

国家自然科学基金资助项目部分研究成果
煤炭科学基金资助项目部分研究成果
煤炭高校跨世纪学术带头人基金资助项目部分研究成果

山西南部煤化作用 及其古地热系统

——兼论煤化作用的控气地质机理

秦 勇 宋党育 著

地 质 出 版 社

P612.110.2

Q-924

国家自然科学基金资助项目部分研究成果

煤炭科学基金资助项目部分研究成果

煤炭高校跨世纪学术带头人基金资助项目部分研究成果

山西南部煤化作用 及其古地热系统

——兼论煤化作用的控气地质机理

秦 勇 宋党育 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

880733

内 容 提 要

本书作者采用构造史—煤层埋藏史—古地热史—烃类生成和保存历史及其数值模拟的地质综合研究思路,并应用流体包裹体分析、电子顺磁共振波谱、压汞、低温液氮、煤的地球化学、有机岩石学、EASY%R法化学反应动力学数值模拟等方法 and 手段,反演了山西南部晚古生代主煤层的埋藏历史、受热历史以及烃类的生成历史,查明了煤化作用显现特征及其作用因素的空间分布格局和演化历史,深入探讨了煤化作用发生、发展以及对煤层气控制的地质机理,进而从煤化作用以及煤层气生成和保存角度,对区内煤层气的勘探开发前景进行了评价。

本书对从事沉积盆地分析、煤层气地质研究、石油天然气资源评价的科研人员、研究生、本科生以及现场生产人员具有参考使用价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

山西南部煤化作用及其古地热系统:兼论煤化作用的控气地质机理/秦勇,宋党育著.-北京:地质出版社,1998.8

ISBN 7-116-02534-0

I. 山… I. ①秦… ②宋… III. ①煤化作用-山西-古生代②地热-山西-古生代 N. P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 2083 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:牟相欣 王 璞

责任校对:关风云

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:5.875 铜版图:1 页 字数:137000

1998 年 8 月北京第一版·1998 年 8 月北京第一次印刷

印数:1—400 册 定价:13.00 元

ISBN 7-116-02534-0

P·1875



(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

作者简介



秦勇,男,1957年生,重庆市人。博士,教授,博士生导师。1974年3月下乡锻炼,1975年11月进入地质勘探队当物探工人,1982年1月毕业于焦作矿业学院地质系并获学士学位,1981~1983年在山西省大同矿务局任技术员和助理工程师,1986年7月至今在中国矿业大学地质系从事煤田、油气地质方面的教学和科研工作。1983~1986年和1989~1991年先后在中国矿业大学北京研究生部和地质系学习,分别获得硕士和博士学位。正式发表学术论文60余篇,独著或合作出版学术专著7部,先后获“中国图书奖”、“国家教委科技进步三等奖”、“中国石油天然气总公司科技进步三等奖”、“国家教委优秀学术著作奖”、“江苏省优秀课程一等奖”等奖励。



宋党育,男,1972年生,河北省沧州市人。硕士,讲师。1989~1994年以及1994~1997年期间在中国矿业大学地质系煤田、油气地质与勘探专业学习,先后获得学士学位和硕士学位,现在中国矿业大学出版社从事编辑工作。正式发表学术论文6篇,合作出版学术专著2部。

目 录

绪 论	(1)
第一章 研究基础	(3)
第一节 煤层气生成演化的地质背景	(3)
一、地层及煤层	(3)
二、区域构造与煤田构造	(6)
三、岩浆活动	(8)
四、区域地质发展史	(8)
第二节 前人研究成果	(9)
一、地质温度计及其理论基础	(9)
二、前人相关研究成果	(12)
第三节 问题的提出及研究思路	(13)
一、问题的提出	(13)
二、研究目的及内容	(14)
三、研究方法 & 流程	(15)
第二章 煤化作用的物质显现特征	(18)
第一节 主煤层的显微岩石学特征	(18)
一、煤岩显微组分	(18)
二、镜质组反射率	(22)
第二节 主煤层的有机地球化学特征	(24)
一、有机组成及统计结构	(24)
二、电子顺磁共振特征	(27)
第三节 主煤层的孔隙性特征	(29)
一、孔容-孔径和孔隙率分布	(30)
二、孔比表面积	(32)
三、孔隙特征的煤化作用趋势	(33)
第四节 主煤层煤级展布	(35)
第五节 小结	(36)
第三章 煤层的埋藏历史	(38)
第一节 煤系上覆地层厚度恢复	(38)
第二节 煤层埋藏历史与埋藏阶段	(40)
第三节 煤层埋藏史地质模式	(42)
一、“V”型埋藏模式	(42)
二、“W”型埋藏模式	(43)
三、“反N”型埋藏模式	(43)

