目　录

前　言 …… I

第一章　煤层气地质背景 …… 1
第一节　地层与含煤地层 …… 1
一　地层概述 …… 1
二　含煤地层 …… 3
三　岩浆活动史及岩浆岩分布 …… 4
第二节　石炭—二叠系聚煤特征 …… 4
一　含煤岩系沉积环境概述 …… 4
二　成煤环境与聚煤模式 …… 5
三　岩相古地理特征与聚煤作用 …… 6
第三节　煤层与煤质 …… 10
一　煤层 …… 10
二　煤质 …… 12
第四节　构造及其控煤作用 …… 13
一　区域构造格架及其演化 …… 13
二　山西南部地质构造 …… 15
三　地质构造的控煤作用 …… 18

第二章　区域构造应力场及其动力学 …… 19
第一节　构造应力场的研究方法 …… 19
第二节　中生代构造应力场特征 …… 20
一　中生代区域地壳运动及构造层划分 …… 20
二　中生代构造应力场的特征 …… 20
第三节　新构造和现代构造应力场特征 …… 29
一　新构造应力场特征 …… 29
二　现代构造应力场特征 …… 30
第四节　构造应力场有限元模拟 …… 32
一　燕山期和喜马拉雅早期构造应力场有限元模拟 …… 33
二　新生代和现代构造应力场有限元模拟 …… 34
第五节　构造应力场演化及其动力学分析 …… 37

第三章　煤层气生成的物质基础 …… 39
第一节　煤层有机质丰度 …… 39
第二节　煤层有机质组成 …… 44
第三节　煤层有机质成熟度 …… 46
第四节　煤层原始有机质的恢复与生气率 …… 49
一　生气率的概念 …… 49
二　煤中原始有机质丰度的恢复 …… 50
三　视煤气发生率 …… 52
四　有效阶段生气率 …… 53

第四章　古地热场特征与煤的生烃演化 …… 54
第一节　煤层埋藏历史和煤层气保存潜势 …… 54
一　煤层上覆地层原始厚度的恢复 …… 54
二　煤层埋藏历史和埋藏阶段 …… 55
三　煤层埋藏历史地质模式与煤层气保存潜势 …… 56
第二节　古地热场特征与煤化作用 …… 59
一　区域古地热场发展史 …… 59
二　晚中生代古地热场特征 …… 61
三　反演煤热演化历程的 EASY%R_o 法数值模拟 …… 63
四　晚中生代异常古地热场形成机理 …… 65
第三节　石炭—二叠系煤的生烃演化 …… 69
一　各地质历史时期的生烃特征 …… 70
二　二次生烃作用 …… 71
三　生烃特征与煤层气富集 …… 72

第五章　煤层气的储集和封盖特征 …… 74
第一节　煤储层物性分析 …… 74
一　主煤层割理系统 …… 74
二　煤储层孔隙结构分布特征 …… 77
三　煤储层渗透率 …… 87
四　煤储层吸附性 …… 89
第二节　盖层物性分析 …… 91
一　主煤层顶板裂隙系统 …… 91
二　主煤层顶板孔隙结构 …… 92
三　主煤层顶板渗透率 …… 97
第三节　煤储层及其盖层的几何特征 …… 97
一　上主煤层及其盖层的几何特征 …… 97
二　下主煤层及其盖层的几何特征 …… 99
第四节　煤层气的有利储盖类型 …… 102

一　煤储层的储集性能及其类型…… 103
二　盖层的封盖性能及其类型…… 104
三　有利储盖类型的分布与组合…… 105

第六章　煤层含气性分析与预测…… 106
第一节　推定区煤层含气性分布…… 106
一　煤层含气性区域分布…… 106
二　煤层含气梯度与煤层气风化带深度…… 110
第二节　推断区和预测区煤层含气性分析…… 115
一　含气性预测方法…… 116
二　沁水盆地深部预测区…… 118
三　沁水—翼城推断—预测区…… 119
四　临汾盆地预测区…… 120
第三节　煤层气可采潜势…… 122
一　可采潜势评价方法…… 122
二　煤层气解吸率…… 123
三　兰氏参数、视储层压力和临界解吸压力 …… 126
四　煤层气采收率…… 130

第七章　山西南部煤层气资源评价…… 132
第一节　煤层气资源量计算方法…… 132
一　资源量计算流程…… 132
二　计算块段、资源量类别和计算单元 …… 132
三　资源量计算基本公式和参数的确定…… 136
第二节　煤层气资源量分布…… 138
一　煤层气资源量类别及其层域分布…… 138
二　煤层气资源量地域分布…… 139
第三节　煤层气资源勘探前景综合评价…… 140
一　评价参数讨论…… 140
二　综合评价标准…… 141
三　煤层气有利勘探区段优选…… 141

第八章　结束语…… 146

主要参考文献…… 149

第一章　煤层气地质背景

山西省南部包括沁水煤田中南段、霍西煤田和临汾盆地，是中国煤层气最有勘探开发前景的地区之一。该区地理坐标范围为东经 111°10′～112°45′、北纬 35°40′～37°20′，面积约为 30000 km^2。区内地势复杂，东部的沁水盆地区和西北部的霍州—汾孝地区多为低山丘陵，中北部为太岳山区，西南部为临汾—洪洞平原(盆地)。区内煤田地质和区域地质调查程度较高，基础地质资料丰富，为研究该区煤层气地质背景奠定了良好的基础。

第一节　地层与含煤地层

一　地层概述

山西南部各时代地层的简要特征自下而上分述如下(山西地质矿产局，1989)。

1. 前寒武系

本区前寒武系包括太古宇和元古宇，是华北地台沉积盖层的古老基底，厚度巨大。研究区内地层露头主要见于霍山隆起区的古县至洪洞，呈 NNE 向长条状展布，在南部边缘及西部边缘亦见有零星露头分布。

2. 下古生界寒武系和奥陶系

该套地层与下伏前寒武系呈明显的角度不整合接触，在全区发育程度不一。寒武系厚度为 215～415 m，自东向西有明显的超覆沉积现象，沉积厚度亦相应具渐次变薄之势。东南部从下统馒头组至上统凤山组均有沉积，而西部仅发育中、上寒武统。岩性以白云岩、白云质灰岩、鲕状灰岩、砾状灰岩、砂岩和泥岩为主。

奥陶系仅发育下统和中统下部层位，自下而上有下奥陶统冶里组、亮甲山组、下马家沟组、上马家沟组和中奥陶统峰峰组，地层厚度大于 400 m，主要岩性为石灰岩和白云岩。研究区内上马家沟组或峰峰组直接伏于晚古生代沉积之下。

寒武系和奥陶系露头与前寒武系露头分布基本一致，唯奥陶系在含煤盆地内部常见有一些零星露头，使得原本连续的煤层出现小而积的缺失区。

3. 上古生界石炭系和二叠系

石炭系仅发育上石炭统的本溪组和太原组，本溪组地层厚度为 0～50 m，在东部和东北部沁源、武乡一带较厚，向南和西南厚度渐趋变薄或缺失。岩性主要为砂岩、泥岩、透镜状石灰岩，偶夹薄煤层，与下伏奥陶系呈平行不整合接触。太原组连续沉积于本溪组之上，主要岩性为砂岩、泥岩、灰岩和煤层，是晚古生代主要含煤地层段之一。其底界以发育的砂岩层(K_1)为分界标志，顶界位于 K_7 砂岩层位底部，厚度为 50～135 m(何锡麟等，1995)。

石炭系在本区分布较广，除太岳山、浮山—翼城、汾西等地老地层出露区缺失以外，其它地区在地表或钻孔中均有揭露。主要出露区分布于灵石—霍州、沁水—晋城、古县和沁源西

部地区，其它地区直接被上覆地层所盖。

二叠系自下而上包括下二叠统山西组、下石盒子组和上二叠统上石盒子组、石千峰组。山西组位于K_7砂岩底至K_8砂岩底，地层厚度为20～86 m，是主要含煤地层段之一。岩性主要为砂岩、砂质泥岩和煤层，颜色偏暗。下石盒子组直接沉积于山西组之上，位于K_8砂岩底至K_{10}砂岩底，以黄绿、灰绿、杏黄色砂岩和泥岩为主，顶部为紫色砂岩、泥岩，全组厚60～160 m，一般为100～120 m左右。研究区中部存在一东西向地层薄带，厚度不大于70 m，向南北两方向地层厚度均呈增大趋势。下石盒子组地层颜色趋于黄、绿、紫色，不含煤(或偶有煤线)，辅以较为发育的K_8和K_{10}砂岩，较易于识别。上石盒子组(K_{10}底～K_{14}底)是一套以河流相为主、夹少量湖泊相的杂色砂岩、泥岩、硅质岩地层。该套地层明显分为三段，分别以特征砂岩为分界标志。上石盒子组厚300～644 m，东部地区沉积较厚(>500 m)，而在西部诸如襄汾、汾阳—孝义等地厚度均小于350 m。石千峰组是二叠系顶部地层，该组是自K_{14}砂岩开始至石膏泥灰岩顶的一套由砂岩、陆相泥灰岩和少量的石膏构成的河流—湖泊相沉积组合。主要岩性为紫红、砖红色泥岩，夹黄绿色、紫红色砂岩及陆相泥灰岩、泥质灰岩，厚度为22～217 m，一般厚90～110 m(常朝辉，1997；王自强等，1987)。

二叠系在本区主要出露于灵石—霍州、沁水—晋城、古县至沁源西部。山西组和下石盒子组保存较全，而上石盒子组和石千峰组在部分地区残留甚少或剥蚀殆尽。区内沁源东部、安泽、屯留、武乡、临汾、洪洞等地二叠系则被新地层所覆盖。

4. 中生界三叠系和侏罗系

三叠系自下而上包括下三叠统刘家沟组、和尚沟组，中三叠统二马营组、铜川组和上三叠统延长组，由一套陆相碎屑砂岩、泥岩组成。地层序列清楚，底部与二叠系逐渐过渡，顶部延长组与上覆中侏罗统不整合接触。

山西南部的三叠系露头主要见于东部地区，在沁水盆地范围内呈NE—SW向分布。临汾、洪洞一带被巨厚的新生代沉积所覆盖，据地震资料揭示其发育较好。西北部由于后期破坏，三叠系没有残留。区域内三叠系残留厚度见表1-1。

表1-1　　山西南部残留三叠系厚度分布表　　(单位：m)

地　点	刘家沟组	和尚沟组	二马营组	铜川组	延长组	总　厚
武　乡	575	248	488	413	77	1801
平　遥	585	272	615	574	79	2125
沁　源	343	193	675	554	>30	>1795
临　汾	338	201	669	634	477	2319

侏罗系在区内仅见零星露头，主要分布于古县和榆社等地。保存层位为中侏罗统云岗组上部和天池河组，多不整合于下伏上三叠统延长组之上。其主要岩性为黄绿色、紫红色砂岩和砂质泥岩。

5. 新生界第三系和第四系

本区新生界主要包括第三系上新统和第四系。主要分布于新生代断陷盆地、山前黄土丘陵地带和山间盆地之中，其厚度不等，大多数地区零星分布，仅临汾—洪洞一带新生界分布面积较广且厚度大，最厚可达1500～2000 m。

二　含煤地层

本区含煤地层主要由上石炭统太原组和下二叠统山西组构成。区内含煤地层平均总厚度为 145.95 m，含煤性较好（图 1-1）。

1. 上石炭统太原组

太原组（自 K$_8$ 砂岩底至 K$_7$ 砂岩底）是区内主要含煤地层组之一，由一套灰色中细粒砂岩、灰黑色粉砂岩、泥岩、石灰岩和煤层组成，具有明显的完整或不完整沉积旋回。地层厚度为 50～135 m，全区厚度分布东厚西薄，太岳山以东沉积厚度一般大于 100 m，西部区为 60～100 m。地层中海相石灰岩层数和厚度有自东向西递减的趋势，东部晋城、屯留一带石灰岩有 5～6 层、厚度大，而沁源—沁水一线以西石灰岩仅出现 3～4 层，厚度较小。

本组发育煤层 8～10 层，底部煤组 H$_{15}$煤的厚度最大且稳定，为全区主要可采煤层，也是本次研究的主要目的层之一。该煤层在沁水煤田大多为单一煤层，称为 15 号煤；在霍西煤田多分为三层，分别称为 9 号煤、10 号煤和 11 号煤。尽管研究区内地层组合存在某些差异，但通过层序地层分析、生物化石等手段却可进行精确对比。太原组自下而上发育 6 个标志层（即 K$_1$～K$_6$），层位稳定或较稳定，研究程度高，与不同的煤层具有一定的时序关系，易于辨识，为区内煤岩层划分和对比提供了可靠依据。尤其是 K$_2$～K$_4$ 三层石灰岩，区内相当发育，且常为煤层的直接顶板，是对比主要煤层的直接依据。

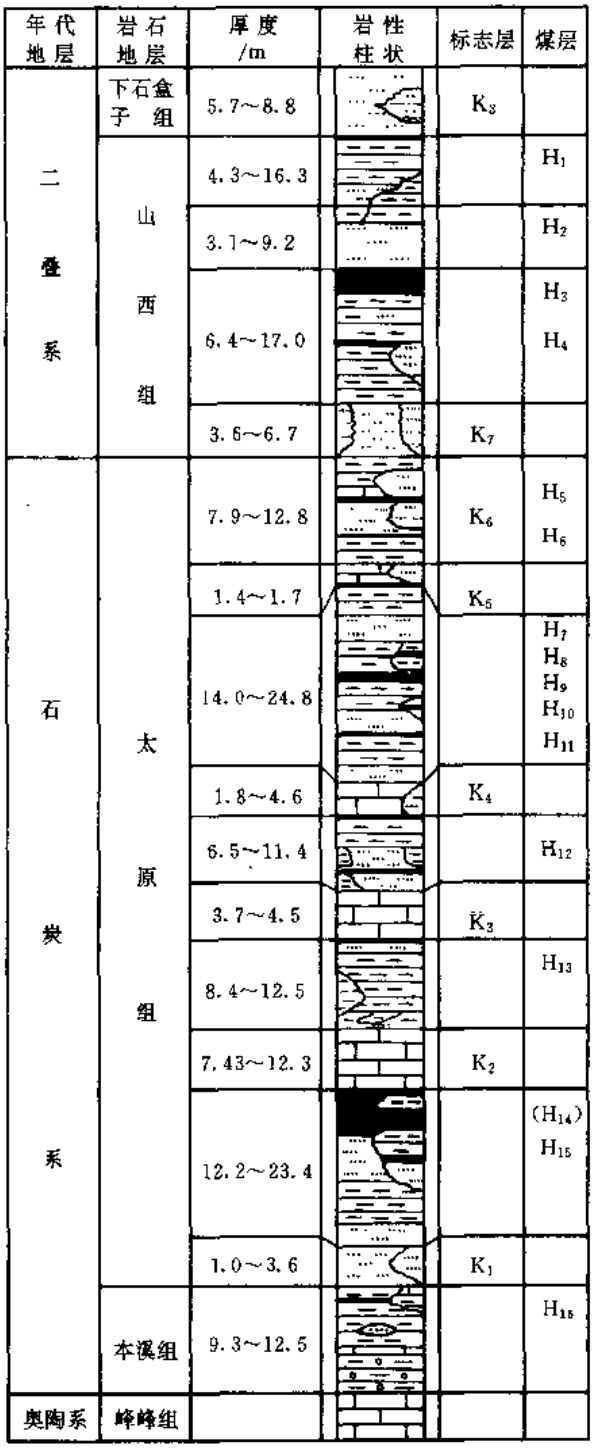


图 1-1　山西南部石炭—二叠系含煤地层综合柱状图

2. 下二叠统山西组

山西组（自 K$_7$ 砂岩底至 K$_8$ 砂岩底）与下伏太原组连续沉积，为主要含煤地层组之一。主要由砂岩、砂质泥岩、泥岩和煤层组成，属滨海三角洲相沉积。地层厚度为 20～86 m，全区

变化规律明显，北厚南薄、东厚西薄，最厚处位于晋城、屯留、武乡、灵石等地，而沁源、霍州、襄汾等地较薄，厚度分布呈局限盆控型，明显区别于浅海背景下的太原组厚度变化规律。山西组含煤1～4层，其中霍西煤田范围内煤层层数多而单层薄，主要煤层为2号煤；沁水煤田煤层层数少但单层厚，主要煤层为3号煤。通过对比，两个编号不同的煤层形成于同一时期，统称为H_3煤层，为本次研究的主要目的层之一。

三　岩浆活动史及岩浆岩分布

据现有资料，山西南部岩浆岩地表露头主要见于襄汾—翼城—浮山之间的塔儿山—二峰山一带，在其它地区，如太岳山西部、临汾西佐、侯马紫金山等地，岩浆岩则沿一些较深的断裂断续分布。岩浆岩种类多样，主要见有花岗岩类、脉岩类、超基性岩类和基性岩类，岩体出露规模一般不大，产状有岩枝、岩墙、岩脉等。

区内岩浆活动主要集中于太古代—元古代和中生代两个地质阶段。太古代—元古代岩浆岩存在于前寒武系地层中，其岩体小、多以脉状产出，岩性以超基性岩、基性岩和酸性岩为主，主要分布于太岳山区。中生代（特别是燕山期）是华北地区岩浆活动的鼎盛时期，在山西南部也有清楚显示。岩浆岩体分布于研究区南部，多呈NEE向断续分布，其展布方向和形式受隐伏的基底断裂带控制，各侵入体在地表以近等轴状形态出露，多沿短轴背斜的轴部侵入，其围岩主要是奥陶系、石炭—二叠系和三叠系。

区内最大的出露岩体（塔儿山—二峰山）呈枝状产出，分布面积大于100 km^2，与其呈侵入接触的最新地层是三叠系二马营组。根据同位素年龄测定结果，岩体侵入时代为白垩纪早中期。该岩体对附近石炭—二叠系煤的煤化作用具有一定影响，从而造成侵入体附近煤级呈环带状分布。

除暴露于地表或侵入煤系及其以上层位的岩体以外，区内存在隐伏岩浆岩岩体的可能性不容忽视。根据已有资料和区内岩浆活动规律分析，区内翼城、安泽、阳城、晋城范围内可能存在较大规模的燕山期隐伏岩浆岩侵入体，侵位较深。其主要证据有：① 晋城—阳城一带可见零星出露的燕山期岩浆热液岩脉，属于岩浆后期产物，其下必有较大母岩体存在；② 航测资料显示阳城—晋城—高平一带为正磁异常区，异常强度可达+100 γ～+250 γ；③ 浮山—翼城为断裂与岩浆活动强烈的块断隆起构造区，有燕山期岩体分布，其磁异常局部可达+700 γ，向东至阳城、晋城岩浆岩体呈东西向带状分布；④ 周边地区燕山期岩浆侵入到奥陶系—寒武系或下部层位的现象较为常见。研究区内隐伏岩体的存在，对于上古生界煤层的煤化作用有深刻影响。

第二节　石炭—二叠系聚煤特征

一　含煤岩系沉积环境概述

本区上古生界含煤岩系主要为一套陆表海碳酸盐台地沉积、堡岛—泻湖沉积和陆表海浅水三角洲沉积。前两者在近陆一侧以浑水碎屑岩沉积为主，远陆一侧则以清水碳酸盐台地沉积为主，清水、浑水沉积在陆表海广大范围内形成交互沉积；后者以河流作用占优势，三角洲平原相发育，而三角洲前缘相及前三角洲相则不发育。

1. 碳酸盐台地沉积体系

碳酸盐台地沉积体系主要分布于太原组和本溪组，进一步可分为开阔台地相、局限台地

相和台地潮坪相。开阔台地相主要为生物碎屑泥晶灰岩或泥晶生物碎屑灰岩，多发育狭盐性生物和反映开阔--动荡水体的生物遗迹化石组合，其 $\delta^{13}C$ 在 $-2.95‰$～$-2.72‰$之间，古盐度 Z 值为 115～127(表明咸水条件)，古温度为 22.7 ℃～29.9 ℃，不溶残渣含量为 6%～9%(表明水体较清澈)。本区的 K_2～K_3 石灰岩多在此环境中形成。局限台地相海水含盐度正常或微淡化，其岩石类型主要为泥晶灰岩或生物碎屑泥晶灰岩、泥灰岩，其中广盐性生物种属单调，有反映平静—弱动荡水体的生物遗迹化石组合。本区东南部的 K_6 灰岩应属于局限台地相沉积环境类型。

2. 陆源碎屑堡岛—泻湖沉积体系

堡岛—泻湖沉积体系主要由一系列障壁岛(滩)、障壁后的泻湖和潮坪、潮汐三角洲和潮汐水道系统等沉积相组成。

障壁岛相岩性主要为细—粗粒石英砂岩，成分成熟度和结构成熟度均高，发育有冲洗层理和平行层理。本区太原组底砂岩(K_1)多在此环境中形成。

泻湖相岩性主要为黑色泥岩和粉砂质泥岩，常具水平层理，含有个体小、壳体薄、适应能力强的腕足和软体动物化石以及植物化石碎片，有大量菱铁矿结核以及反映水体平静的生物遗迹化石组合。泻湖相沉积广泛分布于太原组和本溪组，常形成煤层的伪顶板。

潮坪相主要由细粒石英砂岩、粉砂岩或与泥岩互层组成，潮汐层理极为发育，常具生物扰动构造和生物潜穴，在太原组中该相广泛发育，常形成煤层的底板。

潮汐三角洲相岩性主要为细—中粒石英砂岩，常具大型板状交错层理、冲洗层理和潮汐层理，粒度向上变细。潮道相常与下伏沉积呈冲刷接触，由细—粗粒砂岩组成，具大型板状交错层理和双向交错层理，在剖面上呈透镜状，常与潮汐三角洲相共生。本区西北部汾西至沁源之间的太原组中上部砂体(K_4 灰岩之上)多为潮道相沉积，而东部和南部呈席状分布的砂体应为潮汐三角洲相。

3. 陆表海浅水三角洲沉积体系

浅水三角洲相是本区山西组含煤岩系的主要沉积环境类型。在垂向上以三角洲平原相占优势，其中分流河道相又占主要地位，三角洲前缘相和前三角洲相不发育。本区三角洲平原相主要由分流河道相、泛滥盆地相、堤岸相和泥炭沼泽相等微相组成。

分流河道相具有河流相沉积特征，岩性主要为中—粗粒岩屑或长石石英砂岩，常见有大型硅化木，槽型和板状交错层理发育，底部常含有砾石为滞留沉积。泛滥盆地相以泥岩、粉砂岩沉积为主，含丰富的植物化石或其碎片。泛滥盆地可沼泽化而形成泥炭沼泽，故常为煤层顶、底板的沉积环境类型。堤岸相沉积可见于本区局部地段。

三角洲前缘相主要由河口沙坝、远沙坝和分流间湾微相组成。河口沙坝相主要由细—中粒石英砂岩或岩屑石英砂岩组成，杂基含量较高，沙纹层理和板状交错层理发育，变形滑塌构造常见。远沙坝相岩性一般为粉砂岩与泥岩互层。分流间湾相以黑色泥岩为主，常夹有砂岩透镜体，可含少量植物化石碎片，常为煤层顶、底板的沉积环境。在垂向上自下而上常构成一个完整的分流间湾—远沙坝—河口沙坝—分流河道的逆粒序沉积序列。

二　成煤环境与聚煤模式

本区有两种聚煤环境，即泥炭沼泽和泥炭坪。泥炭沼泽聚煤作用主要发育在二叠系的山西组，泥炭坪聚煤作用主要发育在石炭系的本溪组和太原组。

1. 泥炭沼泽聚煤环境

山西南部泥炭沼泽成煤环境主要为三角洲平原泥炭沼泽。它常由三角洲平原相中的有关亚环境进一步演变而成，因此三角洲平原泥炭沼泽成煤序列为：底部为三角洲前缘的河口沙坝相或分流河道相，向上过渡为泛滥盆地相或泥炭沼泽相，顶层被泛滥盆地相或分流河道相所覆盖。

2. 泥炭坪聚煤环境

热带、亚热带地区的潮间坪和潮上坪，在适宜的条件下可生长大量红树或类似红树生态的潮汐适盐植物，从而造成大面积的泥炭堆积。这种在潮坪上直接成煤的环境称为泥炭坪。它包括潮间坪和潮上坪，甚至包括部分局限潮下浅水带和潮沟(刘焕杰等，1983)。泥炭坪属海相范畴，它可以发育在受潮汐影响的各种环境中，如潮坪区、障壁岛后潮坪区、潮汐三角洲和碳酸盐台地的潮坪区以及分流间湾的潮坪区等。不同类型的泥炭坪具有各自的沉积特征和成煤特征。本区泥炭坪成煤环境可划分为以下五种类型。

① 泻湖泥炭坪：为发育在泻湖近岸潮坪区的泥炭坪，其垂向序列通常从障壁岛相或局限台地相开始，向上过渡为泻湖相、潮坪相和泥坪相，其上多由泻湖相或碳酸盐台地相所覆盖。在这种环境中形成的煤层分布广、厚度大、层位稳定、灰分产率中等—高、硫分含量高，如果有淡水补给硫分含量会产生明显变化。研究区太原组主煤层多属于泻湖泥炭坪成煤环境类型。

② 堡岛泥炭坪：它发育于堡岛后侧的障壁坪部位，呈带状分布，但在陆表海环境中堡岛往往低平而宽广，加之堡后冲积扇比较发育，故堡后泥炭坪可以向泻湖延伸较远，从而造成大面积的成煤环境。

③ 潮汐三角洲泥炭坪：它是在潮汐三角洲的潮坪上发育起来的成煤环境。本区东部潞安矿区和西北部霍东煤田中部 K_4 灰岩下的 10 号煤，多属于此成煤环境类型。

④ 碳酸盐台地泥炭坪：它在碳酸盐台地潮坪上发育，煤层上下均由局限台地或开阔台地碳酸盐岩所覆盖。本区南部 13 号煤多属于此成煤环境类型。

⑤ 分流间湾泥炭坪：它是在分流间湾的潮坪区发育起来的成煤环境。太原组顶部及山西组底部煤层多属于此成煤环境类型。

综上所述，泥炭坪成煤的主要特点是：煤层分布广，层位稳定，硫分含量高，厚度变化大，煤层多为复杂结构，灰分中等至高。上述各种聚煤环境并不是孤立存在的，其间存在着内在联系。泻湖泥炭坪、堡后泥炭坪以及三角洲间湾泥炭坪都可在相邻位置上形成，伴随着海平面变化，可沉积大而积的但属于不同成煤环境的同一煤层。

泥炭坪和泥炭沼泽是两种性质不同的成煤环境。伴随着海平面在时空上的演化，聚煤条件可以互相转化和替代，聚煤范围也可不断扩大，这是本区分布着大面积有开采价值煤层的重要原因。两种聚煤环境的分布特点可见聚煤模式图(图 1-2)。

三 岩相古地理特征与聚煤作用

1. 含煤岩系岩相古地理特征

本溪期沉积层厚度为 0～50 m，北厚南薄，夹灰岩 1～2 层、厚度可达 6 m，主要分布于汾西、沁源一线以北地区，南部缺失，表明海侵主要来自北东方向。定性和定量的岩相古地理分析表明：该期本区主要为陆表海环境，由于基底高低不平，造成海水连通性差，全区发育了以泻湖为主体、间有局限台地、障壁岛和潮坪相区的复合沉积体系。

太原期沉积厚度为 50～135 m，北厚南薄，北部含砂率高，显示物源区在本区北部。太原

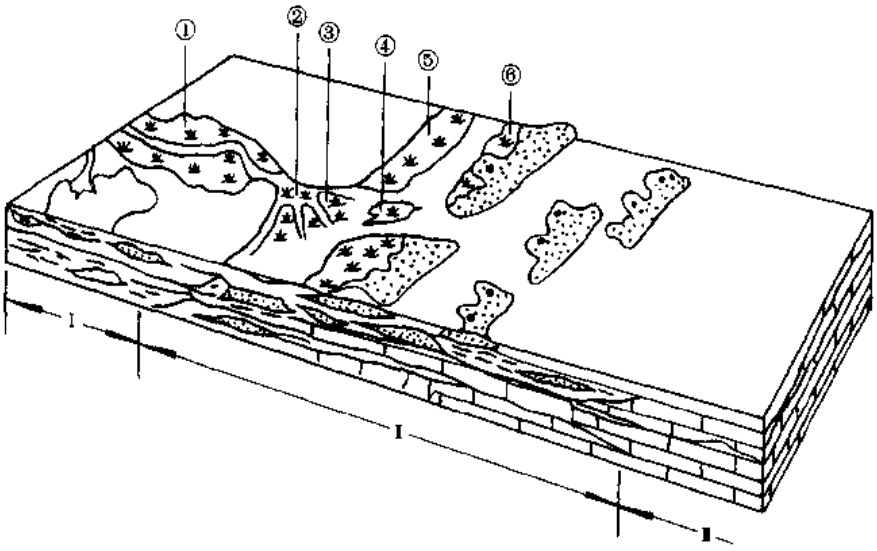


图 1-2　山西南部上古生界太原组和山西组成煤模式图

Ⅰ——三角洲体系；Ⅰ·—障壁岛体系和障壁岛—碳酸盐台地体系；Ⅱ——碳酸盐台地体系

①— 泛滥盆地泥炭坪；②——三角洲平原沼泽；③—分流间湾泥炭坪；

④——潮汐三角洲泥炭坪；⑤——泻湖泥炭坪；⑥——障壁岛后泥炭坪

期沉积了 3～6 层灰岩，其中发育较稳定的共 5 层(K_2～K_6)，总厚为 12～24 m，南厚北薄，表明海侵主要来自东南方向。K_2～K_4 灰岩全区发育，代表海侵最大层位。到 K_5 灰岩沉积时，海侵范围缩小，仅在沁源县以南以及洪洞、临汾、襄汾以东地区有分布，表明当时海水自西北向东南后撤。K_6 灰岩沉积时海水继续后撤。K_6 灰岩仅在本区东南部阳城、晋城地区有分布。本区中北部以障壁岛—泻湖—潮坪沉积为主，沁源以南则以碳酸盐台地沉积体系为主。

下二叠统山西组厚 20～86 m，西北部厚、东南部较薄，北部含砂率较高，主要以三角洲沉积为主，可划分为二个相带。汾西、沁源以北以三角洲平原沉积为主，以南则以三角洲前缘沉积为主，总的古地理格局是南部靠海、北部靠陆，物源区在本区北部。

2. 聚煤特征与岩相古地理

本区山西组和太原组煤层多达 10 余层。太原组 K_2 灰岩的直接下伏煤层及其极近距离煤层(H_{15})为下煤组主煤层(简称下主煤层)，包括东部地区 15 号煤层以及中、西部霍东及霍西地区的 9 号、10 号和 11 号煤层，后几层煤的分叉合并现象较为普遍。山西组下部 3 号煤层(或 2 号煤层)在本区相当稳定，称为上煤组主煤层(简称上主煤层)，也是本区的主要煤层(H_3)。现就这两主煤层的分布状态和环境特点概述如下。

下主煤层广布全区，厚度大、稳定性好，除在安泽、良马一带其厚度小于 2 m 以外，其余地区均在 2.5～7 m 之间，西北部较厚，东南部较薄(图 1-3)。在煤层形成之前，本区中部广大地区以泻湖相沉积为主，东部及西北部则以障壁岛、泻湖和潮坪沉积为主，西南边缘由于靠近中条古陆，局部陆源物质供给充分，故以障壁岛相沉积为主(图 1-4)。由于海侵来自本区东南方向，聚煤作用首先发生在本区西部和北部地区，故煤层较厚。东南部地区由于水体较深，聚煤作用发生较晚，故煤层相对较薄。在本区中部，以潮坪相和障壁岛相沉积占优势，潮汐水流作用充分，是中部煤层分叉变薄和结构较为复杂的主要原因。

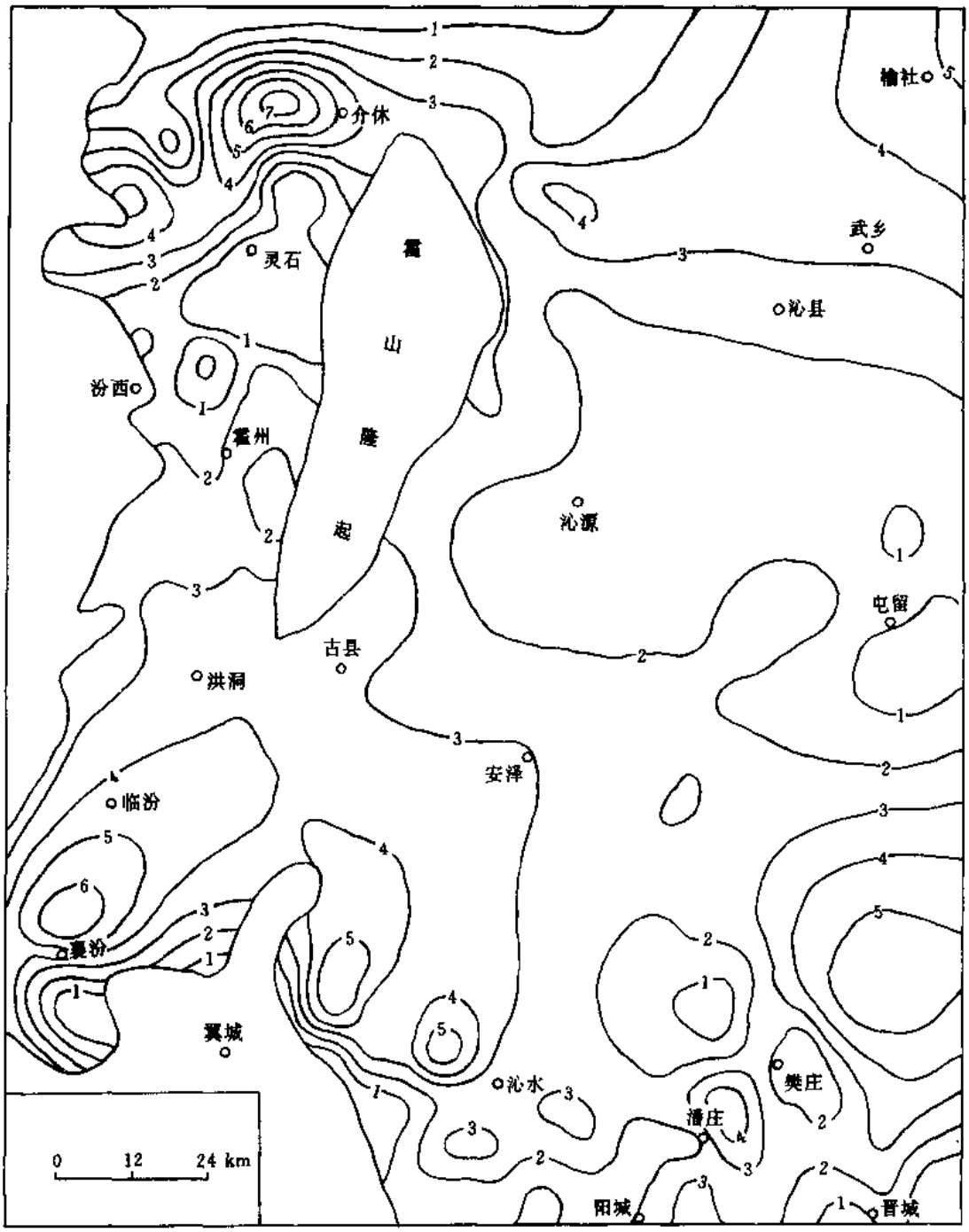


图 1-3　山西南部太原组主煤层(H_{15})厚度等值线图

在聚煤作用过程中，中部地区由于差异性沉降而形成了一个相对凹陷区。当沉降速度大于补给速度而不具备成煤条件时，发育了泻湖、障壁岛或潮坪相环境，这是造成煤层分叉的主要原因。在下主煤层(H_{15})顶板海相灰岩(K_2)形成时期，海侵方向是自南东向北西，故东南部地区聚煤作用结束较早，这也是东南部煤层发育相对较差的原因之一。

上主煤层广布全区，厚度一般在 1.0～7.0 m 之间，南厚北薄、东厚西薄，最薄处位于本区中部(图 1-5)。该煤层发育在三角洲沉积之上，北部广泛发育分流河道，分流河道的侧向

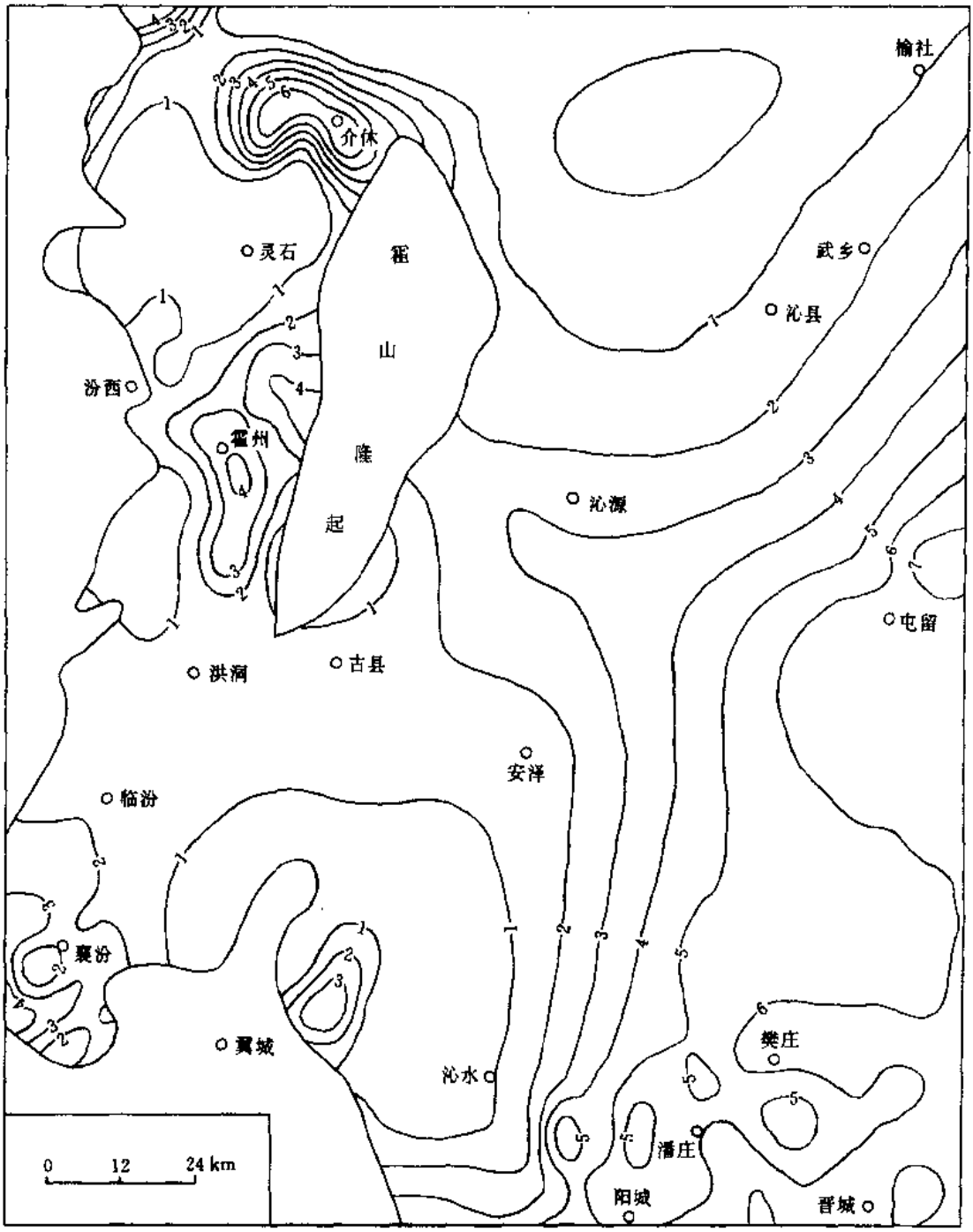


图 1-5　山西南部山西组主煤层(H_3)厚度等值线图

迁移和冲蚀是造成北部煤层较薄的原因之一。南部地区是分流间湾相区，这是南部煤层厚度较大的主要原因之一(图 1-6)。

上主煤层形成之后，北部地区发育了分流河道和泛滥盆地环境。分流河道对下伏煤层在成煤期或成煤后有冲刷作用，致使煤层局部变薄或缺失。本区中部自北向南的薄煤带应为分流河道或河口沙坝冲刷所致。南部广大地区发育分流间湾环境，对煤层的保存较为有利。由此可见，成煤前、成煤期和成煤后的岩相古地理对上主煤层的发育特征有重要的控制作用。

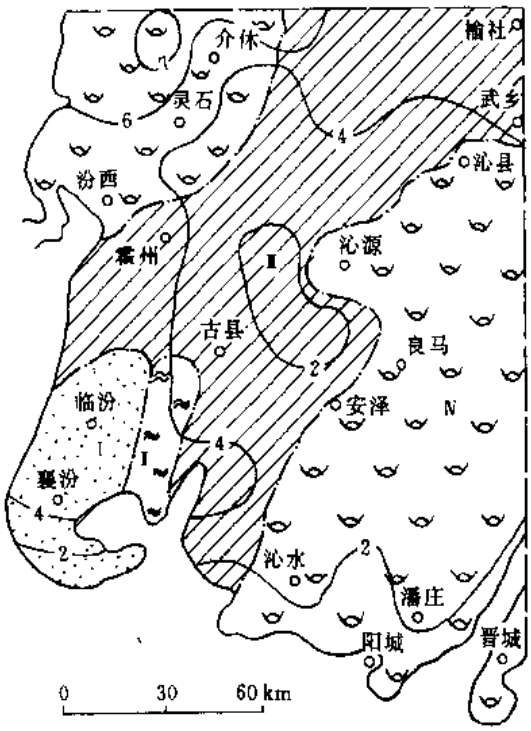


图 1-4 山西南部太原组主煤层(H_{15})成煤前岩相古地理图

Ⅰ——障壁岛相区；Ⅱ 潮坪相区；Ⅲ 泻湖相区；Ⅳ 障壁岛 泻湖 潮坪相区

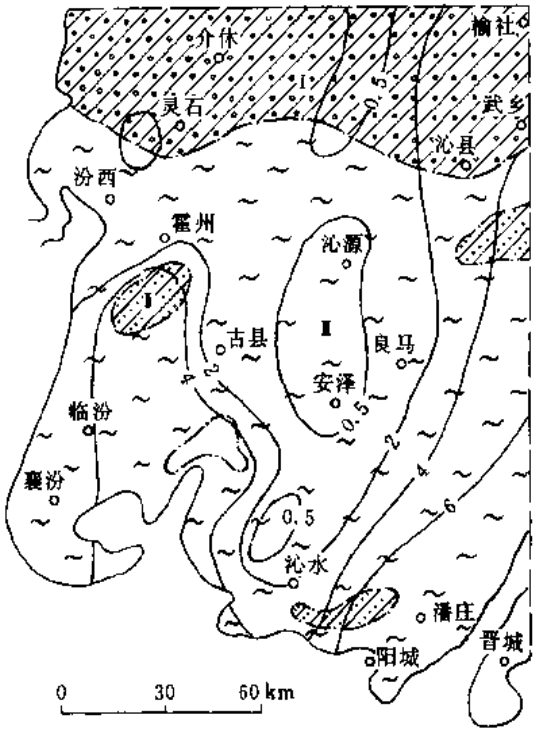


图 1-6 山西南部山西组主煤层(H_3)成煤前岩相古地理图

Ⅰ——分流河道相区；Ⅱ——河口沙坝相区；Ⅲ——分流间湾相区

第三节 煤层与煤质

一 煤层

山西南部上石炭统太原组和下二叠统山西组平均总厚度为 145.95 m，含煤 10 余层，煤层平均总厚度为 10.43 m，总含煤系数为 7.15%。

西部霍西煤田和东部沁水煤田地层的发育特征、煤层层数和厚度不尽相同，煤层的编号亦不统一。本次研究工作在对大量钻孔和野外露头剖面资料进行生物地层学、层序地层学、成因地层学综合分析的基础上，对区内含煤地层进行了详细的时序分割对比，主要煤层对比及本书编号如表 1-2 所示。本书在以后的叙述中，所有煤层的编号均采用表 1-2 编号，并将上煤组和下煤组的主煤层分别简称为上主煤层(H_3)和下主煤层(H_{15})。

1. 上主煤层

上主煤层(H_3)位于山西组中下部，在平面上呈席状分布于全区，属于稳定—较稳定可采煤层。该煤层在大部分地区为单一煤层，仅在介休与霍州之间常分为上、下两个分层(2 号上煤层和 2 号下煤层)，其分层间距为 2.0～5.7 m。

上主煤层的厚度为 1.0～7.0 m，具有一定的区域分布规律。厚煤区位于东南部的阳城—晋城、屯留一带和西北部的介休附近，其厚度大于 5 m，而在北部的沁县—榆社、西北部的灵石和西南部的临汾—古县—安泽一带煤层厚度较薄，仅有 1～2 m。全区煤厚变化总体趋

165475

势是东南部厚而向西北方向逐渐变薄(见图 1-5)。

表 1-2　　山西南部石炭- 二叠系主要煤层对比表

年代地层	岩石地层	前人编号		本书编号	
		沁水煤田	霍西煤田	主要目的层	编　号
二叠系下统	山西组	3	2	上主煤层	H_4
			3		H_4
石炭系上统	太原组	7	5		H_7
		8			H_8
		9	6		H_9
		12	7		H_{12}
		13	8		H_{13}
		15	9，10，11	下主煤层	H_{15}

上主煤层的煤层结构从简单到复杂，霍州、武乡矿区煤层结构简单，无夹矸或偶见一层夹矸，其厚度小于 0.1 m，其它地区相对复杂。一般来说，夹矸层数和厚度随煤厚而变化，在厚煤区常见 2～5 层，而襄汾—翼城—沁源一线西北多为 2 层。夹矸厚度为 0.05～0.20 m，其成分多为高岭石泥岩和碳质泥岩。煤层顶板多为泥岩，少数为细—粉砂岩或砂质泥岩。

2. 下主煤层

下主煤层(H_{15})位于太原组下部，由煤分层、泥岩分层和砂岩分层或砂体复合体构成，该煤层以全区发育的 K_2 石灰岩为直接顶板。在不同地段，下主煤层包含的煤分层数目和分层厚度有所变化。在南部的襄汾—沁水—晋城—长治一线和东北部的武乡—榆社一带，下主煤层为一复杂结构的单一煤层，其它地区由于线状砂体或周围砂、泥加入，均分为 3 个煤分层，在霍西煤田自上而下为 9 号、10 号和 11 号煤层，在沁水煤田潞安矿区一带分别为 15-1 号、15-2 号和 15-3 号煤层(甚至包括 14 号煤层)。考虑到下主煤层的分叉合并现象、煤分层发育程度、可采性以及分层间距较大等因素，分别将下主煤层的主分层(10 号煤层或东部的 15-3 号煤层)与若干矿区发育的单一煤层对比而作为本次研究的主煤层。

下主煤层全区稳定可采，厚度为 1.0～7.0 m，煤厚变化呈现南北厚、中部薄的趋势，且西北部厚度大于东南部。煤厚在南部襄汾—沁水—晋城一带为 2.0～6.0 m，在北部介休—榆社一线为 3.0～7.0 m，在中部(安泽、良马一带)一般小于 2.0 m，煤厚分带近东西向展布(图 1-3)。全区煤层结构简单—复杂，在一近 NE 向展布带区(翼城—古县—沁源中南部—襄垣)内，该煤层结构简单；该带以北下主煤层含夹矸 1～5 层，夹矸厚 0.03～0.19 m，岩性多为伊利石泥岩和碳质泥岩；该带以南的沁水—晋城—高平一带，含夹矸 3～6 层，夹矸厚度为 0.01～0.12 m，最厚可达 0.23 m，岩性为泥岩。

下主煤层直接顶板为 K_2 石灰岩，伪顶为碳质泥岩，厚度全区不一。

3. 其它煤层

(1) H_4 煤层

H_4 煤层系指霍西煤田 3 号煤层和古县—沁源矿区 3 号煤层，距上主煤层 5.0～15.6 m，发育于山西组底部 K_7 砂岩之上。煤层厚度为 0～3.32 m，平均厚 0.87 m，主要发育在襄汾、

翼城、古县、沁源和汾孝等矿区，而在沁水煤田大部分地区缺失或极薄。该煤层含夹矸 0～2 层，多为简单煤层，局部可采，顶板多为粉砂岩，少数为砂质泥岩。目前，仅有介休矿务局的高阳矿开采此煤层。

(2) H_9 煤层

H_9 煤层系指霍西煤田 6 号煤层和沁水煤田 9 号煤层，位于太原组中部 K_4 石灰岩之上，在侧向上断续分布，厚度为 0～2.44 m，平均厚 1.02 m。主要分布于霍州、灵石、武乡、高平、晋城、阳城、古县和沁源等矿区，为局部可采煤层。该煤层仅在晋城矿区可见 3 层夹矸。煤层顶板多为粉砂岩，少数为砂质泥岩。该煤层距山西组底部煤层 15.5～53.0 m，间距在东部地区较大。

(3) H_{12} 煤层

H_{12} 煤层系指霍西煤田 7 号煤层和沁水煤田 12 号煤层，全区发育的 K_4 石灰岩为其直接顶板。煤层分布面积较广，除沁水、阳城、晋城、长治等矿区外，其它地区均可见到该煤层。煤层厚度为 0～2.5 m，平均为 0.41 m，局部地区分为两层。该煤层在灵石、武乡等地为局部可采煤层，大多数地区薄而不可采。煤层结构简单，距 H_9 煤层 13.0～34.0 m。

(4) H_{13} 煤层

H_{13} 煤层系指霍西煤田 8 号煤层和沁水煤田 13 号煤层，太原组 K_3 灰岩为其直接顶板。主要分布于霍西煤田和古县 沁源一带。煤厚 0～1.0 m，平均厚 0.48 m。煤层向东尖灭或局部发育，仅个别地点可采。煤层结构简单，距下主煤层 15.0～32.0 m。

二 煤质

山西南部石炭—二叠系煤的煤级范围极宽，从肥煤至无烟煤均有产出，主要煤层的煤质分析结果见表 1-3 所示。

表 1-3　　山西南部上古生界煤层煤质汇总表

地区	煤层和测试结果																			
	H_3					H_9					H_{13}					H_{15}				
	A_d	V_{daf}	S_{td}	C_{daf}	H_{daf}	A_d	V_{daf}	S_{td}	C_{daf}	H_{daf}	A_d	V_{daf}	S_{td}	C_{daf}	H_{daf}	A_d	V_{daf}	S_{td}	C_{daf}	H_{daf}
介休	19.4	22.7	0.40	89.9	4.92	26.1	22.5	1.61	89.5	5.20	14.8	22.1	1.83	89.4	4.93	18.2	17.4	3.87	89.7	4.45
灵石	19.0	37.5	0.42	86.1	5.71	26.8	—	2.09	—	—	24.2	36.2	1.78	—	—	30.7	34.3	1.88	86.3	5.36
霍州	18.1	31.4	0.33	87.6	5.02	24.3	32.3	2.58	86.8	5.18	31.5	33.7	1.47	86.0	5.63	22.4	33.6	3.45	85.4	5.07
襄汾	18.7	16.6	0.46	89.9	4.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25.8	16.1	2.96	88.8	4.43
翼城	19.5	14.3	0.45	91.4	4.18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18.3	12.1	4.28	89.1	3.72
沁水	18.9	9.7	0.44	92.6	3.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20.0	11.6	3.35	90.4	3.80
沁源	16.6	18.4	0.47	90.5	4.65	24.9	17.8	1.54	—	—	20.6	17.5	3.61	—	—	17.7	17.2	3.42	89.4	4.35
阳城	13.8	6.9	0.40	93.2	3.04	17.6	5.8	3.92	—	—	—	—	—	—	—	14.2	5.7	2.70	92.1	2.85
晋城	13.6	7.0	0.35	93.0	3.09	19.0	6.9	3.18	—	—	—	—	—	—	—	17.4	6.6	2.53	93.4	2.98
屯留	16.6	12.5	0.31	91.4	4.23	27.1	13.7	2.66	90.9	4.34	16.2	12.3	2.46	91.5	3.98	27.9	14.4	3.61	90.8	3.97
武乡	20.8	13.2	0.47	80.4	4.72	25.0	17.0	3.00	—	—	—	—	—	—	—	23.1	13.1	2.08	90.8	3.50

在研究区范围内，原煤平均灰分产率(A_d)为 13.60%～31.47%，主要煤层平均灰分产

率在垂向上具有明显的分布规律，在横向上的分布特点亦不相同。上主煤层平均灰分产率为13.60%～20.80%，在南部和东部普遍低于20.0%，向西北方有逐渐增高的趋势，最高可超过35.0%。下主煤层平均灰分产率为14.19%～30.67%。上、下主煤层的灰分产率呈近东西向带状展布，临汾—阳城—晋城一带低于20.0%，此带以北灰分产率增高。

研究区平均挥发分产率(V_{daf})为6.64%～37.47%。尽管区内挥发分产率变化较大，但在同一地区随煤层埋藏深度的增加而降低，在空间上具有南低北高和东低西高的分布趋势。在南部和东部地区，平均挥发分产率处于5.0%～15.0%之间，仅局部地区(如屯留一带)稍高。在襄汾—沁水—阳城—晋城一带一般小于10.0%。沁源—古县—临汾一线及其以北地区挥发分产率增高，一般在20.0%～35.0%之间。挥发分产率低值带呈东西至北东向展布，高值区(霍州—灵石一带)大体近北西向带状分布。在西南部襄汾—翼城地区，挥发分产率等值线呈环带状分布，这与燕山期岩浆岩体有关。其它煤层的挥发分产率也有相似的分布特点(杨起等，1988)。

煤中硫分含量的高低受成煤环境的影响。由表1-3可知，研究区主要煤层硫含量在横向上分布规律性不甚明显，但在垂向上分布规律全区一致，即下部煤层的硫含量普遍高于上部煤层。就主煤层来说，上主煤层全硫含量低于1.0%，平均为0.31%～0.47%；下主煤层全硫含量大于1.0%，变化于1.88%～4.28%之间。

煤中碳含量(C_{daf})和氢含量(H_{daf})与煤级有关。上主煤层的平均碳含量为86.12%～93.23%，下主煤层的碳含量为85.39%～93.37%，垂向变化不明显，但横向分布皆有一定变化趋势。东部和南部地区主煤层的碳含量较高，一般大于90.0%，在阳城—晋城一带达93.0%以上；西北部地区相对较低，一般为85.0%～90.0%。其它煤层的碳含量亦有相似的分布趋势。上主煤层的平均氢含量为3.04%～5.71%，下主煤层的平均氢含量为2.85%～5.36%，在垂向上随埋深增加而降低，在横向上皆表现为自东南向西北方向氢含量增高。

第四节　构造及其控煤作用

一　区域构造格架及其演化

研究区位于吕梁—太行断块西南部，西部以离石大断裂为界与鄂尔多斯断块的兴县—石楼褶皱带和关王庙褶皱带相接，西南部以中条山山前断裂和横河断裂为界与豫皖断块的中条山断隆毗邻，东部以晋获大断裂(太行山断裂)为界与太行山块隆搭界(图1-7)。

吕梁—太行断块占据山西南部的大部分地区，霍山山前断裂和晋获断裂将其切割成三条北北东向的长条形地块，总体表现为东西隆起、中间坳陷。西部为吕梁山隆起，其北部主要由吕梁期花岗岩和前吕梁期混合花岗岩构成，西侧沿离石断裂构造较为复杂，发育一系列断层和褶皱，东侧构造较为简单，总体上为一盆状复向斜(霍西煤田)。中部为沁水坳陷(煤田)，总体上为一向斜构造，核部出露三叠系，向两翼依次为二叠系、石炭系、奥陶系和寒武系。东部为太行山隆起，其北段主体表现为一大背斜，核部为太古宇、下元古宇变质岩系，两翼主要为长城系—奥陶系，南段总体表现为向西倾斜的单斜构造，其内部发育有南北向、北东向褶皱和逆冲断层。

山西南部大地构造的发展经历了太古代—早元古代的基底发展阶段、中元古代—三叠纪的盖层发展阶段和中新生代的"活化"阶段，早元古代末期的吕梁运动，使包括本区在内的

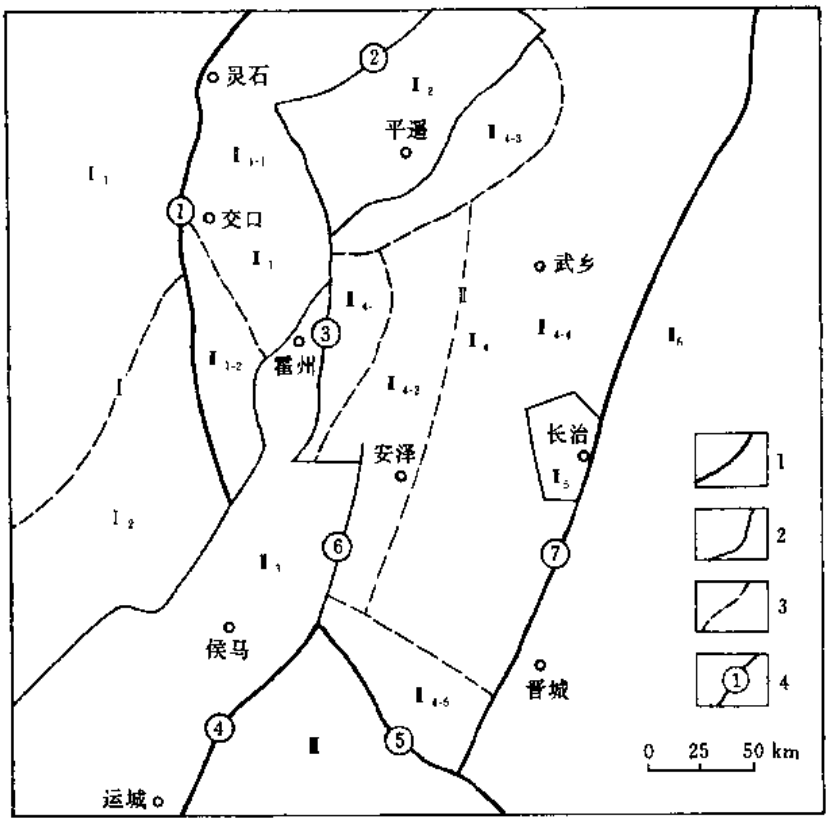


图 1-7 山西中南部构造单元划分示意图

1 ——二级构造单元界线；2——三级构造单元界线；3 ——四级构造单元界线；4 区域大断裂及编号；① 离石断裂；② 交城断裂；③ 霍山山前断裂；④ 中条山山前断裂；⑤ 横河断裂；⑥ 浮山断裂；⑦ 晋获断裂 Ⅰ——鄂尔多斯断块（$Ⅰ_1$——兴县—石楼褶皱带；$Ⅰ_2$——关王庙褶皱带）；Ⅱ 吕梁—太行断块（$Ⅱ_1$——吕梁隆起带；$Ⅱ_{1-1}$——阳泉曲—汾西盆地；$Ⅱ_{1-2}$——勍香—太林褶皱带；$Ⅱ_2$——晋中断陷；$Ⅱ_3$——临汾—运城断陷；$Ⅱ_4$——沁水坳陷；$Ⅱ_{4-1}$ 霍山隆起带；$Ⅱ_{4-2}$ 郭道—安泽褶皱带；$Ⅱ_{4-3}$ 普洞—来远褶断带；$Ⅱ_{4-4}$ 武乡—阳城褶皱带；$Ⅱ_{4-5}$ 西阎—芹池褶断带；$Ⅱ_5$——长治断陷；$Ⅱ_6$——太行山隆起）；Ⅲ——豫皖断块

整个华北地区完全拼合成一个坚硬而稳定的地块，形成了本区的结晶基底。

本区在长城纪开始进入稳定的盖层发展阶段，大部分地区为古陆，发育一系列古裂谷，形成内陆盆地。南部为秦岭古洋的大陆边缘和火山岛弧。北北东向的上党裂谷进一步发展并与秦岭古洋沟通，形成上党海湾。长城纪中晚期，南部抬升，上党海湾与秦岭古洋隔绝而形成内陆海并于长城纪晚期抬升，从而使本区全面遭受剥蚀。蓟县纪早期，海水自北向南注入，在本区准平原化的基础上形成大面积的陆表海。蓟县纪晚期，海域逐渐缩小，最终海水全部退缩到秦岭古洋，使本区再次遭受剥蚀并一直持续到早寒武世。

在震旦纪之后的晋宁运动期间，海水由秦岭古洋向北入侵，使长期遭受剥蚀已准平原化的山西遭受大范围海侵并由南向北超覆。此后，地壳发生多次不均衡升降振荡运动，直到中奥陶世末期，随着北秦岭洋的封闭，本区乃至整个华北大多数地区一起上升为陆地。中石炭世本区遭受了自北而南的海侵，晚石炭世晚期海水开始向南退缩，在早二叠世由晚石炭世的滨海平原转变为近海冲积平原，从此本区脱离海侵环境。

自三叠纪末期的印支运动开始，本区进入一个动荡不定、地壳运动频繁的时代，寒武纪以来统一而稳定的地理地貌景观分化瓦解。燕山早中期，以断裂活动为主，本区被切割成不同级别的断块，断块内普遍发育平缓开阔褶皱，仅在逆冲断裂附近形成较强烈的褶皱。

燕山运动后期挤压断裂作用逐渐减弱，本区出现了断块山和坳陷两种构造单元。自上新世开始，地壳又趋活跃，形成了晋中、临汾和长治断陷盆地，并使霍山和太行山隆起，形成现今的地貌景观。

二　山西南部地质构造

本区被一系列断层切割成不同规模、不同展布方向的断块，在各期区域构造应力场的作用下，各断块具有不同的边界条件，因而造成各断块内构造的类型、方向和发育程度均不相同(图 1-8)。

1. 勋香—太林南北向褶皱带

该褶皱带位于本区的最西部，属吕梁隆起的南端，总体上为一走向近南北的正弦曲线状复向斜，中间为石炭系、二叠系，两侧以奥陶系为主。带内次级褶皱规模比较小，一般长 4～10 km，两翼平缓，倾角一般在 10°左右。

2. 阳泉曲—汾西盆状复向斜

该复向斜位于吕梁山隆起的南部，分布在孝义县阳泉曲、汾西县及其以南，构成著名的霍西(汾西)煤盆地。总体呈 NNE 向展布，长约 140 km，宽约 45 km，总体表现为一复式向斜。中部为二叠系含煤地层，两侧为石炭系和奥陶系。地层产状平缓，倾角一般为 10°～15°。向斜内部发育有 NE 向、NW 向、NNE 向、SN 向及 EW 向次级褶皱，主要分布在盆地的四周，其中 NE 向和 NW 向褶皱规模较大；另外，向斜内还发育少量近 EW 向正断层。

3. 霍山隆起带

霍山隆起带位于沁水坳陷的西缘，南北长约 90 km，东西宽约 20～30 km。带内的地层西翘东倾，倾角一般为 20°～25°，自西向东依次出露前寒武系、寒武系、奥陶系和石炭系。该隆起带内褶皱不太发育，仅在断层附近形成一些牵引褶皱，主要发育数条纵向逆冲断层。正断层在北段走向北偏西 5°左右，中段近 SN 向，南段 NNE 向，总体为一向东突出的弧形构造。它们大都倾向西，倾角较大。断裂带内发育有擦痕、碎裂岩、构造透镜体和牵引褶皱等构造，反映上盘向东逆冲。西缘为霍山大断裂，总体走向近 SN，长约 60 km，在犁湾附近被近 EW 向断层切割成两段。北段主断面倾向东，中生代表现为向西逆冲，使东盘太岳山群混合片麻岩逆冲到西盘寒武系—奥陶系之上，断距大于 1000 m。南段主断面西倾，新生代活动强烈，上盘明显下降。

4. 郭道—安泽南北向褶皱带

该褶皱带位于沁水坳陷西部，总体走向 NNE，南北长约 140 km，东西宽 20 km，主要出露地层为石炭系、二叠系和下三叠统。其内褶皱走向近 SN(NE 5°～10°)，密集成群排列，单个褶皱规模较小，长度一般为 3～10 km，宽约 2～3 km，影响深度为 1～3 km。西侧褶皱的两翼倾角比较大，一般为 10°～40°，轴面东倾；东侧褶皱两翼倾角较小，一般 10°左右，轴面近于直立。

该褶皱带内断层不发育，仅在南北两端发育近 SN 向、NNE 向断层。北端主要为逆断层，规模小、倾角大；南端在旧县—隆化一带发育有平行于临汾断陷边缘断层的正断层，其绝大多数西倾，在剖面上构成书斜式组合。

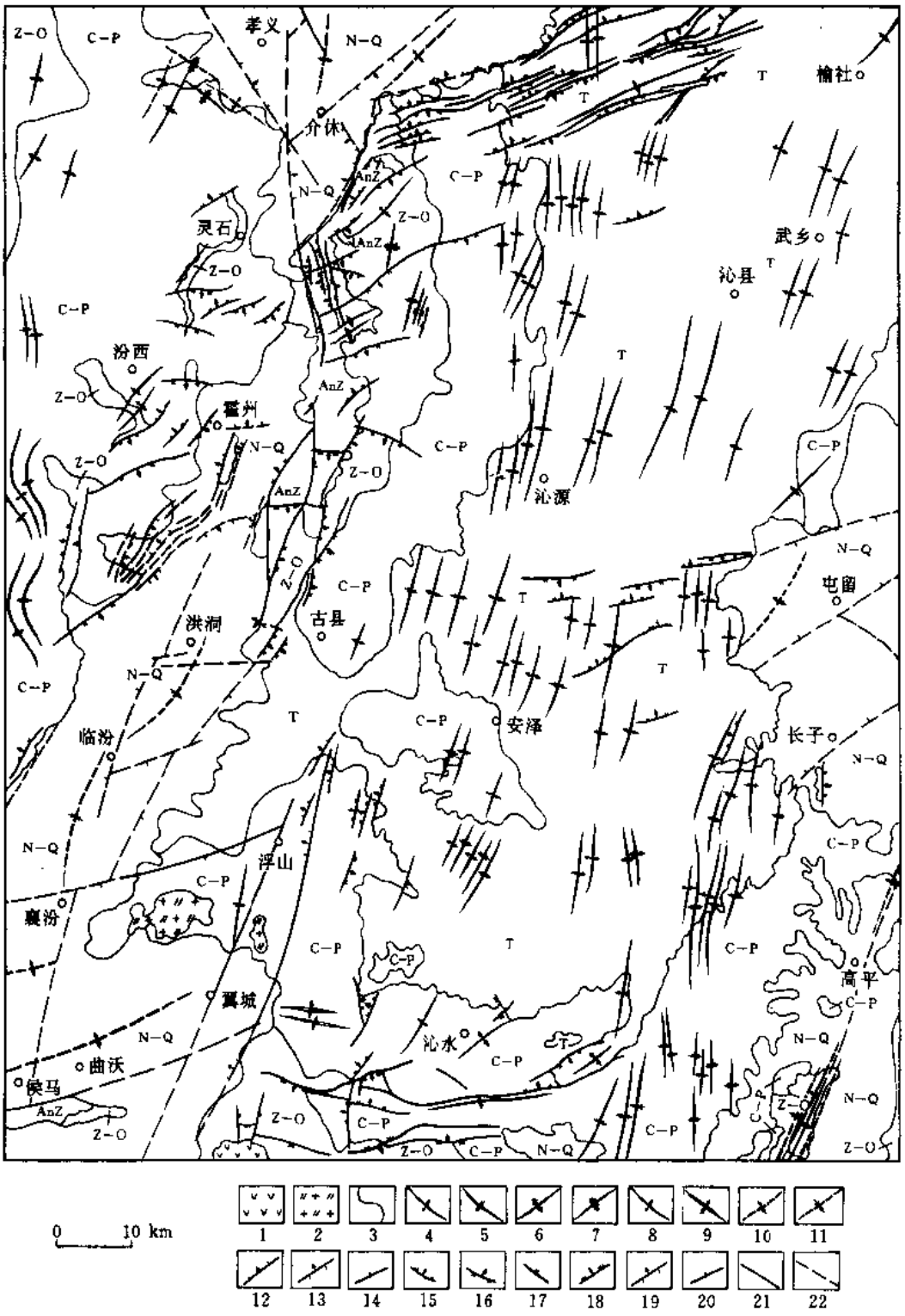


图 1-8 山西南部构造纲要图

1——长城—震旦系火成岩；2——燕山期中酸性侵入体；3——地层界线；4——喜马拉雅期背斜轴；5——喜马拉雅期向斜轴；6——燕山期背斜轴；7——燕山期向斜轴；8——印支期背斜轴；9——印支期向斜轴；10——隐伏背斜轴；11——隐伏向斜轴；12——喜马拉雅期正断层；13——喜马拉雅期逆断层；14——喜马拉雅期性质不明断层；15——燕山期正断层；16——燕山期逆断层；17——燕山期性质不明断层；18——印支期正断层；19——印支期逆断层；20——印支期性质不明断层；21——时代不明断层；22——隐伏断层

5. 普洞—来远北东东向褶断带

该褶断带位于沁水坳陷的北部，总体走向NEE，长约80 km，宽约30 km，出露地层为奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系和少量中侏罗统，总体上从西到东地层由老到新。褶断带构造极为复杂，NEE向的褶皱和断层呈多字形密集斜列。主体褶皱为走向70°～80°的开阔背斜和紧闭向斜，剖面上形似"隔槽式"褶皱。主干断层规模大，走向与褶皱轴一致，大多出现在向斜核部，呈地垒或地堑式，平面上可划分为三个断裂密集带。断层紧闭有擦痕，断层带内发育有断层泥、构造透镜体和牵引褶皱，反映断层曾发生过逆冲走滑运动。

6. 武乡—阳城北北东向褶皱带

该褶皱带位于本区东部，带内主要出露二叠系、三叠系和少量石炭系。褶皱带由一系列NNE向不同级别的褶皱组成，向斜宽阔，背斜相对较窄，两翼倾角一般为10°左右，褶皱规模较大，一般长10～30 km。在屯留县张店乡、沁水县固县镇一带还发育有SN向褶皱群，其规模一般较小，两翼很缓，倾角一般不超过10°。该带内西南边缘还发育有NW向次级褶皱，这些褶皱规模较小，叠加在NNE向褶皱之上。在襄垣县五阳乡—屯留县张店乡—安泽县罗云乡一带，还发育有NNE向断层，其倾角较大，表明曾发生平移运动。

