0.127 mD、0.188 mD和0.191 mD,相差不大,而压后渗透率分别是19.492 mD、11.205 mD和4.685 mD,压裂改造显著拉大了不同煤层渗透率的差异,导致改造渗透率和储层压力系数相对较高的5<sup>-2</sup>号煤层产气贡献率明显较大,而另外2个煤层的产气潜力受到抑制。由此提出“合采产层组分层均衡压裂改造”的设计理念,旨在通过差异性改造来弱化原始储层的属性差异(秦勇等,2020a)。而“复合储层压裂”设计要求考虑压裂缝的扩展方向和扩展范围。中联煤层气有限公司在鄂尔多斯盆地东北部临兴—神府地区开展了大量煤层气、煤系致密砂岩气共探合采方案的现场研究与试验,认为“直接压裂煤系砂岩、间接带动改造煤层的煤系储层改造方法是实现吸附气与游离气高效合采的有效途径”,释放煤层气产能的同时,可避免直接改造煤层及煤层与射孔段直接接触带来的储层伤害。

##### (2) 合采技术

煤系气开发效果取决于吸附气与游离气或有机储层气与无机储层气之间合采兼容性及其地质控因,合采可行性评价技术是煤系气开发技术体系的核心构成之一。煤系气合采产层的层间矛盾正是煤系气合采兼容性问题,合采地质兼容性可通过生产数据统计分析、数值模拟、物理模拟等方法予以识别,但对主要影响因素的认识仍存在差异(秦勇等,2018a);秦勇等(2020b)采用分峰剥离法将临兴区块第一期示范工程10口煤系气合采井产量曲线划分为解吸型、解吸-游离型、游离-解吸型、游离型(图8),进行合采有效性的定性判识,并指出具有工业价值的煤系多类型共生气藏均赋存在深部,深部地层富水性弱,造成“排水降压”传统模式失效,但解吸-游离型和游离-解吸型曲线对富水性弱这一重大局限性具有针对性,对于煤系气高效开发具有普遍意义。孟尚志等(2018)研究了鄂尔多斯盆地东缘临兴区块煤系气合采井的生产资料,认为压力系统差异会引起气水倒灌、导致邻近产层水淹、制约井筒内多产层合采,并提出了在降水排压基础上密切控制液面和气水产出速度,防止气水倒灌,保证长时间稳定排采的控制措施;张健等(2018)根据井筒中气水两相流状态,将合采工艺分

表3 不同地区煤系气合层开采的地质条件门限值(据秦勇等,2018b修改)

Table3 Threshold value of geological conditions for coal measure gas seam mining in different areas (modified after Qin Yong et al., 2018b)

研究者	门限值或阈值				研究区	合采对象
	最大跨度	储层压力梯度	渗透率差	其他		
倪小明等, 2010		越小越好	越小越好	地下水流动特征尽可能近,顶底板厚度、泊松比尽可能大	沁水盆地樊庄区块	煤层气
李国彪等, 2012		<0.5 MPa/hm	相差不大	产气液面高度不超过50 m,供液能力相差不大	沁水盆地南部	煤层气
王振云等, 2013		<0.3 MPa/hm	同一数量级	临界解析压力差小于0.3 MPa,供液能力差小于5 m <sup>3</sup> /d	沁水盆地寿阳区块	煤层气
张政等,2014		<0.08 MPa/hm	<1×10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup>	供液能力相当,上部煤层临界解析压力大于下部煤层	沁水盆地南部	煤层气
傅玉通等, 2018	155~180 m			层间跨度<20 m,合压合采;层间跨度20~50 m,限流法分层压裂;层间跨度>50 m,下封隔器分层压裂	鄂尔多斯盆地延川南区块	煤层气、致密砂岩气
孟艳军等, 2013		差别不大	差异小	含气量、含气饱和度差别小;顶底板封闭性好,富水性弱	鄂尔多斯盆地柳林区块	煤层气
申建等,2018		流体压力比0.15~1	渗透率比0.43~35	单层产气贡献率20%~80%,厚度比、孔隙率比、含水饱和度比适宜	鄂尔多斯盆地临兴区块	煤层气、致密砂岩气
孟尚志等, 2018	无限制	无限制	无限制	原始静液面高度小于50 m	鄂尔多斯盆地东北部	煤系气
谢相军等, 2014		<0.3 MPa/hm	不能太大	临界解析压力差小于1.2 MPa,供液能力差异小	准噶尔盆地南缘白杨河区块	煤层气
马兵,2016		无限制	小于两个数量级	存在适合开采的渗透率临界值	准噶尔盆地南缘阜康地区	煤层气
秦勇等,2016	<100 m			煤层累计厚度小于12 m,合采层数小于8	黔西织纳地区	煤层气
杨兆彪等, 2018	不能过大	<0.1 MPa/hm		原生结构煤和碎裂煤,主层产能贡献指数大于35 %	黔西松河区块	煤层气
秦勇,2018a	<100 m	抑制合采产能	影响产层贡献	原生结构煤和碎裂煤,可跨含气系统,层间临界解析液柱相对高差小于50 m	黔西滇东地区	煤层气
秦勇等,2019				薄煤层与碎屑岩类频繁互层;含气饱和度高、储层渗透率高	澳大利亚苏拉特	煤系气

为同压力体系合采工艺和分压力体系合采工艺;胡海洋等(2019)将煤层气“五段三压”排采模式和页岩气“三阶段”排采模式相结合,实现了煤层气与煤系页岩气合采下的高产、稳产。

3.4.4 煤系气合采贡献识别技术

合采产层贡献判识是优化合采产层的基本依据,对合采工程设计具有重要的指示意义。识别产层贡献的关键在于合采井气水来源解析、相对流量判识及预测模型。目前常用的识别方法有井筒分层实时监测装置及产出水地球化学动态分析、数值模拟与物理模拟、生产曲线分峰剥离等判识方法,

其中基于生产曲线分峰剥离的合采产层贡献全过程反演分析值得关注。

井筒流体压力温度实时探测技术在鄂尔多斯盆地东缘柳林地区煤层气合采试验、临兴区块煤层气和致密气合采试验的压力监测中取得较好效果;使用井筒流体参数实时监测仪在沁水盆地南部煤层气合采试验中获取了系列监测数据,计算出了合采中每个煤层的产气贡献,为确定合采方式和产层组合提供了依据,为定量分析合采产层贡献提供了可供推广的监测手段。