第四节 小结	(44)
第四章 古地热场发展史	(46)
第一节 地热场要素	(46)
第二节 区域古地热场演化	(47)
一、地质历史分析	(47)
二、EASY%Ro法数值模拟	(49)
第三节 晚中生代异常古地热场	(52)
一、异常古地热场特征的数值模拟和电子顺磁共振分析	(52)
二、包裹体热物理性质与异常古地热场要素	(54)
三、包裹体地球化学与异常古地热场形成机制	(56)
第四节 小结	(61)
第五章 煤的热演化及生烃历史	(62)
第一节 煤的热演化历史	(62)
一、数值模拟方法	(62)
二、煤的热演化历程	(64)
第二节 煤的生烃演化历史	(67)
一、烃类生成的理论基础	(67)
二、煤层气生成演化特征	(69)
第三节 煤的二次生烃作用	(72)
一、二次生烃条件	(72)
二、二次生烃特征	(72)
第四节 小结	(73)
第六章 煤化作用的控气特征	(75)
第一节 煤级展布与煤层含气性	(75)
一、煤级与煤层含气性	(75)
二、煤级控气地质机理	(76)
第二节 煤层埋藏史与煤层气保存	(77)
一、煤层埋藏类型的控气特征	(77)
二、煤系上覆基岩厚度与煤层含气性	(78)
第三节 二次生烃强度与煤层含气性	(81)
第四节 煤层气勘探前景评价	(83)
第五节 小结	(84)
结 论	(85)
主要参考文献	(87)
图版说明及图版	(90)

绪 论

盆地古地热场特征直接影响到沉积有机质的热演化历史、物理化学性质、成熟度及其展布,进而对沉积有机质的生烃演化历程起着决定性的控制作用。查明盆地的古地热场特征,研究煤的生烃演化历史,是煤层气资源勘探开发前期评价与预测中的重要工作和依据之一;对发展煤层气地质基础理论,深化含煤(油气)盆地演化的研究也具有积极意义。

研究区位于山西省南部,东临太行山,西至吕梁山,南到晋城—阳城—翼城一线,北至平遥—孝义—榆社一带,南北长约170 km,东西宽约150 km,面积近26 000 km²,覆盖沁水煤田中部、南部和霍西煤田,包括晋城、阳城、沁水、翼城、屯留、沁源、古县、霍州等矿区及临汾盆地(图0-1)。本区不仅是我国重要的煤炭产地,也是我国目前煤层气勘探开发的热点地区之一。

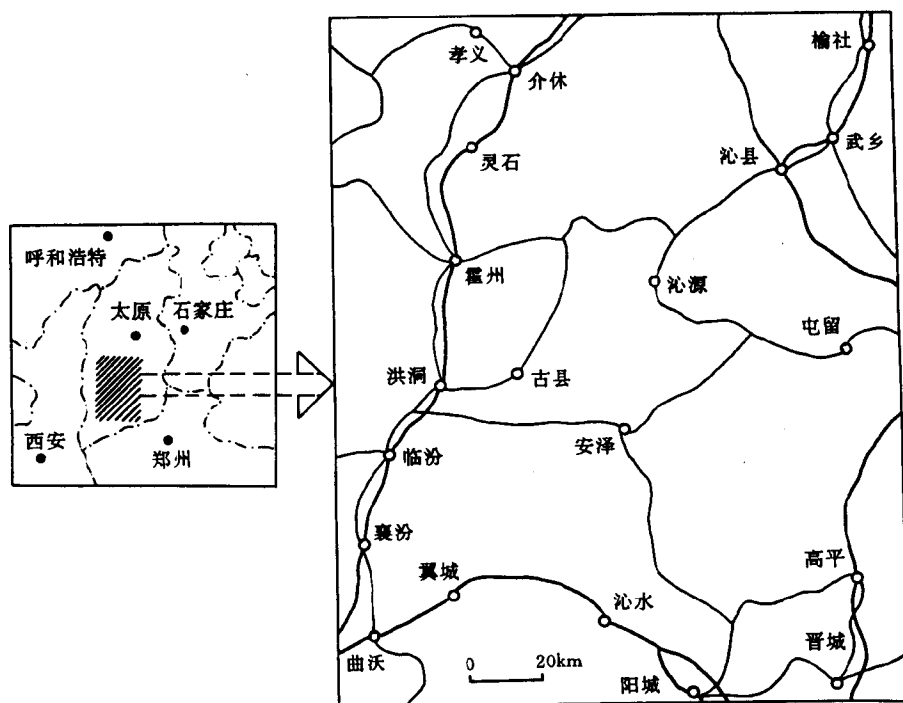


图 0-1 研究区位置示意图

鉴于上述原因,作者在野外和矿井地质调查的基础之上,围绕煤层气资源预测这一主题,对研究区晚古生代煤的生气历史以及古地热场背景进行了研究。研究工作历时1年零8个月,先后两次(共4个月)对研究区进行野外地质考察和矿井地质调查,收集了前人研

究成果和基础地质资料,采集煤、岩石、煤系中发育的石英及方解石脉体等样品共 400 余件,并对各现采矿区主采煤层及顶板的割理裂隙发育状况进行了观察测量。室内工作主要包括:镜质组反射率测定,煤岩显微组分定量,石英及方解石脉体样品处理及包裹体薄片制备,包裹体镜下观察照相,包裹体温度、压力、成分和稳定同位素测定,煤样化学提纯及电子顺磁共振波谱分析,岩样粉晶 X 射线衍射分析,EASY%R.法和 TTI 法数值模拟软件的编制等。

在上述工作的基础之上,作者取得了以下主要研究成果:

(1)应用流体包裹体分析、电子顺磁共振等方法,结合对煤层沉积埋藏史的恢复,对研究区煤化作用古地热场特征及形成机理进行了研究,并应用国外新创立的 EASY%R.法和自己编制的数值模拟软件,反演出研究区自晚古生代以来的古地热历史。其中:流体包裹体地球化学技术应用的系统性和完整性,在本区尚属首次;EASY%R.数值模拟方法的应用成果,在国内尚未见诸报道。

