

文章编号: 0253-2697(2023)11-1755-09 DOI:10.7623/syxb202311001

# 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础

罗平亚 朱苏阳

(油气藏地质及开发工程全国重点实验室 西南石油大学 四川成都 610500)

**摘要:**中国煤层气资源种类齐全且极为丰富可靠,具有形成年产千亿立方米级新兴大产业的资源基础。在国家的大力支持下,经过30年的艰苦努力,中国煤层气勘探开发取得重大进展,形成了年产百亿立方米级的煤层气产业。但距年产千亿立方米级的大产业目标相距太远,且煤层气连续3个五年计划没有实现预期目标,同时也失去了明确的发展方向,中国煤层气产业发展处于前所未有的困境。在中国亟需大力发展的天然气产业中煤层气贡献微薄,其根本原因是30年来国内外所建立的煤层气勘探开发理论与技术不能完全体现煤层组成、孔隙结构特征与煤层气以吸附态为主的赋存状态,现有技术不完全切合煤层气的产气机理,不具备普适性。在深入分析煤层气产气机理的基础上,提出了将煤矿瓦斯学科与天然气开发学科相融合,建立起科学、实用的煤层气勘探开发理论与技术,并提出4类煤层气资源都可据此建立起科学、实用的理论与技术,以实现高效勘探、有效开发。进一步从煤层气资源状况、油气勘探开发技术进步、煤层甲烷赋存、运移规律研究进展等方面论述了中国建成千亿立方米级煤层气大产业的可能性及实施路径。煤层气大产业需要依靠煤炭和油气两大行业交叉融合,加强基础研究,从源头创立适用于各类煤层气藏实现高效勘探、有效开发的理论与技术体系,产生一个新的学科(方向),形成一个新的生产、技术、行业领域,建成一个大产业的路线,从而实现“由煤层气勘探开发原创理论与技术支撑形成一个煤层气新兴大产业的发展战略”,确保中国年产千亿立方米级煤层气大产业尽快形成,从而大幅度降低中国天然气对外依存度,并力争逐步实现中国天然气自给自足。

**关键词:**煤层气;千亿立方米级;资源禀赋;瓶颈问题;技术基础;攻关方向

**中图分类号:**TE132

**文献标识码:**A

## Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China

Luo Pingya Zhu Suyang

(National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation; Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China)

**Abstract:** China has a complete range of coalbed methane (CBM) resources, which are extremely rich and relatively reliable. The resource foundation can completely form an emerging industry with an annual gas production of hundreds of billions of cubic meters. With strong national support, after 30 years of arduous efforts, China has made significant progresses in the exploration and development of coalbed methane, forming an industry with an annual production of 10 billion cubic meters. However, this is too far from the goal of 100 billion cubic meters of coalbed methane annually, and the national task has not been completed for three consecutive Five-year plans. At the same time, China CBM industry has lost its clear development direction. Only a small contribution can be made to the urgently needed natural gas industry in China. The fundamental reason is that the theory and technology of CBM exploration and development established domestically and internationally over the past 30 years can not fully reflect the composition and pore structure characteristics of coal, as well as the occurrence state of methane mainly in an adsorbed state, which is not fully in line with the mechanism of CBM production, of which applicability is too small to be universal. On the basis of in-depth analysis of the mechanism of coalbed methane production, it is proposed that only the integration of coal mine gas and natural gas development disciplines can establish scientific and practical theories and technologies for CBM exploration and development. Then, four types of CBM resources are divided. Moreover, each CBM resource can be established with scientific and practical theories and technologies to achieve efficient exploration and effective development. This article discusses the possibility and implementation path of building a 100 billion-cubic-meter-scale CBM industry in China from aspects such as the status of CBM resources, progress in oil and gas exploration and development technology, occurrence and migration laws of methane in coal. This article proposes to rely on the cross integration of coal and oil and gas industries, strengthen basic research, establish a theoretical and technical system suitable for efficient exploration and effective development of various types of coalbed methane reservoirs, generate a new discipline (direction), form a

**基金项目:**中国工程院战略研究与咨询项目(2021-XY-24)和国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 52104036)资助。

**第一作者及通信作者:**罗平亚,男,1940年6月生,1963年毕业于四川石油学院,现为中国工程院院士,长期从事钻井液与完井液、储层保护技术和提高油气采收率等方面的研究工作。Email: sklabog@swpu.edu.cn

new production, technology, and industry field, and build a path of a large industry, To achieve the development strategy of forming an emerging coalbed methane industry supported by original theories and technologies of coalbed methane exploration and development, and to ensure the rapid formation of China's annual production of a 100 billion-cubic-meter-scale CBM industry, in order to significantly reduce China's dependence on external natural gas.

**Key words:** coalbed methane; 100 billion-cubic-meter-scale; resource endowment; bottleneck problem; technological base; breakthrough direction

引用:罗平亚,朱苏阳.中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J].石油学报,2023,44(11):1755-1763.

Cite :LUO Pingya,ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(11):1755-1763.

为全面建成具有中国特色的社会主义现代化强国,实现中华民族伟大复兴的宏伟目标,能源的支撑保障作用至关重要。国家“双循环战略”的实施与“双碳目标”的实现也对中国油气特别是天然气的发展提出了更高、更严、更迫切的要求<sup>[1]</sup>。

但是,中国每年面临 $(2\ 000\sim 3\ 000)\times 10^8\text{ m}^3$ 天然气供给缺口,对外依存度长期保持在40%~50%<sup>[2]</sup>。为落实习总书记“能源的饭碗必须端在自己手里”的指示精神,如何尽可能降低天然气对外依存度已成为中国亟需解决的重大战略问题。受资源和技术限制,中国仅依靠常规天然气、页岩气、致密气等资源的开发很难有效弥补这个缺口。煤层气的有效开发资源极为丰富但至今对天然气产业发展贡献微薄,其具备形成千亿立方米级大产业的潜力,是弥补这个缺口的希望所在。

