



zhongguo meicengqi kantan yu kaifa

中国煤层气勘探与开发

李文阳 王慎言 赵庆波 主编

.8

中国矿业大学出版社

中国煤层气勘探与开发

李文阳 王慎言 赵庆波 主 编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是一部关于我国煤层气资源分布、目标区选择、试验区评价、开发工艺、下游利用等方面的综合性专著。书中介绍的煤层气目标区、试验区是我国煤层气勘探开发的热点地区,介绍的开发工艺是当今最先进的技术。书中资料丰富,内容新颖、系统、翔实,可供煤层气现场工作者、煤层气、石油天然气勘探开发研究者、大专院校相关专业的研究生、本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国煤层气勘探与开发/李文阳,王慎言,赵庆波主编.
—徐州:中国矿业大学出版社,2003.8
ISBN 7-81070-752-3

I. 中… II. ①李…②王…③赵… III. ①煤层—地
下气化煤气—地质勘探—文集②煤层—地下气化煤气—
资源开发—文集 IV. P618.110.8—53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 065791 号

书 名 中国煤层气勘探与开发
主 编 李文阳 王慎言 赵庆波
责任编辑 宋党育
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumptvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学印刷厂排版中心
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 21.5 字数 513 千字
版次印次 2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷
印 数 1~1000 册
定 价 60.00 元
(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

《中国煤层气勘探与开发》编委会

主 编	李文阳	王慎言	赵庆波
副主编	崔思华	王红岩	鲜保安
	胡爱梅	刘洪林	
编 委	李安启	李五忠	张建博
	孙 斌		

序

煤层气是一种非常规天然气,以吸附的形式自生自储在煤层中。我国煤炭资源非常丰富,孕育着多种类型的煤炭。这其中吸附着大量从煤岩转化的天然气,因此煤层气在中国分布广泛,煤层伴生的煤层气资源也极其丰富,储量位居世界前列。世界一些国家都在研究和开发利用此能源,尤以美国最显著,自1983年开发利用以来,目前已具相当规模,2002年煤层气产量已达450亿立方米,比我国去年天然气产量还高。目前我国煤层气理论有突破性认识,也初步具备了煤层气勘探开发的配套工艺技术,同时也在几个点上进行了开发试验,并初见成效。在当前我国经济高速发展之时,石油、天然气能源供需矛盾日益加大,因此,加快开发利用我国煤层气资源,将煤层气作为天然气的补充能源是非常必要的,同时也可使煤矿开发中减少事故。

中国石油学会石油地质专业委员会,专门成立煤层气学组,促进煤层气产业化发展,用学会的组织来团结我国从事煤层气开发与研究的单位、专家、有志之士,来交流、讨论煤层气勘探开发理论、技术、发展管理等方面问题;分析研究我国煤层气发展的难点和制约因素;提出发展措施和建议等,提供一个有利的论坛。它是跨部门、跨产业的,为此要发挥各路专家、学者,通力协调,发挥大家的积极性,打破地域封锁、行业封锁、专业封锁,互相学习、互相促进、互相提高,把中国煤层气产业尽快发展起来。

石油地质专业委员会煤层气学组,确定在2003年9月,召开煤层气学术研讨会,届时将有各方面代表参加。会议将对煤层气地质理论新认识、煤层气的选区评价和经济评价、煤层气勘探开发工艺技术、煤层气综合利用以及国外煤层气发展和我国煤层气开发前景展望等方面进行研讨,以此推动我国煤层气开发进展。为了使与会代表及广大读者能及时了解本次会议内容,特将收到的各位专家论文稿件编辑出版,以满足关心者之急需,限于时间和条件等原因,文集中有不妥之处,望广大读者谅解。

