

紫金山岩体的热力构造类型、期次及其对鄂尔多斯盆地东缘多种能源矿产的影响作用

杨永恒¹⁾ 杨兴科²⁾

1) 中国地质大学能源学院,北京 100083; 2) 长安大学地球科学与国土资源学院,陕西西安 710054

摘要 紫金山岩体是鄂尔多斯盆地东缘一个多期次形成的碱性杂岩体,从外到内可分为六个相带,地貌上构成了正向穹窿型热力构造。二长岩、霓辉正长岩、暗霞正长岩和霞石正长岩四个相带构成中浅成侵入型热力构造;响岩、响岩质火山角砾岩和粗面斑岩、粗面质火山角砾岩两个相带构成了表浅层火山喷发型热力构造。三叠纪以来紫金山有三期热力作用。晚侏罗世—早白垩世的一期中浅成侵入型热力作用促进了上古生界煤变质并发生二次生烃作用;促进了上古生界烃源岩(煤系和暗色泥岩)热演化;岩浆上侵形成火山刺穿遮挡圈闭油气藏。

关键词 紫金山岩体,热力构造,能源矿产,影响

Thermal Structure Types and Stages of Zijinshan Rock Body and Their Influence upon Several Energy Resources and Minerals in Eastern Ordos Basin

YANG Yongheng¹⁾ YANG Xingke²⁾

1) School of Energy Resources, China University of geosciences, Beijing 100083;

2) School of Earth Sciences and Land Resources, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054

Abstract Zijinshan complex in eastern Ordos basin, an alkaline rock body formed in several stages, can be divided into six phases from the outer part to the core. The rock body morphologically forms a normal dome type thermal structure. Monzonite, aegirine-augite syenite, malignite and nepheline syenite belong to the intermediate-deep intrusion type thermal structure, whereas phonolite/phonolitic volcanic breccia and trachyte/trachytic volcanic breccia are of the superficial/shallow volcanic eruption type. Since the beginning of Triassic period, there have occurred three thermal activities in Zijinshan area. The intermediate-deep intrusion from Late Jurassic to Early Cretaceous accelerated coal metamorphism which resulted in secondary hydrocarbon production. It also accelerated the maturity of Upper Paleozoic hydrocarbon source rock (coal and dark mudstone), and led to volcanic piercing closure resulting from upward magmatic intrusion, which finally became an oil/gas-bearing structure.

Key words Zijinshan rock body, thermal structure, energy resources and mineral, effect

碱性岩在岩浆岩中所占比例很小,产出明显受深断裂控制。不少学者认为它是断裂拉张时期深源物质上升经过不同成岩机制形成的(阎国翰等,1988;周玲棣等,1991)。碱性岩是深部地球动力学过程,即地幔柱活动与壳—幔相互作用在地壳浅部

或地表的直接表现和历史记录,有关研究是探索地球深部物质组成和动力学过程的重要途径。

鄂尔多斯盆地东部晋西挠褶带内燕山期热力作用发育(杨起等,1988;任战利,1997;任战利等,1999),深部岩浆侵入和热力作用事件使该区地下

本文由科技部国家重点基础研究(973项目)子课题(编号:2003CB214601-03C)资助。

责任编辑:刘志强;收稿日期:2006-11-16;改回日期:2007-08-16。

第一作者简介:杨永恒,男,1977年生,博士研究生,目前主要从事盆地构造研究;通讯地址:100083,北京市海淀区学院路29号;电话:010-82339743;E-mail: yangyongheng2003@163.com。

深处形成许多隐伏的中深成侵入岩或浅成—喷发相岩体及其伴随的热力构造,紫金山岩体是盆地东部燕山期岩浆多期侵入活动的代表。

紫金山岩体是一个碱性杂岩体,位于山西省临县西北约 20 km 的紫金山、大肚山一带,略呈 NW—SE 方向展布,出露长 7.5 km,宽 4 km,面积约 23 km²。岩体位于晋西挠褶带内一个由东向西倾伏的巨大单斜构造上,其上发育一系列开阔平缓的南北向、东西向次级褶皱(张胜利等,1996),岩体西部是鄂尔多斯盆地的主体,以东是吕梁山,西峰—挂县深断裂从岩体通过。

近年来,由于对鄂尔多斯盆地石油、天然气、煤、铀等资源的深入勘探及华北地台中生代一些基础地质问题的研究(周新桂,2006;李增学,2007),它日益受到地质工作者的重视(阎国翰等,1988,1989;周玲棣等,1994,1996;赵振华等,1994)。本文从热力作用的角度对紫金山岩体进行了热力构造类型、期次划分,并探讨了它对于鄂尔多斯盆地东缘多种能源矿产形成、改造的影响。