中国的煤层气资源基础雄厚且落实程度高,是弥补天然气产量缺口雄厚的资源基础。30年前,全球兴起了一股源于美国的开发浅层煤层气、建成大产业的热潮。中国也曾期望形成年产千亿元以上煤层气新兴大产业,因而加以大力扶持。但经过30年的努力,因缺乏正确的发展战略、过关的勘探开发理论与技术,全球煤层气也没有建成千亿立方米级的大产业。煤层气产业失去了明确的发展方向,国内外业界对建成煤层气大产业也失去了耐心和信心。中国从“十四五”规划(2021—2025年)开始不再重点支持煤层气产业,极为丰富的煤层气资源因理论和技术不过关而被闲置,处境本已艰难的煤层气产业发展更加困难,对中国亟需大力发展的天然气产业贡献式微。

鉴于此,中国工程院组织了一批院士、专家,通过全面系统总结、分析了国内外煤层气产业发展的经验与教训,综合应用煤矿瓦斯动力学、气藏工程及采气工程的相关理论与方法,分析了煤层气井生产过程中甲烷解吸、扩散、渗流的耦合过程及其对产量的影响,论证认为各类煤层气都有可能建立高效勘探、有效开发的理论与技术体系。在此基础上,提出“以原始创新支撑形成煤层气千亿立方米大产业”的建议,以期通过创立煤层气勘探开发原创性理论与技术,支撑建立千亿立方米级煤

层气大产业。一方面,大幅度降低中国天然气对外依存度,并力争与常规气、页岩气的发展共同发力逐步实现天然气自给自足;另一方面,助推煤炭产业健康发展,更强有力地支撑煤炭在能源供应中的“压舱石”作用。

笔者所指的煤层气是赋存于煤层和与煤层叠合共生于致密砂岩中以甲烷为主要成分的天然气。煤层气大产业以年产(数)千亿立方米为主要标志,开发方式主要包括煤层气地面建井开采和煤炭生产过程中瓦斯零排放回收利用的瓦斯两部分,以地面建井开采为主。

## 1 中国煤层气资源基础

中国煤层气资源种类齐全,资源量极为丰富且探明程度可靠。

### 1.1 资源禀赋

根据全国煤层气资源动态专项评价结果,中国2000 m以浅的煤层气资源量约为 $30.05\times 10^{12}\text{ m}^3$ ,可采资源量约为 $12.5\times 10^{12}\text{ m}^3$ <sup>[3]</sup>。其中,高煤阶、中煤阶、低煤阶煤层气资源结构完整,地质资源量各约占1/3<sup>[4]</sup>。另外,根据全国29个主要盆地的资源评价结果,埋深大于2000 m的煤层气地质资源量为 $40.71\times 10^{12}\text{ m}^3$ ,可采资源量为 $10.01\times 10^{12}\text{ m}^3$ <sup>[5]</sup>。

中国煤层气的新增探明储量每年均维持在约 $3\ 000\times 10^8\text{ m}^3$ 。在“十三五”期间(2016—2020年),新增探明储量总体呈现下降趋势<sup>[6]</sup>。随着“十三五”期间勘探开发技术不断进步,2020年煤层气新增探明储量重新出现了一定规模的增长,新增探明储量为 $3\ 315.54\times 10^8\text{ m}^3$ ,同比上升15.71%(图1)。

同时,根据中国矿业大学对全国29个含煤盆地的评价结果,全国2000 m以浅煤系气资源为 $82\times 10^{12}\text{ m}^3$ <sup>[7]</sup>,煤系气/煤层气资源量比例系数为2.69。由此可知,中国的煤系气地质资源量同样极为丰富。

### 1.2 资源可靠性

煤层气资源量的可靠性得益于煤矿区详查的优势,从地质载体和探井成功率两个方面分析认为,2000 m以浅的煤层气资源储量的控制程度明显高于其他类型天然气。

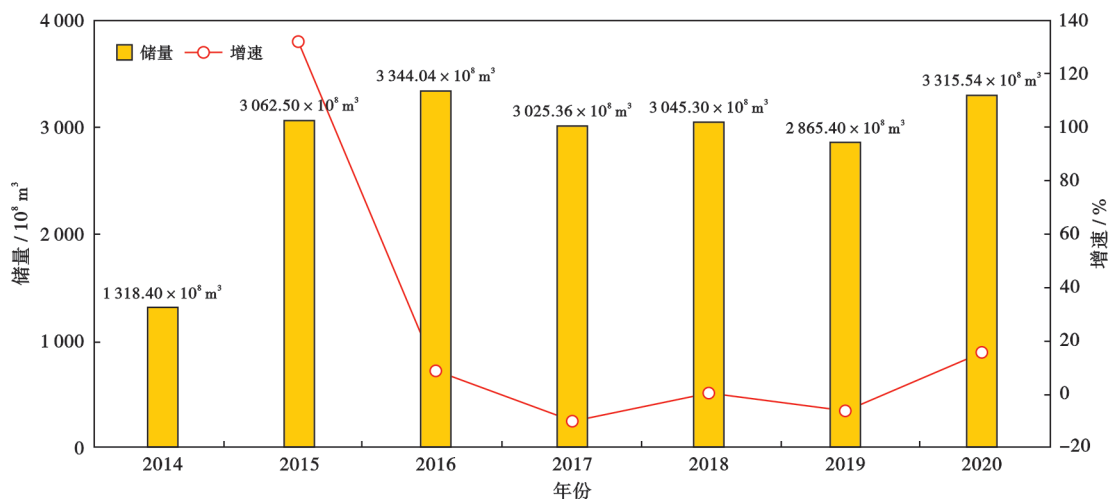
图 1 2014—2020 年煤层气新增探明储量变化情况<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Changes of new proved reserves of coalbed methane from 2014 to 2020