(2)在利用多种方法恢复煤层沉积埋藏史和煤化作用古地热史的基础上,研究了晚古生代煤的热演化历史、生烃历程及其空间分布特征,指出本区燕山期曾存在着异常古地热场,由于异常古地热场的作用致使煤的二次生烃作用显著。进而,从生烃演化和气体赋存角度,对研究区煤层气的开发前景进行了初步评价。

本书成果属于秦勇教授主持的国家自然科学基金项目“高煤级煤储层物性及其控气特征”以及煤炭科学基金项目“前勘探区煤层气有利区带优选新方法”的部分研究内容。地质调研得到了山西汾西矿务局、霍州矿务局、晋城矿务局、潞安矿务局以及有关地方煤矿的大力协助,测试工作得到了中国地质科学院矿床地质研究所、中国科学院生物物理研究所等单位的帮助,刘焕杰教授、王桂梁教授、邵振杰教授、贾玉茹教授、曾勇教授、范秉恒博士、桑树勋博士、张有生博士以及美国 Amoco 东方石油公司杨振东博士、Matcalfe 博士等对研究工作提出了许多宝贵建议,在本书正式出版之际,作者对上述单位和个人谨致谢意。

第一章 研究基础

本章首先叙述研究工作赖以开展的煤层气地质背景, 简要阐述古地热场研究的理论基础, 同时回顾前人在区域和本区所取得的有关研究成果。以此为基础, 作者指出了本区古地热场研究中存在或需要深化的 5 个方面的主要问题, 进而提出本书的研究思路、拟研究的主要内容以及研究流程。

第一节 煤层气生成演化的地质背景

煤层气是煤化作用的产物, 煤化作用特征和历史受控于煤层埋藏史、区域构造史、岩浆活动史、古地热场演化史等地质因素。因此, 了解地质背景条件, 分析区域地质发展历史, 乃是开展古地热场和生烃演化特征研究的首要前提。

一、地层及煤层

(一) 地层

研究区地层见图 1-1。各时代出露地层自下而上分述如下。

1. 前寒武系

本区前寒武系包括太古宇和元古宇, 是华北地台沉积的基底, 厚度巨大。区内该套地层露头主要见于太岳山隆起区古县至洪山一带, 呈北北东向长条状展布, 在南部边缘和西部边缘也有零星出露。

2. 下古生界

区内下古生界包括寒武系和奥陶系, 与前寒武系呈不整合接触(局部为整合接触), 发育程度不一, 缺失志留系。

寒武系与上覆奥陶系之间为整合接触, 露头主要分布于吕梁山地区, 地层厚度为 217~540 m。寒武系下部以紫色泥页岩发育为特征, 中上部以灰岩和白云岩为主。

奥陶系和华北地区相同, 仅发育下统和中统, 自下而上为下奥陶统的冶里组、亮甲山组、下马家沟组、上马家沟组和中奥陶统的峰峰组, 地层厚度为 509~670 m, 主要出露于吕梁山地区。下部主要为白云岩、含燧石白云岩, 上部主要由灰岩、含蠕虫状和豹皮状白云质细条痕灰岩以及泥灰岩组成。

3. 上古生界

本区上古生界由石炭系和二叠系组成, 缺失泥盆系。

石炭系仅发育上统的本溪组和太原组, 与下伏地层呈不整合接触, 是一套海陆交互相的重要含煤地层。本溪组底部为山西式铁矿, 下部是含铁铝土岩、铝土岩和铝土质页岩, 夹 1~2 层铁矿, 上部为页岩、碳质页岩夹煤线和 1~2 层灰岩, 总厚度为 10~30 m。太原组连续沉积于本溪组之上, 为一套海陆交互相沉积。主要岩性为砂岩、灰岩、泥岩、砂质泥岩、碳质页岩、铝土质页岩或粘土夹煤线、煤层, 形成数次的海侵海退旋回结构, 厚度约