1 岩体地质

在地表,紫金山岩体的直接围岩为中三叠统二马营组(T₂er)岩屑质长石中、细砂岩夹杂色泥岩,而其东南、东北、西北均为第四系黄土覆盖,沿沟谷出露的较老地层为下三叠统刘家沟组和铜川组。

1.1 岩性分带

岩体在平面上以水磨川一流水岔连线的中点为中心,由外向内分为 6 个相带(图 1)。显示了由早到晚多期侵入、喷发的特点(吴利仁等,1966),各相带呈“半环状”分布:最外层为浅灰、灰白色二长岩,与沉积围岩呈侵入接触;次外层为灰黑、灰绿色霓辉正长岩,在二长岩的内接触面上,具有长石高岭土化、碱性辉石绿泥石化等轻微蚀变现象;外层为灰黑色暗霞正长岩,与霓辉正长岩呈侵入接触;中间层主要由浅灰、灰黑色霞石正长岩类组成,与外层呈侵入接触;内层为暗灰、灰褐色响岩和响岩质火山角砾岩,与围岩呈叠覆接触;中心部位为棕、黄褐色粗面斑岩和粗面质火山角砾岩,围岩受热变质作用而发生角岩化。

1.2 同位素年龄

根据前人研究(林建平,1991;汤达祯等,1992;山西省地质矿产局,1989),二长岩的年龄为 154 Ma,霓辉正长岩的年龄为 141 Ma;根据 SHRIMP 测

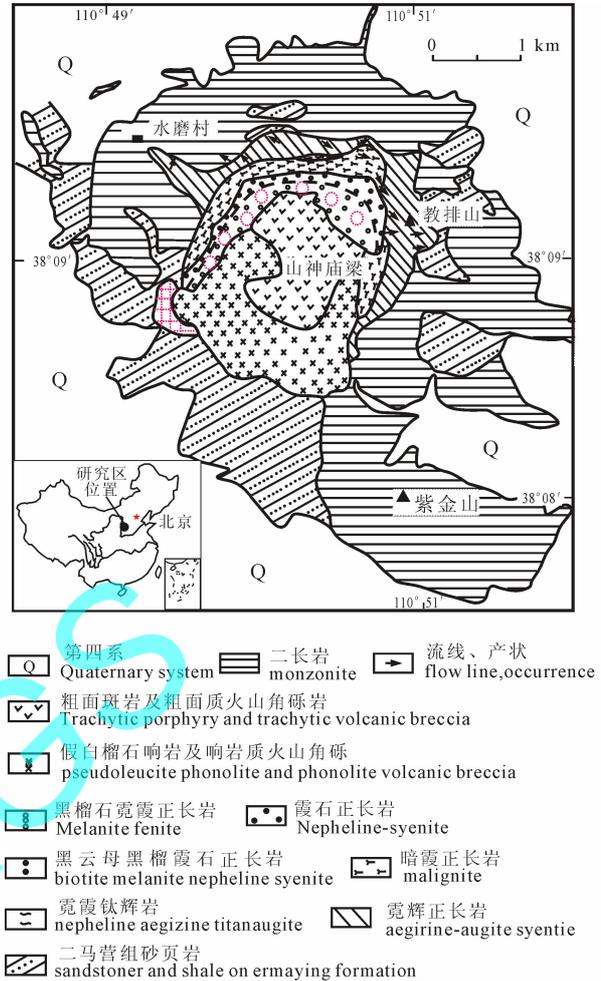


图 1 紫金山岩体相带划分图(据吴利仁,1966)
Fig. 1 Lithofacies division of Zijinshan complex
(from Wu, 1996)

年,暗霞正长岩和霞石正长岩的年龄分别为 132 Ma 和 125 Ma (杨兴科等,2006),另外有 9 组锆石测年数据集中在 287~293 Ma 和 343 Ma,揭示本区可能存在石炭纪和早二叠世两期深部岩浆热力作用(杨兴科等,2006)。

任战利(1997)通过对鄂尔多斯盆地东部及邻区沁水盆地晚侏罗世—早白垩世古地温梯度和古大地热流值的测定,确定在中生代晚期存在一期强烈的构造热事件。沁水盆地内岩体同位素年龄为 95.34~166.45 Ma,周边地区岩浆活动带中的 500 多个同位素年龄的最大丰度值介于 124~153 Ma 之间,表明这次构造热事件发生在晚侏罗世至早白垩世,是燕山中期运动的反映(任战利等,1999),而 124~153 Ma 的年龄段和紫金山岩浆侵入的时代是