### (1) 地质载体稳定

历次全国埋深 2000 m 以浅煤层气地质资源量预测结果的变化值均不超过 20%，其原因在于煤炭作为一种稳定沉积环境下形成的地质体，煤层侧向分布总体连续且厚度相对于砂岩等更为稳定，煤层“有机储层”的特性有别于以无机储层为地质载体的其他类型天然气，微孔发育且吸附性强烈，导致存在“有煤层就有气，且含气变化幅度不大”的客观规律。

### (2) 探井成功率较高

由于“有煤就有气”，中国煤层气井投产率一般为 50%~70%，少数区块可达 80%，虽然产量不高，但是探井成功率极高<sup>[8]</sup>。其他类型天然气探井成功率则一般为 30%~60%，最高可达约 70%，风险探井成功率则低于 35%。对比分析初步认为，中国埋深 2000 m 以浅煤层气资源量控制程度明显高于其他类型天然气。

综上可知，中国煤层气资源类型齐全（高煤阶、中煤阶、低煤阶的煤层气，与煤层叠合共生致密砂岩煤系气）且资源量发育较为平均、资源量丰富且评价结果可靠，为建立千亿立方米级煤层气大产业提供了扎实的物质基础。

## 2 全球煤层气产业与技术发展现状

经过 30 年的发展，全球煤层气形成产业的国家仅有 4 个（美国、加拿大、澳大利亚和中国），但没有任何一个国家建成年产千亿立方米级的大产业，全球煤层气产业年产量总和都未曾达到过千亿立方米，而且发展缓慢并呈现下滑的趋势，建立煤层气大产业的愿景严重受挫。

### 2.1 国外成功开发煤层气国家的煤层气产业与技术现状

#### (1) 美国

美国在富含水的低煤阶煤层气领域形成了一套

“煤层气有效勘探开发的理论与技术”，主要包括煤层气吸附-扩散理论、排水降压、特殊结构井（羽状水平井、U 型井技术等）、钻完井（裸眼完井、洞穴完井）、活性水压裂改造等系列配套技术。依靠这套理论与技术，美国成功开发了一批产气量高、效益好的煤层，形成了峰值  $(500\sim 600) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  的产量规模，成为全球煤层气产业与技术的发源地。但自页岩气大力发展之后其产业逐渐萎缩，产量逐步下滑到  $(200\sim 300) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

美国形成的该套理论和技术成为各国煤层气勘探开发的理论基础和参考依据，然而其应用效果并不理想。

#### (2) 加拿大

20 世纪 90 年代，加拿大在多个地区应用“美国理论与技术”进行了尝试，但是目标煤层多为弱含水的干煤层，排水降压技术难以套用，煤层气开发因没有经济效益而放弃。2000 年之后，随着油气提高采收率技术的进步，针对阿尔伯特弱含水干煤层的特点，加拿大发展了氮气泡沫压裂、注氮增产、气驱增产等技术，实现了弱含水煤层气的商业化开发。2009 年峰值产量达到  $95 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，实现了局部的产业化，由于一直没能突破“美国理论与技术”体系的束缚，最终没有形成百亿立方米级的年产规模<sup>[9]</sup>。

#### (3) 澳大利亚

澳大利亚煤层气产业的发展历程可以鲜明地分为两个阶段。第一阶段为 2011 年以前鲍文盆地煤层气的开发。鲍文盆地发育厚层富含水的低阶煤，由于“美国理论与技术”在低煤阶的适用性较好，鲍文盆地煤层气产量在 21 世纪初大幅度上升，但峰值产量仅达  $76.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  且后继乏力<sup>[10]</sup>。第二阶段为 2011 年之后对苏拉特盆地煤系气的开发。随着油气领域大排量压裂技术的突破，压裂缝可以穿层并在多岩性储层

内同时扩展,煤层-致密砂岩的复合气藏产能得到充分释放,实现了苏拉特盆地煤层共生致密砂岩气(煤系气)的规模开发,盆地内直井日均产量可高达数万立方米以上,其年产气量快速超越鲍文盆地。

苏拉特盆地煤系气开发之初(2011—2014年),澳大利亚学术界和工业界并没有厘清煤系气的本质,仍认为产气源于煤层。随着生产测试和对气藏认识的不断加深,2015年以来,才逐渐明确了煤层和叠置共生砂岩共同产气的事实,并提出了规模化直井穿层压裂的煤系气开发概念,形成了 $400 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的产量规模,其目前产量超越美国,成为全球第一。

国外煤层气产业的发展历程与现状说明:国外煤层气的发展远未达到预期,大规模开发煤层气形成大产业使之成为世界天然气产业巨大的新的增长点的目标远未实现。煤层气的开发进展缓慢,已被快速发展的页岩气、致密气边缘化,其前景堪忧。同时也带来了3点启示:①目前国际流行的源于美国的“煤层气有效勘探开发的理论与技术”只适用于少数的煤层,不具有普适性;②不突破现有的“煤层气有效勘探开发的理论与技术”的局限,就很难全面有效开发煤层气,无法形成千亿立方米级的煤层气大产业;③不同类型的煤层气应具有不同的开采、开发的原理和针对性的开发技术。

## 2.2 中国煤层气产业与技术现状

30年来,在国家的大力支持和组织下,中国在中煤阶、高煤阶煤层以源于美国的“煤层气有效勘探开发的理论与技术”为基础,结合中国煤储层地质特点进行了全面系统的攻关研究,经过30年的艰苦努力,取得了重大成果,形成的煤层气勘探开发技术总体上达到国际先进水平且极具特色。高煤阶、中煤阶煤层气投产井平均产量由 $600 \sim 700 \text{ m}^3/\text{d}$ 已提高至 $1200 \sim 1400 \text{ m}^3/\text{d}$ ,平均单井产量突破了盈亏平衡点,具备了工业化利用价值<sup>[11]</sup>。同时,建立了25个煤层气产业化生产基地,2020年煤层气产量达 $57 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,实现了高煤阶、中煤阶煤层气产业化。对其他类型煤层也开展了一系列探索,并取得了一些突破。

