

华北克拉通中部沁水盆地热演化史与山西高原中新生代岩石圈构造演化

孟元库¹, 汪新文², 李波³, 蔡志东⁴

(1. 中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037;
2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 青海省第一地质矿产勘查院,
青海 平安 810600; 4. 中国石油东方地球物理公司新兴物探开发处, 河北 涿州 072751)

摘要:以沁参 1 井地质资料为基础, 结合沉积构造演化及邻区对比等, 以磷灰石裂变径迹分析为主要手段, 配合锆石裂变径迹、矿物流体包裹体、有机质镜质体反射率、区域岩浆活动及盆地演化分析, 较系统地研究了沁水盆地晚古生代以来的区域构造运动与构造演化。并以此为基础探讨了山西高原中—新生代岩石圈构造热演化与高原的隆升过程, 提高了对沁水盆地的地质评价, 为下一步研究华北克拉通东部沁水盆地及邻区的古地热演化历史奠定了基础。

关键词:沁参 1 井; 裂变径迹; 流体包裹体; 盆地构造分析; 岩石圈; 沁水盆地

中图分类号: P542

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2015)02-0159-10

Thermal Evolution History of Qinshui Basin in the Middle of North China Craton and Mesozoic-Cenozoic Lithosphere Tectonic Evolution in Shanxi Plateau

MENG Yuanku¹, WANG Xinwen², LI Bo³, CAI Zhidong⁴

(1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
3. No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, Ping'an 810600, Qinghai, China;
4. Department of Emerging Geophysical Exploration Development, Bureau of Geophysical Prospecting (BGP) Inc. of CNPC, Zhuozhou 072751, Gansu, China)

Abstract: Based on the geological data of Qincan No.1 well, combined with the sedimentary structural evolution and its contrast with neighboring areas, the paper systematically studied the regional tectonic movement and tectonic evolution of Qinshui basins since the late Paleozoic by apatite fission track analysis as well as studies on aspects including zircon fission track, minerals fluid inclusions, organic matter vitrinite reflectance, regional magmatic activity and basin structural evolution. On this basis, the Mesozoic-Cenozoic lithosphere tectonic evolution and plateau uplift thermal process in Shanxi plateau was discussed, and the geological evaluation of Qinshui basin-

收稿日期: 2014-12-09; 修回日期: 2015-03-21

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(40921001)、中国地质调查局项目(1212010818094)和自然科学基金项目联合资助(41302166)

作者简介: 孟元库(1986-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业。E-mail: ykmeng@foxmail.com

was improved, which laid a solid theoretical foundation for further studies of ancient geothermal history in Qinshui basin of North China Craton and its adjacent areas.

Keywords: Qincan No. 1 well; fission track; fluid inclusions; basin structural analysis; lithosphere; Qinshui basin

21 世纪初国家自然科学基金委员会设立“华北克拉通破坏与演化”研究计划以来, 研究者们通过不同学科间的有效交叉融合, 围绕克拉通破坏的时间、范围和机制等重要科学问题(朱日祥等, 2011)进行了大量的工作, 并取得了诸多新认识。

笔者主要是基于沁水盆地沁参 1 井磷灰石裂变径迹、锆石裂变径迹以及流体包裹体等方法, 通过当地温梯度的变化来反映该区从晚古生代到第四纪以来地壳的隆升剥蚀与下降沉积的关系, 从而探讨山西高原的隆升问题, 为华北克拉通在山西沁水一带的演化与破坏提供有力的证据。

1 区域构造地质背景

沁水盆地在构造上介于太行山隆起带和吕梁山隆起带之间, 并与二隆起带中的次级构造单元如阳泉、涉县复向斜及汾西复向斜相通。周缘下古生界多已出露地表, 向盆地内部依次出露上古生界及中生界, 在盆地中心一带, 三叠系大面积出露。对沁水盆地而言, 盆内主要构造区划断裂及盆内小型断裂主要为燕山期至喜马拉雅期形成或在这一时期表现出很强的活动性(汪新文等, 1996), 其中一系列逆冲断裂系主要发育于中三叠统以下层位, 地震资料显示向下在 Pt_{2+3} 与 Pt_1 + Ar 间的基底面上拆离, 表明其形成于中三叠世后的印支运动; 从沉积建造格局看, 区内三叠系大部分保留完整, 而且其各个沉积中心在剖面上反映清晰, 在全区具有很好的连续性, 在沁水盆地中三叠统的沉积相变化也是较小的, 在全区可以进行对比(山西地矿局, 1989)。

因此, 可以认为沁水盆地的构造区划反映的主要是印支期后, 特别是燕山运动及喜山运动的构造运动性质差异。在构造单元划分上, 华北地台为一级构造单元, 沁水盆地隶属于华北地台山

西隆起区的次级构造单元, 属于三级构造单元。其中沁水盆地可以进一步划分为四级构造单元。原则为: ①印支期后活动的边界断层。②构造断块性质、差异及活动时间。③中生代沉积建造差异, 特别是新生代以来断块隆升过程中的沉积差异。④基底构造特别是基底面构造形态的反映。

由此可以根据一般原则和四级构造划分方法将盆地划分为 9 个四级构造单元, 分别为: 太原西山断块、晋中断凹、寿阳-阳泉斜坡、天中山-议城褶断区、沁源-榆社褶断区、大寨-坪头斜坡、安泽-屯留褶皱区、沁水-阳城斜坡以及霍县段凸(图 1)。