表1 紫金山岩体热力构造类型、期次划分

Table 1 Thermal structure type and stage of Zijinshan rock body

期次	时代	岩性	地貌分类	岩浆—热力作用影响深度分类
I	早石炭世	侵入岩	不详	中深层侵入型(?)
	早二叠世	侵入岩	不详	中深层侵入型(?)
	中三叠世	喷出岩	不详	表浅层火山喷发型
II	晚侏罗世	二长岩	正向穹隆	中浅成侵入型
	早白垩世	霓辉正长岩		
		暗霞正长岩		
		霞石正长岩		
III	晚白垩世	响岩、响岩质	表浅层火山喷发型	
	晚白垩世	火山角砾岩		
		粗面斑岩、粗面质火山角砾岩		

吻合的。

2 热力构造类型及期次

盆地和构造形成的动力有应力、热力和重力3种(刘池阳等, 1999)。但一直以来, 盆地和构造的热力和重力成因及其作用研究较薄弱或被忽略(刘池阳等, 1999; 马宗晋等, 2003), 近几年研究进展较大(杨文采, 1999; 王绳祖等, 2000; 赵国春等, 1994)。

根据现今构造、地貌形态, 结合地层时代和岩浆—热力影响深度, 将热力构造分为两类五型(刘池阳等, 1999)。按地貌形态可将其分为正向穹隆型、负向塌陷型和边隆核陷型三种, 按岩浆—热力作用的影响深度将其分为(古)地热异常群集区、表浅层火山喷发—热液活动—浅成斑岩体侵入型、热力背斜(热穹隆)、中深层侵入型和地幔热柱型五种(杨兴科等, 2005)。

2.1 热力构造类型

按地貌形态, 紫金山岩体的六个相带构成了正向穹隆型热力构造(表1)。从岩浆—热力作用的影响深度分析, 二长岩、霓辉正长岩、暗霞正长岩和霞石正长岩构成了中浅成侵入型热力构造(表1), 这种类型是表浅层火山喷发—热液活动—浅成斑岩体侵入型的亚型之一; 响岩、响岩质火山角砾岩和粗面斑岩、粗面质火山角砾岩则构成了表浅层火山喷发型热力构造(表1), 这种类型也是表浅层火山喷发—热液活动—浅成斑岩体侵入型的亚型。

在中三叠世(227~241 Ma)沉积的铜川组地层中发现了两层厚度不大的凝灰岩围绕着紫金山呈环

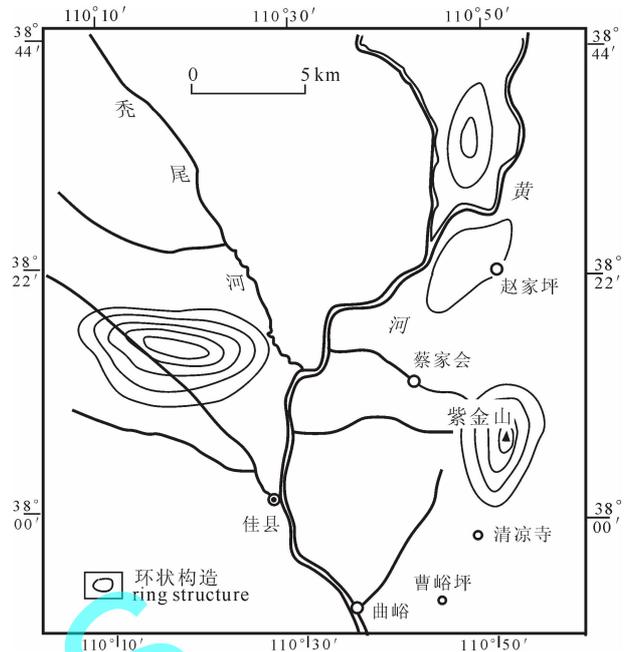


图2 遥感照片解译的环状构造示意图

Fig. 2 Ring structure interpreted by remote sensing photo

状分布, 且厚度随着和紫金山距离的增大逐渐变薄, 这是铜川期本区曾发生过两次相隔不久的火山喷发活动的重要证据。此次岩浆热力活动形成的表浅层火山喷发型热力构造在晚侏罗世岩浆上侵形成二长岩体之前已被剥蚀完, 致使现今地表看不到此期火山岩而只能在铜川组地层中发现其活动的痕迹。