7. 西阎—芹池近东西向褶断带

西阎—芹池褶断带位于沁水坳陷的南缘，东西长约50 km，西部宽25 km，东部宽10 km，出露寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系。主要由一系列近EW向断层及其旁侧发育的与之平行的褶皱构成，主干断层规模较大，一般长20～40 km，倾角一般为65°～80°，常被NNE向或NW向断层切割，断距一般为300～600 m。根据断层带内发育的构造岩、构造透镜体、流劈理、擦痕和牵引褶皱分析，该主干断层发生过逆冲运动，而从其切割地层及旁侧发育的与之平行的小正断层判断，也发生过正断运动。

8. 晋中断陷盆地

晋中断陷盆地位于榆次—孝义一带，地貌上表现为平行四边形，四周被断裂所围限。西北侧主要以交城大断裂为界，东南侧以洪山—范村锯齿状断裂为界，西侧以三泉断裂为界，北东侧以榆次—北田断裂为界。断陷盆地总体呈NE向延伸，长105 km，宽40 km，叠加于吕梁块隆、五台块隆和沁水块坳之间。基底大部分为三叠系，局部为二叠系、石炭系、奥陶系、寒武系及前长城系，个别地段有侏罗系和燕山期石英二长岩体。断陷盆地充填物为上新统至全新统。

该断陷盆地主体为向NE掀斜的箕状断陷，断陷内发育一系列与边缘断层平行的SE向倾斜的断层。由于这些断层的切割，基底呈北西深、南东浅的不对称地堑型断陷盆地。南东侧基底埋深一般为200～400 m，中部和北西侧基底埋深一般在2000 m以上。

9. 临汾断陷盆地

临汾断陷盆地位于本区的西南部，地貌上表现为一第四系覆盖的并有一些孤山的盆地。东界为霍山山前断裂和浮山断裂，北西界为范家庄—土门断裂，南部在稷山—侯马一线与运城盆地相连，横跨鄂尔多斯断块、吕梁—太行断块（包括吕梁块隆和沁源块坳）和豫皖断块，总体走向NNE，向南逐渐转为NE—NEE向，区内长150 km。基底总体上南老北新，南端为前长城系变质岩，向北东为寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系，局部有三叠系和侏罗系，盆地沉积自上新世开始，中心为河湖相，边缘以河流相沉积为主。

基底断裂将盆地切割成一系列次级断隆和断凹，在剖面上呈地垒和地堑式构造。在洪洞

附近一组近 EW 向断裂将盆地分成两段，北段窄且浅，南段宽且深。盆地边缘正断层往往是在中生代逆冲断层的基础上发展起来的。

10. 长治断陷盆地

长治断陷盆地位于本区的东部，东缘为晋获大断裂，基底地层为奥陶系、石炭系、二叠系和三叠系，自东向西逐渐变新，其内充填物为上第三系至第四系全新统。盆地东深西浅，最深达 200 m，大致位于长治市附近，在剖面上为向西逐渐掀斜的箕状或半地堑式构造。

三　地质构造的控煤作用

加里东运动使本区总体上升遭受剥蚀，并形成 NE 向大型隆起带和凹陷带。全区经历了剥蚀、夷平和准平原化，为晚古生代含煤建造的沉积及聚煤作用创造了有利条件。石炭纪至二叠纪早期发生区域性差异升降，先后形成了石炭—二叠系煤层，二叠纪晚期至三叠纪的大幅度下沉使得煤层得以普遍保存。印支运动期间地壳缓慢抬升，三叠纪末本区处于隆起状态并广泛遭受剥蚀。燕山运动使本区形成 NNE 向的大型隆起和凹陷，并与区域上 EW 向隆起和凹陷叠加，在隆起部位煤系被剥蚀，在凹陷部位（如沁水盆地、霍西盆地）煤系得以保存。新生代喜马拉雅运动继续影响山西南部，形成了一系列 NNE 向断陷盆地，使得在断陷盆地内（如晋中盆地、临汾盆地）煤系得以保存，断陷盆地间则相对隆起并发生剥蚀（霍山隆起），石炭—二叠系煤层遭受到不同程度的破坏。另外，区域内一些小型断层、褶皱对于煤层的分布也有一定的影响。

第二章　区域构造应力场及其动力学

煤层气的开采地质条件与构造应力场特别是现代构造应力场有着十分密切的关系，古构造应力场往往也对地质历史时期中煤层气的聚集和逸散具有关键性的影响。因此，构造应力场的研究在煤层气的资源评价和开采地质条件分析等方面具有十分重要的意义。

第一节　构造应力场的研究方法

古构造应力场是指第四纪以前的构造应力场，需在区域地质、矿井地质调查和构造形迹野外观测统计等工作的基础上，运用地质分析、数值模拟等方法加以反演和恢复。现代构造应力场的确定主要依据现代构造应力实测结果、尤其是地震台网长期积累的观测资料。

构造应力场研究的一般工作程序如图 2-1 所示。构造应力场模拟和反演的流程如图2-2所示。

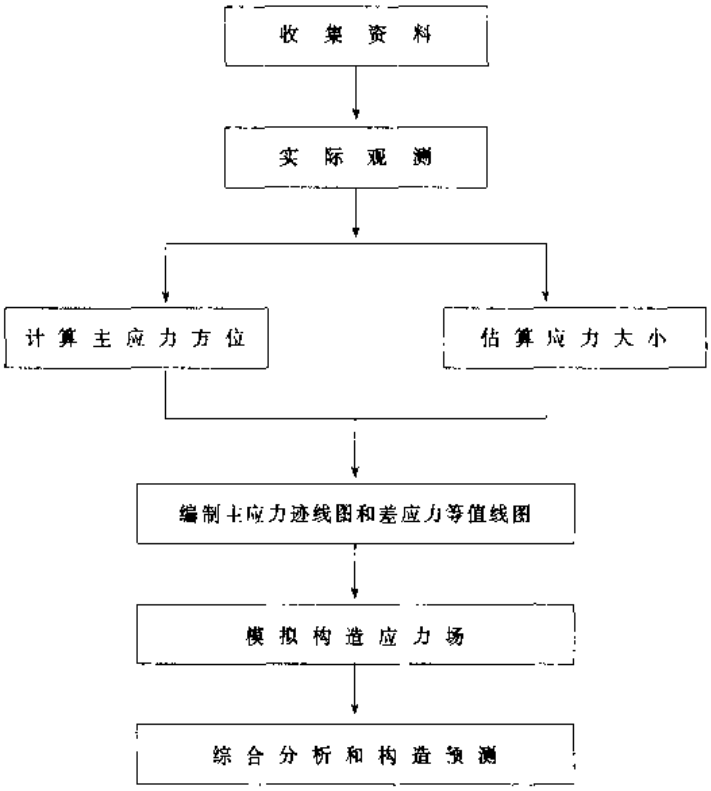


图2-1　构造应力场研究的流程图

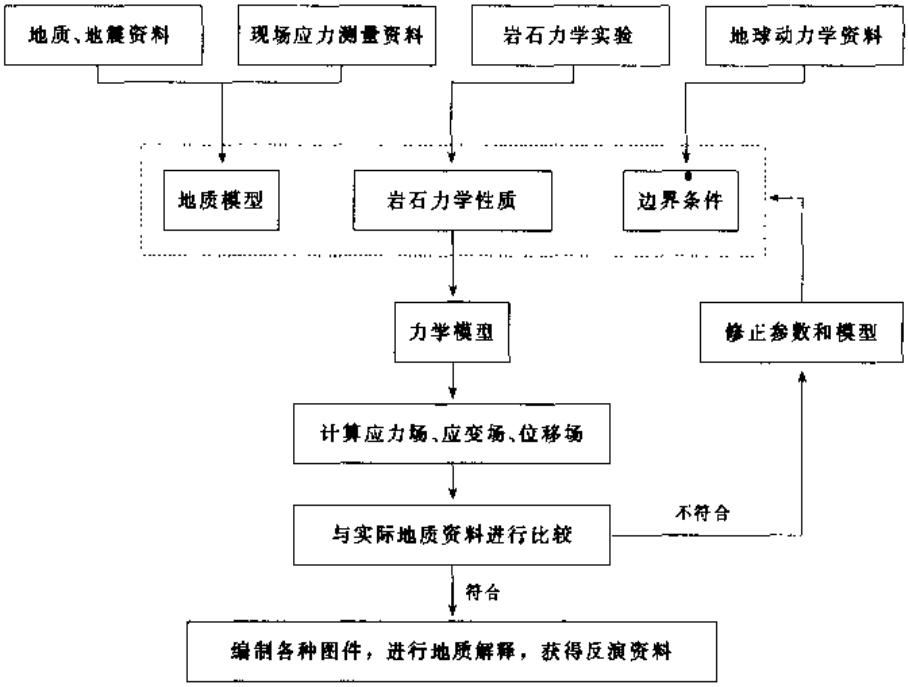


图2-2　构造应力场模拟反演流程图

第二节　中生代构造应力场特征

一　中生代区域地壳运动及构造层划分

山西南部自印支运动以来经历了多期构造运动。根据区域地层接触关系、沉积建造和岩浆活动特征，并结合区域大地构造背景及其演化，可将本区震旦系—第四系划分为五个构造层(见表 2-1)。

二　中生代构造应力场的特征

山西南部在中生代经历了印支运动、燕山运动和早期的喜马拉雅运动，每次构造运动都相应地产生一系列褶皱、断层和节理。通过对这些褶皱和断层的特征、构造样式和组合规律的分析以及对节理的分期配套研究，可恢复本区各期构造应力场的特征。

(一) 纵弯褶皱反映的构造应力场

纵弯褶皱是在侧向压应力作用下岩层弯曲变形而形成的。在通常情况下，纵弯褶皱的轴面与区域构造应力场中最大主压应力(σ_1)轴垂直，其枢纽平行于中间主应力(σ_2)轴，最小主压应力(σ_3)轴位于轴面内且垂直于枢纽。

本区的第一构造层(Z—T)广泛发育一系列纵弯褶皱。这些褶皱的规模、形态、样式和强度有比较显著的差异，据此可分为近东西向—北东东向、北北东向、北西向和近南北向四套褶皱。

近东西向—北东东向的褶皱，仅发育于研究区南部和北侧的阳曲—孟县东西向断隆带上，从而形成南北两个近东西向展布的褶皱带。这套褶皱在侏罗系中不发育，如在晋北大同和宁武—静乐的侏罗纪盆地内仅发育北北东向褶皱和与之平行的逆冲断层以及北西向的正断层。因此，近东西向褶皱构造形成于印支运动，反映印支期近南北方向的水平挤压应力场。

表 2-1　　山西南部及邻区中新生代构造层划分简表

构造层	地层	岩相与建造	构造形变	应力场期次	应力方向
		裂陷碎屑岩建造	裂　　陷		
Ⅵ	N～Q	喜马拉雅运动中晚期：区域性角度不整合 岩浆活动：陆相玄武岩		Ⅳ	NWW－SEE 向伸展
Ⅴ	E	蒸发岩建造 红色碎屑岩建造	裂　　陷		
		喜马拉雅运动早期：角度不整合 岩浆活动：玄武岩		Ⅲ	NE－SW 向挤压
Ⅳ	K	红色碎屑岩建造	NW 向褶皱及掀斜裂陷		
		燕山运动晚期：角度不整合 岩浆活动：中酸性及碱性侵入岩			NNW－SSE 向挤压
Ⅱ	J_3	陆相火山岩建造	NNE 向褶皱和逆断层	Ⅱ	
		燕山运动早期：角度不整合 岩浆活动：酸性及碱性侵入岩			NNW－SSE 向挤压
Ⅰ	J_1～J_2	碎屑岩含煤建造	NNE 向褶皱和逆断层		
		印支运动：平行、角度不整合 岩浆活动：中性和碱性侵入岩		Ⅰ	近 SN 向挤压
Ⅰ	Z～T	碳酸岩建造、含煤建造和陆相碎屑岩建造	EW－NEE 向褶皱和逆断层		

北北东向褶皱最为发育，遍布全区，规模较大，一般长 10～30 km，两翼倾角近于相等。自南向北褶皱走向呈规律性变化，南部阳城以南褶皱轴呈北北东—北东向，北部在沁源以北呈北北东向，中部呈近南北向－北北东向。在大褶皱的两翼往往发育一系列次级褶皱，其规模小，易于观察测量，是进行应力场研究的良好标志(图 2-3)。该套褶皱构造反映出燕山期北西西—南东东方向的水平挤压应力场。

北西—北西西向褶皱在本区零星出现，规模较小，一般叠加在北北东向褶皱之上，其变形微弱(图 2-4)，反映出喜马拉雅早期北北东—南南西方向水平挤压应力场。

近南北向褶皱主要集中发育于沁水断坳的槽部，规模较小，往往密集成群排列，影响深度小。西部褶皱轴面倾向东，槽部轴面近于直立，除主干褶皱外还发育许多次级小褶皱(图 2-5)，可能是在新生代太行山与吕梁山隆起时产生的局部北西—南东方向水平挤压应力场的作用下而形成的。

(二) 平面共轭剪节理反映的构造应力场

共轭剪节理在本区分布广泛，易于测量、分期和配套，加之本区构造变形微弱，褶皱和断层不甚发育，故其受局部构造的影响较小。因此，共轭剪节理是恢复本区区域构造应力场的良好标志。

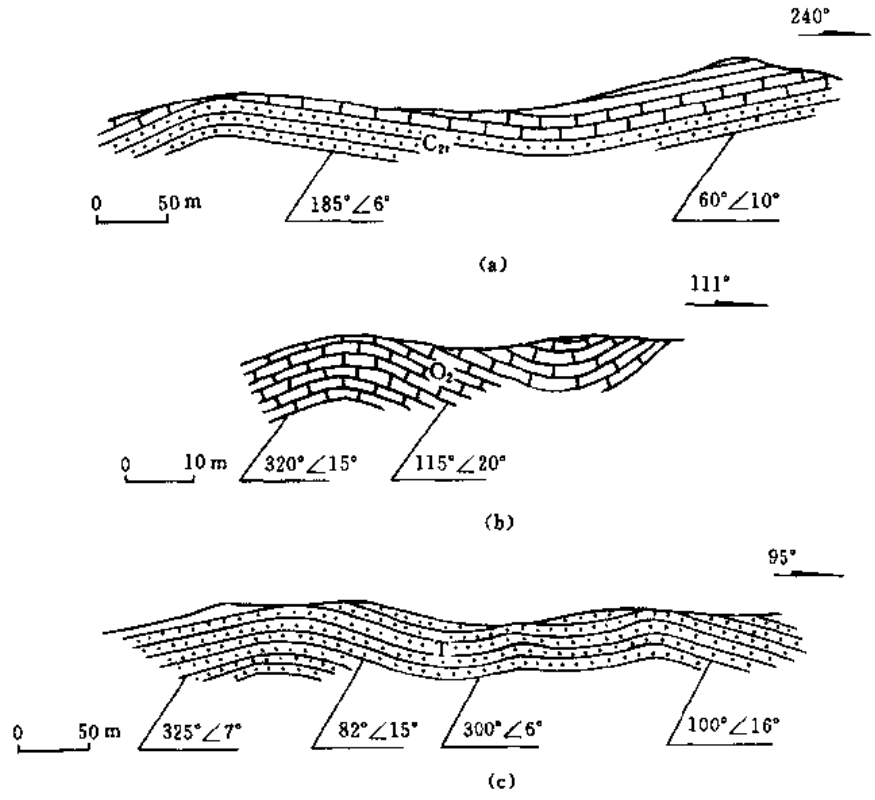


图 2-3 山西南部北北东向小褶皱剖面图

(a) 交口县双池镇 (b) 乡宁县光华镇 (c) 安泽县良马乡

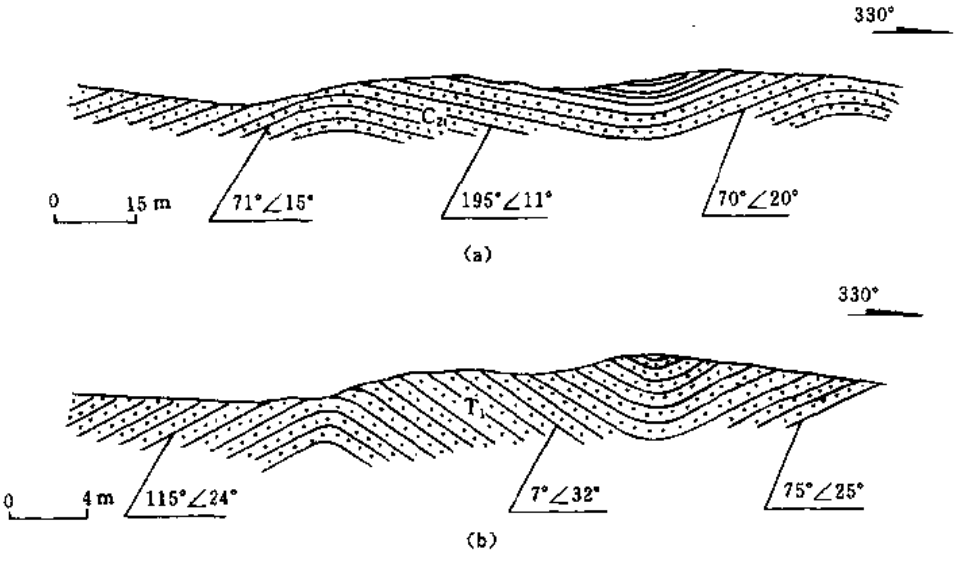


图 2-4 山西南部北西向褶皱剖面图

(a) 汾西县城关镇 (b) 安泽县唐城镇

山西南部大部分地区都发育两套共轭剪节理系。不同地区的节理发育程度不尽相同，有些地区发育四组节理。通过对其充填、切割、限制、发育程度和规模等特征的分析，主要为两

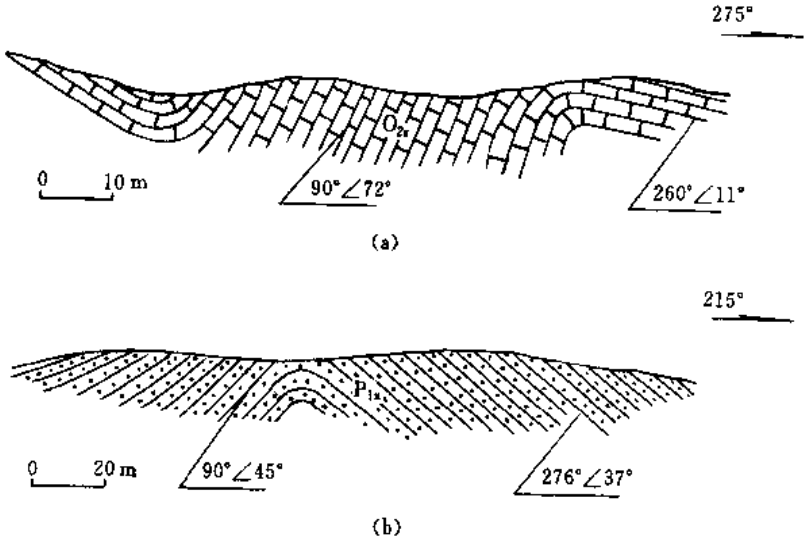


图 2-5 山西南部南北向小褶皱剖面图

(a) 乡宁县光华镇 (b) 灵石县西许乡

套共轭剪节理系，反映两期构造应力场。例如，乡宁县光华镇奥陶系中厚层状灰岩中发育四组剪节理(图 2-6)，其代表性产状分别为 144°∠76°、49°∠87°、344°∠89°和 99°∠89°。第一组节理发育左列羽列现象，反映左旋扭动；第二组节理发育右列羽列，显示右旋扭动；第三组和第四组节理切割前两组节理。第一组和第二组节理规模大、密度小，第三组和第四组节理规模小、密度大，其发育密度互为消长关系。据此分析：第一组和第二组节理为一套共轭剪节理系，反映出近南北方向的挤压应力；第三组和第四组节理为一套共轭剪节理系，反映出北西—南东方向的挤压应力。

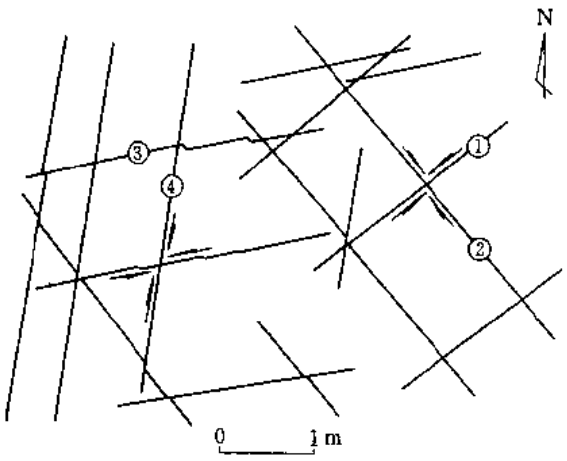


图 2-6 山西南部乡宁县光华镇节理素描图

有些地区发育三组剪节理，根据其充填特征、切割关系和发育程度分析，它们是由晚期形成的节理系利用早期节理系中的一组而形成的。这种情况也可反映两期应力场。如阳城县上白桑乡在太原组灰色厚层状含燧石条带灰岩中发育三组节理(图 2-7)，其代表性产状分别为 194°∠86°、120°∠88°和 252°∠86°。在第一组和第二组节理中都充填有方解石脉，第三组中则没有充填。第二组不太发育，规模也较小，呈左列羽列排列，反映左旋扭动。第一组和第二组相互切割，第三组切割第一组和第二组。因此，第一组和第二组节理为早期共轭剪节理系，反映近南北方向的挤压应力；第二组和第三组为晚期共轭节理系，反映北西—南东向的挤压应力。

有些地区仅发育两组节理。在本区构造变形不太强烈的情况下，一般认为其锐角平分线应对着主压应力方向，而从节理相互错动关系分析，其钝角平分线应对着主压应力方向。这可能是由于在后期应力场作用下完全利用早期节理而形成的。这种情况也可以反映两期构造应力场，但第二期应力场方向可能有些误差。例如，沁水县南窑乡中三叠统紫红色中厚层状细粒砂岩中发育两组节理(图 2-8)，其代表性产状为 50°∠85°和 155°∠87°，锐角平分线朝北西－南东方向，两组节理都呈左旋扭动，运动方向不配套。结合区域构造应力场的特征分析，其锐角平分线对着早期主压应力轴方向，钝角平分线对着晚期主压应力轴方向。

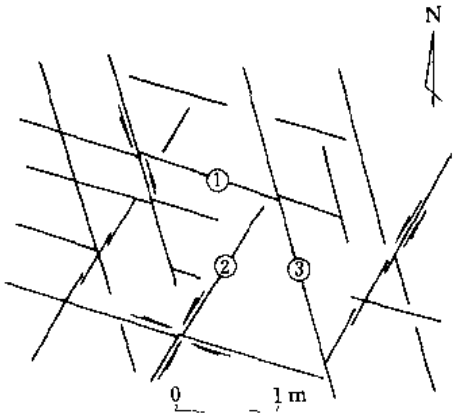


图 2-7　山西南部阳城县上白桑乡节理素描图

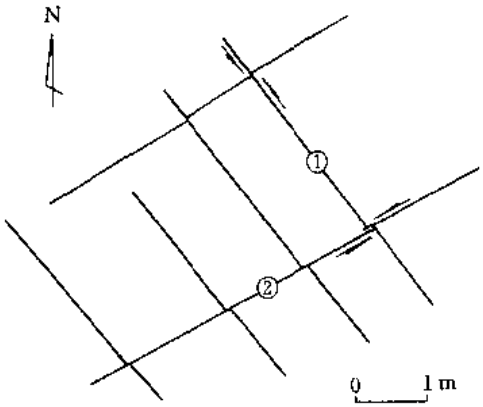


图 2-8　山西南部沁水县南窑乡节理素描图

根据平面共轭剪节理的特征，在本区可划分出三期应力场：第一期为近南北向挤压应力场；第二期为北西西—南东东向挤压应力场；第三期为北东—南西向挤压应力场。这与褶皱构造所反映的应力场是一致的。

（三）燕山期和喜马拉雅早期构造应力场特征

燕山期本区发生过两次明显的构造运动，构造应力场均表现为北西西—南东东方向的水平挤压。而在喜马拉雅早期，构造应力场则表现为北东—南西方向的水平挤压。在这三期构造应力场的作用下，形成了山西南部的主体构造，褶皱、断层和节理遍布全区，因此可对其应力场进行详细的研究。

1. 东部地区构造应力场特征

根据研究区内东部地区 75 个节理统计点共轭剪节理的统计分析结果，本区燕山期构造应力场中最大主压应力(σ_1)轴总体为北西西—南东东方向，最小主压应力(σ_3)轴总体为北北东—南南西方向，倾伏角一般小于 10°，中间主应力(σ_2)轴近直立(图 2-9)。喜马拉雅早期构造应力场中最大主压应力(σ_1)轴总体为北北东—南南西方向，最小主压应力(σ_3)轴总体为北西西—南东东方向，近于水平，中间主应力(σ_2)轴近于直立(图 2-10)。

燕山期构造应力场的主应力迹线呈规律性变化，最小主压应力迹线总体上呈“S”形。在安泽—长子以北呈北北东方向，以南至沁水县城—端氏镇间呈近南北方向，端氏镇以南又呈北北东向，阳城县城以南呈北东向，安泽—沁水以西呈北北东—北东向。最小主压应力迹线方向的变化，与本区北北东向褶皱轴走向的变化基本上是一致的。

喜马拉雅早期构造应力场的主应力迹线亦呈规律性变化，在晋城—沁水以北，最大主压

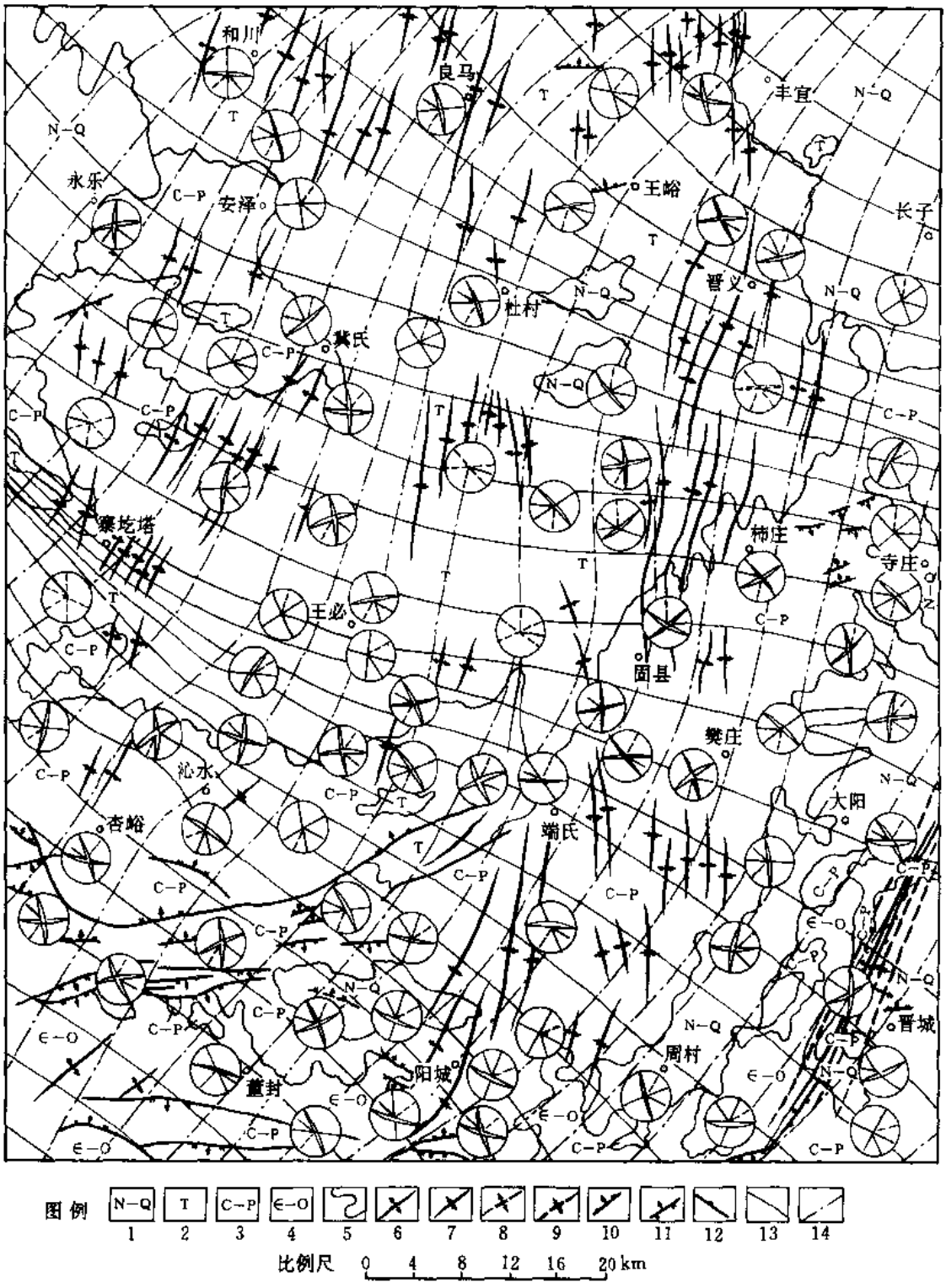


图 2-9　山西南部的东部地区燕山期主应力迹线图

1——上第三系—第四系；2——三叠系；3——石炭系—二叠系；4——寒武系—奥陶系；

5——地层界线；6——背斜轴；7——向斜轴；8——隐伏背斜轴；9——隐伏向斜轴；

10——正断层；11——逆断层；12——性质不明断层；13——最大主压应力迹线；14——最小主压应力迹线

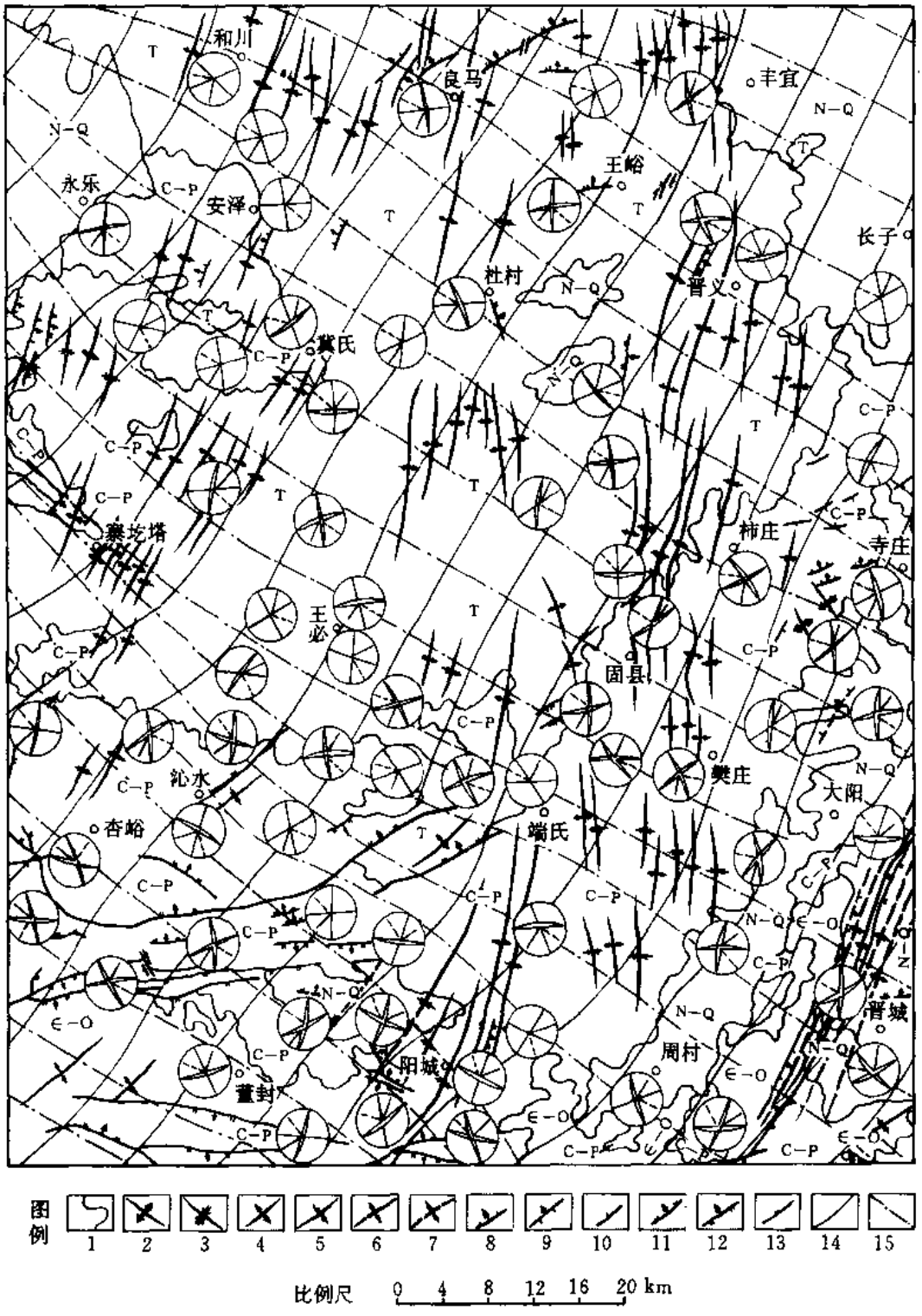


图 2-10 山西南部的东部地区喜马拉雅早期主应力迹线图

1——地层界线；2——喜马拉雅期背斜轴；3— —喜马拉雅期向斜轴；4— 燕山期背斜轴；5 ·燕山期向斜轴；6 ·隐伏背斜轴；7 —隐伏向斜轴；8——喜马拉雅期正断层；9 —喜马拉雅期逆断层；10 喜马拉雅期性质不明断层；11 —· 燕山期正断层；12 —燕山期逆断层；13—— 燕山期性质不明断层；14 —— 最大主压应力迹线；15——最小主压应力迹线

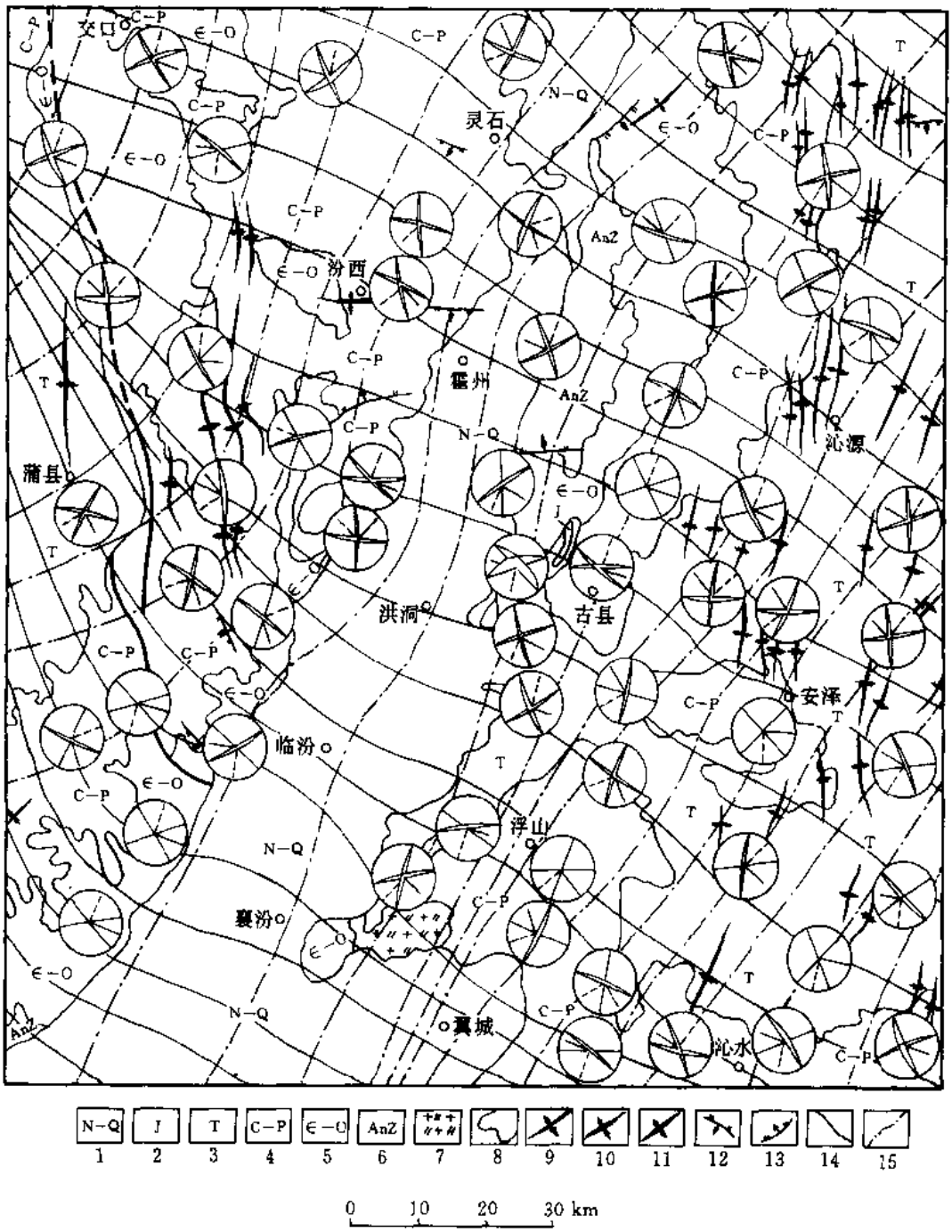


图 2-11 山西南部的中西部地区燕山期主应力迹线图

1— 上第三系—第四系；2——侏罗系；3——三叠系；4——石炭系—二叠系；5——寒武系—奥陶系；6——前震旦系；7——中—酸性侵入体；8——地层界线；9——燕山期背斜；10——燕山期向斜；11——印支期背斜；12——逆断层；13 —正断层；14— 最大主压应力迹线；15——最小主压应力迹线

应力迹线呈北北东向，以南及安泽—沁水以西呈北东向。

2. 中西部地区构造应力场特征

根据研究区内中西部地区 52 个节理统计点共轭剪节理统计分析结果，本区燕山期最大

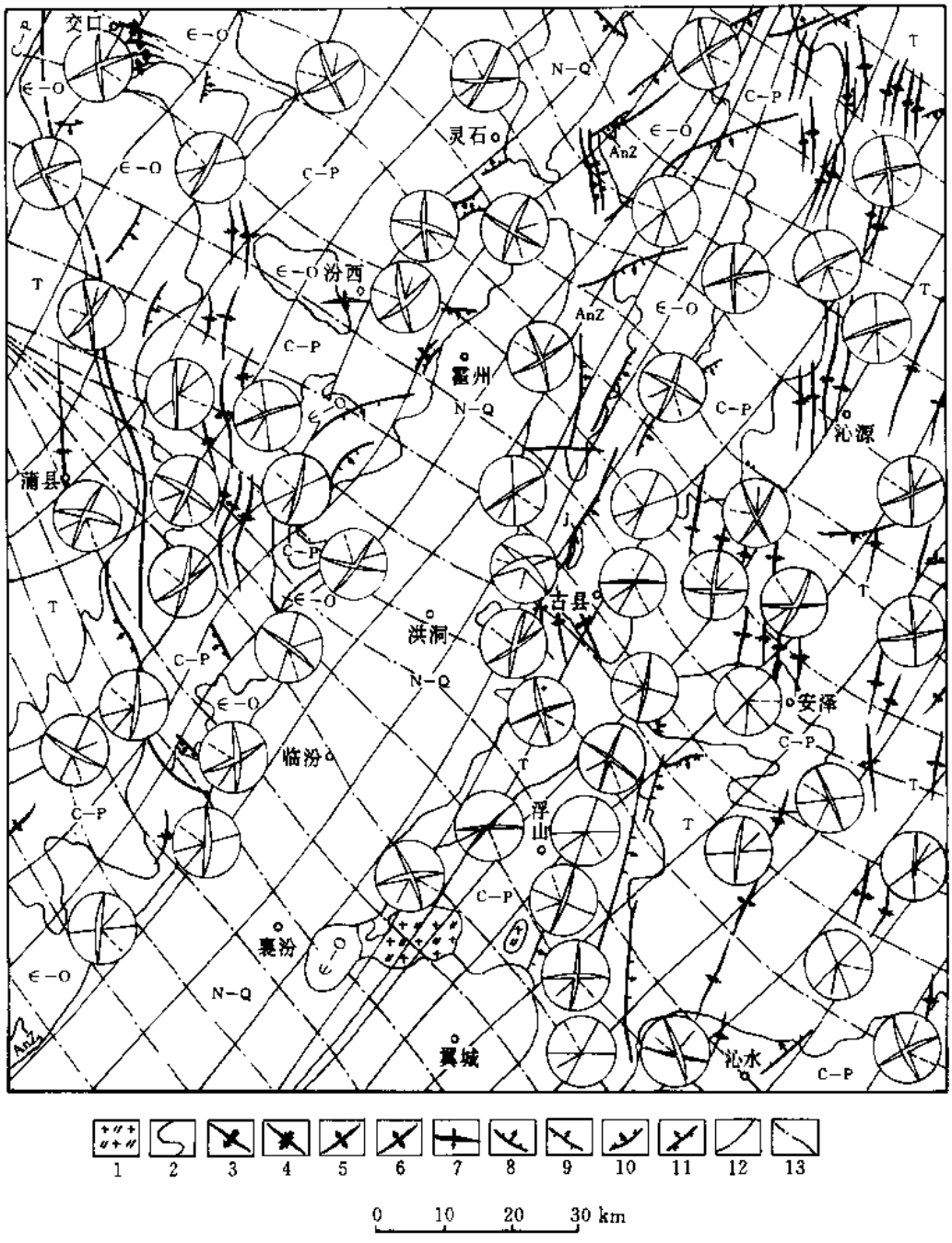


图 2-12　山西南部的中西部地区喜马拉雅早期主应力迹线图

1　燕山期侵入体；2——地层界线；3——喜马拉雅期背斜；4——喜马拉雅期向斜；5——燕山期背斜；6——燕山期向斜；7——印支期背斜；8——喜马拉雅期正断层；9——喜马拉雅期逆断层；10——燕山期正断层；11——燕山期逆断层；12——最大主压应力迹线；13　最小主压应力迹线

主压应力(σ_1)轴总体为北西西—北西方向，最小主压应力(σ_3)轴总体为北北东—北东方向。除少数点外大多近于水平，中间主应力(σ_2)轴近于直立(见图 2-11)。喜马拉雅早期最大主压应力(σ_1)轴总体为北北东—北东方向，最小主压应力(σ_3)轴总体为北西西—北西方向，大多近于水平，中间主压应力(σ_2)轴近于直立(图 2-12)。

燕山期，构造应力场主应力迹线在离石大断裂以东与东部地区相似，最小主应力轴迹线总体呈北北东向，在沁源县以北略向东偏；在离石断裂以西，最小主应力迹线呈北东—北东东向。

喜马拉雅早期，构造应力场最大主应力迹线在离石大断裂以西呈北东—北东东向，在离石断裂以东总体呈北北东向，在安泽县城以南开始西偏，在沁水—翼城一带呈北东向。此外，霍山隆起对主应力迹线走向也有一定影响，在其附近主应力迹线发生弯曲。

山西南部燕山期最小主压应力迹线总体上呈"S"形，北部略向东偏，南部略向西偏。燕山期褶皱枢纽的走向也具有这些特点，喜马拉雅早期主压应力迹线则与此不同。经进一步分析发现，褶皱枢纽与最小主压应力轴迹线的夹角较小，这可能反映该期应力场具剪切性质。山西南部燕山期主压应力轴迹线的这种规律性变化，可能与区域上南北两条东西向构造带有关。

第三节　新构造和现代构造应力场特征

一　新构造应力场特征

在新第三纪以前，山西南部与整个山西断块一起整体处于隆起剥蚀状态。中新世，山西南部的运城盆地作为山西断陷带的一部分开始形成；上新世初，运城盆地进一步发展，临汾盆地和北部的太原盆地也开始形成。与盆地断陷沉降相对应，这一时期的构造应力场表现为强烈的近水平伸展状态。从断层擦痕反演的构造应力张量数据（表 2-2）可以看出：山西南部新构造应力场比较稳定，其总体特征表现为北西—南东或北北西－南南东方向的近水平伸展应力场（图 2-13），主张压力轴近水平，主压应力轴近直立。

表 2-2　　山西南部第四纪构造应力张量

测点号	位　置	σ_3 倾向/倾角	σ_2 倾向/倾角	σ_1 倾向/倾角
1	太谷范村	SE/近水平	NE/近水平	SW/近直立
2	太谷神井村	SE/近水平	NE/近水平	SW/近直立
3	文水章多村	SE/近水平	SW/近水平	NE/近直立
4	霍州秦家岭	SSE/近水平	SWW/19°	NNE/近直立
5	霍州郭庄、圣佛	NWW/近水平	SW/近水平	NE/近直立
6	洪洞广胜寺李南庄	NW/近水平	SW/近水平	NEE/近直立
7	临汾龙祠峪里村	NW/近水平	SW/近水平	NEE/近直立
8	襄汾安里村	SEE/近水平	NNE/近水平	SSW/近直立
9	侯马西呈阳村	NW/近水平	NE/近水平	SW/近直立
10	河津县北	SSE/近水平	SWW/近水平	NE/近直立
11	解州南娘娘庙	SE/近水平	NE/近水平	SW/近直立
12	夏县南王峪口村	SE/近水平	NE/近水平	SW/近直立

（据谢富仁等，1993）

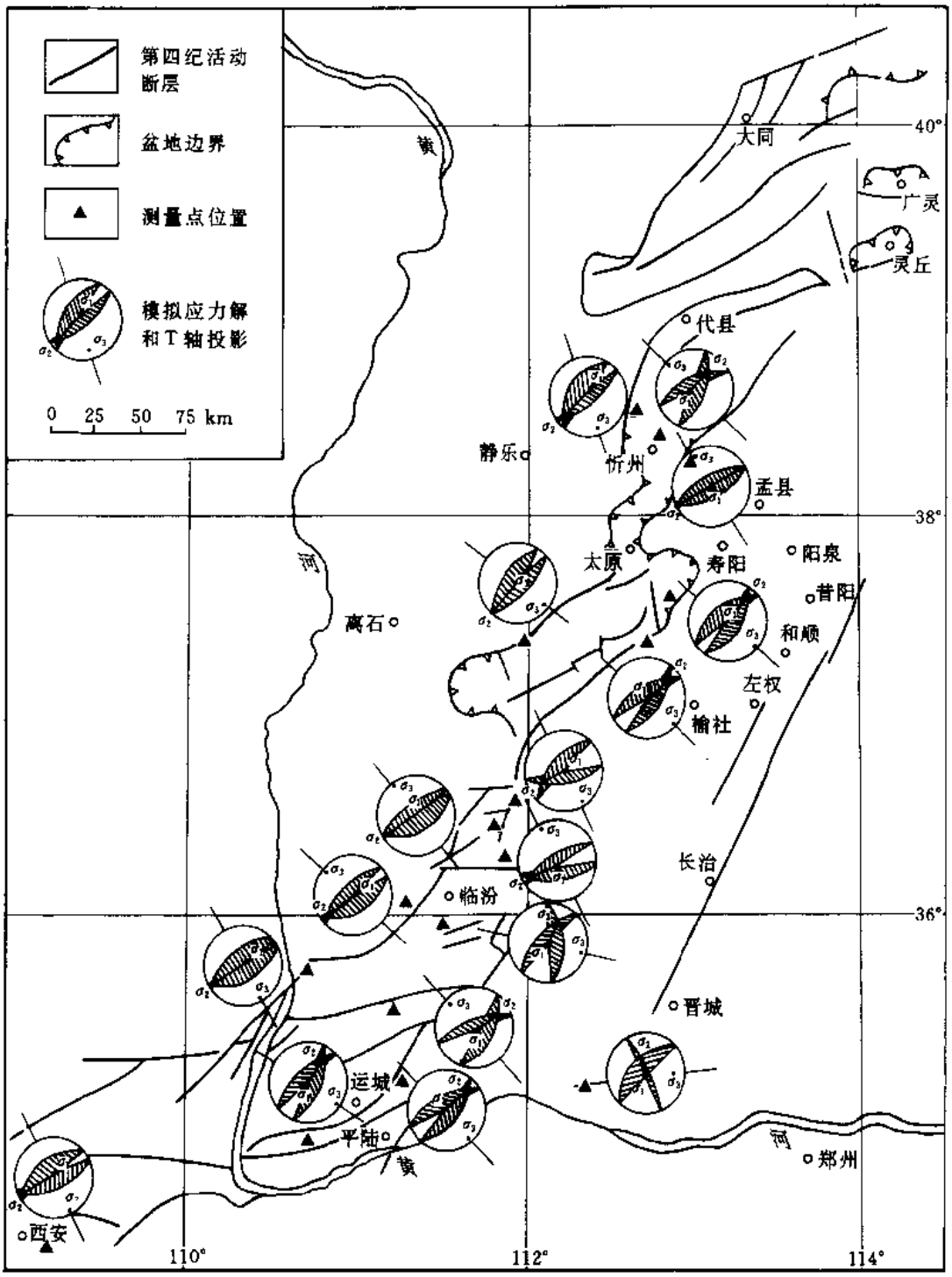


图 2-13　山西南部新生代构造应力场

（据谢富仁等，1993）

二　现代构造应力场特征

1. 主应力方向

根据较大地震震源机制解和分布广泛的小震综合断面解，可有效地推断现代地壳构造

应力场的主应力方向。经分析可得出以下几点结论。

① 太原盆地小震综合断面解：主压应力轴（P 轴）方位为 45°～52°，仰角为 23°～86°；主张应力轴（T 轴）方位为 132°～154°，仰角为 4°～15°。其表现为北西—南东方向至北北西—南南东方向的水平伸展应力场。

② 临汾盆地小震综合断面解：主压应力轴方位为 53°，仰角为 52°；主张应力轴方位为 153°，仰角为 10°。其表现为北西—南东方向的水平伸展应力场。

③ 运城盆地小震综合断面解：主压应力轴方位为 206°～230°，仰角为 38°～60°；主张应力轴方位为 328°～333°，仰角为 10°～18°。其表现为北西—南东方向的水平伸展应力场。

④ 和顺—长治小震综合断面解：主压应力轴方位为 NEE 向，仰角为 10°，近水平；主张应力轴方位为 NNW，仰角为 30°～50°。其表现为 NEE—SWW 方向的近水平挤压应力场。

⑤ 蒲县地区小震综合断面解：主压应力轴方位为 SE，仰角为 25°左右；主张应力轴方位为 NWW，仰角为 47°～55°。应力场以 NNW—SSE 方向的挤压应力为主。

上述震源机制解和小震综合断面解的资料表明，研究区内的东部地区和西部山区表现为挤压应力场。其中，东部地区表现为 NEE—SWW 方向近水平挤压应力场，西部山区以 NNW—SSE 方向挤压应力场为主。而北部、中部和南部地区的现代断陷盆地则均表现为近水平的伸展应力场。伸展应力场中主张应力轴总体呈北西—南东方向展布，仰角较小且较稳定，一般小于 20°；主压应力轴总体呈北东—南西向展布，仰角变化较大，一般为 40°～60°。

2. 应力水平

岩石破裂实验证明，应力降与总的应力水平有关，前者是后者的 10%左右（武烈等，1993；赵新平等，1993）。根据山西南部小震应力降数据（表 2-3，图 2-14），其小震应力降总体变化趋势为东高西低。在阳城、安泽和沁源一带平均应力降最高，可达 11 MPa。此外，侯马

表 2-3　　山西南部小震应力降数据统计表

编号	地点	$\Delta\sigma$/MPa	资料来源	编号	地点	$\Delta\sigma$/MPa	资料来源
1	新绛	0.41	武烈等，1993	15	乡宁	0.76	武烈等，1993
2	介休	1.11	武烈等，1993	16	河津	0.65	武烈等，1993
3	稷山	1.28	武烈等，1993	17	霍州	3.47	武烈等，1993
4	古县	0.02	武烈等，1993	18	襄汾	2.56	武烈等，1993
5	夏县	0.86	武烈等，1993	19	汾西	2.80	武烈等，1993
6	临汾	0.34	武烈等，1993	20	太谷	1.26	武烈等，1993
7	北格	0.75	武烈等，1993	21	祁县	3.10	武烈等，1993
8	浮山	0.16	武烈等，1993	22	安泽	9.34	赵新平等，1993
9	翼城	0.31	武烈等，1993	23	运城	4.79	赵新平等，1993
10	清徐	0.36	武烈等，1993	24	闻喜	0.12	赵新平等，1993
11	灵石	4.37	武烈等，1993	25	沁源	11.82	赵新平等，1993
12	方荣	1.35	武烈等，1993	26	文水	1.05	赵新平等，1993
13	洪洞	0.95	武烈等，1993	27	侯马	6.80	赵新平等，1993
14	太原	0.95	武烈等，1993	28	蒲县	0.66	赵新平等，1993

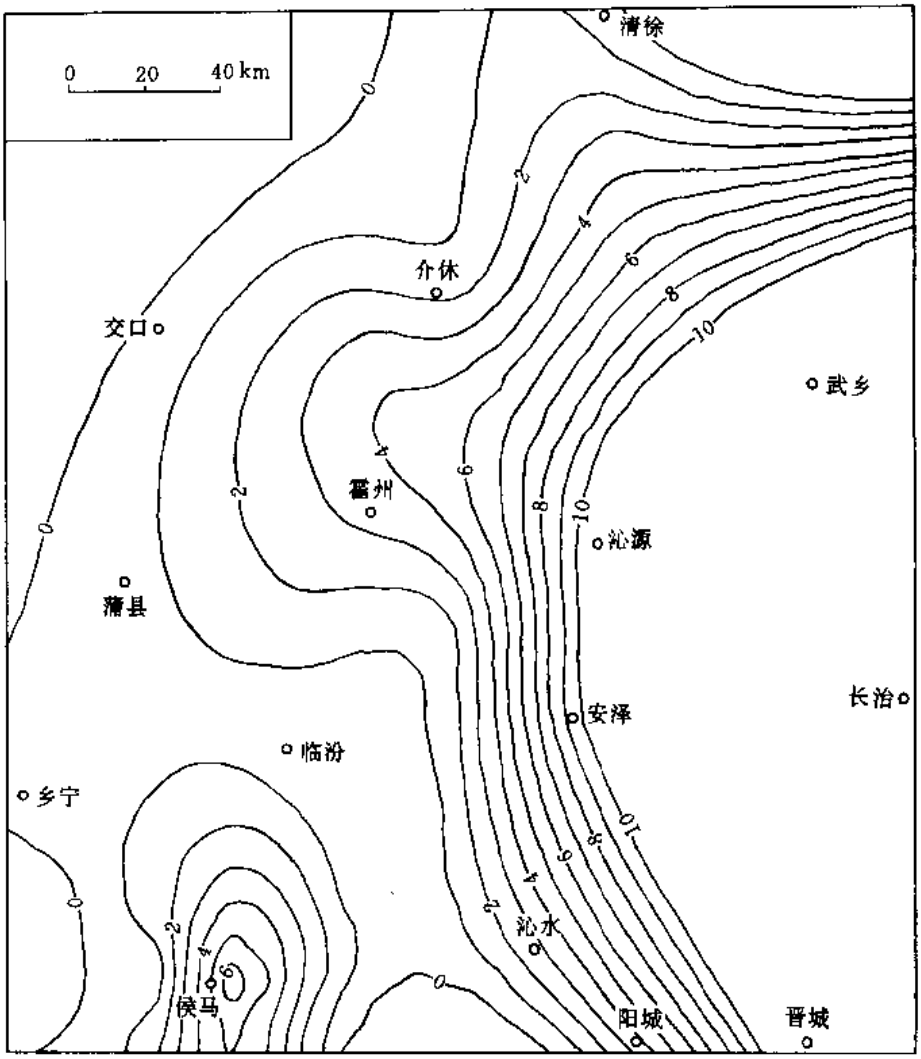


图 2-14　山西南部应力降分布平面图

—万荣一带以及霍州---灵石一带还存在着两个相对高值区，平均应力降大于 3.5 MPa。在临汾盆地和太原盆地中，应力降很低，平均应力降小于 1.0 MPa。

上述应力降的分布特点与山西南部断裂构造的发育程度具有良好的对应性。东部地区断裂构造相对不甚发育，地质体的连续性较好，因而平均应力降高；西部吕梁山区、太原盆地和临汾盆地中断裂构造较为发育，地质体的连续性则较差，因而平均应力降较低；南部峨嵋台地和中部辛置台地上断裂构造发育程度中等，其平均应力降相对较高，构成两个次级高应力降区。应力降的分布规律与山西南部煤层气的富集状况有较为密切的关系。在阳城、安泽、沁源高应力降区，煤层气含量相应地亦高于其它地区，这充分表明现代地壳中的应力水平对于煤层气富集具有明显的控制作用。

第四节　构造应力场有限元模拟

地质构造分析和震源机制解表明：山西南部经历了燕山期和喜马拉雅早期两期水平挤

压构造应力场的作用。在喜马拉雅中晚期，本区新生代断陷盆地一直处于近水平伸展应力场作用之下，而其东部沁水含煤盆地却处于挤压应力场作用之下。为了进一步了解构造应力场的空间变化、为煤层气资源评价奠定基础，作者应用 ADINA 程序对构造应力场进行了弹塑性有限元模拟分析。

一　燕山期和喜马拉雅早期构造应力场有限元模拟

根据模拟结果，分别编制了山西南部燕山期和喜马拉雅早期构造应力场有限元主应力矢量图（图 2-15 和图 2-16）。其中，两期平面挤压应力场的主应力矢量图与燕山期和喜马拉雅早期构造应力场主应力迹线图（图 2-11 和图 2-12）基本相同，二者的主应力迹线展布方向

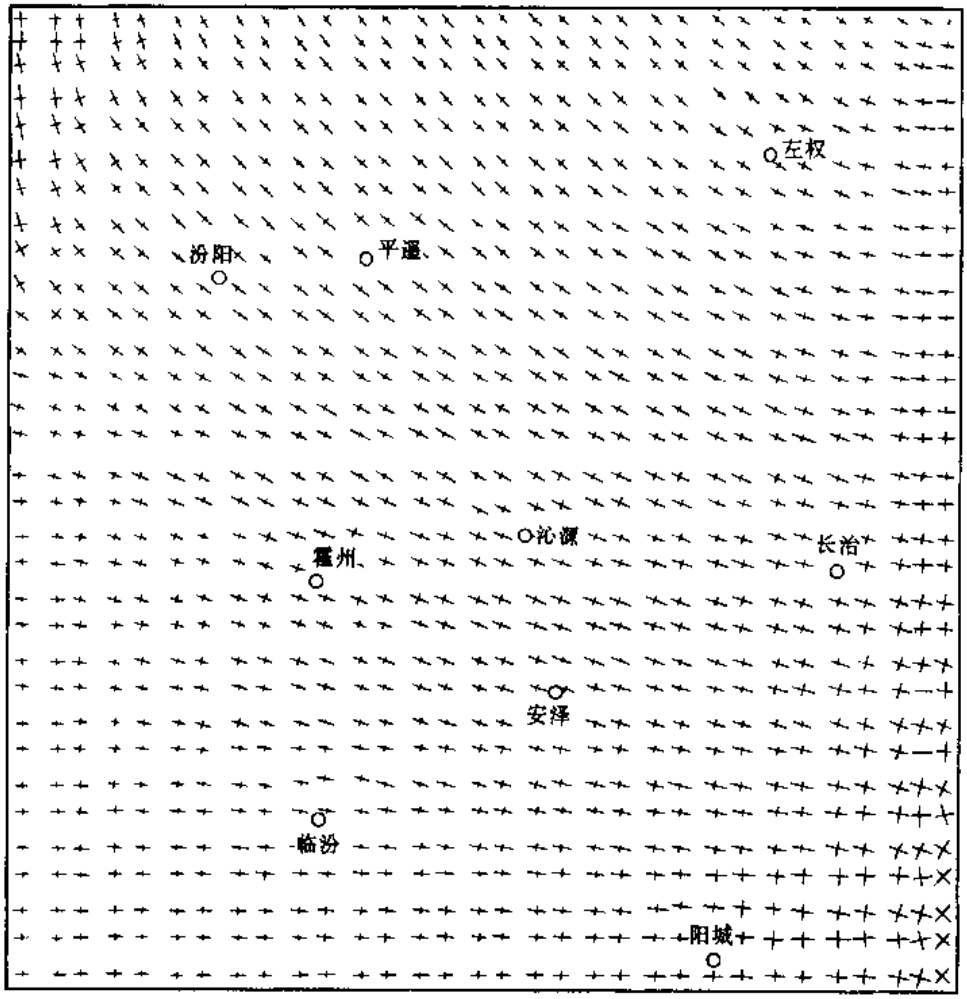


图 2-15　山西南部燕山期有限元模拟主应力矢量图

和变化趋势几乎完全一致，仅在边界附近由于受边界约束条件的限制致使模拟结果与实测应力迹线之间产生局部偏差。

这种一致性表明：有限元模拟的边界条件和载荷作用方式是基本合理的；燕山期北北西—南南东方向近水平挤压应力场的作用力主要来源于南东方向，在这一水平挤压力作用下形成了山西南部一系列枢纽走向北东—北东东的褶皱构造和沁水块坳；喜马拉雅早期北东—南西方向近水平挤压应力场的作用力主要来源于南西方向，由此形成了山西南部一系列

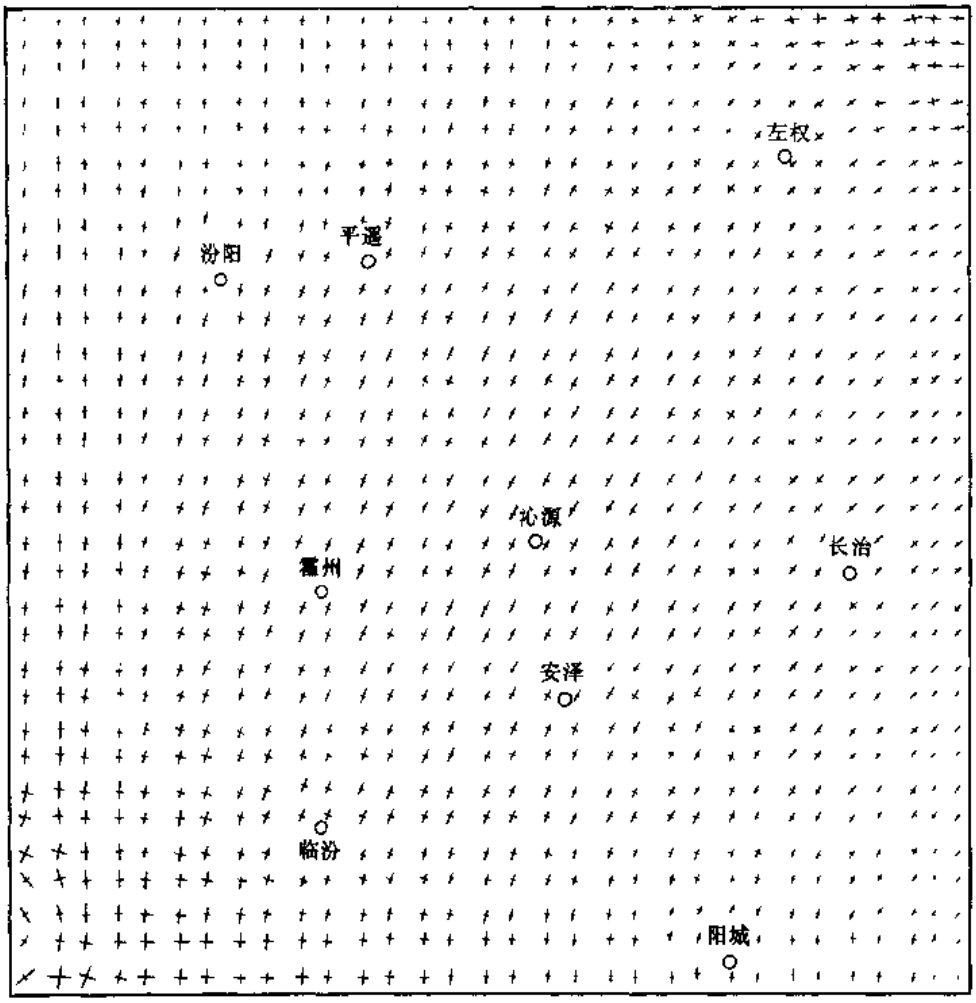


图 2-16　山西南部喜马拉雅早期有限元模拟主应力矢量图

枢纽走向北西并且叠加在燕山期北东—北东东向褶皱之上的小型褶皱构造。

二　新生代和现代构造应力场有限元模拟

由构造应力场分析结果可知，山西南部新第三纪以来总体上一直处于北西—南东方向的近水平伸展应力场作用之下，相继形成了临汾断陷盆地和太原断陷盆地。两盆地周缘基本上被正断层所围限。上新世以来，临汾断陷盆地和太原断陷盆地的沉积厚度分别为 2000 m 和 3800 m，断陷幅度分别为 2900 m 和 4900 m（张世民和刘光勋，1993）。

根据地质构造分析和震源机制解可确定新生代和现代构造应力场的主应力方向，并由小震应力降资料可大致确定山西南部应力水平的总体变化规律。因此，可以运用有限元法较精确地模拟新生代和现代构造应力场的应力分布状况。

对不同方案所得模拟结果进行对比分析后发现，仅在沁水块坳轴部的节点上采用全约束、其它节点为自由节点且不考虑重力作用条件下的结果，与现代小震应力降资料最为吻合。图 2-17 即为根据这一方案的结果所编制的主应力差平面分布图。可以看出，山西南部存在阳城—武乡和汾阳—清徐两个呈北北东方向展布的高主应力差值条带。其中，前者分布在沁水块坳的轴部，应力水平与现代应力降资料极为吻合，同时在沁水块坳范围内最大主应力

为压应力(图 2-18)。这与根据震源机制解确定的山西南部的东部地区表现为北西—南东方向近水平挤压应力场亦是一致的。在太原盆地和临汾盆地中,主应力差值很低,且最大主应力以拉应力为主。对比图 2-18 和图 2-17 可以看出,二者主应力差等值线具有大致相同的变化趋势,同时二者的主应力差值亦大致相同。

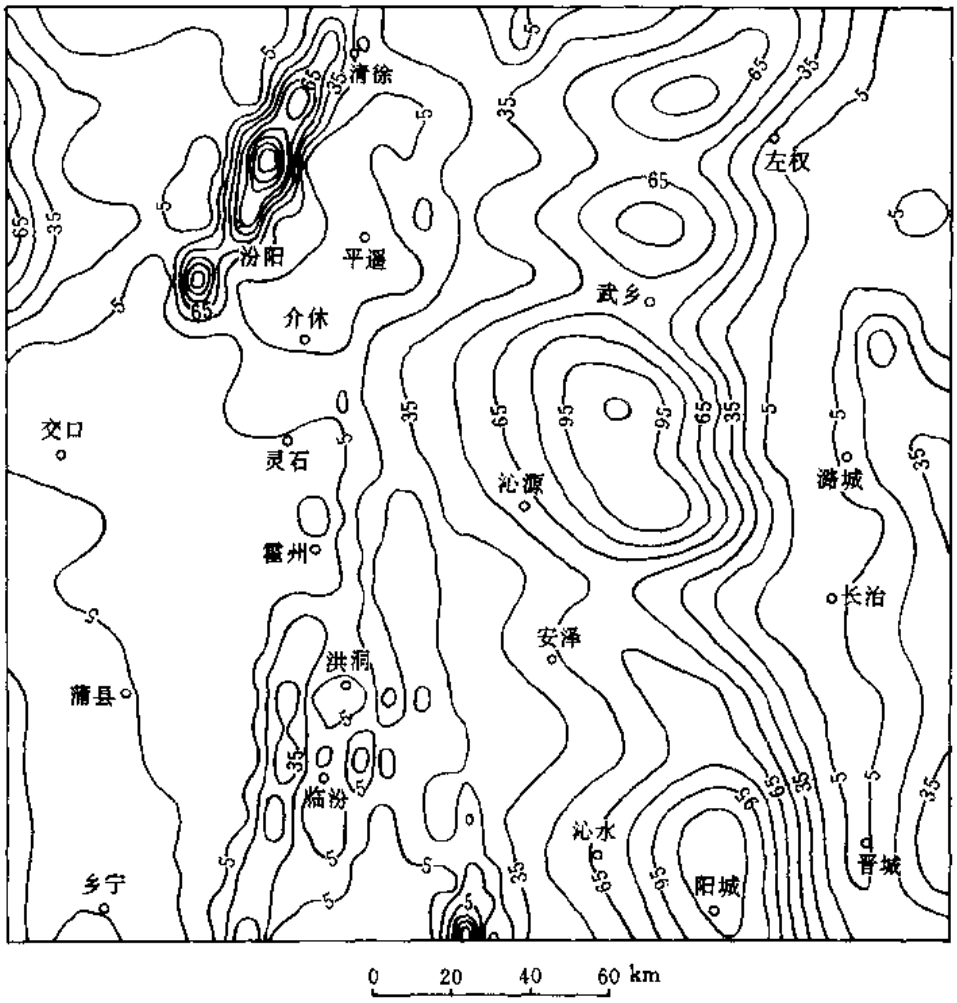


图 2-17 山西南部现代构造应力场有限元模拟主应力差等值线图(应力单位:MPa)

上述模拟结果揭示:沁水块坳现今北西—南东方向近水平挤压应力场的动力来源是其东部太行山和西部霍山的隆起和抬升;而太原盆地和临汾盆地中的北西—南东方向近水平伸展应力场则与盆地深部塑性物质的上涌而导致的侧向拉伸有关。

新生代构造应力场的特征与现代构造应力场十分相似。因此,在对新生代构造应力场模拟计算时参考了现代构造应力场模拟计算的边界条件和载荷作用方式,但其断层节点的给定位移则是模拟现代构造应力场时的 100 倍(主要是考虑新生代断陷盆地的总沉降幅度)。图 2-19 是根据以上方案的计算结果所编制的主应力差平面分布图。

对比图 2-17 和图 2-19 我们可以看出,二者主应力差等值线的变化趋势和展布方向几乎完全相同,只是后者主应力差值比前者要大得多,并且沁水块坳最大主应力均为压应力。这表明自新第三纪以来,山西南部基本处于与现今构造应力场大致相同的应力状态。换言