2 热史分析与高原隆升过程

从沁水盆地一的热演化历史分析看, 山西高原中—新生代岩石圈构造热演化与高原的隆升过程: 以磷灰石裂变径迹分析为主要手段, 配合锆石裂变径迹、矿物流体包裹体、有机质镜质体反射率、区域岩浆活动及盆地构造演化分析, 较系统地研究了沁水盆地晚古生代以来的热史, 并以此为基础探讨了山西高原中—新生代岩石圈构造热演化与高原的隆升过程。

自 1995 年以来, 不少专家学者对其进行了研究, 取得了新的进展与突破(秦勇等, 1998; 任战利等, 1997; 任战利等, 1999; 任战利, 1999; 任战利, 2000;)。

以沁水盆地沁参 1 井的钻井地层柱取样为主(图 2), 结合露头地层样品(图 3), 较完整地建立了沁参 1 井的磷灰石-锆石裂变径迹分析地层柱, 共测试沁参 1 井及邻区露头的有效样品 22 件, 涵盖上古生界(太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组、石千峰组)、三叠系(刘家沟组、和尚沟组、二马营组、铜川组、延长组)和中侏罗统(黑峰组)(表 1)。

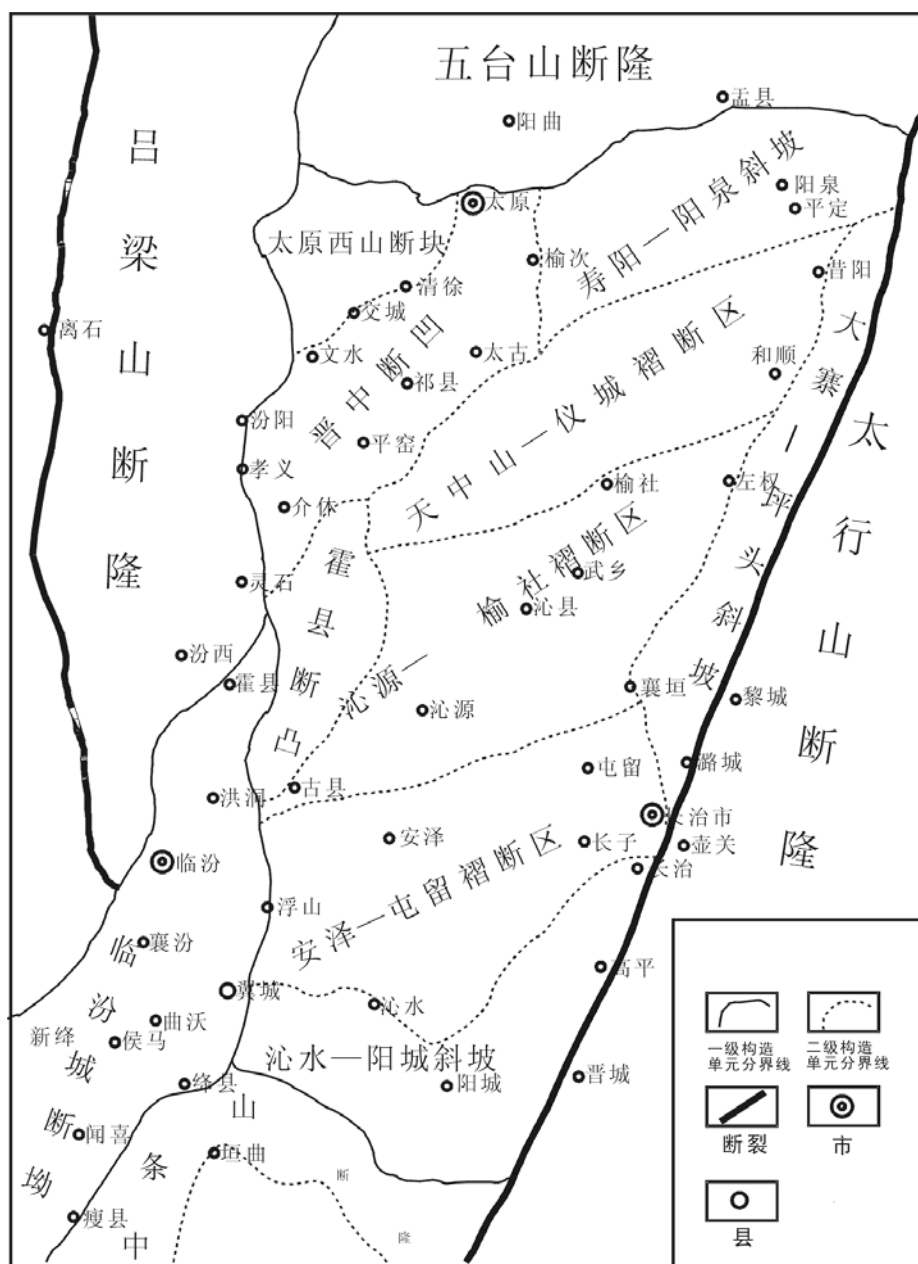


图1 沁水盆地构造单元划分图(粗黑线表示边界大断裂,细线表示造单元分界线)

Fig. 1 Division of structural units of Qinshui basin (bold black line for major faults; thin black line for structural boundary)

2.1 磷灰石裂变径迹

所有样品的磷灰石裂变径迹表观年龄介于12.69~27.7 Ma,远远小于其所在地层的地质年龄,这说明样品发生过很强的退火作用,相应地层应经受过120℃以上的古地温,使早期形成的裂变径迹全部退火消失,而现今样品中的裂变径迹是后期(新生代以来)重新形成的。样品裂变径迹表观年龄随井深的加大而逐渐减小,与地层时代的增加呈相