(1) 高煤阶煤层气勘探开发技术达到国际先进水平且具有特色

沁水盆地南部是全球首个也是目前唯一实现商业化的高煤阶煤层气开发基地。根据低孔、特低渗、埋深浅、低压、高含水和高含气量的煤层特点,主要采用直井、丛式井、长水平井混合井网开发,对碳捕获、利用与封存技术(CCUS)增产也进行了的尝试。虽然在部分区块(潘河、潘庄、郑庄等)实现了高效高产的示范开发,但是多数井的产量普遍较低,规模化生产之后仍存在经济效益不足的问题。

(2) 低煤阶煤层气勘探开发仍处于尝试阶段

目前,中国低煤阶的煤层气尚未成为勘探和开发的重点,仅在辽宁阜新盆地形成了商业化的开发基地。中国低煤阶的煤层气资源特点与美国形成规模开发的煤层较为相似,完全可以借鉴“美国理论与技术”实现规模化开发。

(3) 煤层和与煤层叠合共生致密砂岩气勘探与开发多点突破

“十三五”规划以来,中国在鄂尔多斯盆地东缘的临兴、石楼西、三交北等煤系致密气区块进行了多气合采尝试,已实现快速上产(部分气田取得了产气量为 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的突破)。同时,中国2019年煤层气产量达 $54.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中产自煤层气区块未纳入统计的煤系砂岩气产量达 $35 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[12]</sup>。近年来受澳大利亚煤层和与煤层叠合共生致密砂岩气规模化开发的启示,中国已在该领域实现了“多点开花”,正迈进在规模化生产的道路上。

近十多年来,随着页岩气等非常规油气开发技术进步,储层体积压裂改造开发技术也引入到煤层气开发中,但由于存在煤层水平井壁不稳定、煤层压裂中支撑剂嵌入及大量产生煤粉的问题,此类煤层具有的特殊重大技术难题没有很好地解决,导致这些技术使用未取得明显效果<sup>[13]</sup>。

(4) 中国瓦斯抽采现状

为降低瓦斯突出的风险,中国在多年攻关下,已形成了完整的地面地下综合一体的瓦斯预抽技术,但总体而言其利用率仍然较低。2018年,全国煤矿瓦斯抽采量为 $129.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,利用量为 $53.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,利用率仅为40.89%<sup>[14]</sup>。对于已泄压且孔渗条件较好的预采区,地面钻井抽采可以高效开采煤层气资源。而对于渗透率极低的高含瓦斯煤层,通常采用井下钻孔后的水力压裂、水力割缝、深孔爆破和水力冲孔等方法,对煤体进行卸压增透后,对瓦斯进行高效抽采。特别是井下瓦斯预抽技术在中国大型复杂煤矿开采过程中广泛应用,已成为降低瓦斯突出风险并减少煤矿安全事故的重要保障措施,也是“双碳”战略中瓦斯零排放的核心储备技术。

总之,虽然经过30年的努力,中国煤层气实现了产业化,但形成的煤层气勘探开发技术不具有建成千亿立方米级煤层气大产业的支撑能力,产业化规模距离年产千亿立方米级的大产业目标相差太远,其根本原因是现有理论与技术条件下的单井产量太低( $< 1000 \text{ m}^3/\text{d}$ )且至今未能找到有效的解决途径。煤层气产业连续3个五年计划没有实现预期目标,因此人们对于大力发展煤层气、建成千亿立方米级的大产业逐

渐失去耐心和信心,从“十四五”规划开始,煤层气也未能继续成为国家重点支持对象,中国煤层气发展处于前所未有的困境。

### 3 建立煤层气大产业愿景严重受挫的原因

未能建成千亿立方米级煤层气大产业的问题复杂、原因很多,但其根本原因是虽有极为丰富的资源,但无有效开发的技术。

#### 3.1 现有技术只适用于某些煤层,但不具有普适性

现有资料表明,美国在煤层气开发初期,也曾对含气量较高的中—高煤阶煤层气进行过抽采尝试,但由于渗透率过低、单井产量过小而放弃。美国开发理论与技术适用的煤层气藏多为渗透率较高的含水低阶煤,但是这部分煤层气探明储量仅占总量的 10%~15%<sup>[4]</sup>,对大多数煤层气藏并不适用现有的开发理论与技术。而 30 年来国内外煤层气产业界受现有理论与技术体系的束缚,虽经多方努力都未能突破,因此对大多数煤层气藏(85%~90%)的开发效果不好或无效。

#### 3.2 现有理论与技术未能体现煤层气储层特征、甲烷赋存状态及其产气机理

现有的技术本质上是以渗流为基础,以钻井、完井、压裂来形成产气通道,并采用扩大泄气面积及沟通地层深部裂缝等来形成和增加气井产量。但这一理论未能充分体现煤层气的产气机理,只有其中的排水降压技术被认为能够体现或部分体现煤层气的特点。由于煤储层孔隙结构特征及煤层中煤层气赋存状态决定了煤层气产气速度(单井日产量)取决于:①煤层基本单元内微孔隙表面吸附甲烷向微孔内的解吸速度;②解吸的甲烷在基本单元微孔内(向割理)的扩散速度;③从孔隙中扩散而来的甲烷在煤层微裂缝(割理)向井眼的渗流速度。初步研究表明,扩散速度最慢,但其决定了气井产量。由于解吸煤层基本单元内(1 nm、10 nm、100 nm)孔隙中的甲烷扩散速度非常缓慢,所以一般煤层气井的产量很低。而现有煤层气开采技术的所有生产措施都是以增加渗流速度为直接目标,现在还没有直接提高其扩散速度的方法与技术,所以现有技术不管如何改进也很难使产量大幅提高。

