

鄂尔多斯盆地渭北隆起岐山—麟游地区 中生代构造热演化及地质响应 ——来自裂变径迹分析的证据

祁凯^{1,2)},任战利^{1,2)},崔军平^{1,2)},于强¹⁾,曹展鹏¹⁾,杨鹏¹⁾,邓亚仁¹⁾,张梦婷¹⁾

1) 西北大学地质学系,西安,710069; 2) 西北大学大陆动力学国家重点实验室,西安,710069

内容提要:本文通过对渭北隆起西南缘岐山—麟游地区构造变形特征进行研究,结合磷灰石、锆石裂变径迹测试分析及热史模拟,探讨了研究区中生代构造热演化过程及地质响应。结果表明,燕山运动对研究区影响最大,使得研究区发生大规模构造变形及抬升,研究区中生代以来至少包括三次构造抬升:晚侏罗—早白垩世早期(138~128Ma)、早白垩世末以来,主要是晚白垩世(86~69Ma)和始新世(50~40Ma)。AFT年龄的空间分布暗示了研究区抬升冷却具有南早北晚、后期整体抬升的特点。热史模拟结果表明研究区南部在158Ma达到最大古地温,158~130Ma,样品快速抬升至部分退火带,130~40Ma为缓慢抬升,40Ma以来抬升速率明显加快。研究区中生代构造热演化过程与相邻构造单元的相互作用具有密切的联系,晚侏罗世构造抬升与秦—祁造山带此时进入强烈多旋回陆内造山过程相对应,早白垩世稳定沉降期是鄂尔多斯盆地油气成熟的关键时期,晚白垩世以来的构造抬升与秦岭造山带抬升具有一致性,始新世以来的快速隆升,与渭河盆地北缘翘倾作用有关。

关键词:构造变形;裂变径迹分析;热史模拟;岐山—麟游;渭北隆起;鄂尔多斯盆地

渭北隆起是鄂尔多斯盆地南部一级构造单元,在大地构造位置上,它处于构造活动带(秦岭造山带)与稳定地块(鄂尔多斯地块)的过渡地带,构造位置独特(图1a),演化历史复杂。长期以来,该区被众多学者视为盆山耦合关系和构造热演化研究的理想区域。近几年来,随着盆地南部油气勘探工作的不断深入,显示出隆起带北部具有良好的勘探前景。

渭北隆起是中生代以来形成的断块隆起,后期受到强烈的构造变形、抬升作用,严重影响了油气的保存及成藏,进一步制约了油气勘探工作,因此,系统开展渭北隆起后期构造抬升、构造热演化及盆山耦合关系研究具有极其重要的意义。目前,已有众多学者利用磷灰石裂变径迹法和盆地模拟等多种方法从不同角度探讨了渭北隆起后期隆升及演化过程,积累了大量的研究资料^①(Sun Shaohua et al., 1996; Gao Feng et al., 2000; Chen Gang et al., 2007; Liu Wusheng et al., 2008; Wang Jianqiang,

2010; Wang Jianqiang et al., 2010; Xiao Hui et al., 2013; Ren Zhanli, 1995; Ren Zhanli et al., 2014a, 2014b, 2015; Huang Zhigang et al., 2015),基本认定该区整体隆升于早白垩世末,之后不断抬升剥蚀,且不同时期不同地区抬升冷却速率及时间存在一定的差异性。岐山—麟游地区位于渭北隆起西南缘,毗邻渭河盆地,西接河西走廊—六盘山过渡带,西南与北祁连构造带、秦岭造山带相接,处于构造交汇部位(图1a),构造热演化及中生代构造抬升的时限研究相比同区其它地方较为薄弱,该区复杂的构造变形及良好的野外露头记录的地质信息可为解释隆起带构造抬升、热演化及热年代学研究提供有利依据。

因此,本文在野外实际考察及前人资料研究的基础上,通过研究岐山—麟游地区中生代构造变形特征,结合野外露头样品的裂变径迹测试分析,运用构造热年代学的方法,详细探讨了研究区中生代构造抬升期次、构造热演化过程及其地质响应,取得