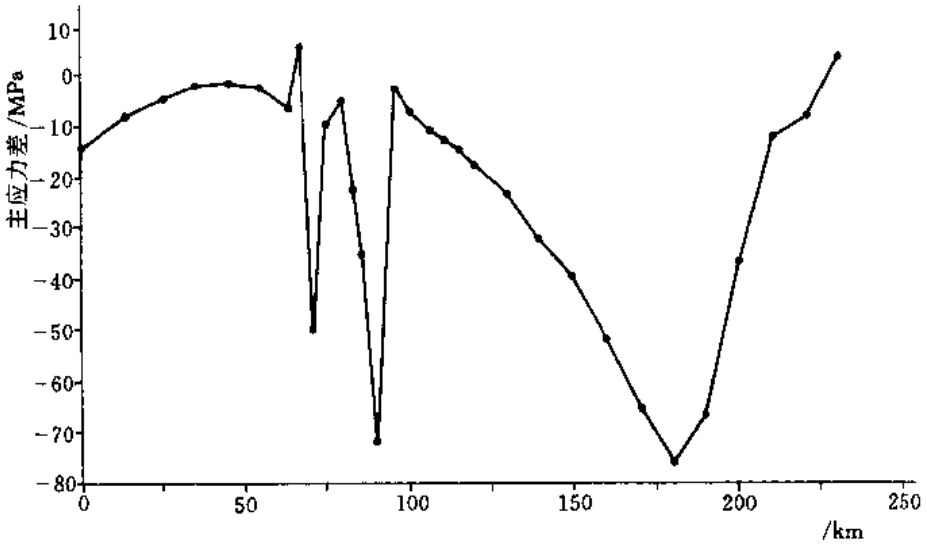


图 2-18　山西南部第 7 剖面顶界面水平方向主应力分布图

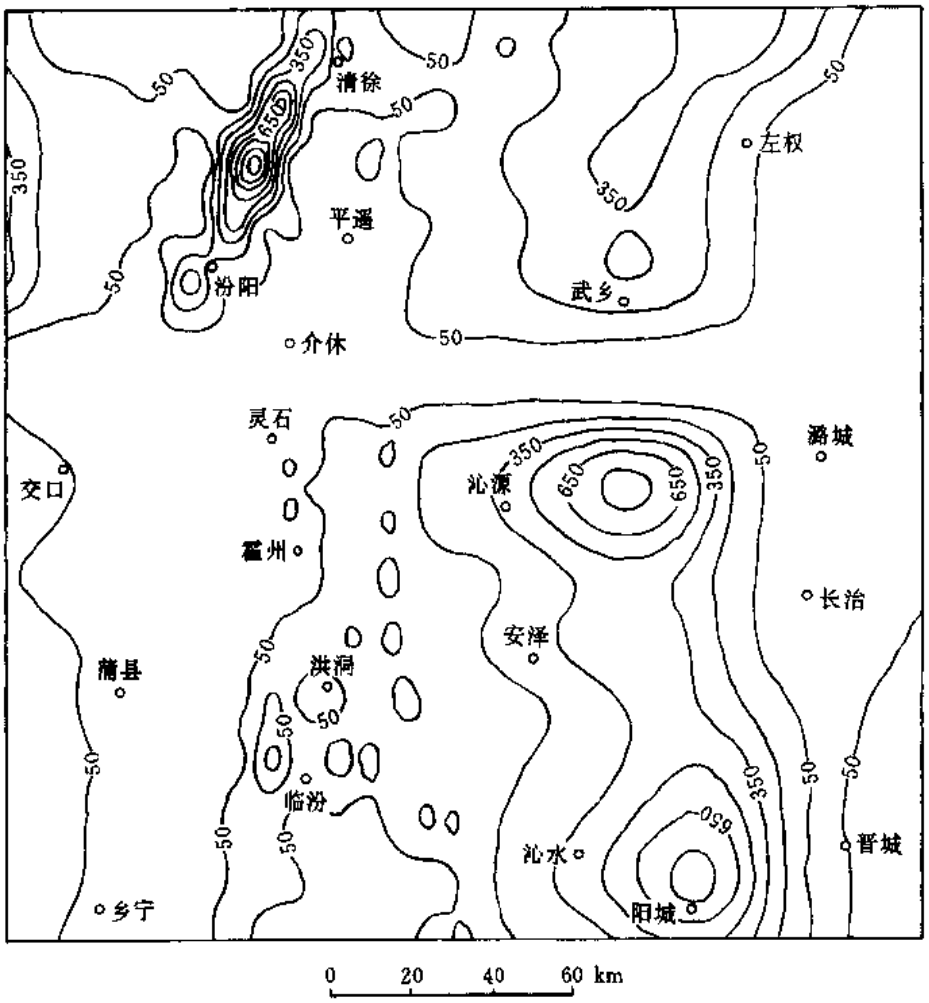


图 2-19　山西南部新生代构造应力场有限元模拟主应力差等值线图（应力单位：MPa）

之，山西南部的东部地区自新第三纪以来一直处于北西—南东向近水平挤压应力场作用下，沁水块坳轴部发育的近南北向小褶皱群很可能就是这一局部挤压应力场作用的产物；太原盆地和临汾盆地则受北西—南东向近水平伸展应力场作用，其动力来源与现代构造应力场基本相同。

此外，在图 2-17 和图 2-19 中，均存在阳城北部和武乡南部两个高主应力差值区（其最大主应力均为压应力），这恰好与山西南部的东部地区两个高含气量区相对应。这一特点说明，新第三纪以来构造应力场中的高压应力对煤层气的保存和富集具有明显的控制作用。

第五节　构造应力场演化及其动力学分析

印支运动以来，山西南部经历了多期构造应力场的作用。印支期构造运动表现为近南北方向的水平挤压应力场；燕山期主要表现为北东—南西方向近水平挤压应力场；喜马拉雅早期表现为北东—南西方向近水平挤压应力场；上新世以来主要表现为北西—南东方向的拉伸应力场，局部（东部地区）则表现为北西—南东方向的近水平挤压应力场。

山西南部位于华北板块中部。华北板块南缘的秦岭造山带为多旋回复合造山带（许志琴等，1988；任纪舜等，1990；程裕淇等，1994）。前人研究成果表明，华北板块与扬子板块的碰撞最迟始于加里东期，形成了以加里东造山旋回为主旋回的北秦岭多旋回造山带（黄汲清等，1977），而两板块的全面拼贴、焊接则完成于印支期。同位素年龄的测定给出了主碰撞期的时限：大别山区 C 型榴辉岩的 Sm—Nd 矿物等时线年龄为 244 Ma，辉长侵入体的 Sm—Nd 年龄为 231 Ma（李曙光等，1989）；南秦岭多硅白云母的 $^{39}Ar-^{40}Ar$ 同位素年龄为 216～232 Ma（Mattauer 等，1985）。华北板块北缘天山—兴安造山带于早二叠世全面碰撞拼贴，但印支期仍遭受到西伯利亚板块自北而南的挤压作用（程裕淇等，1994）。

印支期，华北板块南北边缘造山带的强烈挤压导致华北板块遭受近南北方向的水平挤压作用，形成了一些近东西向的构造，但这种水平挤压应力由板块边缘向板内逐渐衰减。因此，华北板块边缘的挤压褶皱和逆冲推覆变形较为强烈，而板块内部则表现得并不十分明显。在该期构造应力场作用下，山西南部的南缘（阳城以南）下古生界碳酸盐岩地层中形成了一些枢纽方向近东西的褶皱构造和逆掩断层（见图 1-8）；在阳城以北则未见到类似的构造，很有可能表现为地壳抬升。在研究区南部，中侏罗统云岗组与下伏中三叠统二马营组呈角度不整合接触，但在山西北部宁武—静乐盆地，下侏罗统大同组则假整合于上三叠统延长组之上（山西省地质矿产局，1989）。总体来看，印支期近南北方向的水平挤压应力场对于山西南部的影响不大，并未在其内部形成形迹明显的地质构造，仅导致南部产生一定程度的隆起抬升，从而造成中侏罗统云岗组与下伏中三叠统二马营组呈角度不整合接触。

燕山期，华北板块南北边缘的两条造山带再次经受造山作用，中国东部的构造发展逐步置于环太平洋构造域的控制之下，在中国东部产生了指向北西—北西西方向的水平挤压应力，挤压作用由东向西逐渐减弱，在亚洲大陆外侧形成了宏伟的燕山期造山带。中国东部除四川和鄂尔多斯两个稳固的地块外，几乎全部受到了这一碰撞造山作用的影响（任纪舜等，1990）。实际上，鄂尔多斯地块亦经受了这一碰撞造山作用的影响，只是其影响较弱而已。山西南部这一时期的区域构造应力场与整个中国东部的区域构造应力场基本一致，但应力强度较弱。在北西—南东方向近水平挤压应力作用下，山西南部褶皱抬升，形成十分宽缓的沁

水块坳和一系列北北东—北东向褶皱构造。局部地区构造变形仍表现得较为强烈，如吕梁山东缘发育有倒转褶皱和逆断层。

喜马拉雅早期，山西南部构造应力场的特征与华北板块东部区域构造应力场存在一定的差别。中白垩世以来，中国东部及邻区逐步置于濒太平洋构造域今太平洋体系的控制之下，这是一个裂陷—引张型动力学体系（任纪舜等，1990）。在这一动力学体系的控制之下，太行山以东地区强烈伸展裂陷，形成盆岭构造，岩浆活动异常强烈，岩石圈大面积拉伸变薄。与此相比，山西南部所在的太行山以西的鄂尔多斯地块则处于相对稳定抬升态势。山西南部这一时期的构造应力场表现为北东—南西方向的近水平挤压应力场。由此需要把山西南部及其所在的鄂尔多斯地块的构造态势与印度板块和欧亚板块的碰撞作用联系起来考虑。

白垩纪至老第三纪初期，印度板块与欧亚板块的碰撞挤压作用导致中国西部产生近东西向的挤压应力场。由西向东挤压应力方向逐渐向东偏转，在鄂尔多斯地块形成北东—北东东方向的挤压应力场（国家地震局，1988）。山西南部喜马拉雅早期的北东—南西方向的水平挤压应力场应是这种碰撞挤压作用的结果。在这一水平挤压应力场作用下，山西南部形成了一系列规模较小、叠加在燕山期北东向褶皱之上的北西向褶皱。总体上看，该期应力场的强度较弱，在山西南部并未形成大规模的褶皱构造和逆断层。但是，其对煤层气的构造圈闭条件却可能有一定的影响或控制作用。例如，在阳城北高含气区，高含气地带的展布方向呈北西—北西西方向，且发育有北西向褶皱构造，这种褶皱构造可能有利于煤层气的富集。

新第三纪以来，鄂尔多斯地块在印度板块与欧亚板块的碰撞挤压型动力学体系和中国东部裂陷—引张动力学体系的联合作用下出现裂陷沉降，从而在山西南部相继形成了临汾断陷盆地和太原断陷盆地。随着裂陷沉降作用和断陷盆地深部塑性物质上涌底劈作用的增强，研究区构造运动遂演化为以北西—南东方向近水平伸展应力场为主。在这一伸展应力场作用下，上述断陷盆地和盆地边缘形成了一系列北北东—北东东向平移正断层，或导致燕山期断层再次活动，致使盆地内部及边缘地段断裂构造十分复杂。远离断陷盆地，断裂构造的发育程度则逐渐减弱（见图 1-8）。伴随着霍山和太行山的不断隆起，在沁水块坳中产生了北西—南东向的局部近水平挤压应力场，沁水向斜轴部的一系列规模较小的近南北向褶皱很可能就是在这种局部应力场作用下形成的。这种局部挤压应力场一直持续到现代。由此形成的高应力分布区应当是煤层气富集的有利区带。

第三章　煤层气生成的物质基础

煤中有机质是煤层气生成的物质基础，煤层中有机质的丰度、组成和成熟度是这一物质基础的三个基本要素。煤层的生气条件主要是通过有效阶段生气率对煤层气的富集和保存产生影响（秦勇等，1998）。

第一节　煤层有机质丰度

与常规油气源岩不同，煤层有机质丰度评价可采用工业分析方法和有机岩石学方法，用灰分产率和煤岩显微组分含量予以表示。

山西南部7个现采矿区30余个井田及勘探区的大量煤质资料统计结果表明：

上主煤层原煤的中值灰分产率（50%概率）为16%、最大灰分产率（5%概率）为35%、最小灰分产率（95%概率）为12%，其对应的近似有机质含量分别为84%、65%和88%〔图3-1(a)〕；灰分产率的总体变化趋势是西高东低、北高南低，有机质含量的变化趋势与之相反（图3-2）。

下主煤层原煤的中值灰分产率为19%、最大灰分产率为29%、最小灰分产率为11%，其对应的近似有机质含量分别为81%、71%和89%〔图3-1(b)〕；在空间上灰分产率仍具有北高南低的变化趋势，东西方向上的变化趋势与上主煤层不同，为东高西低（图3-3）。

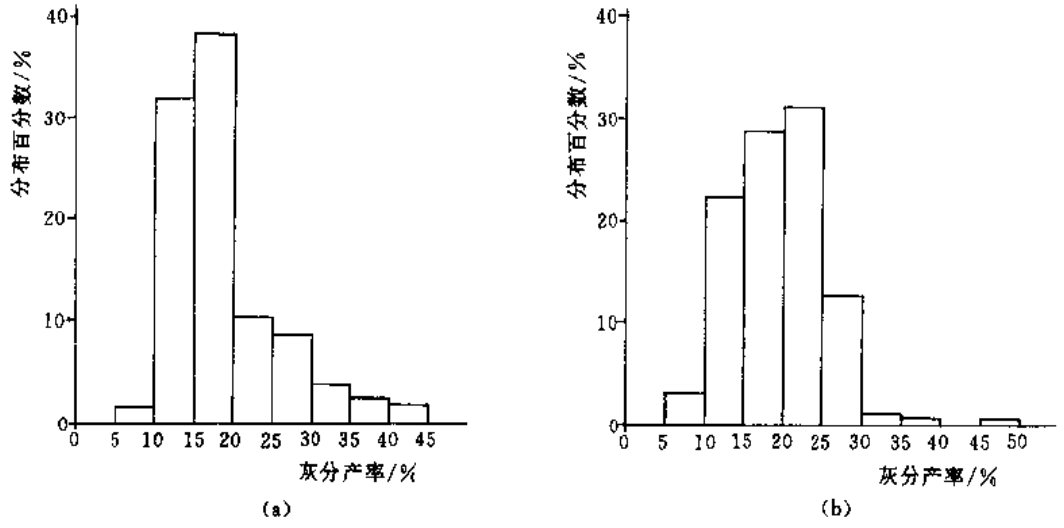


图3-1　山西南部石炭－二叠系主煤层灰分产率直方图

(a) 上主煤层　(b) 下主煤层

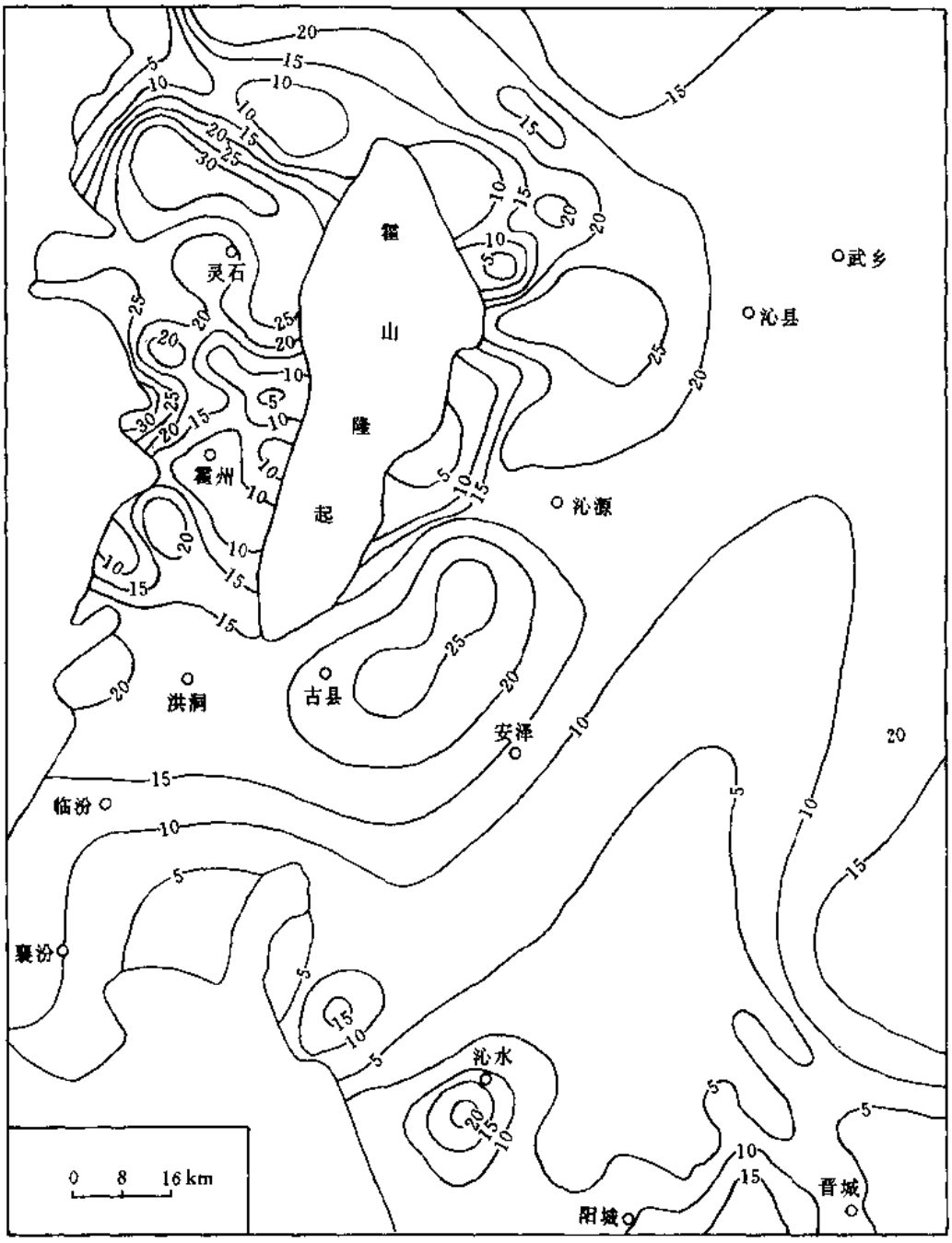


图 3-2 山西南部上主煤层灰分产率等值线图

煤的灰分产率和有机质含量直接受控于煤岩类型，富矿物暗煤灰分产率最高，其次为矿物充填的丝炭，再次为亮煤，镜煤的灰分产率最低。煤的成因是控制煤中灰分产率及有机质含量的根本原因。灰分产率的空间变化趋势与成煤期物源供给方向一致，当时主要物源供给方向为由北向南。成煤环境不同，造成煤层之间以及同一煤层不同区域之间的灰分产率的差异。废弃碎屑体系沼泽成煤的灰分产率最低，活动碎屑体系沼泽成煤的灰分产率中等，海相泥炭坪成煤的灰分产率则较高。

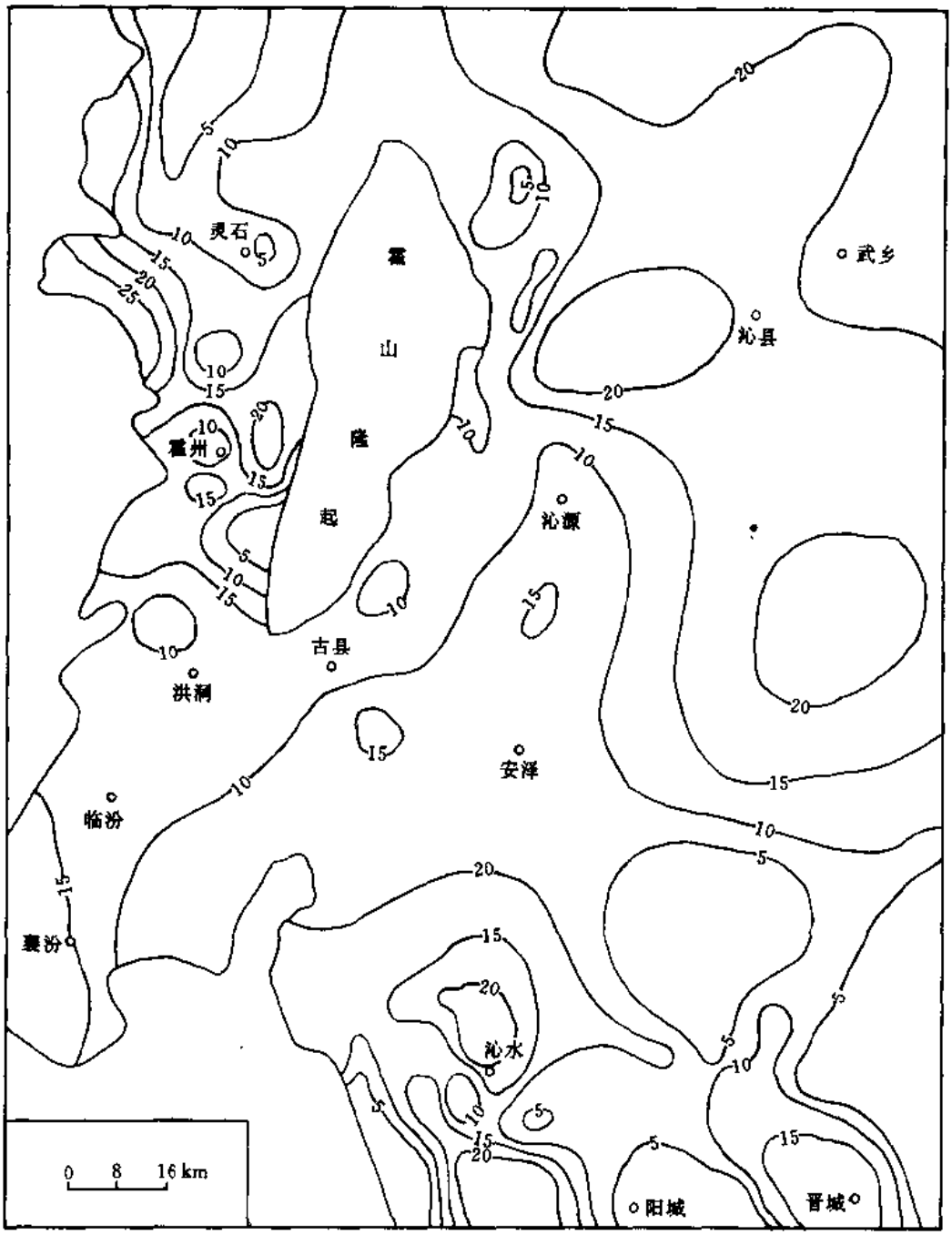


图 3-3 山西南部下主煤层灰分产率等值线图

山西南部主煤层显微组分定量统计结果如表 3-1 所示。上主煤层显微组分含量变化于 83%～99%之间，一般为 90%～97%；矿物质含量为 1%～17%，一般为 3%～10%，主要为粘土矿物，含少量黄铁矿和方解石。下主煤层显微组分含量变化范围为 84%～98%，一般为 89%～96%；矿物质含量为 2%～16%，一般为 4%～11%，以黄铁矿和粘土矿物为主，方解石和其它矿物较少。上、下主煤层显微组分含量在空间上具有南高北低的变化规律，上主煤层的显微组分含量在本区南部略高于下主煤层，而在北部则略低于下主煤层。

表 3-1　　山西南部石炭—二叠系主煤层显微岩石学组成定量结果

样品	地点与煤层号	(变)镜质组							(变)惰质组					(变)壳质组										矿物质					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)
19	潞安 3#	3.2	8.4	46.8	1.2	0.2	2.8	62.6	16.2	2.4	0.2	3.4	22.2						7.2		0.4		7.6	5.6	0.2	0.4	1.4		7.6
40	起龙沟 9#+10#	8.8	17.0	48.6	0.4	0.4	0.4	75.6	13.0	1.2	0.2	1.2	15.6		0.2			1.2	1.6	1.8	1.2		6.0	2.0	0.6		0.2		2.8
46	西沟 3#	4.8	13.4	44.2	0.6		0.1	63.4	25.2	1.0		1.2	27.4					0.4	0.6	2.8	1.8		5.6	2.8		0.4	0.4		3.6
47	圪堆 2#	5.8	7.2	51.0			0.6	64.6	16.8	1.8		3.2	21.8						1.4	0.6	1.2		3.2	4.6			5.8		10.4
49	沁新 2#	6.6	8.4	45.2			5.4	65.6	18.0	5.6	0.2	5.2	27.0	0.2					0.2	0.2	0.8		1.4	5.2	0.2		0.6		6.0
50	白龙 2#	4.6	8.6	38.6	0.8		1.6	54.2	21.6	3.4		2.0	27.0	3.6	2.6	0.4			0.4				7.0	8.6	0.4		2.8		11.8
56	辛置 2#	2.4	9.0	42.0	0.6		4.4	58.4	22.6	3.8	0.2	3.0	29.6	0.6	1.2	0.4			0.4				2.6	6.2	0.2		3.0		9.4
57	北庄 3#	8.6	12.0	42.6			0.4	63.6	20.8	4.2		2.0	27.0						0.6				0.6	7.0	0.2		1.6		8.8
64	河村 9#	8.0	34.2	31.4	0.2		1.2	75.0	12.2	0.4		0.2	12.8	0.4	0.2			0.2	1.8	1.8	0.8		5.2	4.8	1.0	0.2	0.8	0.2	7.0
67	郭家坪 9#+10#	10.8	19.0	40.4	0.2		1.8	72.2	13.0	2.8		1.0	16.8	0.6	0.6				0.6	0.2	1.2		3.2	5.6	1.6		0.6		7.8
108	柳岔沟 2#	7.8	9.8	44.4	0.4	0.4	1.0	63.8	17.0	2.8		1.2	21.0	1.8	0.6	0.4			0.8				3.6	9.8	1.8				11.6
110	南关 2#	5.4	8.0	60.8	1.6	0.2	0.6	76.6	9.0	3.4		1.6	14.0	0.2	0.2				1.6				2.0	6.0	0.2		1.2		7.4
112	柳岔沟 10#	6.2	7.0	47.2			0.8	61.2	18.2	3.0	0.2	1.0	22.4											10.2	3.6		2.6		16.4
42	古寨 2#	9.8	7.2	41.0	0.8		0.8	59.6	24.2	3.0		2.6	29.8	0.2					1.0				1.2	6.2	1.0		2.2		9.4
45	殿儿垣 3#	18.2	7.4	33.2	0.8		3.2	62.8	17.6	2.4		4.6	24.6		0.2				1.2				1.4	10.4	0.6		0.2		11.2
48	张家沟 2#	10.2	9.0	35.8	0.4		1.0	56.4	20.1	2.4	0.2	1.6	24.6		0.2				1.2				1.4	14.2			3.4		17.6
52	永红 3#	7.4	11.2	36.8	0.6		0.2	56.2	25.6	1.0		4.6	31.2					0.4	1.0	3.4	1.8		6.6	3.2		1.2	1.6		6.0
53	老河里 9#+10#	17.4	16.2	32.8	1.6		1.0	69.0	18.4	0.4	0.2	1.8	20.8						1.2	0.6	0.6		2.4	6.6	0.4		0.8		7.8
57	北庄 3#	3.0	14.0	42.2	0.4			59.6	25.8	1.2			27.0					0.4		3.6	2.6		6.6	1.8	0.4		4.6		6.8
61	阳泉 3#	5.8	12.2	49.8	1.2		0.6	69.6	12.8	1.0		2.6	16.4		0.2			0.6		1.6	0.6		3.0	6.6		0.4	4.0		11.0
62	河村 3#	3.0	14.4	50.6	0.6			68.6	13.2	0.6		1.2	15.0	0.2					1.2	4.8	3.4		9.6	2.8			4.0		6.8

续表

样品	地点与煤层号	(变)镜质组							(变)惰质组					(变)壳质组										矿物质					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)
41	坨堆 3#	9.8	11.2	39.8	1.0		1.2	63.0	24.4	1.6		1.8	27.8	0.4	0.2								0.6	6.8			1.8		8.6
54	刘王沟 9#+10#	8.2	14.2	34.2			0.4	57.0	26.0	1.4		2.0	29.4	0.2	0.2					1.8	1.2		3.4	9.0	1.2				10.2
55	中村 2#	2.4	9.4	57.6				69.4	15.0	1.2	0.2	1.8	18.2						2.2	1.2	1.2		4.6	1.0	0.2	0.6	6.0		7.8
65	聪子峪 9#+10#	17.8	10.2	32.8	0.6		1.8	63.2	19.6	2.8		2.4	24.8						0.8				0.8	9.2	1.0		1.0		11.2
B3	潞安 15#	21.6	10.4	40.2	1.0		3.4	76.6	13.6	2.0		2.2	17.8						0.2				0.2	4.4	0.6		0.4		5.4
B4	高阳 3#	25.6	8.0	32.8	1.4		0.8	68.6	18.0	4.0		1.8	23.8	0.4					1.4				1.8	4.6	0.2		1.0		5.8
B5	潞安 3#	26.0	19.6	36.0	0.6	0.2	0.2	82.6	11.6	1.8		1.0	14.4						0.2				0.2	1.6			1.2		2.8
B6	两渡 2#	19.4	23.8	37.0	1.2			81.4	13.0	1.4	0.2	0.6	15.2						1.4				1.4	0.8	0.8		0.4		2.0
51	古阳 2#	7.2	5.8	49.8	1.4		0.4	64.6	19.8	2.8		2.6	25.2	0.4					1.0				1.4	6.8	0.2		1.8		8.8
66	三交河 2#	2.8	12.6	43.6			0.2	59.2	20.2	2.0		3.6	25.8	3.4	3.0	0.8	0.4		0.6				8.2	4.6	0.2		2.0		6.8
109	什林 2#	2.6	5.2	40.4			0.2	48.4	29.8	1.6		2.2	33.6	3.2	2.6	0.4			1.0			0.4	7.6	8.4	0.2	0.6	1.2		10.4
B7	两渡 10#	16.2	16.4	23.8	0.8		2.0	59.2	23.6	3.8		2.0	29.4	0.4		0.2			1.0				1.6	5.2			4.6		9.8
B9	李雅庄 2#	3.8	15.8	37.0	1.4		0.4	58.1	23.2	3.6		0.4	27.2	2.6	2.8	0.4	0.4		3.2				9.4	3.4			1.6		5.0
115	定窑 2#	17.8	6.6	37.2	1.4		1.2	64.2	14.2	2.0		1.6	17.8						1.2				1.2	14.2	0.2		2.4		16.8
119	段家庄 2#	14.2	6.2	41.2	1.2		0.6	63.4	22.2	1.2		1.8	25.2		0.2				1.6				1.8	4.8	0.2		4.6		9.6
120	团柏 10#	4.8	8.6	36.8	0.6			50.8	24.6	1.6	0.2	3.4	29.8	4.6	3.8	0.8	0.4		0.8			0.4	10.8	7.4	0.2		1.0		8.6
121	圣干 2#	3.0	6.6	34.2	0.1		1.2	45.4	30.8	4.2		2.6	37.6	1.0	1.4				1.2				3.6	9.2	0.2	0.2	3.8		13.4
122	三河 1#+2#	25.8			3.8		7.6	37.2	8.8	5.4		5.6	19.8											43.0					43.0

注：(1)——结构镜质体；(2)— 均质镜质体；(3)— 基质镜质体；(4) 团块镜质体；(5)— 胶质镜质体；(6) —碎屑镜质体；(7)— 镜质组(小计)；
(8)— 丝质体；(9) 粗粒体；(10)——菌类体；(11) —碎屑惰质体；(12) 惰质组(小计)；(13) — 孢子体；(14) —角质体；(15)— 树脂体；
(16)——树皮体；(17) —沥青质体；(18)——粒状体；(19)——纤状体；(20)——球状体；(21)——碎屑壳质体；(22)——壳质组(小计)；
(23)— 粘土矿物；(24)——硫化物；(25) — 碳酸盐；(26)— 硅质矿物；(27)— 其它；(28)— 矿物质(小计)

由灰分产率换算所得的有机质含量是质量百分比，而通过煤岩定量得到的有机质含量是体积百分比，在山西南部后者大约是前者的 1.1～1.2 倍。它们所反映的煤中有机质丰度及其变化规律具有很好的一致性。

第二节　煤层有机质组成

研究区西部煤层属低煤化—中煤化烟煤，根据范氏图解判别属于Ⅲ型有机质范畴（图 3-4）（潘钟祥，1986）。研究区东部煤层以中高煤化烟煤和高煤级煤为主，此煤级用地球化学方法已无法识别有机质类型，但煤岩学方法却可弥补这一不足。煤岩显微组分由镜质组、壳质组、惰质组三大组分组构成。其在较低煤级阶段采用常规光学方法易于识别，在较高煤级阶段采用交叉偏光法依然清晰可辨（秦勇，1994）。

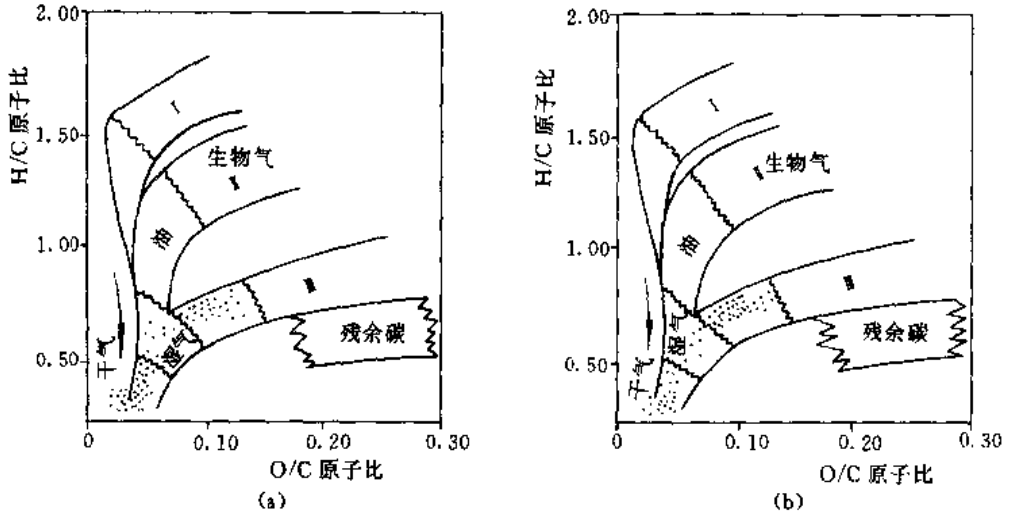


图 3-4　山西南部石炭—二叠系主煤层有机质类型范氏判别图解

（a）上主煤层　（b）下主煤层

三大组分组的生烃能力及性质具有显著的差异（黄第藩，1992）。如表 3-2 所示，壳质组生烃能力强，液态烃所占比例较大；镜质组生烃能力较强，主要生成气态烃；惰质组生烃能力弱，几乎全为气态烃。在同一显微组分组内，不同组分的生烃能力和性质也有一定差异。所以，显微组分组成不同的煤，尽管同属于Ⅲ型有机质，但其生烃特征却存在差别。有机岩石学显微组分组合法是评价煤层有机质类型的有效方法。

表 3-2　　煤岩显微组分与生烃的关系

显微组分（组）	生烃能力	生烃特征
藻类体、沥青质体、树脂体、荧光体	极强	油多气少
孢子体、木栓质体、角质体、富氢镜质体	强	气多油少
镜质组	较强	以气为主
惰质组	弱	气

分别以(变)壳质组、(变)镜质组和(变)惰质组为端点，采用双参数坐标〔(变)壳质组＋(变)镜质组＋(变)惰质组＝100%，(变)壳质组/(变)镜质组〕绘制显微组分含量三角图。根据实测结果以及显微组分生气特征，将三角图划分为三个区域，分别对应于强生气、中等生气和弱生气三种生气类型(图 3-5)。它们对应的显微组分组成情况见表 3-3。结果表明，山西南部实测样品多属中等生气型，其次为弱生气型，强生气型比较少。在不同区域和不同煤层中，有机质生气类型也有一定变化。

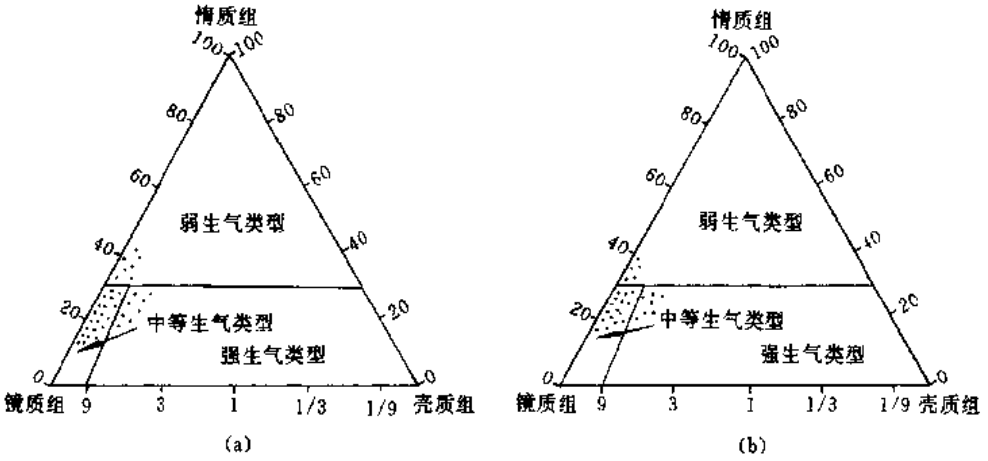


图 3-5　山西南部石炭—二叠系主煤层显微组分含量和有机质类型分布图

(a) 上主煤层　(b) 下主煤层

表 3-3　　煤的生气类型与显微组分组成的对应关系

有机质生气类型	惰　质　组	镜质组/壳质组
强生气型	＜30%	＜9
中等生气型	＜30%	＞9
弱生气型	＞30%	

强生气型煤中镜质组的含量为 60%～70%，主要为基质镜质体，其次为均质镜质体，含少量结构镜质体和团块镜质体，碎屑镜质体少见；壳质组占 10%～15%，其中孢子体、角质体占绝对优势，高煤化烟煤和无烟煤中主要为源于孢子体和角质体的粒状体、似纤状体和球状体(秦勇，1994)，见少量树脂体和树皮体或其煤化作用后的残余组分；惰质组占 15%～25%，其中丝质体占绝对优势，浑圆状粗粒体也较为常见，贫碎屑惰质体。

中等生气型煤中镜质组含量为 65%～80%，与强生气型相比基质镜质体含量更高，均质镜质体有所减少，结构镜质体略有增加，碎屑镜质体相对常见；壳质组含量为 5%～10%，显微组分相对组成与强生气型基本相似，但沥青质体较为常见；惰质组占 20%～30%，丝质体仍占绝对优势，基质状粗粒体较浑圆状粗粒体更为常见，碎屑惰质体少见。

弱生气型煤中镜质组占 50%～70%，与中等生气型煤相比结构镜质体明显增多，基质镜质体明显减少，均质镜质体和碎屑镜质体无明显变化；壳质组含量为 5%～10%，显微组分组成与中等生气型煤相似；惰质组占 30%～40%，与中等生气型煤相比丝质体含量略有增加，碎屑惰质体更为多见，粗粒体有所减少。

第三节　煤层有机质成熟度

煤中有机质的成熟度即煤级或煤化程度，可用煤岩学参数和有机地球化学参数加以表征。前者包括镜质组反射率、荧光参数和色变指数等，后者包括挥发分产率、热解最大峰温、有机元素组成、红外光谱参数和生物标记物等参数，二者互相关联(布鲁克斯，1981；程守田等，1991)。通过对大量煤样测试结果的统计，得出如下经验回归方程：

$$V_{daf} = 83.11 - 77.14\,R_{o,max} \qquad (0.17 < R_{o,max}\% < 0.52)$$

$$V_{daf} = 51.20 - 18.26\,R_{o,max} \qquad (0.52 < R_{o,max}\% < 2.30)$$

$$V_{daf} = 11.67 - 1.93\,R_{o,max} \qquad (2.30 < R_{o,max}\% < 5.00)$$

式中　V_{daf}——挥发分产率，%；

$R_{o,max}$——镜质组最大油浸反射率，%。

山西南部实测镜质组反射率与根据上述关系式得出的等效反射率之间相差很小，故予以采用。36个矿井煤样镜质组反射率测定结果见表3-4。

表3-4　　山西南部石炭-二叠系主煤层镜质组最大反射率实测结果

矿　区	取样点和样品号	煤层号	$R_{o,max}$/%	$R_{o,min}$/%	$\overline{R}_{o,max}$/%
沁　源	定湖矿 (115)	3#	1.38	1.03	1.32
	古寨矿 (42)	3#	1.60	1.01	1.27
	段家庄矿 (J19)	3#	1.57	1.16	1.43
	沁新矿 (49)	3#	1.67	1.01	1.27
	古阳矿 (51)	3#	1.41	1.03	1.33
	圪堆矿 (41)	3#	1.39	1.04	1.35
	圪堆矿 (47)	3#	1.60	1.01	1.27
	郭家坪矿 (67)	15#	1.47	1.03	1.32
	聪子峪矿 (65)	15#	1.70	1.21	1.60
沁　水	阳泉矿 (61)	3#	3.29	1.94	3.11
	中村矿 (55)	3#	2.75	1.83	2.60
	北庄矿 (57)	3#	4.79	2.01	3.97
	永红矿 (52)	3#	4.20	2.09	4.01
	老河里矿 (53)	15#	2.79	2.08	2.65
	起龙沟矿 (40)	15#	2.85	2.03	2.63
阳　城	西沟矿 (46)	3#	4.36	2.30	4.02
	河村矿 (62)	3#	4.11	2.19	3.78
	河村矿 (64)	9#	4.01	2.17	3.65
潞　安	王庄矿 (B_5)	3#	1.78	1.04	1.59
	小河堡矿 (B_3)	3#	1.68	1.13	1.54

续表

矿　区	取样点和样品号	煤层号	$R_{o,max}$/%	$R_{o,min}$/%	$\overline{R}_{o,max}$/%
霍　州	什林矿（109）	2#	0.90	0.64	0.82
	辛置矿（56）	2#	1.13	0.75	0.96
	白龙矿（50）	2#	1.21	0.61	0.87
	团柏矿（120）	10#	0.89	0.61	0.75
	柳岔沟矿（112）	10#	0.88	0.64	0.79
	南关矿（110）	2#	1.42	0.96	1.22
	柳岔沟矿（108）	2#	0.85	0.54	0.74
介　休	两渡矿（B_6）	10#	1.50	1.05	1.40
	两渡矿（B_7）	2#	1.48	1.03	1.39
汾　西	李雅庄矿（B_5）	2#	0.96	0.62	0.83
	高阳矿（B_4）	3#	1.23	0.88	1.10
洪　洞	老王矿（121）	10#	1.06	0.73	0.99
	三交河矿（66）	2#	0.87	0.60	0.81
翼　城	刘王沟矿（54）	9#+10#	2.71	1.92	2.43
	殿儿垣矿（45）	3#	2.16	1.47	1.99
	张家庄矿（48）	2#	2.51	1.78	2.33

结果表明，全区石炭—二叠系主煤层 $R_{o,max}$ 均在 0.85%～4.79%之间。其中阳城矿区为 4.01%～4.36%，沁水矿区为 2.75%～4.79%，翼城矿区为 2.16%～2.71%，沁源矿区为 1.38%～1.70%，洪洞矿区为 0.87%～1.06%，霍州矿区为 0.85%～1.42%，汾西矿区为 0.96%～1.23%，介休矿区为 1.48%～1.50%。同一矿区下主煤层的 $R_{o,max}$ 比上主煤层高出 0.2%～0.3%。在此基础上，进一步将数千个挥发分产率数据换算成等效反射率，并与实测反射率数据相结合，可绘制出两个主煤层的反射率等值线图（图 3-6，图 3-8）。由图可见，主煤层 $R_{o,max}$ 总体上表现为由北向南和由西向东逐步增高，即东部地区的煤级明显高于西部地区。阳城矿区煤层为低级一中级无烟煤，沁水矿区以低级无烟煤为主，翼城矿区为低级无烟煤，潞安矿区为高煤化烟煤，霍西矿区主要为中煤化烟煤。

腐殖型有机质的生气演化大致经历了五个阶段（图 3-7）。

第一阶段，$R_{o,max}$ 小于 0.40%，为生物气阶段，以脱水和脱羧基为主，CH_4 产率低，晚期有所增加。第二阶段，$R_{o,max}$ 为 0.4%～0.65%，为生物—热催化气阶段（沈平等，1991），气体成分以 CO_2 为主，CH_4 产率随煤级增高而逐渐增大。第三阶段，$R_{o,max}$ 为 0.65%～1.50%，为热降解气阶段，生成的气体以烃气为主，含有较多重烃气，并有少量液态烃产出，为湿气阶段。第四阶段，$R_{o,max}$ 为 1.50%～2.0%，为热裂解气形成阶段，以生成大量 CH_4 气体为特征，重烃气逐渐消失。第五阶段，$R_{o,max}$ 为 2.0%～4.0%，CH_4 大量裂解生成，基本上没有重烃产出（陈荣书，1986）。

因此，研究区东部主煤层的生气作用已经历了第四至第五阶段，生气量大；西部地区则一般不超过第三阶段，生气量相对较低。

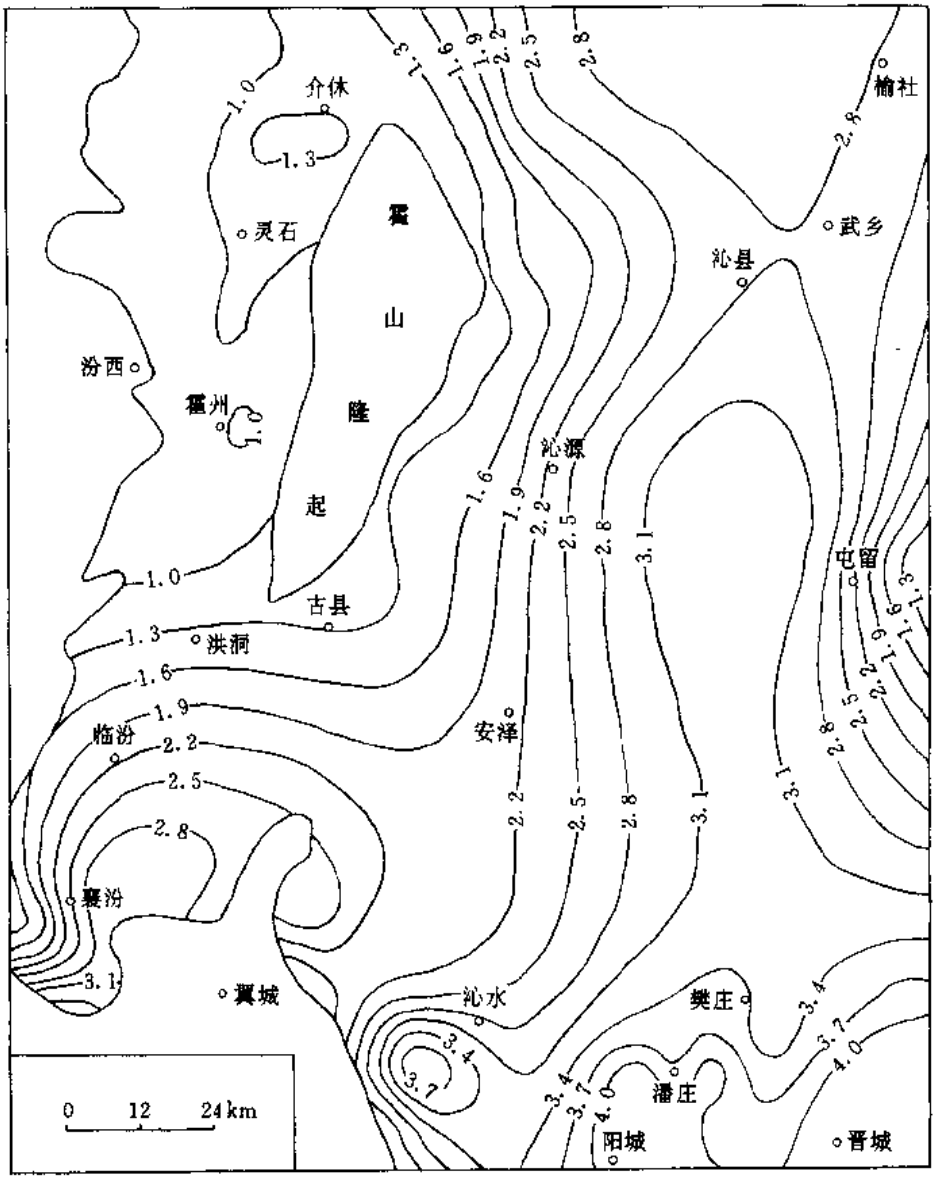


图 3-6　山西南部上主煤层镜质组最大反射率等值线图

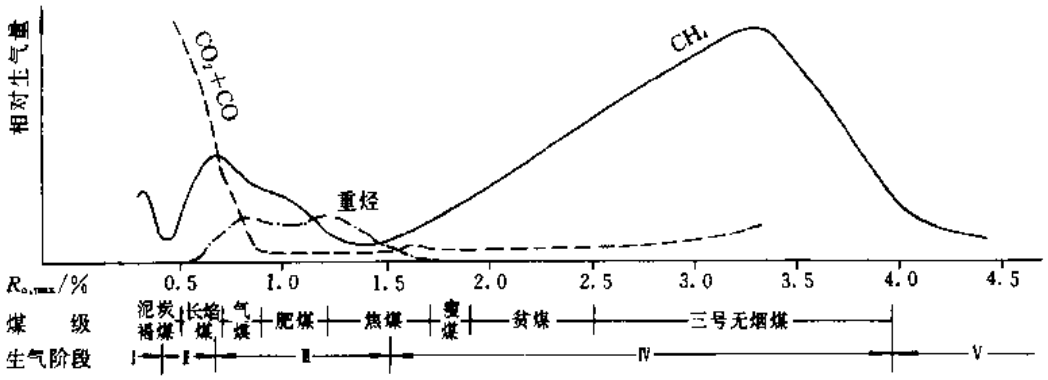


图 3-7　腐殖型有机质的生气模型

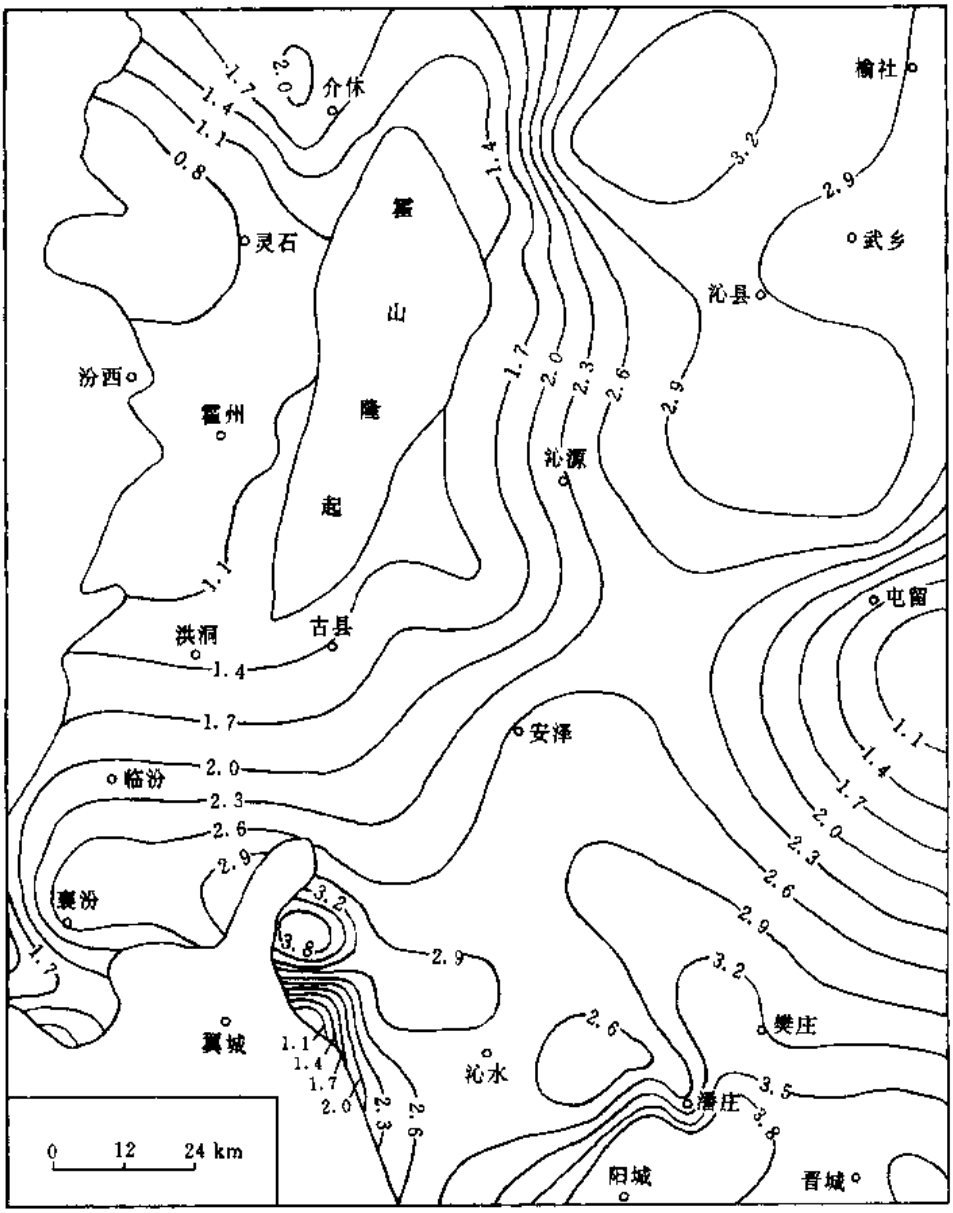


图 3-8 山西南部下主煤层镜质组最大反射率等值线图

第四节 煤层原始有机质的恢复与生气率

煤层气的物质基础直接关系到煤层的生气条件。生气条件集中反映为煤层的生气能力——生气率，具体地则取决于煤层的有机质丰度、有机质类型（显微组分组成）、有机质成熟度（煤级）和生气史。煤的原始有机质丰度和有机质类型的恢复对于评价煤层的生气能力是至关重要的。不同概念的生气率与煤层气富集的关系差别很大，生气条件主要通过有效阶段生气率来控气。

一 生气率的概念

煤层生气能力一般用生气率表示。生气率包括三个基本概念，即煤气发生率、视煤气发

生率和阶段生气率(包茨,1988)。煤气发生率,是指从泥炭到特定煤级所生成烃类气体的总和;视煤气发生率,是指褐煤到特定煤级所生成烃类气体的总量;阶段生气率,是指煤化过程中特定阶段所生成烃类气体的数量。

煤层具有极高的气体发生率。根据热模拟试验,无烟煤的视煤气发生率大于 300 m^3/t,中煤化烟煤(焦煤)的视煤气发生率也高于 100 m^3/t(李明潮等,1990),而无烟煤和焦煤的最大吸附能力分别为 50 m^3/t 和 20 m^3/t 左右(张新民等,1991)。从煤级升高方面来说煤化作用是连续的,但从时间上讲煤化作用又具有不连续的阶段性,区域构造运动是导致煤化作用阶段性发展的重要原因。确切地讲,视煤气发生率是多个阶段生气量的累加,但大部分阶段生成的气体因构造运动而解吸逸散,可供保存的气体多形成于最后一个生气阶段,这一阶段的气体发生率和视煤气发生率相差甚远。笔者将这一生气阶段称为有效生气阶段。

有效生气阶段,是指对煤层气保存具有决定性贡献、为当前煤层原位气体提供主要气源的生气阶段。有效生气阶段内煤层有机质的气体发生率称为有效阶段生气率。有效阶段生气率可视为特定的阶段生气率,但二者所用的基准不同。前者是单位质量的当前煤级煤在有效生气阶段的气体发生率,而后者是单位质量的原始煤级煤的阶段气体发生率。生气条件主要通过有效阶段生气量来控气,有效阶段生气率与煤层含气量呈正相关关系。有效阶段生气率的计算是进一步研究其控气作用的前提。

视煤气发生率是计算有效阶段生气率的基础。关于各种煤岩显微组分的视煤气发生率,前人已做了大量热模拟试验。目前,准确计算研究区主煤层视煤气发生率、有效阶段生气率的关键是恢复煤层原始有机质丰度和原始有机质组成(秦勇等,1998)。

二 煤中原始有机质丰度的恢复

煤中原始有机质丰度的恢复可以视为原始煤级煤中灰分的恢复。煤由水分、灰分、固定碳和挥发分四部分组成,如果以干燥基为基础可以不考虑水分。若不考虑灰分和固定碳绝对量在煤化作用过程中的变化,则有机质含量的变化只受控于挥发分绝对量的减少。因此,有机质丰度的恢复可以通过恢复挥发分来实现,笔者称之为挥发分法。

取褐煤的平均挥发分产率 50%作为煤的原始挥发分产率,假设现今煤级煤的挥发分产率为 C,相对于固定碳绝对量 F 的挥发分变化计算如下:

$$\frac{V_0}{V}=\frac{(F/50\%)\times 50\%}{[F/(1-C)]\times C}=\frac{1-C}{C} \tag{3-1}$$

式中 V_0——原始挥发分产率;

V——现今挥发分产率。

相对于固定碳绝对量 F 的有机质含量则变为:

$$\frac{F+[F\times C/(1-C)]\times[(1-C)/C]}{F/(1-C)}=2(1-C) \tag{3-2}$$

设现今煤级煤的灰分产率为 B,已知固定碳绝对量 F,灰分绝对含量为 D,挥发分产率为 C,原始有机质绝对含量为 O,则煤的原始有机质丰度计算公式如下:

$$\frac{O}{D+O}=\frac{[D(1-B)/B]\times 2(1-C)}{D+[D(1-B)/B]\times 2(1-C)}=\frac{1}{B/[2(1-B)(1-C)]+1} \tag{3-3}$$

那么,煤的原始灰分含量 A 可用下式表示:

$$A=\frac{B/[2(1-B)(1-C)]}{B/[2(1-B)(1-C)]+1}=\frac{1}{1+[2(1-B)(1-C)]/B} \tag{3-4}$$

在煤化作用过程中，各种显微组分的演化具有内在的规律性。如果已知现今煤级煤的显微组分组成，只要能恢复每类显微组分在热演化过程中体积的减量，就可以恢复煤的显微组分的原始组成。为了确定不同显微组分组在不同煤级下的减量，肖贤明等做了大量热模拟试验，用各显微组分组在不同演化阶段的平均热失重表示减量(表 3-5)(肖贤明，1992)。由此，原始有机质的显微组分组遂成为：

$$V=\frac{V/(1-V_s)}{V/(1-V_s)+E/(1-E_s)+I/(1-I_s)} \tag{3-5}$$

$$E=\frac{E/(1-E_s)}{V/(1-V_s)+E/(1-E_s)+I/(1-I_s)} \tag{3-6}$$

$$I=\frac{I/(1-I_s)}{V/(1-V_s)+E/(1-E_s)+I/(1-I_s)} \tag{3-7}$$

式中 V_s、E_s、I_s 分别代表镜质组、壳质组和惰质组在不同热模拟温度及相应煤级下的平均热失重率。

表 3-5　　在不同热模拟温度下显微组分组的平均热失重结果（%）

显微组分组 \ 镜质组反射率/%	0.55	0.72	0.89	1.14	1.43	1.98	2.70
惰质组→惰质组	1.1	2.0	2.8	3.1	6.1	13.4	28.3
镜质组→镜质组	7.6	8.6	14.9	17.9	19.7	22.5	28.3
壳质组→壳质组	7.1	7.2	15.9	37.8	43.4	48.4	51.0

在对研究区主煤层不同煤级煤进行显微组分统计的基础上，根据上述热模拟的结果，作者对研究区煤的显微组分组成进行了恢复，相应地煤层有机质生气类型的分布随之也发生了变化(图 3-9)，强生气型煤有了显著增加。

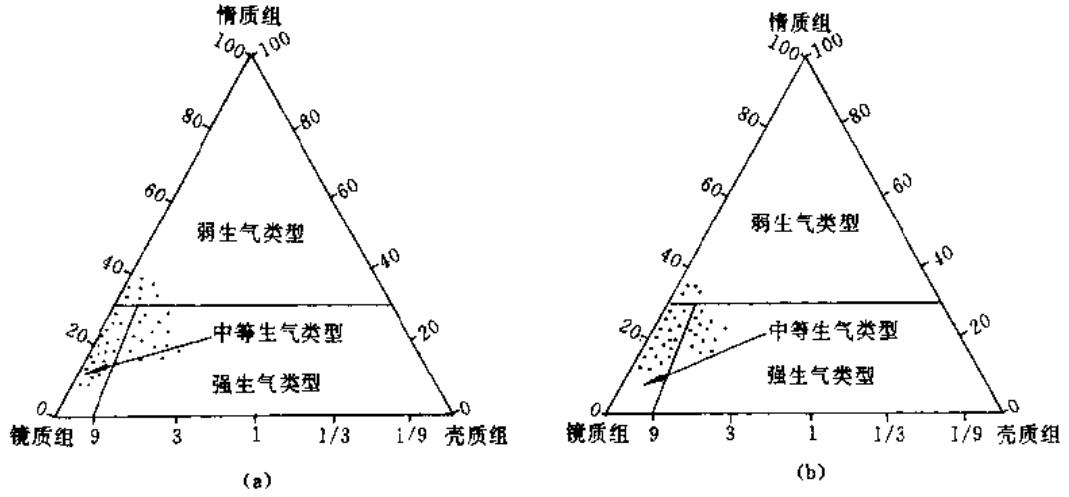


图 3-9　山西南部石炭二叠系主煤层原始有机质生气类型分布图

(a) 上主煤层　(b) 下主煤层

三　视煤气发生率

视煤气发生率的基本计算公式如下：

$$G_P = V G_V + E G_E + I G_I \tag{3-8}$$

式中　G_P——原始煤级煤视煤气发生率，m^3/t；

G_V——镜质组视煤气发生率，m^3/t；

G_E——壳质组视煤气发生率，m^3/t；

G_I——惰质组视煤气发生率，m^3/t。

其中：G_V、G_E、G_I 含量取自表 3-6，V、E、I 的含量分别由式(3-5)、式(3-6)、式(3-7)求得。

表 3-6　　不同煤级煤各种显微组分组的视煤气发生率　　(单位：m^3/t)

煤级 / 显微组分组	长焰煤	气煤	肥煤	焦煤	瘦煤	贫煤	三号无烟煤
壳质组	5～38	15～81	33～233	184～294	250～313	263～394	330～420
镜质组	3～25	10～54	26～145	128～208	194～231	214～223	286～364
惰质组	2～18	7～38	11～95	85～172	147～183	160～250	240～271

注：数据引自李明潮等，1990。

在原始有机质丰度和组成恢复的基础上，根据不同煤级各种显微组分组的视煤气发生率，作者重点对研究区不同矿区主煤层视煤气发生率进行了计算(表 3-7)。

表 3-7　　山西南部主要矿区主煤层视煤气发生率与有效阶段生气率

矿区	煤层	当前的显微组分组成/%			当前灰分/%	原始的显微组分组成/%			原始灰分/%	有效阶段生气量/$m^3 \cdot t^{-1}$	视煤气发生率/$m^3 \cdot t^{-1}$
		镜质组	壳质组	惰质组		镜质组	壳质组	惰质组			
沁源	3#	69.6	2.1	28.9	27	71.8	2.9	25.2	18	87	114
	15#	74.8	2.2	23.0	22	76.8	3.0	20.3	14	95	144
沁水	3#	69.3	5.6	23.1	20	71.1	8.7	20.3	12	92	304
	15#	76.3	4.4	19.3	24	77.0	6.5	16.5	15	106	266
阳城	3#	69.7	8.1	22.2	17	70.8	12.2	7.1	10	139	333
	15#	80.6	13.8	5.6	18	81.1	8.5	10.4	10	130	336
潞安	3#	85.0	0.2	14.8	22	86.8	0.3	12.8	15	47	161
	15#	80.9	0.3	18.8	23	82.9	0.4	15.4	15	40	159
霍州	3#	63.1	5.8	31.1	23	65.4	6.1	28.5	18	30	57
	15#	69.4	0.9	29.7	20	70.9	1.0	29.1	16	27	58
汾西	3#	72.4	4.4	23.6	30	74.6	5.0	20.4	23	28	87
	15#	65.6	1.8	32.6	18	68.4	2.7	28.9	13	24	135
洪洞	3#	63.5	8.8	27.7	23	66.4	9.3	24.9	17	42	60
	15#	52.4	4.2	43.4	24	55.4	5.0	39.7	17	36	74
冀城	3#	69.6	1.6	28.8	15	71.2	2.6	26.1	9	90	241
	15#	63.5	3.8	32.7	20	64.8	5.8	29.4	13	93	250

四　有效阶段生气率

设有效生气阶段起始煤级对应的镜质组反射率为 R_1(%)，终止煤级对应的镜质组反射率为 R_2(%)，终止煤级一般与当前煤级一致。则有效阶段生气量的基本计算公式如下：

$$G_{EF} = K(G_{P2} - G_{P1}) \tag{3-9}$$

式中　G_{EF}——有效阶段生气量，m^3/t；

K——有机质丰度校正系数；

G_{P2}——有效生气阶段的终止煤级对应的视煤气发生率，m^3/t；

G_{P1}——有效生气阶段的起始煤级对应的视煤气发生率，m^3/t。

在煤化作用过程中，煤中有机质可生成水、二氧化碳和烃类等挥发性物质，同时自身的体积和质量变小，但矿物质却可以近似地认为总质量不变(斯塔赫，1990)。有机质校正系数 K，实际上是原始煤级煤中单位质量矿物质对应的有机质与其变质为特定煤级煤中单位质量矿物质对应的有机质之比。矿物质一般用灰分近似表示。由于测定视煤气发生率所选最低煤级为褐煤，故视褐煤为原始煤级，则 K 的计算公式为：

$$K = \frac{(1 - A)/A}{(1 - B)/B} \tag{3-10}$$

式中　A——原始煤级煤(褐煤)的灰分；

B——当前煤级煤的灰分。

如果原始煤级煤的显微组分组成中镜质组质量百分比为 V，壳质组质量百分比为 E，惰质组质量百分比为 I，而各显微组分组从褐煤到不同煤级的热模拟视煤气发生率已知，则：

$$G_{P2} = V\,G_{V2} + E\,G_{E2} + I\,G_{I2} \tag{3-11}$$

$$G_{P2} = V\,G_{V1} + E\,G_{E1} + I\,G_{I1} \tag{3-12}$$

式中　G_{V2}、G_{V1}——镜质组在有效生气阶段终止和起始煤级的视煤气发生率；

G_{E2}、G_{E1}——壳质组在有效生气阶段终止和起始煤级的视煤气发生率；

G_{I2}、G_{I1}——惰质组在有效生气阶段终止和起始煤级的视煤气发生率。

在式(3-10)、式(3-11)和式(3-12)中，原始煤级煤的灰分(A)和显微组分组成(V、E、I)可以通过上述原始有机质丰度和有机质组成恢复获得。

式(3-4)代入式(3-10)可得到 K 值，式(3-5)、式(3-6)和式(3-7)分别代入式(3-11)和式(3-12)可得到 G_{P1}、G_{P2}值，然后将 K 值、G_{P1}值、G_{P2}值代入基本计算公式(3-9)，最终便可得到有效阶段生气量 G_{EF}的值。

应用上述计算方法，在煤层气资源评价的实际工作中，作者对山西南部主要矿区(或勘探区)的上、下主煤层的有效阶段生气量进行了计算(见表 3-7)。

第四章　古地热场特征与煤的生烃演化

自然界煤中有机质热演化生烃是古地热场热力作用的结果，烃类的生成和保存与煤层埋藏历史及古地热场特征息息相关，它们均直接受控于区域构造发展史。本章通过对研究区构造发展史的进一步考查，在查明晚古生代以来煤层埋藏历史和古地热场特征的基础上，从埋藏史和热历史角度对山西南部煤层气的生成保存特征进行分析与阐述。

第一节　煤层埋藏历史和煤层气保存潜势

本区自上古生界含煤地层形成以来，经历了海西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期构造运动，地壳多次沉降和隆起，区内发生构造分异，导致含煤岩系上覆地层差异沉积和差异剥蚀，暗示着区内不同地段上古生界煤层的埋藏和烃类生成保存历史存在一定差异。

一　煤层上覆地层原始厚度的恢复

尽可能正确地恢复煤层上覆地层的原始厚度，是重建煤层埋藏历史的必要前提。研究区内中生界地层由于受到剥蚀而保存不全，不同地区的剥蚀程度有所差异，这给正确恢复原始地层厚度造成较大困难。为此，需要利用多种方法对上覆地层厚度进行综合恢复。

区内晚石炭世至晚三叠世连续沉积。其中，晚石炭世—晚二叠世沉积在区内普遍赋存，煤炭系统和石油系统对该套地层都做过多年的详细研究工作，地层原始厚度的时空分布规律已基本查明。三叠纪期间本区普遍接受沉积，NWW—SEE 方向展布的沉积中心位于研究区南缘及外围的济源—侯马一带，最大沉积厚度可大于 3600 m。因此，三叠系地层等厚度带在研究区内呈 NWW—SEE 方向展布，从 NNE 向 SSW 方向地层厚度变薄，最大厚度带分布在阳城—翼城一带，原始厚度在 3000～3500 m 之间(杨起等，1988)。本区的三叠系目前主要保存在临汾盆地和沁水盆地内，残留厚度大于 2000 m(见表 1-1)。

晚三叠世末期本区整体隆起，先期沉积地层遭受剥蚀，由于构造分异作用，不同地区遭受剥蚀的程度有所不同。对于区内在侏罗纪是否发生过沉积，中国地质界一直存在争议。某些研究者认为本区至少在早　中侏罗世仍与西部的鄂尔多斯盆地存在一定联系，有沉积作用发生(张抗，1989)；某些研究者则认为本区缺失侏罗系—白垩系。事实上，研究区内现在仍有中侏罗统残存，并可见中侏罗统与上三叠统延长群下段地层呈不整合接触，三叠系仅缺失延长群上段地层。如在古县一带发现中侏罗统上部地层的露头，研究区北缘的榆社一带存在中侏罗统天河组，其层位位于前者之上，两者总厚大于 750 m。因此可以认为，本区至少在中侏罗世期间接受过沉积，地层最大厚度在 750 m 以上。

