

国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发

“煤层气地球物理勘探关键技术”（编号：2011ZX05035）项目资助

延川南煤层气田 勘探开发关键技术及应用

方志雄 著



地质出版社

型油气田及煤层气开发
关键技术”(编号:2011ZX05035)项目资助

延川南煤层气田 勘探开发关键技术及应用

方志雄 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

《延川南煤层气田勘探开发关键技术及应用》一书凝聚了具有中石化特色的煤层气勘探开发技术以及配套工艺的主要成果。全书共分9章,涵括了地质评价、地震勘探、测井评价、开发部署、钻完井工程、压裂改造、排采方案、产能评价以及地面集输工艺等技术系列成果,有利于促进我国深部煤层气地质理论的发展和完善,并为其他地区煤层气的勘探开发提供地质依据和可借鉴的勘探开发技术。

本书可供从事煤层气地质及勘探开发领域的科技人员、工程技术人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

延川南煤层气田勘探开发关键技术及应用 / 方志雄
著. —北京:地质出版社, 2017. 6
ISBN 978 - 7 - 116 - 10293 - 4

I. ①延… II. ①方… III. ①煤层-油气田-油气勘
探-研究-延川县 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第039227号

责任编辑:田野 房媛

责任校对:李玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010) 66554528(邮购部);(010) 66554631(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm 1/16

印 张:17.5

字 数:430千字

版 次:2017年6月北京第1版

印 次:2017年6月北京第1次印刷

定 价:118.00元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 10293 - 4

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

随着国民经济的快速增长，对能源的需求量日益增大，国内能源短缺的形势也越来越紧迫。煤层气是一种洁净的非常规天然气资源，它不仅对我国能源保障具有重要意义，而且对改善能源结构，促进清洁能源发展也具有重大意义。因此，加快煤层气有效开发是我国能源战略的重要选择。我国煤层气资源丰富，据国土资源部新一轮全国油气资源评价成果，我国 2000 米以浅煤层气资源量为 36.81 万亿立方米，位列世界第三。“十一五”以来，国家启动了沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘两个产业化基地建设，形成了煤层气勘探、开发、生产、输送、销售、利用等一体化产业格局，发展速度明显加快，煤层气产业发展已初具规模。

为加快鄂尔多斯盆地东缘煤层气产业化基地建设，促进煤层气产业发展，增加清洁能源供应，华东油气分公司从 2008 年起通过前期研究、建立了煤层气勘探开发评价体系并开展资源评价，按照“选区评价—单井突破—小井组先导—大井组试验—整体开发”的思路，通过 5 年的规律探索，落实了开发井网、井型及配套的工程工艺技术，稳步推进了延川南煤层气田 5 亿方产能建设。

延川南煤层气田作为目前世界上投入规模开发的最深的煤层气田，在产建实施过程中面临着低孔、低渗、低产的气藏现状及生态脆弱的黄土塬地表条件等开发难点。华东油气分公司自主创新、集成了一批核心技术，应用于延川南产建过程中，创造了多项深煤层开发领域的新纪录，填补了一大片技术空白，为中国煤层气行业的发展作出了突出贡献。

鉴于国内还没有一本系统介绍深层煤层气勘探开发的书籍，为进一步巩固中石化煤层气的勘探开发成果，我们觉得有必要对延川南煤层气田勘探开发的技术和实践经验进行总结，把科研人员和产能建设者的智慧成果经验集成起来，形成“延川南模式”的煤层气勘探开发技术体系。供从事煤层气开发的科研和技术人员参考。

本书系统总结了延川南煤层气田成藏特征、地震勘探、测井评价、开发部署、钻完井工艺、增产措施、排采技术及地面工程等方面的成功经验，

剖析了关键的问题，有利于促进我国深部煤层气地质理论的发展和完善，并为其他地区煤层气的勘探开发提供了地质依据和可借鉴的勘探开发技术。

本书共分九章，由方志雄进行整体结构设计、大纲编写及全部书稿的修改、统编、审定。参与初稿执笔的人员有：陈贞龙、吴英、许祖伟编写第一章，方志雄、何希鹏编写第二章，邓玉胜、刘明编写第三章，梅俊伟、陈贞龙、房大志编写第四章，方志雄、王运海、王晓蕾编写第五章，沈建中、龙志平编写第六章，张龙胜、熊炜、蒋晨编写第七章，朱玉洁、刘长利、陈贞龙、郭涛编写第八章，李清、李志刚、孟良编写第九章。在本书的修编工作中，华东油气分公司勘探开发研究院、石油工程技术研究院、非常规资源勘探开发指挥部及非常规资源管理部的专家和科研技术人员对书稿的修订工作提出了建议、指导和帮助，在此一并感谢！