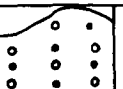
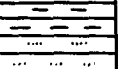
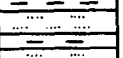
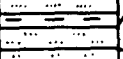
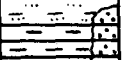
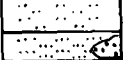
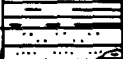
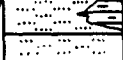
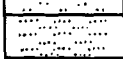
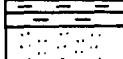
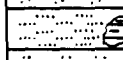
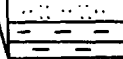
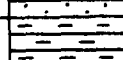
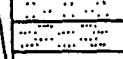
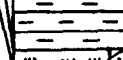
年代地层	岩石地层	层号	柱状剖面	层厚 m	累积 厚度 m	岩性描述
第四系		18		$\frac{0 \sim 18.0}{7.0}$	7.0	松散沉积物
二 叠 系	石千峰组	17		$\frac{13.4 \sim 46.2}{33.5}$	40.5	上部为砂岩,下部为粉砂岩、细砂岩
	上 石 盒 子 组	16		$\frac{25.34 \sim 73.3}{36.7}$	77.2	粉砂岩和泥岩互层
		15		$\frac{4 \sim 15.7}{7.15}$	84.37	K ₁₅ 分选较好的细粒砂岩
		14		$\frac{25.8 \sim 89.2}{40.1}$	124.3	泥岩、粉砂岩和细砂岩互层,夹粗砂岩
		13		$\frac{5.1 \sim 11.8}{6.9}$	131.4	K ₁₃ 中—粗砂岩
		12		$\frac{27.1 \sim 148.9}{61.06}$	192.47	以中—粉砂岩为主,顶板为泥岩、泥页岩
		11		$\frac{3 \sim 12.7}{6.5}$	199.0	K ₁₁ 中砂岩
		10		$\frac{63.9 \sim 282.8}{116.9}$	316.0	中—粉砂岩夹泥岩
		9		$\frac{3.0 \sim 9.7}{5.5}$	321.5	K ₉ 粗砂岩
	下石盒子组	8		$\frac{43.2 \sim 170.3}{104.2}$	382.5	以细—粉砂岩和泥岩为主
		7		$\frac{3.4 \sim 12.5}{6.5}$	410.7	K ₇ 分选较好的细粒砂岩和中粒砂岩
	山西组	6		$\frac{2.0 \sim 82.8}{25.2}$	439.9	砂岩、泥岩夹 2°、3° 煤层
石 炭 系	太原组	5		$\frac{0 \sim 88.2}{27.4}$	463.1	粉砂岩、泥岩、灰岩夹 5°、7° 煤层
		4		$\frac{8.7 \sim 92.3}{45.8}$	508.9	粉砂岩、灰岩夹 12°、13° 煤层
		3		$\frac{2 \sim 38.9}{17.7}$	526.6	粉砂岩、泥岩夹 15° 煤层
	本溪组	2		$\frac{9 \sim 25.4}{9.3}$	535.9	钙质泥岩、泥岩夹粉砂岩透镜体
奥陶系	峰峰组	1		$\frac{3 \sim 12.0}{7.5}$	543.3	灰岩

图 1-1 研究区东部沁水盆地地层综合柱状图

50~135 m。其底界以 K_1 砂岩为分界标志, 顶界位于 K_7 层位底部。

二叠系在区内广泛出露, 包括下统的山西组和下石盒子组以及上统的上石盒子组和石千峰组, 总厚度为 470~1065 m。山西组自 K_7 砂岩底部至 K_8 砂岩底部, 地层厚度为 20~86 m, 岩性以砂岩、砂质泥岩和煤层为主。下石盒子组整合于山西组之上, 从 K_8 砂岩底到 K_{10} 砂岩底, 以黄绿、灰绿、杏黄砂岩和泥岩为主, 顶部为紫色砂岩、泥岩, 厚度差别较大, 变化于 60~160 m 之间, 但沉积相序相似。上石盒子组包括 K_{10} 砂岩至 K_{14} 砂岩底之间的地层, 以一套湖相和河流相沉积的砂岩为主, 厚度为 300~644 m。石千峰组是二叠系顶部地层, 为一套干旱气候条件下的开阔湖相沉积, 岩性较简单, 全区稳定, 由紫红、砖红色泥岩夹黄绿色、紫红色砂岩、陆相泥灰岩和灰质泥岩组成, 厚 90~175 m。

4. 中生界

本区中生界仅见到三叠系和侏罗系, 其中前者分布广泛, 后者仅有零星赋存。

三叠系自下而上包括下三叠统的刘家沟组及和尚沟组、中三叠统的二马营组和铜川组以及上三叠系的延长组, 最大厚度超过 2300 m (表 1-1)。三叠系在区内出露不全, 其顶部与侏罗系呈不整合接触, 底界与二叠系整合接触。刘家沟组以砂岩为主, 厚 338~585 m; 和尚沟组以紫红色—砖红色砂质泥岩和泥岩为主, 厚度为 193~272 m; 二马营组由灰绿、黄绿、灰白色长石砂岩、砂质泥岩和泥岩组成, 厚度为 488~669 m; 铜川组由灰黄、浅灰红色长石砂岩及砂泥岩、页岩组成, 厚度为 414~634 m; 延长组由黄绿、灰绿、灰黄中厚层中细粒长石砂岩夹灰绿、黄绿、灰黑色砂岩泥岩组成, 由于受到强烈的剥蚀, 残余厚度变化较大, 厚 30~477 m。

表 1-1 山西南部部分地区三叠系厚度分布

地 点	地 层 组 厚 度/m					总 厚 度 m
	刘家沟组	和尚沟组	二马营组	铜川组	延长组	
武 乡	575	248	488	414	77	1802
平 遥	585	272	615	574	79	2125
沁 源	343	193	675	554	>30	>1795
临 汾	338	201	669	634	477	2319

据区调资料, 区内尚有中侏罗统残存, 不整合于三叠系之上, 主要分布于临汾、古县、榆社等地。在临汾、古县一带发现中侏罗统云岗组出露 (图 1-2), 在榆社一带见到中侏罗统天河组, 其层位高于云岗组, 岩性主要为黄绿色、紫红色砂岩和砂质泥岩, 两组残留厚度大于 750 m。