反的变化,说明它们是在完全退火之后,地层由浅部到深部依次上升、降温进入到记录裂变径迹的温度线之内而逐渐形成的。但总体来看,样品表观年龄值随井深及地层时代的增加而降低得很少,说明相应地层在新生代时期有一个古地温迅速降低的过程,可能反映了地热流迅速下降和地层抬升剥蚀降温的共同作用(图4)。

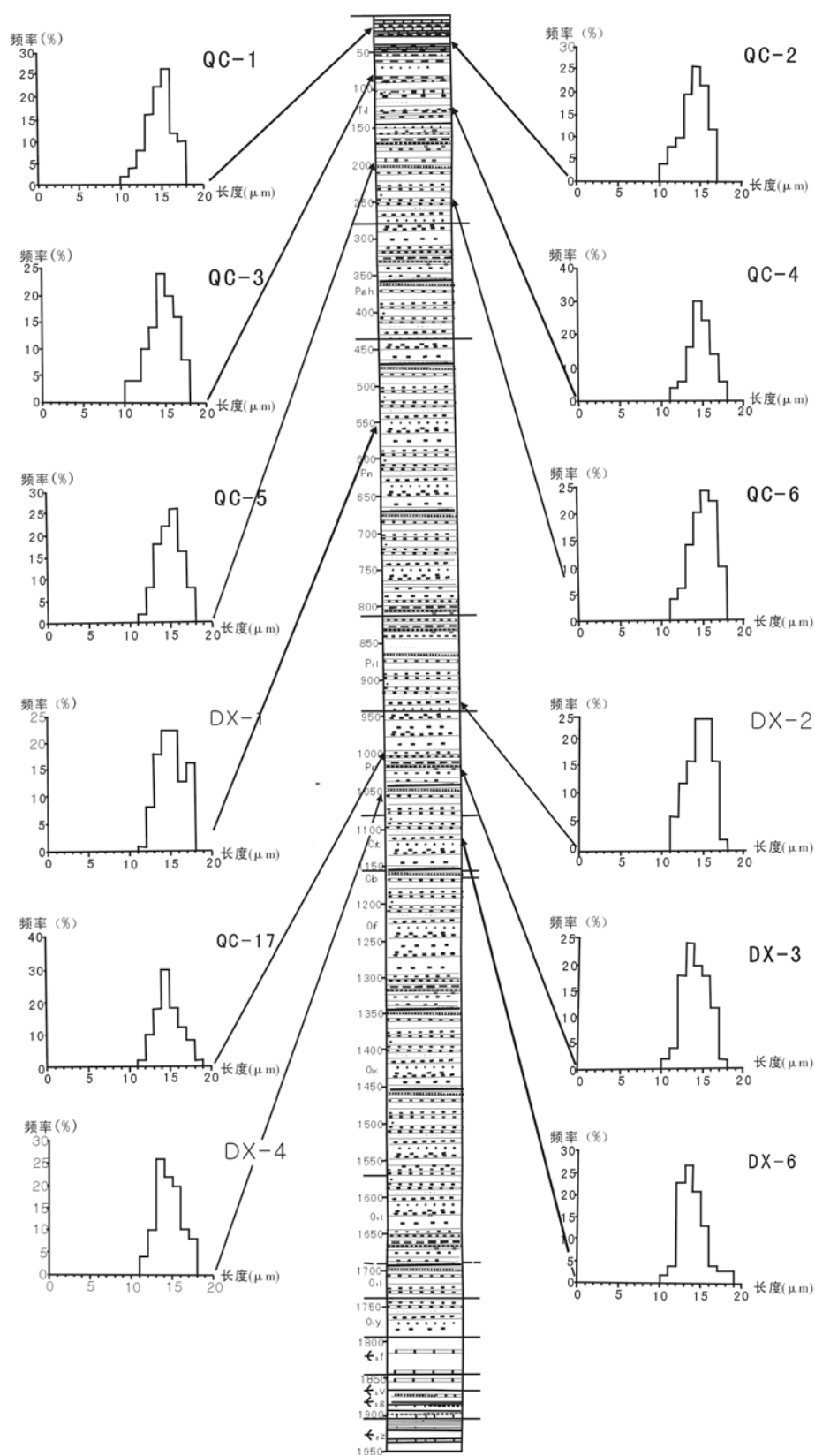


图2 沁参1井磷灰石裂变径迹长度随深度变化图

Fig. 2 Apatite fission track length variation with depth of well Qincan1

表 1 沁水盆地区域地层简表
Tab. 1 Regional stratabable of Qinshui basin

界	系	统	群或组	代 号	厚 度(m)	岩 性	接触关系	构造运动	反射层
新生界	第四系			Q	0~550	黄土、亚黏土	喜马拉雅 燕山运动	喜马拉雅 燕山运动 印支运动	
	新近系			N	0~220	黏土、分沙土			
中生界	中侏罗统		黑峰组	J ₂ h	0~220	灰绿-灰黄色石英砂岩, 砂砾岩	T10		
	三叠系	上统	延长群	T ₃ yn	30~138	灰红灰绿色砂岩、页岩和淡水灰岩			
		中统	铜川群	T ₂ t	396~591	浅红、灰黄色长石砂岩夹砂质泥页岩			
			二马营群	T ₂ er	467~742	灰绿-紫红色长石砂岩、泥岩及页岩			
		下统	和尚沟组	T ₁ h	131~474	紫灰色长石砂岩夹紫红色泥岩			
			刘家沟组	T ₁ l	350~595	灰紫红色长石砂岩夹页岩及砾岩			
上古生界	二叠系	上统	石千峰组	P ₂ Sh	100~217	黄绿色长石砂岩与紫红色泥岩互层	T11		
			上石盒子组	P ₂ s	340~560	灰绿色石英砂岩与紫红色粉砂岩互层			
		下统	下石盒子组	P ₂ x	100~361	黄绿色泥、粉砂及砂岩, 底有薄煤层			
			山西组	P ₁ s	36~132	灰绿色砂岩及页岩、灰岩和薄煤层			
	石炭系	上统	太原组	C ₂ t	82~142	灰绿色石英砂岩、页岩、灰岩及煤层	T12		