王黎明
二〇〇四年六月

目 录

序	翟光明
第一章 中国煤层气勘探开发前景展望及国内外煤层气发展	1
一、中国煤层气地质认识及未来勘探新领域	3
二、中国煤层气勘探开发所面临的若干科学问题	14
三、中国煤层气资源潜力分析	21
四、国外煤层气勘探、开发新进展	27
五、美国煤层气勘探开发现状	34
第二章 煤层气地质理论及选区评价	39
一、中国煤层气高产富集规律及煤层气成藏条件	41
二、沁水盆地煤层气成藏条件分析	49
三、大宁、韩城地区煤层气资源潜力评价	57
四、鄂尔多斯盆地大宁—吉县地区煤层气分布特征	65
五、滇东黔西地区煤层气勘探目标评价概论	74
六、沁水盆地南部地区含煤层系古应力场研究	81
七、鄂尔多斯盆地南部煤层气勘探选区评价	88
八、吐哈盆地煤层气有利勘探目标评价	94
九、鄂尔多斯盆地河东地区煤层气勘探	102
十、层序地层学在煤层气勘探中的应用	109
十一、煤层气勘探开发中的煤储层评价	116
十二、鄂尔多斯盆地煤岩储集性能研究	125
十三、淮北地区构造煤及其储层物性特征	133
十四、淮南煤田煤层气成藏动力学特征研究	139
十五、煤储层的气体解吸特性研究	144
十六、沁水盆地煤层气富集成藏规律探讨	150
第三章 煤层气数值模拟及经济评价	161
一、煤层气数值模拟技术在柳林煤层气试验区的应用	163
二、煤层气田储层数值模拟技术及应用	172
三、煤层气数值模拟软件应用	179
四、煤层气项目经济评价指标体系及系统模型研究	187

五、沁水煤层气田樊庄区块煤层气开发经济评价	194
第四章 煤层气勘探开发工艺技术及煤层气综合利用	201
一、煤层气定向羽状水平井钻井工艺技术研究	203
二、定向羽状水平井开采煤层气的数学模型	209
三、煤层气钻井工程技术研究	220
四、我国煤层气井水力压裂的实践及煤层裂缝模型选择分析	229
五、煤层压裂井裂缝动态法监测技术研究与应用	236
六、CO ₂ 增产技术改造煤层的可行性探讨	246
七、煤层气井用压裂液对煤储层伤害的研究	253
八、煤层气井产能预测研究	257
九、煤层气储层异常压力的理论计算方法	264
十、大宁—吉县地区煤层气测井综合研究	268
十一、煤层气三维地震勘探 AVO 技术及相关理论研究	277
十二、煤层高渗区综合预测技术	283
十三、煤层气井水力压裂机理研究现状及发展趋势	292
十四、煤层气藏非烃驱替置换增产措施技术探讨	302
十五、影响煤层气井产量的因素分析	308
十六、铁法煤田大兴井田煤层气可采性有利因素的分析	314
十七、煤层气井注入/压降试井技术研究	318
十八、注 CO ₂ 提高煤层气采收率工艺技术研究	326
十九、中国煤层气开发综合利用技术	331

第一章

中国煤层气勘探开发前景展望

及国内外煤层气发展



一、中国煤层气地质认识及未来勘探新领域

赵庆波

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院煤层气勘探项目经理部 065007)

摘要 根据中国石油天然气股份有限公司煤层气 10 年勘探经验教训,借鉴国外成功实例,总结了我国煤层气生气、成因、成藏模式,进行了煤层气勘探目标评价参数分类;提出了不同煤阶区的煤层气勘探新认识;梗概阐述了利用以上理论认识发现沁水煤层气田和大宁含气区的基本地质条件;最后分析了煤层气未来勘探新领域。

关键词 中国煤层气,地质理论,新发现,新领域

1 引言

中国石油天然气股份有限公司煤层气勘探已 10 年,煤层气勘探项目经理部有机地把有关油田研究院所、大专院校组织在一起,实施科研、生产、现场试验一体化,形成多学科联合攻关体。历年投资达几亿元,钻井几十口,完成各类研究课题 130 余个,参加攻关人数约 250 人,初步形成了配套的勘探技术,提出了中国煤层气成藏条件、勘探方法和选区评价参数的理论认识。用以上勘探技术和理论方法,探明了中国第一个煤层气大气田—沁水煤层气田,控制了一个大型含气区——大宁含气区,发现了一批有利勘探目标。

在配套的 42 项工艺技术上,有 6 项已达到国际领先,并获国家专利,包括煤层气井绳索取心技术、煤层气测井技术、注入/压降法试井技术、大地电位法对煤层气井压裂裂缝监测技术、井间地震波层析成像技术、煤层气藏开发数值模拟技术。