由于深层煤层气的勘探开发理论与实践还处于积极探索和不断完善之中，本书难免存在一些不足和有待探讨的问题，恳请读者在参阅本书时提出宝贵意见。我们将在今后的科研和生产实践中，不断完善理论和总结经验，为加快中国煤层气的开发进程尽绵薄之力。

目 录

前 言

第一章 延川南煤层气田概述	1
第一节 区域地质概况	2
第二节 煤层气勘探开发简况	9
第二章 煤层气富集区优选与评价技术	11
第一节 煤层气藏基本特征	11
第二节 煤层气富集成藏控制因素	27
第三节 煤层气富集区评价技术	42
第三章 煤层气藏地震勘探技术	52
第一节 煤层气地震资料采集处理技术	52
第二节 煤层气地震资料构造解释技术	60
第三节 煤层气储层预测技术	68
第四章 煤层气测井评价技术	82
第一节 煤层气储层测井响应特征	82
第二节 煤层气储层测井定量评价	99
第五章 煤层气开发方案优化技术	110
第一节 煤层气井网部署设计	110
第二节 开发方案指标优化及经济评价	120
第六章 煤层气钻完井技术	137
第一节 煤层气钻完井工艺技术	137
第二节 煤层气钻完井配套工艺技术	153
第七章 煤层气压裂增产改造工艺技术	166
第一节 煤层气压裂工艺技术	166
第二节 测试技术	174
第三节 煤层气低效井增产改造技术	184

第八章 煤层气排采技术..... 193

第一节 煤层气井排采原理..... 193

第二节 煤层气井排采特征..... 198

第三节 煤层气井排采制度优化及应用..... 211

第四节 煤层气井排采配套工艺与设备优选..... 222

第九章 煤层气地面工程系列工艺技术..... 235

第一节 地面工程总体布局及工艺流程优选..... 235

第二节 采出气处理技术..... 243

第三节 排采水处理技术..... 256

第四节 节能减排与污染防治..... 263

参考文献..... 265

第一章 延川南煤层气田概述

延川南煤层气田位于晋陕交界处，行政区划隶属于陕西省韩城市独泉乡，山西省临汾市枣岭乡，吉县柏山寺乡（图 1-1）。地理坐标：东经 $110^{\circ}25'00'' \sim 110^{\circ}34'14''$ ，北纬 $35^{\circ}48'00'' \sim 36^{\circ}00'00''$ ，气田总面积为 701.4km^2 。



图 1-1 延川南煤层气田交通位置图

延川南煤层气田位于晋西黄土高原的南端，黄河中游峡谷区的下游，为典型的黄土高原地貌，受构造运动的影响，地形切割强烈，为遭受强烈侵蚀-剥蚀的低-中山地貌。沟

壑纵横，多坡地，少平川，地形复杂，沟谷多呈“V”字形。基岩裸露，植被稀少。总体地形形态为东高西低，最大相对高差 882m。

气田内河流属黄河水系，河流的流向基本为由东流向西，最终注入黄河。水资源因地下断层渗漏，较为贫乏，主要河流为鄂河，地下水埋藏分布面积小，不易开采利用，人畜饮水主要靠小泉小水供给。

本区属暖温带大陆性季风半干旱气候区，年温差大，四季分明。春季多风干旱，风向多为西北向。雨水多集中于夏、秋两季，冬季寒冷少雪。由于气候干旱，夏秋两季雨量也较小，滑坡等地质灾害鲜有发生，且煤层气井选井多位于黄土塬上，对煤层气的开采影响较小。年平均气温 10℃，每年一月气温最低，平均为 -6℃，每年七月气温最高，平均为 29℃。年平均降水量 600mm，初霜期一般在每年的十月上旬，终霜期在次年的三月下旬，无霜期 180d 左右，最大冻土深度 1m。据《中国地震动参数区划图》（GB18306 - 2001），该气田的地震动峰值加速度为 0.10g，对应的地震基本烈度值为Ⅶ度。

煤层气田所处区县矿产资源得天独厚，工业以煤炭为主，年总产量达 $220 \times 10^4 \text{t}$ 。此外有化肥、机械制造、电力、水泥、制药、铁木业、紫陶业等生产。区内交通以公路为主，区域交通较便利。乡宁县距省会太原市约 320km，高速公路车程约 3 小时。与临吉高速距离约 40km，209 国道由吉县、乡宁县从北至南贯通区块东部，经西坡镇向南可至河津市，区内各乡镇由县级公路连通，交通较为便利。向东可连通山西省南北公路大动脉大（同）—运（城）高速公路；向西则经陕西省与西部各主要城市相连接，并可直达青银高速公路终点宁夏银川市。同时，区内有省级、县级公路连接各主要村镇，距离气田最近的天然气管线乡宁—保德管线直线距离 50km。