			本溪组	C ₂ b	0~50	杂色铁铝岩、黏土岩及灰岩, 底有铁矿			
下古生界	奥陶系	中统	峰峰组	O ₃ f	0~76	中层豹皮灰岩、白云质及黑色灰岩	晋冀鲁豫		
			上马家沟组	O ₂ s	170~308	白云质泥灰岩、豹皮及角砾状灰岩			
			下马家沟组	O ₂ x	37~213	厚层灰岩、角砾状灰岩, 底部钙质页岩			
		下统	亮甲山组	O ₁ l	105	厚层白云岩、含燧石及结核白云岩			

注:波浪线为角度不整合;虚线为平行不整合。

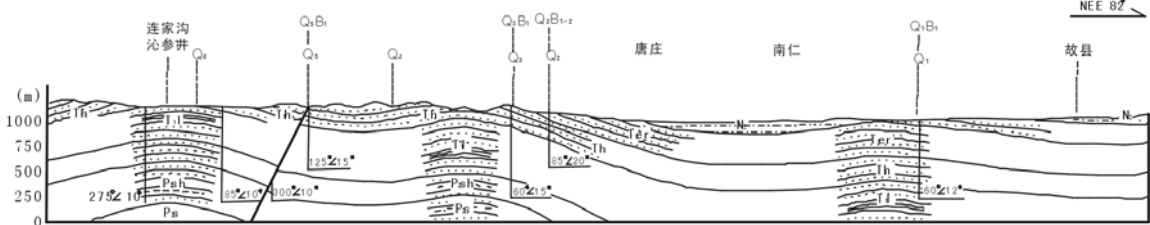


图 3 沁参 1 井附近地表出露地层剖面及岩样采取位置图

Fig. 3 Profile and rock samples sites of neighbour of well Qincan1

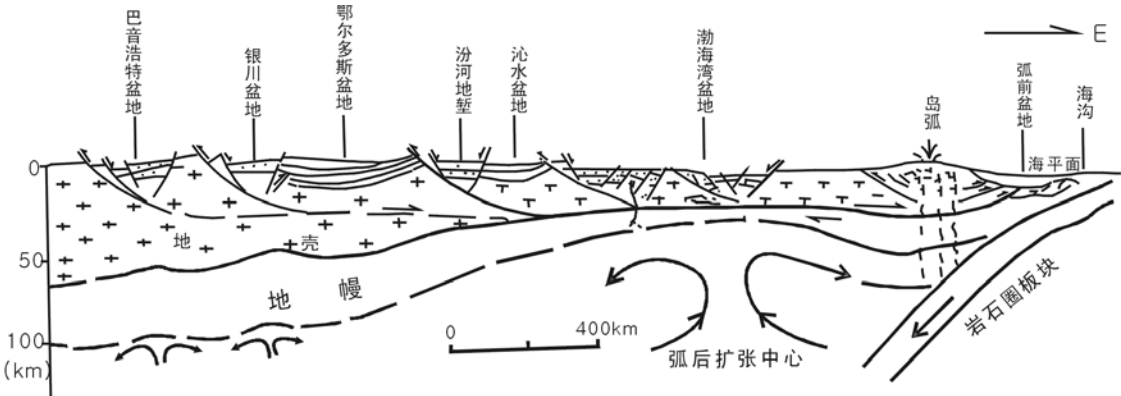


图 4 沁水盆地中生代区域构造演化模式图

Fig. 4 The map of Meso-cenozoic regional tectonic evolution in Qinshui basin

磷灰石平均封闭径迹长度为 $14.7 \sim 15.45 \mu\text{m}$, 且随井深变短现象不显著, 与在 65°C 以内的低温环境下形成的初始径迹长度 $(16.3 \pm 0.9) \mu\text{m}$ 相比, 退火作用很弱, 说明后期的地热史降温过程中在低温环境的时间要更长一些。各样品的磷灰石封闭径迹长度分布特征主要呈正偏态分布(图 5), 即相对较短的径迹所占比例较少, 而相对较长的径迹所占比例要高得多, 这说明在温度较高的部分退火带 ($65 \sim 120^\circ\text{C}$) 所形成的较短径迹含量较少, 而在低温下形成的长径迹含量较高。所以, 磷灰石平均封闭径迹长度与长度分布特征揭示, 该套地层在新生代时期具有一个先快后慢的降温过程, 即它们在温度较高的部分退火带 ($65 \sim 120^\circ\text{C}$) 所停留的时间较短, 反映了样品的快速降温作用; 在 65°C 以内的低温环境下停留的时间更长一些, 为相对较慢的降温作用。