数值模拟用于模拟与真实地层情况相似的地质

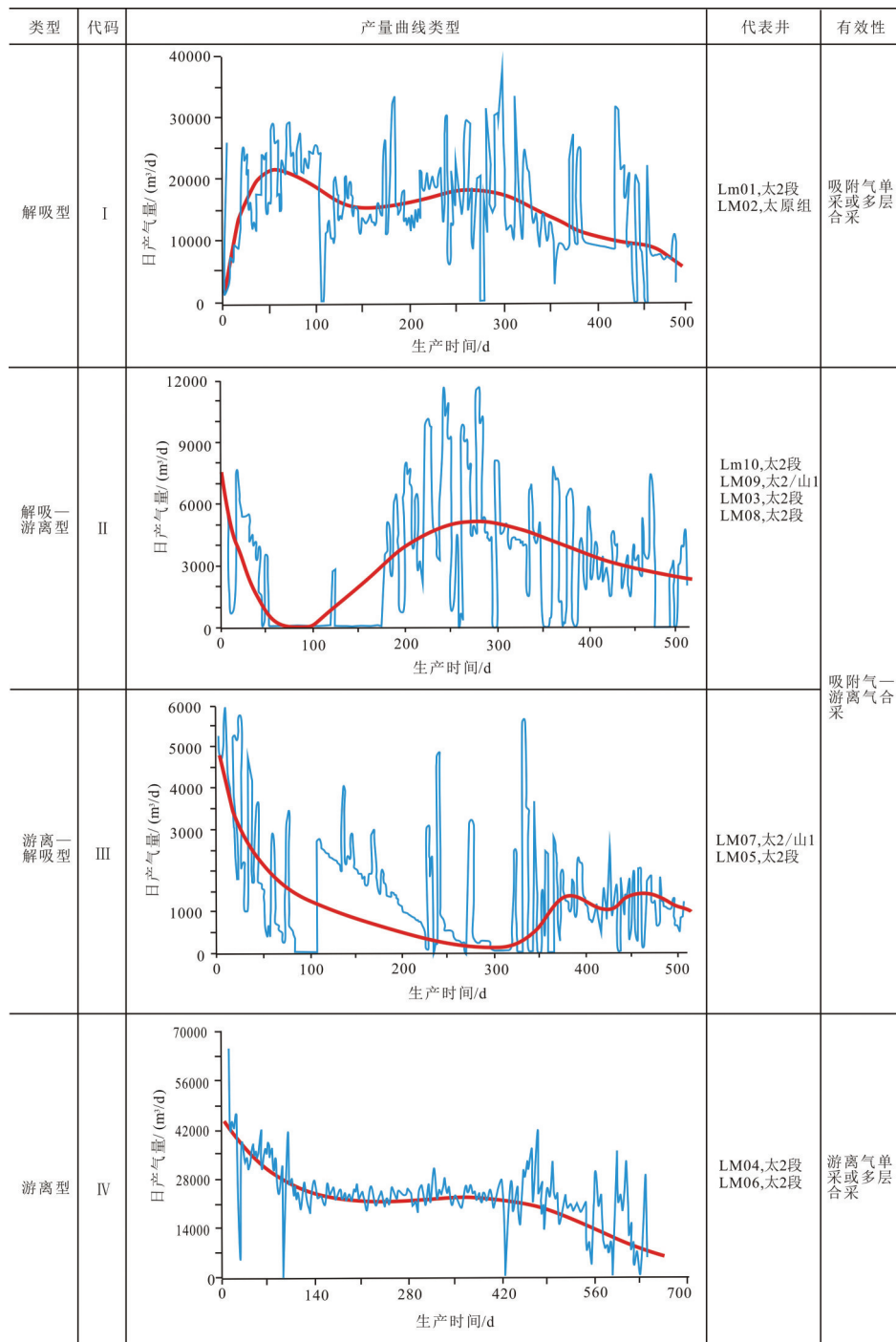


图8 煤系气合采井产量曲线类型及其合采有效性(据秦勇等,2020b)  
Fig.8 Curve type of joint CMG and its effectiveness(after Qin Yong et al., 2020b)

条件,结合生产资料不断尝试新的生产技术方案,提供产层和生产参数拟合所需要的参照或刻度;通过Ecilipse、COMET3软件进行合层开发井多产层动态模拟,分析不同产层组产能贡献,认为煤层厚度比、含气量比等参数对合采效果的影响显著。

王蕊等(2016)针对鄂尔多斯盆地东北缘煤系气地质条件建立了“煤岩/致密砂岩双层分压均质理想模型”,模拟结果分析认为“煤层在上、致密砂岩在下、两气合采为最优生产方案,层间距越大、产能越高”;申建等(2018)建立了煤层气、致密砂岩气合

采模型,对临兴区块进行了区域评价,优选了合采兼容性较好的层段。

### 3.5 煤系气资源评价与有利区预测方法

#### 3.5.1 煤系气资源评价

国内外非常规油气资源评价基于美国地质调查局(United States Geological Survey, 简称 USGS) 1995年所提出的“连续型油气聚集”概念,是针对含油气盆地中致密砂岩、煤层、页岩等非常规储层中,“油气大面积聚集分布、圈闭与盖层界限不清、缺乏明确油气水界面的特点”而提出。随着非常规油气勘探开发的迅猛发展,非常规油气资源评价方法逐渐得到重视。目前,非常规油气资源评价的主要方法有6种,即资源丰度类比法、体积法、致密砂岩气藏预测法、油气资源空间分布预测法、FORSPAN法(也称 ACCESS法, USGS)和随机模拟法(USGS)。国外以USGS为代表,针对非常规(连续型)油气资源分布特征,系统地提出并发展了FORSPAN法及随机模拟法。以中国石油勘探开发研究院为代表,针对我国非常规油气资源特点,发展了致密砂岩气藏预测法、油气资源空间分布预测法等新的评价方法(郭秋麟等, 2009)。依据不同评价原理,可将国内外致密气、页岩气和煤层气等非常规油气资源评价方法归纳为5种主要类型,即EUR类比法、资源

丰度类比法、体积法、随机模拟法和成因法,不同评价方法的代表方法、适用对象及优缺点见表4。

#### 3.5.2 煤系气有利区预测

“煤系气”概念的系统性被广为人知之前,非常规天然气资源评价与甜点区预测多针对单一气藏,采用的主要评价方法包括层次分析法、加权求和法、模糊物元法、灰色评估法、灰色类聚法、模糊数学综合评价法、软件分析法等,其关键在于气藏参数的选取和权重赋值。针对单一煤层气藏(王一兵等, 2006;尹准新等, 2009;李五忠等, 2010;杨兆彪, 2019)、页岩气藏(张金川, 2008, 2009, 2012)的评价方法并不适用于煤系气藏评价。杨燕青等(2019)分类评价了豫东地区煤系烃源岩有机质丰度、类型及成熟度,采用体积法估算了不同区块煤系气含量及目标层位煤层气、致密砂岩气资源量,初步圈定了有利区块;张小东等(2018)通过模糊数学法建立了豫东地区煤系气有利区块评价模型;高为等(2014)采用了多因素叠加、综合地质评价的方法对贵州省煤层气和页岩气共探合采有利区进行初步评选。

煤系气资源评价及有利区优选的重中之重是优选评价参数,建立一套合理的评价体系。实现煤系非常规天然气共探合采需要对烃源岩生排烃规

表4 主要非常规油气资源评价方法及优缺点比较

Table4 Advantages and disadvantages of evaluation methods of main unconventional oil and gas resources

主要类型	代表性方法	适用评价对象	优点	缺点	
类比法	EUR类比法	FORSPAN法(USGS)、ACCESS法(USGS)、资源密度网格法(ExxonMobil)	中高勘探地区	评价过程简单、快速	关键参数难以确定;未充分考虑EUR空间相关性等
	资源丰度类比法	面积丰度类比法(中国工程院)、刻度区类比法(中国石油)	中低勘探地区	评价过程简单、快速	未考虑资源丰度分布非均质性;类比标准及类比参数选取主观性强等
统计法	体积法	容积法(EIA和ARI)、的含气量法(中国工程院)、容积法、含气量法(中国自然资源部)	中低勘探地区	评价过程简单、快速	未考虑含气量、孔隙度等关键参数;具有明显非均质性等
	随机模拟法	随机模拟法(USGS)、资源空间分布预测法(中国石油)、基于地质模型的随机模拟法(GSC)	中高勘探地区	考虑关键参数空间位置关系,能够给出资源量空间分布位置,指导勘探	要求参数多,要有已发现储量分布;计算过程复杂;评价周期长等
成因法	热模拟法(美国Humble地化服务中心)、致密砂岩气藏预测法(中国石油)	低-高勘探地区	可了解油气资源地质分布特征和聚集规律	重要参数受样品采集、测试等影响;盆地模拟过程复杂;评价周期长等	