2 中国煤层气地质理论新认识

中国是世界第二大煤炭、煤层气资源大国,煤层气远景资源量达 27 万亿 m^3 。但是,由于煤层气勘探起步较晚,早期勘探专用技术不配套,勘探思路也不准确,致使 20 多年没有取得大的突破,即没有达到一定规模的产业化。

分析 20 世纪 70 年代至 90 年代初期已钻 100 余口煤层气井,失败原因如下:

沿用煤炭勘探方法,在矿区内打井,井浅,大部分井打在甲烷氧化散失带(动力洗刷带)、生物降解带,含气量很低,开采中有的井气产量极少,产水量较大;

沿用常规油气勘探理论方法,打构造点,大部分井钻遇煤层较深,煤层物性差,处于低解吸带,可解吸气量很低,或钻遇构造高部位,开采中煤层含水量极微,压力降不下来,气产量很低。

2.1 煤层气生气模式

区域热变质: 由于后期火山岩活动, 形成较高古热力场, 在加速煤层热演化中产生大量次生割理, 使煤层物性好、含气量高、含气饱和度高, 如沁水盆地围绕火山岩侵入体煤层 R_o 为高值区(见图 1)。

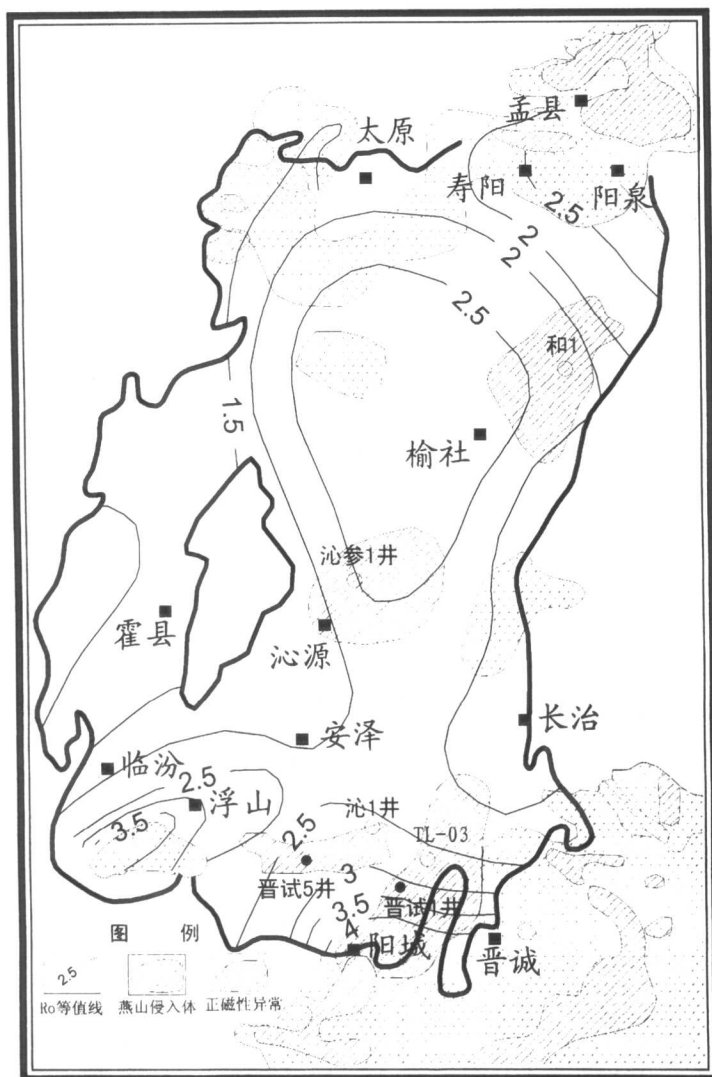


图 1 沁水盆地煤层气演化与煤层气分布关系图

局部热动力变质: 高含有机质煤层在热演化生气阶段, 和围岩产生相对高热异常值层, 遇到围岩封盖条件好, 热动力作用难以使大量气体扩散, 可吸附煤层颗粒基质表面, 而封盖条件差的部位, 可使热动力作用把大量气体从煤层中扩散运移到砂岩储层中或散失, 如彬县、长武地区。