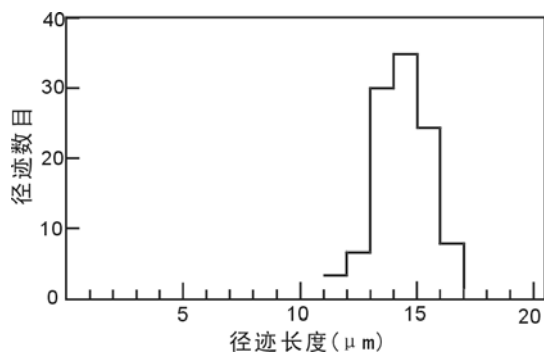


图 5 各样品的磷灰石封闭径迹长度分布图

Fig. 5 Apatite fission track of samples distribution

2.2 锆石裂变径迹

锆石的裂变径迹具有耐高温的特点, 一般认为在地质时期的部分退火温度为 $160 \sim 250^\circ\text{C}$ (Hurford A J, et al., 1986; Brandon M T et al., 1992; Fitzgerald P G et al. 1998)。通过对沁参 1 井太原组和山西组的 5 个样品进行的锆石裂变径迹分析(和磷灰石取自同一层位), 其裂变径迹年龄为 $207 \sim 269 \text{ Ma}$, 比原地层年龄(约 $280 \sim 310 \text{ Ma}$) 偏低, 但偏差并不大。表明锆石的裂变径迹经历过明显的部分退火作用。因此, 推测沁参 1 井太原组-山西组所经历的最高古地温应与锆石裂变径迹的部分退火温度限相当, 即 $160 \sim 250^\circ\text{C}$; 而超过完全退火的温度限 250°C 的可能性不大, 或者即使超过其时间和幅度也十分有限, 否则它将从完全退火后的时间开始

重新记录裂变径迹年龄, 其年龄值必将大大小于原地层年龄。该锆石样品的最高古地温比太原-山西组在三叠纪末的正常地温梯度下的埋藏增温时的温度(约 $100 \sim 120^\circ\text{C}$) 要高出许多, 说明它们在三叠纪的正常地温之后、新生代的大幅降温之前一定经历了一个较高的异常地温场时期。

2.3 有机质镜质体反射率 (R_o)

本次测试沁参 1 井及南 1 井样品镜质体反射率 9 块(太原组和山西组的煤岩及碳质泥岩样品), 镜质体反射率测试所得结果与前人在该区的测试及研究结果基本一致(赵重远等, 1990)(表 2)。应用

表 2 沁水盆地钻井上古生界镜质体反射率 (R_o) 测试结果表
Tab. 2 Upperpalaeozoic Rotesting results of Qinshui basin

样品号	采样地点(m)	地层时代	岩性	R_o	资料来源
N-12	南 1 井 1 312.15	P ₂ s	碳质泥岩	2.152	本项目
N-13	南 1 井 1 532.15	P ₁ s	煤岩	2.313	本项目
N-14	南 1 井 1 534.30	P ₁ s	碳质泥岩	2.214	本项目
N-15	南 1 井 1 569.10	P ₁ s	碳质泥岩	2.164	本项目
N-16	南 1 井 1 580.00	P ₁ s	煤岩	2.436	本项目
N-17	南 1 井 1 592.10	P ₁ s	碳质泥岩	2.191	本项目
N-18	南 1 井 1 645.90	C ₂ t	煤岩	2.322	本项目
	沁参 1 井 500.0	P ₂ s	碳质泥岩	1.5	经理部
	沁参 1 井 1 022.0	P ₁ s	碳质泥岩	2.09	经理部
	沁参 1 井 1 023.6	P ₁ s	煤岩	2.19	经理部
	沁参 1 井 1 038.8	P ₁ s	煤岩	2.22	经理部
QC-1	沁参 1 井 1 061.8	P ₁ s	煤岩	2.39	本项目
QC-2	沁参 1 井 1 096.0	C ₂ t	碳质泥岩	1.9	本项目
	沁参 1 井 1 096.0	C ₂ t	碳质泥岩	2.09	经理部
	沁参 1 井 1 096.02	C ₂ t	煤岩	2.21	经理部
	沁参 1 井 1 098.9	C ₂ t	煤岩	2.18	经理部
	沁参 1 井 1 099.0	C ₂ t	煤岩	2.24	经理部
	沁参 1 井 1 137.0	C ₂ t	碳质泥岩	2.11	经理部
	沁参 1 井 1 500.0	o	碳质灰岩	2.7	经理部
	沁参 1 井 1 946.4	o	碳质灰岩	2.99	经理部
	沁 2 井 1 025.0	P ₁ s	碳质泥岩	2.10	经理部
	沁 2 井 1 357.0	C ₂ t	煤岩	2.38	经理部
	沁 3 井 543.0	C ₂ t	碳质泥岩	1.95	经理部
	沁 4 井 600.0	C ₂ t	碳质泥岩	1.67	经理部
	沁 4 井 673.0	C ₂ t	煤岩	2.4	经理部
	阳 2 井 128.0	C ₂ t	煤岩	2.9	经理部
	丰 1 井 955.0	C ₂ t	煤岩	1.99	经理部

注: 表 2 中的经理部是指: 华北石油天然气勘探项目经理部, 内部资料。

Barker 和 Pawlewicz 建立的最大埋藏温度 ($T_{\max}$) 与平均镜质体反射率 (R_m) 之间的关系式计算了最大古地温, 计算所获得的最高古地温值为 $236 \sim 266^{\circ}\text{C}$, 平均为 250°C 左右。基本上与锆石的裂变径迹反映的最高古地温相当。