注:本文为国家自然科学基金项目(41372128)、国家重大专项(2011ZX05005-004-007HZ)、西北大学大陆动力学国家重点实验室(BJ08133-1)资助的成果。

收稿日期:2015-12-11;改回日期:2016-03-31;责任编辑:黄敏。

作者简介:祁凯,男,1993生。研究生在读,主要从事构造—热年代学及热演化研究。Email:1150331820@qq.com。通讯作者:任战利,男,1961年生。研究员,博士生导师,长期从事盆地构造—热演化史与油气成藏和油气地质研究与教学工作。Email:renzhanl@nwu.edu.cn。

了新的认识。

1 研究区地质概况

岐山—麟游地区位于渭北隆起西南缘麟游—永寿逆冲带,该带以草碧山—老龙山—圣人桥断层为北界,以渭河盆地北缘断层为南界,整体呈一三角形

区域(图 1b、c),其与渭北隆起具有统一的结晶基底,由南向北,出露的地层依次变新,主要有:中上元古界、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系及下白垩统等,志留—下石炭统及上白垩统缺失,地层总体呈北东—北东东向展布(图 1c)。

从沉积演化来看,研究区与渭北隆起具有相似

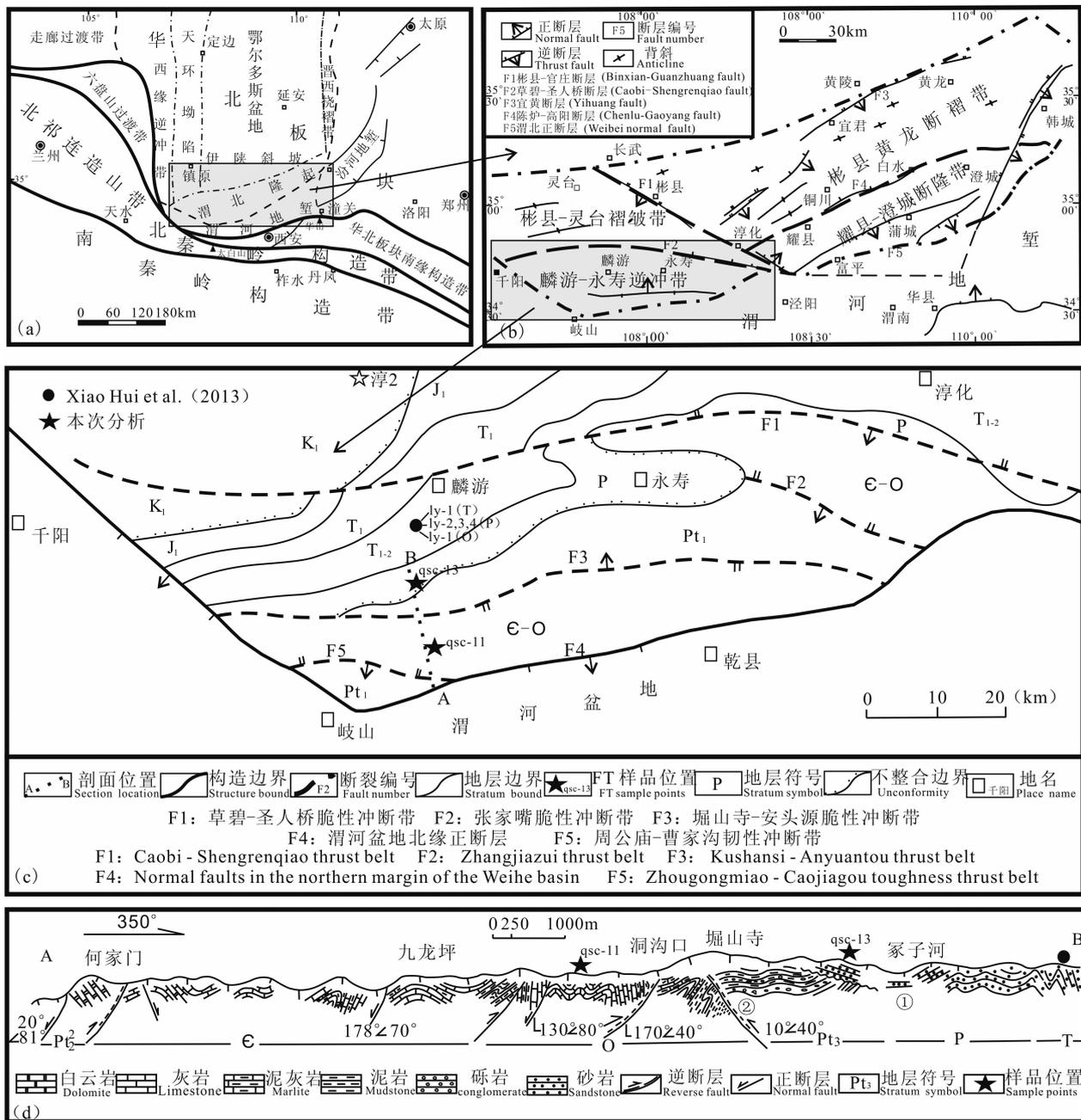


图 1 鄂尔多斯盆地渭北隆起西南缘构造位置、地层展布

Fig. 1 Tectonic location and strata distribution of the southwestern margin of Weibei uplift in the Ordos basin

(a) 研究区大地构造位置; (b) 渭北隆起断裂分布及构造分区; (c) 研究区构造—地质及裂变径迹样品分布;

(d) 岐山—麟游塬山沟地质剖面图(据 Zhou Dingwu et al., 1994 修改)

(a) tectonic location in the study area; (b) fault distribution and tectonic subarea in Weibei uplift; (c) tectonic-geological and sampling points distribution of fission-track in the study area; (d) the tectonic-geological profile of Kushangou in the Qishan-Linyou area (Revision according Zhou Dingwu et al., 1994)