自晚侏罗世开始，本区地壳重新抬升，构造分异进一步加剧，地层再度遭受剥蚀，进而导致不同地区之间上古生界煤层埋深的差别更为明显。研究区内及其外围均有燕山期岩浆侵入体赋存，煤系地层中也发育该期形成的热液脉体。因此，通过对这些脉体中流体包裹体捕

获压力的研究，可大致了解上古生界煤层在燕山期的埋藏状况。

区域地质调查、钻探和地震勘探的结果表明，本区缺失下第三系。上第三系和第四系主要赋存于临汾盆地和沁水盆地，其厚度已由地震勘探和钻探加以证实。在区内其它地区也有上第三系和第四系零星分布。

根据上述地质研究和测试分析，本书对研究区范围内六个地区上古生界煤系上覆地层的原始厚度进行了恢复，结果如表 4-1 所示。

表 4-1　　山西南部上古生界煤层埋藏史和受热史恢复数据

地层时代	起始绝对年代/Ma	持续年代/Ma	阳城—翼城		临汾—洪洞		安泽		沁源—沁县		霍州		汾西	
			埋深	温度	埋深	温度	埋深	温度	埋深	温度	埋深	温度	埋深	温度
Q	1.64	1.64	600	32	3000	80	800	36	1100	42	500	30	800	36
N	23.30	21.66	550	21	<1900	58	<750	35	1000	40	200	24	<680	34
E	65.00	41.70	—	—	<1500	50	<700	34	<900	38	<150	23	<530	31
K_2	97.00	32.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K_1	145.60	48.60	2800	251	2300	182	2660	177	2200	137	2130	152	2450	172
J_3	157.10	11.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
J_2	178.00	20.90	3530	126	3940	138	3140	114	3230	117	2850	106	2680	100
J_1	208.00	30.00	3330	120	3140	94	2340	90	2530	96	2650	100	2480	94
T	245.00	37.00	4330	150	3940	138	3830	135	3720	117	3350	121	3180	115
P_2	256.10	11.10	830	45	940	48	830	45	720	42	850	46	880	47
P_1	290.00	33.90	230	27	230	27	230	27	280	29	280	28	220	27
C_2	311.30	21.30	100	23	100	23	90	23	120	24	120	24	90	23

注：① 绝对年代据《IUGS1989 全球地层表》，国际地层委员会，1989。

② 地质年代单位为 Ma，埋深单位为 m，温度单位为 C。

二　煤层埋藏历史和埋藏阶段

煤层埋藏历史受控于构造运动发展阶段。也就是说，构造发展阶段相应于煤层埋藏阶段，每一阶段构造运动性质决定该阶段煤层埋藏特征，进而控制有机质生烃演化历程。

本区在海西期是华北巨型聚煤盆地的一个组成部分，构造运动表现为地壳整体缓慢沉降、接受沉积，形成了包括石炭—二叠系含煤岩系在内的上古生界地层，地层厚度在区域上分布稳定，显示出典型的地台型沉积特征。印支期构造运动继承了海西期的特点，地壳继续沉降，三叠系与二叠系连续沉积，但沉降速率和幅度明显增大，在区域上沉降幅度出现分异，结果形成了巨厚且厚度在区域上具有明显变化的沉积地层，暗示地壳构造活动性开始增强或地台开始活化。燕山早期区内构造运动具有波动特征，地壳既有抬升遭受剥蚀又有沉降接受沉积，表明构造活动性进一步增强。燕山期是包括本区在内的华北地区晚古生代以来构造演化史上的重要转化时期，区域构造应力场由挤压体制转变为拉张体制，构造运动由褶皱差异运动转换为断块差异运动，同时深部物质上涌，岩浆活动强烈，所形成的区域异常地热场对上古生界煤层的生烃演化造成显著的影响。喜马拉雅期以来，区内构造分异进一步加剧，地壳重新发生局部沉降，进而影响到不同地区晚古生代煤中煤层气的保存和逸散特征。

根据区内构造运动发展阶段、地层原始厚度和煤层埋藏深度恢复结果(表 4-1),可知上古生界煤层经历了以下五个埋藏阶段(图 4-1):

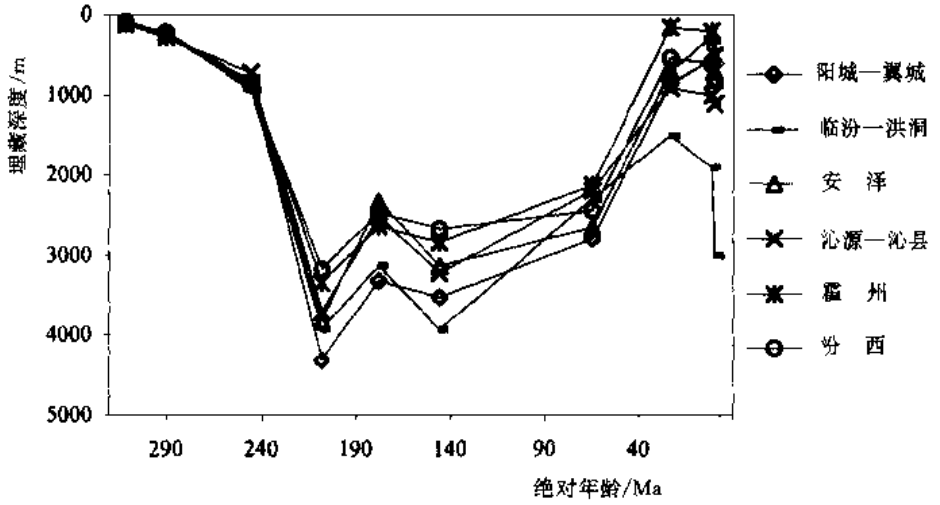


图 4-1 山西南部石炭—二叠系煤层埋藏历史曲线

第一阶段,从晚石炭世至晚三叠世,历经海西后期和印支期。海西期沉积速率约为 14 m/Ma,煤系上覆地层厚度缓慢增加。进入三叠纪后地壳沉降速率急剧增大,地层沉积速率达 95 m/Ma,导致煤层埋深急剧增大,故该期可称为快速埋藏时期。

第二阶段,属于燕山早期。下侏罗统在区内未见,中侏罗统厚度不大,其与三叠系之间仅缺失上部延长群的上段地层,故可认为该阶段地壳在相对稳定的背景下有所波动,可称为稳定—波动时期。

第三阶段,出现在白垩纪,属燕山运动中期。据煤系地层中形成于该期的流体包裹体压力测定结果,煤层埋深减小幅度为 200～1600 m(表 4-1),表明该阶段地壳处于构造隆起状态,抬升速率在 3～27 m/Ma 之间,可称为埋深显著减小阶段。

第四阶段,出现在早第三纪,相当于燕山晚期—喜马拉雅早期,地壳长期隆起,地层不断遭受剥蚀,煤层埋深持续减小。在研究区西北部的霍州—汾孝一带,上第三系和第四系地层直接覆盖在上古生界地层之上,表明部分地段的煤层埋深甚至小于煤层气风化带深度,这对煤层气的保存极其不利。该阶段与第三阶段相似,同样可称为埋深减小阶段,但在古地热场特征方面存在显著差异(见下述)。

第五阶段,出现在晚第三纪至第四纪,属于喜马拉雅运动晚期,特点是构造分异作用重新加剧。某些地区地壳快速沉降(如临汾—洪洞地区沉降速率达 60 m/Ma),煤层埋深重新加大,有利于煤层气的继续保存。大部分地区基本稳定或略有沉降(或抬升),煤层气的保存状况更加明显地受到其它地质因素的影响。

三 煤层埋藏历史地质模式与煤层气保存潜势

本区上古生界煤层的埋藏历史曲线表明,新生代以前煤层的埋藏深度始终大于 1000 m。因此,从埋藏历史角度分析,本区煤层气的保存状况主要取决于第四阶段晚期和第五阶段煤层(系)的埋藏特征。进一步分析煤层埋藏历史曲线发现,山西南部不同地区上古生界煤层的埋藏历史是有所差异的。这种差异主要体现在上述第二阶段和第五阶段,是构造分异作

用的必然结果。由此可总结出本区煤层埋藏历史的三种模式，不同模式下煤的生烃演化历程和煤层气的保存历史有所差异。

第一种类型可称为“V”型模式，是华北晚古生代煤田现采矿区煤层的主要埋藏类型，存在于阳城—翼城、霍州、汾西等地区(图 4-2)。这种类型的特点是自印支晚期(第二阶段)以来，地壳持续抬升，导致煤层的埋藏深度持续减小。因此，煤层气的总体保存条件取决于煤层曾经达到的最大埋深以及喜马拉雅期以来上覆地层被剥蚀的程度。

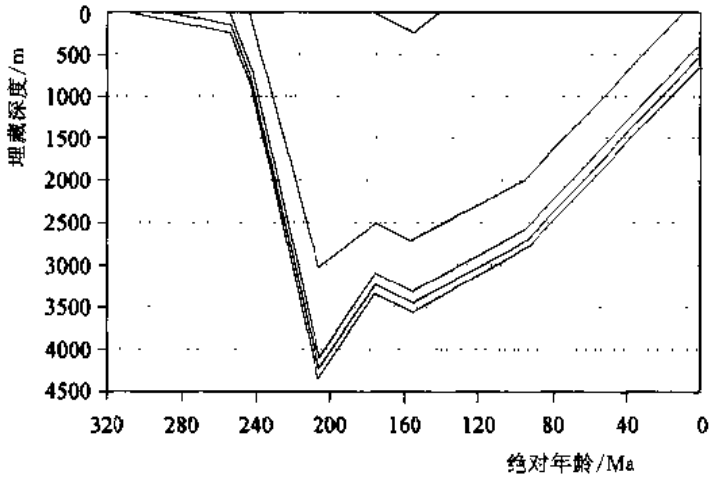


图 4-2　上古生界煤层“V”型埋藏模式埋藏历史剖面

在阳城—翼城地区，印支晚期以来尽管总体上处于持续上隆、遭受剥蚀的状态，但上古生界含煤岩系底界的最大埋深曾达 4400 m，煤层被抬升至煤层气逸散带(距地表 600 m 以浅)内的时间距今仅有 5 Ma 左右(图 4-2)，逸散时间较短，有利于煤层气的保存。这是阳城矿区煤层含气量高和含气饱和度大(见第六章)的重要原因之一。

汾西、霍州等地区煤层气的保存条件与阳城—翼城地区有所不同。虽然这些地区煤层埋藏历史的类型相同，印支晚期—喜马拉雅中期地壳抬升幅度、速率和剥蚀厚度相似，但汾西和霍州地区上古生界煤系上覆地层原始厚度远小于阳城—翼城地区，抬升和剥蚀的结果造成前两地区煤层进入煤层气逸散带的时间远长于后一地区。汾西地区煤层进入煤层气逸散带的时限约在距今 35 Ma，霍州地区距今约 50 Ma。尽管这两个地区自晚第三纪以来煤层埋深再次有所增大，但总体上未超过煤层气逸散带深度，致使煤层气基本上放散殆尽。数年来的煤田地质勘探和煤矿开采的实践已充分证明了这一事实。

第二种模式表现为“W”型埋藏历史，沁源—沁县地区和安泽地区上古生界煤层是这种类型的典型实例(图 4-3)。这类埋藏模式与“V”型模式的区别在于第二阶段地壳的波动幅度相对较大，煤层埋深在中侏罗世再度明显增大，增大的幅度相当于或略大于印支期被剥蚀的地层厚度，因此煤化作用在埋藏历史的第二阶段仍有可能得以进展。

就沁源—沁县地区而言，除盆地西部边缘的狭长地带以外，剥蚀作用始终未能完全穿透三叠系，有利于煤层气的保存，为煤层气聚集成藏创造了较好的埋藏条件和气源条件。

安泽地区煤系新生代以来的埋藏特征有别于沁源—沁县地区。据地震勘探剖面分析，煤层的现代最大埋深在 800 m 左右，且地层平缓、埋藏较为稳定(图 4-4)，似乎处于煤层气最

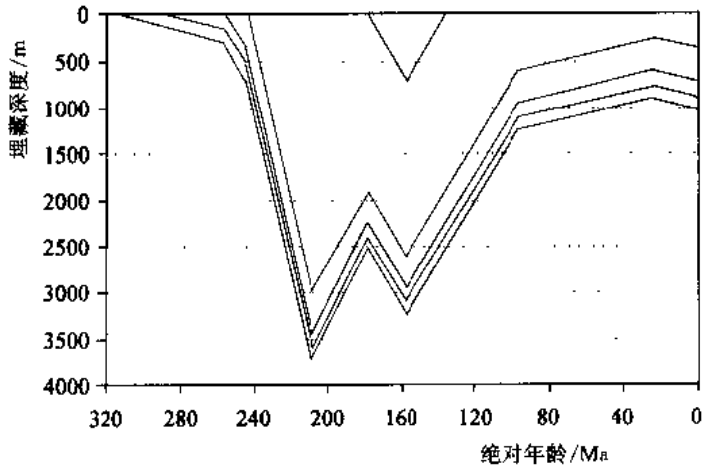


图 4-3　上古生界煤层"W"型埋藏模式埋藏历史剖面

佳勘采深度之内。然而，煤层埋藏历史分析结果表明，该区晚新生代的沉积作用极其微弱，自晚第三纪初期开始，煤层最大埋深就一直处于煤层气逸散的临界深度线附近，对煤层气的保存可能存在一定不利影响。

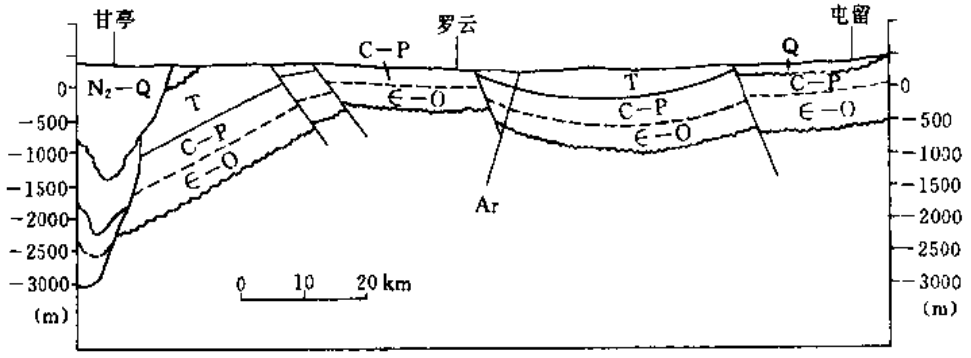


图 4-4　山西南部安泽地区地震勘探线剖面示意图

第三种模式具有"反 N"型特征，存在于临汾盆地(临汾—洪洞地区)。其特点是在埋藏历史的第五阶段地壳大幅度急剧沉降，从而与第一阶段的沉降和第二至第四阶段的抬升构成反"N"型沉降曲线(图 4-5)。临汾盆地内部广泛残留三叠系，上古生界煤系的埋深始终大于 1000 m，对煤层气的保存十分有利。但是，晚新生代以来的大幅度沉降使盆内大部分地区的煤层被深埋于 1000 m 之下，最深可超过 3000 m，给煤层气的开发带来巨大困难，但不排除盆地深部存在常规(非煤)储层形成的天然气藏的可能性。

综上所述，山西南部上古生界主煤层埋藏历史比较复杂，地质历史中不同地区煤层的埋藏特征差异较大。通过对上古生界主煤层埋藏历史的分析研究初步认为：临汾—洪洞、阳城—翼城和沁源—沁县地区煤层气保存的埋藏史条件较好；霍州和汾西地区的煤层气在地质历史中几乎逸散殆尽，基本上失去了进一步开展煤层气地质工作的价值；安泽地区煤层气可能已有相当数量的逸散，进一步开展煤层气地质条件的综合研究是确定该区是否具有勘探前景的重要途径。

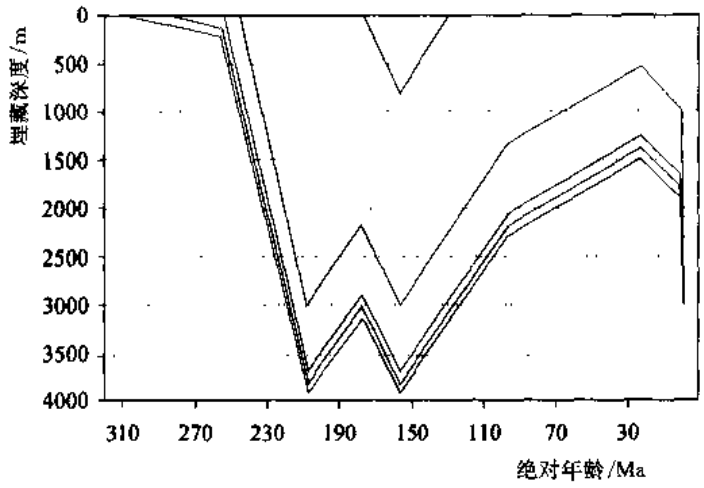


图 4-5　上古生界煤层"反 N"型埋藏模式埋藏历史剖面

第二节　古地热场特征与煤化作用

古地热场特征直接控制着煤层在地质历史中的受热温度、受热速率和受热强度，影响到煤层气的生成演化历程，进而对煤层气的保存逸散历史产生影响。因此，查明不同地史时期的古地热场特征及其演化，是煤层气地质研究的一个主要内容，也是煤层气资源评价乃至地质选区研究的重要基础工作之一。

一　区域古地热场发展史

地热场的基本要素包括地温梯度(地温增温率)、地壳中某一深度处的温度以及大地热流密度(或大热流值)。区域构造、地壳结构和岩浆活动状况决定上述要素的表现特征，其活动史控制着古地热场的演化。

前已述及，晚古生代华北地区为统一而稳定的巨型盆地，具有典型的克拉通盆地的特征。在三叠纪，华北地台开始活化，但三叠系与二叠系连续沉积，区内除南、北边缘之外，至今尚未发现印支期岩浆活动的证据，有人甚至据此认为印支运动在华北盆地内部表现不明显。无论印支期构造运动在本区的表现明显与否，地层的沉积特征至少表明海西期和印支期仍同属一个构造旋回，印支期该区大地构造仍具有地台的特征。在全球大陆的克拉通地区，大地热流密度一般小于 45 mW/m^2(1.08 HFU)。取砂岩和泥岩的平均热导率 1.6 计算(陈墨香，1988)，沉积盖层的地温梯度约为 2.8 ℃/100m。由此，可将地温梯度为 3 ℃/100m 左右的地热场定义为"正常地热场"。上述特征表明，上古生界煤层埋藏历史第一阶段期间的古地热场属于正常古地热场范畴，煤化作用服从深成变质规律。

进入燕山期之后，整个华北地区构造分异作用加剧，地壳深部热流体制调整，古地热场特征发生变化。然而，就整个华北地区而言，侏罗系岩浆岩仅见于北缘的阴山—燕山地区和东缘的郯庐深断裂带，属陆壳型岩浆岩，在包括山西南部的华北地区内部未见显示。因此，研究区内燕山早期(侏罗纪)的古地热场可能还不具备异常古地热场的特征，或者说对上古生界煤层在埋藏第二阶段的煤化作用没有产生显著影响。

燕山中期是华北晚古生代以来最重要的岩浆—热事件时期，岩浆活动显示遍及华北全区，山西南部同样存在多处该期岩浆活动的证据。研究区西南部襄汾—浮山—翼城之间为一燕山中期岩浆活动强烈的块断隆起区，有闪长岩体大面积出露，露头总面积达 100 km^2。岩体侵位于中三叠统，上覆第三系上新统。其钾氩法放射性同位素绝对年龄为 91～138 Ma，主要集中于 130～140 Ma 之间，即鼎盛期持续了约 10 Ma(表 4-2)，属早白垩世岩浆活动的产物。在东南边缘及外围的晋城、平顺一带见燕山期低温热液铅锌矿点。燕山期第二阶段(早白垩世)具有幔源岩浆性质的中—基性岩体分布在林县、辉县一带。燕山中期的岩浆岩在研究区东部外围的长治、左权以及西北部外围的太原等地也有广泛分布。霍州地区内部不存在岩浆岩侵位于晚古生代以来沉积地层的现象，但在霍州东部的峪里、尉家垄、南峪等地见到穿插于太古界霍县群混合岩化片麻岩中的燕山期闪云煌岩脉。

表 4-2　　山西南部西南边缘燕山期岩浆岩钾氩法放射性同位素绝对年龄数据

采样地点	岩石名称	绝对年龄/Ma	产出时代	采样地点	岩石名称	绝对年龄/Ma	产出时代
襄汾塔儿山	正长闪长岩	132	早白垩世	襄汾玉兔岭	正长斑岩	123	早白垩世
襄汾公德山	石英二长岩	138	早白垩世	襄汾老山	正长斑岩	91.5	早白垩世
襄汾公德山	石英二长岩	120	早白垩世	浮山二峰山	矽卡岩	130	早白垩世
襄汾老山	二长岩	138	早白垩世	浮山二峰山	矽卡岩	77	晚白垩世

注：引自《中国区域地质调查报告(临汾幅)1∶20 万》，山西省地质局区域地质调查大队，1976。

燕山中期的构造—岩浆活动，在山西南部形成了异常古地热场，强大的古地热流使区内沉积盖层的古地温梯度高达 5.5 ℃/100m 以上，对上古生界煤在埋藏第三阶段的煤化作用进程和煤层气的生成具有显著影响。异常古地热场作用于上古生界含煤地层，形成了分布广泛的热液脉体，脉体中所含的流体包裹体的各种性质为研究异常古地热场的特征提供了可靠依据。

进入新生代后，华北地区地壳逐渐冷却，古地热场逐步恢复正常。华北地区新生代岩浆活动主要发生于北部和东部边缘地带，在研究区东部外围左权一带有沿 NW－SE 向分布的第四系玄武岩产出，研究区内部未见新生代岩浆活动的痕迹。现代地热场沉积盖层的地温梯度在 2.03～3 ℃/100m 之间，大地热流密度为 62～75 mW/m^2(1.5～1.8 HFU)。因此，山西南部在新生代处于正常古地热场作用之下。由于地温梯度减小，煤层埋深变浅，煤层受热强度显著低于燕山期，故在煤层埋藏的第四、第五阶段煤化作用没有显著进展。换言之，山西南部上古生界煤的现今煤级基本上定型于燕山中期的早白垩世。

综上所述，结合包裹体测温结果(下述)，可恢复出各地质时期煤层的受热温度(表4-3)，进而得到山西南部上古生界煤层受热历史曲线(图 4-6)。显而易见，煤的受热历史包括以下四个主要阶段：

第一阶段为缓慢增温阶段，对应于埋藏史的快速埋藏阶段，煤级缓慢增高；

第二阶段为温度波动阶段，相当于埋藏史的稳定—波动阶段，煤化作用几乎没有进展；

第三阶段是快速增温阶段，煤级可能急剧增高，是本区煤化作用的主要时期，可能导致二次生烃作用的出现，对应于显著抬升阶段；

第四阶段为温度降低阶段，包括埋藏史的第四和第五阶段，根据煤化作用的不可逆性原

理可知，煤化作用在这一阶段已完全停止。

表 4-3　山西南部上古生界含煤岩系流体包裹体温压特征和晚中生代古地场参数

样品产地	产出层位	脉体类型	包裹体温度/℃		包体压力 /10^5×Pa	等效埋深 /m	古地温梯度 /℃·(100m)$^{-1}$	大地热流密度	
			爆　裂	均　一				/mW·m^{-2}	/HFU
介休两渡	10 煤顶	方解石	301	172	9.4	2450	6.20	99.20	2.38
阳城北庄	3 号煤	方解石	294	238	12.3	3200	6.81	108.96	2.61
阳城西沟	3 号煤	石　英	287	243	10.8	2800	7.96	127.36	3.05
翼城龙王沟	9 煤顶	方解石	313	288	15.4	4000	6.70	107.20	2.57
沁水老河里	9 煤顶	方解石	—	251	9.2	2400	9.63	154.08	3.69
沁源三合	2 煤顶	石　英	287	228	8.5	2200	9.46	151.36	3.63
沁源沁新	2 煤顶	方解石	267	—	—	—	—	—	—
阳城烟水	3 煤顶	方解石	267	—	—	—	—	—	—
晋城窑会	山西组	石　英	—	234	—	—	—	—	—
晋城背岭	山西组	石　英	—	267	—	—	-	—	-

注：① 包裹体压力根据溶液浓度法计算，均一温度已进行过压力校正。　② 晋城数据引自杨起(1988)。
③ 每千米厚度地层静压力约等于 26 MPa。　④ 计算大地热流密度采用的岩石热导率为 1.6。

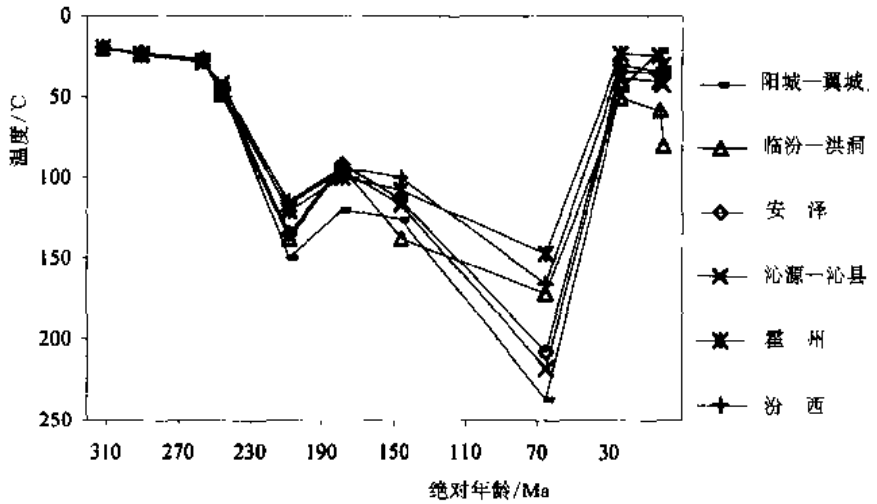


图 4-6　山西南部上古生界煤层受热历史曲线

二　晚中生代古地热场特征

地层脉体中发育的流体包裹体的矿物学性质和地球化学特征是古地热场热力学环境的真实反映。山西南部上古生界煤系地层中广泛发育燕山期热液脉体，如方解石脉、石英脉等，其中以方解石脉分布较为普遍。通过对脉体中流体包裹体的捕获温度、形成压力、流体成分、稳定同位素组成等的测试分析，不仅为晚中生代古地热场特征的确定提供了基本依据，而且在煤层埋藏、煤层气生成、二次生烃、盆地构造演化乃至异常古地热场形成机理等方面也获得了丰富的信息。

气液两相包裹体测温结果表明，煤层在晚中生代的煤化作用温度在空间的分布上是不

均衡的，具有南高北低、东高西低的总体特点(表 4-3)。这种特点与煤级的现代空间展布规律基本一致(图 3-6，图 3-8)，进一步反映出晚中生代古地热场特征对现代煤级分布的决定性影响，并从一个侧面为本区现代煤级定型于燕山中期的推论提供了进一步依据。

在研究区南部晋城—阳城—沁水—翼城一带，代表包裹体形成最低温度的均一温度大于 240 C。该带东部晋城地区略高于中部沁水、阳城地区，但西部的翼城地区又显著高于晋城地区。这种分布特征似乎与西部强烈的燕山中期岩浆侵入和东部的岩浆活动显示有关。在东北部沁源一带，包裹体均一温度在 220 C～230 C之间，低于南部地区。西北部介休(或汾西)一带的包裹体均一温度在全区最低，仅有 170 C左右。一般认为，爆裂温度代表包裹体形成的上限温度，但爆裂温度的高低实际上受到多种因素影响，除形成温度之外，还与矿物种类、包裹体壁厚度(或包裹体大小与母矿物晶粒大小之间的相对关系)、包裹体壁的力学强度和流体性质等因素有关。因此，爆裂温度往往不能反映包裹体形成的真实温度，与均一温度之间常不具良好的对应关系，仅能作为参考。

包裹体压力，系指包裹体形成时的压力，它与包裹体形成时的上覆地层压力具有一定的对应关系。通过包裹体压力数据可以换算出燕山中期煤层的等效埋藏深度(表 4-3)。但是，地层中的脉体多形成于张性裂隙，导致其真实形成压力多小于上覆地层的静压力，因此根据包裹体压力换算出的等效埋深只能被看成是煤层埋藏深度的上限值。对比燕山中期与燕山早期的煤层埋深可以发现，山西南部不同地区在晚侏罗世期间的地层剥蚀厚度是有差别的。例如，阳城—翼城一带约为 700 m 左右，临汾—洪洞地区达 1500 m 以上，沁源—沁县地区大于 1000 m，霍州地区大致为 700 m，而安泽地区、汾西地区分别只有 500 m 和 200 m 左右。这种差别正是构造分异作用的具体表现，说明本区在晚侏罗世尽管处于整体上隆的构造背景下，但不同地区隆起的幅度存在明显差异。这在一定程度上抵消了古地热场特征空间分布不均一性对煤化作用进程及生烃作用的影响。

地温梯度和大地热流密度是地热场正常与否的最佳判定标志。在地层垂向岩性构成相似的条件下，二者具有正相关关系。包裹体均一温度和形成压力的测试结果表明：山西南部晚中生代古地热场的地温梯度普遍超过 6 C/100m，在沁水、沁源等地高达 9 C/100m 以上；大地热流密度普遍大于 2.3 HFU，最高可达 3.6 HFU(表 4-4)。现代大陆的大地热流密度值在 0.92～1.92 HFU 之间，地温梯度在 3 C/100m 左右。这些指标可以作为衡量正常地热场的标准。

对比之下，山西南部晚中生代地热场的有关参数远高于现代大陆地热场的平均值，具有异常古地热场的典型特征。正是由于这种古地热场中强大地热流的作用，使上古生界煤层在较短暂的地质时段内迅速演化至现今煤级，并在此过程中生成大量煤层气。

进一步分析发现：晚中生代地热场中最高热流区的分布与最高煤级区的展布并不一致，与燕山期岩浆活动显示带在空间上也不重合。例如，本区最高煤级展布于东南部的阳城一带，燕山期岩浆岩基本上只见于西南角的襄汾—浮山一翼城地区和东南角的晋城地区，而高热流区则分别位于南部的沁水地区和东北部的沁源—沁县地区。前一种现象源于不同地区煤层在晚中生代埋藏深度的差别，热流虽高但埋藏相对较浅的地区，由于煤层实际受热温度相对较低，故煤级不一定最高，反之亦然。如前所述，不同地区隆起幅度的明显差异，在一定程度上抵消了古地热场特征空间分布不均一性对煤化作用进程及生烃演化的影响。因此，后一种现象则是古地热场机制控制下的自然现象或结果(详见后述)。

表 4-4　　山西南部晚中生代地热场有效受热时间的 LOM 法模拟结果

地　区	镜质组反射率/%	实测均一温度/℃	模拟温度/℃		
			49 Ma	10 Ma	1 Ma
阳城—翼城	3.54	251	215	238	280
临汾－洪洞	1.75	182	170	190	225
安　泽	2.10	199	180	205	225
沁源—沁县	2.88	228	210	230	265
霍　州	1.15	152	135	160	195
汾　西	1.46	172	160	180	223
晋　城	4.00	251	225	245	285

国内外已有实例表明，古地热场鼎盛期持续时限的长短与有机质的生气效率密切相关。在一定的煤级范围内，短时高温的热力作用有利于烃类的生成。例如，在美国圣胡安盆地、中国河东煤田柳林气田等地区，区域岩浆热变质作用即是煤层气富集高产的主要地质因素之一。数值拟合结果显示，采用 10 Ma 的有效受热时间（最高古地温段持续的地质时限）所拟合出的最高古地温温度与山西南部实测包裹体均一温度值最为接近（表 4-4）。换言之，山西南部晚中生代异常古地热场鼎盛期持续的时间仅有 10 Ma 左右，是一种典型的非稳定（瞬时）地热场，具备有利于煤层气生成的古地热场条件。应当指出，这一时限与本区燕山中期岩浆活动鼎盛期持续时间是一致的（参见上述），两者的吻合并非偶然，而是正好反证了所用数值拟合方法具有的高度客观性。

综上所述，山西南部晚中生代地热场具有三个主要特征：一是大地热流量高；二是具有非均一性；三是具有瞬时性。这些特征与正常古地热场背景叠加，共同作用于上古生界煤层，结果是一方面使煤级在短暂地质时限内迅速增高，并在二次生烃过程中完成了主要生气历程，造成现今煤级分布不均一的格局；另一方面有可能提高煤中有机质的生气效率，从而给煤层气的富集创造了有利生气条件。

三　反演煤热演化历程的 EASY%R$_o$ 法数值模拟

基于化学反应动力学原理的数值模拟是定量恢复煤热演化历程的唯一途径。迄今为止，世界各国提出的数值模拟方法已达数十种，但得以广泛推广应用的只有 Karweil 法、Hood 法（LOM 法）、Z 值法、Lopatin-Waples 法（TTI 法）、Tissot 法等以及由这些方法衍生出来的其它方法。在这些方法中，有的方法将化学反应活化能作为常量看待从而造成拟合结果存在较大失真，有的方法考虑到反应活化能的变化但未考虑有机质热演化中存在的平行反应而仍有一定误差，有的方法考虑到了各种影响因素而使拟合过程过于复杂化（秦勇等，1995）。因此，国内外研究者一直在寻求一种既能反映真实演化历程又较为简便的数值模拟方法，以便应用于实际操作。而由 Burnham（1989）、Sweeney（1990）等建立的 EASY%R$_o$ 法正是这种努力的最新成果。

EASY%R$_o$ 法吸取了其它方法的主要优点，考虑并简化了平行反应过程，在阿伦尼乌斯方程的基础上建立了适用于煤的化学反应动力学模式，以定量描述镜质组反射率与受热历史、有机质化学组成等之间的关系。目前，EASY%R$_o$ 法已引起国际能源地质界的关注，在美

国的阿巴拉契亚和中欧的鲁尔盆地等地区得到应用，并被认为是优于其它模拟方法的一种有效方法。

山西南部上古生界煤层热演化历史的EASY%R。法模拟结果见表4-5。为进行对比，也采用TTI法和LOM法进行了数值模拟(表4-6)。上主煤层镜质组反射率在阳城—翼城一带平均为3.3%，在沁源—沁县一带平均为2.6%，在安泽地区为2.1%，在霍州地区为1.0%，在汾西地区为1.4%，根据区域分布规律预测临汾—洪洞一带平均为1.7%。对比之下，EASY%R。法拟合结果与镜质组反射率的实测值基本吻合，LOM法结果与实测值也较为接近，而TTI法结果误差明显较大。由此可以认为，EASY%R。法是适宜于本区的较为理想的方法，能够较为真实地反映煤的热演化历程，LOM法的拟合结果也较为可信，而TTI法在本区并不适用。本书采用EASY%R。法的模拟结果讨论煤的热演化历史。

表4-5　　山西南部上古生界煤层煤化作用历史EASY%R。法模拟结果

地　区	不同地质时代的镜质组反射率/%						
	晚石炭世	早二叠世	晚二叠世	三叠纪	早侏罗世	中侏罗世	早白垩世
阳城—翼城	0.27	0.29	0.31	1.00	1.00	1.15	3.54
临汾—洪洞	0.27	0.29	0.31	0.85	0.85	0.96	1.78
安　泽	0.27	0.29	0.31	0.69	0.69	0.76	2.11
沁源—沁县	0.27	0.29	0.31	0.69	0.69	0.76	2.87
霍　州	0.27	0.29	0.31	0.72	0.72	0.78	1.15
汾　西	0.27	0.29	0.31	0.68	0.68	0.74	1.46

注：① 恒温带温度取20℃，深度取0 m。

② 模拟结果为每一地质时代末期的数据。

表4-6　　山西南部上古生界煤层煤化作用历史的TTI法和LOM法模拟结果

地质时代	阳城—翼城		临汾—洪洞		安　泽		沁源—沁县		霍　州		汾　西	
	TTI	LOM	TTI	LOM	TTI	LOM	TTI	LOM	TTI	LOM	TTI	LOM
K_1	4.95	3.70	2.45	1.70	3.02	2.00	4.53	2.50	1.50	1.10	2.02	1.30
J_2	2.19	0.85	1.73	0.85	1.60	0.62	1.22	0.71	1.39	0.65	1.15	0.60
T	1.14	0.82	0.95	0.78	0.95	0.78	0.68	0.61	1.28	0.65	1.00	0.60
P_2	0.35	0.32	0.35	0.35	0.35	0.34	0.35	0.35	0.35	0.36	0.35	0.36

注：① 恒温带温度取20 ℃，深度取0 m。

② 模拟结果为每一地质时代末期的数据，以镜质组反射率给出。

煤化作用史严格受控于煤的受热历史，因此山西南部上古生界煤的煤化作用历史与其受热历史相对应，同样经历了四个发展阶段(图4-7)：

第一阶段末期，全区普遍达到或超过了亮褐煤—长焰煤煤级，最高已至气煤阶段。煤化作用在二叠纪进展缓慢，仅达褐煤煤级，在三叠纪进展加快，这与埋藏速率增大有关。

第二阶段早侏罗世煤化作用没有进展，中侏罗世煤级略有增高，但仍未超出气煤阶段。

第三阶段是煤化作用显著发展的时期，这是异常古地热场作用的必然结果，该阶段煤级

迅速跃升，最高者已接近超无烟煤，在早白垩世末完成了本区主要煤化作用历程。

第四阶段，煤层受热温度降低，煤化作用停止。

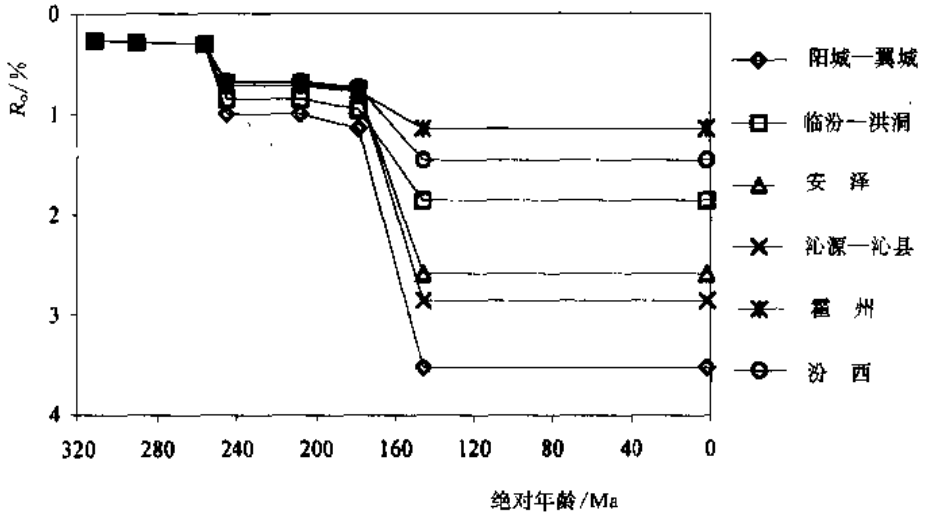


图 4-7 山西南部上古生界煤热演化历史曲线

在山西南部的不同地区，煤的热演化进展是有差异的，这种差异显然是构造分异作用和古地热场热流作用空间分布不均衡性的具体表现。热演化差异起始于三叠纪，并随煤化作用的加深而渐趋显著。这是从印支期至燕山期本区构造分异程度及古热流作用不均衡性不断加剧的必然结果。在早白垩世末最终形成了本区"南高北低、东高西低"以及气煤至无烟煤均有赋存的煤级展布格局。

四 晚中生代异常古地热场形成机理

要探讨异常古地热场的形成机理，关键在于查证异常大地古热流的来源及其大地构造背景，而研究矿物流体包裹体的矿物学和地球化学特征是进行这一查证的有效途径。

前已述及，山西南部晚中生代古地热场的大地热流密度普遍大于 2.3 HFU，地温梯度普遍超过 6 ℃/100m。对比地球上不同时代和不同大地构造单元中地热场有关热物理参数可知，山西南部晚中生代古地热场的相应古热流数据远高于现代大陆的平均值，而与现代大陆裂谷带较为接近(表 4-7)。因此，本区晚中生代异常古地热场的形成显然与区域断块的活化有关。

形成区域性异常地热场的热源可能来自多个方面，例如侵入地壳深部的岩浆的释放热、上地幔隆起造成的异常热传导和深循环地下高温气水溶液的热对流等。这些附加热源与正常地热场背景叠加，往往是导致具有一定规模的异常地热场的主要原因。

山西南部中生代岩浆岩仅见于东南部的襄汾—浮山—翼城地区，该区局部地段的煤级带展布发生畸变，分别围绕塔儿山和二峰山岩体呈环带状分布，环带极为狭窄，远离岩体煤级分布很快趋于正常(图 3-6，图 3-8)。换言之，岩浆岩的冷凝释放热确实为异常古地热场的形成提供了附加热源。一般来说，侵入体冷凝释放热对煤化作用影响的有效半径是侵入体直径的 1～3 倍，作用时间只有 10^3～10^5 年。因此，这种影响仅是局部的，其作用范围和时限均极为有限，不足以为区域性异常古地热场的形成提供附加热源。因此，对于造成区域性异常古地热场的主要热源，尚需进一步研究。

表 4-7　　不同大地构造单元或盆地地热场热物理数据

构造单元或地区		大地热流密度		地温梯度/℃·(100m)$^{-1}$	
		/mW·m^{-2}	/HFU	最大值	一般值
现代大陆	前寒武纪地盾	3.85	0.92	—	—
	后前寒武纪非造山区	64.4	1.54	—	—
	后前寒武纪造山区	61.9	1.48	—	-
	中—新生代造山区	80.3	1.92		—
现代大陆裂谷	中国渤海湾盆地	98.7	2.36	3.78	3.08～3.37
	中国松辽盆地	93.6	2.24	6.20	3.11～4.80
	中欧莱茵盆地	176	4.21		—
	俄罗斯贝加尔盆地	143	3.42	—	—
	西欧格兰德河盆地	107～670	2.56～16.03	—	6.30～7.00
	非洲东非盆地	105～144	2.51～3.42	—	—

注：数据引自陈胜早等(1992)。

显微镜下观察，区内热液脉体中流体包裹体的大小多为 10～30 μm，气液比多在 5%～20%之间，形态多较规则，表明多为原生包裹体(表 4-8)。一般情况下，岩浆热液矿床中包裹体个体较大(20～90 μm)、气液比高(多为 40%～70%)、形状较规则；非岩浆热液矿床中包裹体则个体小(多<3 μm)、气液比低(3%～8%)、形状不规则(何知礼，1982)。对比可见，本区热液脉体既具有非岩浆热液的成因特征，又具有岩浆热液的某些特点。

表 4-8　　山西南部上古生界煤系脉体包裹体矿物学特征

样品产地	脉体类型	包体常见大小/μm	包体常见形态	气液比常见值/%	成分类型		其它特征
					单相	两相	
介休两渡	方解石	10～35	负晶状	10～20	—	NaCl—H_2O	包体丰富，主要为两相包体
阳城北庄	方解石	5～15	负晶状	10～20	—	NaCl—H_2O	包体少，形体小
阳城西沟	石英	<10	较规则	≤12	—	NaCl—H_2O	包体少，见含子晶三相包体
翼城龙王沟	方解石	5～15	负晶状	<20	—	NaCl—H_2O	主要为两相包体
沁水老河里	方解石	4～15	负晶状	5～15	CO_2-CH_4	NaCl—H_2O	包体丰富，最高气液比>30%
沁源三合	石英	5～30	负晶状	8～20	CO_2-CH_4	NaCl—H_2O	包体丰富，最高气液比达 30%

热液脉体原生包裹体中的流体实际上是矿物形成时保存下来的成岩介质，其物质成分中包含了丰富的古地热场成因信息。据显微冷热台观察，本区两相流体包裹体主要为 NaCl—H_2O 类型(表 4-8)，气相色谱和原子光谱测定结果不仅证实了这一观察结果，而且给出更为丰富的成因信息。液相物质组成尽管较为单调、以离子总量表示的总矿化度较低，但富含在酸性岩浆和变质水中较为丰富的 Na^+、K^+ 阳离子以及岩浆期后气水溶液中特有的 F^-、Cl^-、SO_4^{2-} 阴离子，而缺乏沉积岩中富有的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 阳离子(表 4-9)。气相组成中以 H_2O 占绝对优势，CO_2 也占一定比例，除个别样品中富含 CH_4 外，其它成分比例极低，这与岩浆期后气水热液具有相似之处(表 4-10)。

表 4-9　　山西南部上古生界煤系脉体流体包裹体液相组成

样品产地	样品类型	总矿化度 /μg·g⁻¹	液相（离子）组成 /%									
			Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Br	NO_3^-	PO_4^{3-}
介休两渡	方解石	114.39	2.80	35.32	—	—	2.50	6.23	53.15	0	0	0
阳城北庄	方解石	27.35	17.77	23.00		—	5.61	41.35	11.92	0	0	0
阳城西沟	石　英	25.10	32.83	8.77	0	0	1.95	42.07	14.38	0	0	0
翼城龙王沟	方解石	3.16	8.86	36.71	·	—	16.46	14.87	23.10	0	0	0
沁源三合	石　英	17.62	11.35	24.97	—	—	8.17	12.37	43.13	0	0	0
沁源沁新	方解石	13.81	11.80	21.22	—	—	2.82	23.82	40.33	0	0	0
阳城烟水	方解石	15.48	10.01	38.76	—	—	4.39	34.56	12.27	0	0	0

表 4-10　　山西南部上古生界煤系脉体流体包裹体气相组成

样品产地	样品类型	气相浓度 /10^{-6} mol·g⁻¹	气相组成 /%						
			H_2O	CO_2	CH_4	CO	N_2	H_2	O_2
介休两渡	方解石	23.221	95.72	3.42	0.52	0.29	0.05	0	0
阳城北庄	方解石	36.247	98.62	1.20	0.06	0.07	0.06	0	0
阳城西沟	石　英	19.135	81.00	微量	18.81	0.15	0.04	0	0
翼城龙王沟	方解石	27.344	97.33	2.53	0.03	0.06	0.05	0	0
沁源三合	石　英	12.856	45.35	1.46	0.10	0.11	0	0	0
沁源沁新	方解石	14.173	88.78	10.48	0.50	0.24	0	0	0
阳城烟水	方解石	14.738	87.71	9.67	1.15	1.15	0.33	0	0

在自然界中，从天水、海水、地层中下降水，经原生岩浆水、变质水向高岭石方向，氧同位素组成逐渐变重，这一规律在 Steppard(1977)图解中得到明确反映(张文淮等，1993)。因此，通过包裹体氢氧同位素组成在 Steppard(1977)图解中的分布特征可以较为可靠地判别其流体的物质来源。

研究山西南部流体包裹体发现：其氧同位素组成偏重，致使氢氧同位素组合在 Steppard(1977)图解中落入原生岩浆水和变质水右侧区域，其变化小、分布范围集中，但某些样品落点接近高岭石线(表 4-11，图 4-8)。

戴金星等(1992)的研究成果表明，中国自然界中的各种成因甲烷的碳同位素组成(PDB)分布在－92‰～－14‰之间。其中，生物气甲烷为－92‰～－55‰，油型气甲烷为－56‰～－30‰，有机热成混合甲烷为－37‰～－30‰，地热甲烷为－30‰～－20‰，煤层气甲烷为－42‰～－14‰。本区包裹体碳同位素组成小于－10‰，分布于甲烷气范围之外，但部分样品接近甲烷气范围(表 4-11)；包裹体中碳化合物气体由 CO_2、CO 和 CH_4 组成，其中 CO_2 在气相物质中的含量远高于 CH_4 所占比例(表 4-10)。由此可以认为 CO_2 是本区包裹体碳同位素的主要贡献者。进一步考察碳同位素组成与二氧化碳含量之间的关系发现，阳城北庄和沁源三合的包裹体 CO_2 具有无机成因，翼城样品包裹体 CO_2 却具有有机—无机混合成因气的典型特点(表 4-11，图 4-9)。无独有偶，翼城样品是山西南部所采包裹体样中最靠近岩浆岩体(塔儿山—二峰山岩体)的样品。

表 4-11　　山西南部上古生界煤系脉体流体包裹体稳定同位素组成

样品产地	产出层位	样品类型	稳定同位素组成/‰			
			δD_{SMOW}	$\delta^{18}O_{PDB}$	$\delta^{18}O_{SMOW}$	$\delta^{13}C_{PDB}$
阳城北庄	3 号煤层	方解石	−80	−15.7	14.7	−9.7
阳城西沟	3 号煤层	石　英	−68	−	19.3	
翼城龙王沟	9 号煤顶板	方解石	−85	−20.9	9.3	−1.0
沁源三合	2 号煤顶板	石　英	−67	−15.7	14.7	−9.8

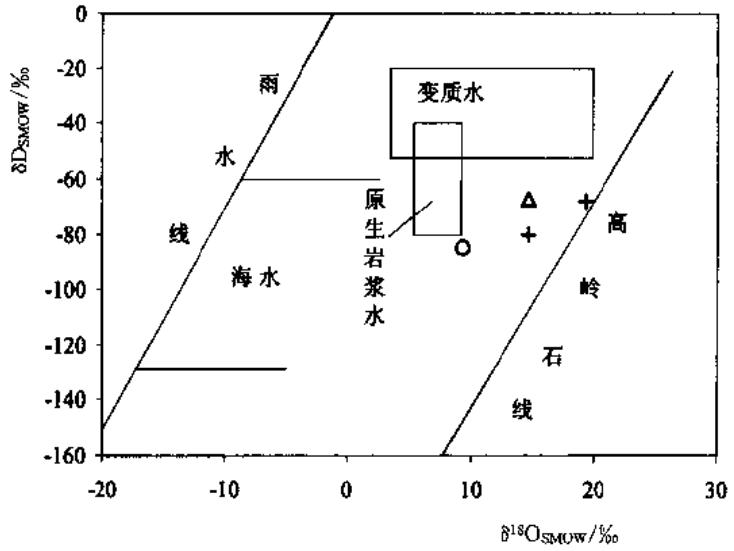


图 4-8　山西南部上古生界煤系脉体流体包裹体氢氧同位素分布 Steppard 图解

+——阳城样品；○——翼城样品；△——沁源样品

总结山西南部流体包裹体的地球化学特征，可以得出以下几点结论。

第一，本区晚中生代古地热场中流体介质的主要来源不是天水和地表下降水，氢氧同位素在 Steppard 图解中的分布特征充分证实了这一结论。进一步推论，该地质时期本区不存在气水热液的强烈深循环作用。

第二，本区包裹体流体可能主要来源于深部上涌的岩浆期后气水热液。Steppard 图解、包裹体液相组成中 Na^+、K^+、F^-、Cl^-、SO_4^{2-} 等离子浓度高、氢氧同位素组成分布范围集中等特点为此推论提供了证据。除此之外，二氧化碳的碳同位素分布范围与热液矿床中包裹体二氧化碳的碳同位素分布范围（−12‰～−4‰）基本一致，也是这一结论的重要佐证。

第三，本区包裹体流体存在一定程度的混合成因，但混合程度较弱。这种混合可能起源于两种原因：一是岩浆期后气水热液在上涌过程中途经深部太古界—元古界变质岩系，与变质水发生混溶，导致其氢氧同位素组合接近变质水区；二是气水热液侵入煤系地层后与已生成的煤成气发生混合，造成部分样品包裹体二氧化碳具有有机—无机混合成因。

第四，深部气水热液进入沉积盖层后具有作用期短、热量释放快的特征，这与由数值模拟得出的本区晚中生代异常古地热场具瞬时性的结论是一致的。换言之，深部气水热液在形成煤系脉体之前未能与沉积盖层之间进行充分的气—水—岩物质交换作用。这是本区包裹

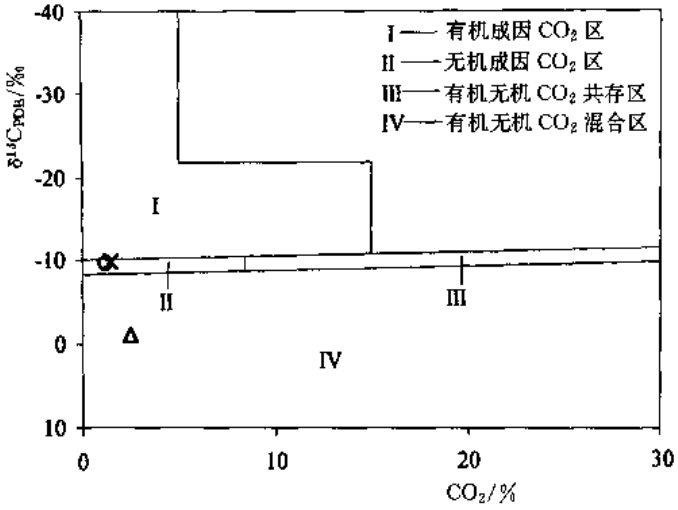


图 4-9　山西南部上古生界煤系脉体流体包裹体二氧化碳成因判别图解

+——阳城样品；○——翼城样品；△——沁源样品

（底图据戴金星等，1992）

体流体中缺乏含煤地层和下伏下古生界碳酸盐岩中富有的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 离子以及含煤地层碎屑岩硅酸盐、硅化物矿物中富含的 Si^{4+}、Fe^{3+}、Al^{3+} 等离子的根本原因。一般而言，海相碳酸盐岩的碳同位素组成为－5‰～5‰，氧同位素组成在－15‰～0‰之间，与本区包裹体碳氧同位素组成分布范围相去甚远。这一事实同样支持了上述结论。

第五，本区除西南部之外，燕山期岩浆在深部的大规模侵入可能至少在区内东南部的阳城—晋城—陵川—高平地区也曾发生。这些地区正磁异常、煤系岩浆期后热液脉体和晚中生代高热地热场的存在正是这种深部岩浆活动的具体表现。山西南部最高煤级分布带与岩浆侵入区在空间上的吻合，则是这种深部岩浆活动的必然结果。本区在早中燕山期总体上处于拉伸大地构造环境，该期深部的大规模岩浆运移和热力学机制调整不仅是这种构造环境的动力，也是其存在的具体反映。

通过以上对流体包裹体物质来源的研究，论证了山西南部晚中生代深部岩浆活动的存在，从而可知形成本区晚中生代异常古地热场的附加热源来源于两种途径：一是岩浆期后气水溶液的热对流；二是岩浆侵位于地壳不同深度而造成的热传导。岩浆期后气水溶液是一种热容量极大且传热效率极高的载热流体，其存在使沉积盖层中的古地热场快速升温，但由于热量释放快、作用时间短、缺乏有效循环和可能主要作用于上涌通道附近，故不能作为附加热流的主要来源。大规模侵位于地壳深处的岩浆通过地层热传导向上传递强大热流，作用时间相对较长、而积大、热流高，可能是形成本区晚中生代区域异常古地热场的主要原因。

第三节　石炭—二叠系煤的生烃演化

煤中烃类的生成主要是其有机质热演化的结果。基于这种因果关系，本节将在煤热演化历程研究的基础上进一步讨论山西南部上古生界煤在不同地质时期所达到的生烃阶段、各阶段烃类生成的数量以及不同地区生烃特征的差异，特别是与煤层气现今富集状况密切相

关的二次生烃作用及其发生的时代、强度等地质影响因素。

一 各地质历史时期的生烃特征

煤层总体上是一种以Ⅱ型有机质为主的气源岩。与常规油源岩相比，煤中有机质的生烃作用具有以下特征。

① 从广义来看，煤层气的生成贯穿于整个煤化作用过程，因此在低、中、高煤级的煤化作用阶段均有可能形成煤层气气藏。

② 由于作用因素的差异和有机质中小分子脱落的机制不同，煤的生气历程将先后经历生物气、热降解气(湿气)和热裂解气(干气)三个具有潜在经济价值的生气高峰。

③ 在不同阶段中煤层气产率占总气产率的比例有所差异，生物气产率略小于总产率的1/4，热解气约占总产率的1/3，热裂解气略多于总产率的1/3。因此，湿气阶段和干气阶段均是煤层气生成的重要阶段。

④ 前一热演化阶段由于古地温温度降低而停止生烃之后，在后续地质历史中如果再次出现古地热场增温且温度高于前一阶段古地热场温度、具有足够的作用时间，煤层气将会再次生成，即所谓的二次生烃作用。

根据上面关于埋藏史、热演化史和生烃演化一般特征的讨论可知，山西南部上古生界煤的生烃作用几乎只发生在埋藏—热演化史中的两个阶段。第一阶段为快速沉降—缓慢增温阶段，历经石炭纪、二叠纪和三叠纪；第二阶段为快速抬升—快速增温阶段，主要发生在晚侏罗世至早白垩世。采用视煤气发生率热模拟实验数据(图4-10)，可计算出山西南部不同地区上古生界煤在不同阶段中的生烃演化特征(表4-12)。

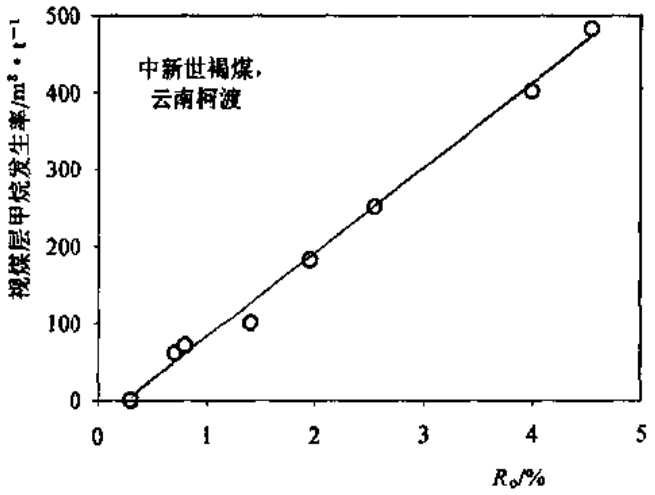


图4-10 褐煤视煤气发生率演化曲线

(数据引自傅家谟等，1990)

在生烃演化的第一阶段，区内煤层普遍经历了生物气阶段。在该阶段结束时的晚三叠世末期，普遍进入了湿气阶段，但基本上未达到湿气生成的高峰时期。然而，不同地区煤的生烃演化程度是不同的：阳城—翼城地区的煤已达湿气中期阶段，开始进入湿气生成的高峰；临汾—洪洞地区煤处于湿气早期阶段；其它地区的煤则刚进入湿气阶段。不同地区煤的生烃特征与三叠系原始厚度的区域分布特征一致，显然受控于印支期地壳沉降的幅度，是深埋作用

或深成变质作用的结果。

表 4-12　　山西南部上古生界煤生烃演化历程

地　区	地质时代	热演化阶段	阶段末 R_o/%	煤层气生成阶段	阶段生气量 /$m^3 \cdot t^{-1}$	累计生气量 /$m^3 \cdot t^{-1}$
阳城　翼城	C_3—T_3 J_3—K_1	N～FM FM～WY	1.00 3.54	生物气～湿气中期 湿气中期～干气末期	81.45 277.65	81.45 359.10
临汾—洪洞	C_3　T_3 J_3—K_1	N～QM QM～SM	0.85 1.78	生物气～湿气早期 湿气早期～干气初期	65.05 129.53	65.05 194.58
安　泽	C_3　T_3 J_3—K_1	N～QM QM～PM	0.69 2.11	生物气～湿气初期 湿气初期～干气早期	47.56 155.23	47.56 202.79
沁源　沁县	C_3—T_3 J_3　K_1	N～QM QM～PM	0.69 2.57	生物气～湿气初期 湿气初期～干气中期	47.56 205.52	47.56 253.08
霍　州	C_3—T_3 J_3 -K_1	N～QM QM～FM	0.72 1.15	生物气～湿气初期 湿气初期～湿气中期	50.85 47.01	50.84 97.86
汾　西	C_3- T_3 J_3—K_1	N～QM QM～JM	0.68 1.36	生物气～湿气初期 湿气初期～湿气中期	46.47 74.34	46.47 120.81

注：N——泥炭；QM——气煤；FM——肥煤；JM——焦煤；SM——瘦煤；PM——贫煤；WY——无烟煤

在生烃演化的第二阶段，不同地区煤层的生烃作用明显分异。阳城—翼城地区煤的生烃作用进展最大，历经湿气生成高峰和干气生成高峰阶段，至阶段末期基本上经历了煤化作用历史中的整个生烃过程。沁源—沁县地区的煤经历了湿气阶段，并在阶段末期开始进入干气高峰阶段。安泽地区和临汾—洪洞地区的煤经历了湿气阶段，开始生成干气。霍州和汾西地区煤的生烃作用在此阶段进展最小，明显落后于其它地区，阶段末期仅达湿气生成的中期阶段。该阶段生烃作用在地区之间的差异性是燕山中期构造分异作用和异常古地热场空间分布非均一性的必然结果，主要取决于煤的区域岩浆热变质作用。

二　二次生烃作用

煤的二次生烃作用取决于其受热历史。在正常古地热场背景下，煤层的二次埋藏深度必须远远大于一次埋藏深度，这是二次生烃作用发生的必要条件。但是，在满足这种必要条件的情况下二次生烃作用并不一定能够发生，因为有机质热演化的重新启动是温度、反应活化能和作用时间的综合结果，足够的作用时间是二次生烃的又一必要条件。一次热演化作用达到的煤级越高，二次生烃发生所需要的作用时间越长。在异常高热古地热场情况下，由于煤层在异常古地热场中的受热温度通常远大于在一次生烃期正常古地热场中的受热温度，故二次生烃作用的发生对埋藏史没有严格要求。二次生烃期间煤层的埋深可大于一次生烃的埋深，也可远小于一次生烃的埋深。同时，煤层在异常古地热场中的受热速率显著增高，因此热演化重新启动所需的作用时间也会短于在正常古地热场中所需的时间。进而言之，二次生烃作用发生的最重要地质条件是煤层再次受热的最高温度，只要在一定作用时间内受热温度高于一次埋藏期中的最高受热温度，生烃作用就有可能再次发生。

埋藏史—古地热史—热演化史—生烃史的研究表明，山西南部上古生界煤的生烃历程是不连续的。在海西—印支期，发生进展较为缓慢的第一次（简称一次）生烃作用；在燕山早期，生烃作用中断或基本停止；在燕山中期，出现第二次（简称二次）生烃作用，进展较为迅速。平均而言，山西南部一次生烃作用的生气量在总生气量中的相对比例只有 32%，后者则达 68%，前者显著弱于后者。因此可以认为，二次生烃作用的特征是影响煤层现今含气性的

最为重要的因素之一。

然而，与埋藏史—古地热史—热演化史—生烃史相同，二次生烃作用强度在空间上的分布也有极大的非均一性(图 4-11)。阳城—翼城一带的二次生烃作用显著强于其它地区，绝对生气量达 277 m^3/t，相对生气量为 71%。沁源—沁县次之，绝对生气量在 205 m^3/t 左右，相对生气量高达 81%，占总生气量的五分之四。安泽地区相对生气量占总生气量的四分之三，绝对生气量在 155 m^3/t 左右。临汾—洪洞地区二次生烃作用弱于上述地区，但绝对生气量仍有 129 m^3/t，相对生气量为 71%，二次生气量仍占总生气量的三分之二以上。霍州地区和汾西地区二次生烃作用尽管在山西南部最弱，但仍然十分明显，绝对生气量为 47～74 m^3/t，相对生气量在 48%～61%之间，仍占总生气量的一半左右。

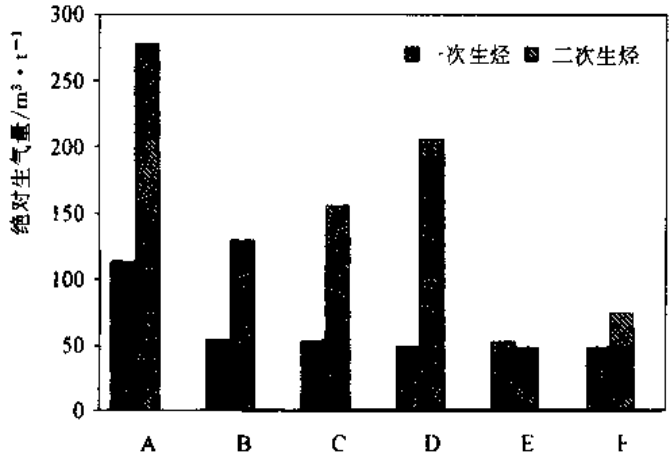


图 4-11　山西南部不同地区上古生界煤一次和二次生烃作用绝对生气量对比直方图

A——阳城—翼城地区；B——临汾—洪洞地区；C——安泽地区；

D　沁源　沁县地区；E　霍州地区；F——汾西地区

三　生烃特征与煤层气富集

煤层气的富集与逸散受控于多种地质因素，生烃特征是其中的重要地质控制因素之一。与煤层气富集相关的生烃因素主要包括三个方面：一是最后一次生烃作用发生的地质时期；二为最后一次生烃作用所经历的生烃过程和达到的生烃阶段；三是生烃作用停止之后煤层的埋藏历史。山西南部上古生界煤层的现今煤级定型于燕山中期的早白垩世，这一结论已从区域构造演化史、煤层埋藏史、古地热史以及煤的热演化史等方面得到证实。因此，控制山西南部上古生界煤层中煤层气相对富集的生烃因素是二次生烃作用的历程、程度以及后来的埋藏历史(秦勇等，1997)。

根据上述因素，可将区内煤层气相对富集的条件分为以下三种类型(表 4-13)：

第一种类型为煤层气富集条件相对较好的地区，包括阳城—翼城、临汾—洪洞和沁源—沁县三个地区，其二次生烃作用的历程长，经历了 1～2 个生气高峰阶段，煤化作用停止时已达干气阶段，煤层在煤层气逸散带中停留的时间短或从未暴露于煤层气逸散带中，故煤层气的保存条件最好。其中，阳城地区是山西南部目前已知的含气性最好的地带。

第二种类型是煤层气富集条件中等的地区，主要分布在安泽一带，其二次生烃作用的历程较长，经历了第一个(湿气)生气高峰阶段，煤化作用停止时已进入干气阶段，煤层在煤层

气逸散带中停留的时间相对较长，从而导致煤层气可能已有较大程度的逸散。

表 4-13　　山西南部上古生界煤层气富集条件的生烃因素评价

地　区	二次生烃作用的特征			煤层抬升于 800 m 以浅的时限/Ma	富集条件的生烃因素评价(相对)
	历程长短	生气高峰	中止阶段		
阳城　翼城	最长	湿气，干气	干气末期	<10	较　好
临汾—洪洞	较长	湿气	干气初期	0	较　好
安　泽	较长	湿气	干气早期	<27	中　等
沁源—沁县	长	湿气，干气	干气中期	0	较　好
霍　州	短	无	湿气中期	约 47	较　差
汾　西	较短	湿气	湿气中期	约 32	较　差

第三种类型是煤层气富集条件较差的地区，主要分布在霍州和汾西一带，其二次生烃作用的历程短，没有经历过生气高峰阶段或仅进入第一个(湿气)生气高峰阶段，煤化作用中止于湿气的早期—中期阶段，煤层在煤层气逸散带中停留的时间长，大面积煤层中的气体基本上已逸散殆尽，仅局部地带煤层气的保存相对较好。

根据以上分析可以认为，山西南部上古生界煤层的含气性，在南部可能相对较好，在中部和东北部可能好或中等，在西北部可能最差。

第五章　煤层气的储集和封盖特征

石油天然气的储层，是指具有连通孔隙、能使油气在其中储集和运移的各种地质体。煤层气的储层即为煤层，简称煤储层。煤储层的封盖条件主要取决于煤层顶板的岩石学特征、几何特征和物理性质。狭义地讲，煤储层的盖层就是指煤层伪顶和直接顶板的各类岩层组合。本章由此概念出发，讨论山西南部石炭—二叠系煤储层的储集性能和封盖条件。

第一节　煤储层物性分析

煤储层的物性是影响煤层含气性、煤层气开采地质条件和产能的重要因素，主要受控于其自身的物质组成和结构特征，并通过煤储层的孔隙－割理性质、渗透性、吸附解吸性等体现出来。因此，通过对煤储层物性的综合分析，可为查明煤储层中煤层气的储集、运移特征及其演化历史提供重要依据。

一　主煤层割理系统

从广义上来说，煤储层中的割理是指煤中所有的天然裂隙(Close，1994)。但是实际上煤层中同时存在着主要由构造应力形成的外生裂隙(割理)和主要起源于煤层内力作用的内生裂隙(割理)，二者发育的特征是有所不同的。因此，本书将前者称为外生割理，将后者则视为内生割理。

1. 外生割理的基本特征

山西南部上主煤层中发育两组外生割理。第一组割理的走向变化于1°～80°之间，一般为30°～45°，平均密度为61条/m；第二组割理的走向为275°～357°，大多集中在280°～331°之间，平均密度为46条/m(表5-1，图5-1)。

下主煤层也发育两组外生割理。第一组割理走向为20°～89°，多数集中在20°～45°之间，平均密度为90条/m；第二组割理走向为275°～357°，多集中于285°～300°之间，平均密度为76条/m(表5-1，图5-2)。第一组割理在研究区内均较发育，而第二组割理在局部地区不发育，诸如介休两渡矿等。

显然，第一组外生割理较为发育，属本区主煤层中的主要外生割理；第二组外生割理发育程度相对较弱，为主煤层中的次要外生割理，且上主煤层外生割理发育程度低于下主煤层。上主煤层外生割理的发育密度在研究区的北部地区相对较大、南部地区相对较小；下主煤层却与此相反，南部地区外生割理发育较好，北部地区相对较差。

2. 内生割理的基本特征

研究区内生割理的统计结果表明：山西南部煤层内生割理发育密度在下主煤层较高，上主煤层相对较低；两主煤层中内生割理密度均以南部的沁水矿区为最大，上主煤层内生割理发育最差的地区为研究区的西部，下主煤层内生割理发育最差的地区则位于研究区的东北