测试沁参 1 井及邻区露头样品石英矿物流体包裹体均一温度 16 块, 组成上石炭统、二叠系、中一下三叠统样品的矿物流体包裹体均一温度变化序列。均一温度可以明显地分为 2 个不同的温度等级, 较低的温度等级一般变化在 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$, 并且具有明显的由上部地层向下部地层或由浅部向深部温度增高的趋势; 较高的温度等级一般变化在 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$, 比低的温度等级约高出一倍, 略具有由上部地层向下部地层增高的趋势 (图 6、图 7)。根据包裹体均一温度测试结果, 结合区内地质构造演化历史及与邻区对比推测: 本区矿物流体包裹体可能形成于早、晚 2 个成岩阶段。早期成岩阶段形成的包裹体均一温度较低, 为 $80 \sim 150^{\circ}\text{C}$, 可能发生于三叠纪一早、中侏罗世, 反映当时为正常地温梯度; 晚期

成岩阶段形成的包裹体均一温度较高, 为 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$, 可能发生于晚侏罗世—白垩纪, 应与高温构造—热液活动有关, 反映当时地温梯度较高, 推测晚期比早期的地温梯度将增加一倍左右。

从区域地质背景研究来看, 晚侏罗世—早白垩世是构造运动比较活跃的时期, 使古生代—早中生代地层一起发生了不同程度的构造变形, 形成一系列的褶皱和断裂。与此同时, 构造运动还引起区内一系列的岩浆活动, 并可造成深部热液的上升与循环, 这些必将会引起地温场的增温。山西地区煤高变质带的分布与岩浆岩的分布相吻合。例如, 襄汾、浮山、翼城之间的二峰山、塔儿山花岗岩, 高平、晋城、陵川、平顺西沟等地一带的花岗岩, 晋中地堑祁县的石英二长岩, 太原西山煤田的狐偃山花岗岩, 临县紫金山花岗岩都与煤的高变质带相对应 (赵重远等, 1995)。另外, 在晋城、阳城、阳泉都有岩脉和岩浆热液矿脉分布。上述岩体的同位素年龄测定值表明, 岩浆侵入时代为晚侏罗世—早白垩世, 其中主要为 $95 \sim 141 \text{ Ma}$ (任战利等, 2005; 陈刚, 1997; 任战利

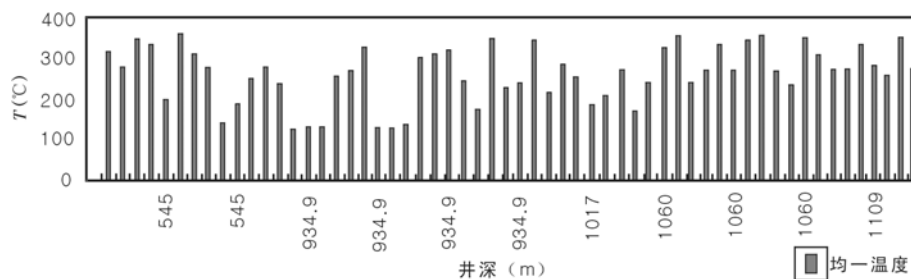


图 6 沁水盆地沁参 1 井流体包裹体测温-井深分布图

Fig. 6 Well Qincan1 of Qin shui basin fluid inclusions temperature with well depth

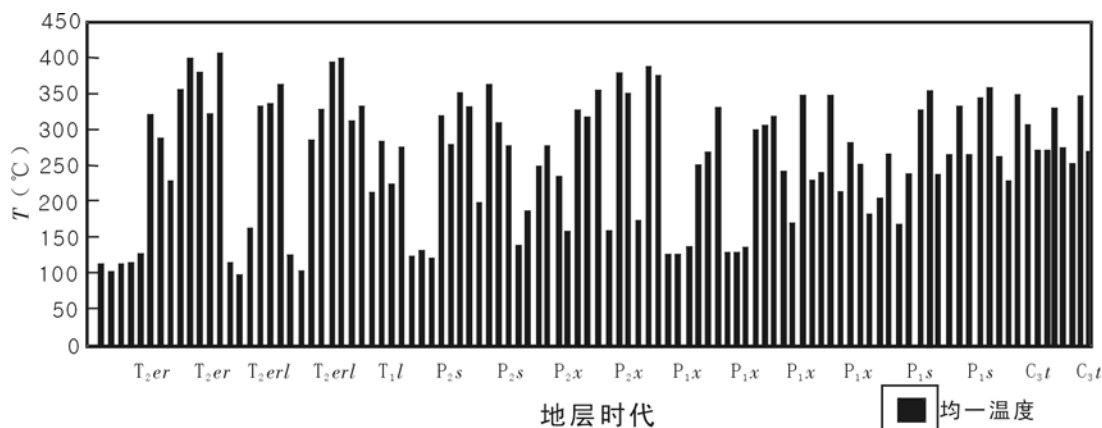


图 7 沁参 1 井及部分地表露头样品的流体包裹体测温-时代分布图

Fig. 7 Well Qincan1 and some fluid inclusions of outcrops of sample thermometry-age

等,2005;孟元库,2013),相当于早白垩世。这说明该区在晚侏罗世—早白垩世存在异常的高温地温场,并可能在早白垩世时期地温场增温达到最高值。

利用磷灰石裂变径迹封闭径迹长度分布的测试结果,运用扇形模型,分别对 17 个样品进行了热史模拟,获得了较为一致理想结果。再结合前述多方面的分析,以及区域盆地构造演化特征,可较系统地获得沁水盆地晚古生代以来热史演化的定性-半定量认识。大致分为 7 个热史演化小阶段:①晚石炭世—二叠纪,由于为稳定克拉通盆地性质,推测为正常地温场,地温梯度为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右,至晚二叠世末期含煤层系的最高古地温约为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。②三叠纪为略偏低的地温场,盆地逐渐演化为地温梯度偏低的类前陆盆地性质,估计为 $2.5\sim 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,晚三叠世末期含煤层系的最高古地温约为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。③早—中侏罗世为略偏高的正常地温场,地温梯度估计为 $3\sim 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。④晚侏罗世—早白垩世为古地温场大幅增温时期,本区地温梯度大幅度上升,推测在早白垩世达到最大值,含煤层系的最大古温度可能达 $200\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$,其地温梯度可能为 $5.5\sim 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。⑤晚白垩世至古新世为高地温场的延续时期,其地温梯度较前期可能仅有缓慢的小幅度降低,推测地温梯度可能为 $5\sim 5.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。⑥始新世—渐新世为地温场大幅降温时期,推测地温梯度可能从 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右降至 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右。⑦新近世—第四纪地温场逐渐趋于正常,推测地温梯度接近现代地温场的 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右。