#### 3.3 体现煤层气藏特点的排水降压技术相关理论值得商榷

煤层气井产量由煤层所含甲烷中占 90%的吸附气提供,其生产过程为:在煤层中形成井眼后,排水使煤层压力下降达到该煤层中煤层气的临界解吸(脱附)压力,从而引起吸附态甲烷解吸,造成煤层气井产气。该工艺技术即为排水降压技术。但是,煤层压力即为

其气体压力,只要地层压力降低,达到吸附平衡的吸附气必然立即随之解吸,并不存在临界解吸(脱附)压力的概念<sup>[15-16]</sup>,这一点已被大量煤层气生产实践所证实。同时,煤中甲烷的吸附符合 Langmuir 吸附理论,只有当游离甲烷的压力高于孔隙表面饱和吸附平衡压力时才可能有降压解吸,而此临界解吸压力就是其饱和吸附压力,这与大多数的煤层实际不符。因此,采用临界解吸(脱附)压力来指导排采技术及煤层气生产会带来明显的误导,直接影响煤层气有效开发正确技术路线的建立,束缚了煤层气学术界的思维。

#### 3.4 目标煤层局限于浅煤层,限制了煤层气的发展领域

长期以来,受现有煤层气勘探开发理论与技术体系的限制,把煤层气的开采只局限于 1500 m 以浅的煤层本身,而未能认识到深部煤层气及与煤层叠合共生致密砂岩气的可采性,使可开采的资源大大受限。近 10 年来国内外的煤层气勘探开发实践证明,一旦突破这个界线则可能大有可为。

#### 3.5 煤矿瓦斯学科与气田开发学科未能很好融合,不能产生符合煤层气储层特征、产气机理的有效开发技术

煤层气的产气过程是甲烷解吸、扩散与超低渗裂缝性储层中渗流耦合作用的结果,其完整的流动机制至今未能认识清楚,这必须将煤矿瓦斯学科与气田开发学科融合才能解决。但目前攻关研究在解决煤层气开采问题时,这两个学科仍然彼此分离,因此不能建立客观、正确、实用的煤层气开采、开发理论和适用技术。

### 4 建成千亿立方米级煤层气新兴大产业的可能性

#### 4.1 中国具有雄厚的煤层气资源基础

现有研究表明,中国煤层气资源种类齐全且极为丰富,煤层气资源由原来局限在 1500 m 以浅的煤层气扩展为由浅到深的各类煤层气藏、与煤层共生的致密砂岩复合气藏、以及煤炭生产过程中瓦斯零排放回收利用的瓦斯,资源量由约  $30 \times 10^{12} \text{ m}^3$  扩大到约  $180 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。气田开发经验表明:用  $180 \times 10^{12} \text{ m}^3$  的资源量来保证  $(2000 \sim 3000) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  的产量规模,只要技术一旦有所突破就必有可能实现。

#### 4.2 非常规油气藏勘探开发技术的重大突破成为煤层气有效开发坚实的技术储备

近 10 年来,中国非常规天然气勘探、开发理论与技术已有重大发展,对于游离气含量小于  $2 \sim 4 \text{ m}^3/\text{t}$  的低渗气藏、超低渗气藏、非常规致密气藏、页岩气藏,尽管其渗透率远低于煤层气藏也都能实现高效勘探、工业化有效开发。近 10 年来,中国的多气合采或多气

共采技术已基本形成。因此,非常规油气藏勘探开发技术取得的重大突破可为煤层气有效开发提供更有力的理论、技术支持。

#### 4.3 综合应用煤矿瓦斯学科与气田开发学科联合研究煤层气开发问题已成共识并有所突破

研究表明:综合应用煤矿瓦斯动力学、气藏工程及采气工程相关理论与方法,分析研究煤层气井产气过程中解吸、扩散、渗流的耦合及其对煤层气井产量的影响可以厘清各类煤层的煤层气产气机理。研究实践证明:各类煤层的煤层气都有可能建立其高效勘探、有效开发的理论与技术体系,并对其实现有效开发。

#### 4.4 中国如何形成年产千亿立方米级煤层气新兴大产业

按以上思路与技术路线可考虑将煤层气藏分为4类,对每类煤层逐一进行综合分析和研究。

##### 4.4.1 现有技术就可以获得高产的煤层气藏

###### (1) 中国的浅层低煤阶煤层气

中国的浅层低煤阶煤层气孔隙度高(10%~15%),以中孔—大孔(100~1000 nm)为主,甲烷在其中可渗流运移,产气全过程无扩散过程,气井产量由渗流过程及速度控制,渗透率较高(1.0~10.0 mD),埋藏浅(<1000 m),厚度大(>10 m)。理论和实践已经证明,这类煤层气藏在中国可适用于现在的“煤层气有效勘探开发的理论与技术”并获得单井高产。美国依靠这类煤层气藏(资源量约为 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )建成的产量为 $(500 \sim 600) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,中国这类煤层气藏的资源量约为 $14.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,可能建成产量为 $(400 \sim 500) \times 10^8 \text{ m}^3$ 的煤层气产业。

###### (2) 深部可适用于现有技术开发的中煤阶、高煤阶煤层气

1500 m以深煤层的渗透率低、孔隙度低,长期被认为是煤层气开发的禁区。但是目前研究表明,煤层大都具有随着埋深增加煤层气吸附状态发生转换的“临界深度”特性,即随着埋深增加,煤层温度、压力增加,而煤层对煤层气吸附的高温解吸效应超过压力增加对吸附的增强效应,使其游离气比例随埋深的增加而逐渐增加(图2)。当埋深大于此煤层的“临界深度”后,游离甲烷气含量可能逐渐增加到总含气量50%以上。中国深部煤层气的“临界深度”为1500~1700 m,一般压力较高、含气量也高(15~30  $\text{m}^3/\text{t}$ ),游离甲烷气含量大于7~15  $\text{m}^3/\text{t}$ ,使其能适用于现有非常规天然气开发理论与技术,用水平井压裂或水平井体积压裂等方法有效开采,并可能获得高或较高的单井产量,经济效益好,有利于形成煤层气大气田。