第一节 区域地质概况

一、区域构造背景

鄂尔多斯盆地构造上位于中朝地台的西部，面积 $37 \times 10^4 \text{km}^2$ ，发育于稳定中朝地台之上，是我国石炭系—二叠系、上三叠统和下侏罗统三套含煤岩系的特大型含煤盆地。鄂尔多斯盆地在经历了太古宙、元古宙构造形变以后形成了稳定的结晶基底，吕梁运动形成了稳定的中朝地台基底，沉积了巨厚的中元古代、新元古代、古生代地层；加里东运动末期，中朝地台整体抬升，早古生代地层遭受剥蚀，晚古生代地层缺失；海西运动，中朝地台整体沉降，沉积了石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系，形成了石炭系、二叠系、侏罗系三套含煤层系的特大型含煤盆地。印支、燕山、喜马拉雅运动在中朝地台演化过程中具有差异，燕山运动及喜马拉雅运动在延川南煤层气田主要表现特征以隆起抬升剥蚀为主，形成了现今的构造格局。按照现今构造形态，结合盆地的演化历史，可划分为伊盟隆起、晋西挠褶带、陕北斜坡、天环坳陷、渭北隆起、西缘褶皱冲断带 6 个构造单元（表 1-1）。延川南煤层气田位于鄂尔多斯盆地东缘南段，处于陕北斜坡、晋西挠褶带和渭北隆起交叉

带，表现为过渡性质的盆缘构造类型（邓军等，2005）（图 1-2）。

表 1-1 鄂尔多斯盆地构造单元划分表

一级单元	二级单元	三级单元	四级单元
中朝准地台	鄂尔多斯台坳	伊盟隆起	乌兰枯尔基岩凸起带；伊北挠褶带；伊南斜坡
		晋西挠褶带	保德-兴县背斜区；临县-柳林背斜区；永和-石楼背斜区；蒲县-吉县背斜区
		陕北斜坡	
		天环坳陷	
	渭河地堑	渭北隆起	
鄂尔多斯西缘坳陷带		西缘褶皱冲断带	西部冲断构造带；桌子山复合冲断带；横山堡阶状冲断带；马家滩叠瓦冲断带；石沟驿复合冲断带；沙井子片状冲断带

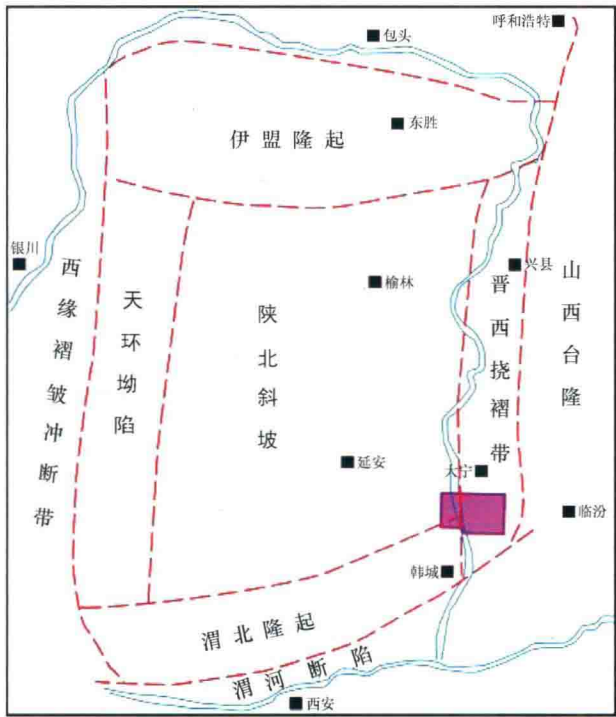


图 1-2 延川南煤层气田构造位置图

二、区域地层与沉积环境

(一) 区域地层特征

鄂尔多斯盆地是一个典型的继承性叠合沉积盆地，盆地内发育了多套生储盖组合（杨俊杰等，2002），蕴藏着丰富的油气资源。延川南煤层气田位于鄂尔多斯盆地东南缘，地层由老到新向西依次出露。

气田内钻井揭示的地层有中奥陶统上马家沟组 (O_2m)、峰峰组 (O_2f)，下石炭统本溪组 (C_1b)、上石炭统太原组 (C_2t)，下二叠统山西组 (P_1s)、下石盒子组 (P_1x)、上二叠统上石盒子组 (P_2s)、石千峰组 (P_2sh)，下三叠统刘家沟组 (T_1l)、和尚沟组 (T_1h)、中三叠统二马营组 (T_2er)，第四系 (Q) (表 1-2)。本区主要含煤地层为上石炭统太原组和下二叠统山西组。岩性主要特征由老至新简述如下：