3 综合分析 with 讨论

与上述热演化阶段相对应,山西高原中—新生代岩石圈构造热演化与高原的隆升过程表现为如下特征。

(1)晚石炭世—二叠纪,山西地区为华北大型稳定克拉通盆地的一部分,主要发育海陆交互相—内陆河湖相含煤碎屑岩建造,地温场正常,古地面高程接近古海平面,一般认为当时的岩石圈厚度较大,为 $160\sim 220\text{ km}$ 。

(2)三叠纪,随着华北克拉通南侧秦岭—大别地区板块俯冲—碰撞作用的强化,前期的克拉通盆地逐渐演化为类前陆盆地性质,特别是经过中三叠世末

的印支 1 幕构造运动后,晚三叠世的前陆盆地特征更加明显,其沉积与沉降中心位于陕南—豫西一带,山西中南部为大型前陆盆地的北侧缓坡,以河湖相红色碎屑岩沉积为主,地势较低;山西北部的主体在晚三叠世可能已隆起为山地,成为剥蚀物源区;三叠纪时期由于地温场偏低,并遭受了一定程度的挤压—缩短作用,其中晚三叠世末的印支两幕运动要略强一些,推测岩石圈厚度将较前期有进一步增厚的趋势。

(3)早—中侏罗世总体为印支期后的应力松弛环境,山西地区不同程度地发育了该时期的断—拗型盆地,它们主要受活动性较弱的少数正断层及应力松弛导致的地壳差异沉降作用控制,主要沉积了一套含煤碎屑岩系。沁水盆地仅发育中侏罗世沉积,中侏罗统与上三叠统为平行不整合接触;推测该时期山西地区总体应属准平原地势,在地势略高的地区发育剥蚀夷平作用,在较低的断—拗型盆地中则发育河湖—沼泽沉积。该时期由于构造逐渐活跃,局部已始出现岩浆活动和热液活动,地温场回升;岩石圈底部的等温面开始变浅,发生一定的底部侵蚀作用,使岩石圈的厚度应有所减薄,推测又回到晚古生代晚期的厚度或略薄。

(4)晚侏罗世—早白垩世是山西地区中生代岩石圈演化最为重要的时期。其中,在晚侏罗世主要表现为强烈的挤压收缩作用(可能包括中侏罗世末、晚侏罗世末等幕式挤压构造运动),基本上奠定了本区的总体挤压构造变形格局,同时表层发生褶皱隆升,形成山地或准高原地势,全区缺失晚侏罗世沉积;早白垩世本区转入应力松弛—弱伸展时期,局部发育弱伸展—塌陷型盆地沉积,山地则逐渐遭受剥蚀。晚侏罗世—早白垩世本区古地温场发生大幅度增温,在早白垩世期间地温梯度可能达到 $5.5\sim 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。反映该时期岩石圈底部与软流圈之间的温度平衡界面可能发生大幅度上移,岩浆活动也逐渐增强,且由源区较深的中基性逐渐向源区较浅的中酸性演化。根据地温梯度将近增加一倍,估计岩石圈厚度减薄将近一半,推测为 $80\sim 120\text{ km}$ 。这同时说明该时期的岩石圈减薄作用并不限于东部的华北平原区,应已扩展至现今的山西高原区。

(5)晚白垩世—古新世总体为弱挤压作用时期,本区总体上为隆起,全区基本上缺失沉积,可能保持了山地—准高原的地势。由于该时期地温梯度较前

期仅有小幅度降低,推测岩石圈厚度少量增加,但仍然偏薄。

(6)始新世—渐新世本区东侧的华北平原区表现为强烈的伸展裂陷作用(断陷广泛、深度大、地势低);而山西地区主要表现为一种应力松弛环境,无明显断陷发育,但地温场大幅降温,同时遭受广泛的剥蚀夷平,地势逐渐降低成为准平原(现今普遍分布有该时期的夷平面)。由于地温梯度的大幅降低,推测岩石圈底部等温界面发生显著下移,岩石圈厚度有较大幅度的增加,可能已接近沁水盆地现今的岩石圈厚度 120~160 km。

(7)新近世—第四纪华北平原区发育成面积广大的拗陷盆地,山西地区则发生广泛的隆升、剥蚀,古气候有从温暖潮湿向半干旱、偏冷演化的趋势,逐渐形成现今的山西高原地貌。由于地温场逐渐趋于正常,推测整体的岩石圈厚度变化不大,但由于山西裂谷在该阶段的发育,使裂谷系附近的岩石圈厚度具明显的减薄(为 80~100 km)。