水动力洗刷变质: 深部地层水沿断裂带或剥蚀面上移, 和地表水交替形成相对高地温

区,把周围煤层中的吸附气洗刷带走,如河北大城地区。

煤层矿化变质:形成的煤层气藏后期被水打开,使煤层割理、裂隙被方解石脉或石英充填,煤层物性变差,含气饱和度低、可解吸气量降低。

区域压实变质:煤层受构造沉积作用埋藏加深(超过 1 500 m),由于压实作用物性变差,可解吸气量降低、含气饱和度低,多处于斜坡下台阶或生气向斜部位。

构造应力变质:后期构造断裂活动使可塑性煤层受到不同程度地破坏而成糜棱煤、碎粒煤及破裂煤。其中糜棱煤根本见不到割理,碎粒煤割理分布也极少,破裂煤割理狭窄,分布不连续,起不到煤层气解吸的疏通作用。

以上区域热变质区煤层割理发育、物性好,是煤层气高产富集区。

2.2 煤层气成因模式

煤层气分布分带性明显,在中、高煤阶区,往往从盆地边缘到腹部可划分四个带,如鄂尔多斯盆地东部地区(见图 2)。

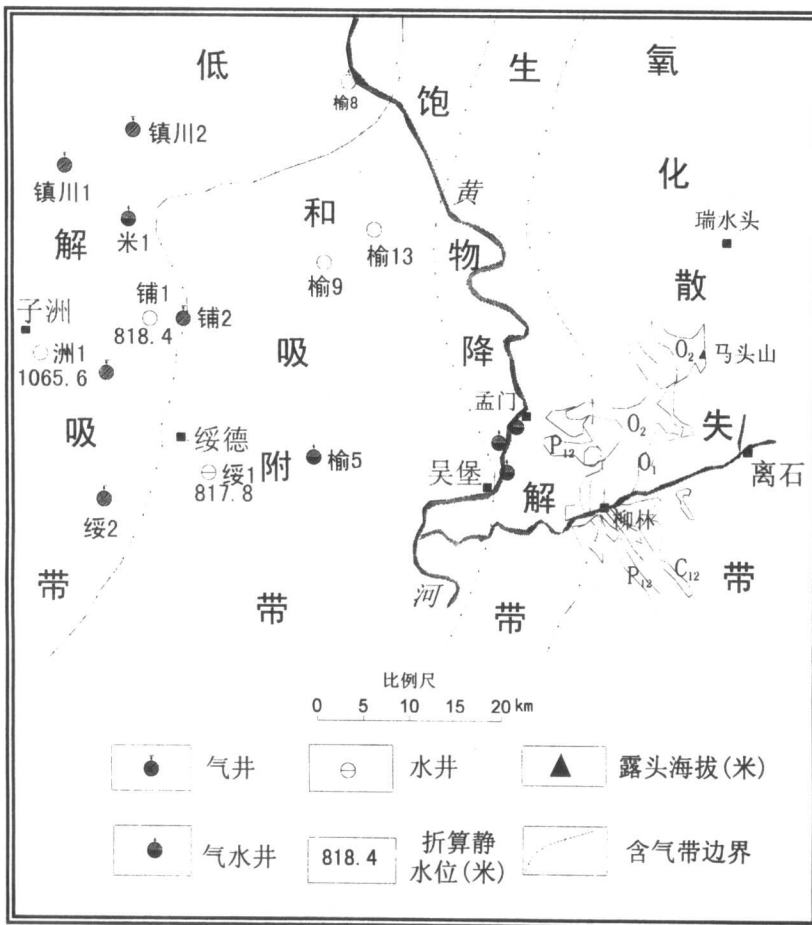


图 2 鄂尔多斯盆地东部斜坡带 C—P 煤层气成因图

氧化散失带(动力洗刷带):从盆地边缘到煤层埋深小于 300 m 左右,处于地层水和大

气淡水大面积交替地带,煤层气封盖条件不利,大量甲烷气散失,惰性气体 N_2 、 CO_2 含量较高,可达到 20% 以上,不利于煤层气勘探。

生物降解带: 甲烷含量一般 75%~98%, $\delta^{13}C_1$ 轻,为 -65‰ ~ -50‰ , 尽管地层水仅仅和上部水层局部出现交替,但不是勘探最有利部位。盆地凹陷上斜坡分布较多,煤层埋深一般为 300~600 m。