另外, 紫金山岩体并非是孤立存在的, 在南北方向上仍有一些中、深层侵入体与其构成串珠状分布(图2), 它们均构成了中深层侵入型热力构造。

2.2 热力作用期次

从热力构造演化的角度, 紫金山地区自中三叠世以来有三期热力作用。在中三叠世有一期表浅层火山喷发—热液活动型热力作用(生成的火山岩地表未见); 晚侏罗世—早白垩世发生一期中浅成侵入型热力作用, 岩浆侵入二马营组地层中, 先后形成了二长岩(154 Ma)、霓辉正长岩(141 Ma)、暗霞正长岩(132 Ma)和霞石正长岩(125 Ma)4个(半)环带; 而在晚白垩世发生了第三期表浅层火山喷发型热力活动, 形成了地表可见的响岩、响岩质火山角砾岩和粗面斑岩、粗面质火山角砾岩。

另外, 锆石 SHRIMP 测年数据显示海西期本区可能存在两期深部岩浆热力作用, 时代分别为早石炭世(343 Ma)和早二叠世(287~293 Ma)。这两期热力活动所生成的侵入岩现今在地表看不到, 进一

表2 鄂尔多斯盆地不同演化阶段古地温场特征表
(据付金华等,2000)

Table 2 Paleogeotemperature field features of different evolution stages in Ordos basin (after Fu et al., 2000)

发展阶段	地质时代	古地温梯度(°C/100)	古地温场特征
第一阶段	C-T	2.2~3.0	正常
第二阶段	J ₁ -J ₂	2.8~4.0	过渡型
第三阶段	J ₃ -K ₁	3.9~5.9	异常高温型
第四阶段	K ₂ -Q	2.7~3.1	过渡型

步的证据还没有。

晚侏罗世一早白垩世是中国东部岩浆活动和热力作用最强烈的时期。一直以来,对这一时期的构造动力环境有(走滑)伸展和(走滑)挤压两种截然不同的认识(翟明国等,2004;赵重远等,1990)。刘池阳认为,热力作用起了主导作用,可以将该期定义为热—构造动力环境而不应再禁锢在应力构造环境中争论和寻求答案(刘池洋,2005),紫金山岩体可看作是此环境的产物或表现。

3 紫金山热力构造对盆地东缘多种能源矿产形成改造的影响

紫金山岩浆热力活动对于鄂尔多斯盆地东缘煤、煤层气和铀等能源矿产的形成、改造具有重要作用。

3.1 促进煤变质和煤层气生成

紫金山岩体所处的兴县—临县地区以紫金山岩体为核心发育了一个较大的平缓穹窿,其周围煤系主要含煤地层为上石炭统太原组和下二叠统山西组,为河东煤田中部的烟煤(或无烟煤)区。从山西组主煤层煤化作用等值线图(图3)可以清晰地看出岩体周围形成了一个环状的镜质体反向率(R_o)高异常区,向南、北两端 R_o 值变小。地表出露的岩体(以及卫星照片解译出的隐伏岩体,图2)、煤级梯度的明显增高和环状 R_o 高异常区等,充分证明了岩浆的侵入作用导致高变质煤的形成。

紫金山岩浆侵入活动时,太原组和山西组已经历了成岩作用阶段,且经历了最大埋深,岩浆的活动使煤层经历了一次不同于正常地温梯度(表2)的岩浆热变质作用,形成了又一个生烃阶段,即发生了二次生烃作用,这使煤层气主产气时段集中,大幅提高燕山期煤气发生量达60%以上(汤达祯等,2000),同时导致煤层气总发生率提高。而且,岩浆上拱穹窿及高温气胀裂隙都有利于增强煤的储气和气体驱