注:GSC为加拿大地质调查局英文缩写。

律、煤系气富集规律和成藏机制、储层条件、保存条件进行综合评价,确定目的层厚度、埋深、结构构造、渗透率、有机碳含量、镜质组反射率等关键评价参数,建立煤系非常规天然气评价标准与预测技术。不同参数选取的科学性与不确定性很大程度上取决于对地质因素研究的深入程度和实际操作的难易程度。

目前,从储气参数、产气参数和合采兼容性参数3个方面建立评价体系。其中,储气参数包括含气性、含气饱和度、储集规模等,以反映资源潜力;产气参数包括临界解析压力、临储比、地应力等,以反映动用优势;合采兼容性参数包括煤系气系统流体压差、储层渗透率差、储层力学性质、产层贡献率等,其刻画难度最大,但又是决定煤系气共探合采的关键所在。

## 4 煤系气地质研究存在的重要科学问题

中国煤系气勘探开发尚处于探索阶段,有待于开展煤系气共生特性、共探方法、合采兼容性地质评价方面的系统性研究工作,完善共探共采模式,创新煤系气共探共采技术方法,逐步实现煤系气资源利用的“立体勘查、综合开发、一井多用、节约高效”。当前亟待解决的重要科学问题包括以下4个方面。

### 4.1 煤系气储层精细描述及可改造性评价

煤系储层非均质性强且垂向叠置组合关系多样,直接影响不同岩性组合条件下煤系气资源评价和有利区预测。目前,煤系储层非均质性研究经历了由单一到综合、由粗略到精细、由定性到定量的过程,重点开发区(如沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘)开展了精细层间、平面、层内和微观非均质性研究。今后,有必要开展区域性地质调查,结合钻孔揭示,精细表征不同岩性配置关系下煤系气储层层域和区域非均质性发育特征。

储层可改造性是非常规油气开采中的重要参数,是评价煤系储层是否能作为“甜点”的关键指标之一。煤系“三气”合采储层可改造性评价,“单独评价不同储层、叠加后得到合采储层可改造性优选区”的方法缺少储层组合观念;将多种可采储层划分为不同的产层组,通过层次分析法、数值模拟法将脆性指数、石英含量、孔隙度、TOC、渗透率、含

气量、水平应力差、断裂韧性、黏土矿物含量、含水饱和度等影响产层组可改造性的储层参数转化为产层组参数,建立了产层组可改造性多级评价模型(刘欣佳等,2016;孙斌等,2020)。可参考页岩可压性评价方法,从岩石脆性、地应力特征、天然裂缝发育程度三方面、利用Rickman公式、结合叠前地震反演预测煤系页岩脆性指数,评价煤系储层可压性(盛秋红等,2016)。

储层精细表征的目标是查明叠置含气系统内,同一产层组合层段内各储层渗流特征、储层岩石物性特征的差异,针对其储层特征差异,建立分层压裂或合层压裂的判别方法,选择储层改造工艺。

### 4.2 煤系气资源评价方法及有利区优选

目前,煤层气资源评价的方法已较为成熟,但煤系致密砂岩气、煤系泥页岩气资源评价标准尚不统一,因此煤系“三气”资源评价及有利区预测体系尚不完善。

煤系气有利层位优选不同于单纯的煤层气有利层位优选,需要综合考虑多套储层自身特性及层系组合关系,包括储层渗透性、含气性、厚度、层间距及潜在的层间干扰,针对不同类型储层的特点确定其特有的资源评价参数,建立多元、差异性资源评价方法。因此,煤系气资源评价、有利区预测及有利层系组合优选仍是一项较为复杂的工作。

### 4.3 煤系气开发甜点区(段)评价技术

煤系气开发甜点区(段)综合评价技术对于煤系气勘探开发选区、提高产能具有重要意义。以往的评价方法更多侧重于资源富集条件,而对储层改造与多层合采适配性技术应用重视不够,导致勘探开发工作失败。如何从资源富集区中优选开发甜点区是制约煤系气高产的关键(杨晓盈等,2018)。从气藏分析与产能预测入手,围绕资源富集、储层导流能力及地层能量等因素,深入剖析各相关因素对产能的影响机理和影响程度,建立影响煤系气富集高产综合评价指标体系和基于产能分析的高产“甜点”区综合评价模型,是今后研究的主要方向。考虑合采门限是煤系气合采无法回避的问题,需建立以产气贡献为目标的煤系气合采产层组合优化与甜点区预测方法。

### 4.4 叠置煤系气系统合采兼容性评价

目前,对煤系气资源的共生特性和可采潜势认

识不足,针对叠置含气系统之间压力、含气性、渗透性、储层可改造性质等差异,建立叠置含气系统合采兼容性的判识方法,是煤系气开发的基础科学问题之一。

煤系气叠置含气系统具有多类型气藏叠置、多流体系统共存的地质特点,叠置含气系统合采兼容性研究对煤系气合采工艺技术优化和创新至关重要。煤系中不同类型气藏的合采不同于煤层气、致密砂岩气、页岩气等同种气藏的多层合采,储层物性、流体赋存状态、储层压裂工艺和排采工艺的差异更加显著,层间干扰等地质兼容性问题更加突出,煤系气合采难度更大。与常规油气藏、煤层气、页岩气等单一非常规气藏评价相比,叠置煤系气系统合采兼容性的量化表征与级别划分成为判断甜点区和甜点层位开采的必要条件。合采兼容性地质规律包括复合含气系统中气体的赋存条件、成藏模式及可采潜势、系统间流体动力条件兼容性、系统内不同储层可改造条件兼容性、产水产气层间干扰等均需进行量化描述。

## 5 结 论

(1)梳理了煤系气地质研究主要进展与成果:①基于煤系构造-沉积特点,总结了煤系气共生成藏具有“生烃量大、持续充注能力强,多相态气体共存、气藏类型多样,源储相依、储盖交互、多重封闭,气水分布关系复杂,系统间动态平衡关系脆弱,储层改造难度大”等6个基本地质特征;②根据源储关系,将煤系气共生组合方式划分为源储一体型、源储紧邻型、源储混合型或自源型、自源+他源型、远源型,明确了生烃强度、运移输导方式、地层流体能量、区域有效盖层是煤系气富集成藏的4个主控因素;③基于煤系含气系统叠置性地质成因分析,提出了关键层测井响应识别法、地下水化学性质差异性、流体压力曲线法等叠置煤系气系统识别与评价方法;④含煤地层的“沉积序列与层序格架、含气系统间流体能量差异、系统内不同储层力学性质”是控制煤系叠置含气系统合采兼容性的3个地质要素,依据生产数据统计分析、数值模拟、物理模拟等方法识别煤系叠置含气系统及其兼容性;⑤煤系气合采的核心是合采门限,依据煤系气合采地质门限进行煤系气合采产层组合优化,总结了现有煤系