饱和吸附带: 在盆地凹陷斜坡中段,煤层埋深一般为 400~1200 m,下倾部位有充足气源供给,上倾部位有承压水封堵,煤层封盖条件好,含气量高、含气饱和度高,是高产富集的有利部位,保存了原始气藏特征, CH_4 含量一般大于 96%, $\delta^{13}C_1$ 为 -50‰ ~ -30‰ 。

低解吸带: 一般处于盆地腹部,凹陷下斜坡和向斜中,煤层埋藏深大于 1500 m,煤储层物性差,含气饱和低,煤层气单井产量低,不利于煤层气勘探。

从以上各类中可见,重点寻找饱和和吸附带区,其分布大小与地质因素有关。

2.3 煤层气成藏模式

压力封闭型: 受沉积的差异压实和后期构造抬升作用,形成超压煤层气藏。但往往煤储层割理不发育,割理横向连通性差,物性差,含水微量,开采中煤层水产量低,解吸半径小,致使气产量低(见图 3)。

顶板水网络状微渗滤封闭型: 煤层顶、底板较薄,岩性封闭条件较差,局部已和上部水层连通,围岩水在渗入煤层过程中,有时有一定动力作用,把部分甲烷气带走,有的局部处于滞流状态,起到一定封闭作用。但往往含气饱和度较低,单井产气量有的较低,也有的具有一定工业开采价值。

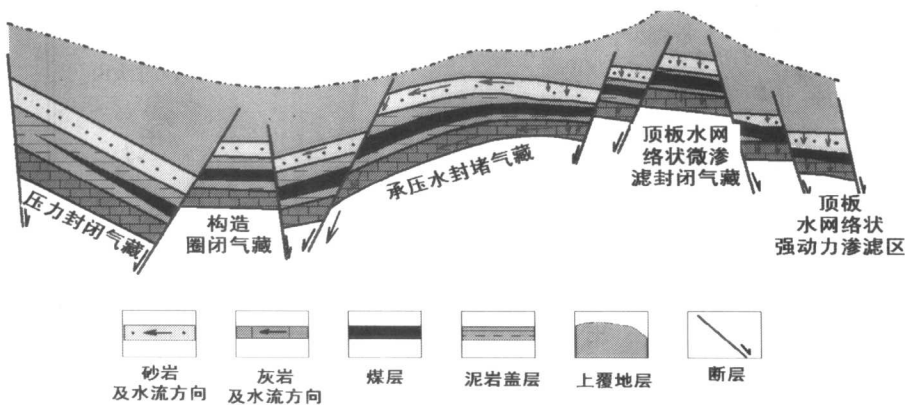


图 3 煤层气成因模式图

构造封闭型: 构造轴部煤层含水极微,开采中解吸半径小,气产量低。

构造变形差异聚集承压水封堵型: 高煤阶区一般煤储层物性差。但对于一些构造抬升盆地早期煤层埋藏深,热演化程度高,生气量大,后期盆地抬升受剥蚀,煤层变浅的地区,在盆地抬升中煤层被松动,产生密集割理,改善储层物性条件,下倾部位有充足气源供给,上倾部位靠承压水封堵,进而可形成高产富集区。沁水煤层气田就处于晋城斜坡带。

从以上可见,中国煤层气有多种类型气藏,构造变形差异聚集承压水封堵区是主要勘探目标。

2.4 煤层气勘探参数评价的新认识

借鉴国外煤层气勘探实际资料,根据国内煤层气勘探经验教训,针对煤层气勘探目标评价标准,划分为含气丰度指标、开采价值评价指标、产气性能评价指标和煤热演化程度分类指标四大类,共14项关键参数,并充分考虑煤层有一定的稳定分布面积和单井产能。具体分类标准如下(见表1)。