部(表 5-2)。

表 5-1　　山西南部石炭—二叠系主煤层外生割理发育特征观测统计结果

地　点	煤层	产状(走向、倾角)	充填特征	平均密度/条·m^{-1}
汾西高阳矿	1#	45°∠76°	紧闭充填,不明显	73
	1#	340°∠81°	紧闭充填,不明显	22
	2#	42°∠78°,45°∠81°	紧闭充填,不明显	81
	2#	275°∠70°	紧闭充填,不明显	57
	3#	35°∠83°,37°∠82°	紧闭充填,不明显	59
	3#	302°∠76°	紧闭充填,不明显	103
介休两渡矿	2#	5°∠82°,65°∠78°,75°∠78°	紧闭充填,不明显	60
	2#	345°∠73°	紧闭充填,不明显	45
霍州白龙矿	2#	1°∠82°,80°∠81°,75°∠80°	方解石充填	77
	2#	357°∠86°	方解石充填	57
灵石柳盆沟矿	2#	24°∠83°	充填不明显	17
	2#	278°∠83°	充填不明显	7
翼城殿儿垣矿	2#	28°∠42°,44°∠42°	紧闭充填,不明显	17
	2#	331°∠42°,304°∠55°	紧闭充填,不明显	14
沁水宁巴沟矿	2#	15°∠85°,20°∠89°	紧闭充填,不明显	53
	2#	280°∠83°,285°∠77°	紧闭充填,不明显	53
阳城西沟矿	3#	28°∠85°,31°∠86°,42°∠88°	闭合见方解石薄膜	43
	3#	325°∠83°,328°∠89°,330°∠79°	闭合见方解石薄膜	28
沁源沁新矿	2#	15°∠83°,45°∠89°	紧闭充填,不明显	155
	2#	285°∠83°,307°∠71°	紧闭充填,不明显	73
潞安王庄矿	3#	276°∠88°,304°∠67°,324°∠80°,355°∠77°	紧闭充填,不明显	72
晋城成庄矿	3#	66°∠82°,33°∠85°	见方解石薄膜	27
	3#	318°∠85°,304°∠83°	见方解石薄膜	24
介休两渡矿	9#	89°∠89°	闭合无充填	42
霍州辛置矿	9#	22°∠85°,25°∠72°	未见充填物	124
	9#	275°∠87°,285°∠87°	未见充填物	96
	10#	25°∠83°,45°∠70°,75°∠79°		96
	10#	285°∠84°,315°∠80°		185
沁水豹凹沟矿	15#	89°∠85°	紧闭充填,不明显	94
	15#	301°∠59°,345°∠79°	紧闭充填,不明显	123
沁源北章矿	10#	22°∠79°,22°∠72°	紧闭充填,不明显	93
	10#	287°∠86°,291°∠83°,299°∠86°,357°∠62°	紧闭充填,不明显	82
潞安小河堡矿	15#	20°∠51°,30°∠76°	紧闭充填,不明显	48
	15#	315°∠73°,345°∠76°	紧闭充填,不明显	44

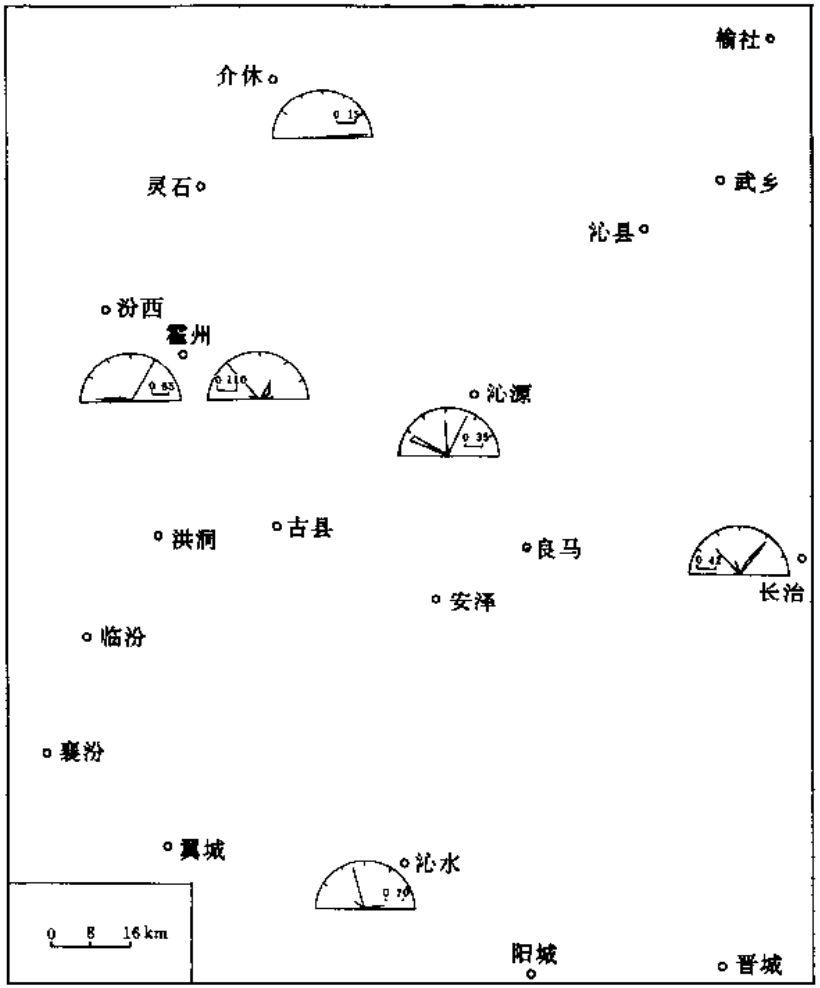


图 5-1　山西南部石炭—二叠系上主煤层外生割理走向玫瑰花图

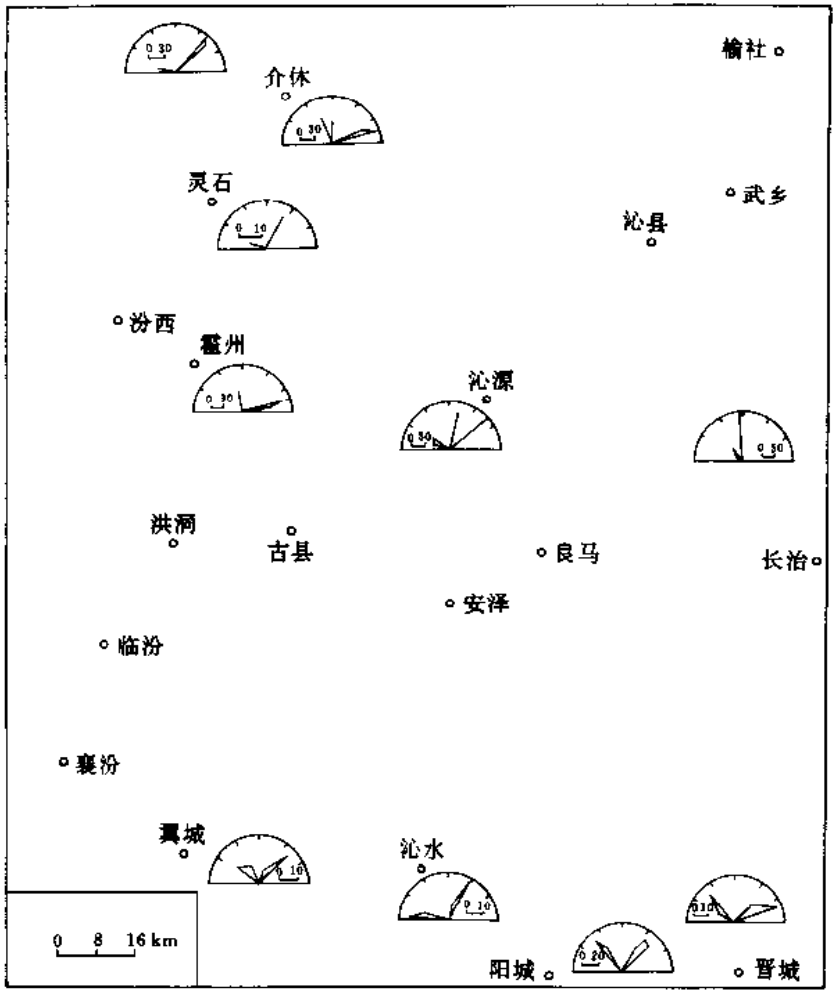


图 5-2　山西南部石炭—二叠系下主煤层外生割理走向玫瑰花图

表 5-2　　山西南部石炭—二叠系主煤层内生劈理发育特征观测统计结果

地　点	煤层	组数	充填特征	密　度 / 条·m^{-1}		
				组密度	平均密度	总密度
沁水宁凹沟矿	2#	2	无充填	375/833	604	1208
阳城西沟矿	3#	1	无充填	173	173	173
潞安王庄矿	3#	2	无充填	540/220	380	760
霍州白龙矿		1	无充填	156	156	156
汾西高阳矿	3#	1	无充填	136	136	136
介休两渡矿	2#	1	无充填	104	104	104
翼城殿儿垣矿	2#	2	无充填	63/70	67	133
沁源沁新矿	2#	2	无充填	222/122	172	344
介休两渡矿	10#	1	无充填	579	579	579
霍州辛置矿	9#	2	无充填	195/145	170	340
	10#	1	无充填	650	645	645
沁源北章矿	10#	2	无充填	700/360	530	1060
沁水豹凹沟矿	15#	2	无充填	980/180	580	1160
潞安小河堡矿	15#	2	无充填	78/65	72	143

二　煤储层孔隙结构分布特征

煤储层孔隙结构的基本特征参数包括孔径结构、孔容、孔比表面积、孔隙率和中值孔径等，通过这些基本参数所反映出来的煤储层的基本物理性质包括排驱压力、渗透率、孔隙连通性和吸附性等。

（一）主煤层孔容、孔比表面积和孔隙连通性

采用压汞法可求得样品中直径大于 7 nm 孔隙的孔径结构，进一步采用低温液氮吸附法可补求样品中直径小于 7 nm 孔隙的孔径结构。前者称为压汞孔径结构，后者称为全孔孔径结构。由此，将煤中孔径结构划分为大孔（ϕ>1000 nm）、中孔（1000 nm>ϕ>100 nm）、过渡孔（100 nm>ϕ>10 nm）、微孔（10 nm>ϕ>5 nm）、次微孔（5 nm>ϕ>2 nm）和极微孔（ϕ<2 nm）出六个孔径段。

1. 压汞孔容和孔比表面积

山西南部上主煤层总孔容的区域分布以翼城矿区最低，向四周逐渐增大，最大值位于东部的潞安矿区，其次是研究区南部的阳城矿区，在研究区北缘外围的阳泉矿区又出现低值，可供分析研究时参考。上主煤层各孔径段分布的规律性虽不十分明显，但仍具有一定的区域分布趋势。在研究区的北部以大孔为主，其次为过渡孔，微孔所占比例最低；南部则以过渡孔和大孔为主，其中又以过渡孔略占优势，微孔所占比例最小（表 5-3）。

下主煤层压汞总孔容以沁水矿区最低，以其为中心向周边地区逐渐增高，并出现三个高值区：东部潞安矿区最高，其次为西北部汾西矿区，再次为西南部的翼城矿区。下主煤层孔径结构的区域分布规律大体上可划分为南北两区：北区以大孔为主，过渡孔次之，微孔所占比例最小；南区以过渡孔为主，大孔次之，微孔所占比例亦最小。其中，潞安、介休两渡矿、翼城等地段的大孔所占比例最高（表 5-4）。

表 5-3　　山西南部石炭—二叠系上主煤层孔隙结构压汞法测试结果

地　点	煤层	煤样编号	孔容/10 $^{-4}cm^3 \cdot g^{-1}$					孔容比/100%			
			V_1	V_2	V_3	V_4	V_t	V_1/V_t	V_2/V_t	V_3/V_t	V_4/V_t
阳泉五矿	3#	YQ3	67	16	104	27	214	0.313	0.075	0.486	0.126
汾西高阳矿	3#	FG04	282	16	109	41	448	0.629	0.036	0.243	0.092
介休两渡矿	2#	FLD0204	168	39	105	42	354	0.475	0.110	0.297	0.119
灵石柳岔沟矿	2#	HZ010101	125	19	123	27	294	0.425	0.065	0.418	0.092
霍州什林矿	2#	HZ020101	185	35	119	36	375	0.493	0.093	0.317	0.096
		HZ0201B	64	13	148	44	269	0.238	0.048	0.550	0.164
霍州白龙矿	2#	HZ020201	202	147	158	37	544	0.372	0.270	0.290	0.068
		HZ020204	83	23	111	28	245	0.339	0.094	0.453	0.114
霍州辛置矿	2#	HZ020301	259	138	120	34	551	0.470	0.250	0.218	0.062
		HZ020302	393	42	154	51	640	0.614	0.066	0.241	0.079
		HZ020304	212	26	163	44	445	0.476	0.059	0.366	0.099
		HZ020305	119	4	49	26	198	0.601	0.020	0.248	0.131
沁源南山矿	2#	HZ040101	199	48	121	40	408	0.488	0.117	0.297	0.098
沁源沁新矿	2#	HZ040201	245	34	116	37	432	0.567	0.079	0.269	0.085
沁源定湖矿	2#	HZ040301	194	10	72	26	302	0.642	0.034	0.238	0.086
沁　源	2#	HZ040401	601	33	132	47	813	0.739	0.041	0.162	0.058
沁源黄土坡矿	2#	HZ040601	347	18	142	39	546	0.636	0.033	0.260	0.071
沁源三合矿	3#	HZ040701	111	23	126	51	311	0.356	0.075	0.405	0.164
沁源古寨矿	2#	HZ040901	121	27	93	24	265	0.457	0.102	0.350	0.091
潞安王庄矿	3#	LWZ04	873	35	157	54	1119	0.780	0.031	0.140	0.048
潞　安	5#	LA3	125	22	140	45	332	0.377	0.056	0.422	0.135
洪　洞	2#	HZ020501	141	32	121	44	338	0.417	0.095	0.358	0.130
洪洞三交河矿	2#	HZ030601	140	59	135	43	377	0.372	0.156	0.358	0.114
古县圪堆矿	3#	HZ030101	129	37	158	49	373	0.346	0.099	0.424	0.131
	2#	HZ030104	90	24	124	41	279	0.323	0.086	0.444	0.147
古县古阳矿	2#	HZ030201	93	18	108	36	255	0.364	0.071	0.424	0.141
翼城殿儿垣矿	3#	HZ050104	94	26	110	37	267	0.352	0.097	0.412	0.139
		HZ050102	83	7	121	34	245	0.338	0.029	0.494	0.139
翼城张家沟矿	2#	HZ050201	82	18	99	34	233	0.352	0.077	0.425	0.146
沁水中村矿	2#	HZ060301	66	31	157	44	298	0.221	0.104	0.527	0.148
		HZ060302	114	8	67	27	216	0.528	0.037	0.310	0.125
		HZ060303	113	15	157	49	334	0.338	0.045	0.470	0.147
沁水羊泉矿	3#	HZ060401	405	17	134	53	609	0.665	0.028	0.220	0.087
沁水永红矿	2#	HZ070202	334	23	161	51	569	0.587	0.040	0.283	0.090
阳城河村矿	3#	HZ070402	140	22	132	44	338	0.414	0.065	0.391	0.130

续表

地　点	煤层	煤样编号	孔容/$10^{-4}cm^3 \cdot g^{-1}$					孔容比/100%			
			V_1	V_2	V_3	V_4	V_t	V_1/V_t	V_2/V_t	V_3/V_t	V_4/V_t
沁水北庄矿	3#	HZ070301	410	19	146	51	626	0.655	0.030	0.233	0.082
		HZ070303	52	9	162	67	290	0.179	0.031	0.559	0.231
阳城西沟矿	3#	HZ070102	555	27	154	46	782	0.710	0.034	0.197	0.059
		HZ070104	190	17	163	62	432	0.440	0.039	0.377	0.144
晋城成庄矿	3#	JC0201	264	18	156	51	489	0.540	0.037	0.319	0.104
		JC0202	118	27	158	56	359	0.329	0.075	0.440	0.156
		JC0203	136	11	134	41	322	0.423	0.034	0.416	0.127
		JC0204	90	23	168	34	315	0.286	0.073	0.533	0.108

注：V——孔容；V_1——大孔（$\phi>1000$ nm）；V_2——中孔（1000 nm$>\phi>$100 nm）；V_3——过渡孔（100 nm$>\phi>$10 nm）；V_4——微孔（$\phi<10$ nm）；V_t——总孔容；下同。

表 5-4　　山西南部石炭-二叠系下主煤层孔隙结构压汞法测试结果

地　点	煤层	煤样编号	孔容/$10^{-4}cm^3 \cdot g^{-1}$					孔容比/100%			
			V_1	V_2	V_3	V_4	V_t	V_1/V_t	V_2/V_t	V_3/V_t	V_4/V_t
太原东山矿	15#	YQ3	188	34	166	50	438	0.429	0.078	0.379	0.114
阳泉五矿	15#	FGY04	293	24	168	49	534	0.549	0.045	0.315	0.091
介休两渡矿	10#	FLD0204	478	22	151	49	700	0.683	0.031	0.216	0.070
灵石柳盆沟矿	10#	HZ010101	253	48	129	36	466	0.543	0.103	0.277	0.077
霍州团柏矿	10#	HZ020201	205	58	109	27	399	0.514	0.145	0.273	0.068
沁源聪子峪矿	9#	HZ020102B	138	25	118	35	316	0.437	0.079	0.373	0.111
沁源郭家坪矿	9#	HZ040801	107	26	125	47	305	0.351	0.085	0.410	0.154
潞安小河堡矿	15#	LHP04	874	28	179	58	1139	0.767	0.025	0.157	0.051
翼城刘王沟矿	9#	HZ050301	411	25	125	40	601	0.684	0.042	0.208	0.066
沁水起龙沟矿	9#	HZ060101	81	20	124	55	280	0.289	0.071	0.444	0.196
沁水老河里矿	9#	HZ060604	87	19	124	38	268	0.325	0.071	0.462	0.142
阳城河村矿	9#	HZ070403	123	18	142	52	335	0.367	0.054	0.424	0.155
	9#	HZ070406	156	43	153	52	404	0.386	0.106	0.379	0.129

孔比表面积的大小与孔容和孔径的分布特征密切相关。在孔容相同的前提下，具有较小孔径的孔容所占的比例越大，孔比表面积则越大，两者之间表现为幂指数函数关系。因此，孔比表面积主要集中在微孔和过渡孔段。

上主煤层总孔比表面积变化较大，其分布范围为 269.0×10^{-3}～6452.2×10^{-3} m^2/g，多数样品集中在 4200×10^{-3}～6000×10^{-3} m^2/g 之间，其样品数占样品总数的 77%。总孔比表面积大于 6000×10^{-3} m^2/g 的采样点只有 3 处，占全部采样点的 6.8%（表 5-5）。可以看出，山西南部上主煤层孔比表面积主要集中在过渡孔段，其次为微孔段，而大孔和中孔的孔比表面积甚微。从区域上来看，上主煤层平均总孔比表面积以东南部晋城和阳城一带最高，东部

潞安矿区也相对较高，而西南部相对较低，最低值位于翼城矿区，以其为中心向周边地区有逐渐增高的趋势。此外，研究区以北阳泉矿区主煤层总孔比表面积低于翼城矿区。

表 5-5　　山西南部石炭—二叠系上主煤层孔比表面积压汞法测试结果

地　点	煤层	样品号	孔比表面积/$10^{-3}m^2 \cdot g^{-1}$					孔比表面积比/100%			
			S_1	S_2	S_3	S_4	S_t	S_1/S_t	S_2/S_t	S_3/S_t	S_4/S_t
阳泉五矿	3#	YQ3	0.7	28.6	2347.3	1248.3	3624.9	0.0002	0.0078	0.648	0.344
汾西高阳矿	3#	FG04	5.1	31.3	2414.7	1911.4	4362.5	0.001	0.007	0.554	0.438
介休两渡矿	2#	FLD0204	10.3	58.1	2309.6	1885.5	4263.5	0.002	0.014	0.542	0.442
灵石柳泓沟矿	2#	HZ010101	4.0	32.0	2736.9	2094.0	4866.9	0.001	0.007	0.562	0.430
霍州什林矿	2#	HZ020101	3.6	63.7	2497.8	1640.6	4205.7	0.001	0.015	0.594	0.390
		HZ020102B	64.0	13.0	148.0	44.0	269.0	0.238	0.048	0.550	0.164
		HZ020103A	3.2	8.0	2235.2	1312.3	3558.7	0.001	0.002	0.628	0.369
霍州白龙矿	2#	HZ020201	26.8	146	3078.5	2142.4	5393.7	0.005	0.027	0.571	0.397
		HZ020204	1.7	41.2	2490.3	1293.0	3826.2	0.001	0.011	0.651	0.337
霍州辛置矿	2#	HZ020301	31.7	147.9	2509.5	1542.1	4231.2	0.007	0.035	0.593	0.365
		HZ020302	7.4	80.3	3298.2	2367.9	5753.8	0.001	0.014	0.573	0.412
		HZ020304	3.6	38.5	3365.0	1991.5	5398.6	0.001	0.007	0.623	0.369
		HZ020305	1.9	10.5	1129.6	1171.4	2313.4	0.001	0.005	0.488	0.506
沁源南山矿	2#	HZ040101	5.5	71.5	2629.6	1851.2	4558.1	0.001	0.016	0.577	0.406
沁源沁新矿	2#	HZ040201	11.0	49.2	2546.3	1696.5	4303.0	0.003	0.011	0.592	0.394
沁源定湖	2#	HZ040301	5.0	11.3	1645.4	1143.0	2804.7	0.002	0.004	0.587	0.407
沁源段家庄矿	2#	HZ040401	3.8	73.6	2992.6	2133.6	5203.6	0.001	0.014	0.575	0.410
沁源黄土坡矿	2#	HZ040601	4.6	31.5	3094.6	1805.6	4936.3	0.001	0.006	0.627	0.366
沁源三合矿	3#	HZ040701	6.7	45.0	2995.9	2033.6	5081.2	0.001	0.009	0.590	0.400
沁源古寨矿	2#	HZ040901	5.6	40.2	2053.4	1106.4	3205.6	0.001	0.013	0.641	0.345
潞安王庄矿	3#	LWZ04	7.7	55.8	3455.9	2467.2	5986.6	0.001	0.009	0.578	0.412
潞安矿	3#	LA3	2.3	40.4	3046.3	1957.6	5046.6	0.001	0.008	0.603	0.388
洪洞圣王矿	2#	HZ020501	6.0	55.7	1739.2	1993.5	3794.4	0.002	0.015	0.458	0.525
洪洞三交河矿	2#	HZ030601	6.9	44.6	2902.6	2036.3	4990.4	0.001	0.009	0.582	0.408
古县圪堆矿	3#	HZ030101	6.8	69.3	2854.6	2661.3	5592.0	0.001	0.012	0.511	0.476
	2#	HZ030104	3.9	40.3	2650.5	1917.3	4612.0	0.001	0.009	0.575	0.415
古县古阳矿	2#	HZ030201	3.7	31.7	2385.3	1632.9	4053.6	0.001	0.008	0.588	0.403
翼城殿儿垣矿	3#	HZ050104	2.1	47.9	2470.9	1695.8	4216.7	0.001	0.011	0.586	0.402
		HZ050102	3.7	15.3	2655.5	1540.3	4214.8	0.001	0.004	0.630	0.365
翼城张家沟矿	2#	HZ050201	3.6	36.6	2328.2	1551.1	3919.5	0.001	0.009	0.594	0.396
沁水羊泉矿	3#	HZ060401	1.9	33.7	2978.5	2395.0	5409.1	0.0004	0.006	0.552	0.442
沁水永红矿	2#	HZ070202	8.4	56.1	3561.6	2384.0	6010.1	0.001	0.009	0.593	0.397

续表

地　点	煤层	样品号	孔比表面积/$10^{-3}m^2 \cdot g^{-1}$					孔比表面积比/100%			
			S_1	S_2	S_3	S_4	S_t	S_1/S_t	S_2/S_t	S_3/S_t	S_4/S_t
沁水中村矿	2#	HZ060301	2.4	54.3	3255.5	2357.3	5669.5	0.001	0.010	0.574	0.415
		HZ060302	2.5	13.0	1513.2	1201.6	2730.3	0.001	0.005	0.554	0.440
		HZ060303	1.9	28.2	3303.0	2305.7	5638.8	0.0003	0.005	0.586	0.409
沁水北庄矿	3#	HZ070301	2.4	37.6	3139.5	2361.0	5540.5	0.0004	0.007	0.567	0.426
		HZ070303	0.7	18.9	3466.1	2168.7	5654.4	0.0001	0.003	0.613	0.384
阳城西沟矿	3#	HZ070102	2.6	49.1	2907.4	2512.6	5471.7	0.0005	0.009	0.532	0.459
		HZ070104	10.0	34.0	3576.4	2831.8	6452.2	0.002	0.005	0.554	0.439
阳城河村矿	3#	HZ070402	3.0	36.2	3375.5	2006.2	5420.9	0.001	0.007	0.622	0.370
晋城成庄矿	3#	JC0201	1.4	36.4	3576.4	2291.8	5906.0	0.0002	0.006	0.606	0.388
		JC0202	0.9	57.4	3375.5	2519.1	5952.9	0.0002	0.010	0.567	0.423
		JC0203	1.5	31.3	3070.7	1821.0	4924.5	0.0003	0.006	0.624	0.370
		JC0204	3.8	48.0	3634.5	2068.0	5754.3	0.001	0.008	0.632	0.359

注：S—— 孔比表面积；S_1——大孔(ϕ>1000 nm)；S_2——中孔(1000 nm>ϕ>100 nm)；S_3——过渡孔(100 nm>ϕ>10 nm)；S_4 ——微孔(ϕ<10 nm)；S_t——总孔比表面积；下同。

下主煤层压汞总孔比表面积变化于 $3363.1\times10^{-3}\sim6464.8\times10^{-3}\ m^2/g$ 之间，多数在 $4500\times10^{-3}\sim6000\times10^{-3}\ m^2/g$ 之间，其样品数占总数的 62%(表 5-6)。此外，总孔比表面积小于 $4500\times10^{-3}\ m^2/g$ 的样品占总数的 23%，大于 $6000\times10^{-3}\ m^2/g$ 的样品仅占 15%。下主煤层总孔比表面积主要集中在过渡孔段，其次为微孔段，而中孔和大孔所占比例很小。在区

表 5-6　　山西南部石炭—二叠系下主煤层孔比表面积压汞法测试结果

地　点	煤层	样品号	孔比表面积/$10^{-3}m^2 \cdot g^{-1}$					孔比表面积比/100%			
			S_1	S_2	S_3	S_4	S_t	S_1/S_t	S_2/S_t	S_3/S_t	S_4/S_t
太原东山矿	15#	YQ3	9.2	64.7	3513.7	2240.0	5827.6	0.002	0.011	0.603	0.384
阳泉五矿	15#	FGY04	4.1	44.4	3835.2	2229.6	6113.3	0.001	0.007	0.627	0.365
介休两渡矿	10#	FLD0204	11.3	42.9	3392.4	2199.3	5645.9	0.002	0.008	0.601	0.389
灵石柳泓沟矿	10#	HZ010101	10.8	59.7	2793.1	1688.6	4552.2	0.002	0.013	0.614	0.371
霍州团柏矿	10#	HZ020101	10.1	68.8	2224.3	1059.9	3363.1	0.003	0.020	0.661	0.316
沁源聪子峪矿	9#	HZ020102B	5.0	45.3	2593.1	1635.8	4279.2	0.001	0.011	0.606	0.382
沁源郭家坪矿	9#	HZ040801	6.7	55.4	1779.8	2162.4	4004.3	0.002	0.014	0.444	0.540
潞安小河堡矿	15#	LHP04	10.5	43.8	3731.9	2678.6	6464.8	0.002	0.007	0.577	0.414
襄城刘王沟矿	9#	HZ050301	2.0	32.7	2672.8	1811.9	4519.4	0.0004	0.007	0.591	0.401
沁水起龙沟矿	9#	HZ060101	3.8	31.8	2539.8	2560.8	5136.2	0.001	0.006	0.494	0.499
沁水老河里矿	9#	HZ060604	3.0	34.6	2691.3	1713.1	4442.0	0.001	0.008	0.606	0.385
阳城河村矿	9#	HZ070403	0.8	31.2	3166.3	2351.9	5550.2	0.0001	0.006	0.570	0.424
	9#	HZ070406	7.6	66.0	3625.5	2351.9	6051.0	0.001	0.011	0.599	0.389

域上，总孔比表面积在东南部和北部较高，西部相对较低。霍州矿区下主煤层平均总孔比表面积最低，以其为中心向围边地区逐渐升高，东南部的阳城、晋城一带为一高值区，西北部介休和东部潞安一带也为一高值区。

2. 全孔孔容和孔比表面积

对于上述 57 件压汞测试煤样中的 23 件样品进一步采用低温液氮吸附法进行测试，并利用朗格缪尔单分子层吸附理论和 Brunauer-Emmet-Teller(BET)多分子层吸附理论解释样品中直径小于 10 nm 孔隙的孔径结构，以达到对主煤层孔径结构进行全孔分析的目的。

上主煤层全孔总孔容在 $187.44\times10^{-4}\sim598.84\times10^{-4}\ cm^3/g$ 之间变化。其中，全孔总孔容大于 $500\times10^{-4}\ cm^3/g$ 的占总样品数的 21%，孔径结构以大孔为主；以过渡孔为主的样品数量次之；再次为中孔、次微孔和微孔；而极微孔所占比例极小(表 5-7，图 5-3)。可以看出：大孔和过渡孔的孔容比相差不大；北部地区以大孔为主，过渡孔次之；中部和南部大致可以

表 5-7　　山西南部石炭—二叠系主煤层全孔孔容测试结果

地点	煤层	样品号	孔容/$10^{-4}cm^3\cdot g^{-1}$							孔容比/100%					
			V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_t	V_1/V_t	V_2/V_t	V_3/V_t	V_4/V_t	V_5/V_t	V_6/V_t
阳泉五矿	3#	YQ3	67	16	104	0.05	0.38	0.01	187.44	0.357	0.085	0.555	0.0003	0.002	0.00005
潞　安	3#	LA3	125	22	140	0.45	1.01	0.05	288.51	0.433	0.076	0.485	0.002	0.004	0.0001
古县屹堆	3#	HZ030101	129	37	158	2.85	3.86	4.78	335.49	0.385	0.110	0.471	0.008	0.012	0.014
	2#	HZ030104	90	24	124	1.31	2.50	2.52	244.33	0.368	0.098	0.508	0.005	0.010	0.011
沁源沁新	2#	HZ040201	245	34	116	0.74	1.53	0.01	397.28	0.617	0.085	0.292	0.002	0.004	0.00003
沁源三合	3#	HZ040701	111	23	126	0.91	1.23	0.08	262.22	0.423	0.088	0.481	0.003	0.005	0.0003
沁源古寨	2#	HZ040901	121	27	93	1.22	2.69	6.15	251.06	0.482	0.108	0.370	0.005	0.011	0.024
翼城殿儿垣	3#	HZ050102	83	7	121	0.58	1.45	0.01	213.04	0.389	0.033	0.568	0.003	0.007	0.00005
	3#	HZ050104	94	26	110	2.61	4.30	4.70	241.61	0.389	0.108	0.455	0.011	0.018	0.019
翼城张家沟	2#	HZ050201	82	18	99	4.53	12.64	—	216.17	0.379	0.083	0.458	0.021	0.059	—
沁水羊泉	3#	HZ040601	405	17	134	0.80	1.77	3.34	561.91	0.721	0.031	0.238	0.001	0.003	0.006
沁水永红	3#	HZ070202	334	23	161	1.37	0.36	—	519.73	0.643	0.044	0.310	0.003	0.0006	·
沁水北庄	3#	HZ070301	410	19	146	1.02	8.56	14.26	598.84	0.685	0.032	0.244	0.002	0.014	0.023
阳城西沟	3#	HZ070104	190	17	163	1.53	10.86	23.44	405.83	0.468	0.042	0.402	0.004	0.027	0.057
太原东山	15#	CG15	188	34	166	1.02	0.32	0.77	390.11	0.482	0.087	0.425	0.003	0.001	0.002
阳泉五矿	15#	YQ15	293	24	168	2.43	2.74	0.15	490.32	0.598	0.048	0.343	0.005	0.006	0.0003
沁源聪子峪	9#	HZ040501	138	25	118	2.68	4.49	4.07	292.34	0.473	0.085	0.404	0.009	0.015	0.014
沁源郭家坪	9#	HZ040801	107	26	125	1.24	2.06	0.02	261.32	0.410	0.099	0.478	0.005	0.008	0.0001
翼城刘王沟	9#	HZ050301	411	25	125	1.27	2.82	0.02	565.11	0.727	0.044	0.221	0.002	0.005	0.00003
沁水起龙沟	9#	HZ060101	81	20	152	0.14	0.66	2.32	256.12	0.316	0.078	0.593	0.001	0.003	0.009
沁水老河里	9#	HZ060204	87	19	124	0.88	2.58	0.01	233.47	0.373	0.081	0.531	0.004	0.011	0.00004
阳城河村	9#	HZ070403	123	18	142	4.17	8.97	0.38	296.52	0.415	0.061	0.479	0.014	0.030	0.001
	9#	HZ070406	156	43	153	2.24	8.64	0.01	362.89	0.430	0.118	0.422	0.006	0.024	0.00002

注：V_4——微孔(10 nm>ϕ>5 nm)；V_5——次微孔(5 nm<ϕ<2 nm)；V_6——极微孔(ϕ<2 nm)；其余同前表。

分出东西两个区域，东区（沁水、阳城、沁源）以大孔为主、过渡孔次之，西区则以过渡孔为主、大孔次之。就全区而言，上主煤层全孔总孔容以沁水矿区最高，向周边地区逐渐减小，最低值位于翼城矿区。

下主煤层全孔总孔容的变化范围为 $233.47\times10^{-4}\sim565.11\times10^{-4}\ cm^3/g$，多数样品的总孔容集中于 $233.47\times10^{-4}\sim292.24\times10^{-4}\ cm^3/g$ 之间，占总样品数的 56%，总孔容为 $490\times10^{-4}\sim565.11\times10^{-4}\ cm^3/g$ 的样品占总样品数的 22%。孔径结构以大孔为主，平均孔容比为 46.9%；其次为过渡孔，平均孔容比为 43.3%；再次为中孔、次微孔和微孔，极微孔的孔容比最小（表 5-7，图 5-4）。但是，沁水一带和沁源郭家坪矿则以过渡孔为主、大孔次之，其它孔径段分布与上述规律相同，孔容比的大小顺序为中孔、次微孔、微孔、极微孔。研究区西北部外围太原东山矿区长沟矿较为特殊，其微孔的孔容比略大于次微孔。就全区而言，下主煤层全孔总孔容以翼城矿区最大，向其四周逐渐降低。

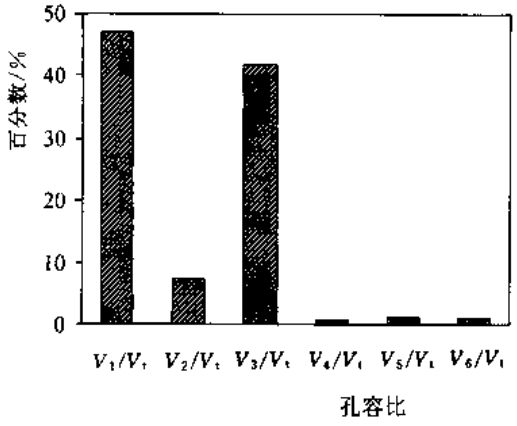


图 5-3 山西南部石炭—二叠系上主煤层全孔孔容分布直方图

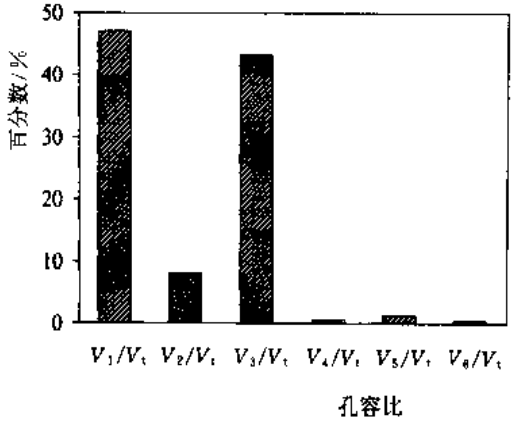


图 5-4 山西南部石炭—二叠系下主煤层全孔孔容分布直方图

本区上主煤层全孔孔比表面积变化极大，分布于 $2847.0\times10^{-3}\sim14906.0\times10^{-3}\ m^2/g$ 之间。全孔孔比表面积大于 $10000\times10^{-3}\ m^2/g$ 的样品有两件，占总数的 14%，小于 $3000\times10^{-3}\ m^2/g$ 的样品数占总数的 21%（表 5-8，图 5-5）。全孔孔比表面积主要集中在过渡孔段，其次为次微孔段，再次为微孔段、极微孔段和中孔段，以大孔段孔比表面积比最低。但沁水矿区北庄矿和阳城矿区西沟矿情况不同，全孔孔比表面积主要集中在极微孔段，过渡孔段次之。其余地区极微孔段的孔比表面积变化较大，有的地区仅次于过渡孔段。从全区来看，上主煤层全孔孔比表面积最大值位于阳城矿区，向周边地区逐渐降低，最小值位于沁源一带。

下主煤层全孔孔比表面积分布在 $3069.9\times10^{-3}\sim4913.4\times10^{-3}\ m^2/g$ 之间，多数样品集中在 $3797.6\times10^{-3}\sim4913.4\times10^{-3}\ m^2/g$ 范围之内，占全部样品的 67%，分布于 $3000\times10^{-3}\sim3797.6\times10^{-3}\ m^2/g$ 范围内的样品占总数的 33%（表 5-8，图 5-6）。下主煤层全孔孔比表面积主要集中于过渡孔段，其次为次微孔段，再次为微孔段、极微孔段和中孔段，而大孔段孔比表面积最低。但是，某些地区极微孔段的孔比表面积要高于微孔段，例如太原东山长沟矿、沁源聪子峪矿、沁水起龙沟矿等。个别地区的微孔段孔比表面积要高于次微孔段，例如阳泉五矿。就全区而言，下主煤层全孔孔比表面积以翼城矿区最低，向其周边地区逐渐增高，最高值位于阳城矿区。

表 5-8　　山西南部石炭—二叠系主煤层孔比表面积测试结果

地点	煤层	样品号	孔比表面积/$10^{-3}m^2 \cdot g^{-1}$							孔比表面积比/100%					
			S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_t	S_1/S_t	S_2/S_t	S_3/S_t	S_4/S_t	S_5/S_t	S_6/S_t
阳泉五矿	3#	YQ3	0.7	28.6	2347.3	30	450	22	2878.6	0.0002	0.010	0.815	0.010	0.156	0.008
潞　安	3#	LA3	2.3	40.4	3046.5	330	1413	102	4934.2	0.0005	0.008	0.617	0.067	0.286	0.021
古县圪堆	3#	HZ030101	6.8	69.3	2854.6	189	580	1625	5324.7	0.001	0.013	0.536	0.035	0.109	0.306
	2#	HZ030104	3.9	40.3	2650.5	88	3840	899	7521.7	0.0005	0.005	0.352	0.012	0.511	0.120
沁源沁新	2#	HZ040201	11.0	49.7	2546.3	49	190	1	2847.0	0.004	0.017	0.894	0.017	0.067	0.0004
沁源三河	3#	HZ040701	6.7	45.0	2995.9	56	158	19	3280.6	0.002	0.014	0.912	0.018	0.048	0.006
沁源古寨	2#	HZ040901	5.6	40.2	2053.4	82	422	1281	3884.2	0.001	0.010	0.529	0.109	0.321	0.330
翼城殷儿垣	3#	HZ050102	3.7	15.3	2655.5	37	1985	1	4697.5	0.001	0.003	0.565	0.008	0.423	0.0002
	3#	HZ050104	2.1	47.9	2470.9	1751	641	1585	6497.9	0.0003	0.007	0.380	0.269	0.099	0.244
翼城张家沟	2#	HZ050201	3.6	36.6	2328.2	3073	1336	—	4011.4	0.001	0.005	0.344	0.453	0.198	—
沁水羊泉	3#	HZ040601	1.9	33.7	2978.5	49	288	1153	4504.1	0.0004	0.007	0.661	0.011	0.064	0.256
沁水永红	3#	HZ070202	8.4	56.1	3612.2	145	38	—	3859.7	0.002	0.015	0.936	0.038	0.009	—
沁水北庄	3#	HZ070301	2.4	37.6	3307.1	70	1161	5713	10291	0.0002	0.004	0.321	0.007	0.113	0.555
阳城西沟	3#	HZ070104	10.0	34.0	3466.1	102	1843	9451	14906	0.001	0.002	0.232	0.007	0.124	0.634
太原东山	15#	CG15	9.2	64.7	3513.7	66	38	106	3797.6	0.003	0.017	0.925	0.017	0.010	0.028
阳泉五矿	15#	YQ15	41.0	44.4	3835.2	146	426	32	4524.6	0.009	0.010	0.848	0.032	0.094	0.007
沁源聪子峪	9#	HZ04C501	5.0	45.3	2593.1	184	665	1421	4913.4	0.001	0.009	0.528	0.037	0.135	0.290
沁源郭家坪	9#	HZ04C801	6.7	55.4	2779.8	81	229	4	3155.9	0.002	0.018	0.881	0.026	0.072	0.001
翼城刘王沟	9#	HZ05C301	2.0	32.7	2672.8	85	357	2	3151.5	0.001	0.010	0.848	0.027	0.113	0.001
沁水起龙沟	9#	HZ06C101	3.8	31.8	3335.9	7	111	874	4363.5	0.001	0.007	0.765	0.002	0.025	0.200
沁水老柯甲	9#	HZ06C204	3.0	34.6	2691.3	80	260	1	3069.9	0.001	0.011	0.877	0.026	0.085	0.0003
阳城河村	9#	HZ070403	0.8	31.2	3166.3	2997	1049	84	7328.3	0.0001	0.004	0.432	0.409	0.143	0.012
	9#	HZ070406	7.6	66.0	3265.5	254	873	1	4467.1	0.002	0.015	0.731	0.057	0.195	0.0002

注：S_4 —微孔(10 nm>ϕ>5 nm)；S_5——次微孔(5 nm>ϕ>2 nm)；S_5——极微孔(ϕ<2 nm)；其余同前表。

3. 主煤层孔隙连通性

根据压汞曲线，可对煤中孔隙的连通性进行定性分析，并可区分出连通型孔、半连通(或半封闭)型孔和封闭型孔三类。显然，连通性越好，煤层气的运移潜势就越大。

上主煤层孔隙连通性变化较大，三种类型的孔隙都有发现。沁水矿区上主煤层的孔隙连通性最好，孔隙类型均属于连通型孔；其次为晋城、潞安、阳泉、阳城、高阳等矿区或井田，以连通型孔为主，含部分半连通型孔；再次为沁源、灵石、古县等，以半连通型孔为主，有部分封闭型孔。综观全区，本区上主煤层孔隙连通性在南部地区最好，中部地区最差，而北部地区则介于两者之间。

下主煤层孔隙连通性的空间分布规律不甚明显。介休两渡、翼城、阳泉等地相对较好，均为连通型孔；其次为沁水，以连通型和半连通型孔为主；再次为沁源、潞安、太原等地，以半连通型孔为主；霍州矿区最差，以封闭型孔为主。

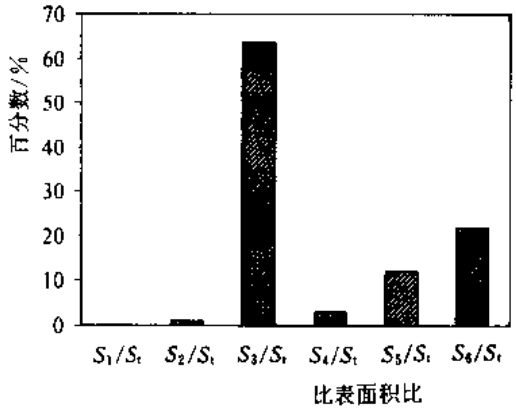


图 5-5 山西南部石炭—二叠系上主煤层全孔孔比表面积分布直方图

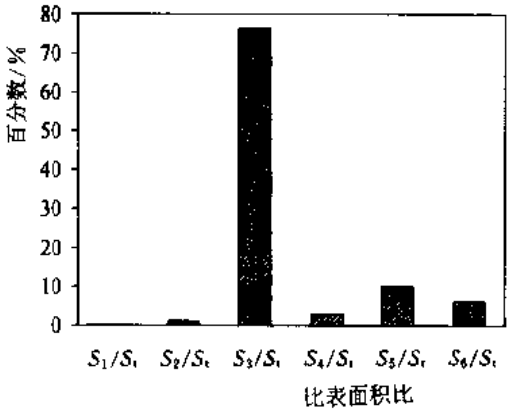


图 5-6 山西南部石炭—二叠系下主煤层全孔孔比表面积分布直方图

（二）主煤层压汞孔隙率、中值孔径和排驱压力

由压汞法测试，可求得直径大于 nm 的孔隙空间所占的相对比例，称之为压汞孔隙率。尽管压汞孔隙率对孔隙空间分布的反映并不全面，但仍能由此大致了解煤储层孔隙空间的分布状况。

1. 主煤层压汞孔隙率

测试结果表明，山西南部上主煤层的压汞孔隙率变化范围比较大，绝大多数分布于 8%～23%之间，众数在 12%和 23%左右（表 5-9，图 5-7）。从区域上看，上主煤层的平均压汞孔隙率以潞安最高，以其为中心向周边地区逐渐降低，以翼城矿区最低，在阳城和沁源矿区也相对较高。

下主煤层压汞孔隙率分布于 8.99%～41.25%之间，众数在 21%左右（表 5-9）。平均压汞孔隙率的区域分布规律以沁源矿区为中心，向周边地区有逐渐增高的趋势，此外潞安、翼城、介休两渡等地也相对较高。

表 5-9 山西南部石炭－二叠系主煤层孔隙率、中值孔径和排驱压力测试结果

样品号	煤层	排驱压力/MPa	孔隙率/%	中值孔径/nm	样品号	煤层	排驱压力/MPa	孔隙率/%	中值孔径/nm
YQ3	3#	27.04	9.75	31.8	HZ050102	3#	44.68	10.39	33.5
PGY04	3#	49.76	18.07	4886.9	HZ050201	2#	44.47	10.87	33.4
FLD0204	2#	55.87	12.95	76.87	HZ060601	2#	51.37	12.31	23.5
HZ010101	2#	47.18	12.15	43.3	HZ060302	2#	37.84	8.79	7644
HZ020101	2#	49.48	16.63	699.2	HZ060303	2#	30.97	14.23	34.7
HZ020102B	2#	52.52	9.43	19.7	HZ060401	3#	44.73	23.82	85483
HZ020103A	2#	38.80	8.15	26.2	HZ070202	3#	49.84	23.18	15420
HZ020201	2#	—	24.46	440.7	HZ070301	3#	47.92	25.90	93178
HZ020204	2#	51.58	11.51	48.1	HZ070303	3#	39.54	12.47	19.8

续表

样品号	煤层	排驱压力/MPa	孔隙率/%	中值孔径/nm	样品号	煤层	排驱压力/MPa	孔隙率/%	中值孔径/nm
HZ020301	2#	—	25.9	889.1	HZ070102	3#	30.33	28.94	126563
HZ020302	2#	44.41	23.98	54678	HZ070104	3#	34.69	14.87	82.4
HZ020304	2#	47.65	16.15	333.2	HZ070402	3#	34.67	27.73	74.1
HZ020305	2#	49.74	8.79	21671	JC0201	3#	34.39	18.07	28950
HZ040101	2#	56.98	16.15	660.7	JC0202	3#	34.39	12.15	40.8
HZ040201	2#	39.29	38.65	2852	LC0203	3#	39.25	15.19	55.1
HZ040301	2#	64.03	17.11	54168	JC0204	3#	37.46	13.43	28.3
HZ040401	2#	34.67	30.54	87345	CG15	15#	44.61	16.79	155.7
HZ040601	2#	44.68	23.02	72136	YQ15	15#	37.78	20.47	23949
HZ040701	3#	42.57	22.18	36.0	FLD1004	10#	52.14	25.58	77495
HZ040901	2#	40.11	9.22	447	HZ010104	10#	46.06	21.58	2169
LMZ04	3#	44.67	50.84	106764	HZ020401	10#	—	19.98	1180
LA3	3#	34.88	12.79	61.7	HZ050401	9#	44.47	10.27	133.7
HZ020501	2#	61.92	13.75	120.8	HZ040801	9#	44.47	9.11	36.0
HZ020601	2#	44.46	15.83	82.4	LHP04	15#	46.88	41.25	100891
HZ030101	3#	27.11	10.51	65.1	HZ050301	9#	49.88	24.30	94961
HZ030104	2#	44.46	20.50	37.9	HZ060101	9#	43.92	12.15	23.9
HZ030201	2#	39.33	22.69	42.0	HZ060204	9#	46.41	10.87	38.4
HZ050104	3#	41.23	12.79	48.1	HZ070403	9#	45.31	8.99	44.4

2. 主煤层压汞中值孔径

中值孔径是反映煤储层孔隙总体分布特征的重要参数，它是孔隙喉道大小的平均值，对煤层气储集和运移潜势具有显著影响。

从区域上看，上主煤层压汞孔容中值孔径按大小可分为四类：第一类分布在潞安、高阳、阳城等矿区，中值孔径均大于 40000 nm；第二类分布在沁源、沁水等矿区，中值孔径在 20000～40000 nm 之间；第三类分布在霍州和晋城矿区，中值孔径在 8000 nm 左右；第四类分布在洪洞、两渡、古县、灵石、翼城等地，中值孔径小于 120 nm(表 5-9)。

下主煤层压汞孔容中值孔径同样也可分为四类：第一类分布在潞安、翼城、两渡等矿区(煤矿)，大于 70000 nm；第二类分布在阳泉矿区，约在 20000 nm 左右；第三类分布在灵石、霍州等地，在 1000～3000 nm 之间；第四类分布在太原、沁源、阳城、沁水等地，均在 200 nm 以下(表 5-9)。

主煤层压汞孔容中值孔径的分布规律与压汞孔隙率分布十分相似，表明两者之间具有较为明显的正相关关系。

3. 主煤层压汞排驱压力

压汞排驱压力是汞流体开始注入煤样最大喉道时的毛细管压力，反映出煤层气在煤储

层中的运移能力。它与其它储层物性参数相配合，能更准确地评价储层的物性。

上主煤层压汞排驱压力为 27.04～64.03 MPa，多数集中在 35.00～50.00 MPa 之间（图 5-8）。在区域上，平均排驱压力以阳城矿区最低，其次为古县矿区，介休两渡矿最高，总体上表现为从南向北、自东而西逐渐增高的趋势（表 5-10）。

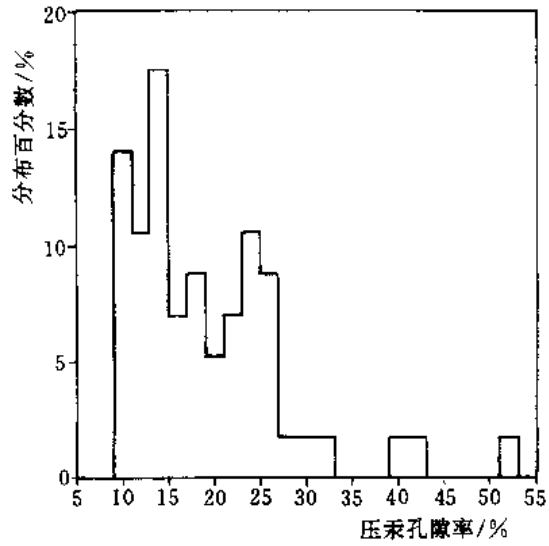


图 5-7　山西南部石炭—二叠系上主煤层压汞孔隙率分布直方图

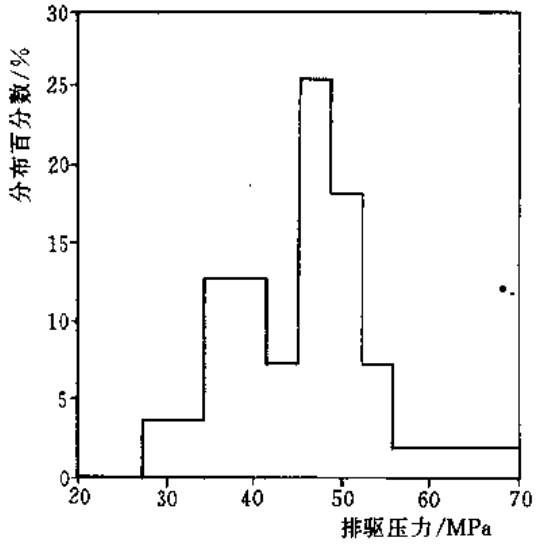


图 5-8　山西南部石炭—二叠系上主煤层压汞排驱压力分布直方图

表 5-10　　山西南部石炭—二叠系主煤层压汞排驱压力测试结果

地区	排驱压力/MPa		地区	排驱压力/MPa		地区	排驱压力/MPa	
	山西组	太原组		山西组	太原组		山西组	太原组
太原		44.61	沁源	46.33	44.47	阳泉	27.04	37.78
高阳	49.76		洪洞	53.19		潞安	39.78	53.08
两渡	55.87	52.14	古县	36.55		阳城	33.23	39.98
灵石	47.18	46.06	冀城	43.46	49.88	晋城	36.37	
霍州	47.59		沁水	43.17	45.28			

下主煤层压汞排驱压力较为集中，为 37.78～52.14 MPa，多数在 40.00～50.00 MPa 之间。从区域上看，下主煤层平均压汞排驱压力有自南向北、自东而西逐渐增高的趋势，阳城矿区最低，向周边地区逐渐增高，在介休两渡矿达到最高值（表 5-10）。

三　煤储层渗透率

本书所述渗透率是在实验室条件下测得的，尽管与煤储层原位渗透率之间存在较大差别，但仍是反映煤储层物理性质的重要参数。

上主煤层渗透率变化较大，其范围在 5.22×10^{-6}～1.69×10^{-3} μm² 之间，绝大多数小于 1.0×10^{-3} μm²（表 5-11）。最大值在晋城成庄井田，达 1.69×10^{-3} μm²，最低值位于沁水矿区永红矿。但由于测试样品为丝炭，而丝炭在煤层中所占比例甚小，不足以反映煤储层渗透

率的总体状况。总体上来看，古县矿区上主煤层渗透率最高，但仍属于低渗透储层。以古县为中心，渗透率向周边地区逐渐降低，大部分地区都在 $1.0\times10^{-6}\ \mu m^2\sim1.0\times10^{-3}\ \mu m^2$ 之间，属于致密储层，渗透性极差。在区域上，渗透性在中部古县矿区相对较好，其次为东南部的阳城、晋城矿区，其余地区的渗透性极差。

表 5-11　　山西南部石炭—二叠系主煤层渗透率实验室测试结果

地　点	样品号	煤层	煤岩类型	基质渗透率/μm^2	
				水　平	垂　直
霍州李雅庄矿	HLYZ0202	2#	半亮煤		2.33×10^{-5}
霍州什林矿	HZ020102	2#	光亮煤	1.02×10^{-4}	
霍州白龙矿	HZ020203	2#	暗　煤	1.58×10^{-4}	
沁源黄土坡矿	HZ040605	2#	光亮煤	2.12×10^{-4}	
	HZ040602	2#	光亮煤	2.14×10^{-5}	
洪洞圣王矿	HZ020502	2#	光亮煤	1.53×10^{-5}	
洪洞三交河矿	HZ020602	2#	光亮煤	3.91×10^{-4}	
沁源古寨矿	HZ040903	3#	暗　煤		6.63×10^{-5}
古县圪堆矿	HZ030105	3#	光亮煤		1.13×10^{-3}
沁水永红矿	HZ070402	3#	光亮煤		5.22×10^{-6}
沁水北庄矿	HZ070303	3#	光亮煤		1.45×10^{-4}
阳城西沟矿	HZ070103	3#	光亮煤		8.03×10^{-4}
阳城河村矿	HZ070401	3#	光亮煤		1.15×10^{-3}
晋城成庄矿	JC0202	3#	光亮煤		3.0×10^{-5}
	JC0203	3#	暗　煤		5.4×10^{-6}
	JC0204	3#	丝　炭		1.69×10^{-4}
阳泉五矿	YQ15	15#	全　煤	1.52×10^{-5}	
阳泉五矿	YQ155	15#	全　煤	1.79×10^{-5}	
介休两渡矿	FLD0202	10#	全　煤		5.84×10^{-6}
灵石柳岔沟矿	HZ010105	10#	光亮煤	1.45×10^{-4}	
霍州团柏矿	HZ020402	10#	光亮煤	3.09×10^{-6}	
沁源郭家坪矿	HZ040802	15#	光亮煤		1.20×10^{-5}
翼城刘王沟矿	HZ050302	15#	暗　煤		1.91×10^{-6}
沁水起龙沟矿	HZ060104	15#	暗　煤		8.34×10^{-4}
	HZ060103	15#	光亮煤		5.41×10^{-5}
阳城河村矿	HZ070407	9#	光亮煤		5.20×10^{-6}

下主煤层渗透率变化于 $1.91\times10^{-6}\sim8.34\times10^{-4}\ \mu m^2$ 之间(表 5-11)。最高值位于沁水矿区，平均值为 $4.44\times10^{-4}\ \mu m^2$；最低值在翼城矿区，为 $1.91\times10^{-6}\ \mu m^2$。就全区而言，下主煤层渗透率以沁水、灵石等地相对较高，但仍属于致密储层，其余地区渗透性极差，均属于致密储层。

四　煤储层吸附性

煤储层的吸附性既取决于其自身的物质组成特征，又取决于所吸附的烃类的性质。但是，煤的吸附性首先与其自身的孔隙性密切相关。煤层孔隙孔径越小、孔隙越多，其孔比表面积越大，则煤层的吸附能力也越强。

为了确定煤对甲烷的最大吸附能力，采用甲烷等温吸附方法对本区主煤层的样品进行了测试，其结果见表 5-12。

表 5-12　　山西南部石炭—二叠系主煤层甲烷等温吸附实验测试结果

地　点	样品号	煤层	实　测　数　据							吸附参数		
										a	b	r
阳泉五矿	YQ3	3#	压力/MPa	0.25	1.44	2.38	3.64	4.73	5.68	20.97	2.406	0.9933
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	9.1	15.4	17.5	19.1	19.4	19.5			
介休两渡矿	FLD0201	2#	压力/MPa	0.44	1.22	2.13	3.14	4.10	4.98	39.09	0.365	0.9800
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	5.71	11.5	16.3	19.6	24.2	25.8			
霍州什林矿	HZ020101	2#	压力/MPa	0.57	1.33	2.06	2.93	3.82	4.57	35.26	0.254	0.9984
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	4.47	8.76	12.4	15.0	17.2	19.0			
霍州白龙矿	HZ020201	2#	压力/MPa	0.57	1.25	2.22	3.14	3.95	4.82	41.86	0.264	0.9914
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	5.52	10.03	15.1	19.2	22.0	23.0			
霍州辛置矿	HZ020301	2#	压力/MPa	0.48	1.25	2.10	2.91	3.77	4.55	54.53	0.164	0.9838
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	3.87	9.44	14.5	17.6	21.7	22.7			
霍州李雅庄矿	HLYZ0201	2#	压力/MPa	0.49	1.27	2.10	2.73	3.66	4.59	26.46	0.368	0.9881
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	4.27	7.94	11.5	13.9	14.5	17.0			
沁源沁新矿	HZ040201	2#	压力/MPa	0.65	1.50	2.40	3.42	4.24	5.74	60.88	0.329	0.9837
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	11.8	20.5	25.5	29.9	35.6	41.4			
沁源三合矿	HZ040701	1#+2#	压力/MPa	0.36	0.97	2.65	3.51	4.28	5.10	72.36	0.252	0.9343
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	63.80	15.0	14.8	31.2	39.1	43.9			
潞安王庄矿	LWZ01	3#	压力/MPa	0.25	0.86	1.81	2.65	3.48	4.3	44.22	0.723	0.9879
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	7.55	17.0	24.1	27.3	32.0	34.5			
潞　安	LA3	3#	压力/MPa	0.35	1.51	2.31	4.16	4.17	—	29.41	1.319	0.9971
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	11.1	18.8	21.1	24.5	26.3	—			
洪洞圣王矿	HZ020501	2#	压力/MPa	0.49	1.26	2.18	3.18	4.05	4.82	28.22	0.332	0.9926
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	4.19	8.07	12.0	13.9	16.0	17.9			
洪洞三交河矿	HZ020601	2#	压力/MPa	0.49	1.29	2.03	2.70	2.58	4.45	28.76	0.352	0.9897
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	4.62	8.58	11.3	14.2	16.4	17.6			
古县古阳矿	HZ030201	2#	压力/MPa	0.65	1.60	2.41	3.46	4.40	5.15	31.55	0.369	0.9951
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	6.0	12.1	14.5	17.6	20.3	20.2			
翼城张家沟矿	HZ050201	2#	压力/MPa	0.49	1.19	2.04	2.96	4.07	4.73	74.68	0.347	0.9770
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	12.7	21.0	28.0	37.5	43.2	48.4			

续表

地点	样品号	煤层	实测数据							吸附参数		
										a	b	r
翼城殷儿垣矿	HZ050102	3#	压力/MPa	0.44	1.15	1.98	2.63	3.61	4.56	58.69	0.210	0.9858
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	4.90	11.5	16.9	21.9	24.9	28.6			
沁水北庄矿	HZ070303	3#	压力/MPa	0.13	0.58	1.48	2.73	3.80	4.76	45.64	1.484	0.9968
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	9.06	20.7	29.1	36.3	38.8	40.4			
沁水中村矿	HZ060301	2#	压力/MPa	0.39	1.15	2.10	2.96	3.80	4.76	42.76	0.389	0.9827
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	6.06	13.6	17.9	22.1	25.6	28.5			
	HZ060301	2#	压力/MPa	0.53	1.50	2.84	3.85	4.41	5.20	85.03	0.460	0.9606
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	21.6	32.4	41.7	52.3	59.9	62.8			
沁水永红矿	HZ0702C2	3#	压力/MPa	0.20	0.74	1.44	2.26	3.14	4.12	93.87	0.636	0.9748
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	14.4	28.8	41.1	50.1	62.4	72.1			
阳城西沟矿	HZ070102	3#	压力/MPa	0.11	0.73	1.67	2.65	3.55	4.20	48.15	1.772	0.9913
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	10.7	24.3	33.5	38.6	42.9	42.3			
太原东山矿	CG15	15#	压力/MPa	0.20	1.06	2.09	3.17	4.23	5.23	29.54	1.001	0.9918
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	6.90	14.3	18.5	21.5	23.7	25.9			
阳泉五矿	YQ15	15#	压力/MPa	0.18	1.16	2.09	3.29	4.31	5.31	41.29	1.251	0.9914
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	11.4	23.6	27.3	31.6	34.4	37.7			
介休两渡矿	FLD1001	10#	压力/MPa	0.31	0.95	1.91	2.79	3.48	4.40	29.15	0.767	0.9921
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	6.02	13.1	16.8	19.4	21.9	23.5			
灵石柳岔沟矿	HZ10104	10#	压力/MPa	0.47	1.16	2.26	3.15	4.04	4.80	32.51	0.347	0.9893
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	4.64	10.8	14.6	17.4	18.8	21.6			
霍州团柏矿	HZ020401	10#	压力/MPa	0.45	1.27	1.95	2.78	3.68	4.47	22.06	0.562	0.9898
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	5.10	8.41	10.9	13.9	15.2	15.7			
沁源郭家坪矿	HZ040801	9#+10#	压力/MPa	0.57	1.50	2.43	3.28	4.18	5.29	71.80	0.297	0.9390
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	13.4	20.7	27.4	32.5	39.8	47.4			
潞安小河堡矿	HZ050301	15#	压力/MPa	0.25	1.03	0.98	3.08	3.97	4.72	43.22	0.629	0.9942
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	6.89	16.2	22.3	28.2	31.2	32.9			
翼城刘王沟矿	HZ050301	9#+10#	压力/MPa	0.29	0.94	1.79	2.90	3.96	5.18	18.22	0.411	0.9756
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	6.70	11.8	20.0	24.7	29.6	34.2			
沁水老河里矿	HZ060204	9#+10#	压力/MPa	0.37	1.16	2.10	3.11	3.86	4.77	84.44	0.428	0.9708
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	14.5	26.8	35.4	46.1	53.5	5.95			
阳城河村矿	HZ070403	9#	压力/MPa	0.10	0.67	1.55	2.62	3.43	4.23	43.05	1.614	0.9873
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	9.49	20.4	29.4	33.3	35.7	39.3			
	HZ070406	9#	压力/MPa	0.44	1.52	2.27	3.25	4.18	5.26	57.45	0.779	0.9839
			吸附量/$cm^3 \cdot g^{-1}$	19.5	28.0	36.2	38.0	44.0	48.4			

测试结果表明，在测试温度为 30 ℃的条件下，本区上主煤层甲烷吸附常数变化较大。兰氏体积(a 值)变化于 20.97～93.87 之间，平均为 46.25；兰氏压力的倒数(b 值)为 0.164～2.406，平均值为 0.829(表 5-12)。由此可知，本区上主煤层甲烷的平均理论饱和吸附量较高，为 46.25 m^3/t，这与研究区以中、高煤级煤为主的煤级分布特征有关。在区域上，上主煤层平均甲烷饱和吸附量由南向北有逐渐降低的趋势。

下主煤层甲烷吸附常数变化范围较大。兰氏体积(a 值)变化于 22.06～84.44 之间，平均为 45.31；兰氏压力的倒数(b 值)变化在 0.297～1.614 之间，平均为 0.691。因此，下主煤层对甲烷的平均理论饱和吸附量为 45.31 m^3/t(表 5-12)。在区域上，下主煤层平均理论饱和吸附量以沁水矿区最高，其次为沁源矿区，以沁水为中心向周边地段逐渐降低。换言之，下主煤层平均甲烷饱和吸附量以南部地区最高，中部地区次之，北部地区最差，同时东部地区要高于西部地区。

第二节　盖层物性分析

盖层，是指位于煤储层上方、能够阻止储集层中的烃类流体向上逸散的岩层。盖层之所以能够封隔烃类流体，原因主要有三点：毛细管压力封闭、浓度封闭和高压异常流体压力封闭。这三个因素尤其是前二个因素与盖层的物性有直接关系。因此，研究盖层的岩石物性，对煤层气储存条件的评价有重要意义。

一　主煤层顶板裂隙系统

本区上主煤层顶板多为砂质泥岩，在霍州白龙矿、介休两渡矿上主煤层顶板为粉砂质泥岩。顶板中发育两组节理：第一组节理走向 54°～80°，大多集中在 55°～70°之间，平均密度为 10 条/m；第二组节理走向为 275°～356°，全区平均密度为 7.1 条/m，多集中在 341°～350°之间，平均密度为 9.0 条/m(表 5-13)。第一组节理发育较好，属于本区上主煤层顶板的主要节理(图 5-9)。节理倾角变化较大，倾角在 35°～85°之间，一般为 77°～85°，节理缝中见有方解石或煤粉充填物，或充填不明显。霍州矿区上主煤层顶板节理最为发育，其次为汾西高阳井田，沁水和阳城矿区主煤层顶板节理发育最差，且仅见一组节理。

表 5-13　　山西南部石炭—二叠系上主煤层顶板节理观测统计结果

地　点	煤层及其顶板岩性	节理发育特征		
		产状(走向、倾角)	充填特征	平均密度/条·m^{-1}
汾西高阳矿	1 煤顶板，砂质泥岩	70°∠35°	充填不明显	13
介休两渡崔家沟井	2 煤顶板，粉砂质泥岩	80°∠55°/ 356°∠61°	方解石充填	4/3
霍州白龙矿	2 煤顶板，细粉砂质泥岩	54°∠82°/ 341°∠79°	方解石充填	27/23
灵石南关	2 煤顶板，砂质泥岩	72°∠81°/ 288°∠77°	无充填	4/4
襄城殿儿垣矿	2 煤顶板，砂质泥岩	275°∠77°/ 350°∠82°	无充填	6/6
沁水杏峪宁四沟矿	2 煤顶板，砂质泥岩	343°∠48°，346°∠54°	煤粉充填	2
阳城西沟矿	3 煤顶板，砂质泥岩	324°∠43°，345°∠85°	煤泥充填	4
潞安十庄矿	3 煤顶板，砂质泥岩	55°∠49°/ 276°∠58°	无充填	2/8

续表

地　点	煤层及其顶板岩性	节理发育特征		
		产状(走向、倾角)	充填特征	平均密度/条·m^{-1}
介休两渡河溪沟井	10煤顶板,砂质泥岩	58°∠88°, 70°∠85°	碳质泥充填	8
	9煤顶板,K_2灰岩	320°∠80°	方解石充填	6
霍州辛置矿	9煤顶板,K_2灰岩	5°∠61°, 28°∠71°	煤粉充填	7
	10煤顶板,砂质泥岩	15°∠84°, 76°∠83°	煤粉充填	3
灵石南关	10煤顶板,砂质泥岩	32°∠80°, 83°∠62°	充填不明显	5
		315°∠85°, 354°∠85°	充填不明显	4
沁水杏峪豹凹沟矿	15煤顶板,K_2灰岩	15°∠50°, 15°∠57°, 26°∠40°, 42°∠55°	充填不明显	7
		342°∠55°, 348°∠58°	充填不明显	2
潞安小河堡矿	15煤顶板,砂质泥岩	273°∠62°, 285°∠48°	充填不明显	1

下主煤层顶板为砂质泥岩、灰岩和砂岩,发育两组节理。第一组节理走向为5°～88°(平均密度为6条/m),大多集中在15°～40°之间,平均密度为5.5条/m。第二组节理走向为273°～354°(平均密度为3.3条/m),多集中在315°～320°之间,平均密度为5.0条/m。第一组节理为本区的主要节理(图5-10)。节理倾角变化在48°～85°之间,大多数为48°～62°,在两渡矿节理缝中见碳质泥质和方解石充填,其它地区充填现象不甚明显。综观全区,下主煤层节理在介休两渡矿最为发育,其次为霍州矿区,沁水、灵石等地煤层顶板节理较差。

二　主煤层顶板孔隙结构

本书采用压汞法测出山西南部石炭—二叠系主煤层顶板样品中直径大于7 nm孔隙的孔径结构、孔容、孔比表面积、孔隙率、中值孔径和突破压力等基本参数,并对其分布特征进行了讨论。