表 1-2 区域地层简表

地层单位			厚度/m	岩性特性
系	统	组		
第四系	全新统		0 ~ 30	亚黏土及卵砾石
	上更新统	马兰组	10	黄土、亚砂土、亚黏土夹钙质结核层
	中更新统	离石组	0 ~ 50	黄土、亚黏土、亚砂土夹钙质结核层
	下更新统	午城组	10 ~ 20	亚黏土
三叠系	中三叠统	二马营组	412 ~ 573	厚层中粒长石石英砂岩夹暗紫色泥岩
	下三叠统	和尚沟组	160 ~ 210	紫红色砂岩与泥岩互层
		刘家沟组	338 ~ 442	紫红、棕红色细粒长石石英砂岩夹砾岩及砂质泥岩
二叠系	上二叠统	石千峰组	70 ~ 141	砂质泥岩、泥岩夹细砂岩
		上石盒子组	340 ~ 480	长石石英砂岩及砂质泥岩、泥岩
	下二叠统	下石盒子组	65 ~ 140	长石质砂岩、粉砂岩及紫红色泥岩、铝质泥岩
		山西组	30 ~ 75	细粒砂岩、粉砂岩、泥岩、煤层互层
石炭系	上石炭统	太原组	35 ~ 91	K_2 、 K_3 、 K_4 灰岩，中、粗粒砂岩、煤层、粉砂岩、泥岩
	下石炭统	本溪组	9 ~ 45	底部山西式铁矿，铝土岩；中部泥岩局部夹薄层灰岩；上部泥岩、石英砂岩夹煤线
奥陶系	中奥陶统	峰峰组	90 ~ 150	上部白云质泥灰岩、泥灰岩及泥质灰岩，泥灰岩中夹石膏；下部厚层状灰岩
		上马家沟组	180 ~ 225	下部泥灰岩、角砾状泥质灰岩、底部夹石膏；中部中厚层豹皮灰岩，白云质灰岩及泥质白云岩；上部中厚层状灰岩夹薄层泥灰岩、泥质灰岩、白云质灰岩
		下马家沟组	37 ~ 91	下部泥灰岩或白云质灰岩、白云质泥灰岩；上部中厚层状灰岩、白云质泥质灰岩
	下奥陶统	亮甲山组	17 ~ 54	中层—厚层夹薄层白云岩，岩性单一
		冶里组	44 ~ 90	中层—薄层结晶质白云岩，夹竹叶状石灰岩条带状白云岩

1. 奥陶系 (O)

(1) 中奥陶统上马家沟组 (O_2m)

下部主要为角砾状石灰岩夹石膏层, 厚 50 ~ 10m。上马家沟组厚 180 ~ 225m。中部以豹皮状石灰岩为主, 夹白云质灰岩, 厚 100m。上部为厚层状石灰岩夹泥质灰岩, 厚 30 ~ 50m。

(2) 中奥陶统峰峰组 (O_2f)

下部为灰—深灰色石灰岩, 白云质灰岩。上部为泥质灰岩, 夹石膏层, 厚约 100m。

2. 石炭系 (C)

(1) 下石炭统本溪组 (C_1b)

下部为灰、灰白色铝土质泥岩, 底部常夹鸡窝状褐铁矿、赤铁矿。上部为深灰色砂质泥岩, 夹铝土质泥岩及薄层细砂岩, 中上部夹不可采煤层 1 ~ 2 层, 本溪组厚 9 ~ 45m, 一般厚度为 20m 左右。与下伏中奥陶统呈假整合接触。

(2) 上石炭统太原组 (C_2t)

该组为本区主要含煤地层, 含煤 5 ~ 8 层。底部为石英砂岩, 下部为灰黑色泥质粉砂岩, 局部夹薄层石灰岩。中部为三层生物碎屑灰岩, 夹薄层泥岩及薄煤层。上部为深灰色泥岩、粉砂岩、夹薄层砂岩, 顶部有时见一层钙质泥岩。与下伏地层为整合接触, 厚 35 ~ 91m, 一般厚度约为 60m。

3. 二叠系 (P)

(1) 下二叠统山西组 (P_1s)

山西组为本区另一主要含煤地层, 含煤 4 ~ 5 层。岩性上部以深灰色砂岩、粉砂岩为主, 含不稳定薄煤层 1 ~ 2 层。下部以深灰、灰黑色泥岩, 砂质泥岩为主, 含煤 2 ~ 3 层。底部为灰白色细粒长石石英砂岩, 与下伏太原组为整合接触, 厚 30 ~ 75m, 一般厚约 45m。