的演化过程,表现为不同时期不同类型的盆地相互叠加,古生代为华北陆缘海—滨浅海盆地,中生代晚三叠世—早白垩世为残延内克拉通盆地,晚白垩世以来进入盆地整体抬升,周缘断陷阶段。现今渭北隆起上出露的地层是后期强烈抬升剥蚀后的结果,加之中生代地层在渭北隆起南部边缘厚度很大,主要以河湖相为主,以及在洛南、周至柳叶河一带分布的中生代地层(Wang Jianqiang et al., 2010),综合表明中生代原始沉积边界应大于现今地层残存边界,向南可达渭河盆地、甚至到华北板块南缘或北秦岭构造带。

2 研究区构造变形特征及变形时间

关于研究区所属构造区带的构造变形特征及构造演化,前人已经做过不同程度的研究(Zhou Dingwu et al., 1994; Liu Chiyang et al., 2006; Zhang Yueqiao et al., 2007),研究成果表明,该区经历了多期构造运动,构造变形较为复杂。在结合前人研究资料的基础上,本文从两个方面探讨研究区构造作用及其表征,首先,构造运动最直接的影响表现在地层的接触关系上,加里东运动使上、下古生界呈角度不整合接触,海西及印支运动主要显示以地壳弱抬升作用形成的地层间区域性平行不整合关系,燕山运动对本区影响较大,表现在晚侏罗统部分缺失并与上覆早白垩统呈角度不整合接触,在南部边缘下白垩统沉积了一套粗碎屑岩类,且下白垩统以上地层整体缺失(图 1、3),喜山运动造成相邻构造单元渭河盆地新生界的巨厚沉积,而研究区主要还是以剥蚀为主。其次,构造运动还主要表现在研究区地层构造变形、断层发育特征上,我们以研究区典型的露头剖面为研究对象,对其进行了构造特征研究及解析。

堀山沟剖面位于研究区南部,岐山与麟游交界处(图 1),主要出露的地层有:中上元古界、寒武—奥陶系、二叠系、向北出露三叠系、侏罗系、下白垩统(图 1),该区构造变形复杂,晚期燕山运动叠加在早期加里东构造的基础上,后期又受到喜山运动的拉张断陷作用,最终形成了现今的面貌。北部二叠—三叠系砂岩组成轴面近直立、走向近东西的冢子河宽缓向斜(图 1d:①处),向斜南翼二叠系呈角度不整合于发生多期变形的震旦系之上,二叠—三叠系的变形特征与区域燕山期变形特征类似,以由南向北逆冲构造兼轴面直立宽缓褶皱变形为特征,其北部被燕山期区域性的逆冲断层(草碧—圣人桥逆断