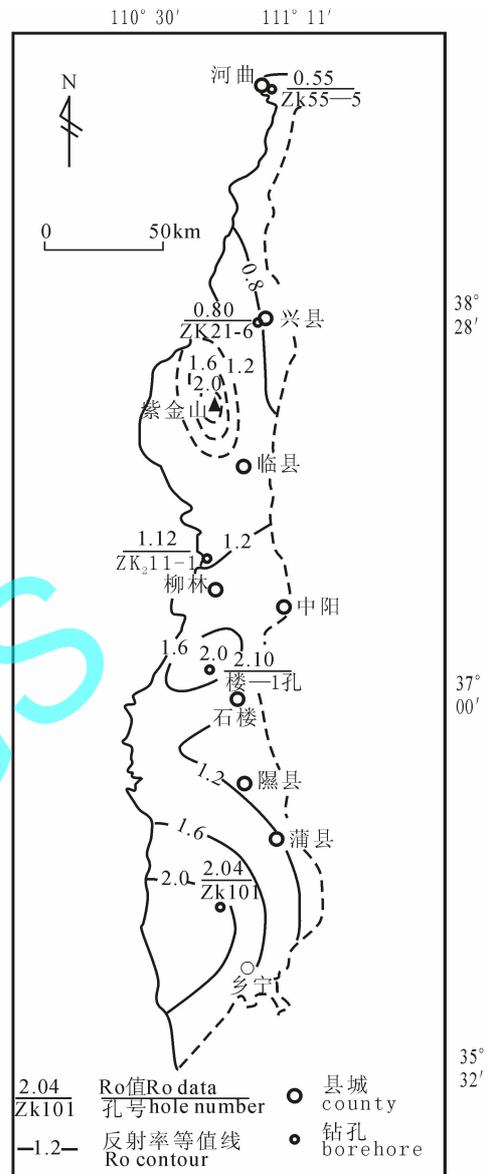


图3 河东煤田山西组主煤层煤化作用等值线图
(据汤达祯,1992)

Fig. 3 Coalification contour line of Shanxi Formation main coal seam in the Hedong coalfield (from Tang, 1992)

动特性,促进气藏的形成。

中国石油天然气总公司正在该区做工作,已完成的1口煤层气资料评价井(吴试1井)证实该区煤层埋藏适中、储集物性好,封盖条件有利,煤层气远景资源量可观。

3.2 促进上古生界烃源岩热演化

晚侏罗世一早白垩世是盆地上古生界烃源岩热演化生烃的第三个重要地质阶段(杨俊杰,2002),

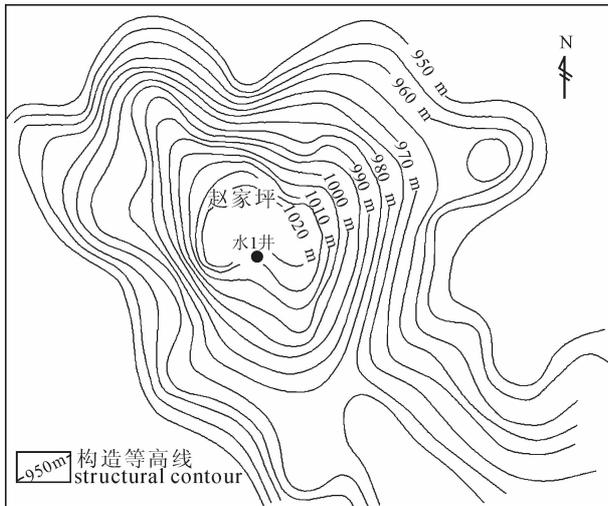


图4 赵家坪构造平面图

Fig. 4 Zhaojiapin structure plan

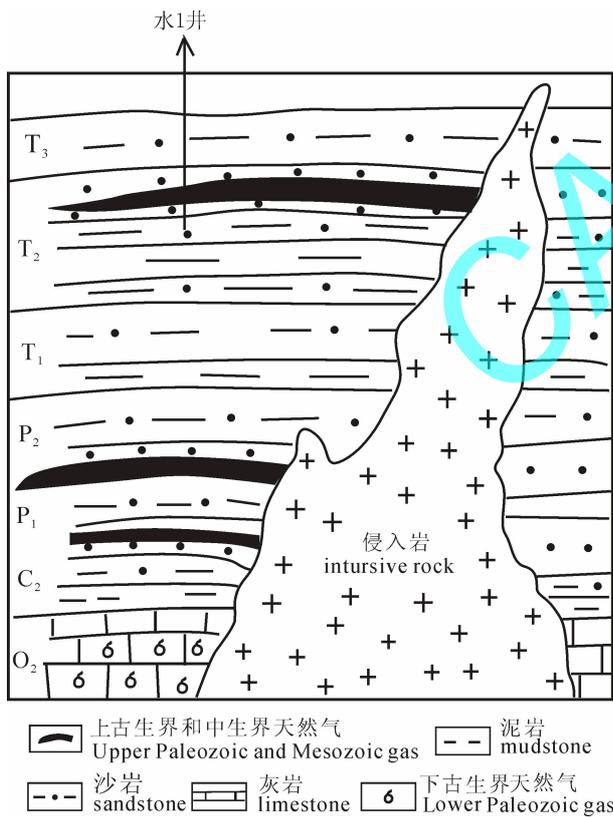


图5 水1井气藏剖面(据何自新,2004)

Fig. 5 Gas pool profile of Shui 1 hole (from He, 2004)

烃源岩热演化受控于构造热事件,进入生气高峰期。盆地东部构成一个生气中心,其以煤岩与暗色泥岩为生烃主体。

紫金山碱性侵入岩的形成时代和上述生烃阶段

相对应,岩浆活动促进了上古生界烃源岩的热演化。任战利(1997)包括紫金山岩浆活动在内的盆地中生代晚期构造热事件提高了上、下古生界两套气源岩的热演化程度,使大部分气源岩达到了生气高峰。