气共探共采技术方法及基于合采井气水来源解析的煤系气合采贡献识别技术;⑥不同勘探程度下煤系气资源评价有EUR类比法、资源丰度类比法、体积法、随机模拟法、成因法等,可从储气参数、产气参数、合采兼容性等3个方面建立煤系气有利区评价指标体系。

(2)提出了中国煤系气勘探开发探索阶段,需完善煤系气共探共采模式、创新煤系气共探共采技术方法,实现煤系气资源利用“立体勘探、综合开发、一井多用、节约高效”,当前亟待解决4个方面重要科学问题:①煤系气储层精细描述及可改造性评价;②煤系气资源评价方法及有利区优选;③煤系气开发甜点区(段)评价技术;④叠置煤系气系统合采兼容性评价。

**致谢:**感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

## Reference

- Bi Caiqin, Shan Yansheng, Pang Bo, Zhang Jiaqiang, Liu Wei, Zhao Yingkai, Zhou Yang. 2018. High gas coal reservoir drilled in coal resource exhausted mining area of Jixi Basin[J]. *Geology in China*, 45(6): 1306-1307(in Chinese with English abstract).
- Bi Caiqin, Zhang Jiaqiang, Shan Yansheng, Hu Zhifang, Wang Fuguo, Chi Huanpeng, Tang Yue, Yuan Yuan, Liu Yaran. 2020. Geological characteristics and co-exploration and co-production methods of Upper Permian Longtan coal measure gas in Yangmeishu syncline, western Guizhou Province, China[J]. *China Geology*, 3(1): 38-51.
- Cao daiyong, Yao Zheng, Li Jing. 2014. Current situation and development trend of unconventional natural gas evaluation in coal measures[J]. *Coal Science and Technology*, 42(1): 89-92, 105 (in Chinese with English abstract).
- Cao Daiyong, Yao Zheng, Li Jing. 2014. Evaluation status and development trend of unconventional gas in coal measure[J]. *Coal Science and Technology*, 42(1): 89-92(in Chinese with English abstract).
- Cheung Katrina, Sanei Hamed, Klassen Patrick, Mayer Bernhard, Goodarzi Fariborz. 2008. Produced fluids and shallow groundwater in coalbed methane (CBM) producing regions of Alberta, Canada: Trace element and rare earth element geochemistry[J]. *International Journal of Coal Geology*, 77(3/4): 338-349.
- Fu Yutong, Yuan Junhong, Cui Bin, Xu Zuwei. 2018. Key technology on co-exploitation of coalbed methane and tight sandstone in south area of Yanchuan[J]. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1747-1753(in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Chen Zhensheng, Song Ru, Zhang Qinghui. 2018. Discovery of coal measures limestone gas and its significance[J].



- Coal Geology of China, 30(6): 59–63(in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Deleqiati Jianatayi, Zhu Yanming, Shen Jian, Li Gang. 2016. Resources characteristics and separated reservoirs' drainage of unconventional gas in coal measures[J]. Earth Science Frontiers, 23(3): 36–40(in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Ge Yanyan, Liang Wenqing, Li Sheng. 2013. Pressure control and fluid effect of progressive drainage of multiple superposed CBM systems[J]. Natural Gas Industry, 33(11): 35–39 (in Chinese with English abstract).
- Gao Wei, Tian Weijiang, Qin Wen, Kong Weimin, Chen Min. 2014. Geological optimization of coalbed methane and shale gas co-exploration and concurrent production in Guizhou Province[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 21(1): 36–38(in Chinese with English abstract).
- Guo Banguang, Xu Hao, Meng Shangzhi, Zhang Wenzhong, Liu Yinan, Luo Haohan, Li Yong, Shen Wenmin. 2012. Geology condition analysis for unconventional gas co-exploration and concurrent production in Linxing area[J]. Clean Coal Technology, 18(5): 110–112, 115(in Chinese with English abstract).
- Guo Chen, Xia Yucheng, Lu Lingling, Ren Yaping. 2017. Development features and mechanism of multi-layer superimposed independent CBM systems in Bide-Santang Basin, western Guizhou, South China[J]. Natural Gas Geoscience, 28(4): 622–632(in Chinese with English abstract).
- Guo Qiulin, Zhou Changqian, Chen Ningsheng, Hu Junwen, Xie Hongbing. 2011. Evaluation methods for unconventional hydrocarbon resources[J]. Lithologic Reservoirs, 23(4): 12–19(in Chinese with English abstract).
- Hao Shumin, Li Liang, You Huanzeng. 2007. Permo-Carboniferous paralic depositional systems in the Daniudi gas field and its near-source box-type gas accumulation-forming model[J]. Geology in China, 34(4): 606–611(in Chinese with English abstract).
- Hao Shumin, Li Liang, Zhang Wei, Qi Rong, Ma Chao, Chen Jingtie. 2016. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 37(2): 149–154(in Chinese with English abstract).
- Hou J C, Wang Z W, Liu P K. 2018. Current states of coalbed methane and its sustainability perspectives in China[J]. International Journal of Energy Research, 42: 3454–3476.
- Hu Haiyang, Bai Lina, Zhao Lingyun, Wang Lingxia, Zhou Peiming. 2019. Drainage and mining control study on co-mining coal measure gas of Longtan Formation in Western Guizhou Region[J]. Safety in Coal Mines, 50(1): 175–178(in Chinese with English abstract).
- Jamieson Michael, Elson Mabbie, Carruthers Ross, Ordens Carlos Miraldo. 2020. The contribution of citizen science in managing and monitoring groundwater systems impacted by coal seam gas production: An example from the Surat Basin in Australia's Great Artesian Basin[J]. Hydrogeology Journal, 28 (1): 439–459.
- Jiang Wenli, Zhao Suping, Zhang Jinchuan, Ye Xin. 2010. Comparison of main control factors of coalbed methane and shale gas accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 21(6):1057–1060(in Chinese with English abstract).
- Ju Yiwen, Wei Mingming, Xue Chuandong. 2011. Constraints of basin mountain evolution on the occurrence of deep coal and coalbed methane in North China[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 40(3):390–398(in Chinese with English abstract).
- Lau H C, Li H Y, Huang S. 2017. Challenges and opportunities of coalbed methane development in China[J]. Energy & Fuels, 31(5): 4588–4602.
- Laubach S E, Gale J F W. 2006. Obtaining fracture information for low-permeability (tight) gas sandstones from sidewall cores[J]. Journal of Petroleum Geology, 29(2): 147–158.
- Law B E. 2002. Introduction to unconventional petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 86(11): 1851–1852.
- Li Guobiao, Li Guofu. 2012. Study on the differences and main controlling factors of the coalbed methane wells between single layer and multi-layer drainage[J]. Journal of China Coal Society, 37(8): 1354–1358(in Chinese with English abstract).
- Li Jing, Yao Zheng, Chen Limin, Jiang Ailin, Yang Chengwei, Cao Daiyong. 2017. Study on the coexistence of unconventional gas in Jurassic coal measures of Muli Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 45(7): 132–138(in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Zhang Dingning, Li Dahua, Tang Shuheng, Zhang Songhang. 2018. Symbiosis and accumulation mechanism of unconventional natural gas in Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 43 (06): 1533–1546(in Chinese with English abstract).
- Li Wuzhong, Tian Wenguang, Chen Gang, Sun Qiping. 2010. Research and application of appraisal variables for the prioritizing of coalbed methane areas featured by different coal ranks[J]. Natural Gas Industry, 30(6): 45–47, 63(in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Wang Yanbin, Meng Shangzhi, Wu Xiang, Tao Chuanqi, Xu Weikai. 2020. Theoretical basis and prospect of coal measure unconventional natural gas co-production[J]. Journal of China Coal Society, 45(4) : 1406–1418(in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Yang Jianghao, Pan Zhejun, Meng Shangzhi, Wang Kai, Niu Xinlei. 2019. Unconventional natural gas accumulations in Stacked Deposits: A discussion of Upper Paleozoic coal-bearing strata in the east margin of the Ordos Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 93(1): 111–129.
- Liang Bing, Shi Yingshuang, Sun Weiji, Liu Qiang. 2016. Reservoir forming of characteristics of “the three gas” in coal measure and the possibility of commingling in China[J]. Journal of China Coal Society, 41(1): 167–173(in Chinese with English abstract).
- Liang Hongbin, Lin Yuxiang, Qian Zheng, Liu Jianjun, Yu Tengfei. 2011. Study on coexistence of absorbed gas and free gas in coal strata South of Qinshui Basin[J]. China Petroleum Exploration, 16