2.5 煤层气勘探的新认识

在目前现有技术条件下,同一个盆地煤层埋深300~1500m勘探范围内,某一种煤阶占主要的地区称为这类煤阶区。不同煤阶区的煤层气勘探主攻方向是不同的,经10年勘探取得以下认识。

(1) 高煤阶区(贫一无烟煤Ⅲ牌号区)

由于这类煤阶在某一个时间煤层埋藏深,热演化程度高,但是在构造抬升型盆地的构造翼部煤层松动部位,寻找高古地应力场中而又相对稳定部位的高渗、高含气量煤层气田。这类地区往往煤层储层物性得到改善,易高产富集,因为断裂发育带往往是水动力洗刷带,煤层含气饱和度低,而应力场低值区则是煤层割理发育区。沁水煤层气田的发现,就是在高煤阶区构造抬升盆地,利用煤层松动理论找到的高饱和富集区。

(2) 中煤阶区(瘦一气煤区)

在高古热力场型盆地而又相对低值部位的封盖条件有利区,寻找次生割理发育的原生型煤层气田。这类地区往往处于热盆冷缘,封盖条件好,保存条件有利,是烃类运移指向区,煤层含气饱和度高,高产条件优越。

(3) 低煤阶区(褐煤—长焰煤区)

在连续沉积较大型盆地的斜坡带,寻找古水动力场相对稳定、原生割理发育、优质巨厚煤层分布区,即寻找高饱和生物降解型煤层气田。这类地区尽管含气量低,但是煤层巨厚,物性好,高饱和,高丰度,亦可形成高产区。

3 中国石油煤层气勘探的新发现

3.1 发现中国第一个大型煤层气田——沁水煤层气田

沁水煤层气田于1994年开始进行目标优选,1996年7月20日晋试1井开始钻探,1997年8月5日获工业性气流。

沁水煤层气田位于山西省沁水盆地南部晋城马蹄形斜坡带。业已述及,该气田是在总结中国煤层气地质理论进行层层目标优选确定钻探井位的。

沁水盆地含煤系地层为石炭—二叠系,是燕山运动以来发育而成构造盆地。盆地面积2.4万km²,初步预测煤层气远景资源量6.23万亿m³。其中南部晋城地区有利勘探面积2350km²,煤层气远景资源量4500亿m³。在中国石油登记区,已探明含气面积182km²,煤层气探明地质储量352亿m³,含控制、预测储量约2200亿m³,单井初期日产气最高9780m³。煤层气分布主要有以下特点(见图4):

1. 煤层埋深适中,煤层厚,分布稳定

一般埋深300~850m,主要发育两套主力煤层,上部为山西组3[#]煤,厚4.1~6.5m,下部太原组15[#]煤,厚2~5m,两套煤层横向分布稳定,间隔8~100m。

2. 煤质好,热演化程度高

煤层气勘探目标评价重要参数分类表

表 1

储量 /亿 m ³	含气丰度评价参数			开采价值评价参数						产气性能评价参数				演化程度	
	煤层厚度 /亿 m ³ ·km ⁻²	资源丰度 /亿 m ³ ·km ⁻²	泥页岩 盖层 m	含气量 /m ³ ·t ⁻¹	含气饱 和度/%	地解比	灰分含 量/%	镜质组	煤层孔 隙半径 μm	原始渗透率 /10 ⁻³ μm ²	割理 /条·m ⁻¹	有效地 应力/MPa	煤阶	R _o /%	
特大气田 >3 000	巨厚煤层 >50	高丰度 >2	最有利 >50	高 >20	高 >80	高 >0.6	高 >40	高 >80	大孔 >1	高 >5	极发育 >500	有利 <10	褐煤 长焰煤	<0.5 0.5~0.7	
大气田 3 000~ 300	厚煤层 50~10	中丰度 2~0.5	有利 50~10	中高 20~15	中 80~60	中 0.6~0.2	富 40~25	中 60~80	中孔 1~0.1	较高 5~0.5	发育 500~100	较有利 10~20	气煤 肥煤	0.7~0.9 0.9~1.2	
中气田 300~ 30	中厚煤层 10~5	低丰度 <0.5	较有利 10~5	中低 15~8	低 <60	低 <0.2	中 25~15	低 <60	小孔 0.1~0.01	中等 0.5~0.1	较发育 100~50	不利 >20	焦煤 瘦煤	1.2~1.7 1.7~1.9	
小气田 30~3	薄煤层 <5		不利 <5	低 <8			低 <15		微孔 <0.01	低 <0.1	不发育 <50		贫煤 无烟煤	1.9~2.4 >2.4	