4 结论

(1)在前人研究基础上,根据沁水盆地印支期后的运动特点,特别是燕山与喜山运动构造性质的差异,将其重新研究与厘定,进行了四级构造单元划分。

(2)以沁参 1 井地质资料为基础,详细分析了沁水盆地的区域构造运动与构造演化特点。

(3)结合各方面的资料,沁水盆地发展演化为:早古生代—晚古生代早二叠世,地温梯度为 3~4 °C/100 m,晚二叠世本地区及邻区整体有所抬升,地温梯度变为 2.5~3.0 °C/100 m;早—中侏罗世,本区有所沉降,地温梯度较前面有所上升,为 3~3.5 °C/100 m;晚侏罗世—早白垩世,本区严重下降,接受沉积,地温梯度大幅度上升,推测在早白垩世达到最大,为 6.0~7.0 °C/100 m;晚白垩世—古近纪早、中期,本区整体没有遭到抬升剥蚀,可能是小范围的变化,地温梯度比前面有小幅度下降;古近纪晚期—末期,本区抬升剥蚀,地温梯度大幅度降低到 3.0~4.0 °C/100 m 左右;中新世以来,山西高原整体趋于稳定,推测地温梯度可能由 3~4 °C/100 m 演变到接近现代的地温场 3 °C/100 m 左右。

致谢:行文过程中得到了中国地质科学院地质

研究所许志琴院士、何碧竹研究员和大庆石油勘探开发研究院施立志高级工程师的指导;另外,审稿专家和期刊编辑对稿件进行了认真的审阅,提出了宝贵的建设性意见,在此一并表示谢意。

参考文献(References):

- 朱日祥,陈凌,吴福元,等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(5): 583-592.
- ZHU Rixiang, CHEN Ling, WU Fuyuan, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton [J]. Sci China, Earth Sci, 2011, 54: 583-592.
- 汪新文. 华北克拉通印支运动及其与早中生代盆地发育的关系[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 1996, 21(4): 449-454.
- WANG Xinwen. Discussion on characteristics of Indosinian movement in north China craton [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1996, 21(4): 449-454.
- 承金,汪新文,王小牛. 山西沁水盆地热史演化特征[J]. 现代地质, 2009, 23(6): 1093-1099.
- CHENG Jin, WANG Xinwen, WANG Xiaoniu. The thermal history of the Qinshui Basin in Shanxi province [J]. Geoscience, 2009, 23(6): 1093-1099.
- 秦勇,宋党育. 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[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- QIN Yong, SONG Dangyu. Coalification and paleo-geothermal system-concurrently gas-controlling geology mechanism of coalification of southern Shanxi province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- 任战利,赵重远. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 134-137.
- REN Zhanli, ZHAO Chongyuan. Late Mesozoic comparative research on the geothermal field of the Ordos Basin and Qinshui Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 134-137.
- 任战利,赵重远,陈刚. 沁水盆地中生代晚期构造热事件 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 46-48.
- REN Zhanli, ZHAO Chongyuan, CHEN Gang. Tectonic thermal events of late Mesozoic in Qinshui basin [J]. Oil and Gas Geology, 1999, 20(1): 46-48.
- 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究 [M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
- REN Zhanli. Research of tectonic-thermal evolution history

- in sedimentary basins, North China[M]. Beijing: Petroleum industry press, 1999.
- 赵重远, 刘池洋. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990.
- ZHAO Chongyuan, LIU Chiyang. Formation and evolution of sedimentary basins and hydrocarbon occurrence, North China Craton[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990.
- 赵重远, 陈刚, 任战利, 等. 山西隆起区古生界区块早期综合评价及邻区含油气条件对比研究[R]. 西安: 西北大学油气盆地研究所, 1995.
- ZHAO Chongyuan, CHEN Gang, REN Zhanli, et al. The early period comprehensive evaluation and petroliferous conditions comparison of the Paleozoic block in Shanxi uplift area[R]. Xi'an: Oil & Gas Basin Institute, Northwest University, 1995.
- 任战利, 肖晖, 刘丽, 等. 沁水盆地构造-热演化史的裂变径迹证据[J]. 科学通报, 2005, 50(增刊): 87-92.
- REN Zhanli, XIAO Hui, LIU Li, et al. Fission track evidence for the tectonic-thermal evolution history of Qinshui basin [J]. Science Bulletin, 2005, 50 (suppl). 87-92.
- 陈刚. 沁水盆地燕山期构造热事件及其油气地质意义[J]. 西北地质科学, 1997, 18(2): 63-67.
- CHEN Gang. Tectothermal event of the Yanshanian and its significance in Qinshui basin [J]. Northwest Geoscience, 1997, 18(2): 63-67.
- 任战利, 肖晖, 刘丽, 等. 沁水盆地中生代构造热事件发生时期的确定[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 43-47.
- REN Zhanli, XIAO Hui, LIU Li, et al. Determination of Mesozoic tectonic heat event in Qinshui basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32 (1): 43-47.
- 孟元库. 太行山东麓地区中-新生代盆-山构造演化[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- MENG Yuanku. Mesozoic-Cenozoic basin-mountain tectonic evolution in eastern foot of Taihang mountain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- REN Zhanli, WANG Shicheng, ZHAO Chongyuan. Determination of palaeotemperature and palaeogeothermal gradient in Qinshui basin[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(4): 233-238.
- FITZGERALD P G, Gleadow J W. Fission track geochronology, tectonics and structure of the Transantarctic mountains in Northern Victoria Land [J]. Antarctica Chem Geol, 1998, 73: 169-198.
- BRANDON M T, VANCE J A. Fission track ages of detrital zircons: implication for the tectonic evolution of the Cenozoic Olympic subduction complex [J]. Am J Sci, 1992, 292: 565-636.
- HURFORD A J. Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps, south central Switzerland, and an age of vertical movement on the Insubric fault line [J]. Contrib Min Petrol, 1986, (9)2: 413-427.