(2) 下二叠统下石盒子组 (P_1x)

岩性主要为灰、灰绿色中—细粒砂岩、粉砂岩、泥岩及铝土质泥岩, 顶部为紫红色鲕状铝土质泥岩夹薄层细砂岩, 厚 65 ~ 140m, 一般厚度约为 90m, 与下伏地层为整合接触。

(3) 上二叠统上石盒子组 (P_2s)

上部以紫灰色、灰绿色砂岩、粉砂岩为主, 夹灰色泥岩。中部为紫红色粉砂岩、泥岩及灰绿色中—细粒砂岩互层。下部为灰绿色粉砂岩, 夹薄层细砂岩及紫灰色泥岩。与下伏地层为整合接触, 厚 340 ~ 480m, 一般厚约 400m。

(4) 上二叠统石千峰组 (P_2sh)

岩性以紫红色、灰紫色砂质泥岩、泥岩为主, 夹中—细粒砂岩及透镜状淡水泥质灰岩 1 ~ 2 层。底部为浅紫红色含砾中—粗粒石英杂砂岩, 与下伏地层为整合接触, 厚 70 ~ 141m, 一般厚约 100m。

4. 三叠系 (T)

(1) 下三叠统刘家沟组 (T_1l)

根据岩性组合特征划分为三段, 上段以紫红色泥岩及灰紫色、紫红色长石砂岩为主,

厚约 130m。中段主要为紫红色粉砂岩、砂岩及灰绿色细粒砂岩互层,厚约 143m。下段以深紫红色薄层中—细粒砂岩为主,夹薄层紫红色粉砂岩及泥岩,砂岩中发育大型交错层理,厚约 137m。与下伏地层为整合接触。

(2) 下三叠统和尚沟组 (T_1h)

本组以棕红色,砖红色泥岩为主,间夹紫红色粉砂岩及薄层细砂岩,底部以砖红色中粒石英砂岩与刘家沟组为整合接触,厚 160~210m。

(3) 中三叠统二马营组 (T_2er)

岩性以黄绿色厚层—巨厚层状中—细粒长石砂岩为主,夹紫红色泥岩薄层,厚度 412~573m。

5. 第四系 (Q)

下部更新统以灰黄色、黄褐色亚黏土为主,含钙质结核,底部为砂砾层,厚 0~208m;上部全新统以亚砂土、砂、砾为主,厚 0~30m。

(二) 煤系地层沉积特征

延川南煤层气田含煤地层为石炭系—二叠系,包括上石炭统太原组和下二叠统山西组,晚石炭世沉积期,随着鄂尔多斯盆地的持续沉降,海水侵入,形成受限陆表海环境,在研究区主要形成潟湖—潮坪沉积;二叠纪早期,鄂尔多斯盆地地壳上升,海水逐渐退去,研究区主要为滨海平原环境,水系发育,以三角洲平原沉积为主。

(1) 上石炭统太原组

太原组沉积早期,鄂尔多斯盆地大部分地区处于海侵初期的滨海环境,由于地壳上升,全区发生海退,出现了广阔的滨海平原,形成了厚而稳定的煤层,这一环境持续时间较长,是太原组早期煤层形成的主要环境,以吴堡以北最为发育,向南逐渐减弱,南部由东向西亦有逐渐减弱的趋势。太原组沉积晚期,鄂尔多斯盆地再次被海水淹没,这次海浸范围更广,持续时间更长,除中央隆起的南段外,大部分被海水淹没,尤以吴堡一带海水最深。由于古地貌及地壳升降不均衡,该区形成了不同的沉积环境。中部榆林至甘泉之间为浅海环境,地层由灰岩和海相泥岩组成,普遍含海相动物化石。在中部一直处于浅海的情况下,南北两端,即榆林以北的神木、府谷地区,甘泉以南至渭北地区却在不断缓慢上升,形成三角洲环境,沉积了长石石英砂岩和泥岩,在三角洲平原的河间沼泽上形成了太原组沉积晚期的煤层。大规模海侵后,地壳又出现了不均衡的升降活动,南北两端特别是北端地壳不断抬升,三角洲不断扩大,使海水向中部退去。当时的沉积中心在绥德以北,地层厚度多在 40m 以上,地层厚度愈向南愈薄,渭北地区多在 20m 左右,铜川附近约为 10m,并在东经 108°线以东尖灭。