- (2): 72–78(in Chinese with English abstract).
- Liu Xinjia, Zhang Sui'an, Jin Jianhu, Xiao Fengzhao, Wang Ruijie, Wang Yi, Zhang Shouren. 2018. Feasibility evaluation of commingle fracturing in the integrated development of coal-derived gas resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1687–1693(in Chinese with English abstract).
- Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, Yang Tao. 2012. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 23(4): 607–615(in Chinese with English abstract).
- Liu Jieqi. 2017. A Study on the Gas Accumulation Process of Coal Source Rocks: A Case Study of Shanxi Formation in the East of Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University(in Chinese with English abstract).
- Lu Jiamin, Liu Chao. 2016. 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*, 21(2): 53–60(in Chinese with English abstract).
- Ma Bing. 2016. Study on Coalbed Methane Drainage Theory in Multi Seam Area [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University.
- Men X Y, Han Z, Gao B S, Ren J H, Cui B L. 2017. Present situation and development suggestion of CBM exploration and development in China[J]. *China Mining Magazine*, 26: 1–4.
- Meng Shangzhi, Li Yong, Wu Xiang, Guo Hui, Xu Yanyong. 2018. Productivity equation and influencing factors of co-producing coalbed methane and tight gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1709–1715(in Chinese with English abstract).
- Meng Yanjun, Tang Dazhen, Xu Hao, Zhang Wenzhong, Chen Tonggang. 2013. Interlayer contradiction problem in coalbed methane development: A case study in Liulin area[J]. *Coal Geology & Exploration*, (3): 29–33, 37(in Chinese with English abstract).
- Mu F Y, Zhong W Z, Zhao X L, Che C B, Chen Y P, Zhu J, Wang B. 2015. 2018. Strategies for the development of CBM gas industry in China[J]. *Natural Gas Industry B*, (2): 383–389.
- Ni Xiaoming, Su Xianbo, Li Guangsheng. 2010. Feasibility of Multi-layer Drainage for No. 3 and No. 15 Coal Seams in the Fanzhuang Area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 21(1): 144–149(in Chinese with English abstract).
- Oison T, Hobbs B, Brooks R, et al. 2002. Paying off for tom brown in white river dom field's tight sandstone, deep coals[J]. *The American Oil and Gas Reports*, (10): 67–75.
- Ouyang Yonglin, Sun Bin, Wang Bo, Tian Wenguang, Zhao Yang, Cao Haixiao. 2016. CBM sealing system and its relationship with CBM enrichment[J]. *Natural Gas Industry*, 36(10): 19–27(in Chinese with English abstract).
- Ouyang Yonglin, Tian Wenguang, Sun Bin, Wang Bo, Qi Ling, Sun Qinpeng, Yang Qing, Dong Haichao. 2018. Characteristics of coal measure gas accumulation and such gas exploration strategies in China [J]. *Natural Gas Industry*, 38(3): 15–23(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong. 2017. Introduction to Fossil Energy Geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press.
- Qin Yong. 2018a. Research progress of coalbed gas CO generation in China[J]. *Natural Gas Industry*, 38(4): 26–36(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Liang Jianshe, Shen Jian, Liu Yinghong, Wang Cunwu. 2014. Gas logging display and gas reservoir type of tight sandstone and shale in the south of Qinshui Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 39(8): 1559–1565(in Chinese with English abstract).
- Qin Y, Moore T A, Shen J, Yang Z B, Shen Y L, Wang G. 2017. Resources and geology of coalbed methane in China: A review[J]. *International Geology Review*, (1): 1–36.
- Qin Yong, Shen Jian, Shen Yulin. 2016. 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*, 41(1): 14–23(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Shen Jian, Shen Yulin, Li Geng, Fan Bing Heng, Yao Haipeng. 2019. Geological causes and inspirations for high production of coal measure gas in Surat Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 40(10): 1147–1157(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Shen Jian, Wang Baowen, Yang Song, Zhao Lijuan. 2012. Deep coalbed methane accumulation effect and its coupling relationship[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(1): 48–54(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Wu Jianguang, Li Guozhang, Wang Yingbin, Shen Jian, Zhang Bing, Shen Yulin. 2020b. Patterns and pilot project demonstration of coal measures gas production[J]. *Journal of China Society, Network Launch*(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Wu Jianguang, Shen Jian, Yang Zhaobiao, Shen Yulin, Zhang Bing. 2018. Frontier research of geological technology for coal measure gas joint-mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1504–1516(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Wu Jianguang, Zhang Zhenguang, Yi Tongsheng, Yang Zhaobiao, Jin Jun, Zhang Bing. 2020a. Analysis of geological conditions for coalbed methane co-production based on production characteristics in early stage of drainage[J]. *Journal of China Society*, 45(1): 241–257(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Xiong Menghui, Yi Tongsheng, Yang Zhaobiao, Wu Caifang. 2008. On unattached multiple superposed coalbed-methane system: in a case of the Shuigonghe Syncline, Zhijin-Nayong Coalfield, Guizhou[J]. *Geological Review*, 54(1): 65–70 (in Chinese with English abstract).
- Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, Zhang Pengfei, Han Dexin. 2008. Research progress in sedimentology and sequence stratigraphy of coal bearing series of offshore type[J]. *Journal of Palaeogeography*, 10(6): 561–570(in Chinese with English abstract).