层)所切割(图 1c),该断层也是渭北隆起上燕山运动逆冲前锋带,构造意义特殊(Zhou Dingwu et al., 1994)。堀山寺—安头源断层(图 1d:②处)是研究区另一条有意义的区域性反冲逆断层,断层带附近变形强烈,残留多期构造形迹,具多期活动性质,表现在加里东期由南向北逆冲后经燕山期改造形成由北向南反冲带,上盘出露中上元古界。堀山寺—安头源断层南至渭河北缘正断层一带,主要由前寒武—奥陶系灰岩、白云岩组成,早期受加里东运动影响,强烈变形褶皱并形成一系列南倾北倒的逆断层,后期又燕山运动影响,由北向南挤压逆冲,该段还发育一些喜山期的正断层,在边缘发生翘倾抬升作用。以上作用最终使前寒武古老地层在该区出露,该区也成为渭北隆起上少有的中上元古界露头剖面。

综上所述,结合区域构造特征研究,我们认为对本区构造变形影响最大的是燕山运动,区域内主要构造作用方向与中晚侏罗及早白垩世末以来的构造应力场基本一致,燕山运动使得上古生界、中生界沉积岩系发生脆性冲断构造及褶皱变形,并叠加改造了下古生界加里东构造层,下白垩统与其下伏地层呈明显的角度不整合接触,因此,研究区现今构造变形与燕山运动密不可分,为了进一步精确厘定研究区中新生界构造变形、抬升的时间及过程,我们采用近几年构造热年代学研究常用的裂变径迹法对其进行研究。

3 裂变径迹分析的结果

3.1 原理方法

裂变径迹测年是建立在矿物 ^{238}U 在自发裂变的过程中会对其载体矿物产生一定的辐射损伤的基础上,通过分析矿物中自发径迹密度与 ^{238}U 含量发展而来的同位素测年方法。裂变径迹分析法(FT)研究盆地演化主要依据裂变径迹矿物中的径迹具有随温度的增高,径迹密度减少,长度变短直至完全消失的特性,随后的抬升冷却又会在低于其封闭温度条件下形成新的径迹。在 $1\sim 100\text{Ma}$ 的时间内,磷灰石的封闭温度范围为 $110\sim 125^\circ\text{C}$,锆石的封闭温度范围为 $210\sim 240^\circ\text{C}$ (Naeser et al., 1989; Gallagher et al., 1998; Donelick et al., 2005),通过测量矿物中 ^{238}U 自发裂变和 ^{235}U 诱发裂变的密度,采用 Zeta 常数法可以获得矿物裂变径迹年龄。年代测定与磷灰石的退火特性相结合,就可以很好地解释盆地的抬升冷却过程及热演化历史(Hu

Shengbiao et al., 1995; Li Xiaoming et al., 2000; Qiu Nansheng et al., 2004; Ren Zhanli et al., 1995, 2014a)。

利用磷灰石裂变径迹资料分析盆地后期抬升冷却年龄及过程,关键在于其退火特性的分析及所处退火带的识别。当样品经历的最高古地温大于完全退火温度时,裂变径迹不再保存,年龄为零。若后期发生一次快速冷却事件,使样品所处的温度小于退火温度,裂变径迹开始保存,矿物的裂变径迹体系的时钟也重新启动。曾完全退火的沉积地层样品记录了几乎相同的年轻的裂变径迹年龄,且远小于其沉积年龄,这就是快速抬升或冷却事件发生的时间(Naeser et al., 1989; Ren Zhanli et al., 2014a)。须注意的是,对测得样品的年龄值必须采用 χ^2 检验,若样品的单颗粒年龄能通过 $P(\chi^2) > 5\%$,则表明样品年龄值服从泊松分布,属于同一年龄组分,样品中心年龄即可代表样品真实抬升冷却年龄;若样品的单颗粒年龄 $P(\chi^2) < 5\%$,则表明样品年龄值不服从泊松分布,中心年龄代表比真实年龄偏大的混合年龄平均值(非单一冷却年龄),必须采用雷达视图与高斯拟合曲线法相结合,对混合年龄进行分组解析,给出不同年龄组分对应的最佳高斯拟合年龄,提供经历不同期次构造抬升事件的样品冷却年龄纪录(Ding Lin, 1997; Zhou Zuyi et al., 2001b; Chen Gang et al., 2007; Qiao Jianxin et al., 2012)。