(2) 下二叠统山西组

上石炭统太原组沉积末期,鄂尔多斯盆地地壳已开始上升,三角洲不断向海推进,原来南北两端的三角洲环境被河流相沉积所代替,中部的浅海沉积被三角洲环境代替,其中安塞—延川一带为具河口坝特征的三角洲前缘环境,其余地区为三角洲平原环境。此后本区地壳活动较为稳定,在河漫平原上及三角洲平原上的低洼处,出现植物生长茂盛、埋藏条件适中的沼泽环境,形成了早二叠世山西组的主力煤层。沼泽环境在神木—延安—澄城一线以东地区普遍存在,持续时间长,其中吴堡以北发育最好,乡宁以南次之,延安附近

有所缺失。主力煤层沉积后本区地壳抬升，全区都成为河流冲积环境，其中河漫平原的沼泽环境中形成了山西组的上部煤层，其厚度和规模远不如下部煤层，这是因为地壳不均衡抬升，河道不断迁移，成煤的沼泽环境不能长时期稳定发展，或后期河道切割冲蚀早期沼泽环境所致。总体来看，上部煤层以北部府谷附近发育最好，中部吴堡附近发育较差，盆地北缘仅在东缘局部地段形成可采煤层。

三、区域水文地质条件

延川南煤层气区的水系属黄河水系，黄河最高洪水位 385.58m，最低水位 379.13m，最大流量 $21000\text{m}^3/\text{s}$ ，最小 $88\text{m}^3/\text{s}$ 。区内沟谷很多，但河流稀少，大部分为季节性河流，其中最主要的河流是鄂河。鄂河从东向西流经本区北部，然后注入黄河，常年有水，流量 $0.03 \sim 0.8\text{m}^3/\text{s}$ ，雨季流量较大，枯水期流量较小。

(一) 区域含水层

区域含水层组自下而上有：中奥陶统灰岩岩溶裂隙含水岩组、太原组灰岩岩溶裂隙含水岩组、山西组上部及下石盒子底部砂岩裂隙含水岩组、上石盒子组、石千峰组及刘家沟组砂岩裂隙含水岩组、第四系砂砾石孔隙含水层。

(1) 中奥陶统灰岩岩溶裂隙含水岩组

延川南煤层气田内中奥陶统灰岩埋深为 1140 ~ 1548m，厚度多为 10 ~ 30m。其中上部峰峰组岩性以白云质灰岩、泥质灰岩为主，岩溶裂隙欠发育。上马家沟组岩性为浅灰色灰岩、白云质灰岩夹豹皮状灰岩和泥质灰岩，见小溶孔。据 404 孔抽水资料，单位涌水量为 $0.006\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ，水位标高 +588.94m，渗透系数 $0.0117\text{m}/\text{d}$ ，水质为 HCO_3^- 、 $\text{Cl}^- - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ 型。

(2) 太原组灰岩岩溶裂隙含水岩组

本含水岩组主要为太原组中部 K_2 、 K_3 、 K_4 石灰岩，区内未出露，煤炭钻孔揭露岩性以深灰色致密石灰岩为主，岩溶裂隙不发育， K_2 、 K_4 石灰岩厚 4m 左右， K_3 石灰岩 2m 左右，其中以 K_2 灰岩厚度最稳定。据 601 孔抽水试验资料，单位涌水量为 $0.0000556\text{L}/\text{s} \cdot \text{m}$ ，水位标高 +681.00m，渗透系数 $0.000226\text{m}/\text{d}$ ，属于富水性弱的含水层。

(3) 山西组上部及下石盒子底部砂岩裂隙含水岩组

山西组上部层组岩性为灰黄色、灰白色厚层砂岩，发育不稳定，厚度变化较大，厚 5 ~ 10m，局部相变为粉砂岩。下石盒子底部为灰黄色中—细粒长石石英砂岩，厚 8m 左右，裂隙不发育，富水性弱。据 601 孔、404 孔抽水试验单位涌水量为 $0.0000108 \sim 0.000038\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ，水位标高 +706.33m ~ +816.89m，渗透系数 $0.000247 \sim 0.000303\text{m}/\text{d}$ ，水质 HCO_3^- 、 $\text{Cl}^- - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ 型。

(4) 上石盒子组、石千峰组及刘家沟组砂岩裂隙含水岩组

本含水岩组包括上石盒子组中部、石千峰组下部及刘家沟组砂岩层段，岩性为灰绿色、灰紫色、紫红色中—细粒砂岩，裂隙不发育，降水是其主要补给来源，由于降水量较小，地表多为无水冲沟，因此富水性差。钻孔中仅 1201 孔在孔深 150m 处发现涌水，涌水量 $0.57 \sim 20.22\text{m}^3/\text{d}$ ，层位为石千峰组底部砂岩。