紫金山周围存在地球化学异常区,其中的含烃包裹体由于受火山热水活动影响,形成温度高达300℃,而向南、向西温度降低(陈安福等,1992),说明异常区曾受到火山活动影响,较高的温度加速了有机质向气态烃类转化而不利于液态烃的保存。

3.3 形成火山刺穿遮挡圈闭油气藏

底辟构造圈闭是蒸发岩类(盐、膏和泥岩等)及火成岩由深层向浅层侵入刺穿,由此引起负载的褶皱变形而形成的圈闭,火山刺穿遮挡圈闭油气藏即为底辟构造油气藏之一。

由于紫金山侵入体具有非渗透性特点,关于刺穿遮挡圈闭所形成的圈闭条件是易于理解的。上古生界煤系因受岩浆烘烤而煤化作用加剧,可较快转化成煤成气,随后便聚集在岩浆冷凝形成的刺穿遮挡圈闭中;紫金山岩浆活动使地层发育放射状、环状断裂,它们与区域性东西、北东、北西向构造叠加以及火山活动后期隐爆作用产生的大量网状裂隙、火山岩冷却后的收缩裂隙,则为油气储集提供了大量空间。

在上世纪90年代末,中联煤层气公司在兴县靠近紫金山岩体东北部一带曾钻煤层气探井4口,主煤层含气量约为6 m³/t。在赵家坪构造(图4)上施工的水1井钻孔(图5),井深206.6 m钻达中三叠统二马营组产气,井口冒气可燃,火焰高1~2 m。

在紫金山岩体周围还发育蔡家会、柴家沟等背斜和鼻隆构造,有环绕岩体展布之势,其成因可能与岩浆侵入时的刺穿底辟作用有关。火山底辟使围岩变形,煤化加剧及自身遮挡为上古生界天然气的形成创造了极有利的条件。

3.4 对铀成矿可能的促进作用

紫金山岩浆侵入活动促进了上古生界烃源岩的成熟,较轻的气态烃类由深部源沿断裂、裂隙等向上覆地层渗漏运移到浅层层间氧化带,可能起到了促进铀成矿的作用。这有待于实践检验,因为至今在盆地东缘还没有发现铀矿床(铀矿点)。但是,一般认为,热力改造形成的区域性地温梯度和地热场对铀成矿物质的迁移、富集有一定的促进作用。

4 讨论

热力构造的研究应该引起关注和重视,因为它

不仅对基础地质研究具有理论意义,对盆地多种能源矿产的勘探开发亦具有重要实际意义。

确定盆地成藏构造时应注意识别热力背斜等热力构造,思考务须全面、细致。对地质资料尤其地震资料解释不合理,将西峰-佳县断裂西南端的本为热力背斜的龙门构造误认为是构造背斜圈闭,结果两口探井龙1、龙2井均未见油气显示。龙2井自延长组第一段顶至蕲县系,发现52层厚达384.5m的岩浆岩,深层以基性岩为主,浅层以中性岩为主,说明至少为两期活动的产物。这个事例反映了热力构造研究的重要性。

参考文献

- 陈安福, 范选林, 张大千. 1992. 用石油包裹体资料解释佳县-紫金山区化探异常. 见: 王锡福, 陈安福主编. 鄂尔多斯盆地非地震油气勘探. 北京: 地质出版社, 153~160.
- 付金华, 段晓文, 姜英昆. 2000. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质及勘探方法. 鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集. 北京: 石油工业出版社.
- 何自新. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油工业出版社.
- 李增学, 余继峰, 李江涛, 等. 2007. 鄂尔多斯盆地多种能源共存富集的组合形式及上古生界沉积控制机制分析. 地球学报, 28(1): 32~38.
- 林建平. 1991. 山西太古代-中生代构造应力场. 现代地质, 5(4): 355~365.
- 刘池阳, 魏永佩, 赵红格. 1999. 造山带研究中值得注意的几个问题. 见: 马宗晋等主编. 构造地质学-岩石圈动力学研究进展. 北京: 地质出版社, 130~137.
- 刘池洋. 2005. 盆地构造动力学研究的弱点、难点及重点. 地学前缘, 12(3): 113~124.
- 马宗晋, 杜品仁, 洪汉净. 2003. 地球构造与动力学. 广州: 广东科技出版社, 362~387.
- 任战利. 1997. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究. 沉积学报, 15(2): 134~137.
- 任战利, 赵重远, 陈刚. 1999. 沁水盆地中生代晚期构造热事件. 石油与天然气地质, 20(1): 46~48.
- 山西省地质矿产局. 1989. 山西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 353.
- 汤达祯, 杨起, 潘治贵. 1992. 河东煤田-地史模拟与煤变质演化. 现代地质, 6(3): 328~337.
- 汤达祯, 王激流, 张君峰, 等. 2000. 鄂尔多斯盆地东缘煤的二次生烃作用与煤层气的富集. 石油实验地质, 22(2): 140~141.
- 吴利仁, 等. 1966. 若干地区碱性岩研究. 北京: 科学出版社, 1~76.
- 王绳祖, 张四昌, 田勤俭, 等. 2000. 大陆动力学-网状塑性流动与多级构造变形. 北京: 地震出版社.
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善. 1988. 山西临县紫金山碱性岩-碳酸岩杂岩体的稀土元素和氧锶同位素特征. 岩石学报, 3: 29~36.
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善. 1989. 中国北方碱性和偏碱性侵入岩的时空分布及其大地构造意义. 中国地质科学院沈阳地质矿产研