5. 新生界

本区新生界主要见有第三系上新统和第四系, 分布于新生代断陷盆地、黄土丘陵地带和山间小盆地中, 厚度不等; 在

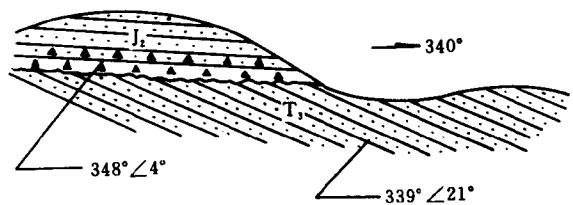


图 1-2 临汾贺家庄中侏罗统地层剖面图
(据徐志斌等, 1996)

大多数地区分布零星, 仅在临汾盆地其厚度较大, 达 1500~2000 m。

(二) 煤层

太原组和山西组是本区的主要含煤地层, 平均总厚度为 146 m, 含煤 10 余层, 煤层平均总厚度为 10.43 m, 含煤系数为 7.51%。

研究区东、西部煤层的发育特征有所差异, 煤层编号亦有所不同。太原组主采煤层在东部的沁水盆地称为 3 号煤层, 在西部的霍西煤田称为 2 号煤层; 山西组主采煤层在东、西部分别为 15 号煤层和 9~11 号煤层。为叙述方便, 本文采用中国矿业大学资源与环境学院煤层气研究中心的煤岩层对比成果 (1996), 将研究区太原组和山西组的主采煤层分别统称为上主煤层和下主煤层。

上主煤层厚 1.0~7.0 m, 煤厚变化总趋势是东南部厚而向西北方向变薄。在东南部的晋城、阳城、潞安一带以及西北角的介休附近大于 5 m, 在西北部的灵石、中部的古县和安泽、西南部的洪洞和临汾等地一般为 1~2 m, 煤层顶板多为泥岩, 少数为砂质泥岩、粉砂岩和细砂岩。

下主煤层厚 1.0~6.8 m, 南北厚, 中部薄, 煤厚分带呈近东西向展布。煤层厚度在中带一般小于 3 m, 在南、北带均在 3 m 以上。煤层直接顶板在大部分地区为灰岩, 在西北部及其它局部地区出现泥岩和砂岩分布区。

上、下主煤层在全区分布, 其中煤层气预测资源量占研究区煤层气总资源量的 85%, 是为本区煤层气勘探开发的主要目的煤层。

二、区域构造与煤田构造

研究区位于吕梁-太行断块的西南部, 西部以离石大断裂为界与鄂尔多斯断块的兴县-石楼褶皱带与关王庙褶皱带相接; 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相接, 东部以晋获大断裂 (太行山断裂) 为界与太行山隆起相接 (图 1-3)。吕梁-太行断块占据了研究区的大部分地区, 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, 中间拗陷。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, 由一系列断层和褶皱组成, 中西侧构造则较为简单, 总体上为一盆状复向斜 (霍西煤盆地); 中部为沁水拗陷, 总体上为一向斜构造, 核部为三叠系, 两翼依次为二叠系、石炭系、奥陶系、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、古元古界变质岩系, 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, 其内发育有南北向、北东向褶皱及逆冲断层。

本区被一系列断层切割成不同规模、不同方向的断块, 在各次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。勐香-太林南北向褶皱带位于本区西部, 为一总体走向近南北的正弦曲线状复向斜, 中间为石炭二叠纪地层, 两翼平缓, 倾角一般在 10° 左右。阳泉曲-汾西盆状复向斜展布在孝义县阳泉曲、汾西县及其以南, 构成霍西 (汾西) 煤盆地, 两侧地层产状平缓, 倾角一般在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。

霍山隆起带位于沁水拗陷西缘, 带内地层西翘东倾, 倾角一般 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$, 自西向东依次出露前寒武系、寒武系、奥陶系和石炭系, 褶皱不太发育, 主要发育数条纵向逆冲断层。东缘正断层总体呈向东突出的弧形构造, 西缘为霍山大断裂, 断距大于 1000 m, 南段主断面