(5) 第四系砂砾石孔隙含水层

第四系砂砾石孔隙含水层主要分布于鄂河及较大冲沟中,岩性主要由冲积物、洪积物、亚黏土、亚砂土及砂、砾石、卵石等松散物组成,厚度0~10m,含孔隙潜水,富水性一般较差,是当地居民及农业主要用水。

(二) 区域隔水层

(1) 下石盒子组泥岩隔水层

下石盒子组岩性主要由泥岩、含铝质泥岩及粉砂岩组成,其间夹薄层细砂岩。泥岩含量高,裂隙不发育,对上覆含水层及地表水起到相对隔水作用。

(2) 太原组上部泥岩隔水层

太原组上部主要由泥岩、粉砂岩夹细砂岩组成,层位稳定,一般厚20m左右。在无断层贯通的情况下,太原组砂岩裂隙水、灰岩岩溶裂隙水与上覆含水层一般不会发生水力联系。

(3) 太原组底部铝土泥岩隔水层

太原组底部由泥岩、粉砂岩、石英砂岩及本溪组铝土泥岩等组成,对下伏奥陶系灰岩含水层具有较好的隔水效果。

(三) 补给、排泄系统

1. 补给条件

大气降水是区内所有地下水的主要补给来源,而地表河流多为季节性河流,其补给量很小,不利于地下水的补给。奥陶系灰岩有大面积的裸露区,接受大气降水的条件最优越,其他岩层含水层和第四系中更新统砂砾石(岩)层出露范围不大,加之地形坡度较大,植物稀少,降水易流失,补给条件不佳。全新统冲积层透气性较好,主要接受大气降水入渗补给,其次接受河水线状渗漏补给,补给条件良好。

2. 径流条件

受单斜构造控制,基岩含水层岩溶、裂隙发育程度、连通性和导水性都沿地层倾向向深部越来越差,导致了地下水从浅部补给区到深埋区径流强度越来越小,径流条件越来越差。因而,奥陶系灰岩溶水在区块西部为弱径流-滞流带,区块东部为浅部补给区及径流带。第四系砂砾岩孔隙潜水含水层透水性好,地形呈缓坡状,径流条件较好。

3. 排泄条件

(1) 奥陶系灰岩岩溶水

东部奥陶系灰岩出露区为其排泄区,且无明显出水点,由于补给、排泄为相同区域,所以排泄条件一般,区块处于弱径流带。

(2) 石炭系灰岩岩溶裂隙水及二叠系砂岩裂隙水

受单斜构造的控制,地下水排泄条件较差,排泄途径主要有:①补、径、排为同一地段。受地形条件限制,短途径流后在河道或沟谷两侧以泄流或泉的方式排泄,此种情况多在石盒子组和石千峰组的浅部,排泄条件较好。②在构造薄弱带和隔水层较薄处越流补给其他含水层。③人工排泄,如矿坑排水、水井取水。在本区块东侧的矿坑排水为含煤地层地下水主要排泄和疏干途径,且排泄条件好。④由浅埋区向深埋区缓慢径流,或由浅部向

深部渗透。

(3) 第四系孔隙水

第四系砂砾石(岩)层孔隙水,受地形条件控制,经短途径流排向河道和沟谷或渗入下伏岩层裂隙中。地下水动态类型为渗入-径流型。第四系孔隙潜水,主要是顺河流向下游径流排泄,其次是蒸发排泄、向下伏基岩入渗、人工排泄等,地下水动态类型主要属于渗入-径流型。

(四) 水动力条件综合分析

1) 区内出露地层主要为下三叠系刘家沟组,风化裂隙较为发育,大气降水为刘家沟组裂隙含水层的主要补给来源,沿断层破碎带可以越流补给下伏含水层,但由于本区降水量小,含水层富水性较差,同时仅在西北部及南部发育两条落差 25~100m 的断层,因此对后期煤层充水影响不大。

2) 延川南煤层气田 2[#]煤直接顶板细粒砂岩及下石盒子底部 K₈ 砂岩是开采 2[#]煤层的直接充水含水层,10[#]煤层直接顶板 K₂ 灰岩为开采 10[#]煤层的直接充水含水层。一般情况下含水层富水性弱,地下水径流滞缓,但在南部埋藏较浅地段或断层带附近及其他地质条件适合时,富水性可能增强,是主要充水来源。

3) 中奥陶统峰峰组及上马家沟组上部岩溶裂隙欠发育,富水性差。由于奥陶系灰岩溶水补给径流条件较差,同时 2[#]煤层与奥陶系灰岩顶面之间岩性多为细碎屑岩,断层不发育,因此在正常情况下不会对 2[#]煤层的开采造成危害,但为了保证安全生产应采取必要的防水措施。