究所刊. 19: 93~100.

- 杨俊杰. 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社.
- 杨起, 潘治贵, 翁成敏, 等. 1988. 华北石炭二叠纪煤变质特征与地质因素探讨. 北京: 地质出版社, 57~77.
- 杨文采. 1999. 后板块地球内部物理学导论. 北京: 地质出版社.
- 杨兴科, 刘池阳, 杨永恒, 等. 2005. 热力构造的概念分类特征及其研究进展. 地学前缘, 12(4): 385~396.
- 杨兴科, 杨永恒, 季丽丹, 等. 2006. 鄂尔多斯盆地东部热力作用的期次和特点. 地质学报, 80(5): 705~711.
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 2004. 华北东部中生代构造体制转换期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 11(3): 285~297.
- 张胜利, 李宝芳, 陈晓东. 1996. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气控制因素探讨. 石油勘探与开发, 23(4): 11~14.
- 赵重远, 刘池阳. 1990. 华北克拉通沉积盆地形成及其油气赋存. 西安: 西北大学出版社, 10~21.
- 赵国春, 吴福元. 1994. 地幔柱构造——一种新的大地构造理论. 世界地质, 13(1): 25~34.
- 赵振华, 周玲棣. 1994. 我国某些富碱侵入岩的稀土元素地球化学. 中国科学, 24(10): 1109~1120.
- 周玲棣, 王传扬. 1991. 赛马和紫金山碱性杂岩体稀土元素地球化学及成因模式. 地球化学, 3: 229~235.
- 周玲棣, 赵振华. 1994. 我国富碱侵入岩的岩石学和岩石化学特征. 中国科学, 24(10): 1093~1101.
- 周玲棣, 赵振华, 周国富. 1996. 我国一些碱性岩的同位素年代学研究. 地球化学, 25(2): 164~171.
- 周新桂, 张林炎. 2006. 塔巴庙气田上古生界致密储层裂缝系统基本特征及其在天然气成藏中的作用. 地球学报, 27(4): 323~328.

References

- Chen Anfu, Fan Xuanlin, Zhang Daqian. 1992. Explanation of Jiexian-Zijinshan geochemical exploration anomalies by petroleum inclusion data. In: Wang Xifu, Chen Anfu. Nonseismic hydrocarbon Exploration of Ordos basin. Beijing: Geological Publishing House, 153~160 (in Chinese).
- Fu Jinhua, Duan Xiaowen, Jiang Yingkun. 2000. Upper Paleozoic gas geology and exploration method in Ordos basin In: Symposium of hydrocarbon exploration and development in Ordos basin. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- He Zixin. 2003. Geotectonic evolution and hydrocarbon in Ordos basin. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Li Zengxue, Yu Jifeng, Li Jiangtao. 2007. Combination types of coexistent multiple energy resources in the Ordos basin and an analysis of the upper Paleozoic sedimentation control mechanism. Acta Geoscientica Sinica, 28(1): 32~38 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jianping. 1991. Archeozoic-mesozoic tectonic stress field of Shanxi province. Geoscience, 5(4): 355~365 (in Chinese).
- Liu Chiyang, Wei Yongpei, Zhao Hongge. 1999. Some noteworthy problems in the research of orogenic belts. In: Ma Zongjin, et al. Advances in structural geology and geodynamics in China. Beijing:

- Geological Publishing House, 130 ~ 137 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chiyang. 2005. The weakness, difficulty and key point in the study of basin tectonic dynamics. *Earth Science Frontiers* 12(3): 113 ~ 124 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zongjin, Du Pinren, Hong Hanjing. Structure and Dynamics of the Earth. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2003: 362 ~ 387 (in Chinese).
- Ren Zhanli. 1997. Late Mesozoic comparative research on the geothermal field of the Ordos basin and Qinshui basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(2): 134 ~ 137 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Zhao Chongyuan, Chen Gang. 1999. Tectonic thermal events of late Mesozoic in Qinshui basin. *Oil and Gas Geology*, 20(1): 46 ~ 48 (in Chinese with English abstract).
- Shanxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional topography of Shanxi province. Beijing: Geological Publishing House, 353 (in Chinese).
- Tang Dazhen, Yang Qi, Pan Zhigui. 1992. Geohistory modeling and coal metamorphic evolution in Hedong coalfield. *Geosciences*, 6(3): 328 ~ 337 (in Chinese with English abstract).
- Tang Dazhen, Wang Jiliu, Zhang Junfeng, et al. 2000. Secondary hydrocarbon generation of coal and accumulation of coalbed methane in the east margin of the Ordos basin. *Experimental Petroleum Geology*, 22(2): 140 ~ 141 (in Chinese with English abstract).
- Wu Liren. 1966. A Study on Some Alkaline Rock Bodies in China. Beijing: Science Publishing House, 1 ~ 76 (in Chinese).
- Wang Shengzu, Zhang Sichang, Tian Qinjian, et al. 2000. Continental Dynamics-Netlike Plastic-Flow and Hierarchical Tectonic Deformation. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Yan Guohan, Mu Baolei, Zeng Yishan. 1988. Characteristics of REE and O, Sr isotopes of Zijinshan alkaline-carbonatite complex in Linxian, Shanxi province. *Acta Petrologica Sinica*, 3: 29 ~ 36 (in Chinese).
- Yan Guohan, Mu Baolei, Zeng Yishan. 1989. Age and distribution of alkaline and subalkaline intrusive rocks in Northern China and their tectonic implication. *Bull of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 19: 93 ~ 100 (in Chinese).
- Yang Junjie. 2002. Geotectonic evolution and hydrocarbon distribution regularities in Ordos basin. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Yang Qi, Pan Zhigui, Weng Chengmin, et al. 1988. Metamorphic characteristics and geological factors of Carboniferous-Permian coal in north China. Beijing: Geological Publishing House, 57 ~ 77 (in Chinese).
- Yang Wencai. 1999. Introduction to earth interior physics of post-plate tectonics. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Yang Xingke, Yang Yongheng, Ji Lidan, et al. 2005. The concept, classification and research progress on thermal structure. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 385 ~ 396 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xingke, Yang Yongheng, Ji Lidan, et al. 2006. Stages and characteristics of thermal actions in eastern part of Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 705 ~ 711 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Meng Qingren, Liu Jianming, et al. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285 ~ 297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shengli, Li Baofang, Chen Xiaodong. 1996. Occurrence and affecting geological factors of coalbed gas of Carboniferous-Permian in the east margin of Ordos basin. *Petroleum Exploration and Development*, 23(4): 11 ~ 14 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chongyuan, Liu Chiyang. 1990. The formation, evolution and hydrocarbon occurrence in North China Craton Sedimentary Basin. Xi'an: Northwest University Press, 10 ~ 21 (in Chinese).
- Zhao Guochun, Wu Fuyuan. 1994. Mantle plume structure-A new kind of theory of tectonics. *World Geology*, 13(1): 25 ~ 34 (in Chinese).
- Zhao Zhenhua, Zhou Lingdi. 1994. REE geochemistry of some alkaline rocks in China. *Science in China*, 24(10): 1109 ~ 1120 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lingdi, Wang Chuanyang. 1991. REE geochemistry and genetic model of Saima and Zijingshan alkaline rock bodies. *Geochimica*, 3: 229 ~ 235 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lingdi, Zhao Zhenhua. 1994. Petrologic and Lithochemical features of some alkaline rock bodies in China. *Science in China*, 24(10): 1093 ~ 1101 (in Chinese).
- Zhou Lingdi, Zhao Zhenhua, Zhou Guofu. 1996. Isotopic chronology of some alkaline rocks in China. *Science in China. Geochemica*, 25(2): 164 ~ 171 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xingui, Zhang Linyan. 2006. Basic characteristics of natural fracture systems in the upper Paleozoic tight sand reservoirs in Tabamiao area, north Ordos basin and its role in the process of gas reservoir formation. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(4): 323 ~ 328 (in Chinese with English abstract).