(一) 主煤层顶板孔容、孔比表面积和孔隙连通性

1. 主煤层顶板压汞孔容

山西南部上主煤层顶板大部分为砂质泥岩,仅在汾西高阳矿见有泥岩、沁源沁新矿见有粉砂岩。总孔容变化于56×10^{-4}～224×10^{-4} cm^3/g之间,大多在135×10^{-4}～224×10^{-4} cm^3/g范围内,占样品总数的67%。孔径结构以过渡孔为主,其平均孔容比为51%;其次为大孔,平均孔容比为28%;中孔所占比例较小,平均为9%(表5-14,图5-11)。在介休两渡矿、翼城殷儿垣矿、沁源沁新矿等地中孔孔容比要略高于微孔孔容比。由此可见,本区上主煤层顶板总孔容空间分布大致具有如下规律:以沁水矿区为中心,向北、向西逐渐增大;微孔孔容比以南部沁水矿区最高,向中部地区逐渐降低,然后向北又有逐渐增高的趋势。

下主煤层顶板岩性除砂质泥岩、泥岩外,还有灰岩。总孔容分布于45×10^{-4}～374×10^{-4} cm^3/g之间,大多数样品小于100×10^{-4} cm^3/g,占样品总数的75%。孔径结构以过渡孔为主,平均孔容比为39%;其次为大孔,平均孔容比为38.6%;中孔的平均孔容比最低,为11%。但沁水矿区下主煤层顶板的大孔孔容比高于过渡孔孔容比,中孔孔容比要高于微孔孔容比,这可能与岩性有关(图5-12)。从区域上看,沁水豹凹沟矿总孔容最低,向北逐渐升高,最高值位于研究区中部的沁源背章煤矿。

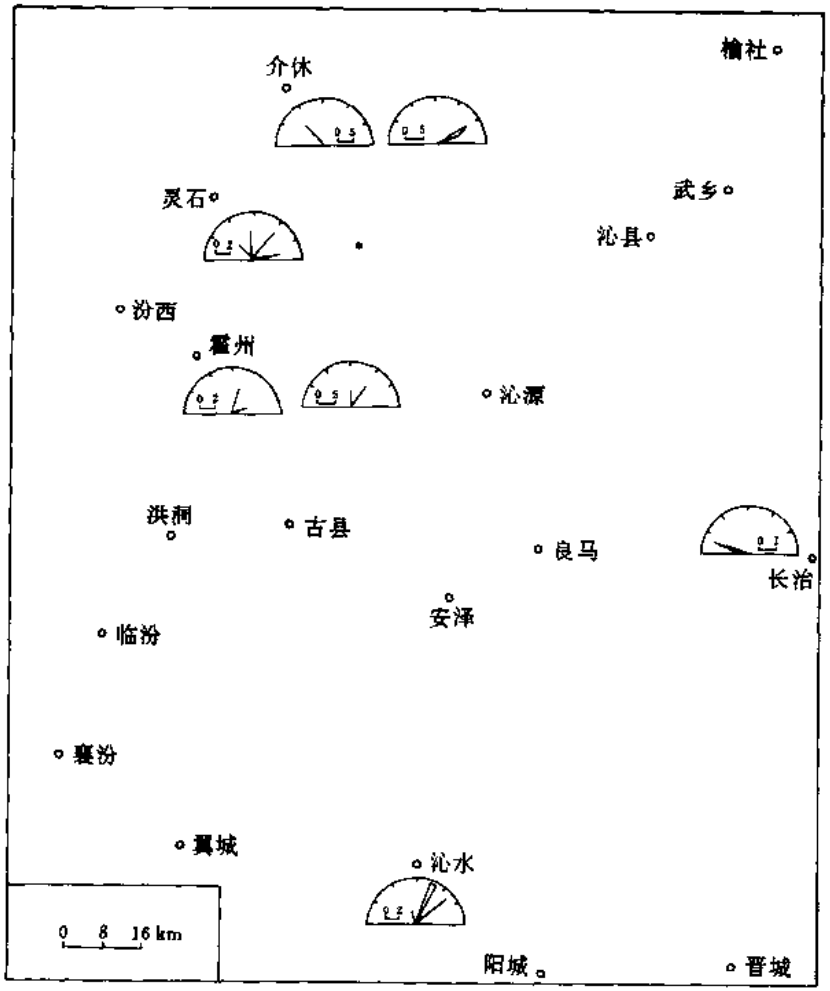


图 5-9　山西南部石炭—二叠系上主煤层顶板节理走向玫瑰花图

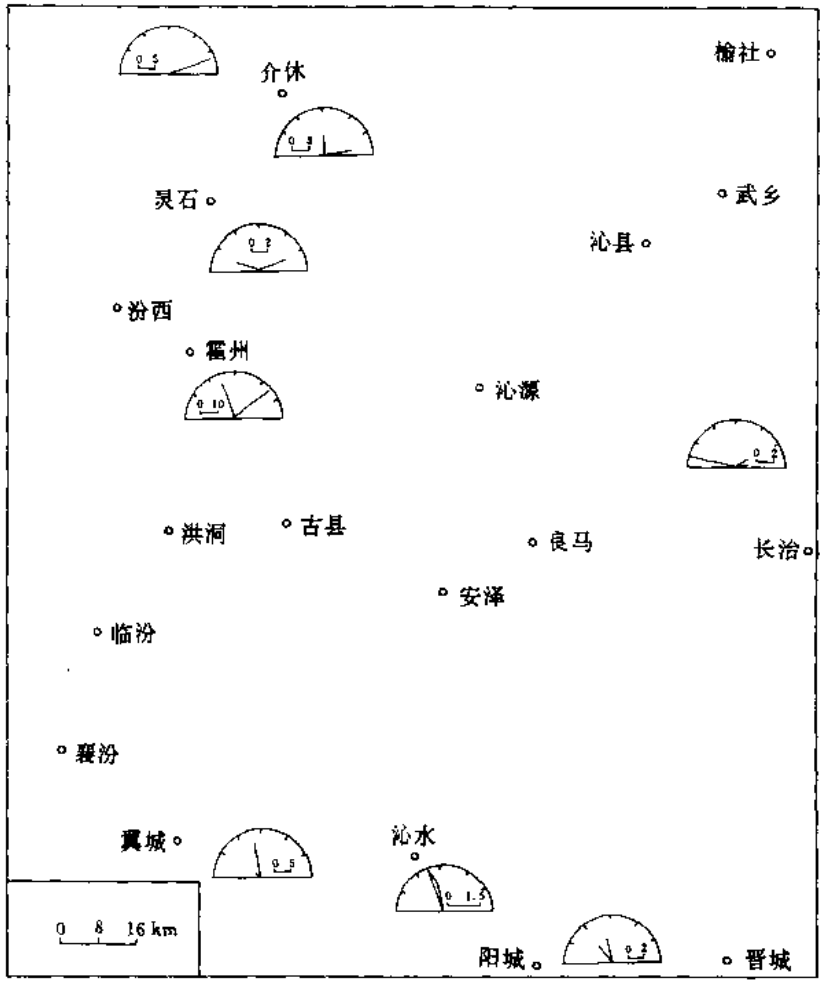


图 5-10　山西南部石炭—二叠系上主煤层顶板节理走向玫瑰花图

表 5-14　　山西南部石炭—二叠系主煤层顶板压汞孔容分布

地　点	煤层及顶板岩性	样品号	孔容/$10^{-4}cm^3 \cdot g^{-1}$					孔容比/100%			
			V_1	V_2	V_3	V_4	V_t	V_1/V_t	V_2/V_t	V_3/V_t	V_4/V_t
汾西高阳矿	3 煤顶板，泥岩	FGY07	27	4	37	17	85	0.318	0.047	0.435	0.200
潞安王庄矿	3 煤顶板，砂质泥岩	LWZ07	55	16	88	21	180	0.306	0.089	0.489	0.116
介休两渡矿	2 煤顶板，砂质泥岩	FLD0207	61	23	94	16	194	0.314	0.119	0.485	0.082
翼城殿儿垣矿	2 煤顶板，砂质泥岩	EDY0207	27	14	174	9	224	0.121	0.063	0.760	0.040
沁源沁新矿	2 煤顶板，粉砂岩	QYX0207	41	23	62	9	135	0.304	0.170	0.459	0.067
沁水宁凹沟矿	2 煤顶板，砂质泥岩	QNW0207	17	2	24	13	56	0.304	0.036	0.428	0.232
介休两渡矿	10 煤顶板，粉砂质泥岩	FLD1007	28	—	39	13	80	0.350	—	0.488	0.162
潞安小河保矿	15 煤顶板，砂质泥岩	LHD07	43	3	37	12	95	0.453	0.032	0.389	0.126
沁水豹凹沟矿	15 煤顶板，灰岩	QBW1507	22	11	11	1	45	0.489	0.244	0.245	0.022
沁源背章矿	10 煤顶板，泥岩	QYBZ1007	79	65	164	66	374	0.211	0.174	0.439	0.176

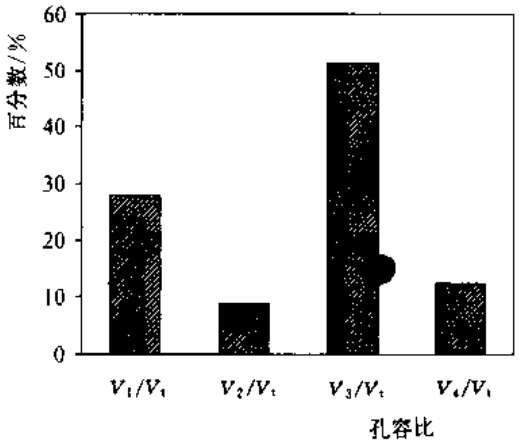


图 5-11　山西南部石炭—二叠系上主煤层顶板平均孔容分布直方图

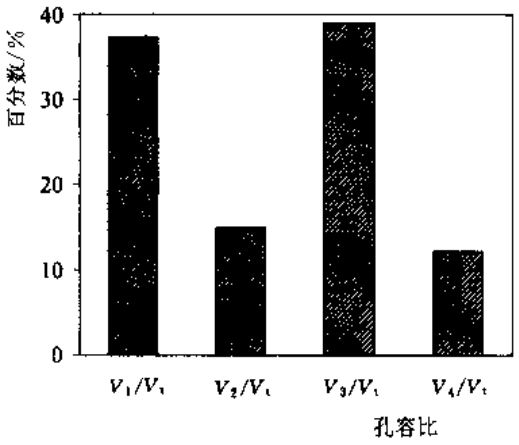


图 5-12　山西南部石炭　二叠系下主煤层顶板平均孔容分布直方图

2. 主煤层顶板孔比表面积

上主煤层顶板总孔比表面积在 $1137.9\times10^{-3}\sim4077.5\times10^{-3}\ m^2/g$ 之间，多数小于 $2000\times10^{-3}\ m^2/g$，占样品总数的 50%(表 5-15)。孔比表面积主要集中在过渡孔段，平均比例为 66.9%；其次为微孔段，平均比例为 33%；大孔段的平均孔比表面积比最低，仅占 0.1%；但在汾西高阳、沁水等地，顶板微孔段的孔比表面积均高于过渡孔段(图 5-13)。在区域上，顶板总孔比表面积最高值位于翼城殿儿垣矿，以其为中心向东、向北逐渐降低；最低值位于沁水宁凹沟矿，但其微孔数量较多，且微孔比表面积比是全区最高的，达 52%。

下主煤层顶板总孔比表面积变化较大，分布在 $265.0\times10^{-3}\sim6365.3\times10^{-3}\ m^2/g$ 之间，大多小于 $2000\times10^{-3}\ m^2/g$。孔比表面积主要集中在过渡孔段，平均比例为 61%；其次为微孔段，平均比例为 36%；大孔段所占比例最小，仅为 0.1%(表 5-15，图 5-14)。从区域上分析，下主煤层顶板总孔比表面积最大值位于沁源矿区，向周边地段逐渐降低，在沁水矿区出

现最低值。沁水矿区下主煤层顶板虽过渡孔段孔比表面积比最高，但微孔比表面积比却为全区最低值。

表 5-15　　山西南部石炭—二叠系主煤层顶板压汞孔比表面积分布

地　点	煤层及顶板岩性	样品号	孔比表面积/$10^{-3}m^2 \cdot g^{-1}$					孔比表面积/100%			
			S_1	S_2	S_3	S_4	S_t	S_1/S_t	S_2/S_t	S_3/S_t	S_4/S_t
汾西高阳矿	3 煤顶板，泥岩	FGY07	0.5	5.1	784.8	845.3	1635.7	0.001	0.003	0.480	0.516
潞安王庄矿	3 煤顶板，砂质泥岩	LWZ07	1.8	27.4	1995.5	952.6	2977.3	0.001	0.009	0.670	0.320
介休两渡矿	2 煤顶板，砂质泥岩	FLD0207	2.1	22.8	1842.5	706.3	2573.7	0.001	0.008	0.716	0.275
翼城殿儿垣矿	2 煤顶板，砂质泥岩	EDY0207	1.0	23.7	3623.2	429.6	4077.5	0.0003	0.006	0.888	0.106
泥源沁新矿	2 煤顶板，粉砂岩	QYX0207	1.9	49.5	1080.0	352.4	1483.8	0.002	0.032	0.728	0.238
沁水宁门沟矿	2 煤顶板，砂质泥岩	QNW0207	0.2	4.4	537.5	595.8	1137.9	0.0002	0.004	0.473	0.523
介休两渡矿	10 煤顶板，粉砂质泥岩	FLD1007	1.2	—	890.7	584.8	1476.7	0.001	—	0.603	0.396
潞安小河堡矿	15 煤顶板，粉砂质泥岩	LHD07	0.8	5.2	749.3	573.0	1328.3	0.001	0.004	0.564	0.431
沁水豹四沟矿	15 煤顶板，灰岩	QBW1507	1.7	23.9	190.7	48.7	265.0	0.006	0.090	0.720	0.184
沁源背章矿	10 煤顶板，泥岩	QYBZ1007	5.1	134.3	3455.4	2770.5	6365.3	0.001	0.021	0.543	0.435

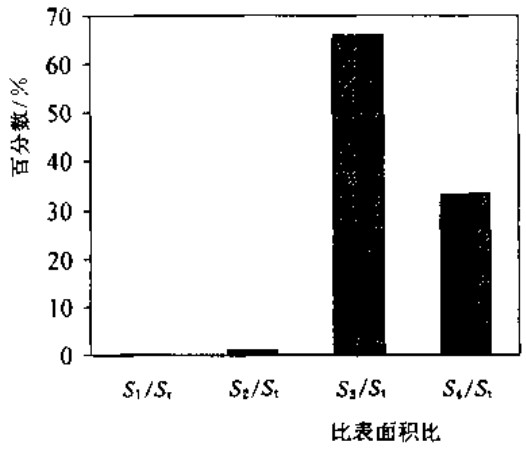


图 5-13　山西南部石炭—二叠系上主煤层顶板平均孔比表面积分布直方图

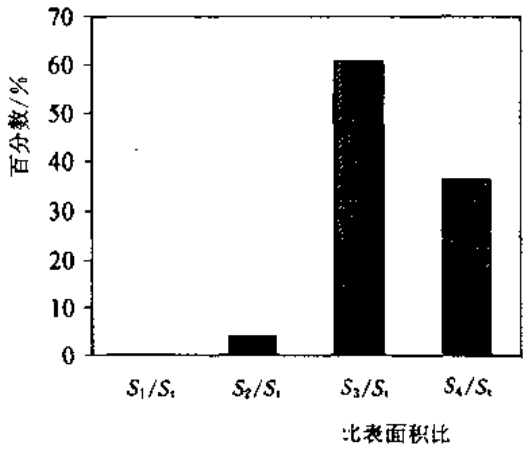


图 5-14　山西南部石炭—二叠系下主煤层顶板平均孔比表面积分布直方图

3. 主煤层顶板孔隙连通性

与煤储层类似，盖层中也存在连通型、半连通型(半封闭)和封闭型三类孔隙连通性类型。显然，盖层中孔隙的连通性越差，其渗透性就越差，对煤层气的封盖能力就越强。

上主煤层顶板孔隙的连通性普遍较差，绝大多数为封闭孔，有极少量的半封闭孔。翼城、沁源、介休等地上主煤层顶板孔隙连通性最差，均属于封闭孔类型；沁水矿区顶板孔隙连通性相对较好，属于半封闭孔类型；在高阳、潞安等地，顶板孔隙连通性介于上述两者之间。下主煤层顶板孔隙连通性与上主煤层类似，绝大部分均属于封闭孔类型，例如沁水、沁源、潞安等地。在介休两渡矿下主煤层顶板孔隙连通性相对较好，但仍属半封闭孔类型。

（二）主煤层顶板孔隙率、中值孔径和突破压力

1. 主煤层顶板压汞孔隙率

上主煤层顶板压汞孔隙率多介于4%～16%之间，多数为6%～10%（表5-16）。最低值在沁水矿区宁凹沟矿，孔隙率为4.16%；其次为汾西高阳矿，孔隙率为6.08%；最高值在翼城殿儿垣矿，为15.83%。这种趋势与孔容的分布规律一致，表明孔容越大孔隙率越高。孔隙率最低的地段位于南部的沁水矿区，向周边地区逐渐增高，尤以西部的翼城地段最高。可见，上主煤层顶板孔隙率在南部地区最低，中部地区最高，北部介于两者之间，同时西部地区高于东部地区。

表5-16　山西南部石炭-二叠系主煤层顶板突破压力、压汞孔隙率和中值孔径

地　点	煤层顶板岩性	样品号	突破压力/MPa	孔隙率/%	中值孔径/nm
汾西高阳矿	3煤顶板，泥岩	FGY07	45.97	6.08	27.1
潞安王庄矿	3煤顶板，砂质泥岩	LWZ07	34.62	8.47	37.1
介休两渡矿	2煤顶板，砂质泥岩	FLD0207	44.68	13.27	52.4
翼城殿儿垣矿	2煤顶板，砂质泥岩	EDY0207	41.29	15.83	23.1
沁源沁新矿	2煤顶板，粉砂岩	QYX0207	19.25	9.43	84.1
沁水宁凹沟矿	2煤顶板，砂质泥岩	QNW0207	56.92	4.16	22.7
介休两渡矿	10煤顶板，粉砂质泥岩	FLD1007	49.69	4.96	23.3
潞安小河堡矿	15煤顶板，砂质泥岩	LHD07	37.79	5.92	82.4
沁水豹凹沟矿	15煤顶，板灰岩	QBW1507	—	3.84	700.7
沁源背章矿	10煤顶板，泥岩	QYBZ1007	44.71	18.39	33.4

下主煤层顶板压汞孔隙率为3.84%～18.39%，众数小于6%，最低值位于沁水豹凹沟矿，最高值位于沁水源背章矿。从区域上看，下主煤层顶板孔隙率以南部的沁水矿区最低，向北逐渐增高，至中部的沁源一带达到最高值，由沁源向北又呈下降趋势。

2. 主煤层顶板压汞中值孔径

上主煤层顶板中值孔径变化于23.7～84.1 nm之间，多数为20～40 nm。中值孔径最大值在沁源矿区，为84.1 nm；其次为介休两渡矿，为52.4 nm；最小值位于沁水和翼城矿区，分别为22.7 nm和23.1 nm（表5-16）。从全区看，中值孔径在南部地区较低，中部较高，北部则介于两者之间。

下主煤层顶板中值孔径变化范围较大，最低值为23.3 nm（两渡矿），最高值为700.7 nm（沁水豹凹沟矿）。大致可以认为，本区南部下主煤层顶板的中值孔径要高于北部地区。

3. 主煤层顶板突破压力

上主煤层顶板突破压力介于19.25～56.92 MPa之间，多数为35.00～45.00 MPa（表5-16）。从区域上分析，突破压力最大值位于沁水宁凹沟矿，其次为汾西高阳矿和介休两渡矿，最低值位于沁源沁新矿。因此，南部地区上主煤层顶板突破压力最大，北部次之，中部地区相对较小。

下主煤层顶板突破压力介于37.79～49.69 MPa间，最高值位于介休两渡矿，最低值位于潞安小河堡矿，沁源背章矿居中（表5-16）。由于测点太少，全区规律性不甚明显。

三　主煤层顶板渗透率

盖层渗透率大小对于煤层气的保存和逸散特征具有重要的控制作用。如果煤储层被非渗透层覆盖，在煤储层的裂隙—孔隙网络中的游离气体能与围岩的流体静压力保持平衡；如果煤储层被渗透层所覆盖，这种平衡便不复存在，游离气体将向上渗透，并从煤储层中向外逸散。同时，游离气体的这种损失又可破坏游离气体与吸附气体之间的平衡，从而促使解吸作用发生，使煤层气不断向外逸散。

实验室测试结果表明：上主煤层顶板渗透率变化于 $3.73\times10^{-6}\sim8.81\times10^{-5}\ \mu m^2$ 之间，潞安矿区王庄矿最低，其次为介休两渡矿，最高值位于汾西高阳矿（表 5-17）。就全区而言，上主煤层顶板渗透率在潞安矿区最低，向周边地区逐渐增大，其中向西北方向增加的幅度较大、向西南方向增加的幅度较小，但全区上主煤层顶板均属于非渗透性盖层，对煤层气的封盖性能良好。

表 5-17　　山西南部石炭—二叠系主煤层顶板渗透率实验室测定结果

地　点	样品号	煤层	顶底板	岩　性	渗透率/μm^2	
					水　平	垂　直
阳泉五矿	YQ3C	3#	顶板	细砂岩	2.29×10^{-5}	
阳泉五矿	YQ3L	3#	底板	中砂岩	1.27×10^{-4}	
汾西高阳矿	FGY06	3#	顶板	泥岩		8.81×10^{-5}
介休两渡矿	FLD0206	2#	顶板	砂质泥岩		9.74×10^{-6}
沁源沁新矿	QYX0206	2#	顶板	粉砂岩		2.49×10^{-5}
潞安王庄矿	LWE06	3#	顶板	砂质泥岩		3.73×10^{-6}
翼城殿儿垣矿	EDY0206	2#	顶板	砂质泥岩		1.2×10^{-5}
潞安小河堡矿	LHP06	15#	顶板	砂质泥岩		2.17×10^{-5}
沁源背章矿	QYBZ1006	10#	顶板	泥　岩		7.49×10^{-5}
沁水豹叫沟矿	QBW1506	15#	顶板	灰　岩		3.56×10^{-6}

下主煤层顶板渗透率变化于 $3.56\times10^{-6}\sim7.49\times10^{-5}\ \mu m^2$ 之间，沁水矿区最低，沁源矿区最高（表 5-17），全区性变化规律不明显，但均属于非渗透性盖层。

第三节　煤储层及其盖层的几何特征

煤储层的几何特征包括煤层厚度、煤层稳定性、煤层结构、煤层间距以及煤层埋深等基本性质，它与煤层气的生成、储集、开采地质条件和储层物性等密切相关。迄今为止，国内外对煤储层的盖层尚无统一定义，本书将煤层伪顶和直接顶板视为盖层予以讨论。

一　上主煤层及其盖层的几何特征

上主煤层全区发育，在霍州—沁县以北地区以及沁水—古县—沁源—沁县以东地区为单一煤层，在其它地区有分叉现象发生。上主煤层在东南部地区称为 3 号煤，在中部和北部地区称为 2 号煤，在西北部高阳一带分叉为两层（10 号煤层和 11 号煤层），在西部地区也分为两层，分别称为 2 号上和 2 号下煤层（图 5-15）。

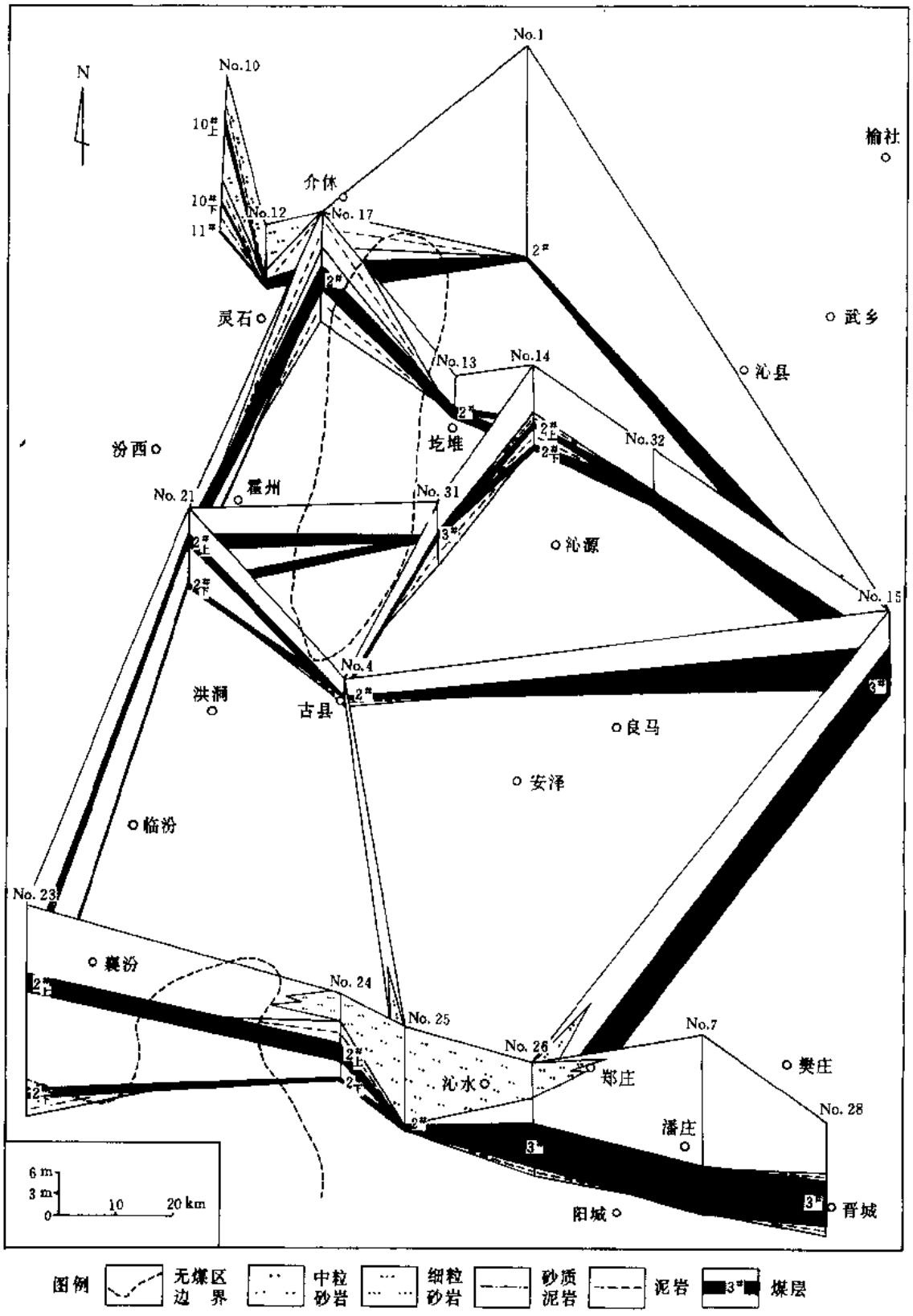


图 5-15　山西南部石炭—二叠系上主煤层煤体形态示意图

上主煤层厚度变化极大，在 0.5～6 m 之间，具有“南厚北薄、东厚西薄”的总体变化趋势。厚煤带位于阳城、晋城以北的潘庄、樊庄、郑庄井田以及东部的潞安矿区，厚度可达 6 m 以上，在西部的襄汾、临汾和洪洞地区煤层厚度为 3～4 m。上主煤层存在两个薄带区：一是位于西部的汾西—灵石之间，厚度仅有 0.5 m，二是位于中部地区，厚度小于 1 m，局部范围内该煤层有可能缺失(图 5-16)。上主煤层直接顶板多为细砂岩和粉砂岩，仅在沁水矿区沁 2 孔中见到中粒砂岩。

2 号上煤层(高阳一带为 11 号煤)分布在西部古县、介休、霍州地区及中部沁 76 孔等地，煤厚 1～2 m，西部厚，中部相对较薄，厚度稳定(图 5-16)。顶板岩性主要为粉砂岩，在南部 L-9 孔附近见 2.5 m 厚的泥岩，在高阳高 8 孔见 0.5 m 厚的薄层泥岩。2 号下煤层的分布范围与 2 号上煤层相同，厚 1 m 左右，尚稳定，其顶板主要为粉砂岩，仅在西北部高阳一带为泥岩(图 5-15)。

二　下主煤层及其盖层的几何特征

下主煤层实际上是由 1～4 层煤组成的，在个别地点(如沁源 11 号钻孔)可达 5 层(图 5-17)。在北部的汾西、霍州、沁源一线以北地区以及西部的灵石、洪洞、临汾、襄汾等地，下主煤层总厚度较大，可达 4～7 m；在东部和南部的沁水、樊庄、郑庄、潘庄等地，下主煤层总厚为 1.5～2.5 m；在中部的安泽、沁源、良马、古县地区下主煤层总厚度较小，均在 2 m 以下，最薄仅有 1.5 m(图 5-18)。

下主煤层全区伏于太原组 K_2 灰岩之下，大多数地区为三个煤层，分别称之为 9 号、10 号和 11 号煤层。在北部的高阳一带，这三层煤合并成为一单层厚煤层，称之为 1+2+3 号煤层。在沁水、阳城和晋城地区，该三层煤也合并为一层，称之为 9 号或 15 号煤层。在东部边缘的潞安矿区(3064 孔)可见四个分层，分别称之为 14 号、15-1 号、15-2 号、15-3 号煤层(图 5-17)。

9 号煤层以汾孝矿区及南部的襄汾、沁水、阳城、晋城矿区较厚，可达 3～5 m。中部和东部广大地区该煤层厚度为 1～1.5 m，其厚度变化不大、分布稳定。该煤层的顶板(K_2 灰岩)厚 7～8 m，最厚在本区南部沁水一带，可达 18 m。顶板灰岩类型多为生物碎屑泥晶灰岩，在南部沁水一带间夹厚 2～2.5 m 的泥岩层，北部高阳地区间夹厚 2.5 m 的细砂岩层。9 号煤层与其下伏 10 号煤层之间的间距为 1～5 m，其间岩性主要为泥岩，在西北部柳湾矿区为粉砂岩。在中部良马—安泽以北、沁源以南以及古县以东的地区，两煤层间距加大，可达 20 m，其间岩性变粗，多为细砂岩。

10 号煤层除在西北部高阳和南部晋城、沁水、襄汾等地与其它煤层合并以外，在其余广大地区均有分布。该煤层在潞安矿区又分叉为两层，分别称之为 15-1 号和 15-2 号煤层；在沁源中部霍 11 孔，该煤分层分为三个更薄的煤分层，其间夹有小于 1 m 的碎屑沉积层。10 号煤层在介休、沁源、灵石、洪洞等地较厚，达 2～3 m，向西南延伸与 9 号煤合并。在东部潞安矿区可达 3～4 m，向中部地区变薄，向南则与 9 号煤层合并。在中部的古县圪堆地区，10 号煤最薄，厚度小于 1 m(图 5-18)。在大部分地区，该煤层的顶板均为泥岩，仅在中部圪堆及其以西地区和西北部的柳湾等地为细砂岩和粉砂岩。10 号煤层与下伏 11 号煤层的间距小于 10 m，在中部和西部边缘间距相对较大，在北部小于 5 m，在南部两层煤合并为单一煤层(图 5-17)。

11 号煤层分布在介休—汾西地区东南部和沁水、潘庄、樊庄以北广大地区(图 5-17)，在

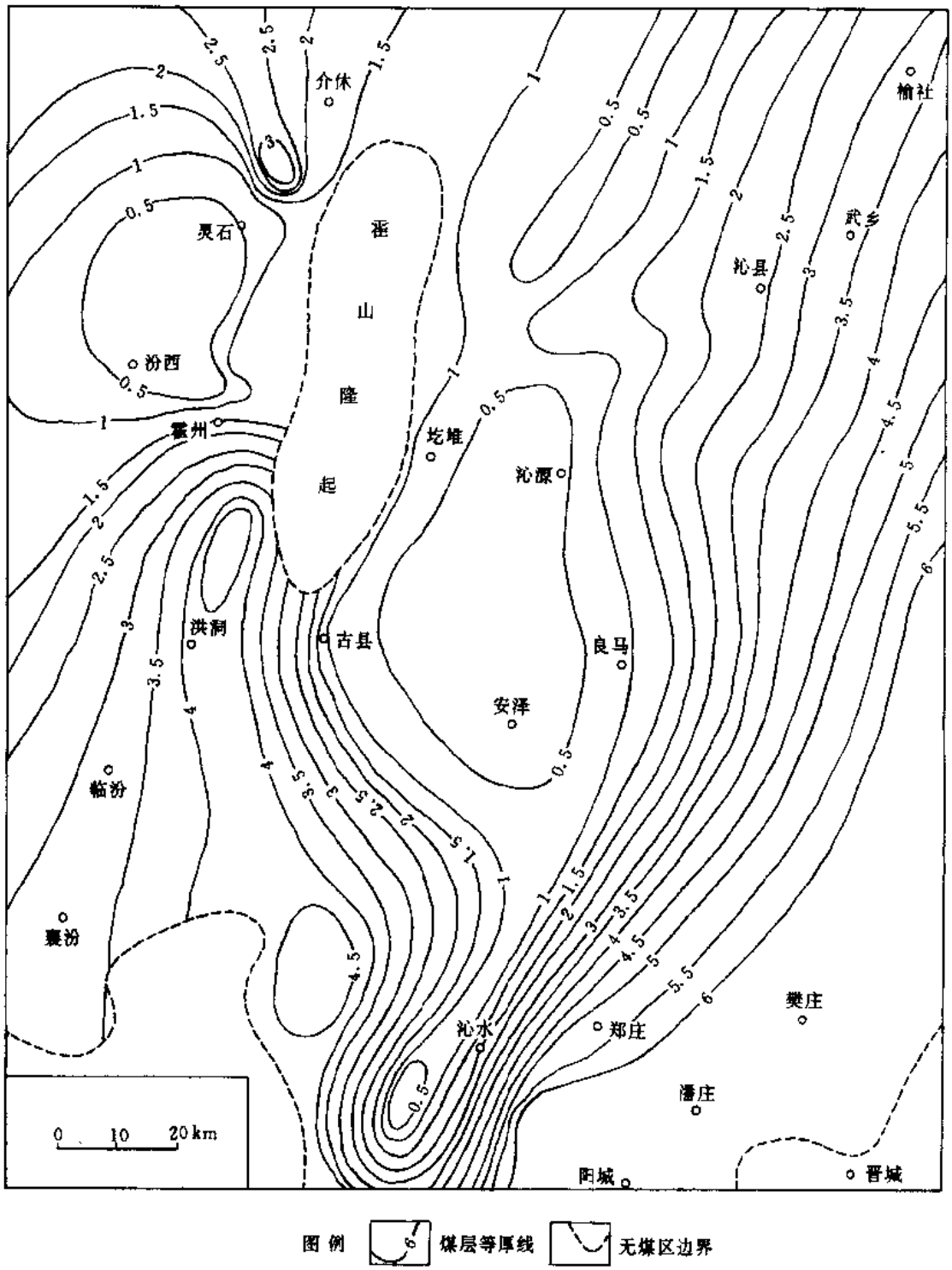


图 5-16 山西南部石炭—二叠系上主煤层净煤总厚度等值线图

潞安矿区称为 15-3 号煤。该煤层厚度一般小于 2 m，仅在西部的洪洞、汾西、霍州之间的地区可达 3 m 以上。煤层顶板岩性主要为细砂岩和粉砂岩，在本区中部古县屯堆和东部潞安 3064 孔之间为泥岩(程保洲，1992)。

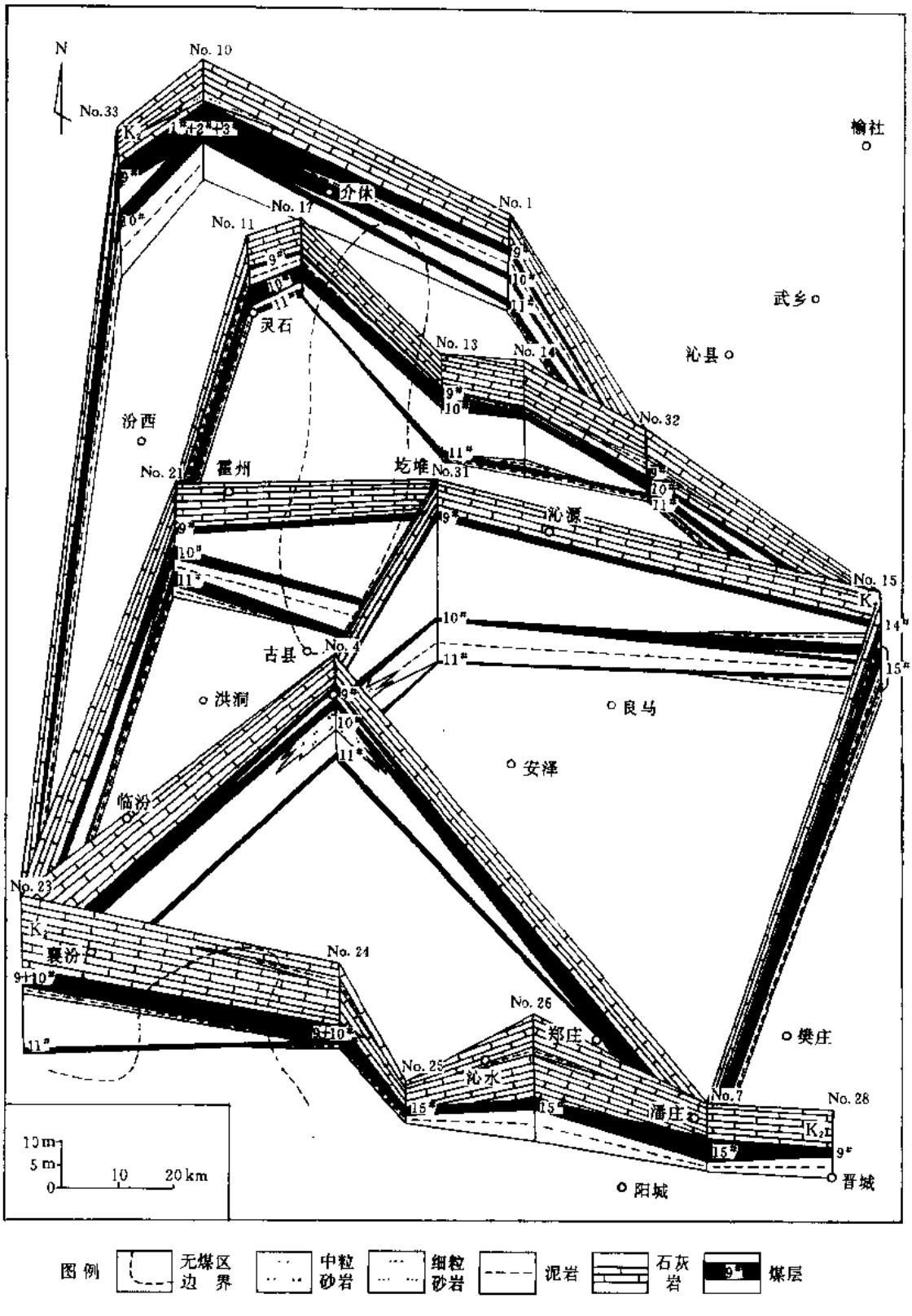


图 5-17　山西南部石炭—二叠系下主煤层煤体形态示意图

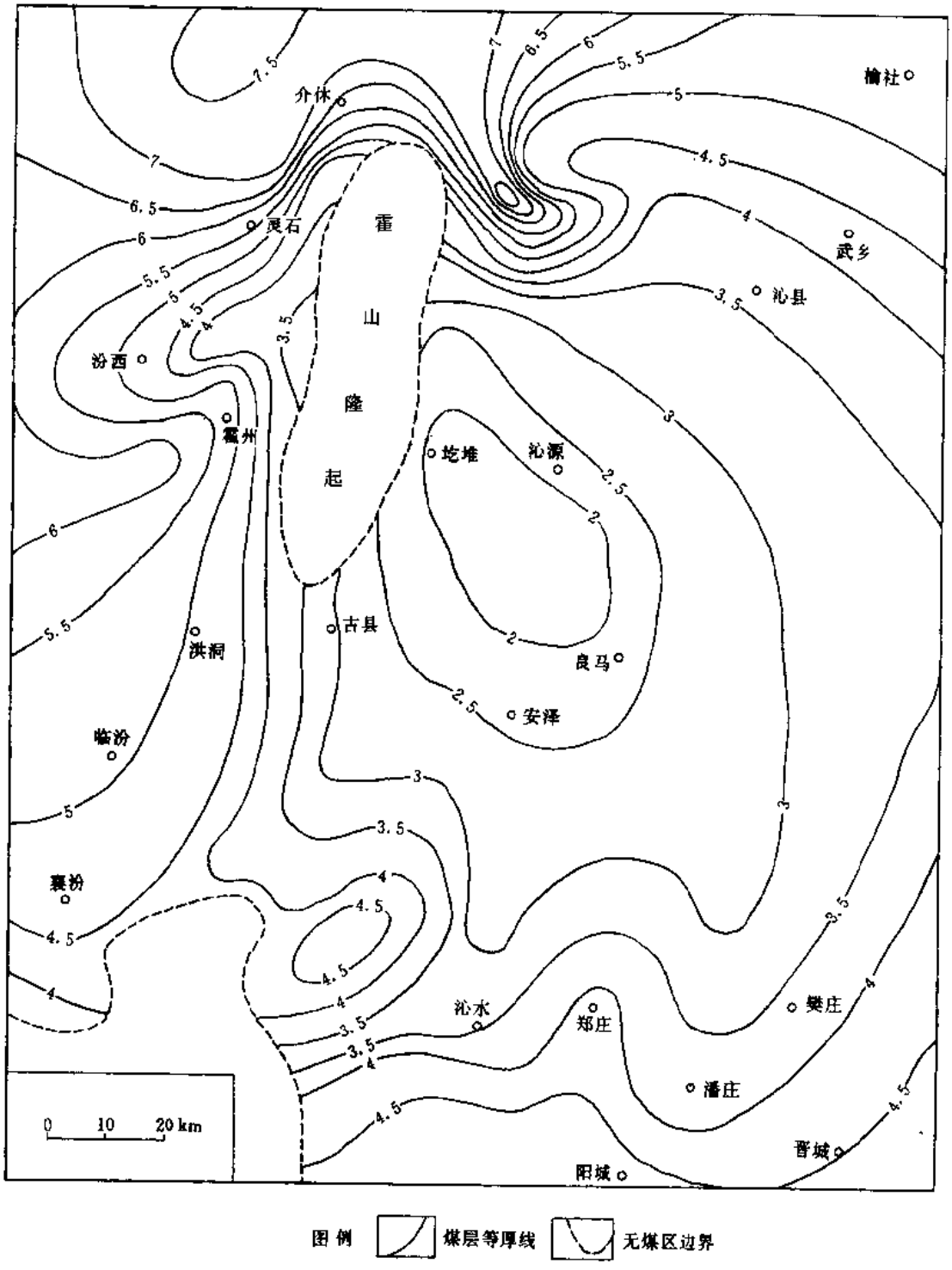


图 5-18　山西南部石炭—二叠系下主煤层净煤总厚度等值线图

第四节　煤层气的有利储盖类型

煤储层储集性能和盖层封盖性能的含义是什么、用什么参数来表达?储盖层类型的定量

指标为多少？本节将在上面对大量地质资料和测试数据进行综合分析的基础上对这些问题进行探讨。

一 煤储层的储集性能及其类型

煤层气在煤储层中主要以吸附状态存在，吸附性能是其作为储层的前提条件，可用代表理论饱和吸附量的兰氏体积加以衡量。然而，不能简单地认为饱和吸附量越大煤储层的吸附性能就越好，原因有二：第一，饱和吸附量越大，煤层达到饱和吸附越困难，煤层气可采性越差；第二，所有煤级中尽管焦煤的兰氏体积(干基)最小，但也在实际开采下限以上。因此，吸附性的好坏主要取决于煤层达到饱和吸附的难易程度，可用理论饱和系数(SI)定量表达：

$$SI = \frac{G}{a}$$

式中：G 是可供煤层吸附的气体总量，考虑到本区高煤级煤在煤化作用期间都经历了二次生气作用，故采用有效阶段生气率值(表 3-7)；a 为煤层最大饱和吸附量，无实测值时取现今煤级对应的经验值。SI 值越大，储层吸附性能越好；反之则差。

煤储层吸附能力最终取决于煤的孔比表面积，两者互呈正相关关系。孔比表面积则是煤级的函数，并与 SI 呈负相关关系。由此，引进孔比表面积系数(BI)：

BI = 孔比表面积($10^{-3}m^2/g$) × 镜质组最大反射率(%)

根据这一关系式，对主煤层的 BI 和 SI 值进行计算，结果见表 5-18。

表 5-18 山西南部石炭—二叠系主煤层 *BI* 和 *SI* 值计算结果

矿区	*SI*		*BI*		矿区	*SI*		*BI*	
	3#	15#	3#	15#		3#	15#	3#	15#
潞安	2.1	2.0	8818	10342	沁源	2.7	2.8	10293	11298
阳城	3.2	3.3	22004	22765	洪洞	1.2	1.4	4892	—
沁水	3.1	3.2	18480	15547	霍州	1.0	0.9	4019	3027
翼城	2.7	3.4	7308	8507	汾西	1.7	2.6	5191	6774

解吸性能主要是指煤储层中煤层气的可解吸程度和解吸速率。我国煤层气的测定采用改进的贝尔塔—吉赛尔法，总含气量由逸散气、自然解吸气、碎前解吸气和碎后解吸气四个部分构成，其中只有前两部分在开发时易于解吸出来，可将其与总含气量之比称为可解吸率(DR)，用以定量表示可解吸程度。山西南部主煤层的 DR 值和 DSR 值详见表 5-19。

表 5-19 山西南部石炭--二叠系主煤层 *DR* 和 *DSR* 值计算结果

矿区	*DR*/%		*DSR*/%		矿区	*DR*/%		*DSR*/%	
	3#	15#	3#	15#		3#	15#	3#	15#
潞安	65	50	22.5	12.0	沁源	55.0	60.0	15.9	19.1
阳城	64.7	71.6	22.5	36.5	洪洞	30	35	5.0	5.3
沁水	65.0	70.0	47.1	30.0	霍州	35	40	5.7	4.0
翼城	60	55	21.7	15.9	汾西	50	55	8.9	11.0

注：*DSR* 为解吸速率。

渗透性主要取决于煤基质孔隙系统和割理裂隙系统，实验室所测渗透率主要来自基质渗透率。因此，在无试井渗透率数据的条件下，对割理渗透率只能参考割理裂隙发育特征大致估量。研究区主煤层割理裂隙系统发育特征与"基质渗透率"详见表 5-1、表 5-2 和表 5-11。煤储层稳定性可用煤厚变异系数(HI)和煤层分岔指数(FI)定量评价：

$$HI = \frac{\delta}{\overline{H}} \qquad FI = \sqrt{\frac{1}{n-i}\sum_{i=1}^{n}(M_i - 1)^2}$$

式中 δ——煤厚标准差；

$\overline{H}$——平均净煤厚度；

M_i——某一地点主煤层分层数目；

n——统计点数。

表 5-20 给出了本区主煤层的几何特征参数取值。显然，FI 越大，煤层就越不稳定，分岔尖灭的频度也越大。

根据上述四类参数，参考国外储层评价标准并结合研究区实际情况，将山西南部煤储层划分为有利储层、过渡储层和不利储层(表 5-21)。

表 5-20　　山西南部石炭—二叠系主煤层的几何特征

矿区	$\overline{H}$/m		HI		FI		矿区	$\overline{H}$/m		HI		FI	
	3#	15#	3#	15#	3#	15#		3#	15#	3#	15#	3#	15#
潞安	6.0	2.5	0.9	0.5	0	3.2	沁源	1.0	2.7	0.5	2.6	0.7	1.4
阳城	6.5	3.0	2.4	1.3	0	0.3	洪洞	4.5	5.0	1.2	0.6	0.9	2.1
沁水	2.5	2.0	1.7	0.7	0.4	0.6	霍州	2.5	4.5	0.8	1.0	0.5	2.4
翼城	4.5	4.0	1.0	0.9	1.1	0.2	汾西	2.0	6.0	1.1	1.4	0.4	2.7

表 5-21　　山西南部石炭—二叠系煤储层分类

煤储层类型	吸附性能		解吸性能				几何特征			渗透率 /$10^{-3}\mu m$
	SI	BI	DR/%	DSR/%	V_t	Dv	$\overline{H}$/m	HI	FI	
有利储层	>3.0	>10000	>60	>20	>400	>20000	>5	1	1	>5
过渡储层	2.0～3.0	5000～10000	40～60	10～20	300～400	500～20000	2～5	1～2	1～3	1～5
不利储层	<2.0	<5000	<40	<10	<300	<500	<2	>2	>3	<1

注：Dv——孔容中值孔径(nm)；V_t　总孔容(cm^3/g)。

二　盖层的封盖性能及其类型

煤层气封盖性能的好坏取决于盖层的岩性、厚度和物性，其中突破压力具有决定性作用。为此，引入盖层突破压力指数(盖层突破压力与煤层排驱压力之比)表示盖层封盖性能的相对好坏。参考常规天然气盖层的评价指标，综合上述影响盖层封盖性能的主要参数，本书将盖层划为屏障层、半屏障层和透气层三类(表 5-22)(王大曾等，1992)。

表 5-22　　山西南部石炭—二叠系煤储层盖层封盖类型分类

盖层类型	盖层突破压力相对指数	孔容中值孔径/nm	岩层渗透率/$10^{-3}\mu m^2$	盖层厚度/m	裂隙发育特征	岩性特征
屏障层	>1	<5000	<0.01	>5	1条/m，多被充填	泥岩、粉砂岩、致密灰岩
半屏障层	0.5～1	1000～5000	0.01～0.1	2～5	1～5条/m，中等充填	砂质页岩、泥质粉砂岩、灰岩
透气层	<0.5	>5000	>0.1	<2	>5条/m，微充填	粉砂岩、砂岩、灰岩

三　有利储盖类型的分布与组合

分析表明：研究区内煤层的有利储层主要分布于阳城矿区以及沁源矿区深部（埋深>600 m），下主煤层的储集性能优于上主煤层；过渡储层分布范围相对较广，如潞安、沁水、翼城，汾西等矿区均以过渡储层为主，其中潞安矿区、沁水矿区上主煤层的储集性能优于下主煤层，翼城、汾西矿区则与此相反；不利储层主要分布于霍州矿区和洪洞矿区，其它矿区仅局部发育。

下主煤层的区域盖层为全区稳定的 K_2 灰岩，仅在阳城矿区表现为屏障层，裂隙发育较差，且以压性和充填为主；在沁源、汾西和沁水矿区的深部表现为半屏障层；潞安、翼城、洪洞、霍州等矿区均表现为透气层，张性裂隙发育，充填程度差。上主煤层区域盖层的封盖性能总体上优于下主煤层的盖层，大部分矿区以半屏障层为主，如阳城、沁水、沁源、汾西、潞安、翼城等矿区；屏障层仅见于阳城矿区的部分地段；透气层多分布于洪洞矿区和霍州矿区，在潞安和沁水矿区也有局部发育。

阳城矿区主要为有利储层—屏障层组合，对于煤层气聚集为最佳匹配关系；沁源矿区以有利储层—半屏障层、过渡储层—半屏障层组合为主，储盖层匹配关系相对较好；沁水、潞安、翼城、汾西矿区以过渡储层—半屏障层、过渡储层—透气层组合为主，储盖层匹配关系相对较差；霍州、洪洞矿区主要发育不利储层—透气层组合，储盖层匹配关系最差。

从煤层储集性能和盖层封盖性能的角度分析，在研究区范围内，阳城矿区为煤层气聚集最有利地区，沁源矿区为较有利地区。

第六章　煤层含气性分析与预测

煤层含气性包括煤层气的含量、组成、含气梯度、含气饱和度、资源丰度及其时空分布特征。它们是构成煤层气藏的基本要素，也是煤层气资源及其开采地质条件评价的首要研究内容。本章从总结推定区主煤层含气性规律入手，分析了推断区和预测区主煤层的含气性，评价了部分矿区或井田煤层气的可采潜势，并对某些主要地质因素的控气作用特征进行了初步探讨。

第一节　推定区煤层含气性分布

煤层气推定区在地质控制程度上具有两方面特征：一是进行过普查以上的煤田地质勘探工作，对煤层气基本地质条件已有较详细了解；二是煤层含气量实测资料比较丰富，其含气性规律基本清楚（秦勇等，1997）。山西南部煤层气推定区包括汾孝矿区、霍州矿区、沁源矿区、屯留井田以及阳城矿区（特别是其中的樊庄、潘1和潘2三个井田）。

一　煤层含气性区域分布

已有的207个钻孔煤芯样品的解吸数据表明，山西南部推定区埋深在800 m以上的石炭—二叠系主煤层的含气性有如下特点：

第一，含气量呈现出“南高北低、东高西低、东南部最高”的总体展布格局（图6-1，图6-2），煤层气中甲烷浓度的分布趋势与这一规律基本一致。平均含气量在东南部的潘1井田为17.02 m^3/t（无水基，下同），潘2井田为15.90 m^3/t，樊庄井田为13.83 m^3/t，向北至沁源矿区降为4.75 m^3/t，向西至霍州和汾孝矿区分别仅为4.91 m^3/t和4.00 m^3/t。甲烷平均浓度在潘庄—樊庄一带大于93%，在沁源矿区为47%，在霍州和汾西一带分别降至17%和21%。这种特征与煤级的区域分布格局是一致的，而与平均取样深度没有直接关系。换言之，煤级越高，含气性越好。

第二，含气性具有“东西分区、上下分层”的特征。这种特征同样与煤层平均埋深没有关系（表6-1，表6-2）。在东部的沁水盆地，无论总含气量高低如何，下主煤层的含气量均显著高于上主煤层，且煤级越高两煤层含气量的差别越大，但甲烷浓度却没有明显差异。西部霍州—汾西一带却与东区相反，下主煤层含气量小于上主煤层。显而易见，含气性不仅具有“区控”特征，而且具有“层控”性质。这些特征一方面与沉积控气作用和热演化控气作用有关，另一方面可能暗示了构造因素甚至水文地质条件的重要影响。

第三，平均含气量的高低与煤级和灰分产率之间的关系十分密切（图6-3）。随煤级增高含气量增大，但其增大趋势是不均一的。在挥发分产率大于15%（约相当于本区煤镜质组反射率为1.5%）的阶段，含气量增大缓慢或几乎没有增加；挥发分产率低于15%之后，含气量急剧增长，并在挥发分产率为6%～9%之间（无烟煤初期阶段）达到高峰。灰分产率增高含

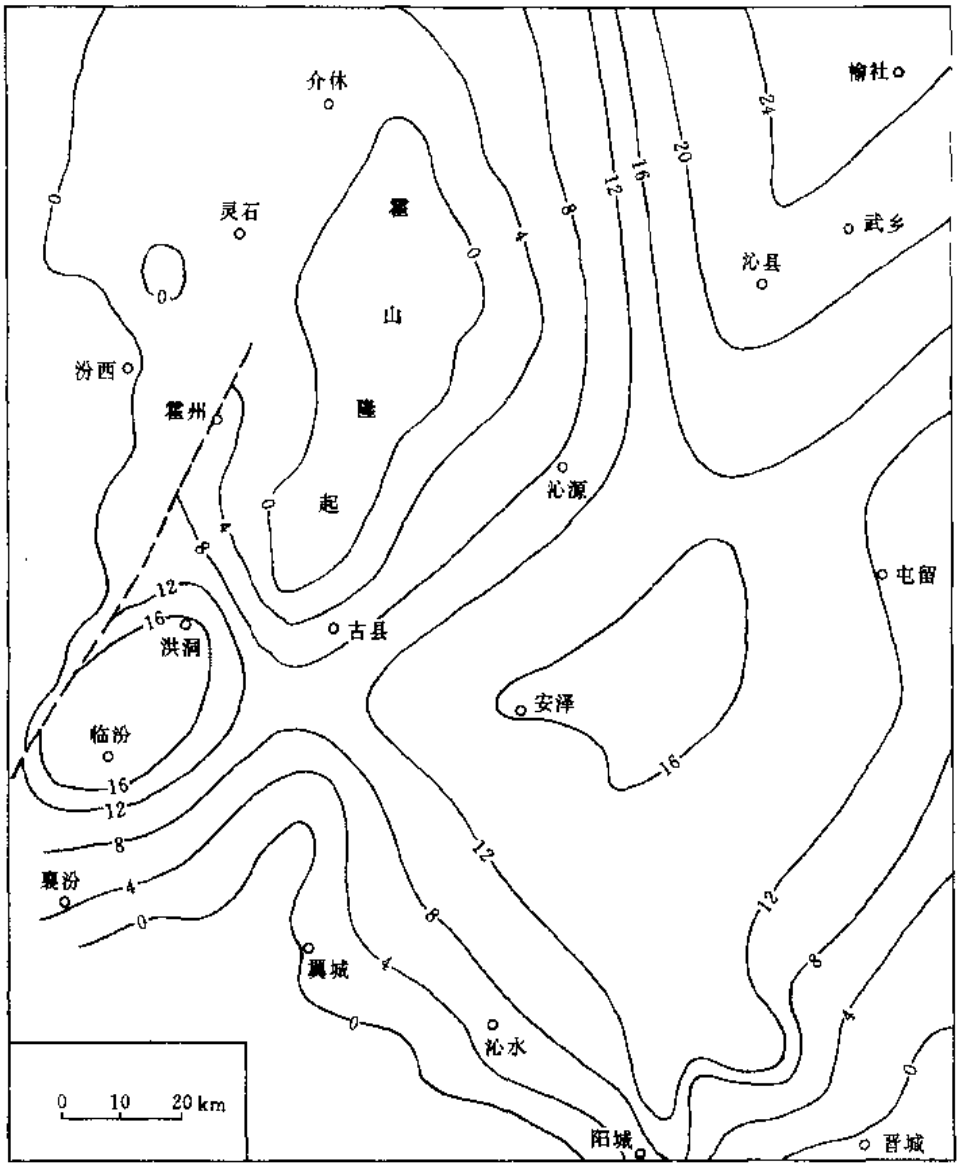


图 6-1 山西南部石炭—二叠系上主煤层含气量等值线图

表 6-1 山西南部推定区石炭--二叠系主煤层含气量统计表

矿区或井田	上主煤层含气量/$m^3 \cdot t^{-1}$			下主煤层含气量/$m^3 \cdot t^{-1}$		
	最大含量	最小含量	平均含量	最大含量	最小含量	平均含量
汾孝矿区	6.75	1.50	4.13	5.26	2.83	3.92
霍州矿区	15.92	0.07	5.59	14.51	0.02	3.91
沁源矿区	10.41	1.68	4.30	8.14	2.27	4.93
樊庄井田	17.77	8.61	13.44	21.00	8.49	14.41
潘 1 井田	25.74	4.10	12.26	38.70	9.56	21.00
潘 2 井田	24.44	7.17	14.67	37.93	9.85	20.01
屯留井田	20.69	4.11	12.12	19.90	3.47	11.31

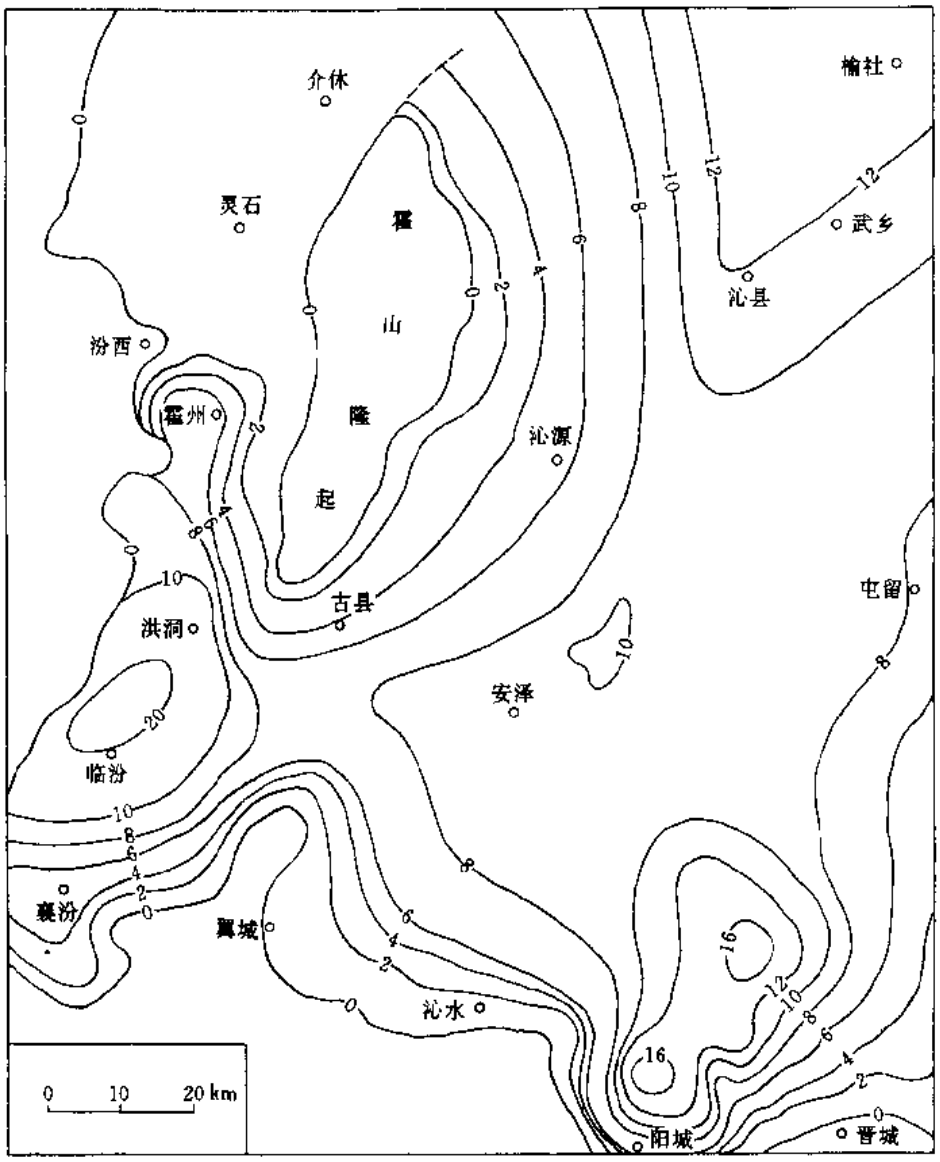


图 6-2 山西南部石炭—二叠系下主煤层含气量等值线图

表 6-2 山西南部推定区石炭—二叠系主煤层甲烷浓度统计表

矿区或井田	上主煤层甲烷浓度/%			下主煤层甲烷浓度/%		
	最大浓度	最小浓度	平均浓度	最大浓度	最小浓度	平均浓度
汾孝矿区	32	1	17	37	12	24
霍州矿区	57	0	22	38	0	7
沁源矿区	85	19	49	96	3	46
樊庄井田	99	71	94	100	86	93
潘 1 井田	100	78	96	100	82	97
潘 2 井田	100	72	95	100	60	93
屯留井田	98	33	75	96	30	67

气量降低。在含气高峰阶段挥发分产率相同的条件下，灰分每增加10%，平均含气量约降低4 m^3/t左右。在含气高峰阶段，如果煤级和灰分产率相同，则上主煤层的平均含气量显著低于下主煤层。含气高峰阶段的起始煤级一般滞后于生气高峰起始煤级，两者之间的差异可能主要源于两个方面的原因：首先是受煤级、灰分产率和煤岩成分等所控制的煤的孔隙性特征的影响；其次是二次生烃作用的强烈影响。

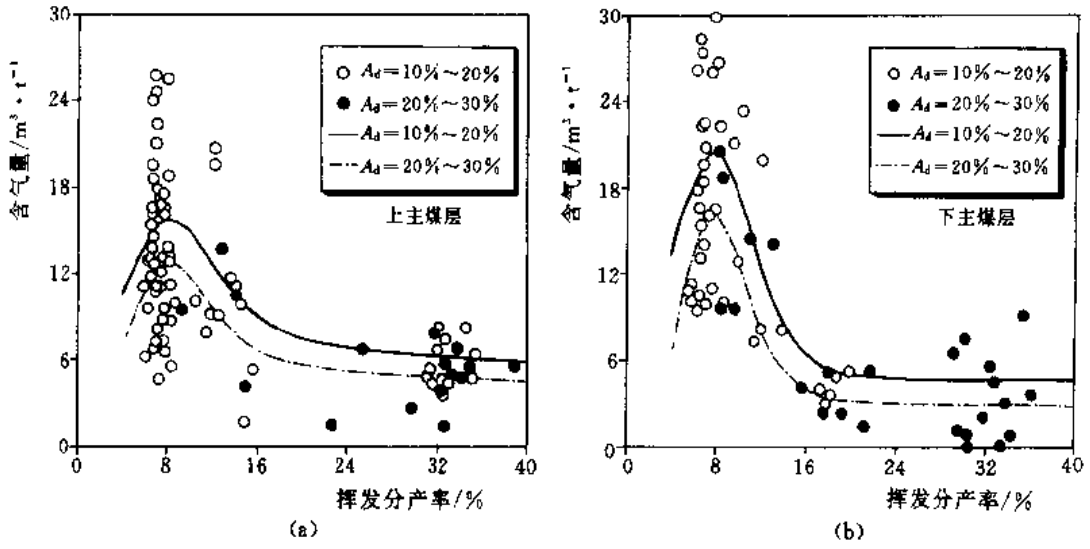


图 6-3　山西南部推定区石炭—二叠系主煤层含气量—挥发分产率—灰分产率关系图

(a) 上主煤层　(b) 下主煤层

根据含气性的上述主要特征，结合含气量、甲烷浓度和甲烷含量之间的相互关系，可将山西南部石炭—二叠系主煤层的平均含气性划分为三类六型(图 6-4)。三类包括富甲烷类

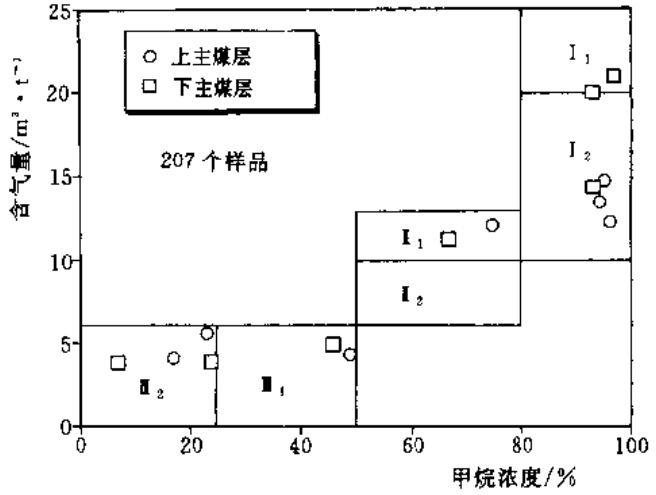


图 6-4　山西南部石炭—二叠系主煤层平均含气性类型图解

I_1——极富甲烷型；I_2——较富甲烷型；II_1——含甲烷型；

II_2——较含甲烷型；III_1——较贫甲烷型；III_2——极贫甲烷型

(Ⅰ)、含甲烷类(Ⅱ)和贫甲烷类(Ⅲ),六型分别为极富甲烷型($Ⅰ_1$)、较富甲烷型($Ⅰ_2$)、富含甲烷型($Ⅱ_1$)、较含甲烷型($Ⅱ_2$)、较贫甲烷型($Ⅲ_1$)和极贫甲烷型($Ⅲ_2$)。有关矿区或井田的平均含气性类型及地域、层域分布状况见表 6-3 所示。

表 6-3　　山西南部石炭—二叠系主煤层平均含气性类型及其分布

类别		含气性特征			推定区		推断区	预测区
类	型	V_G	CH_4	V_{CH_4}	上主煤层	下主煤层		
富甲烷类煤层	极富	>20	>80	>16	—	潘庄	—	沁县—武乡
	较富	10~20	>80	8~16	潘庄,樊庄	樊庄	—	临汾—洪洞
含甲烷类煤层	富含	10~13	50~80	5~10	屯留	屯留	沁水	安泽
	较含	6~10		3~8	—	—		临汾—洪洞
贫甲烷类煤层	较贫	<6	25~50	<1.5~3	沁源		冀城	临汾—洪洞
	极贫	<6	<25	<1.5	霍州,汾孝		—	

注:V_G——含气量,m^3/t;CH_4——甲烷浓度,%;V_{CH_4}——甲烷含量,m^3/t

就可采性和商业性而言,贫甲烷类煤层已失去煤层气资源评价的价值。然而,应予指出的是,某些矿区尽管其平均含气性类型较差,但在一定埋藏深度下仍有含气性相对较好的煤层赋存,对这部分煤层中的煤层气可以考虑予以进一步评价。另外,表 6-3 中推断—预测区的判别依据将在后面的有关内容中加以阐述。

二　煤层含气梯度与煤层气风化带深度

含气梯度系指同一煤层的含气性随埋藏深度增大而变化的定量特征。它是确定推断—预测区煤层含气性的重要标志。含气梯度通常采用每百米的含气性变化幅度予以表示,例如含气量梯度($m^3 \cdot t^{-1}/100m$)、甲烷浓度梯度(%/100m)、含气饱和度梯度(%/100m)等。由于山西南部有关资料所限,本书仅对前两种梯度进行讨论。

分析表明,山西南部石炭—二叠系煤层含气性与煤层埋深之间存在一定的规律性,但这种规律并非是线性变化关系,可规纳为以下两种基本变化类型。

第一种类型可称为"指数"变化类型,以霍州、汾孝、沁源等贫甲烷类煤层的矿区为代表。其含气性表现为随深度增大呈指数增高的总体变化趋势;煤层埋深增大到一定深度(突变深度),含气性增大速率发生较为明显的突然变化。在西北部的霍州和汾孝矿区,含气梯度在超过突变深度后明显增大(图 6-5,图 6-6);在东北部的沁源矿区,含气量梯度在超过突变深度后相对增大,但甲烷浓度梯度却相对减小(图 6-7)。不同矿区含气梯度的差异可能起因于煤级、煤田构造(尤其是地层倾角和断裂发育程度)等因素的差别。