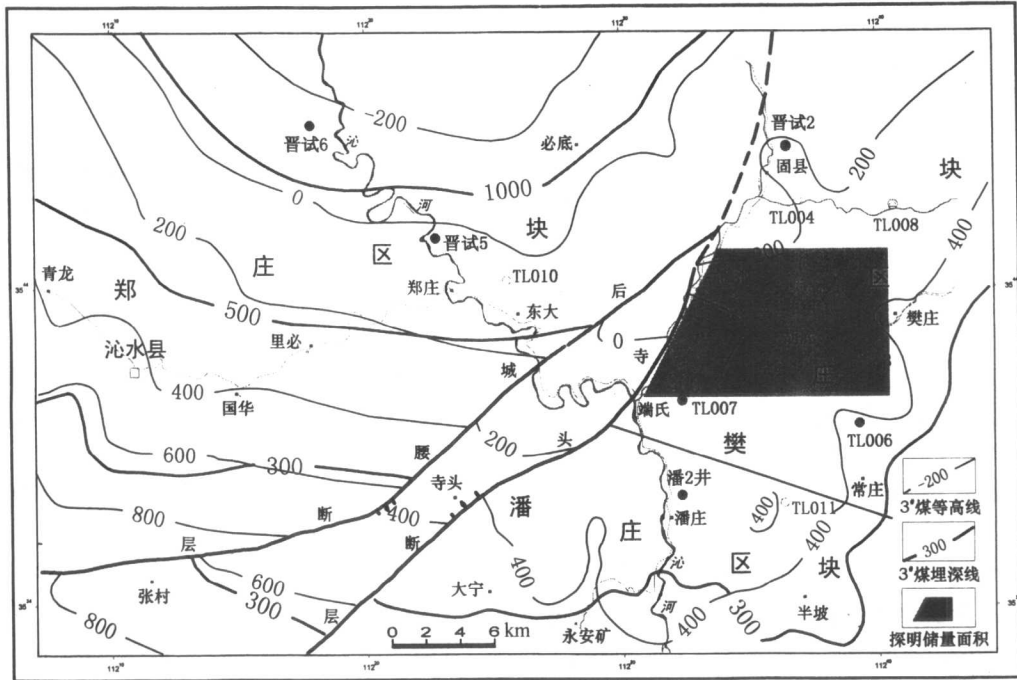


图4 沁水盆地煤层气田勘探成果图

镜质组含量为66%~97%，灰分含量8%~25%，3#煤为低灰分，15#煤为中灰分，这类优质煤层有利于割理发育和甲烷的吸附。 R_o 为1.9%~3.6%，为Ⅲ号无烟煤，属高煤阶，也是世界第一个高煤阶煤层气田。

3. 煤割理发育、储层物性好

煤基质孔隙度为2.9%~10.5%，连通孔隙中值半径53~94 μm ，以微孔为主，这类煤孔隙特征可使比表面增大、吸附能力增强，更重要的是次生割理发育，密度达530~580条/m，宽约1 μm ，割理无明显充填。

煤层储层物性较好，渗透率为 $(0.2\sim2)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，有利于解吸。

4. 封盖条件有利，为原始气藏

3#煤直接盖层为厚达16~55 m的纯泥岩，并且有泥岩盖层愈厚，含气量愈高的特点。泥岩封盖条件十分有利，突破压力2 MPa。含煤层系水总矿化度均高于上部石盒子组总矿化度，为1815~2975 mg/L，而上部地层水仅为300~700 mg/L。煤层气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 较重，为20.8%~38%， CH_4 含量94.5%~99.2%，为原始气藏特点，分析处于承压水封闭环境。