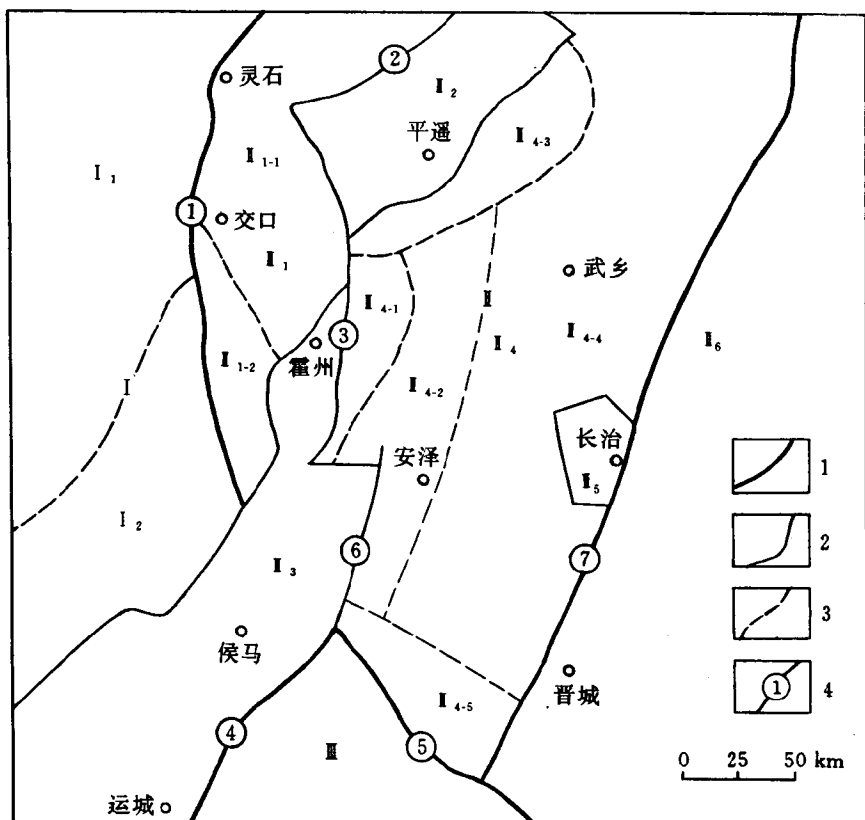


图 1-3 山西中南部构造单元划分示意图

(据云武, 1996)

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；I₁—兴县-石楼褶皱带；I₂—关王庙褶皱带；II—吕梁-太行断块；II—吕梁隆起带
(II₁₋₁—阳泉曲-汾西盆地；II₁₋₂—勋香-太林褶皱带)；I₂—晋中断陷；I₃—临汾-运城断陷；I₄—沁水坳陷；
(I₄₋₁—霍山隆起带；I₄₋₂—郭道-安泽褶皱带；I₄₋₃—普洞-来远褶皱带；I₄₋₄—武乡-阳城褶皱带；
I₄₋₅—西闫-芹池褶皱带)；I₅—长治断陷；I₆—太行山隆起；III—豫皖断块

I₄₋₅—西闫-芹池褶皱带)；I₅—长治断陷；I₆—太行山隆起；III—豫皖断块

西倾，新生代活动强烈，西盘明显下降。

郭道-安泽南北向褶皱带位于沁水坳陷西部，带内次级褶皱密集成群排列，单个褶皱规模较小，影响深度为 1~3 km，断层不发育，仅在南北两端发育近南北向、北北东向断层。普洞-来远北东东向褶皱带位于沁水坳陷北部，构造极为复杂，北东东向的褶皱和断层呈多字型密集斜列，主体褶皱为走向 70°~80° 的开阔背斜和紧闭向斜，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。武乡-阳城北北东向褶皱带位于本区东部，由一系列北北东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 10° 左右，褶皱规模较大。西闫-芹池近东西向断裂带位于沁水坳陷南缘，主要由一系列近东

西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。

晋中断陷盆地位于榆次—孝义一带，四周被断裂所围限，为一北西深南东浅的不对称地堑型断陷。南东侧基底埋深一般为 200~400 m，中部及北西侧基底埋深一般为 2000 m 以上。基底大部分为三叠系，个别地段有侏罗系及燕山期石英二长岩体。断陷盆地充填物来自上新世至全新世。临汾断陷盆地位于本区的西南部，基底总体上为南老北新，南端为前长城系变质岩，向东北为寒武系、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，石炭二叠系含煤地层最大埋深超过 3000 m。

三、岩浆活动

区内未见燕山早期、晚期和喜马拉雅期岩浆活动的显示。然而，燕山中期是华北晚古生代以来最为重要的岩浆-热事件期，岩浆活动的显示遍及华北全区，山西南部同样存在多处该期岩浆活动的证据。

研究区西南角襄汾—浮山—翼城之间有燕山中期闪长岩体大面积出露，面积达 100 km²。岩体侵位于中三叠统，上覆第三系上新统，放射性同位素年龄为 91~138 Ma，主要集中在 130~140 Ma 之间，即鼎盛期约持续了 10 Ma（表 1-2），属早白垩世岩浆活动产物，并在晚古生代煤系中较为广泛地形成了热液脉体。

表 1-2 研究区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	岩石类型	绝对年龄 Ma	产生时代	采样地点	岩石类型	绝对年龄 Ma	产生时代
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	夕卡岩	130	早白垩世
襄汾老山	二长岩	138	早白垩世	浮山二峰山	夕卡岩	77	晚白垩世

注：引自《中华人民共和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。

在研究区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。在研究区西部霍西煤田未见岩浆岩侵位于晚古生代以来沉积地层的现象，但在霍县东部的峪里、尉家堍、南峪等地见到穿插于太古宇霍县群混合岩化片麻岩中的燕山期闪云煌岩脉。

四、区域地质发展史

加里东期构造运动使华北地台整体隆起，致使研究区缺失了晚奥陶世至早石炭世的沉积。海西运动使华北地台在晚石炭世初期发生沉陷，先后出现了有利于泥炭沼泽发育的海陆交互相和陆相沉积环境，形成石炭二叠纪含煤岩系。

在印支运动的早期，本区地壳沉降速率加大，形成厚度巨大的早三叠世至晚三叠世地层。自印支运动晚期的三叠纪末期开始，本区地壳回返，结束了从石炭纪至三叠纪的连续沉积历程。

燕山运动使本区出现显著的构造分异，沁水盆地在早侏罗世开始形成，并在中侏罗世一度接受沉积，然后盆地再度抬升，地层遭受剥蚀。此期本区岩浆活动活跃，并在晚侏罗世至早白垩世达到高潮。