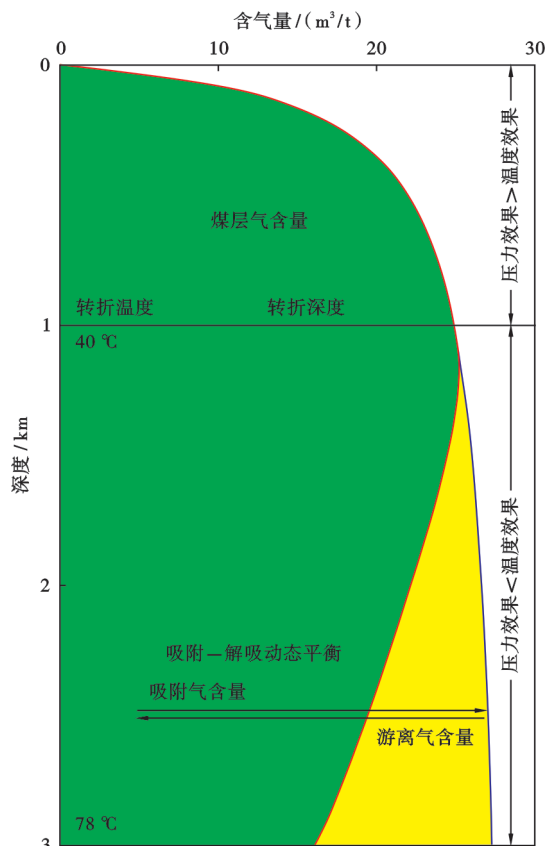


图2 深部煤层气的游离气与吸附气平衡比例<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Balance ratio of free gas and adsorbed gas in deep coalbed methane

近年来,中国深部煤层气的勘探与开发都见到好苗头,2021—2022年中石油煤层气有限责任公司陆续在鄂尔多斯盆地东缘埋深2200~2400 m的深部煤层进行先导扩大试验区,获得初期产量为 $(8.6 \sim 16.3) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,平均产量为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,取得了良好的效果,充分证明了中国深部煤层气藏用现有“非常规天然气有效勘探开发的理论与技术体系”实现有效开发的可能性。中国这类煤层气藏资源量十分巨大( $40.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ),且埋藏并不深(相比于致密气藏、页岩气藏),一旦成功开发其规模将十分可观,因此形成年产几百亿立方米级甚至上千亿立方米级的煤层气大产业是完全有可能的。

###### (3) 废弃煤矿矿井遗煤

到2030年,中国有约15000处高瓦斯废弃煤矿矿井,含有近 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 瓦斯(煤层气)资源。由于废弃煤矿中的煤层已经卸压,完全适合采用现行地面建井的开采技术,并获得高产<sup>[18]</sup>,其足以形成年产十亿立方米级的浅井、高产煤层气田,其总规模可达产量为 $(100 \sim 150) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的大气田。

上述3类煤层气资源完全可以建成年产量大



于  $(1\ 000\sim 1\ 500)\times 10^8\text{ m}^3$  的煤层气大产业。因此,研究、勘查、评价、发现上述这些煤层气藏及其储量,再利用已掌握的先进技术与这类煤层气产气的特殊机理相结合,并有针对性地有效开发,将成为中国建成年产千亿立方米级煤层气大产业现实而坚实的基础。

#### 4.4.2 低渗、超低渗中煤阶、高煤阶煤层气藏

综合应用煤矿瓦斯动力学、气藏工程及采气工程相关理论与方法进行分析研究,将甲烷在煤层中的渗流速度、扩散速度、解吸速度进行耦合,以获得最合理的单井产量为目标进行优化,可以得出煤层气有效开采的相关理论和方法,并可以应用常规低渗、超低渗气藏或致密气藏现有的成熟技术进行开采,可获得单井日产几千立方米以及更高的产量,即可使这类煤层气目前的平均产量成倍、数倍地增加。同时,充分发挥煤层气开采特有的气井稳产期长、生产周期长、累积产量高,以及井浅、地层简单、单井投资不高的优势,以“单井产量不高、但井浅投资少、井数众多而效益显著”的开采开发经营方式,形成年产量大于  $(300\sim 500)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  规模的煤层气大产业,成为中国建成年产千亿立方米级的煤层气大产业另一个重要组成部分。

#### 4.4.3 对与煤层共生致密砂岩气复合煤层气藏的有效开发

中国煤层气开采中经常出现气井“累积产量远超该井控制煤层的总含气量”的现象。分析表明,这些天然气都来源于与煤层叠合共生的致密砂岩中。2020年,中国获得  $57\times 10^8\text{ m}^3$  煤层气产量的同时生产出  $44\times 10^8\text{ m}^3$  与煤层叠合共生的致密砂岩气,这可以说明与煤层叠合共生的致密砂岩气的确大量存在,并且可以同井筒共采。

近年来,中国也对该类气藏开展了系统的探索和研究,并在鄂尔多斯盆地东缘临兴、榆林、三交等地区取得重大突破<sup>[19-20]</sup>。结合澳大利亚成功的开发经验,充分说明与煤层共生致密砂岩气复合煤层气藏完全可以实现有效开发。目前虽然尚未形成系统的开发理论与技术体系,并对其进行大规模有效开发,但在煤层气有效开发理论与技术建立的同时,如与致密砂岩气有效开发技术相融合,就可形成适用的有效开发技术。鉴于中国这类复合气藏资源量特别巨大(大于  $100\times 10^{12}\text{ m}^3$ ),一旦成功开发将可能建成数百亿立方米一千亿立方米级的煤层气大产业,成为中国建成年产(数)千亿立方米级的煤层气大产业的重要保障。