综上所述,延川南区域地形切割强烈,冲沟发育,地表径流排泄条件好,不利于地下水的补给;构造形态为走向北北东的单斜,断裂不发育,含水层垂直方向上的水力联系弱。区内 2[#]煤层埋藏较深,直接充水含水层富水性弱,单位涌水量小于 0.1L/(s·m),补给条件差,且与中奥陶统灰岩顶面间距大,岩性以碎屑岩为主,断裂不发育,一般不会有造成底板岩溶水突水的可能,水文地质条件简单。

第二节 煤层气勘探开发简况

鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探始于 20 世纪 90 年代初,其中延川南煤层气田自 2008 年由中石化华东分公司开始该区的煤层气勘探开发工作,但该区煤炭地质工作始于 20 世纪 50 年代,具有较为悠久的历史,区块东南部有王家岭煤矿,中部有白额、谭坪煤炭普查区。

一、煤田地质勘探工作

20 世纪 50 年代末到 80 年代初,山西煤田地质勘探 144 队先后完成了对区块东南部王家岭矿区的详、精查勘探,获得了丰富的基础地质资料,并于 1964 年 11 月提交了《山西省乡宁矿区王家岭井田详查地质报告》,于 1980 年 12 月提交了《山西省乡宁矿区王家岭井田精查地质报告》。

2003~2005年,北京中煤大地技术开发公司对谭坪勘查区进行普查,竣工钻孔14个,进尺13181.78m,实施测井14孔,实测13015m。2006年1月提交《山西省乡宁县谭坪勘查区煤炭普查报告》。

2006年4月~10月,北京中煤大地技术开发公司对谭坪区进行详查,完成1:1万区域地质及水文地质填图132km²,施工二维地震186.78km,4672个物理点,钻探14个孔,进尺13338.18m,水文钻孔2个,1849.51m,抽水2层次,测井16孔,实测13250m,2006年10月30日提交《山西省乡宁县煤炭勘查区煤炭详查报告》。

2006年10月至2007年10月北京中煤大地技术开发公司完成钻探20孔,进尺21285.85m,其中水文孔2个,抽水4层次,测井22孔,实测28603.39m,采集各类测试样品233件(组)。2007年中煤大地公司在区块中部谭坪规划区完成煤炭详查工作,共钻煤炭钻孔60个,其中有4个钻孔进行了瓦斯测试工作。2008年6月,北京中煤地技术开发公司提交了《山西省乡宁县谭坪勘查区煤炭勘探报告》,并由国土资源部备案。

2006~2015年,中国煤炭地质局第一局在白额地区先后进行煤炭普查、详查工作。历年来煤炭地质工作主要集中于区块的中部和东南部,煤田普查、详查钻孔共计300口以上,其中30个以上钻孔进行了瓦斯测试工作。

二、煤层气勘探开发历程

延川南气田煤层气勘探始于2008年,华东分公司在该气田开展了煤层气勘探评价工作。2009年在实施Y1、Y2两口煤层气探井,落实延川南气田地层特征及煤层气地质条件,其中Y1井2[#]煤层获得最高日产气量2632m³/d,获得了延川南气田第一口探井的工业性气流突破,Y2井评价10[#]煤层效果不佳。

在获得单井突破的基础上,2010年围绕突破井建立了Y1试验小井组8口井的规模,同时部署了探井9口,进一步评价分析,核实煤层展布、厚度和含气量。其中在万宝山构造带部署3口勘探井,Y6井获得2000m³/d以上的稳定工业气流,最高日产气量2300m³/d,实现了万宝山构造带的突破,Y8井评价10[#]煤层效果不佳,根据实际钻遇煤层发育特征以及单井试采评价效果,延川南气田二叠系山西组的2[#]煤层的开发效果明显优于石炭系太原组的10[#]煤层。

2011年至2013年甩开勘探部署了探井13口,同时部署评价井及开发试验井,在万宝山和谭坪构造共建成Y1井组(28口直井+1口U型井)、Y3井组(32口直井+1口V型井+3口U型井)、Y5井组(23口直井+2口V型井+2口U型井)3个开发试验大井组,用以评价煤层气产能及井网井距适应性。Y1大井组中间部位15口井均突破1000m³/d,达到了评价目标,“小井组-大井组试验”取得阶段性成功,证实延川南煤层气具备整体可采条件。在多口单井获得工业气流突破的基础上,2011年与2013年分别提交谭坪构造带和万宝山构造带煤层气探明地质储量,奠定了延川南煤层气规模开发的基础。

截至2017年6月底,延川南煤层气田共投入生产井908口,产气井796口,日产气80.2×10⁴m³/d,日产液1018m³/d,平均单井日产气1008m³/d,其中千方井306口,占总产气井的38.4%。