不同煤层的含气梯度亦存在一定差别。在一般情况下,下主煤层的含气梯度小于上主煤层。在含气量梯度上这种差别更为明显,可能与煤储层的孔隙性和渗透性特征有关。值得注意的是:尽管"指数"型含气梯度随埋深增大呈现出确定的变化趋势,但梯度与埋深之间的关系在汾孝和霍州矿区并不显著,暗示这些矿区煤层的含气性极大地受到某些非生气和非煤储层物性地质因素的影响;沁源矿区上主煤层含气梯度与埋深之间的相关性显著,这是一种正常的变化特征,但下主煤层显著性水平为临界显著,显然是在一定程度上受到某些非生气和非煤储层物性因素的控制(表 6-4)。

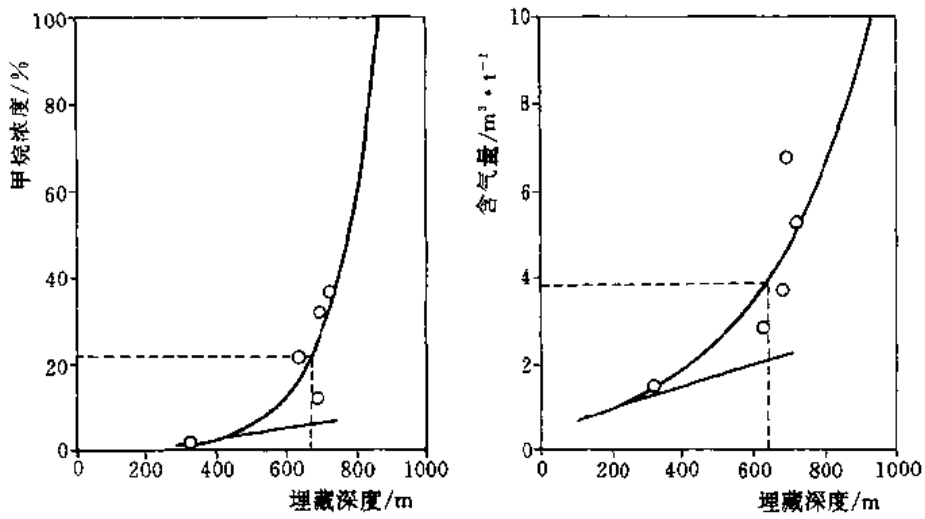


图 6-5 山西南部汾孝矿区石炭--二叠系主煤层含气性与煤层埋深的关系

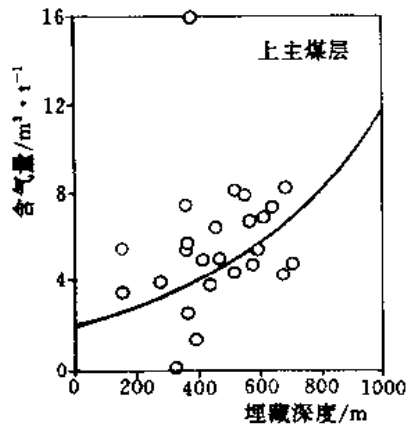
表 6-4 山西南部部分矿区石炭—二叠系主煤层含气性与深度关系的相关性检验

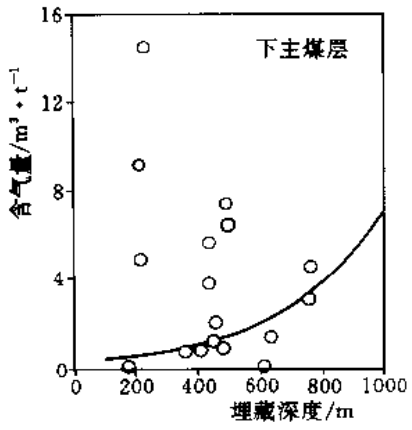
矿区或井田	煤层	自由度 $n-2$	置信度水平/%	临界检验值	深度与甲烷浓度		深度与含气量	
					相关系数	显著性水平	相关系数	显著性水平
汾孝矿区	上+下	3	95	0.8783	0.8048	不显著	0.7679	不显著
霍州矿区	上	23	95	0.3976	0.4016	显著	0.2081	不显著
	下	15	95	0.4821	0.2031	不显著	0.1261	不显著
沁源矿区	上	5	95	0.7545	0.7872	显著	0.7505	临界显著
	下	15	95	0.4821	0.8613	显著	0.4305	临界显著

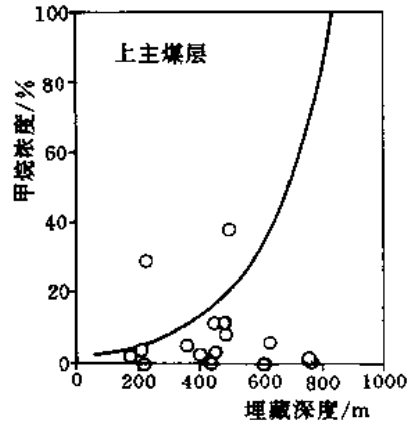
第二种类型表现为“多项式”变化，出现在樊庄、潘庄等富甲烷类煤层地区。随煤层埋深增大，含气性增大到一定程度（埋深到一定深度）又重新减小，含气性由正梯度变为负梯度（图 6-8、图 6-9）。上主煤层与下主煤层含气量极大值所对应的深度差值约为 90 m。这与两煤层之间的间距大致相当，表明上、下主煤层最大含气量出现在同一平面位置，体现出局部构造控气的特征。

在潘 2 井田，山西组主煤层的埋深—含气性关系甚至出现两次这种正、负梯度的转换或波动，显示出更为复杂的变化规律（图 6-10）。同时，含气梯度与煤层层位之间似乎不存在相关关系。显而易见，含气性与煤层埋深之间的这种关系与井田局部构造特征之间具有某种密切联系，并可能暗示煤层气在煤层中发生了显著运移和后生富集，有可能为地质选区评价中有利地点（sweet spot）的预测提供重要的理论依据。

进一步分析发现，含气量与甲烷浓度之间尽管总体上表现为正相关趋势，但变化梯度和相关显著性水平的分布同样也具有地域性和层域性。从汾孝、霍州→沁源→樊庄→潘庄方向，层域性差别逐渐变小，至潘庄井田甚至基本消失（图 6-11）。这一特征再次暗示，含气性的主要控制因素及其影响程度在地域和层域上是不同的，研究其规律和揭示其实质，必将有助于煤层气有利勘采区段的预测、优选和评价。查明煤层气风化带的地域、层域分布规律以及探讨其地质控制因素，是其中的重要工作之一。







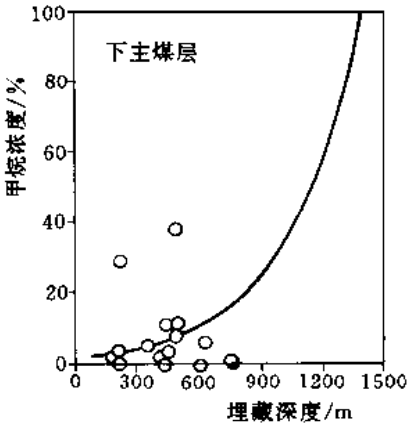
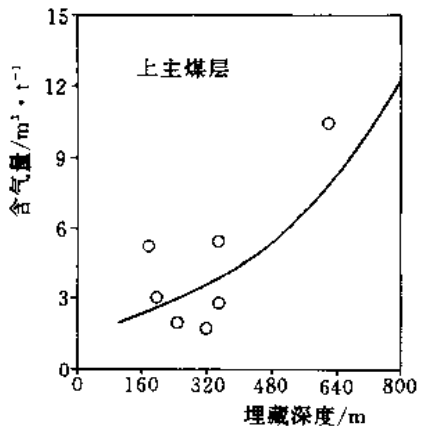
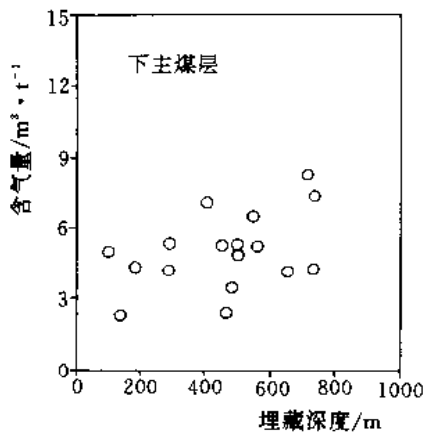
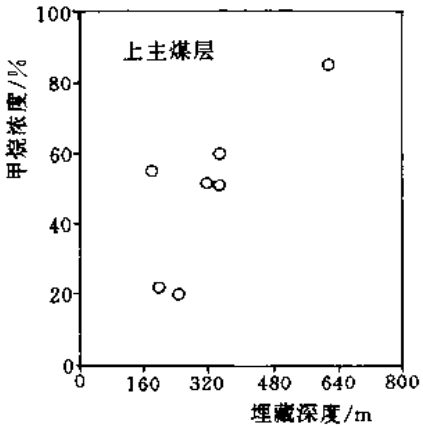


图 6-6　山西南部霍州矿区石炭—二叠系主煤层含气性与煤层埋深的关系







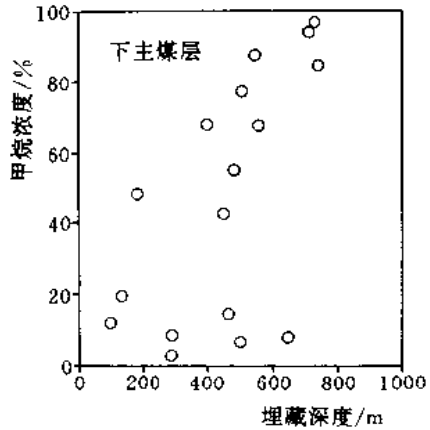
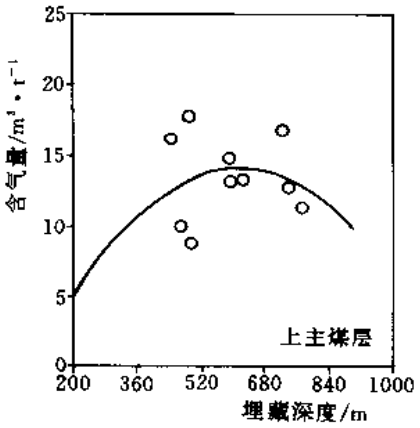
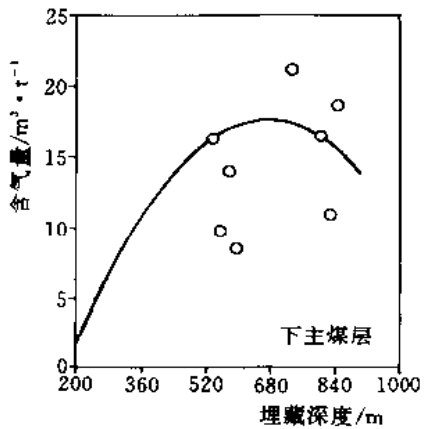
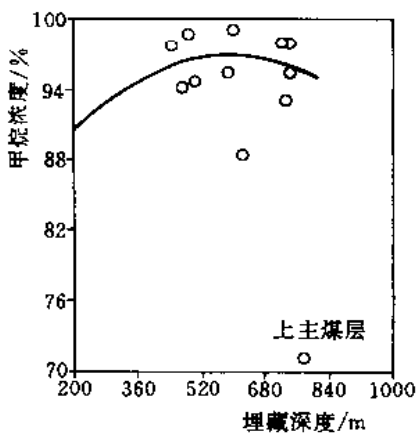


图 6-7　山西南部沁源矿区石炭—二叠系主煤层含气性与煤层埋深的关系







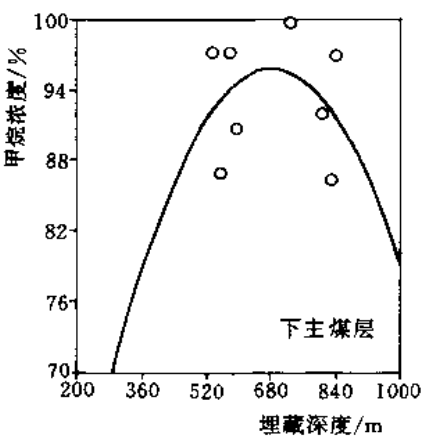
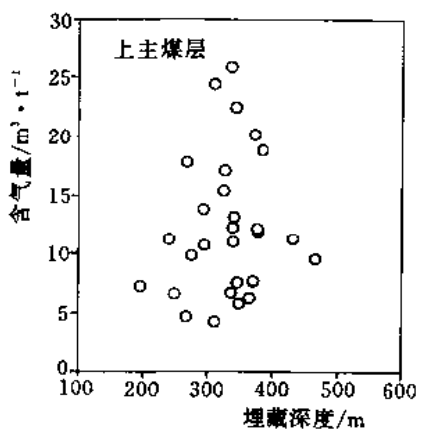
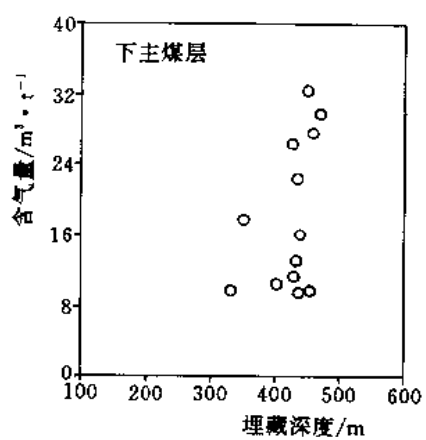
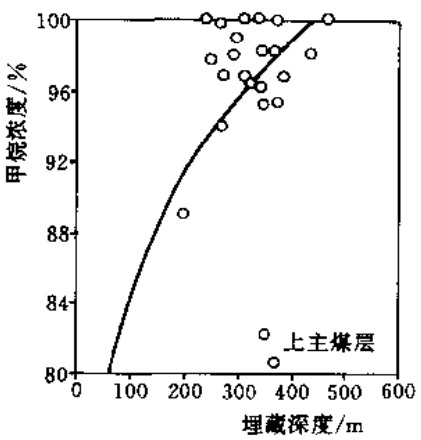


图 6-8　山西南部樊庄井田石炭- 二叠系主煤层含气性与煤层埋深的关系







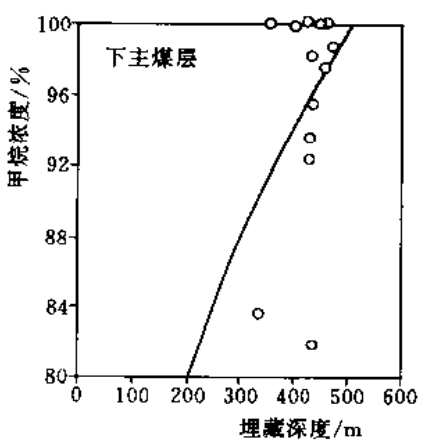
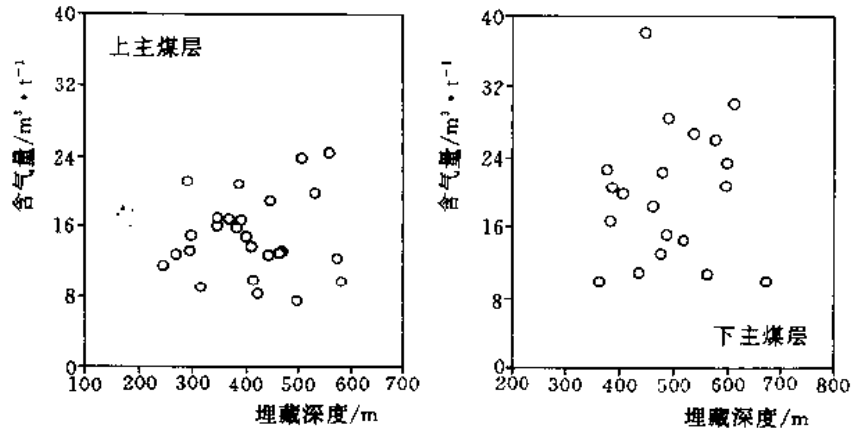


图 6-9　山西南部潘 1 井田石炭- 二叠系主煤层含气性与煤层埋深的关系



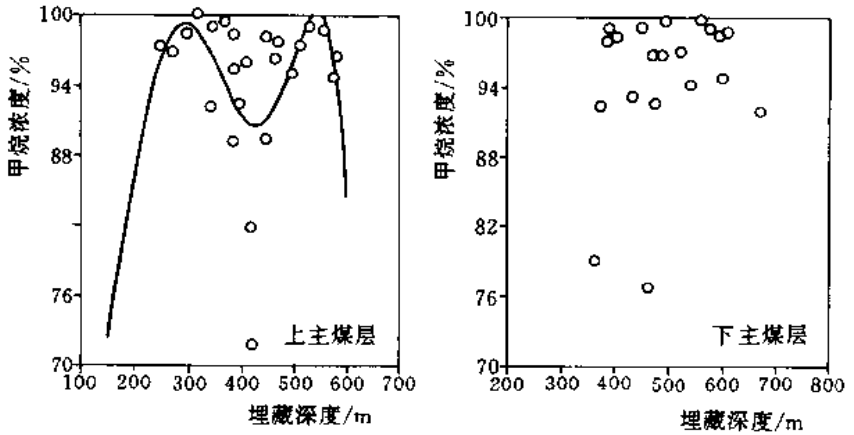


图 6-10　山西南部潘 2 井田石炭　二叠系主煤层含气性与煤层埋深的关系

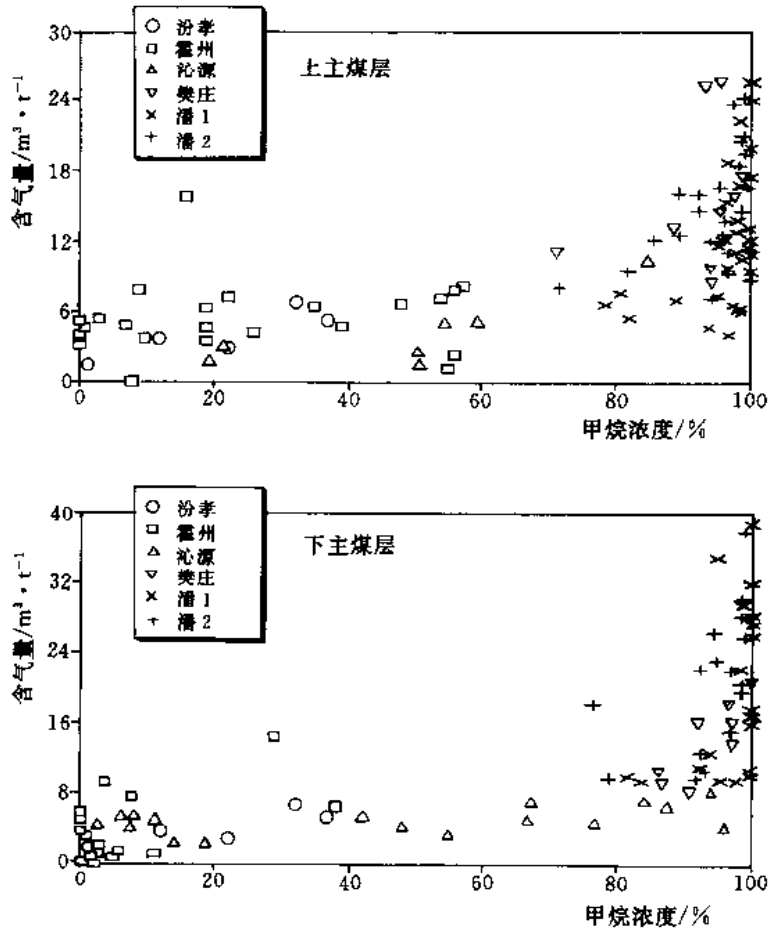


图 6-11　山西南部石炭—二叠系主煤层甲烷浓度与含气量之间的关系

通常以甲烷浓度作为煤层气风化带的划分标志，将甲烷浓度不足80%的地带视为煤层气风化带。换言之，煤层气中甲烷浓度80%所对应的煤层埋深即被定义为煤层气风化带深度的下限。采用这一标准，根据甲烷浓度与煤层埋深之间的相关关系（见图6-5～图6-11），可确定出山西南部不同地区和不同煤层的煤层气风化带深度下限。

本区煤层气风化带具有区控和层控的分布特征。风化带深度在汾孝、霍州矿区一带大于790 m，在沁源矿区为490～600 m，在樊庄井田为80～270 m，在潘1井田为70～210 m，在潘2井田为180～190 m，而且下主煤层煤层气风化带深度普遍大于上主煤层（表6-5）。这种分布特征与含气量和甲烷浓度关系的分布规律高度一致，从汾孝、霍州→沁源→樊庄→潘庄，不仅煤层气风化带深度明显变浅，而且层域差别逐渐变小并最终基本上消失，即使在煤级较高、风化带深度较大的成庄井田也是如此。由此可见，影响山西南部石炭—二叠系煤层气风化带分布的主要因素应是沉积特征、煤级和构造特征。这些因素通过对储盖层物性、水文地质条件、地层倾角等的影响控制煤层气的吸附—解吸、运移富集（逸散）和气—水交换作用，进而控制着煤层气风化带深度的地域和层域分布。

表6-5　　山西南部石炭—二叠系主煤层煤层气风化带深度

地　区	上主煤层/m		下主煤层/m	
	拟合深度	采用深度	拟合深度	采用深度
汾孝矿区	836	830	836	830
霍州矿区	791	790	1000	1000
沁源矿区	491	490	600	600
樊庄井田	78	80	275	270
潘1井田	63	70	207	210
潘2井田	181	180	190	190
成庄井田	480	480	513	510

注：① 汾孝矿区数据过少，上、下煤层合并进行拟合。

② 成庄井田采用曾勇、秦勇等（1994）数据。

应当指出，尽管某些地区主煤层在总体上属于含气性极差的贫甲烷类型，但在煤层气风化带一定深度以下的地层中仍有含气性相对较好的煤层。例如，霍州矿区和沁源矿区主煤层总体上为贫甲烷煤层，但霍州矿区－600 m以下的山西组煤层以及沁源矿区－240 m以下的山西组煤层和－300 m以下的太原组煤层，甲烷含量均在4.0 m^3/t以上，在煤层气资源量计算中似应对这部分煤层加以考虑。显然，汾孝矿区石炭—二叠系煤层和霍州矿区太原组煤层由于其现今最大埋深范围内均为极贫甲烷类煤层，因而失去了资源量计算的价值。

第二节　推断区和预测区煤层含气性分析

推断区系指进行过煤田普查等级以上的勘探工作、拥有较为详细的煤层和煤质实测资料但缺乏含气性实测资料的地区。预测区则是指既缺乏煤层和煤质实际数据、又无含气性实测资料的地区（秦勇等，1997）。在山西南部，推断区面积和预测区面积分别约占全区总面积

的10%和75%。对于这些地区煤层的含气性，必须根据具体的地质背景、采用适当的方法加以预测。

一 含气性预测方法

煤层含气性预测的首要工作是进行地质条件类比，进而选用合适的方法进行预测。因此，预测的关键是要选择一个合适的类比参照区。在本书中，基于对不同地区煤层气基本地质条件的分析和类比，分别采用含气梯度法、煤级—灰分—含气性法和综合分析法对有关地区的煤层含气性加以预测和评价。

1. 含气梯度法

含气梯度法主要适用于同一构造单元中的深部外推预测区或不同构造单元中基本地质条件相近的预测区，是可靠性较高的预测方法之一。其应用的理论基础是含气性主要受控于煤层埋深。在山西南部，应用含气梯度法的前提条件是：同一构造单元中已有浅部(参照区)含气性资料的深部地区；参照区含气性资料较为丰富、含气梯度明显且深度与含气性关系的离散性较小；参照区与预测区同属的构造单元构造简单，总体上表现为单斜构造；同一构造单元中煤级大致相当或变化幅度较小。相比之下，沁源矿区和潞安矿区屯留井田可分别作为所在构造单元中煤层含气性预测的参照地区。换言之，安泽、武乡—阳城构造带中北段等预测区的煤层含气性可用含气梯度法进行预测。

2. 煤级—灰分—含气性法

这是一种预测推断区煤层含气性的基本方法，对于已经进行过煤级和煤质预测的预测区，也可考虑应用这种方法。煤级—灰分—含气性法应用的理论基础，是煤层含气性主要受控于煤级和煤质特征，故其首要前提条件是推断(预测)区的煤级和煤质特征可以与参照区对比，或者根据某些参照区资料可以内插。对于具备应用含气梯度法条件的地区，应尽量采用梯度预测法，不具备其条件的地区再考虑应用煤级—灰分—含气性法。根据地质条件类比结果，拟对沁水—翼城、武乡—阳城构造带中北段等推断区或预测区的煤层含气性采用煤级—灰分—含气性法进行预测。

3. 综合分析法

综合分析法是在基本上没有煤层煤质和含气性实测资料的条件下预测煤层含气性的唯一方法。该法通过对预测区现代构造特点、煤层赋存特征和煤层埋藏—热演化—生烃—烃类保存历史的分析，结合与不同含气性推定(推断)区地质条件的类比，确定预测区煤层含气性类别，进而预测其含气性特征。对于临汾—洪洞地区所在的临汾盆地，拟采用综合分析法预测不同埋藏深度煤层的含气性。

从广义上来说，所有的地质预测方法都内含着一定程度的综合地质分析，各种方法之间均存在某些不可分离的、相辅相成的关系。例如，含气梯度法的应用前提是要进行构造、煤级等的分析和对比，煤级—灰分—含气性法往往要考虑其它控气地质因素的影响而对预测结果加以修正，综合分析法则必须以相关地区煤层的含气性、煤级、煤质等因素做辅助对比。因此，在同一地区煤层含气性的预测中，往往在以某种方法为主的基础上，采用多种方法进行综合预测。

山西南部推定区石炭—二叠系主煤层含气性与埋深及含气性与煤级和煤质之间的平均数量关系均列入表6-6和表6-7中，以便于即将开展的煤层含气性预测工作。此外，潞安矿区屯留井田的煤层埋深为400～650 m，含气量为8～20 m^3/t煤，甲烷浓度为40%～97%，

相应的含气量梯度为 4.8 $m^3 \cdot t^{-1}/100m$，煤层气风化带的下限深度估计在 500 m 左右。

表 6-6　　山西南部推定区石炭—二叠系主煤层平均含气性垂向分布

矿区或井田	煤层	含气性参数	不同埋藏深度煤层的含气性							
			200 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	1000 m
汾孝	上下主煤层	含气量	0.36	1.31	1.81	2.47	3.43	4.75	6.52	—
		甲烷浓度	—	1.14	2.52	5.62	12.4	27.2	60.6	—
		甲烷含量	0.00	0.02	0.05	0.14	0.43	1.29	3.95	—
霍州	上主煤层	含气量	2.75	3.31	3.97	4.75	5.71	6.82	8.16	—
		甲烷浓度	4.70	7.65	12.4	20.2	32.1	52.0	83.2	—
		甲烷含量	0.13	0.25	0.49	0.96	1.83	3.56	6.79	—
	下主煤层	含气量	0.56	0.77	1.07	1.41	2.04	2.80	3.85	—
		甲烷浓度	3.07	4.13	5.54	7.43	9.97	13.4	17.9	—
		甲烷含量	0.02	0.03	0.59	0.11	2.03	0.38	0.69	—
沁源	上主煤层	含气量	2.56	3.34	4.35	5.65	7.35	9.56	12.4	—
		甲烷浓度	22	35	65	77	85	92	100	—
		甲烷含量	0.56	1.17	2.83	4.92	6.25	8.80	12.4	—
	下主煤层	含气量	3.89	4.17	4.47	4.82	5.18	5.56	6.10	—
		甲烷浓度	14	32	53	66	80	85	97	—
		甲烷含量	0.55	1.33	2.37	3.18	4.14	4.73	5.72	—
樊庄	上主煤层	含气量	4.78	8.72	11.6	13.4	14.1	13.8	—	—
		甲烷浓度	90	94	96	96	95	95	—	—
		甲烷含量	4.30	8.20	11.1	12.9	13.4	12.7	—	—
	下主煤层	含气量	1.67	7.26	12.4	15.6	17.3	17.6	16.4	—
		甲烷浓度	56	71	82	95	96	94	91	—
		甲烷含量	0.94	5.16	10.2	14.8	16.6	16.5	14.9	—
潘1	上主煤层	含气量	7.50	14.5	12.5	10.0	—	—	—	—
		甲烷浓度	91	96	99	100	—	—	—	—
		甲烷含量	7	14	12	10	—	—	—	—
	下主煤层	含气量	6	8	20	33	—	—	—	—
		甲烷浓度	79	88	94	97	—	—	—	—
		甲烷含量	5	7	19	32	—	—	—	—
潘2	上主煤层	含气量	9	13	16	16	13.5	—	—	—
		甲烷浓度	87	98	95	97	95		—	—
		甲烷含量	8	13	15	16	13	—	—	—
	下主煤层	含气量	12	15.5	18	24	20	16	—	—
		甲烷浓度	85	91	96	97	95	92	—	—
		甲烷含量	10	14	17	23	19	15	—	—

注：含气量，m^3/t；甲烷浓度，%；甲烷含量，m^3/t。

表 6-7　山西南部推定区石炭—二叠系主煤层平均含气性与平均煤级、煤质特征的关系

矿区或井田	上主煤层					下主煤层				
	V_{daf} /%	A_d /%	R_o /%	含气量 /m³·t⁻¹	甲烷浓度 /%	V_{daf} /%	A_d /%	R_o /%	含气量 /m³·t⁻¹	甲烷浓度 /%
汾孝矿区	24.02	18.54	1.33	4.13	17	19.13	19.96	1.59	3.92	24
霍州矿区	33.22	16.53	0.86	5.59	22	32.92	23.21	0.89	3.91	7
沁源矿区	16.14	19.81	1.55	4.30	48	17.41	21.54	1.68	4.93	46
屯留井田	13.26	18.21	1.68	12.12	75	12.39	27.83	1.75	11.31	67
樊庄井田	7.91	14.47	3.39	15.46	94	7.87	16.15	3.42	14.41	93
潘1井田	7.26	14.94	4.09	12.26	96	7.02	16.19	4.11	21.00	97
潘2井田	6.89	13.99	4.20	14.67	95	7.59	15.67	4.01	19.33	93

二　沁水盆地深部预测区

沁水盆地位于研究区东部，其深部预测区系指该盆地中煤层埋藏深度大于现今煤田地质勘探深度(700～800 m)的地区。预测区以向斜盆地 NNE 向主轴为界，分为东、西两翼，每翼总体上均表现为倾角平缓的单斜构造，断裂稀少，发育一系列 NNE 向次级向斜。地表主要出露三叠系，煤层最大埋深约为 1200 m。因此，从埋藏史和现代构造特征来看，煤层气的保存条件良好。然而，盖层岩相的研究结果表明，大致沿盆地向斜主轴方向，上主煤层顶板中发育一套河道相砂岩，致使该煤储层的封盖性变差，煤层气有可能大量逸散，煤层含气性遂变差。

东翼预测区属于武乡　阳城褶皱带。等煤级带在该区中－北段平行于地层走向呈 NNE 向展布，镜质组反射率变化于 1.5%～3.0%之间，由东向西随煤层埋深增大而逐渐增高。等煤级带在该褶皱带南段逐渐转为近 EW 向展布，镜质组反射率由 NE 向 SW 方向从 2.0%增至 3.4%。因此，东翼预测区煤层含气性预测应该分为南、北两个地段进行：中－北段地带以屯留井田为准并参考西翼沁源矿区，采用含气梯度法进行推算；南段含气性可能与樊庄、潘庄井田相似，在一定程度上受局部构造所控制，故不宜采用含气梯度法，可根据屯留井田和樊庄井田各自的平均含气性特征、煤级(表 6-7)以及地段内煤级与埋深的关系，利用煤级—灰分—含气性法予以内插推算。

西翼预测区属于郭道—安泽褶皱带，预测地带分别为沁源矿区以东(沁源东)的煤层深埋区和以南的安泽地区。等煤级带平行于地层走向呈北北东向展布，镜质组反射率分布于 1.6%～3.0%之间，并且由西向东随煤层埋深增大而增高。沁源东预测区煤层埋深为 800～1200 m，根据沁源矿区含气性与深度的规律可以认为，预测区煤层的含气性随深度增大而规律性增高。安泽地区处于沁水盆地主向斜轴由 NNE—SSW 方向转变为近 EW 向的过渡或转折地带，地层平缓，煤层埋深在 700～900 m 之间，变化较小，其含气性预测可以参考与沁源矿区位于同一等高带上的煤层的平均含气性。应当指出，安泽地区主煤层位于现今埋深水平(煤层气逸散带下限)的时间相对较长，煤层气会有一定程度的逸散。但是，该区地层倾角小于沁源东预测区，断裂极不发育，且与阳城等高含气区同位于现代构造应力场中的高应力降地带内(见图 2-14)，这种现代构造特征似有利于煤层气的保存，故其煤层含气性可能好于沁源地区相同埋深水平煤层的含气性。进一步来说，安泽地区－800 m 水平煤层的含气

性至少可相当于沁源地区－900 m 水平煤层的含气性。

基于上述预测依据，对沁水盆地深部煤层的含气性进行定量预测，其含气性与深度关系的预测结果见表 6-8，其平面分布特征反映在图 6-1 和图 6-2 中。

表 6-8　　山西南部沁水盆地深部石炭　二叠系主煤层含气性预测结果

构造单元	预测区	煤层	含气性参数	不同埋藏深度煤层的含气性						平均值
				700 m	800 m	900 m	1000 m	1100 m	1200 m	
郭道—安泽褶皱带	沁源东	上主煤层	含气量	9.56	12.40	15.15	17.30	19.50	--	15
			甲烷含量	8.80	12.40	15.15	17.30	19.50		15
		下主煤层	含气量	5.56	6.10	7.25	8.70	13.45	16.00	10
			甲烷含量	4.73	5.92	7.18	8.70	13.45	16.00	9
	安泽	上主煤层	含气量	12.40	15.15	17.30	—	—	—	15
			甲烷含量	12.40	15.15	17.30	—	--	-	15
		下主煤层	含气量	6.10	7.25	8.70	13.45	—	—	9
			甲烷含量	5.79	7.18	8.70	13.45	—	—	9
武乡—阳城褶皱带	中—北段	上主煤层	含气量	15.16	16.25	17.33	18.42	19.50	—	17
			甲烷含量	14.40	16.25	17.33	18.42	19.50	—	17
		下主煤层	含气量	13.87	14.30	14.72	15.15	15.57	16.00	17
			甲烷含量	—	—	—	—	—	—	—
	南段	上主煤层	含气量	14.10	15.70	17.30	—	—	—	16
			甲烷含量	13.40	15.70	17.30	—	—	—	16
		下主煤层	含气量	8.10	9.88	11.67	13.45	—	—	11
			甲烷含量	—	—	—	—	—	—	—

注：含气量和甲烷含量的单位均为 m^3/t。

三　沁水—翼城推断—预测区

沁水—翼城推断—预测区位于研究区南部，包括已做过煤田地质勘探工作的沁水、翼城矿区（推断区）及其北部没有做过煤田实际工作的预测区。该区呈 NWW—SEE 向展布，总体表现为向 NNE 倾斜的单斜构造，平均倾角为 1°左右。预测区南部发育一系列近 EW 向的正断层，断层的倾角为 65°～80°，断距可达 40～200 m，长度一般为 20～40 km，煤层气保存条件较差；中部和北部断裂稀少，发育低缓的次级褶皱，褶皱两翼的倾角为 8°～10°，具备煤层气保存和运移富集的局部构造条件；西北部的翼城矿区发育较为密集的高角度正断层，按走向分为 NNW—SSE 向和近 SN 向两组，前组断层最大断距超过 300 m，后组断层断距不足 150 m，煤层气保存的构造条件似乎极差。

本区煤层的构造—埋藏—热演化历史与阳城矿区相似，生气强度较大，特别是本区的西段，靠近塔儿山—双峰山燕山期岩浆岩体，有可能导致煤的生气效率增高；本区东段现代构造应力场具有高应力降特征，并与推定的高含气区（阳城矿区）处于同一应力降范围（见图 2-14）；浅部煤层处于煤层气逸散带内的地质时间相对较短。这些特定的地质条件可能有利于本区煤层气的生成、保存和聚集。本区主煤层的煤级为无烟煤（表 6-9），略低于阳城—潘

庄矿区，但远高于潞安、沁源、霍州和汾孝矿区；主煤层灰分的平均产率在23%左右。根据山西南部推定区煤级—灰分产率—含气量关系图解推算：上、下主煤层的平均含气量在沁水矿区分别应为13 m^3/t 和16 m^3/t，属于较富甲烷类煤层；在翼城矿区分别应为11 m^3/t 和13 m^3/t，属于含甲烷类煤层(见图6-4，表6-3)。

表6-9　　山西南部沁水—翼城煤层气推断区主煤层煤级和煤质的平均数据

矿区	上主煤层				下主煤层			
	R_o/%	V_{daf}/%	A_d/%	煤级	R_o/%	V_{daf}/%	A_d/%	煤级
沁水矿区	2.75	8.08	22.74	无烟煤	2.34	10.11	22.52	无烟煤
翼城矿区	2.34	7.75	23.81	无烟煤	2.71	9.50	29.52	无烟煤

然而，由于浅部煤层位于正断裂发育的南部地带，故实际上大部分煤层气已放散殆尽。换言之，本预测区煤层气风化带下限深度可能远大于其东部的阳城矿区。本区地层平均倾角与沁源矿区相近，含煤地层在南缘出露于地表，但断裂发育程度高于沁源矿区，故煤层气风化带下限深度至少应相当于沁源矿区。此外，前已述及的沿沁水盆地主向斜轴展布的上主煤层顶板河道相砂岩带由北向南穿过沁水矿区，可导致上主煤层的含气性变差。

鉴于上面的分析和类比，将本区上、下主煤层的煤层气风化带下限深度分别定为500 m和600 m。由煤层气风化带的确定标准可知，下限深度水平处煤层甲烷的浓度为80%。根据推定区煤层气含量与甲烷浓度的统计关系，进一步确定出下限深度处的煤层气含量，即上主煤层为6.50 m^3/t，下主煤层为5.50 m^3/t。参考沁源矿区和安泽地区的含气性梯度，最终得出预测区不同深度水平的煤层气含量和甲烷含量(表6-10)。

表6-10　　山西南部沁水—翼城煤层气推断—预测区主煤层含气性预测结果

煤层	含气性参数	不同埋藏深度煤层的含气性						平均值 /$m^3 \cdot t^{-1}$
		300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	
上主煤层	含气量	3.5	4.3	6.5	9.4	12.3	15.2	8.5
	甲烷浓度	40	65	80	90	95	100	—
	甲烷含量	1.4	2.8	5.2	8.5	11.7	15.2	7.5
下主煤层	含气量	—	1.8	2.6	5.5	6.4	7.3	4.7
	甲烷浓度	—	40	65	80	90	95	--
	甲烷含量	—	0.7	1.7	4.4	5.8	6.9	3.9

注：含气量和甲烷含量的单位为 m^3/t，甲烷浓度的单位为%。

四　临汾盆地预测区

临汾盆地为一晚新生代断陷—坳陷盆地，霍州矿区为其向北延展的一个组成部分。盆地总体上呈NNE向展布，两翼被一系列阶梯状正断层所切割，导致石炭—二叠系煤层在盆地中心的埋藏深度达3500 m。盆地内部未进行过煤田钻探工作，盆地北部外围有少量小煤窑井采，西南缘的襄汾矿区、北部外围的霍州矿区和西北外围的古县矿区进行过不同程度的煤田地质勘探，其煤质平均数据见表6-11。

表 6-11　山西南部临汾盆地周边及外围矿区石炭—二叠系主煤层煤级和煤质数据

矿区	上主煤层				下主煤层			
	R_o/%	V_{daf}/%	A_d/%	煤级	R_o/%	V_{daf}/%	A_d/%	煤级
襄汾矿区	—	16.96	21.61	高煤化烟煤	—	15.87	21.76	高煤化烟煤
霍州矿区	0.86	32.51	16.63	低煤化烟煤	0.89	31.51	23.21	低煤化烟煤
古县矿区	1.41	17.47	25.13	中煤化烟煤	—	16.64	22.76	高煤化烟煤

煤层埋藏史分析表明，盆地中心石炭—二叠系主煤层的埋藏深度在地质历史时期中从未浅于 1100 m，存在有利于煤层气保存的埋藏条件。用 EASY%R_o 法模拟得出热演化史，石炭—二叠系煤镜质组反射率在盆区范围内的平均值为 1.74%，累积生气量达 195 m^3/t（表 4-12），具备煤层被气体饱和的生烃条件。然而，盆地西翼高角度 NNE 向正断层发育密集，晚新生代构造应力场具有 NNW—SSE 向拉伸特征，不仅为煤层气的放散提供了可能通道，而且也存在不利于煤层气聚集的构造应力场条件。在北部与盆地具有相似构造特征的霍州矿区，石炭—二叠系主煤层含气性极差，表明构造对煤层气保存的不利影响十分明显。

根据上述地质因素分析，本区煤层含气性预测所依据的主要参数如下：煤层气风化带深度下限以山西南部平均深度为准，即上主煤层为 410 m，下主煤层为 520 m，下限深度处的甲烷浓度为 80%；采用山西南部主煤层含气量与甲烷浓度统计关系（图 6-11）求出上、下主煤层对应于甲烷浓度 80%的含气量分别为 6.5 m^3/t 和 5.5 m^3/t；参考周边各矿区煤质数据及盆地内煤镜质组反射率数值模拟结果，根据山西南部石炭—二叠系煤的兰氏体积—煤级—灰分关系，得到盆地上、下主煤层的可能饱和含气量分别为 30 m^3/t 和 25 m^3/t；根据国内外一般经验，取煤层气饱和带下限深度为 2500 m。由此，对本区煤层含气性进行预测，结果如表 6-12 所示。

表 6-12　山西南部临汾盆地预测区主煤层含气性预测结果

煤层	含气性参数	不同埋藏深度煤层的含气性						平均值 /$m^3 \cdot t^{-1}$
		400 m	500 m	1000 m	1500 m	2000 m	2500 m	
上主煤层	含气量	6.5	7.7	13.5	19.3	24.2	30.0	17
	甲烷浓度	80	85	100	100	100	100	—
	甲烷含量	5.2	6.6	13.5	19.3	24.2	30.0	17
下主煤层	含气量	-	5.5	10.4	15.3	20.1	25.0	15
	甲烷浓度	—	80	100	100	100	100	—
	甲烷含量	—	4.4	10.4	15.3	20.1	25.0	15

注：含气量和甲烷含量的单位为 m^3/t，甲烷浓度的单位为%。

值得提及的是，在临汾盆地西北角的三交河煤矿，分别在 80 年代和 90 年代初发生过两次瓦斯爆炸，造成数 10 人伤亡。该煤矿平硐开采二叠系山西组 $2^{\#}$ 煤层，煤层上覆山体厚度小于 100 m。煤层埋藏如此之浅的矿井中发生瓦斯爆炸的现象，不仅在国内外罕见，而且至少表明该矿井浅部煤层的含气性和甲烷浓度是比较高的。由此暗示，本书对于临汾盆地煤层含气性的估计可能比较保守，实际含气性可能会更高一些。

第三节　煤层气可采潜势

煤层气的可采性是地质选区(乃至目标区优选)和经济评价的重要指标。可采潜势受控于气体在煤储层中的吸附—解吸特征,而后者与煤储层压力系统以及储层物性、温度等因素密切相关。鉴于这种因果关系,本书从吸附—解吸特征和储层压力系统入手,对山西南部石炭—二叠系主煤层煤层气可采潜势进行了初步评价(秦勇等,1998)。

一　可采潜势评价方法

基于实验室测试数据,采用解吸和吸附两种基本方法对山西南部主煤层中煤层气的可采潜势进行评价。这两种方法虽各有所长,但也各有不足。因此,两种方法相互结合往往可收到更为接近实际的评价效果。

1. 解吸法

解吸法是利用矿井或钻孔罐装含气煤样的解吸数据求出煤层气解吸率,可为煤层气可采潜势的初步评价提供参考。煤层气解吸率(R_D)的基本定义是:

$$R_D = G_D/G_T$$

式中,G_D 为样品中可解吸气的含量,等于自然解吸气量和真空解吸气量之和;G_T 代表含气总量,等于可解吸气量和残留气量(破碎解吸气)之和。显然,解吸法的优点是简便明了、可反映样品的含气状况,R_D 越高,煤层气的可采潜势越强。然而,利用罐装样品解吸数据评价煤层气的可采潜势亦存在明显不足,其中最为重要且目前尚不能解决的问题是解吸的压力问题。实验室的解吸是在近于常压—真空的条件下进行的,而自然界中的原位解吸在很大程度上则受控于由储层压力、地层压力、构造应力和煤层气压力所构成的压力系统。两者的解吸条件显然是不同的,由此常会导致对煤层气的可采潜势做出过高的评价。

2. 吸附法

吸附法的测试结果常用等温吸附曲线加以表示,给出的是在恒定温度下吸附压力与吸附量之间的动态变化关系,从而在一定程度上可弥补罐装样品解吸法的不足。进一步说,根据等温吸附数据求出的兰氏体积,可估计样品的理论饱和吸附容量;求出的兰氏压力,可为煤层气临界解吸压力、采收率等开采地质条件的评价提供计算依据。但是,吸附法同样也存在某些不足。首先,吸附法只能显示样品对气体的吸附特性,而不能证明煤层是否含气及其含气性特征。其次,目前的吸附数据表示的仅是煤对单相气体(甲烷)的吸附性,而原位煤层中所存在的是由甲烷、重烃气、二氧化碳、氮气以及水所构成的多元(相)体系,甲烷在一元体系与多元体系中被吸附的特性显然不同。尽管美国同行已进行过煤在二元体系(如甲烷—氮气)中的等温吸附实验(秦勇等,1996),但我国至今只有一元体系(甲烷)的吸附实验数据。

3. 解吸—吸附法

鉴于单纯的解吸法和吸附法的长处和不足,可将二者结合起来形成"解吸—吸附方法",即综合采用两种单纯方法的参数,结合形成新的煤储层物性参数,进而对煤层气可采潜势做出评价。其操作方法如下:

① 通过罐装样品的解吸实验得到阶段解吸含气量、总含气量和气体组成;

② 根据等温吸附实验得出吸附压力与吸附量之间的关系(等温吸附曲线),进而求得兰氏体积和兰氏压力;

③ 根据总含气量、煤质数据以及 a、b 值，采用朗格缪尔方程反演煤储层中的气体压力（“煤层气压力”，在煤层完全被气体饱和的条件下相当于煤储层压力），根据兰氏体积、含气量和甲烷含量并结合气体密度估计煤层的含气饱和度；

④ 根据兰氏体积、兰氏压力、含气量和煤层气压力分别求得煤层气临界解吸压力和煤层气压力低于临界解吸压力条件下的部分采收率，结合煤层气解吸率和等温吸附曲线大致估算废弃压力（煤层气解吸停止时的压力）；

⑤ 综合分析含气性和储层物性特征，对特定地区和煤层的煤层气可采性做出评价。

应当指出：通过上述实验方法对煤层气可采潜势做出的评价只是初步的，因为自然界中煤层气的可采潜势要受诸多因素的影响，如煤层割理系统、上覆地层压力、构造应力场、水文地质条件、井孔处理方法和效果、钻采工艺等。因此，对煤层气可采潜势的准确评价应结合井孔试验，从更为广阔的视角进行，但在煤层气勘探开发之前要进行该项工作往往是极为困难的，这时实验方法不失为一种可采纳的参考方法。

二 煤层气解吸率

根据推定区罐装样品解吸数据得出的山西南部主煤层煤层气解吸率列于表 6-13。

表 6-13 山西南部推定区石炭—二叠系主煤层煤层气解吸率

矿区或井田	上主煤层煤层气解吸率/%			下主煤层煤层气解吸率/%		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
沁源矿区	0.00	0.00	0.00	0.00	61.91	4.24
樊庄井田	12.19	61.52	28.60	9.76	46.45	32.58
潘 1 井田	5.46	66.83	32.08	13.51	69.64	38.57
潘 2 井田	7.91	53.19	27.06	9.91	70.67	41.17

煤层气解吸率的区域分布是不均衡的。在煤层埋深浅于 700 m 左右的推定区，平均解吸率一般不超过 40%，并且上主煤层的解吸率小于下主煤层。煤级较高的樊庄、潘 1 和潘 2 井田，平均解吸率分布在 27%～41%之间，且上主煤层的平均解吸率小于 32%，下主煤层的平均解吸率大于 32%。煤级相对较低的沁源矿区，平均解吸率极低，上主煤层罐装样品中基本上没有解吸气产出，下主煤层的绝大部分样品的解吸率也为 0，即使埋深大于 700 m 的样品也是如此，从而使下主煤层平均解吸率仅有 4%左右。

推定区煤层的煤层气解吸率在垂向上的分布也是不均匀的，在各矿区或井田的分布特征有所不同。沁源矿区上主煤层即使在埋深大于煤层气风化带、含气量达 10 m^3/t 的条件下，样品中仍然未见解吸气产出；在下主煤层已有的 18 个罐装样品中，只有两个样品产出解吸气，产出深度在 400～500 m 之间，而 600～800 m 之间的样品解吸率反而为 0（图 6-12），暗示解吸率可能也在一定程度上受局部构造的控制。樊庄井田煤层气解吸率随埋深加大有增大的趋势，上主煤层的解吸率离散性相对较大，深度与解吸率的关系有所波动，最大解吸率在 60%左右；下主煤层解吸率的增大趋势较为明显，在埋深 800 m 左右解吸率接近 50%（图 6-13）。潘 1 井田和潘 2 井田煤层气解吸率高但离散性极大，与深度之间的关系较为复杂。在这两个井田中，解吸率的深度分布规律与含气量相似，上煤层解吸率最高值出现于 350～450 m 之间，下煤层解吸率最高值分布于 450～550 m 之间，最大值可达 70%，然后随

深度增大解吸率却减小(图 6-14,图 6-15)。

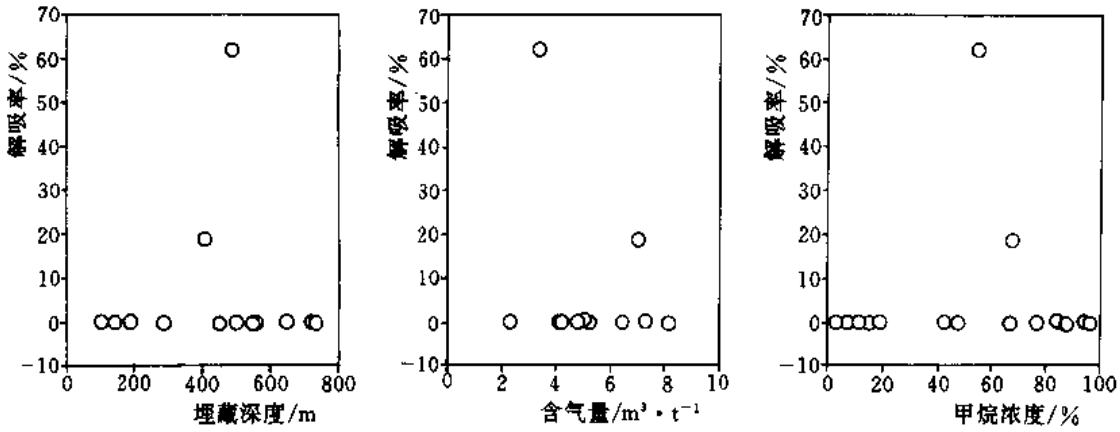


图 6-12 山西南部沁源矿区石炭—二叠系主煤层煤层气解吸率
与埋深、含气量和甲烷浓度之间的关系

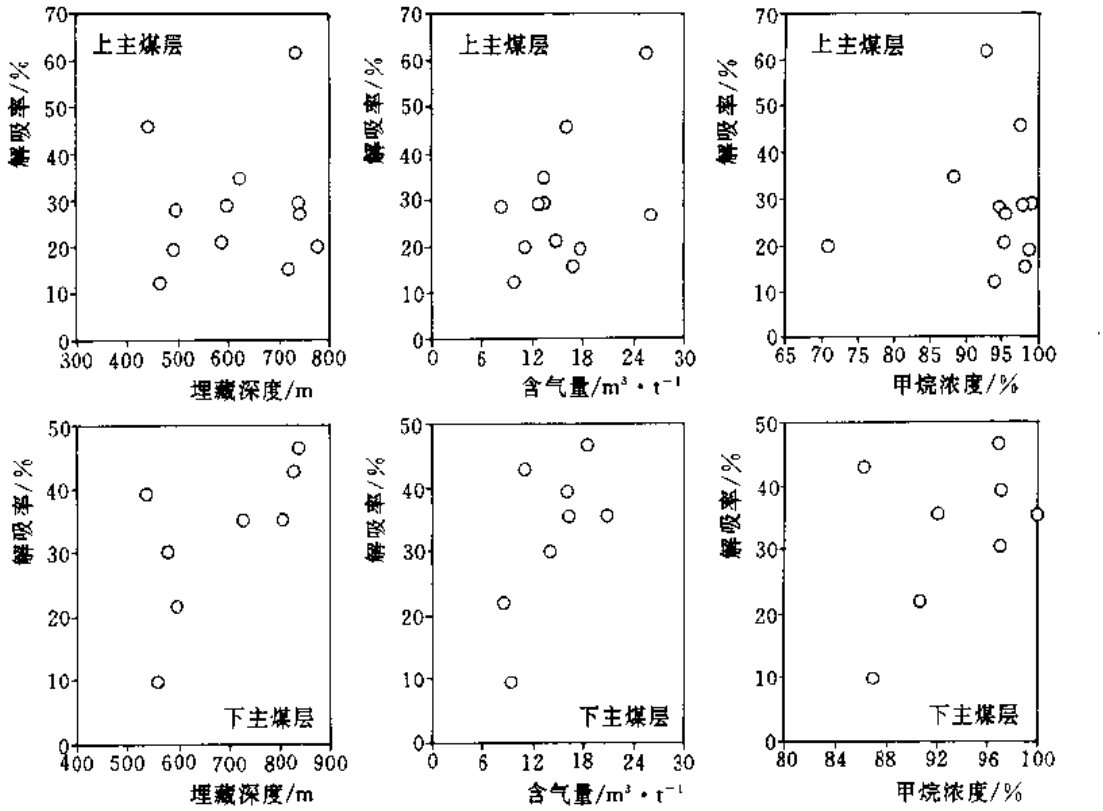


图 6-13 山西南部樊庄井田石炭—二叠系主煤层煤层气解吸率
与埋深、含气量和甲烷浓度之间的关系

推定区煤层的煤层气解吸率受煤层埋深和局部构造两因素的影响。由图 6-7～图 6-9 和图 6-12 可以看出,这两个因素通过对煤层气含量和甲烷浓度的控制,制约了煤层气解吸率的大小。

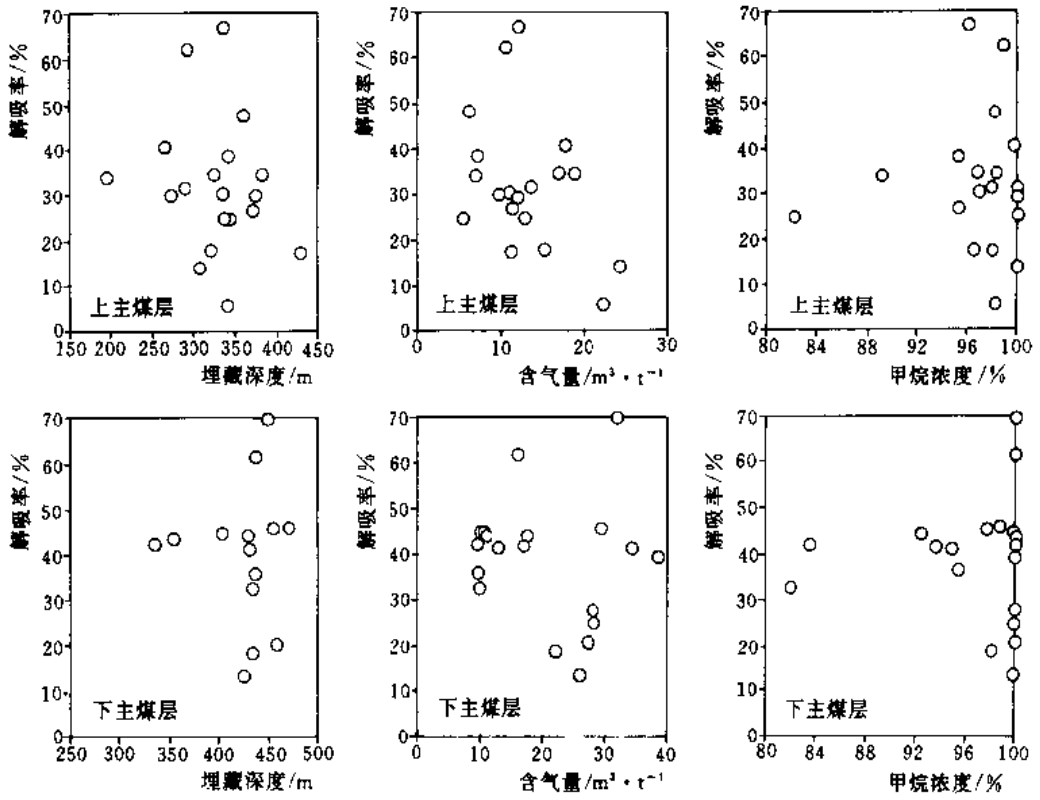


图 6-14　山西南部潘 1 井田石炭—二叠系主煤层煤层气解吸率与埋深、含气量和甲烷浓度之间的关系

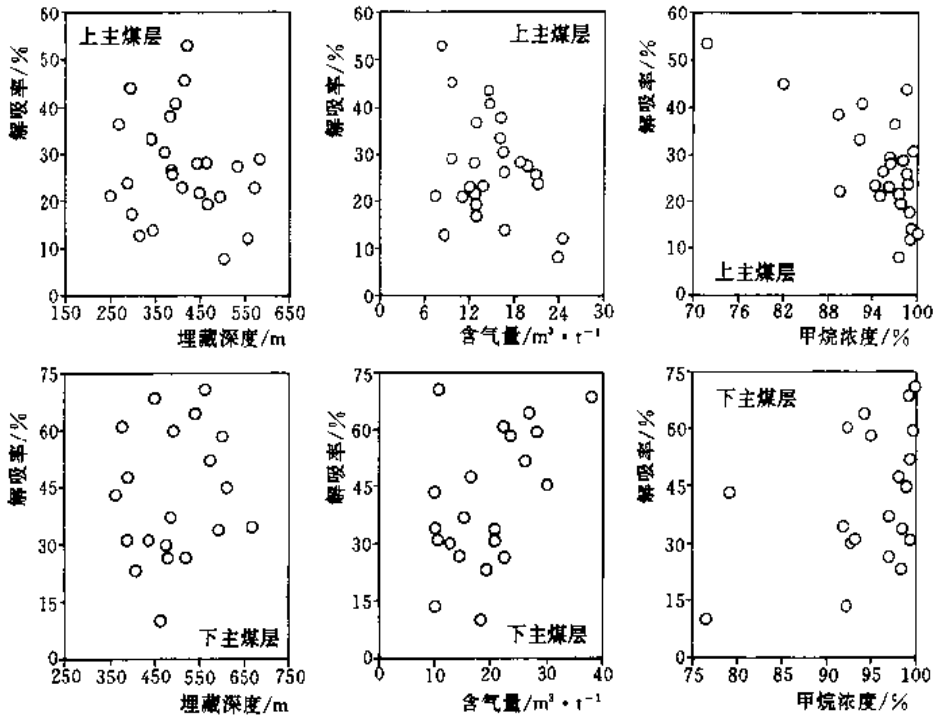


图 6-15　山西南部潘 2 井田石炭—二叠系主煤层煤层气解吸率与埋深、含气量和甲烷浓度之间的关系

三　兰氏参数、视储层压力和临界解吸压力

山西南部石炭—二叠系主煤层的兰氏参数列于表 6-14。如果忽略孔隙中水的作用，则可将煤层气压力近似地看做煤储层压力，这种压力称之为“视储层压力”，可利用含气量、煤质和等温吸附常数等基础数据、通过朗格缪尔方程反演出来(表 6-15，图 6-16)。

表 6-14　　山西南部石炭—二叠系主煤层等温吸附实验结果

矿　区	上主煤层			下主煤层		
	兰氏体积 /$m^3 \cdot t^{-1}$	兰氏压力 /MPa	样品数目 /件	兰氏体积 /$m^3 \cdot t^{-1}$	兰氏压力 /MPa	样品数目 /件
汾孝矿区	35.03	2.60	1	39.82	3.18	2
霍州矿区	31.48	2.97	6	17.59	1.20	1
古县矿区	25.46	1.69	1	—	-	-
沁源矿区	64.22	3.47	2	87.55	5.03	1
翼城矿区	74.52	4.28	2	39.56	1.83	1
沁水矿区	48.09	1.59	3	76.13	2.25	1
阳城矿区	17.72	0.98	4	56.53	1.70	1
潞安矿区	31.70	9.89	2	31.85	1.00	1
阳泉矿区	17.36	0.28	1	36.86	1.02	1
东山矿区	—	—	—	25.80	1.12	1
乡宁矿区	65.07	2.12	2	23.48	1.50	1

表 6-15　　山西南部煤层气推定区石炭—二叠系主煤层平均视储层压力反演结果

矿区或井田	上主煤层视储层压力/MPa			样品数	下主煤层视储层压力/MPa			样品数
	最小值	最大值	平均值		最小值	最大值	平值均	
汾孝矿区	9.4	9.8	9.6	2	5.7	11.9	7.9	3
霍州矿区	1.8	14.4	8.2	25	8.2	19.3	10.4	17
沁源矿区	4.1	13.7	9.1	15	3.7	14.1	6.9	12
屯留井田	3.5	11.7	6.1	13	5.3	15.8	10.1	5
樊庄井田	4.5	5.7	4.9	11	2.9	7.3	5.6	8
潘1井田	4.2	7.5	5.2	25	4.0	7.7	5.5	13
潘2井田	4.3	6.6	5.0	26	3.8	7.4	5.4	21

兰氏参数包括兰氏体积(g_L)和兰氏压力(P_L)。前者表示样品对气体的最大吸附容积，后者往往与实际含气量共同决定着煤层气的临界解吸压力。对一个特定样品而言，不同吸附压力段之间的兰氏参数有所变化，但各压力段兰氏参数的平均值(以下简称兰氏参数)却可被认为与煤层所受压力(或埋深)无关，而主要取于煤级、有机质含量(或灰分产率)、煤的孔隙性、煤岩特征等煤本身的因素。分析表明，山西南部主煤层的煤级、灰分产率与兰氏参数之间具有一定的统计关系，由此可以绘制出兰氏参数—镜质组反射率—灰分产率关系的经验性图版(图 6-17)。

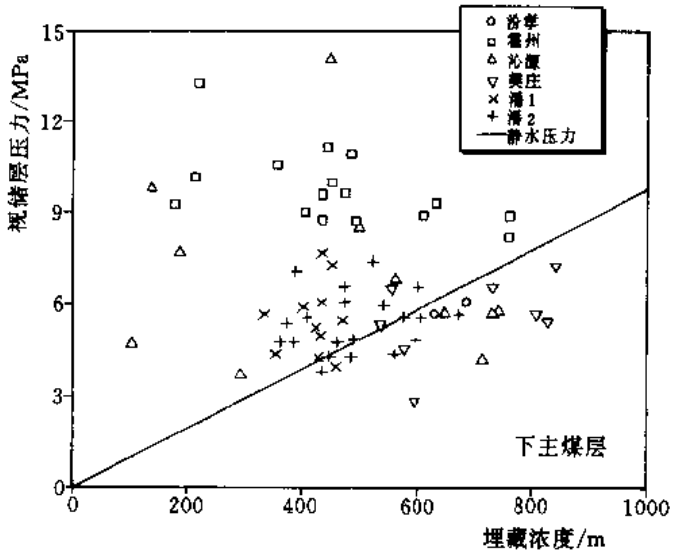


图 6-16　山西南部石炭—二叠系下主煤层视储层压力与埋深关系散点图

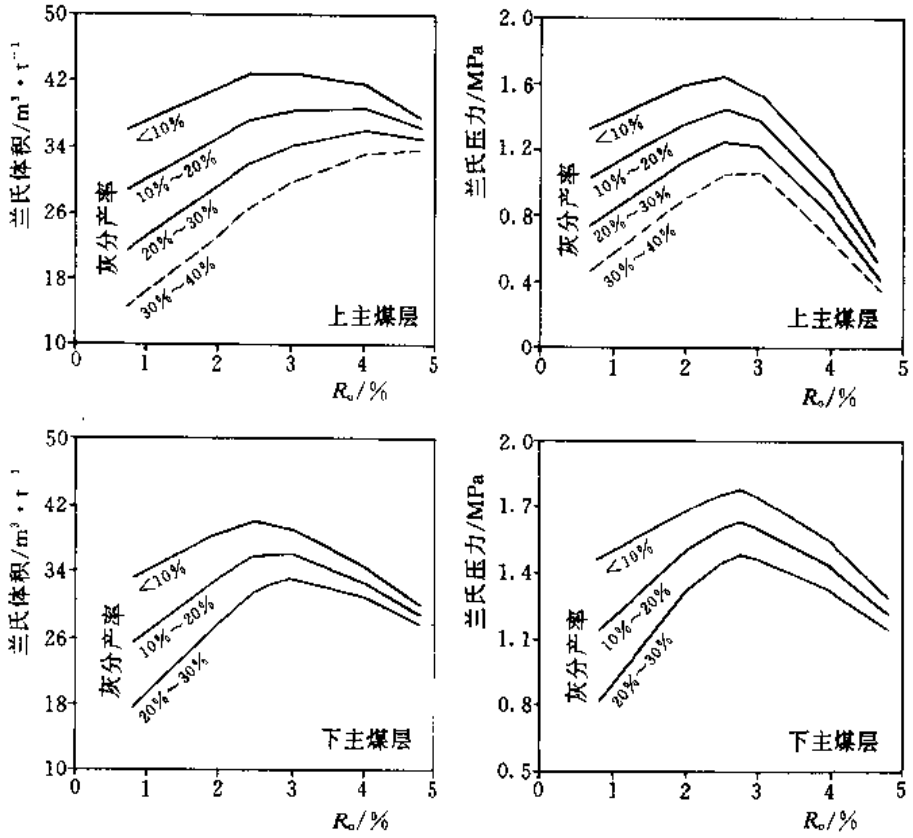


图 6-17　山西南部石炭—二叠系主煤层兰氏参数—镜质组反射率—灰分产率关系经验图

兰氏参数得出之后，结合罐装样品含气性的实测结果求算出山西南部推定区主煤层的临界解吸压力；结合含气性预测结果并参考兰氏参数—镜质组反射率—灰分产率关系经验图便可进一步得出推断区和预测区煤层的临界解吸压力(表 6-16)。

表 6-16　　山西南部石炭—二叠系主煤层煤层气临界解吸压力理论值

类别	地区	煤层	煤层埋深和临界解吸压力							
推定区	汾孝矿区		埋深/m	500	600	700	800			
		上、下煤	压力/MPa	0.26	0.37	0.54	0.8			
	霍州矿区		埋深/m	500	600	700	800			
		上煤	压力/MPa	—	0.83	1.04	1.34			
		下煤	压力/MPa	—	0.21	0.31	0.48			
	沁源矿区		埋深/m	500	600	700				
		上煤	压力/MPa	0.43	0.58	0.79				
		下煤	压力/MPa	0.38	0.41	0.44				
	樊庄井田		埋深/m	200	300	400	500	600	700	800
		上煤	压力/MPa	0.13	0.27	0.39	0.39	0.48	0.52	0.50
		下煤	压力/MPa	—	0.31	0.60	0.83	0.98	1.00	0.90
	潘1井田		埋深/m	200	300	400	500			
		上煤	压力/MPa	0.22	0.55	0.44	0.32			
		下煤	压力/MPa	0.25	0.35	1.24	3.9			
	潘2井田		埋深/m	200	300	400	500	600	700	
		上煤	压力/MPa	0.28	0.45	0.63	0.63	0.48	—	
		下煤	压力/MPa	0.57	0.82	1.03	1.72	1.23	0.86	
推断—预测区	沁源东		埋深/m	800	900	1000	1100	1200		
		上煤	压力/MPa	1.10	1.45	1.76	2.12	—		
		下煤	压力/MPa	0.49	0.59	0.73	1.23	1.53		
	安泽地区		埋深/m	700	800	900	1000			
		上煤	压力/MPa	1.10	1.45	1.76	2.12			
		下煤	压力/MPa	0.59	0.73	1.23	1.53			
	武乡—阳城中北段		埋深/m	700	800	900	1000	1100	1200	
		上煤	压力/MPa	0.50	0.79	1.19	1.68	2.49	—	
		下煤	压力/MPa	0.31	0.35	0.45	0.59	1.34	2.13	
	武乡—阳城南段		埋深/m	700	800	900	1000			
		上煤	压力/MPa	0.64	0.77	0.93	—			
		下煤	压力/MPa	0.41	0.54	0.68	0.85			
	沁水—翼城		埋深/m	500	600	700	800			
		上煤	压力/MPa	0.43	0.67	0.95	1.28			
		下煤	压力/MPa	0.13	0.30	0.36	0.42			
	临汾盆地		埋深/m	400	500	1000	1500			
		上煤	压力/MPa	1.31	3.54	11.1	—			
		下煤	压力/MPa	0.50	1.35	3.41	15.08			

分析以上结果，可以得出如下结论：

第一，在煤级相同的条件下，灰分产率增高，兰氏参数值降低；随煤级增高，兰氏参数呈“抛物线”形演化，不同灰分产率兰氏参数曲线之间的差别变小，最大值出现在无烟煤的早期阶段（R_o 为 2.5%～3.0%）；如果煤级和灰分条件相同，上主煤层的兰氏体积要大于下主煤层（图 6-17）。换言之，上主煤层最大吸附容积总体上要大于下主煤层，最大气体容积随灰分产率的增高而减小。前者大概是山西南部较低煤级矿区下主煤层含气量低于上主煤层的原因之一。

第二，山西南部既存在异常高压煤层，也有异常低压煤层，但以异常高压煤层为主。樊庄井田上、下主煤层，潘 2 井田部分煤层以及沁源矿区部分下主煤层表现出异常低压煤层的特性，其余矿区、井田煤层的视储层压力均在不同程度上高于相应埋深的静水压力，为异常高压煤层（图 6-16）。