在喜马拉雅运动的早、中期，本区继承了燕山期的古地理面貌，绝大部分地区一直遭

受剥蚀。至喜马拉雅运动中晚期的晚第三纪,本区构造分异加剧,临汾-运城等断陷盆地开始形成并接受沉积。进入第四纪,这种构造格局进一步加剧,致使临汾、晋中等断陷盆地中第四纪沉积厚度可达2000余米。

第二节 前人研究成果

古地热场研究的基础是查明反映古地热场要素的地质标志及相关的有机质热演化特征。为此,本节将首先简要阐述古地热场要素分析的理论基础,然后回顾与评述前人的相关研究成果。

一、地质温度计及其理论基础

(一) 概述

从广义上来说,凡是对地质历史中古地热场地温具有指示意义的地质标志均可视为地质温度计。目前,在沉积盆地古地热场研究中常用的地质温度计或温标(Geothermal Indicator)主要有以下几种类型:

1. 有机地质温度计,如煤或干酪根的镜质组反射率、固体沥青反射率、镜煤或Ⅲ型干酪根电子顺磁共振参数自由基浓度、动物有机碎屑反射率、孢粉热变指数、可溶有机质分子结构参数甲基菲指数等。其中,前两种参数在煤、油气地质研究中得到了广泛应用,其它参数的研究近年来也取得了长足的进展。

2. 自生矿物特征及(或)组合,包括矿物流体包裹体分析、粘土矿物种类及组合分析、沸石类矿物分析等,其中流体包裹体分析在沉积盆地古地热场研究中应用最为广泛,粘土矿物作为一种定性或半定量的古地温标志,其关于煤化作用古地热场研究的应用成果也常见诸于文献报道。

3. 碎屑矿物的核物理性质——裂变径迹分析,由于该法在研究古地温时常用的矿物为磷灰石,故也常称为磷灰石裂变径迹法。裂变径迹法得到的古地温温度较为准确,可以反映不同地质时期古地温变化的特点,并可据此得到关于盆地物质来源、沉积地层形成年代、沉积速率、地层抬升速率、剥蚀厚度等方面的信息,是近年来低—中温地质温度计研究的热点方向。这种方法主要适用于生油窗范围内的古地温温度,且测定步骤繁琐,在温度范围宽广的煤化作用研究中受到一定限制。

4. 动物无机碎屑光学性质,如牙形石色变指数,广泛地应用于石油天然气源岩的评价,特别是缺乏镜质组的下古生界源岩,但在我国煤化作用的研究中极少采用。这种方法的精度受操作者经验、牙形石种类、碎片部位等因素的影响,故是一种半定量的温标。

(二) 镜质组反射率化学反应动力学模式

镜质组反射率是目前能源地质界所公认的最为有效的地质温度计。镜质组是一种以具有烷基侧链及官能团的稠环芳香结构为基本结构单元、并以桥键相交联的复杂有机缩合物。在热演化过程中,镜质组化学结构中侧链及官能团脱落、芳香环数目及碳网堆砌层数增多、基本结构单元增大、基本结构单元之间有序化程度增高,导致镜质组反射率规律性增大。因此,在镜质组的反射率、其化学结构以及热演化条件之间存在着层次不同的因果关系,这种关系可用化学反应动力学原理加以描述。换言之,根据镜质组反射率,有可能定量估算地质体中有机质在热演化历史中的受热条件,进而反演古地热场特征及其演化历史。

镜质组反射率的增进可以被视为是有机质一级化学反应的结果,其反应效率(Z)与反应时间(t)成正比:

$$Z = k \cdot t$$

式中反应系数(k)可由阿伦尼乌斯化学反应动力学方程给出:

$$k = A \cdot \exp(-E/RT)$$

由此,得出反应效率与受热温度、受热时间及化学结构之间的化学反应动力学方程:

$$Z = A \cdot t \cdot \exp(-E/RT)$$

式中: A ——频率因子,为一常数,表示单位时间内分子碰撞的次数;

E ——反应活化能,是受热温度和物质化学结构的函数;

R ——理想气体常数;

T ——物质受热的绝对温度。

上述化学反应动力学方程表明:镜质组的受热时间与受热温度互成函数关系,受热时间的确定是利用镜质组反射率来反演受热温度的关键之一;若受热时间和受热温度一定,则反应效率(可用镜质组反射率衡量)取决于反应活化能,而活化能的大小极大地受到镜质体物质组成高度非均一性的影响,是镜质组化学组成和化学结构的函数,因此尽可能真实地确定这种函数关系乃是正确恢复古地热场特征的又一关键;根据化学反应动力学原理,只要建立起具体的解析方程,即可通过已知地质变量求取未知地质变量。具体解析方程的完善程度,直接影响到镜质组反射率这种地质有机温度计的实用程度。

基于上述原理,目前已建立起恢复古地热场特征及有机质受热历史的数十种镜质组反射率化学动力学模式,这些模式大致可归纳为四大类型,即简单函数关系模式、受热时间-经验法模式、反应活化能-温度函数模式和平行反应化学动力学模式(秦勇等,1995)。这种排列顺序,也反映出镜质组化学反应动力学模式由片面到全面的逐渐完善和发展的过程。

简单函数关系模式仅简单地描述有机质成熟度(例如镜质组反射率)与受热温度之间的对应关系,对受热条件、有机质类型和组成等因素未加考虑(例如热姆丘日尼柯夫,1948;列文斯坦,1969;阿莫索夫,1976;Epstein,1977;Price,1983),是模式发展的初期产物。