5. 为高含气量、高饱和气藏

煤层含气量一般为12~23 m^3/t ，最高37.34 m^3/t ，居世界之首。含气饱和度3#煤为90%~98%，15#煤为73%~93%，属高饱和吸附型。

前已述及，该区煤层气之所以富集，分析主要有利条件是盆地早期埋藏很深，在高温演化条件下生气量很大，后期盆地抬升，使高煤阶在抬升中被松动，产生大量次生割理，改变储层物性条件，上部有良好的直接盖层，下倾有充足气源供给，上倾靠承压水封堵，进而形成原

生的构造变形差异聚集型煤层气田。

3.2 发现一个中煤阶含气区——大宁含气区

大宁含气区位于鄂尔多斯盆地东部晋西挠褶带,煤层气最富集区处于局部西倾的断裂鼻状构造倾末端。

初步预测,鄂尔多斯盆地煤层气有利勘探面积约5万 km^2 ,煤层气远景资源量约7万亿 m^3 ,分布于中生界。石炭—二叠系两套含煤系地层中。大宁地区主要分布石炭—二叠系煤层,近几年钻探,单井初期产量较高,最高6700 m^3/d ,各项参数类似于美国黑勇士盆地,这里故不赘述。煤层气分布主要有以下特点:

1. 主力煤层厚、分布稳定

主要勘探目的层山西组5[#]煤和太原组8[#]煤,一般厚14~21.4m,中部最厚,5[#]煤厚6.8~8.1m,8[#]煤厚3.4~9.3m,全区稳定分布,目前已钻10多口井并没有发现缺失现象。

2. 含气量高,含气饱和度较大

钻井气测全烃含量高达37%~58%,平均含气量11.76~20.87 m^3/t ,含气饱和度70.7%~92.4%。

3. 煤质好,煤阶适中,割理发育

镜质组含量愈高,原生割理愈发育,该区单井平均5[#]煤71%~85%,8[#]煤73%~83%,为高镜质组含量区。镜质组含量高的煤层,一般灰分含量低,该区属低灰分含量区;单井平均5[#]煤为5%~11%,8[#]煤为10.8%~14.9%。

中煤阶: R_o 为1.3%~2.1%,为肥煤—贫煤。

根据国外认识,这类煤阶割理发育,应是煤层气勘探最有利煤阶。该区煤层割理密度为240~530条/m,可见极为发育。

4. 具有原始气藏特征

煤层解吸气 CH_4 含量高,一般为94%~98.9%; $\delta^{13}\text{C}_1$ 偏重,5[#]煤一般为31.7‰~42.6‰,8[#]煤一般为32.4‰~39.2‰。局部底板封盖条件较差、靠近断层、地层水对煤层气曾洗刷过地区,其值偏轻,如吉试4井5[#]煤,抽排中日产水80 m^3 以上,分析煤层附近有断层,而煤层解吸气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 较轻,为48.5‰。但总体上,该区上倾靠承压水封堵,顶板直接盖层以泥岩为主,封盖条件较好,煤层气藏保存原始吸附特征。直接盖层突破压力为6~11MPa。

5. 远景资源量可观

初步预测该区煤层埋深800~1200m,含气量大于10 m^3/t ,煤层气远景资源量达5000亿 m^3 。其中已初步控制含气面积717 km^2 ,煤层气地质储量1500亿 m^3 (见图5)。

3.3 发现一批低煤阶有利勘探目标

低煤阶的煤层气勘探首先要瞄准煤层厚、盖层好、含气饱和度高的地区。用煤层厚度来弥补含气量低的缺陷。经几年勘探,发现一批这类有利勘探目标。

东北抚顺煤田处于喜马拉雅运动发育起来的一个新生界断陷小盆地,煤层分布于向斜中,东西长18km,南北宽2km,面积36 km^2 ,主要含煤层系下第三系古城子组,煤层埋藏较浅,一般埋深小于450m,主力煤层厚,煤层最厚为130m,一般为30~75m。为低煤阶长焰煤和气煤,煤质好,低灰分,为3.9%~10.8%,煤储层物性好,渗透率 $(0.54\sim3.8)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,煤矿瓦斯含量高,采煤换算为27 m^3/t 左右,封盖条件最有利,煤层直接盖层为厚达77m的厚层状油页岩,底板为泥岩,致使煤层气保存条件好。