- Shen Yulin, Qin Yong, Guo Haiying, Yi Tongsheng, Shao Yubao, Jin Hongbo. 2012. Sedimentary controlling factor of unattached multiple superimposed coalbed-methane system formation[J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 37(3): 573–579(in Chinese with English abstract).
- Shen Jian, Qin Yong, Zhang Bing, Li Guozhang, Shen Yulin. 2018. Superimposing gas-bearing system in coal measures and its compatibility in Linxing block, east Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 43(6): 1614–1619 (in Chinese with English abstract).
- Sheng Qihong, Li Wencheng. 2016. Evaluation method of shale fracability and its application in Jiaoshiba area[J]. Progress in Geophysics, 31(4): 1473–1479(in Chinese with English abstract).
- Shi Xunzhi, Dai Jinxing, Wang Zemin, Zhu Jiawei, Liu Jiaqi. 1985. A study of methane carbon isotope of coal-formed gas in FRG and its inspiration to us[J]. Natural Gas Industry, 5(2): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Song Ru, Su Yufei, Chen Xiaodong. 2019. Progress and Research on exploration and development of "three gas" resources of deep coal measure in Shanxi Province, China[J]. Coal Geology of China, 31(1): 53–58(in Chinese with English abstract).
- Song Yan, Li Zhuo, Jiang Zhenxue, Luo Qun, Liu Dongdong, Gao Zhiye. 2017. Research progress and development trend of unconventional oil and gas geology[J]. Petroleum Exploration and Development, (4): 638–648 (in Chinese with English abstract).
- Sun Bin, Ju Yiwen, Lu Shuangfang, Wu Jianguang, Wang Jingming, Li Wuyang, Qi Yu, Yu Kun, Chen Wangang, Qiao Peng. 2020. Reconstruction evaluation method and application of coal measure three gases co-mining reservoirs in Linxing Block, East Ordos Basin[J]. Advances in Geosciences, 10(2): 85–99(in Chinese with English abstract).
- Tao S, Pan Z J, Tang S L, Chen S D. 2019. Current status and geological conditions for the applicability of CBM drilling technologies in China: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 202: 95–108.
- Vinson D S, Blair N E, Ritter N E, Martini A M, McIntosh J C. 2019. Carbon mass balance, isotopic tracers of biogenic methane, and the role of acetate in coal beds: Powder River Basin (USA) [J]. Chemical Geology, 530: 119–329.
- Wang Qian. 2015. The Study on Gas Accumulation Dynamics of Upper Palaeozoic Group in the Middle of Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University.
- Wang Rui, Shi Juntao, Wang Tianju, Huang Liang, Sun Zheng, Zhang Lei. 2016. Study on different superimposed CBM and tight gas joint exploitation schemes optimization[J]. Coal Geology of China, 28(6): 42–46(in Chinese with English abstract).
- Wang Tong, Wang Qingwei, Fu Xuehai. 2014. The significance and the systematic research of the unconventional gas in coal measures[J]. Coal Geology & Exploration, 42(1): 24–27(in Chinese with English abstract).
- Wang Yibing, Tian Wenguang, Li Wuzhong, Zhao Qingbo, Tian Lizhi. 2006. Criteria for the evaluation of coalbed methane area selection in China[J]. Geological Bulletin of China, 25(9): 1104–1107(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhenyun, Tang Shuheng, Sun Pengjie, Zheng Guiqiang. 2013. Feasibility Study of Multi-layer Drainage for Nos.3 and 9 Coal Seams in Shouyang Block, Qinshui Basin[J]. Coal Geology of China, (11): 21–26(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianguang. 2013. Progressive recognition of unconventional gas exploration and development in coal bearing series in China[C]//China Coal Society, State Administration of Coal Mine Safety: 25–41.
- Wu Jianguang. 2016. Current Situation and Technical Progress of CBM Exploration and Development in CUCBM [R]. Beihai: 2016 National CBM Symposium, 2016–11–03.
- Xiao Qian, Shen Yulin, Qin Yong, Shen Jian, Gu Jiaoyang, Zhang Chunliang. 2017. 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, 28(4): 590–601(in Chinese with English abstract).
- Xie Xiangjun, Zhang Wei. 2014. Analysis on the factors of partial pressure combined mining of coalbed methane in Baiyanghe block[J]. Science and Technology of West China, (3): 29–29, 99(in Chinese).
- Yang Guang. 2016. Permo Carboniferous Coal Measure Fluid Pressure System and Its Sedimentary Sequence Control in Linxing Block[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology.
- Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, Meng Peilong. 2012. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 39(3): 295–303(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoying, Li Yongchen, Zhu Wentao, Huang Jiyong, Shan Yongle, Zhang Qiang. 2018. The main controlling factors for production and the comprehensive evaluation model of desert area of coalbed methane in Guizhou Province[J]. Natural Gas Geoscience, 29(11): 1664–1671, 1678(in Chinese with English abstract).
- Yang Yanqing, Zhang Xiaodong, Xu Yakun, Zhang Peng, Wang Kun, Zhu Chunhui. 2019. The characteristics of organic matter in coal-measure source rocks and coal-measure gas resource potential in eastern Henan Province[J]. Coal Geology & Exploration, 47(2): 111–120(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhaobiao, Li Yangyang, Qin Yong, Sun Hansen, Zhang Ping, Zhang Zhengguang, Wu Congcong, Li Cunlei, Chen Changxiao. 2019. Development unit division and favorable area evaluation for joint mining coalbed methane[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(3): 559–568(in Chinese with English abstract).

- Yang Zhaobiao, Qin Yong. 2015. A study of the unattached multiple superposed coalbed-methane system under stress conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 44(1): 70-75 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhaobiao, Qin Yong, Chen Shiyue, Liu Changjiang. 2013. Controlling mechanism and vertical distribution characteristics of reservoir energy of multi-coalbeds[J]. Acta Geologica Sinica, 87(1): 139-144(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhaobiao, Qin Yong, Gao Di, Wang Bin. 2011. Coalbed methane (CBM) reservoir-forming character under conditions of coal seam groups[J]. Coal Geology & Exploration, 39(5): 22-26(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhaobiao, Qin Yong, Zhang Zhengguang, Sun Hansen, Li Yangyang, Wu Congcong. 2018. Production layer combination selection for coalbed methane development in multi-coal seams based on cluster analysis[J]. Journal of China Coal Society, 43(6): 1641-1646(in Chinese with English abstract).
- Yi Tongsheng, Gaowei. 2018. Reservoir formation characteristics as well as co-exploration and co-mining orientation of Upper Permian coal-bearing gas in Liupanshui Coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 43(6): 1553-1564(in Chinese with English abstract).
- Yin Huaixin, Tan Hongmei, Tan Junying, Wu Xiang. 2009. Discussion on criteria for evaluation of selected target areas in prospecting CBM in low rank coal in Xinjiang[J]. China Coalbed Methane, 6(6): 9-13(in Chinese with English abstract).
- Yu Yixin, Tang Xuan, Wu Xiaodan, Su Zhan, Ye Hao. 2018. Geological characteristics and accumulation mode of coalbed methane in Surat Basin of Australia[J]. Coal Science and Technology, 46(3): 160-167(in Chinese with English abstract).
- Yuan Xuexu. 2014. Study on the Recognition of Multi Seam Gas Bearing system-Taking the Upper Permian in Western Guizhou as An Example[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology.
- Zhang Jian. 2018. Applicability analysis and technique of combined coalbed methane drainage at same pressure in deep and shallow depth seam[J]. Coal Science and Technology, 46(6): 101-106(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, Zhang Peixian, Tang Ying, Jing Tieya. 2009. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 29(12): 109-114(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, Jiang Shenglin, Liu Jinxia, Jiang Wenli, Tang Xuan, Han Shuangbiao. 2012. The method of shale gas assessment: Probability volume method[J]. Earth Science Frontiers, 19(2): 184-191(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, Wang Zongyu, Jiang Shengling, Song Xiaowei, Zhang Qin. 2008. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 28(6): 136-140(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenhao, Miao Miaoqing, Jiang Kunpeng, Liu Weibin. 2019. Characteristics, trends and ecological management of oil-gas resources exploration and development in China[J]. Geology and Resources, 28(5): 454-459. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Xiaodong, Zhang Shuo, Xu Yakun, Wang Kun, Zhang Peng, Zhu Chunhui. 2018. Favorable block prediction of coal measure gas resource exploration in eastern Henan area based on fuzzy mathematics[J]. Coal Science and Technology, 46(11): 172-181(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zheng, Qin Yong, Fu Xuehai. 2014. The favorable developing geological conditions for CBM multi-layer drainage in southern Qinshui basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 43(6): 1019-1024(in Chinese with English abstract).
- Zheng Shujie. 2016. Source Reservoir Cap Assemblage of Coal Measures and Its Sequence Stratigraphic Framework Control in Linxing area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yanming, Hou Xiaowei, Cui Zhaobang, Liu Gang. 2016. Resources and reservoir formation of unconventional gas in coal measure, Hebei Province[J]. Journal of China Coal Society, 41(1): 202-211(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Huang Shipeng, Ma Feng, Sun Qiping, Li Fuheng, Pan Songqi, Tian Wenguang. 2019. Resource types, distribution and development prospects of coal measures natural gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(3): 433-442 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 毕彩芹,单衍胜,逢磷,张家强,刘伟,赵英凯,周阳. 2018. 鸡西盆地煤炭资源枯竭矿区钻获高含气量煤系储层[J]. 中国地质, 45(6): 1306-1307.
- 曹代勇,姚征,李靖. 2014. 煤系非常规天然气评价研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 42(1):89-92.
- 傅雪海,陈振胜,宋儒,张庆辉. 2018. 煤系灰岩气的发现及意义[J]. 中国煤炭地质, 30(6):59-63.
- 傅雪海,德勒恰提·加娜塔依,朱炎铭,申建,李刚. 2016. 煤系非常规天然气资源特征及分隔合采技术[J]. 地学前缘, 23(3):36-40
- 傅雪海,葛燕燕,梁文庆,李升. 2013. 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, 33(11):35-39.
- 傅玉通,原俊红,崔彬,许祖伟. 2018. 延川南区块深部煤层气与致密砂岩气合采关键技术[J]. 煤炭学报, 43(6):1747-1753.
- 高为,田维江,秦文,孔维敏,陈敏. 2014. 贵州省煤层气与页岩气共探共采的地质优选[J]. 断块油气田, 21(1):36-38
- 郭本广,许浩,孟尚志,张文忠,刘一楠,罗皓菡,李勇,申文敏. 2012. 临兴地区非常规天然气合探共采地质条件分析[J]. 洁净煤技术, 18(5):110-112, 115.
- 郭晨,夏玉成,卢玲玲,任亚平. 2017. 黔西比德一三塘盆地多层叠置独立含煤层气系统发育规律与控制机理[J]. 天然气地球科学, 28