第三，无论推定区还是推断区、预测区，煤层气临界解吸压力的地域、层域和深度分布的规律与含气量的分布规律基本是一致的，即含气量低，临界解吸压力也低，反之亦然（表 6-16）。临界解吸压力越高，煤层气解吸的难度就越小，潜力就越大。在推定区，樊庄井田、潘 1 井田和潘 2 井田下主煤层的临界解吸压力相对高于其它地区；在推断区和预测区，上主煤层的临界解吸压力显著高于下主煤层，临汾盆地煤层的临界解吸压力远高于其它地区（图 6-18）。然而，山西南部主煤层的临界解吸压力总体上远低于正常地层压力（静水压力），更低于根据朗格缪尔方程反演出来的视储层压力。这对于煤中气体的解吸是不利的，势必对排采工艺提出更高要求，加大了排采的难度和成本。

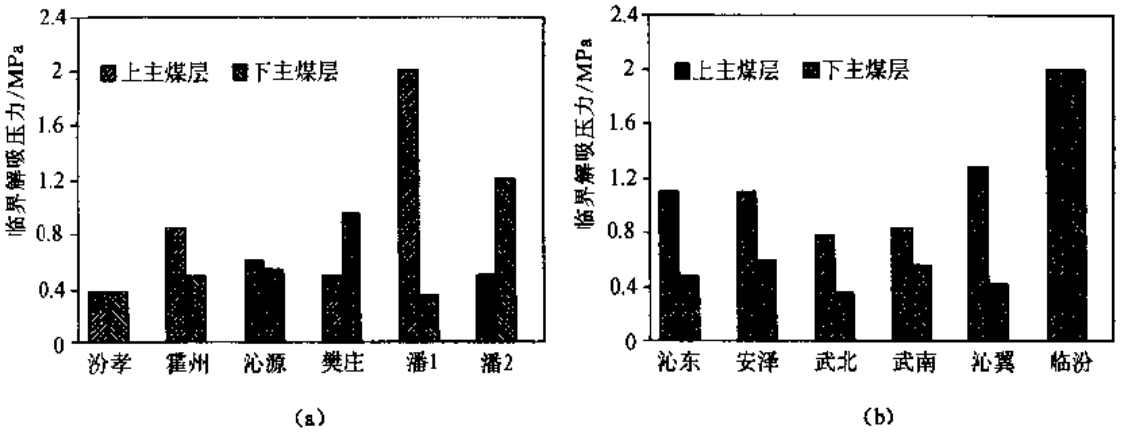


图 6-18　山西南部石炭—二叠系主煤层临界解吸压力对比直方图

(a) 推定区，煤层埋深 600 m　(b) 推断区和预测区，煤层埋深 800 m

第四，就临界解吸压力和视储层压力的平均比值而言，汾孝、霍州、沁源矿区和樊庄、潘 1 和潘 2 井田上主煤层分别为 0.06、0.13、0.07、0.09、0.07 和 0.10，下主煤层分别为 0.06、0.09、0.06、0.14、0.26 和 0.19。这些数值，一方面在总体上相当低，不利于煤中气体的解吸，另一方面随煤级增高有增大的趋势，在较高煤级区（樊庄和潘庄井田）也具有下主煤层的比值明显大于上主煤层比值的基本特征，表明在这些比值相对较大的地区或煤层中气体的解吸（或可采）潜势相对较大。

四　煤层气采收率

煤层气采收率不仅取决于煤层含气性、煤的吸附－解吸特性、煤层的发育和赋存特征以及煤层所处的原始压力系统，而且在相当大的程度上受控于煤层气井的钻井、完井措施和排采工艺。后一方面因素往往影响到煤层被打开后储层压力所能降低到的程度或压降的大小。诚然，如果其它条件不变，压降越大，煤层气采收率则将会越高。

罐装样品解吸气含量是自然解吸量与真空解吸量之和。利用这些数据得出的煤层气解吸率是真空—地表大气压(1 个大气压)条件下的煤层气采收率，也可以看做最大采收率(表 6-13)。但是，在煤层气实际开发过程中，即使采用某些排采措施(如真空泵、深井泵等)，也不可能将钻孔周围煤层气排泄区内的储层压力降到如此低的程度。显然，排采过程中的采收率要低于(甚至远低于)罐装样品的解吸率。根据国外经验，煤层气排泄区的平均压力有可能降至 100 psia，约相当于 7 个大气压或 0.7 MPa。基于此因，可将排泄区最终压力(废弃压力)分别设定为 0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa 或 3、5、7 个大气压，进而根据含气量、兰氏参数和灰分产率等基础数据，从理论上求得不同地区、不同深度、不同煤层和不同废弃压力条件下的煤层气理论采收率(表 6-17，表 6-18)。根据理论采收率进一步与含气量的对比，便可对潜在采收量进行预测。

表 6-17　　山西南部煤层气推定区石炭—二叠系主煤层煤层气理论采收率

矿区或井田	煤层	煤层埋深和废弃压力	理论采收率/%					矿区或井田	煤层	煤层埋深和废弃压力	理论采收率/%				
汾孝矿区	上	埋深/m	500	600	700	800		樊庄井田	上	埋深/m	400	500	600	700	800
		0.5 MPa	0	0	6	32				0.5 MPa	0	0	2	1	
		0.7 MPa	0	0	0	10				0.7 MPa	0	0	0	0	—
	下	0.5 MPa	0	0	6	32			下	0.5 MPa	0	13	22	23	18
		0.7 MPa	0	0	0	10				0.7 MPa	0	0	1	3	0
霍州矿区	上	埋深/m	500	600	700	800		潘1井田	上	埋深/m	200	300	400	500	
		0.5 MPa	—	34	45	54				0.5 MPa	0	5	0	0	
		0.7 MPa	—	12	27	39				0.7 MPa	0	0	0	0	
	下	0.5 MPa	—	0	0	0			下	0.5 MPa	0	0	46	47	
		0.7 MPa	—	0	0	0				0.7 MPa	0	0	31	58	
沁源矿区	上	埋深/m	500	600	700			潘2井田	上	埋深/m	300	400	500	600	700
		0.5 MPa	0	12	32					0.5 MPa	0	13	13	0	—
		0.7 MPa	0	0	10					0.7 MPa	0	0	0	0	—
	下	0.5 MPa	0	0	0				下	0.5 MPa	10	31	40	55	46
		0.7 MPa	0	0	0					0.7 MPa	0	10	23	42	31

分析上述资料，对山西南部煤层气的可采潜势有如下主要认识：

① 废弃压力越大，煤层气采收率越小。换言之，临界解吸压力与废弃压力之差的大小直接决定煤层气采收率的大小，差值越大采收率越大，反之越小。因此，尽可能采取措施降低煤层气排泄区煤储层压力是提高采收率、增加煤层气井产量的关键。

表 6-18　山西南部煤层气推断—预测区石炭—二叠系主煤层煤层气理论采收率

地区	煤层	煤层埋深和废弃压力	理论采收率/%					地区	煤层	煤层埋深和废弃压力	理论采收率/%				
沁源东	上	埋深/m	800	900	1000	1100	1230	武乡—阳城南段	上	埋深/m	700	800	900	1000	
		0.5 MPa	48	57	63	67	–			0.5 MPa	14	23	30	–	
		0.7 MPa	31	43	50	56	–			0.7 MPa	0	5	14	–	
	下	0.5 MPa	0	14	29	54	61		下	0.5 MPa	0	5	20	30	
		0.7 MPa	0	0	4	38	48			0.7 MPa	0	0	0	12	
安泽地区	上	埋深/m	700	800	900	1000		沁水—翼城	上	埋深/m	500	600	700	800	
		0.5 MPa	48	57	63	67				0.5 MPa	0	24	42	53	
		0.7 MPa	31	43	50	56				0.7 MPa	0	0	23	38	
	下	0.5 MPa	0	14	29	54			下	0.5 MPa	0	0	0	0	
		0.7 MPa	0	0	4	38				0.7 MPa	0	0	0	0	
武乡—阳城中北段	上	埋深/m	800	900	1000	1100	1200	临汾盆地	上	埋深/m	400	500	1000	1500	
		0.5 MPa	23	32	45	51	–			0.5 MPa	52	73	81	85	
		0.7 MPa	6	10	31	40	–			0.7 MPa	37	64	75	80	
	下	0.5 MPa	0	0	10	42	51		下	0.5 MPa	1	47	64	73	
		0.7 MPa	0	0	0	28	40			0.7 MPa	0	33	54	65	

② 在 0.7 MPa 废弃压力水平，推定区中绝大部分矿区（井田）或煤层可能没有煤层气产出，即使含气性条件极好的井田或煤层也是如此，如潘庄井田的上主煤层和樊庄井田的上、下主煤层等。如果废弃压力进一步降低到 0.5 MPa，则沁源矿区上主煤层、樊庄井田下主煤层和潘 2 井田上主煤层中可能会有一定数量的煤层气发生解吸。霍州矿区上主煤层在这一废弃压力水平尽管存在相对较高的采收率，但由于含气性极差，亦没有经济价值。

③ 就推断区和预测区而言，主煤层在废弃压力 0.7 MPa 水平上多少都有一定的可采煤层气量。以埋深 800 m 水平估算，煤层气可采潜势以临汾盆地主煤层最好，沁源东和安泽区上主煤层和沁水—翼城区上主煤层相对较高，下主煤层（除临汾盆地外）普遍差或极差，甚至可能没有解吸气产出。

① 含气量高的煤层，其可采性并不一定高。反之，产能低的煤层并不一定就意味着该煤层的含气性差。进一步来说，煤层即使富含煤层气，但由于临界解吸压力低和采收率低，若采用常规工艺和排采方法不能有效降低排泄区压力，气井的产能可能并不理想，甚至有可能采不出气来。在同样的含气性和开采工艺条件下，采收率高的煤层，其产气量可能会较高。研究区东部（沁水盆地区）、沁源东、安泽、阳城北等地已有的几口煤层气井的试井情况均符合这一规律。

⑤ 应当强调指出，潘 1 井田下主煤层的煤层气可采潜势极高，在埋深 500 m 水平即接近 60%，潘 2 井田下主煤层的煤层气理论采收率也相对较高。因此，在山西南部的煤层气推定区中，潘庄井田（特别是下主煤层）的煤层气最具开发前景，这种前景在一定程度上已由近年来的勘探实践予以证实。

第七章　山西南部煤层气资源评价

山西南部石炭—二叠系煤层气资源量极大，但在空间和时间上的分布是不均一的，不同地区煤层气的控气地质因素和开采地质条件也有所差异。本章在前述研究成果的基础上，讨论煤层气资源量的计算方法，计算煤层气资源量，阐述煤层气资源量的时空分布特征，并对区内煤层气资源的勘探前景做出评价。

第一节　煤层气资源量计算方法

前人对于全国或特定地区煤层气资源量的估算结果差别极大(关德师，1995)。其原因主要在于以下二个方面：第一，拥有原始资料的程度不一；第二，计算参数选取和计算方法不统一。如对含气量取值，有的采用算术平均值，有的选取概率分布值；对含气量基准，有的使用无水无灰基，有的使用无水基；对深部煤层含气量的预测，有的采用线性梯度法或幂指数梯度法，有的采用朗格缪尔方程的理论预测法；对煤层气风化带下限深度的确定，有的采用甲烷浓度 80%，有的采用甲烷含量 2 m^3/t；对计算的下限深度，有的采用－1500 m，有的采用－2000 m。鉴于上述原因，本书对煤层气资源量的计算方法进行了探讨(桑树勋等，1996)，并对山西南部石炭—二叠系煤层气资源量进行了计算。

一　资源量计算流程

山西南部石炭—二叠系主煤层的含气性和地质资料的丰富程度在三维空间的分布具有极大的不均一性。为了提高煤层气资源量的计算精度，首先应对含气块段和煤层气资源量的可靠性级别进行划分。含气块段确定以后，再确定上、下计算边界，然后在计算边界限定的范围内统计参算数据，确定资源量类别，并将块段中每一资源量类别对应的独立区域作为基本计算单元。计算单元资源量的累加可得到计算块段的资源量，计算块段资源量的累加则可得到整个评价区煤层气的级别资源量和总资源量。资源量的计算流程如图 7-1 所示。

二　计算块段、资源量类别和计算单元

1. 计算块段划分

一般而言，煤层含气性特征是煤层气资源量计算块段划分的主要直接依据，但在煤田地质勘探程度比较低以及含气性资料较少(甚至缺乏)的情况下，控气地质因素便成为所要考虑的因素。基于如上考虑，本书对山西南部石炭—二叠系煤层气资源量计算块段划分的原则确定如下：

① 煤层气含量比较接近或具有一致的变化规律；

② 同一块段内具有相似的构造—煤层埋藏—热演化—生烃历史和构造发育特征，块段间的边界往往为较大的断层或大型褶皱构造的轴部；

③ 同一块段内具有相似的煤储层和盖层特征，煤储层的割理裂隙、孔隙结构、解吸—

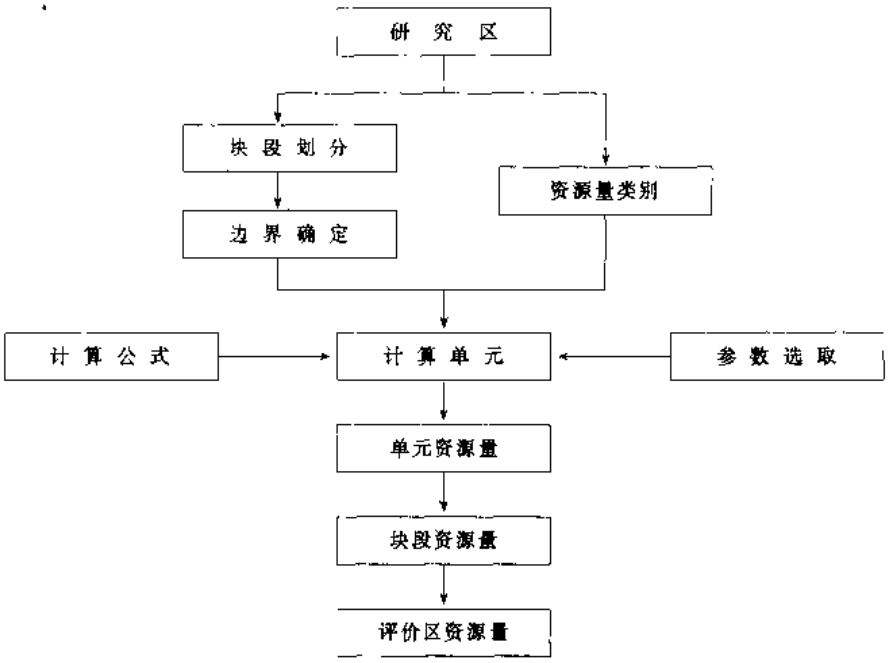


图7-1 山西南部煤层气资源量计算流程图

吸附特征相似，封盖层的岩性大体一致；

④ 煤层的生气条件（如煤级、煤岩和煤质等）大体相似。

根据上述原则，本书将山西南部划分为以下五个煤层气资源量计算块段（图 7-2），现分述如下。

块段Ⅰ（阳城块段）：西以寺头—后城腰断裂带为界，东界为晋获断裂带，北为安泽断褶构造的近东西向轴线延长线，向南与研究区边界一致，大致相当于潘 1 井田、潘 2 井田、成庄井田和樊庄勘探区的范围。其总体构造面貌以北东—南西向相间展布的小褶皱为主，基本不发育断层或偶见小型逆断层。煤层气的分布明显受构造控制，向斜富气、背斜贫气现象非常显著，基本不受埋深影响。煤级均为无烟煤，$R_{o,max}$的分布范围为 3.5%～4.5%。盖层多为屏障层或半屏障层。煤层含气量普遍较高，甲烷含量一般均大于 10 m^3/t。下主煤层含气量多大于上主煤层。

块段Ⅱ（武乡—屯留块段）：西以沁水盆地北东—南西向轴线为界，南界为安泽断褶构造的轴线（与块段Ⅰ、Ⅳ相接），北、东分别为研究区边界。该块段位于沁水盆地的东翼，总体构造面貌为一向北西方向倾斜的单斜构造，同时叠加北东东向展布的断层和褶曲。煤层气的分布主要受埋深控制，随埋深增大煤层气含量和甲烷浓度逐渐增高，同时也受局部构造的影响。煤级为贫煤—无烟煤，呈条带状展布，$R_{o,max}$为 1.9%～2.7%。盖层多为半屏障层。煤层气含量一般介于 8～14 m^3/t 之间。上主煤层含气量明显高于下主煤层。

块段Ⅲ（沁源—安泽北块段）：东以沁水盆地轴线为界与块段Ⅱ相接，南界为安泽断褶构造轴线，北为研究区边界，西界为霍山隆起及近南北向发育的山前断裂。该块段位于沁水盆地西翼，总体构造面貌为一向东倾斜的单斜构造，叠加其上的褶皱和断层发育程度远不如块段Ⅱ。煤层气的分布局部受埋深控制，变化梯度比较稳定，受局部构造的影响非常小。煤级为瘦煤—无烟煤，呈条带状展布，$R_{o,max}$为 1.5%～2.8%。盖层多为半屏障层，部分为屏障

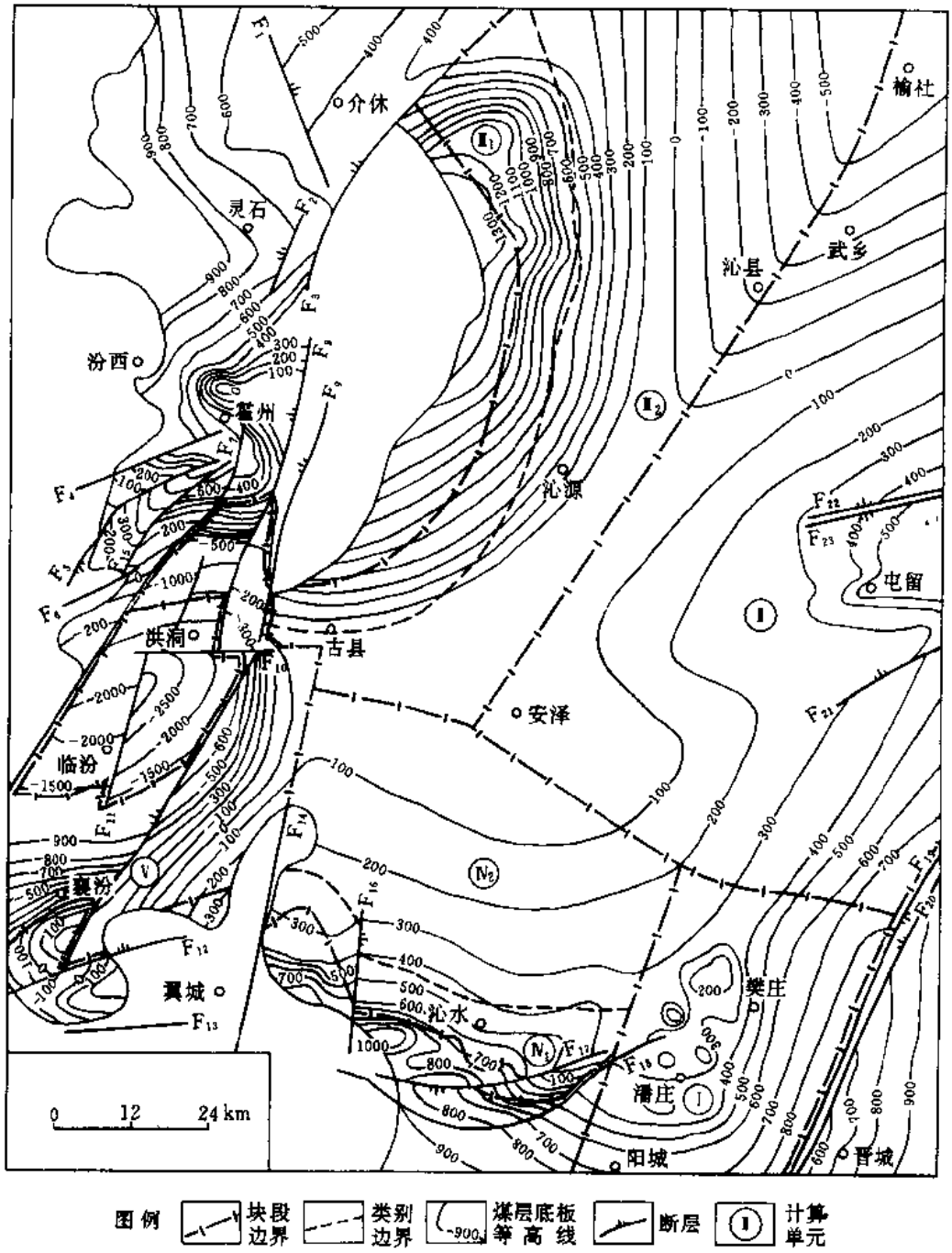


图 7-2　山西南部石炭--二叠系上主煤层煤层气资源量计算块段、资源量类别和计算单元划分示意图

Ⅰ——阳城推定区；Ⅰ——武乡－屯留预测区；Ⅱ$_1$　沁源—安泽北推定区；Ⅱ$_2$　沁源　安泽北预测区；Ⅳ$_1$——沁水—翼城推断区；Ⅳ$_2$——沁水—翼城预测区；Ⅴ——临汾—洪洞预测区

层。煤层气含量一般介于 4～16 m^3/t 之间。上主煤层含气量高于下主煤层。该块段按资源量类别可进一步划分为Ⅱ$_1$和Ⅱ$_2$两个计算单元。

块段Ⅳ(沁水—翼城块段)：东以寺头—后城腰断裂带为界与块段Ⅰ相接，北界为安泽断

褶构造轴线(与块段Ⅰ、Ⅱ相接),西界为浮山断裂带,南为研究区边界。该块段的构造面貌在浅部表现为正断层多于褶曲,深部以褶曲为主,断层相对较少。煤层气含量在浅部主要受构造控制,在深部主要受埋深控制。煤级为无烟煤,$R_{o,max}$为2.7%～4.0%。盖层多为半屏障层。煤层气含量相对较低,一般为4～10 m^3/t。上主煤层含气量明显高于下主煤层。该块段按资源量类别可进一步划分为$Ⅳ_1$和$Ⅳ_2$两个计算单元。

块段Ⅴ(洪洞—临汾块段):南北边界分别为计算资源量的埋深上限,东界为浮山断裂带和霍山山前断裂,西界为吕梁山山前断裂。其范围包括临汾盆地、霍州矿区南部和襄汾矿区北部。总体构造轮廓为一断陷盆地,叠加构造为密集发育的正断层。深部煤层气的分布主要受埋深控制,浅部受构造影响则更为显著。煤级主要为肥煤—瘦煤,$R_{o,max}$为0.8%～1.8%。盖层多为半屏障层。煤层气含量梯度在浅部较小,向深部梯度增大,含气量一般为8～15 m^3/t,上主煤层含气量明显高于下主煤层。

2. 煤层气资源量类别

目前国内煤层气资源的勘探程度很低,基本无探明资源量可言,也无法根据煤层气井的控制程度进行资源量类别划分。鉴于目前这种现状,本书主要依据现有煤田地质勘探程度,并参照中国和美国常规天然气的分类方案及相关术语(武宗城,1994),将山西南部石炭—二叠系主煤层煤层气资源量的相对可靠程度分为推定资源量、推断资源量和预测资源量三大类别(表7-1)。

表7-1　　山西南部石炭—二叠系主煤层煤层气资源量(可靠性)类别

资源量类别	煤炭资源控制程度	煤层含气性控制程度
推定资源量	精查或详查	钻孔煤芯含气量和气体组成测试数据较多,有较多的甲烷等温吸附资料和矿井瓦斯资料可供利用,含气性规律基本查明
推断资源量	普查或找煤	有少量钻孔煤芯含气量和气体组成测试数据,部分甲烷等温吸附资料和矿井瓦斯资料可供利用,对含气性规律有初步认识
预测资源量	未进行过专门的煤炭资源(特别是钻探)工作	基本无煤层含气性和物性数据,含气性特征仅靠地质类比或浅部规律加以预测

推定资源量:煤炭资源控制程度高,一般为精查或详查,有大量的瓦斯测试孔资料、矿井瓦斯涌出量资料和室内等温吸附资料,煤层的含气性和分布规律基本查明。

推断资源量:煤炭资源控制程度中等,一般为普查或找煤阶段,有少量瓦斯测试孔资料,矿井瓦斯涌出量资料和室内等温吸附资料也相对贫乏,煤层的含气性及分布规律靠少量控制点和控气地质因素分析推断,并取得初步认识。

预测资源量:煤炭资源勘探程度低,一般在找煤阶段以下,煤系和煤层的分布主要靠物探资料控制,煤层的赋存特征尚未查明,无煤层含气性资料,煤层的含气性和分布规律仅靠控气地质因素和邻区资料预测。

3. 煤层气资源量计算单元

计算单元是资源量计算的基础,总资源量是各计算单元计算结果的累加。在已划定的计算块段内,首先确定资源量计算的上下边界深度。根据研究区煤层含气量和甲烷浓度的相关关系,资源量计算上界采用煤层甲烷含量1.5 m^3/t所对应的煤层埋深,对于不同块段和同一块段不同煤层,这一深度均有所差异。

上、下主煤层的起算深度,在块段Ⅰ分别为50 m和100 m,在块段Ⅱ则分别为240 m和

300 m，在块段Ⅲ大体与块段Ⅱ相似，在块段Ⅳ分别为 300 m 和 500 m，在块段Ⅴ均为 600 m。考虑到目前勘探开发的技术水平和经济条件，资源量计算下界（资源量计算终止深度）定为煤层埋深 2000 m。计算边界确定以后，在边界范围内进一步划分资源量类别，块段内每一类资源量代表的区域就是一个资源量计算单元。

如图 7-2 和图 7-3 所示，山西南部石炭--二叠系上、下主煤层分别由 7 个计算单元组成：单元Ⅰ和Ⅰ′（块段Ⅰ和Ⅰ′）为推定资源区，单元Ⅱ和Ⅱ′（块段Ⅱ和Ⅱ′）为预测资源区，单元$Ⅲ_1$和$Ⅲ_1'$为块段Ⅲ和Ⅲ′中的推定资源区，单元$Ⅲ_2$和$Ⅲ_2'$为块段Ⅲ和Ⅲ′中的预测资源区，单元$Ⅳ_1$和$Ⅳ_1'$为块段Ⅳ和Ⅳ′中的推断资源区，单元$Ⅳ_2$和$Ⅳ_2'$为块段Ⅳ和Ⅳ′中的预测资源区，单元Ⅴ和Ⅴ′（块段Ⅴ和Ⅴ′）为预测资源区。

三　资源量计算基本公式和参数的确定

1. 煤层气资源量计算基本公式

以往煤层气资源量计算中所用参数的基准多不统一，使计算结果存在偏大或偏小的现象。本书以无水无灰（有机）基为准，采用美国学者 Scott(1995)提出的方法对研究区煤层气资源量进行计算。其公式如下：

$$GIP = (H \times S \times F_{wc}) \times \rho_c \times G_c \times C$$

式中　GIP——原位资源量，m^3；

H——煤层厚度，m；

S——含煤面积，m^2；

F_{wc}——无水无灰基体积校正系数，%；

ρ_c——煤的无水无灰基密度，t/m^3；

G_c——煤层气含量（无水无灰基），m^3/t；

C——英制或公制单位校正系数，当采用公制单位时，$C=1$。

通过对各评价块段煤层气资源量的累加，可得到研究区煤层气总资源量 Q：

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} GIP_{ij}$$

式中　m——参加计算的煤层层数；

n——计算单元数。

推定资源量以 H、F_{wc}、ρ_c 和 G_c 为统计变量，并采用蒙特卡洛法进行计算。推断资源量和预测资源量的实际控制点较少，计算参数多为推测值，其资源量计算采用算术加和法。

2. 资源量计算的主要参数

煤层厚度（H）的求取视资料来源和资源量类别而采用不同的方法。推定区和推断区煤厚取自勘探钻孔和生产矿井资料，并采用蒙特卡洛方法求出概率分布函数（张新民，1990）。预测区无煤厚数据，多采用地质类比法进行估量。

含煤面积（S）采用 4 km^2 方格网求取。研究区内煤层倾角（α）较缓，一般小于 15°。当倾角大于 10°时，应校正倾角对于煤层实际面积造成的影响。若倾角小于 10°，则将煤层倾斜对面积的影响忽略不计。

无水无灰基体积换算系数（F_{wc}）按下式进行计算：

$$F_{wc} = \frac{F_{wc} \times \rho_a}{(F_{wc} \times \rho_a) + (F_{wa} \times \rho_c)}$$

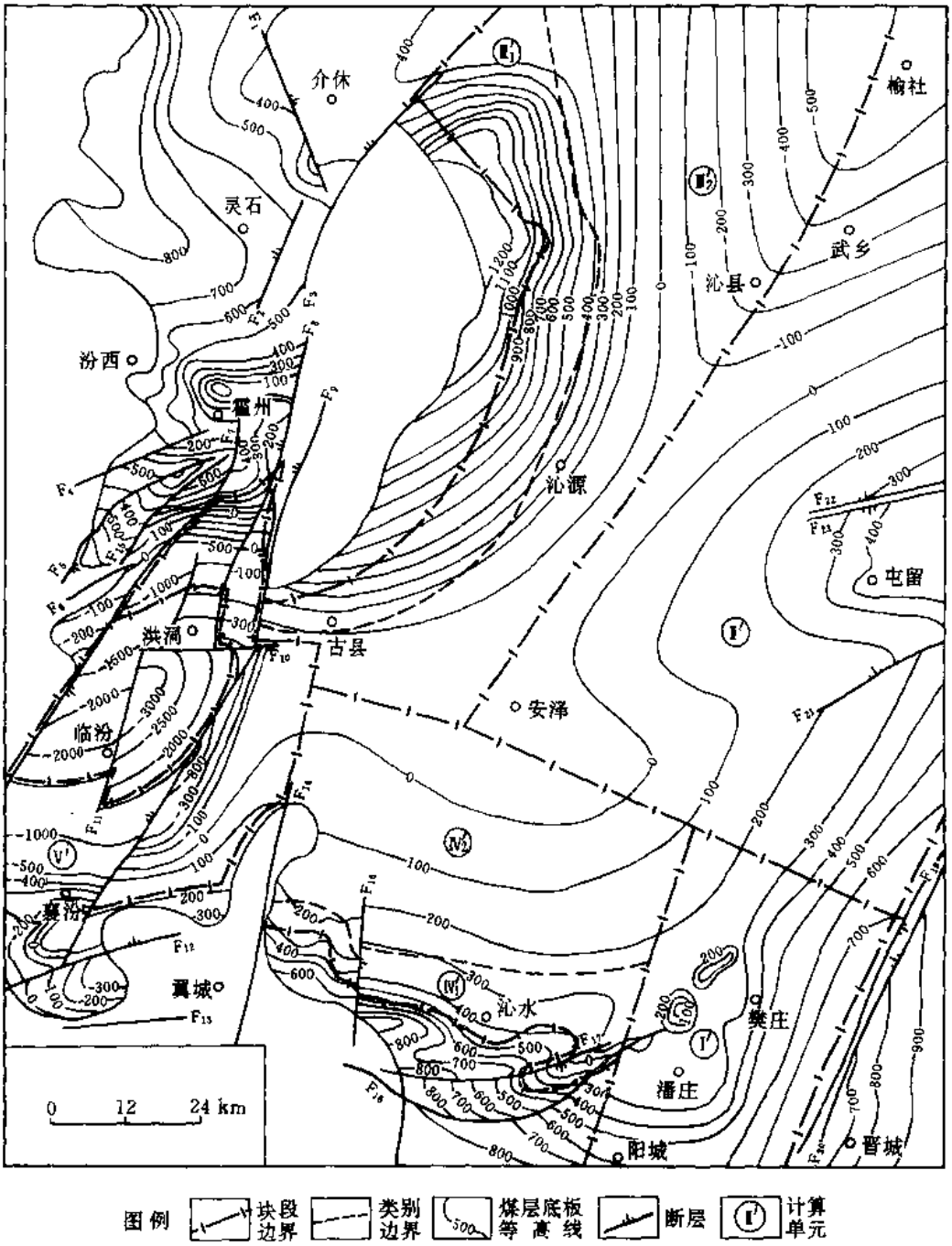


图 7-3　山西南部石炭—二叠系下主煤层煤层气资源量计算块段、资源量类别和计算单元划分示意图

Ⅰ——阳城推定区；Ⅰ′——武乡—屯留预测区；Ⅱ′$_1$——沁源—安泽北推定区；Ⅱ′$_2$——沁源—安泽北预测区；Ⅳ′$_1$——沁水—翼城推断区；Ⅳ′$_2$——沁水—翼城预测区；Ⅴ′——临汾—洪洞预测区

式中　F_{vc}——纯煤体积系数，%；

F_{wc}——煤中有机质重量百分比，%；

F_{wa}——煤的灰分产率，%；

ρ_a——煤中矿物质密度，t/ m^3；

ρ_c——煤中有机质密度，t/ m³。

煤中有机质密度主要受煤级控制，可根据挥发分产率与有机质密度之间经验关系进行换算：

$$\rho_c = K_v - 0.004\ V_{daf}$$

其中，K_v——特定煤级范围的密度常数，当 $V_{daf} \geqslant 8\%$时，K_v=1.40；当 $V_{daf} < 8\%$时，K_v=1.52。

就煤层含气量来说，推定区采用钻孔煤芯解吸数据并建立概率分布函数，推断区采用地质类比法，预测区采用含气梯度与地质类比综合方法。

第二节　煤层气资源量分布

足够的资源量是保障煤层气开发成功的首要基础，查明资源量的大小与分布是煤层气资源评价的中心内容。

一　煤层气资源量类别及其层域分布

计算结果表明，山西南部煤层气总资源量为 23218 亿 m³，其中，煤层甲烷总资源量为 21396 亿 m³，占煤层气总资源量的 92%。在煤层气总资源量中：推定资源量为 3913 亿 m³，占总资源量的 16.9%；推断资源量为 351 亿 m³，占总资源量的 1.5%；预测资源量为 18954 亿 m³，占总资源量的 81.6%。在煤层甲烷总资源量中：推定资源量为 3586 亿 m³，占资源量的 16.8%；推断资源量为 282 亿 m³，占总资源量的 1.3%；预测资源量为 17527 亿 m³，占总资源量的 81.9%(表 7-2)。无论是煤层气还是煤层甲烷，均以预测资源量占绝对优势。

表 7-2　　山西南部石炭－二叠系煤层气和煤层甲烷总资源量

层次与层域		推定资源量/Mm³		推断资源量/Mm³		预测资源量/Mm³		合　计/Mm³	
		全气	甲烷	全气	甲烷	全气	甲烷	全气	甲烷
主煤层	上主煤层	168370	160164	11713	9551	721478	683777	901561	853492
	下主煤层	109685	99545	7280	5726	408958	368896	525923	474167
	小　计	278055	259709	18993	15277	1130436	1052673	1427484	1327659
主煤组	上主煤组	171578	162604	19848	16184	888463	842795	1079889	1021583
	下主煤组	120027	106401	7525	5919	580492	523653	708044	635973
	小　计	291605	269005	27373	22103	1468955	1366258	1787933	1657366
地层组	山西组	181340	171205	22544	18382	972964	921973	1176848	1111560
	太原组	209971	187388	12515	9844	922429	830761	1144915	1027993
	小　计	391311	358593	35059	28226	1895393	1752734	2321763	2139553

就层域的总体分布来看：资源量以山西组居多，煤层气为 11768 亿 m³，煤层甲烷为 11116 亿 m³，均占煤层气总量和煤层甲烷总量的 50%以上；太原组的煤层气和煤层甲烷分别为 11449 亿 m³ 和 10280 亿 m³。主煤层中煤层气和煤层甲烷的资源量也有同样的分布趋势。但是，就煤层组而言，资源量的分布特点却有所不同。上主煤组的煤层气资源量为 10799

亿 m^3，下主煤组的煤层气资源量为 7080 亿 m^3。

二　煤层气资源量地域分布

在 5 个煤层气资源量计算块段中，武乡—屯留块段煤层气资源量最为丰富，煤层气总资源量为 10677 亿 m^3，占总资源量的 46.0%，煤层甲烷资源量为 10019 亿 m^3，占煤层甲烷总资源量的 46.8%。其次为沁源—安泽北块段，煤层气总资源量为 4562 亿 m^3，占总资源量的 19.6%；煤层甲烷资源量为 3891 亿 m^3，占总资源量的 18.2%。阳城块段资源量居第三位，但推定资源量居首位，其煤层气资源量为 3457 亿 m^3，占总资源量的 14.9%，占推定资源量(50%概率)的 91.5%；煤层甲烷资源量为 3277 亿 m^3，占煤层甲烷总资源量的 15.3%，占推定资源量(50%概率)的 91.3%。沁水—翼城块段煤层气资源量为 2324 亿 m^3，占总资源量的 10.0%；煤层甲烷资源量为 2095 亿 m^3，占煤层甲烷总资源量的 9.8%。临汾—洪洞块段煤层气资源量为 2198 亿 m^3，占总资源量的 9.5%；煤层甲烷资源量为 2114 亿 m^3，占煤层甲烷总资源量的 9.9%(表 7-3～表 7-5)。

表 7-3　　山西南部阳城块段推定区煤层气和煤层甲烷概率资源量

概率/%	煤层气/Mm^3						煤层甲烷/Mm^3					
	主煤层		主煤组		地层组		主煤层		主煤组		地层组	
	上层	下层	上组	下组	山西组	太原组	上层	下层	上组	下组	山西组	太原组
95	80228	35825	80228	35825	85031	70050	69948	33990	69948	33990	73413	65753
50	164660	92900	164660	92900	171664	174070	157580	88514	157580	88514	163827	163889
5	310784	224031	310784	224031	325055	409017	304850	212796	304850	212796	315585	394290

表 7-4　　山西南部沁源—安泽北块段推定区煤层气和煤层甲烷概率资源量

概率/%	煤层气/Mm^3						煤层甲烷/Mm^3					
	主煤层		主煤组		地层组		主煤层		主煤组		地层组	
	上层	下层	上组	下组	山西组	太原组	上层	下层	上组	下组	山西组	太原组
95	2091	8043	3301	12501	4344	17313	1554	4479	2335	7255	3799	9543
50	3710	16785	6858	27127	9676	35901	2584	11031	5024	17887	7378	23499
5	15404	32867	24977	51647	34273	66619	14340	27665	25495	44205	31780	56945

表 7-5　　山西南部煤层气和煤层甲烷推断资源量和预测资源量

计算单元	煤层	推断资源量/Mm^3		预测资源量/Mm^3		煤层	推断资源量/Mm^3		预测资源量/Mm^3	
		煤层气	煤层甲烷	煤层气	煤层甲烷		煤层气	煤层甲烷	煤层气	煤层甲烷
武乡—屯留(单元Ⅰ)	上主煤层	—	—	514588	491252	下主煤层	—	—	158046	114185
	上主煤组	—	—	622293	594073	下主煤组	—	—	272988	249047
	山西组	—	—	658195	628346	太原组	—	—	409483	373571
沁源—安泽北(单元$Ⅱ_2$)	上主煤层	—	—	103012	92550	下主煤层	—	—	108517	92943
	上主煤组	—	—	122847	110370	下主煤组	—	—	149811	128310
	山西组	—	—	156118	140262	太原组	—	—	254487	217964

续表

计算单元	煤层	推断资源量/Mm³		预测资源量/Mm³		煤层	推断资源量/Mm³		预测资源量/Mm³	
		煤层气	煤层甲烷	煤层气	煤层甲烷		煤层气	煤层甲烷	煤层气	煤层甲烷
沁水 翼城（单元Ⅳ1）	上主煤层	11713	9551	—	—	下主煤层	7280	5726	—	—
	上主煤组	19848	16184	—	—	下主煤组	7525	5919	—	—
	山西组	22544	18382	—	—	太原组	12515	9844	—	—
沁水—翼城（单元Ⅳ2）	上主煤层	—		60216	57210	下主煤层	—	—	70279	63284
	上主煤组	—	—	70864	67381	下主煤组	—	—	70279	63284
	山西组	—	—	70864	67381	太原组	—	—	126427	113844
临汾—洪洞（单元Ⅴ）	上主煤层		—	43661	42764	下主煤层	—	—	72115	68484
	上主煤组	—	—	72458	70970	下主煤组	—	—	87413	83011
	山西组	—	—	87786	85983	太原组	—	—	132030	125381
合 计	上主煤层	11713	9551	721477	683776	下主煤层	7280	5726	408975	338896
	上主煤组	19848	16184	888463	842794	下主煤组	7525	5919	580491	523652
	山西组	22544	18382	972963	921972	太原组	12515	9844	922427	830760

第三节 煤层气资源勘探前景综合评价

煤层气资源勘探前景综合评价是确定勘探目标、进行勘探部署的重要依据。在前述研究成果的基础上，下面重点讨论选区评价标准，总结不同地（矿）区的煤层气地质特征，从而对山西南部煤层气勘探的前景进行综合地质分析，进而筛选出其中最有潜势的地区（秦勇等，1996）。

一 评价参数讨论

煤层气勘探开发前景受控于含煤层气地质系统以及与含气系统、开发工艺水平、地域和人文条件等有关的经济性因素。从地质角度来说，煤层气地质选区评价工作毫无疑问应当放在含煤层气系统的网络中进行。鉴于此，控气作用的结果（显现特征）显然应当是在煤层气地质选区中首先要考虑的评价参数，当然，控气作用的地质因素也不容忽视。

控气作用的结果主要体现在三个方面，即含气特性（简称含气性）、煤层特性和盖层特性。这些特性可通过某些基本参数予以反映。然而，具体到某一评价区来说，由于煤层气地质条件不同，遂导致各种基本参数在评价中的重要性有所不同，故在确定选区地质评价标准之前需要先对有效参数进行分析和筛选。

含气性的基本参数包括气体质量（气体组成）、单位体积或重量煤中含气的数量（含气量）、单位面积的含气量（资源富集度或资源丰度）和采收潜势（采收率）。这些参数在很大程度上受控于储层特性，并与煤层气风化带特征密切相关。其中，含气量、资源丰度和采收率是煤层气地质—经济评价中所应重点考虑的评价参数。

一般而言，煤层气是一种自生自储式的非常规性天然气矿产。换言之，煤层既是气源岩，又是储集岩。因此，煤层特性包括煤层物质组成、煤层几何形态和煤层物理性质三个方面。它们决定了煤层气的生成特征和储运潜势。煤层物质组成不仅是煤层气生成的基础，同时也对

储集能力起着重要的控制作用。煤层物质由有机质组成(有机元素、显微组分)、有机质丰度(灰分产率或有机质含量)、煤级(镜质组反射率、挥发分产率)等基本参数加以反映。然而,对于煤层来说,只要煤中有机质达到一定的演化阶段,其所生成气体的数量就已远远超出煤的最大吸附容量,故生气(或气源岩)因素对煤层气选区评价并不重要。这一点与常规石油天然气地质条件评价有所不同。煤层几何形态与煤层气开采的地质经济条件密切相关,可用煤层厚度、厚度变异程度、煤层结构(含矸性)、煤层分布范围等基本参数加以限定。对于厚度较大、结构较为简单、横向相对稳定且在某一地区普遍发育的煤层而言,除对资源丰度有重要影响的煤层厚度因素之外,其它煤层几何形态因素似乎可不做重点考虑。煤层物理性质是煤储层特征的核心,涉及到煤层对煤层气的储集和运移潜势。煤层物理性质包括吸附性、解吸性、煤层构造(割理发育特征、煤体破坏类型)以及与这些性质密切相关的煤层渗透性,可由兰氏体积、兰氏压力、临界解吸压力、割理密度及优势发育方向、渗透率(基质、割理、全岩)等参数体现出来。煤层物性受控于煤的物质组成、煤层赋存状况(如埋藏深度、构造应力场特征)、煤层几何形态等因素,同时也在很大程度上反控着含气量和采收率等含气性特征。

盖层特性是关系到煤层气能否富集的关键因素,包括盖层的岩石学性质、几何特征、连续性(节理发育程度)及其透气性,常用岩性、厚度、节理密度和优势发育方向、渗透率和突破压力等参数予以反映。然而,盖层对煤储层的封盖能力是相对的,封盖的基本前提是盖层的透气能力小于储层的渗透潜势。因此,在盖层评价中也可选用反映相对封盖能力的评价参数,如突破压力与排驱压力之比(突排压力比)等。

应当强调指出,含气性、煤(储)层和盖层的诸参数均受控于地质背景条件,如沉积—聚煤史、构造—埋藏史、地热—生烃史、剥蚀—风化史等。从含煤层气系统的角度来看,在上述地质历史中"关键时刻"出现或发生的地史位置及特征对煤层气的生成、储存、封盖、运移、聚集和保存常具有关键性的控制作用。有鉴于此,在选区地质评价中依据含气性、煤储层、盖层等方面基本参数的同时,也应充分考虑地质背景因素,对推断—预测区而言更是如此。

二 综合评价标准

基于上述认识,并充分结合山西南部煤层气地质条件和资源状况,本书提出了山西南部上古生界煤层气地质选区评价标准(表 7-6)。这一标准一方面用于指导本区煤层气勘探开发前景的地质评价,另一方面也反映出作者目前对于山西南部控气地质作用及因素的认识水平。显而易见,不同参数在地质评价中所起的作用是有所差别的。因此,在评价实践中可采用"排除法",可根据参数的重要程度依次对各选区煤层气前景进行筛选,以便最终确定出最有勘探开发前景的地区。

三 煤层气有利勘探区段优选

在本书前述中,已结合研究区实际分别从不同方面初步总结了山西南部的煤层气地质特征。依据选区综合评价标准(表 7-6)并充分考虑前述研究成果,现对山西南部煤层气勘探的前景进行综合地质分析,从而筛选出其中最有潜势的地区。

在评价标准的诸参数中,最基本的是含气量、煤层含气类型及与其相关的煤级、煤层气风化作用时限等参数。只有具有较高的含气性,才有进一步进行评价的必要性,否则其它方面的评价便失去了价值。由此分析,汾西矿区、霍州矿区上古生界煤层的含气性极差,总体上属贫甲烷类煤层,煤层气风化带深度大,镜质组最大反射率低于 1.5%,平均含气量低于 6 m^3/t(图 6-1、图 6-2),煤层处于煤层气逸散带的时限长,大部分煤层气体已放散殆尽。进一

表 7-6　　山西南部上古生界煤层气地质选区综合评价标准

评价参数		勘探前景级别		
类型	参数	最有前景	较有前景	没有前景
含气性	含气量/$m^3 \cdot t^{-1}$	>10	6～10	<6
	资源丰度/$Mm^3 \cdot km^{-2}$	>200	100～200	<100
	采收率/%，0.7 MPa	>20	<20	<10
	采收强度/$Mm^3 \cdot km^{-2}$	>30	10～30	<10
	煤层含气类型	富甲烷类煤层	含甲烷类煤层	贫甲烷类煤层
煤(储)层	煤层厚度/m	>10	—	—
	镜质组反射率/%	>1.5	>1.5	<1.5
	兰氏体积/$m^3 \cdot t^{-1}$	40～50	30～40	<30或>50
	临界解吸压力/MPa	>1	0.5～1	<0.5
	割理密度/条·m^{-1}	>40	—	—
	基质渗透率/$10^{-3}\mu m^2$	>0.5	0.1～0.5	<0.1
	煤储层类型	有利储层	较有利储层	不利储层
盖层	岩石类型	泥岩，灰岩	砂岩，灰岩	砂岩，灰岩
	顶板厚度/m	>5	2～5	<2
	节理密度/条·m^{-1}	<5	5～10	>10
	基质渗透率/$10^{-4}\mu m^2$	<0.01	0.01～0.1	>0.1
	突排压力比	>1	0.5～1	<0.5
	封盖层类型	低透气层	中透气层	高透气层
其它	煤田构造发育特征	次级褶皱发育，断裂稀少	构造简单，多为单斜	断裂极为发育
	现代最大主应力性质	压应力	—	张应力
	现代构造应力降/MPa	>5	—	—
	现代主应力差/MPa	>90	—	—
	新生代主应力差/MPa	>400	—	—
	二次生气量/$m^3 \cdot t^{-1}$	>200	100～200	<100
	煤层气风化作用时限	相对较短	中　等	相对较长

步考查煤的镜质组最大反射率大于1.5%的地区发现，沁源矿区、翼城矿区(沁水—翼城推断区西北部)以及临汾盆地浅部的主煤层均属贫甲烷类煤层，其含气性差。因此，这五个矿(地)区属于没有勘探前景的矿区，失去了进一步评价的价值。

除上述五个无勘探前景的矿(地)区之外，其余地区主煤层均为含甲烷类煤层和富甲烷类煤层，含气性为较好至好，需进一步分析的问题是这部分煤层气资源究竟具有多大的开采潜势，否则有可能出现高含气、低(或无)产气的状况，致使将来的勘探投入得不到相应的煤层气产出回报。影响开采潜势的关键因素是可采性以及与可采性密切相关的煤层渗透性，后者包括基质渗透性和割理渗透性，可分别用煤层气理论采收率、一定废弃压力(如0.7 MPa)下的临界解吸压力、实验室测定的渗透率和煤层割理发育密度加以初步衡量。其中，理论采

收率是含气量、临界解吸压力和基质渗透率等因素的综合反映。

沁源东、安泽和临汾三个预测区上、下主煤层煤层气平均理论采收率均大于20%，平均临界解吸压力均大于1.0 MPa；武乡—阳城中北段预测区、潘1井田和潘2井田推定区的平均采收率为10%～20%，平均临界解吸压力为0.5～1.0 MPa；樊庄井田推定区、武乡—屯留南段预测区和沁水—翼城推断区的平均理论采收率小于10%，平均临界解吸压力为0.5～1.0 MPa(表6-16，表6-17，表6-18)。总体来看，阳城矿区和沁源矿区(可代表沁源东和安泽预测区)的基质渗透率相对较高、煤层割理发育密度相对较大，同时储层与盖层的组合条件亦最为有利。

通过以上筛选，初步明确了山西南部各地区煤层气勘探前景的排列顺序。然而，从经济评价角度出发，勘探前景的进一步确定最起码应该分析一个地区的单位面积含气量(资源丰度)和单位面积采收量(采收强度)。换言之，需要对一定排采半径内的含气状况和采收潜势加以考查。山西南部具有煤层气勘探前景地区的资源丰度和采收强度如表7-7所示。

在推定区中：阳城推定区潘庄(潘1＋潘2)井田的资源丰度大于200 Mm^3/km^2，平均采收强度超过30 Mm^3/km^2，可能是最有煤层气勘探前景的地区；樊庄井田资源丰度大于200 Mm^3/km^2，尽管采收强度极低(不足10 Mm^3/km^2)，但通过采取一定的井孔处理措施有可能进一步提高采收率，可能属于较有前景的地区。在推断—预测区中：武乡—阳城褶皱带中北段的资源丰度不到200 Mm^3/km^2，但采收强度超过30 Mm^3/km^2，似应为最有前景的地区之一；武乡—阳城褶皱带南段的资源丰度大于100 Mm^3/km^2，但采收强度不足10 Mm^3/km^2，沁源东和安泽地区的资源丰度不到100 Mm^3/km^2，但采收强度大于20 Mm^3/km^2，可以认为这三个地区的煤层气勘探较有前景；临汾盆地资源丰度约为150 Mm^3/km^2，理论采收强度高达70 Mm^3/km^2以上，似属于最有前景的地区之一，但其资源量大部分分布在埋深1500 m以下，开采难度较大，故列为较有前景的地区可能更为合适。

山西南部不同地区的煤层气勘探前景，除应用含气性和储、盖层参数进行排序之外，也可根据含煤层气系统中的基本地质条件(或地质背景)加以预测。两类方法的预测结果可以相互验证。

山西南部现代构造应力场中分布着沁源—安泽—阳城应力集中带，新生代构造应力场中存在武乡南(武乡—阳城褶皱带北段)和阳城北(潘庄—樊庄)两块压应力正异常区(见图2-17，图2-19)，这与推定和预测的高含气区的分布完全一致。这种一致性一方面再次证实了高应力区有利于煤层气富集的事实，另一方面也验证了上述运用含气性和储、盖层参数对煤层气勘探前景的预测结果。研究区东部以褶皱为主，西部(特别是西北部)断裂发育，这与含气性“东高西低”的分布格局一致。

应当特别指出的是，潘庄一带次级褶曲发育，高含气“点”的位置与向斜中次级背斜轴部重合，表明次级背斜对煤层气的富集具有良好的控制作用。由此分析，沁源东和武乡—阳城褶皱带中北段正位于沁水盆地向斜轴的“鞍部”，可能比安泽、武乡—阳城褶皱带南段更有煤层气勘探前景。

二次生烃作用的研究表明：煤层气富集的生烃条件较好的地区包括阳城—翼城、临汾—洪洞和沁源—沁县，安泽一带生烃条件中等，而霍州—汾西矿区的生烃条件相对较差。然而，沁水矿区上主煤层顶板存在河道相砂岩，翼城矿区高角度断裂十分发育，临汾地区位于新生代和现代拉伸构造应力区(图2-17，图2-19)。因此，沁水、翼城、临汾地区尽管存在着有利

表 7-7　　山西南部上古生界主煤层煤层气资源丰度和采收强度预测

地区		层位	平均采收率/%	主煤层		主煤组		地层组	
				Q_g	Q_c	Q_g	Q_c	Q_g	Q_c
推定区	樊庄井田	上	0	102.91	0.10	2.91	0	107.29	0
		下	1	64.51	0.65	64.51	0.65	120.88	1.21
		合计	—	167.42	0.75	167.42	0.65	228.17	1.21
	潘1井田	上	0	102.91	0	102.91	0	107.29	0
		下	30	64.51	19.35	64.51	19.35	120.88	36.26
		合计	—	167.42	19.35	167.42	19.35	228.17	36.26
	潘2井田	上	0	102.91	0	102.91	0	107.29	0
		下	21	64.51	13.55	64.51	13.55	120.88	25.39
		合计	—	167.42	13.55	167.42	13.55	228.17	25.39
推断—预测区	武乡—阳城北—中段	上	20	92.15	18.43	111.44	22.29	117.87	23.57
		下	11	26.29	2.89	45.40	4.99	68.11	7.49
		合计	—	118.44	21.32	156.84	27.28	185.98	31.06
	武乡—阳城南段	上	6	92.15	5.53	111.44	6.69	117.87	7.07
		下	4	26.29	1.05	45.40	1.82	68.11	2.72
		合计	—	118.44	6.58	156.84	8.51	185.98	9.79
	沁源东	上	45	23.36	10.51	28.39	12.78	36.29	16.33
		下	18	26.03	4.69	36.77	6.62	60.35	10.86
		合计	—	49.39	15.20	65.16	19.40	96.64	27.19
推断—预测区	安泽	上	45	23.36	10.51	28.39	12.78	36.29	16.33
		下	11	26.03	2.86	36.77	4.05	60.35	6.63
		合计	—	49.39	13.37	65.16	16.83	96.64	22.96
	临汾盆地	上	64	29.10	18.62	48.31	30.92	58.52	37.45
		下	38	49.80	18.92	60.36	22.94	91.18	34.65
		合计	—	78.90	37.54	108.67	53.86	149.70	72.10

注：资源丰度(Q_g)和采收强度(Q_c)的单位均为 Mm^3/km^2

于煤层气富集的生气条件，但由于沉积条件和构造背景的不利影响，均有可能导致煤层气大量逸散而不利于煤层气的保存。这一认识与用参数分析法得出的结果基本吻合。

基于上述认识和优选，对山西南部上古生界煤层气资源勘探前景进行综合评价，结果如表 7-8 所示。应该指出：

① 推定区的评价结果是较为可靠的，对于其中已有煤层气勘探工作的地区，评价结果与勘探成果一致；

② 推断—预测区中最有前景和较有前景的地区存在进行勘探工作的价值，预测结果尚有待将来勘探成果的验证；

③ 在最有勘探前景的地区中，主要勘探层位在潘庄井田是太原组的下主煤层，在武乡—阳城褶皱带中北段则是山西组的上主煤层。

表 7 8　　山西南部上古生界煤层气资源勘探前景综合评价(预测)结果

前景级别	地区	
	推定区	推断—预测区
最有前景地区	潘 1 井田,潘 2 井田	武乡—阳城褶皱带中北段
较有前景地区	樊庄井田,屯留井田	安泽地区,沁源东地区,临汾盆地 武乡—阳城褶皱带南段
没有前景地区	成庄井田,沁源矿区 霍州矿区,汾西矿区	沁水北,临汾盆地浅部 襄汾矿区,古县矿区 沁水矿区,翼城矿区

第八章 结束语

一 尽快建立适合我国地质特点的煤层气基础理论

人类在实现可持续发展的进程中，面临着资源与环境的新挑战，煤层气作为在近一二十年才得到工业性开发的洁净能源，其巨大潜力正逐步为人们所认识。目前，包括中国在内，世界上已有29个国家和地区开展了煤层气勘探、开发和研究活动。美国率先成功地实现了商业性开发并获得巨大的经济效益，形成了煤层气工业体系，在煤层气基础理论、勘探和评价方法、开采工艺和设备等方面积累了丰富的经验。

我国的煤层气远景资源量十分可观，80年代以来先后针对全国和一些重点煤田或矿区的煤层气资源状况、赋存规律、控气地质因素进行了初步调查和研究。近年来，中联煤层气有限责任公司、煤炭工业部、中国石油天然气总公司、地质矿产部和国外有关公司分别在华北、东北和华南施工了一批煤层气参数井或生产试验井，建立了煤层气开发示范区。就煤层气工业性开发状况而言，我国目前尚处于试验和起步阶段。

我国煤层气资源的生成、赋存、富集和开采技术条件取决于我国的煤田地质条件、煤层含气性、煤储层物性和盖层的特征。我国煤层气资源具有低压、低渗透率、低饱和、构造煤发育以及一些高煤级煤储层中打出了高产气井等特点。还应当看到，富煤区并不是都可以进行煤层气勘探的，而富煤层气远景区也不是均为煤层气富集高产区。我国煤层气开发前景应在引进、借鉴国外先进理论和经验的同时，认真总结、探索适合我国地质特点的煤层气基础地质理论、选区评价标准，建立起适合我国地质特点的煤层气资源评价、勘探开发、开采工艺和测试技术的方法体系，以期早日实现我国煤层气工业性开发的突破。本书基于这一认识，在煤层气基础理论、评价标准等方面做了一些研究尝试。

二 含煤层气系统的整体研究

含煤层气系统的整体研究是开展山西南部煤层气地质研究的方法论。含煤层气系统包括已形成的煤层气藏、煤层气源岩——煤层、煤储层、盖层、上覆岩层和煤层气藏形成时的一切地质作用及其合理的时空配置。只有将含煤层气系统作为一个整体进行综合研究，才能客观查明煤层气的赋存规律、准确确定煤层气富集高产带。山西南部煤层气地质的研究，正是按照这一思路将恢复含煤岩系的沉积—聚煤史、构造—埋藏史、地热—生烃史、煤层气聚集—保存史贯穿于含气性、煤储层、盖层和上覆岩层的研究之中，以寻找“关键时刻”出现或发生的地史位置及特征，进而查明研究区煤层气的生成、储存、封盖、运移、聚集和保存的特点，同时在某些基础地质理论和研究方法方面进行了有益探索。

区域构造应力场包括古构造应力场和现代构造应力场。它对于煤层气的聚集、逸散以及煤层气的开采地质条件有着重要影响。应用ADINA程序可有效地进行构造应力场弹塑性有限元模拟分析，从而查明构造应力场的空间变化规律及其动力学特征。

古地热场特征直接控制着煤层在地质历史中受热的温度、速率和强度，区域构造史和煤

层埋藏史是通过区域古地热场发展史而影响煤层气的生成演化历程的。煤系地层中流体包裹体的矿物学性质和地球化学特征是古地热场热力学环境的真实反映，通过对含煤地层热液脉体中流体包裹体捕获温度、形成压力、流体成分、稳定同位素组成等的测试分析，不仅可为古地热场特征的确定提供基本物质依据，而且在煤层埋藏、煤层气生成、二次生烃、盆地构造演化乃至异常古地热场的形成机理等方面也可获得了丰富的有价值的信息。

煤中有机质演化和煤层气生成是古地热场作用的结果，基于化学反应动力学原理的数值模拟方法是定量恢复煤热演化历程的唯一途径，EASY%R。法数值模拟是恢复煤热演化历程的一种有效方法。

煤的二次生烃作用取决于其受热历史。在异常古地热场情况下，二次生烃作用发生的最重要的地质条件是煤层再次受热的最高温度，只要在一定作用时间内这种温度高于一次埋藏期的最高受热温度，生烃作用就有可能再次发生。山西南部石炭—二叠系煤的生烃历程是不连续的，在燕山中期出现二次生烃，其平均生气量占总生气量的68%，是影响研究区煤层现今含气性的最为重要的因素之一。鉴于我国区域地质构造特点，二次生烃作用在我国上古生界煤的生烃历程中占有重要的地位。

有效生气阶段是指对煤层气保存具有决定性贡献并为当前煤层原位气体提供主要气源的生气阶段。该阶段煤层有机质的气体发生率为有效阶段生产率。控制山西南部石炭—二叠系煤层中煤层气相对富集的生烃因素是二次生烃作用的历程、程度及其后来的埋藏历史。

可选用理论饱和系数、比表面积系数、可解吸率、渗透率、煤厚变异系数、煤层分岔系数、盖层突破压力指数等参数表示煤储层的储集性能和盖层的封盖性能，以定量确定储、盖层类型并进而查明对煤层气聚集最佳的储盖组合类型及其分布，从面为煤层气地质选区评价奠定基础。

新区评价的首要基础是进行煤层含气性预测，含气梯度法、煤级—灰分—含气性法和综合分析法均是含气性预测的重要方法。含气梯度法主要适用于同一构造单元中的深部外推预测区或不同构造单元之间基本地质条件相似的预测区，其可靠性较高。煤级—灰分—含气性法是一种预测推断区煤层含气性的基本方法，对于已经进行过煤质预测的区域也可考虑应用该方法。综合分析法是在基本上没有煤层、煤质和含气性实测资料的条件下预测煤层含气性的唯一可行的方法。

煤层气可采潜势是地质选区和经济评价的重要指标，它受控于吸附—解吸性、孔隙分布、储层压力等煤储层的物理性质，在对含气性、兰氏参数、临界解吸压力、废弃压力等研究的基础上建立起来的“煤层气理论采收率”，是在勘探前期阶段定量评价煤层气可采潜势的有效参数。

煤层气地质选区评价是建立在含煤层气系统整体研究的基础之上的，也是含煤层气系统整体研究的主要组成部分。地质选区评价的基本要素包括含气性、煤储层特性、盖层特性及其所呈现的多种基本参数。结合不同地区的控气地质条件，在确定选区地质评价标准之前应对有效参数进行分析筛选，并在充分考虑研究区地质背景因素的基础上对煤层气开发前景和有利地区做出综合评价和筛选。

三　我国煤层气工业性开发的新曙光

煤层气作为下一世纪新的重要洁净能源，已逐渐为我国政府和有关工业部门所认识，开发和利用煤层气资源已迅速提到我国能源建设和环境保护的议事日程上来。近年来，中联煤

层气有限责任公司、煤炭工业部、中国石油天然气总公司、地质矿产部及所属有关高校和生产单位竞相开展煤层气资源的研究调查工作，已施工90余口煤层气资源评价井和生产试验井，并分别在山西柳林和河北开滦建立起煤层气开发示范区。尽管我国煤层气开发目前仍有待于新的突破，但在煤层气资源分布、选区评价和工艺技术试验等方面已积累了大量资料和宝贵的经验教训。

煤层气的生成、储存、封藏和运移、聚集、保存，不同于常规天然气，也不同于煤层的赋存，其勘探特点和开采工艺更有别于常规天然气和固体煤炭。我国煤层气的含气性、煤储层和盖层特点以及地质背景条件，更不同于美国的圣胡安和沃里尔盆地。因此，必须充分认识我国煤层气勘探和开发的复杂性和特殊性。在借鉴国外成功理论和技术的同时，一定要立足于我国煤层气资源的特点和地质背景条件，在加强含煤层气系统整体研究的同时有必要总结并建立适合于我国特点的煤层气基础地质理论和评价标准。在选区评价的基础上，应该进行勘探开发试点，并对开发技术和工艺组织实施攻关研究。

我国煤层气商业性开发的新曙光已经呈现，作为研究者和探索者，我们盼望工业性开发利用我国煤层气洁净能源的时代早日到来！

主要参考文献

1 山西地质矿产局.1989.山西区域地质志.北京:地质出版社

2 王大曾主编.1992.瓦斯地质学.北京:煤炭工业出版社

3 王志强,王立新.1987.华北石千峰下部晚二叠世植物化石.天津地质矿产研究所所刊,15号:1～80

4 包茨主编.1988.天然气地质学.北京:科学出版社

5 布鲁斯克.1987.有机质成熟作用研究与矿物燃料勘探.高品文译.北京:石油工业出版社

6 卢焕章,李秉伦,沈昆等主编.1990.包裹体地球化学.北京:地质出版社

7 任纪瞬,陈延愚,牛宝贵等.1990.中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿.北京:地质出版社

8 李明潮,张五侨等.1990.中国主要煤田的浅层煤成气.北京:科学出版社

9 李曙光,郑双根等.1988.中国华北华南陆块碰撞时代的钐—钕同位素年龄证据.中国科学(B辑),25(3)

10 许志琴,卢一伦,汤耀庆等.1988.东秦岭复合山链的形成.北京:中国环境出版社

11 肖贤明.1992.有机岩石学及其在油气评价中的应用.广州:广东科技出版社

12 何知礼.1982.包体矿物学.北京:地质出版社

13 何锡林,朱梅丽,范秉恒等.1995.山西太原东山晚古生代地层划分对比及古生物研究.长春:吉林大学出版社

14 沈平,徐永昌,王先彬等.1991.气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究.兰州:甘肃科学技术出版社

15 陈荣书主编.1986.天然气地质学.武汉:中国地质大学出版社

16 陈墨香主编.1988.华北地热.北京:科学出版社

17 张文淮,陈紫英.1993.流体包裹体地质学.武汉:中国地质大学出版社

18 张世民,刘光勋.1993.山西及邻区新构造运动分区及其特征概述.见:马宗晋主编.山西临汾地震研究与系统减灾.北京:地震出版社,23～30

19 张抗.1989.鄂尔多斯断块构造和资源.西安:陕西科学技术出版社

20 张新民.1990.蒙特卡罗法在煤层甲烷资源量计算中的应用.煤田地质与勘探,18(5):24～28

21 张新民,张遂安,李静等.1992.中国煤层甲烷.西安:陕西科学技术出版社

22 武守诚.1994.石油资源地质评价导论.北京:石油工业出版社

23 武烈,贾宝卿,赵学普.1993.山西地震.北京:地震出版社

24 杨起,潘治贵,翁成敏等.1988.华北石炭二叠系煤变质特征与地质因素探讨.北京:地质出版社

25 国家地震局.1994.鄂尔多斯周缘活动断裂系.北京:地震出版社
26 赵新平,啜永清,傅昌洪等.1993.临汾盆地小震应力降及介质Q值的研究.见:马宗晋主编.山西临汾地震研究与系统减灾.北京:地震出版社,295～301
27 秦勇.1994.中国高煤级煤的显微岩石学特征及结构演化.徐州:中国矿业大学出版社
28 秦勇,刘焕杰,范秉恒等.1997.山西南部上古生界煤层含气性研究:Ⅱ,推断—预测区煤层含气性预测.煤田地质与勘探,25(6):18～22
29 秦勇,刘焕杰,范秉恒等.1998.山西南部上古生界煤层含气性研究:Ⅲ,煤层气可采潜势分析.煤田地质与勘探,26(1):26～30
30 秦勇,刘焕杰,桑树勋等.1996.煤层气资源综合评价标准及实例研究.中国煤层气,(2):91～93
31 秦勇,刘焕杰,桑树勋等.1997.山西南部上古生界煤层含气性研究:Ⅰ,推定区煤层含气性评价.煤田地质与勘探,25(4):25～30
32 秦勇,宋党育.1997.山西南部晚古生代煤的煤化作用及其控气特性.煤炭学报,22(3):230～235
33 秦勇,宋党育,王新华.1995.有机地质温度计——镜质体反射率化学动力学模式及其应用.矿业世界,(3):6～12
34 秦勇,桑树勋,刘焕杰等.1998.煤层气生成与富集:II,有效阶段生气量的计算方法.煤田地质与勘探,26(2):25～29
35 秦勇,曾勇主编译.1996.煤层甲烷评价与生产技术.徐州:中国矿业大学出版社
36 桑树勋,刘焕杰,李贵中等.1997.煤层气生成与富集:Ⅰ,有效阶段生气量与煤层气富集.煤田地质与勘探,25(6):14～17
37 桑树勋,刘焕杰,范秉恒,秦勇.1996.含煤盆地煤层气资源量计算方法.中国煤层气,(2):106～109
38 黄汲青,任纪瞬,姜春发等.1977.中国大陆构造基本轮廓.地质学报,(2):117～135
39 黄第藩,华阿新,王铁冠等.1992.煤成油地球化学新进展.北京:石油工业出版社
40 常朝辉.1977.山西省二叠系顶界——"石千峰"地层时代问题.山西地质科技,(2):22～39
41 程守田,谢习农.1991.煤层气地质(试用教材).武汉:中国地质大学出版社
42 程保洲主编.1992.山西晚古生代沉积环境与聚煤规律.太原:山西科学技术出版社
43 程淇裕,沈永和,曹国权等.1994.中国区域地质概论.北京:地质出版社
44 斯塔赫 E 等.1990.斯塔赫煤岩学教程.杨起等译.北京:煤炭工业出版社
45 傅家谟,刘德汉,盛国英主编.1990.煤成烃地球化学.北京:科学出版社
46 谢富仁,刘巍,梁海庆等.1993.山西断陷带及周缘构造应力场.见:马宗晋主编.山西临汾地震研究与系统减灾.北京:地震出版社,59～66
47 潘钟祥.1986.石油地质学.北京:地质出版社
48 戴金星,裴锡古,戚厚发主编.1992.中国天然气地质学(卷一).北京:石油工业出版社
49 Mattauer M et al.. 1985. Tectonic of Qinling belt:buildup and evolution of eastern Asia. Nature,37(6):496～500
50 Scott A D. 1995. A modified approach to estimating coalbed gas resources: a example

from Sand Wash Basin, Colorado. Bull. AAPG, 79(9)

51 Sweeney J J and Burnham A K. 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. Bull. AAPG, 74(10): 1559～1570