#### 4.4.4 煤炭生产过程中全部回收的瓦斯

为实现“双碳”目标,煤炭生产过程中瓦斯必须全部回收,实现零排放对回收瓦斯的资源化综合利用与

煤层气产业结合。中国每年生产  $(30\sim 40)\times 10^8\text{ t}$  煤,必然有  $(400\sim 450)\times 10^8\text{ m}^3$  的瓦斯回收量。这部分瓦斯的回收和综合利用,经过国家油气重大专项长期攻关研究,已有好的基础,继续攻关完全实现零排放将是必然的结果,如此可同时获得产量为  $(400\sim 450)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  的煤层气。

综上所述,对每类煤层逐一进行综合分析、研究表明:煤矿瓦斯工程学科与天然气开发工程学科的交叉融合可以分别建立适用于各类煤层气藏的勘探开发理论与技术,并对其实现有效开发。每种类型煤层都有可能建成大于  $(500\sim 1\ 000)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  的产量规模,而且可以获得显著的经济效益,其总和甚至可能建成年产量为  $(2\ 000\sim 3\ 000)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  规模的大产业。

### 4.5 举全国之力办大事的制度优势是建立煤层气千亿立方米级大产业的可靠保证

建立煤层气千亿立方米级大产业是国内外近 30 年来业界都努力想办成而终未办成的大事。从当前形势看,仅按市场规律任其发展,在短期内不可能成功,但充分发挥中国能集全国之力办大事的制度优势,则其成功的可能极大。若能如此,中国煤层气产业发展未来可期且前程远大:只要经过 15~20 年的努力就有望建成产量为  $(2\ 000\sim 2\ 500)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  的煤层气大产业,其中地面建井开采产量为  $(1\ 500\sim 2\ 000)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ ,瓦斯零排放回收利用产量为  $(400\sim 500)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ ,这可以大幅降低天然气对外依存度,并力争与常规气、页岩气等的共同努力发展,逐步实现中国天然气自给自足,并且有助于煤炭产业健康发展,更好地协助保证煤炭的“压舱石”作用。

## 5 中国煤层气产业发展的建议

### 5.1 重振建成煤层气年产千亿立方米级大产业的信心

以建成煤层气年产千亿立方米级大产业、大幅度降低中国天然气对外依存度、并力争与常规气和页岩气等共同发展逐步实现中国天然气自给自足为目标。由煤层气勘探开发原创理论与技术支撑,形成一个煤层气新兴大产业为实施战略,重振建成煤层气年产千亿立方米级大产业的信心,建议将建成煤层气大产业重新纳入国家能源发展战略,进一步加强支持力度,并重新制定发展规划。

### 5.2 重新组织全国力量攻关,形成各种类型煤层气的高效勘探、有效开发的原创理论与技术体系

依靠煤炭和油气两大行业交叉融合,从源头创立适用于各类煤层气藏实现高效勘探、有效开发的理论与技术体系,产生一个新的学科,形成一个新领域,并建成一个大产业。创建针对各类煤层气藏的“煤层气

藏勘探评价的理论、方法与技术体系”,对全国煤层气资源进行新的评价与分类。针对各类煤层气藏用新的煤层气藏有效开发的理论与技术体系研究适用的技术,实现不同方式、模式的有效开发。

### 5.3 发挥现有煤层气生产基地的战略支撑作用

充分利用现有的沁水盆地、鄂东、滇东黔西等已有煤层气示范基地的作用,以现有煤层气生产基地为基础,建设不同类型煤层的煤层气有效开发实验区,研究、试验、补充、提高、完善并建立适用各类煤层气有效开发技术体系。

### 5.4 持续研发煤矿瓦斯零排放和全浓度利用技术,并纳入煤层气大产业发展规划

贯彻煤矿瓦斯零排放的“双碳”战略,全面推进煤矿瓦斯全浓度利用是煤层气大产业必然而且不可缺少的重要组成部分。在现有技术和政策基础上,创新发展全浓度瓦斯利用技术,尤其是低浓度瓦斯直接燃烧利用技术,制定配套的产业扶持政策,从而实现煤矿抽采瓦斯零排放,并形成产量为 $(400 \sim 450) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的另一类煤层气产业。

### 5.5 持续加强研究平台与科技人才队伍建设

面向“煤层气勘探开发原创的理论与技术”及其应用研究需求,加强煤层气产业基地的建设,优化领域内国家战略科技力量,融合组建产学研用相结合的攻关团队,形成新的煤层气勘探开发学科方向,培养新的具有原始创新能力的人才队伍。

## 6 结论

(1) 中国煤层气资源种类齐全(低阶高渗煤层、中一高阶煤层、煤系气、煤矿生产过程中抽排的瓦斯以及废弃煤矿中聚集的瓦斯),各类煤层气资源量极为丰富且探明程度可靠,从理论上讲都有可能实现有效开发,完全具备形成年产千亿立方米级新兴天然气大产业的资源基础。

(2) 目前已形成的“煤层气有效勘探开发的理论与技术”只适用于少数低阶中一高渗含水煤层,对其他各类煤层气藏不具有普适性。中国煤层气受制于勘探开发理论及技术的局限,未能实现预期目标,目前发展暂时面临困境。

(3) 笔者所指煤层气大产业中的资源是赋存于煤层和与煤层叠合共生砂岩中的天然气,开发方式包括地面建井和煤炭生产过程中瓦斯回收利用两种方式,以地面建井开采为主。煤层气大产业的实现,需要深度融合煤矿开采和气藏工程两个学科,以形成各种类型煤层气的高效勘探开发的原创理论与技术体系。

(4) 这种学科间的深度融合和产、学、研的配合,

需要充分发挥中国能集全国之力办大事的制度优势,综合统筹应用煤矿瓦斯动力学、气藏工程及采气工程相关理论与方法,同时利用现有煤层气生产基地及煤矿抽采瓦斯零排放的时机。