- (4):622-632.
- 郭秋麟, 周长征, 陈宁生, 胡俊文, 谢红兵. 2011. 非常规油气资源评价方法研究[J]. 岩性油气藏, 23(4):12-19.
- 郝蜀民, 李良, 尤欢增. 2007. 大牛地气田石炭—二叠系海陆过渡沉积体系与近源成藏模式[J]. 中国地质, 34(4):606-611.
- 郝蜀民, 李良, 张威, 齐荣, 马超, 陈敬铁. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系—二叠系大型气田形成条件[J]. 石油与天然气地质, 37(2):149-154.
- 胡海洋, 白利娜, 赵凌云, 汪凌霞, 周培明. 2019. 黔西地区龙潭组煤系气共采排采控制研究[J]. 煤矿安全, 50(1):175-178.
- 姜文利, 赵素平, 张金川, 叶欣. 2010. 煤层气与页岩气聚集主控因素对比[J]. 天然气地球科学, 21(6):1057-1060.
- 琚宜文, 卫明明, 薛传东. 2011. 华北盆地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.
- 李国彪, 李国富. 2012. 煤层气井单层与合层排采异同点及主控因素[J]. 煤炭学报, 37(8):1354-1358.
- 李建忠, 郭彬程, 郑民, 杨涛. 2012. 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, 23(4):607-615.
- 李靖, 姚征, 陈利敏, 蒋艾琳, 杨承伟, 曹代勇. 2017. 木里煤田侏罗系煤系非常规气共存规律研究[J]. 煤炭科学技术, 45(7):132-138.
- 李俊, 张定宇, 李大华, 唐书恒, 张松航. 2018. 沁水盆地煤系非常规天然气共生聚集机制[J]. 煤炭学报, 43(6):1533-1546.
- 李五忠, 田文广, 陈刚, 孙钦平. 2010. 不同煤阶煤层气选区评价参数的研究与应用[J]. 天然气工业, 30(6):45-47, 63.
- 李勇, 王延斌, 孟尚志, 吴翔, 陶传奇, 许卫凯. 2020. 煤系非常规天然气合采地质基础理论进展及展望[J]. 煤炭学报, 45(4):1406-1418.
- 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 刘强. 2016. 中国煤系“三气”成藏特征及共采可能性[J]. 煤炭学报, 41(1):167-173.
- 梁宏斌, 林玉祥, 钱铮, 刘建军, 于腾飞. 2011. 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, 16(2):72-78.
- 刘洁琪. 2017. 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.
- 陆加敏, 刘超. 2016. 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, 21(2):53-60.
- 刘欣佳, 张遂安, 靳建虎, 肖凤朝, 王瑞杰, 万毅, 张守仁. 2018. 煤成(层)气资源综合开发中的合层压裂可行性评价[J]. 煤炭学报, 43(6):1687-1693.
- 马兵. 2016. 多煤层地区煤层气合层排采理论研究[D]. 焦作: 河南理工大学.
- 孟尚志, 李勇, 吴翔, 郭晖, 徐延勇. 2018. 煤层气和致密气合采产能方程及影响因素[J]. 煤炭学报, 43(6):1709-1715.
- 孟艳军, 汤达祯, 许浩, 张文忠, 陈同刚. 2013. 煤层气开发中的层间矛盾问题——以柳林地区为例[J]. 煤田地质与勘探, (3):29-33, 37.
- 倪小明, 苏现波, 李广生. 2010. 樊庄地区3#和15#煤层合层排采的可行性研究[J]. 天然气地球科学, 21(1):144-149.
- 欧阳永林, 孙斌, 王勃, 田文广, 赵洋, 曹海霄. 2016. 煤层气封闭体系及其与煤层气富集的关系[J]. 天然气工业, 36(10):19-27.
- 欧阳永林, 田文广, 孙斌, 王勃, 祁灵, 孙钦平, 杨青, 董海超. 2018. 中国煤系气成藏特征及勘探对策[J]. 天然气工业, 38(3):15-23.
- 秦勇. 2017. 化石能源地质学导论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 秦勇. 2018a. 中国煤系气共生成藏作用研究进展[J]. 天然气工业, 38(4):26-36.
- 秦勇, 梁建设, 申建, 柳迎红, 王存武. 2014. 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, 39(8):1559-1565.
- 秦勇, 申建, 沈玉林. 2016. 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, 41(1):14-23.
- 秦勇, 申建, 沈玉林, 李耿, 范炳恒, 姚海鹏. 2020. 苏拉特盆地煤系气高产地质原因及启示[J]. 石油学报, 40(10):1147-1157.
- 秦勇, 申建, 王宝文, 杨松, 赵丽娟. 2012. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J]. 石油学报, 33(1):48-54.
- 秦勇, 吴建光, 张争光, 易同生, 杨兆彪, 金军, 张兵. 2020a. 基于排采初期生产特征的煤层气合采地质条件分析[J]. 煤炭学报, 45(1):241-257.
- 秦勇, 吴建光, 李国璋, 王应斌, 申建, 张兵, 沈玉林. 2020b. 煤系气开采模式探索及先导工程示范[J]. 煤炭学报, 网络首发, 2020-5-16.
- 秦勇, 吴建光, 申建, 杨兆彪, 沈玉林, 张兵. 2018b. 煤系气合采地质技术前缘性探索[J]. 煤炭学报, 43(6):1504-1516.
- 秦勇, 熊孟辉, 易同生, 杨兆彪, 吴财芳. 2008. 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, 54(1):65-70.
- 邵龙义, 鲁静, 汪浩, 张鹏飞, 韩德鑫. 2008. 近海型含煤岩系沉积学及层序地层学研究进展[J]. 古地理学报, 10(6):561-570.
- 申建, 秦勇, 张兵, 李国璋, 沈玉林. 2018. 鄂尔多斯盆地东缘临兴区块煤系叠置含气系统及其兼容性[J]. 煤炭学报, 43(6):1614-1619.
- 沈玉林, 秦勇, 郭海英, 易同生, 邵玉宝, 金洪波. 2012. 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, 37(3):573-579.
- 盛秋红, 李文成. 2016. 泥页岩可压性评价方法及其在焦石坝地区的应用[J]. 地球物理学进展, 31(4):1473-1479.
- 史训知, 戴金星, 王则民, 朱家蔚, 刘家祺. 1985. 联邦德国煤成气的甲烷碳同位素研究和对我们的启示[J]. 天然气工业, 5(2):1-9.
- 宋儒, 苏育飞, 陈小栋. 2019. 山西省深部煤系“三气”资源勘探开发进展及研究[J]. 中国煤炭地质, 31(1):53-58.
- 宋岩, 李卓, 姜振学, 罗群, 刘冬冬, 高之业. 2017. 非常规油气地质研究进展与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, (4):638-648.
- 孙斌, 琚宜文, 卢双舫, 吴建光, 王璟明, 李午阳, 戚宇, 余坤, 陈万钢, 乔鹏. 2020. 鄂尔多斯盆地东缘临兴区块煤系“三气”合采储层可改造性评价因素分析及其应用[J]. 地球科学前沿, 10(2):85-99.
- 王倩. 2015. 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.
- 王蕊, 石军太, 王天驹, 黄亮, 孙政, 张磊. 2016. 不同叠置关系下煤层气与致密气合采方案优化研究[J]. 中国煤炭地质, 28(6):42-46.
- 王佟, 王庆伟, 傅雪海. 2014. 煤系非常规天然气的系统研究及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 42(1):24-27.