受热时间-经验法模式引入了受热时间的概念,在受热条件中考虑了温度与时间之间的关系,同时也根据模拟实验及实际资料统计结果,引入阿伦尼乌斯一级反应动力学方程,建立起有机质成熟度、受热时间与受热温度之间的数学模式(解析方程)或图解模式(例如:Karweil,1955;Bostick,1971,1978;Teichmuller,1971;Connan,1974;Middleton,1982;Zhijun,1983;Pigott,1985;Antia,1986;Wood,1988;Barker,1989),使模式所依据的理论基础趋于严密。然而,这类模式在理论和方法上存在着明显不足:将反应活化能作为常量看待,由于反应活化能是受热温度的函数,故将其常量化无法真实地反映有机质的热演化状况;均采用地层年龄代表受热时间,忽略了对有效受热时间、有机质成熟作用不可逆性、构造历史及埋藏历史等复杂地质因素的考虑,有可能歪曲地层的受热历史,进而影响到对矿产资源预测评价的准确性;有机质在热演化过程中同时进行着多种化学反应(即平行反应),不同反应所需的活化能是不一样的,此类模式中将所有平行反应均用一个活化能来表示,显然无法反映有机质化学组成的高度非均一性。

反应活化能-温度函数模式的最大特点在于引入了反应活化能,在以阿伦尼乌斯一级反应为理论基础的模式中,明确了反应活化能随有机质成熟度而变化这一事实(例如:

Lopatin, 1971; Waples, 1980; Ritter, 1984; Lerche 等, 1984; Armagnac 等, 1989), 并在某些模式中定义了“有效受热时间”的重要概念(Hood 等, 1975; Bostick 等, 1978)。其中, 目前应用最为广泛的是由 Lopatin (1971) 提出、后由 Waples (1980) 修订的“时间-温度指数(time-temperature index, 简记为 TTI)”模式以及由 Hood (1975) 提出、后由 Bostick (1978) 补充完善的“有机成熟度水平 (level of organic metamorphism, 简记为 LOM)”模式。这类模式明显优于简单的成熟度-温度模式和受热时间-经验法模式。但也存在某些不足: 在特定温度下仅采用平均反应活化能, 不足以代表在宽广温度范围和受热温度下有机质热演化过程中复杂的平行反应; 模式中仍含有较高的经验性成分, 采用不同的经验数值, 对古地热场特征恢复的结果是有差异的。

在平行反应化学动力学模式中考虑到不同的化学反应具有不同反应活化能这一事实, 采用一系列化学动力学方程, 描述出地质体中有机质的热演化(降解)是由一系列平行反应构成的反应过程。Tissot 等 (1984, 1987)、Larter (1988)、Burnham 等 (1989) 先后建立起相关的化学动力学模式, 通过赋予不同平行反应以不同反应活化能的方式, 较为全面地描述了有机质类型和组成与受热条件之间的函数关系。然而, 尽管这类模式在理论上较为完善, 但计算过程过于繁琐, 某些涉及到有机质化学结构的参数也难以选择, 从而限制了模式的推广应用。鉴于此因, Sweeney (1990) 进一步简化了先前模式, 提出名为“EASY %R.” 的数值模拟方法, 使平行反应化学动力学模式朝实用性方面迈进了一步。

目前, EASY %R. 方法已引起国际能源地质界的关注, 并在某些国家和地区得以应用 (Littke, 1994)。可以说, 平行反应化学动力学模式在理论和方法上更为成熟, 是今后模式开发和应用的主要方向。

(三) 矿物流体包裹体分析

矿物包裹体按成因可分为原生包裹体、次生包裹体和假次生包裹体, 按物理状态可分为固体包裹体和流体包裹体。只有原生流体包裹体形成后与外界基本上没有发生物质交换, 保留了成矿流体的成分和性质, 故可反映矿物形成时的物理化学条件, 如温度、压力、成矿溶液盐度和密度、成矿流体来源等。

包裹体测温有淬火法、爆裂法和均一法。淬火法多用于岩浆岩的研究。爆裂法由于受包裹体的形态、成分、主矿物的硬度、解理发育情况、粒度大小及测温过程仪器的影响, 其结果只能作为参考。均一法是包裹体测温的基本方法, 所测均一温度经过压力校正得到包裹体的捕获温度, 指示了矿物形成的下限温度。

流体包裹体的形成压力可以通过流体成分和其 P - V - T - X 特性加以确定, 目前常用方法包括流体蒸气压力法、均一温度——另一个独立地质温度计法、等溶线交互法、含子矿物包裹体估算法等 (张文淮等, 1993)。在本书中, 作者采用等溶线交互法求取煤系脉体包裹体的形成压力, 进而用其对均一温度进行校正以及对脉体形成时含煤地层的古埋藏深度进行反演。

除温度、压力测试外, 流体包裹体分析还包括流体盐度分析、液相成分分析、气相成分分析、稳定同位素分析等。作者通过这些分析, 为异常古地热场成因或机理的研究提供了丰富信息 (见第四章)。

(四) 电子顺磁共振测温

干酪根是一种含烃基链和官能团的芳香稠环缩聚体系。在受热过程中, 体系中的化学