(5) 只要经过15~20年的努力,完全有望建成产量为 $(2000 \sim 2500) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的煤层气大产业,可以大幅降低天然气对外依存度,并力争与常规气、页岩气等共同努力发展,逐步实现中国天然气自给自足,并且有助于煤炭产业健康发展,更好地协助保证煤炭的“压舱石”作用。

## 参 考 文 献

- [1] 贾爱林,程刚,陈玮岩,等. 双碳背景下中国天然气供需形势预测[J]. 石油勘探与开发,2023,50(2):431-440.  
JIA Ailin, CHENG Gang, CHEN Weiyan, et al. Forecast of natural gas supply and demand in China under the background of “Dual Carbon Targets”[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 431-440.
- [2] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2021-09-25]. <https://data.stats.gov.cn/>.  
National Bureau of Statistics. National data[EB/OL]. [2021-09-25]. <https://data.stats.gov.cn/>.
- [3] 张道勇,朱杰,赵先良,等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. 煤炭学报,2018,43(6):1598-1604.  
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1598-1604.
- [4] 徐凤银,侯伟,熊先钺,等. 中国煤层气产业现状与发展战略[J]. 石油勘探与开发,2023,50(4):669-682.  
XU Fengyin, HOU Wei, XIONG Xianyue, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 669-682.
- [5] 申建,秦勇. 我国主要盆地深部煤层气资源量预测[R]. 徐州:中国矿业大学,2021.  
SHEN Jian, QIN Yong. Prediction of deep coalbed methane resources in main basins in China[R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [6] 张抗,张立勤,刘冬梅. 近年中国油气勘探开发形势及发展建议[J]. 石油学报,2022,43(1):15-28.  
ZHANG Kang, ZHANG Liqin, LIU Dongmei. Situation of China's oil and gas exploration and development in recent years and relevant suggestions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 15-28.
- [7] 自然资源部. 全国石油天然气资源勘查开采通报(2020年度)[EB/OL]. [2021-09-17]. [http://gi.mnr.gov.cn/202109/t20210918\\_2681270.html](http://gi.mnr.gov.cn/202109/t20210918_2681270.html).  
Ministry of Natural Resources. National petroleum and natural gas resource exploration and production report (2020)[EB/OL]. [2021-09-17]. [http://gi.mnr.gov.cn/202109/t20210918\\_2681270.html](http://gi.mnr.gov.cn/202109/t20210918_2681270.html).
- [8] 刘成林,朱杰,车长波,等. 新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J]. 天然气工业,2009,29(11):130-132.  
LIU Chenglin, ZHU Jie, CHE Changbo, et al. Methodologies and



- results of the latest assessment of coalbed methane resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(11): 130-132.
- [9] EIA. Coalbed methane production[EB/OL]. [2021-09-08]. [https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngr52nus\\_1a.htm](https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngr52nus_1a.htm).
- [10] Queensland Government. Production and reserve statistics[EB/OL]. [2021-09-10]. <https://www.business.qld.gov.au/industries/mining-energy-water/resources/petroleum-energy/outlook-statistics>.
- [11] 王凤林. 加快我国煤层气产业突破发展的关键问题研究[C]//我国煤层气有效开发发展战略研究研讨会. 成都: 西南石油大学, 2021.
- WANG Fenglin. Research on key issues to accelerate the breakthrough development of China's coalbed gas industry[C]// Proceedings of the China's Coalbed Gas Effective Development Strategy Research Seminar. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2021.
- [12] 秦勇, 申建. 持续推进煤系气科技攻关, 满足天然气增储上产国家需求[C]//第六届非常规油气地质评价暨新能源学术研讨会. 武汉: 中国石油学会石油地质专业委员会, 2021.
- QIN Yong, SHEN Jian. Continuously advancing technological breakthroughs of coal measure gas and meet the national demand of increasing natural gas storage and production[C]// 6th Unconventional Oil and Gas Geological Evaluation and New Energy Academic Symposium. Wuhan: Petroleum Geology Committee of the Chinese Petroleum Society, 2021.
- [13] 张遂安, 刘欣佳, 温庆志, 等. 煤层气增产改造技术发展现状与趋势[J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 105-118.
- ZHANG Sui'an, LIU Xinjia, WEN Qingzhi, et al. Development situation and trend of stimulation and reforming technology of coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 105-118.
- [14] 袁亮. 煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十三五”规划中期评估报告[R]. 北京: 中国工程院能源与矿业工程学部, 2018.
- YUAN Liang. Mid-term evaluation report of the 13th Five Year Plan for the development and utilization of coalbed methane (coal mine gas)[R]. Beijing: Department of Energy and Mining Engineering, Chinese Academy of Engineering, 2018.
- [15] 罗平亚. 关于大幅度提高我国煤层气井单井产量的探讨[J]. *天然气工业*, 2013, 33(6): 1-6.
- LUO Pingya. A discussion on how to significantly improve the single-well productivity of CBM gas wells in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(6): 1-6.
- [16] 朱苏阳. 煤层气的吸附—解吸机理及应用研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- ZHU Suyang. The mechanism and application studies on coalbed methane adsorption and desorption[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [17] 秦勇, 申建, 史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 371-387.
- QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 371-387.
- [18] 袁亮, 杨科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 16-24.
- YUAN Liang, YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 16-24.
- [19] 余浩杰, 王振嘉, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地长庆气区复杂致密砂岩气藏开发关键技术进展及攻关方向[J]. *石油学报*, 2023, 44(4): 698-712.
- YU Haojie, WANG Zhenjia, LI Jinbu, et al. Key technological progress and breakthrough direction for the development of complex tight gas reservoirs in Changqing gas field, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(4): 698-712.
- [20] 牛小兵, 赵伟波, 史云鹤, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(8): 1240-1257.
- NIU Xiaobing, ZHAO Weibo, SHI Yunhe, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration potential of Benxi Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(8): 1240-1257.

(收稿日期 2023-08-07 改回日期 2023-09-29 编辑 王培玺)