- 王一兵, 田文广, 李五忠, 赵庆波, 田立志. 2006. 中国煤层气选区评价标准探讨[J]. 地质通报, 25(9):1104-1107.
- 王振云, 唐书恒, 孙鹏杰, 郑贵强. 2013. 沁水盆地寿阳区块3号和9号煤层分层排采的可行性研究[J]. 中国煤炭地质, (11):21-26.
- 吴建光. 2013. 我国含煤岩系非常规天然气勘探开发进展及认识[C]. 中国煤炭学会, 国家煤矿安全监察局, 25-41.
- 吴建光. 2016. 中联公司煤层气勘探开发现状及技术进展[R]. 北海: 2016年全国煤层气学术研讨会, 2016-11-03.
- 肖骞, 沈玉林, 秦勇, 申建, 顾娇杨, 张春良. 2017. 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, 28(4):590-601.
- 谢相军, 张伟. 2014. 白杨河区块煤层气分压合采因素分析[J]. 中国西部科技, (3):29-29, 99.
- 杨光. 2016. 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.
- 杨华, 付金华, 刘新社, 孟培龙. 2012. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 39(3):295-303.
- 杨晓盈, 李永臣, 朱文涛, 黄纪勇, 单永乐, 张强. 2018. 贵州煤层气高产主控因素及甜点区综合评价模型[J]. 天然气地球科学, 29(11):1664-1671, 1678.
- 杨燕青, 张小东, 许亚坤, 张鹏, 王昆, 朱春辉. 2019. 豫东地区煤系烃源岩有机质特征与煤系气资源潜力[J]. 煤田地质与勘探, 47(2):111-120.
- 杨兆彪, 李洋阳, 秦勇, 孙晗森, 张平, 张争光, 吴丛丛, 李存磊, 陈长骁. 2019. 煤层气多层合采开发单元划分及有利区评价[J]. 石油勘探与开发, 46(3):559-568.
- 杨兆彪, 秦勇. 2015. 地应力条件下的多层叠置独立含气系统的调整研究[J]. 中国矿业大学学报, 44(1):70-75.
- 杨兆彪, 秦勇, 陈世悦, 刘长江. 2013. 多煤层储层能量垂向分布特征及控制机理[J]. 地质学报, 87(1):139-144.
- 杨兆彪, 秦勇, 高弟, 王斌. 2011. 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, 张争光, 孙晗森, 李洋阳, 吴丛丛. 2018. 基于聚类分析的多煤层煤层气产层组合选择[J]. 煤炭学报, 43(6):1641-1646.
- 易同生, 高为. 2018. 六盘水煤田上二叠统煤系气成藏特征及共探共采方向[J]. 煤炭学报, 43(6):1553-1564.
- 尹淮新, 谈红梅, 坛俊颖, 吴翔. 2009. 新疆低煤阶煤层气勘探选区评价标准的探讨[J]. 中国煤层气, 6(6):9-13.
- 俞益新, 唐玄, 吴晓丹, 苏展, 叶浩. 2018. 澳大利亚苏拉特盆地煤层气地质特征及富集模式[J]. 煤炭科学技术, 46(3):160-167.
- 袁学旭. 2014. 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.
- 张健. 2018. 深浅煤层同压合采煤层气的适用性分析及工艺[J]. 煤炭科学技术, 46(6):101-106.
- 张金川, 姜生玲, 唐玄, 张培先, 唐颖, 荆铁亚. 2009. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 29(12):109-114.
- 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 姜生玲, 刘锦霞, 姜文利, 唐玄, 韩双彪. 2012. 页岩气资源评价方法与技术: 概率体积法[J]. 地学前缘, 19(2):184-191.
- 张金川, 徐波, 聂海宽, 汪宗余, 林拓, 姜生玲, 宋晓微, 张琴. 2008. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 28(6):136-140.
- 张文浩, 苗苗青, 姜鲲鹏, 刘卫彬. 2019. 中国油气资源勘探开发特点、趋势及生态管理[J]. 地质与资源, 28(5):454-459.
- 张小东, 张硕, 许亚坤, 王昆, 张鹏, 朱春辉. 2018. 基于模糊数学的豫东煤系气资源勘探有利区预测[J]. 煤炭科学技术, 46(11):172-181.
- 张政, 秦勇, 傅雪海. 2014. 沁南煤层气合层排采有利开发地质条件[J]. 中国矿业大学学报, 43(6):1019-1024.
- 郑书洁. 2016. 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.
- 朱炎铭, 侯晓伟, 崔兆帮, 刘刚. 2016. 河北省煤系天然气资源及其成藏作用[J]. 煤炭学报, 41(1):202-211.
- 邹才能, 杨智, 黄土鹏, 马锋, 孙钦平, 李富恒, 潘松圻, 田文广. 2019. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J]. 石油勘探与开发, 46(3):433-442.