3.2 样品采集及实验流程

本文在对研究区野外重点露头区段考察的基础上,在岐山曹家沟地区采集样品2块,进行磷灰石、锆石裂变径迹分析,样品分布层位为奥陶系平凉组、二叠系下石盒子组,此外,还系统收集了前人在麟游地区发表的裂变径迹数据(Xiao Hui et al., 2013),两者结合相互补充,从南向北可覆盖整个研究区,样品分布及编号如图1所示。样品在中国地质大学(北京)进行了裂变测试分析,所采样品用常规的重液和磁选方法分离出磷灰石、锆石单矿物,分别制成环氧树脂和聚全氟乙丙烯塑料样片,经磨平和抛光后制成光薄片,使得矿物内表面露出,并与白云母外探测器贴紧。磷灰石在25℃下用7% HNO₃蚀刻30 s,锆石在220℃的8 g NaOH+11.5 g KOH溶液中蚀刻30 h,分别揭示自发径迹,再将低铀白云母外探测器与矿物一并放入反应堆辐照,揭示诱发径迹。矿物的裂变径迹是用高精度光学显微镜,在高倍显微镜下测量,选择平行C轴的柱面测出自发

径迹和诱发径迹密度,水平封闭径迹长度。中子注量利用CN5铀玻璃标定,再根据IJGS推荐的 ξ 常数法和标准裂变径迹年龄方程计算年龄值,磷灰石和锆石的Zeta常数分别为 357.8 ± 10.8 和 127.1 ± 6.4 。测试结果见表1。

3.3 结果与解释

对样品得到的裂变径迹年龄进行分析的关键是样品所处退火带的划分,除了利用表观年龄与真实年龄进行比较外,还可利用不同层位热演化程度进行判别。本文结合不同层位镜质体反射率及裂变径迹年龄数据,对实验结果进行分析。研究区两块磷灰石裂变径迹样品中心年龄分别为 $104 \pm 11\text{Ma}$ 、 $155 \pm 12\text{Ma}$ (表1),均远小于样品产出的地层年龄,平均径迹长度为 $12.3 \pm 1.8 \mu\text{m}$ 、 $12.7 \pm 1.6 \mu\text{m}$,小于新生成自发径迹平均长度 $16.3 \pm 0.9 \mu\text{m}$,表明样品经历了退火冷却作用,样品表观年龄反映最近一次构造抬升冷却年龄。

对于岐山曹家沟奥陶系平凉组qsc-11样品,锆石裂变径迹(ZFT)中心年龄为 $245 \pm 21\text{Ma}$,属于小于地层年龄但 $P(\chi^2) = 0$ 情况下的混合年龄,雷达图上显示FT年龄至少有两个组分(图2),对应拟合峰值年龄分别为 $134\text{Ma} \pm$ 、 $249\text{Ma} \pm$,较老组分年龄与其中心年龄在误差范围内相当,可能暗示研究区受中生代构造运动的最早时间;较年轻组分年龄大致对应 $134\text{Ma} \pm$ 的一次构造抬升,代表后期构造冷却的时间,以上年龄均小于地层实际年龄 $450 \sim 430\text{Ma}$ 。另外,研究区奥陶系地层等效镜质体反射率大于2.0%,计算最大古地温可达200℃以上,热演化程度高,锆石可能发生部分退火。qsc-11样品的磷灰石裂变径迹在 $P(\chi^2) < 5\%$ 的情况下给出的中心年龄为 $104 \pm 11\text{Ma}$,远小于地层实际年龄,代表非单一冷却年龄,采用高斯拟合得到峰值年龄为 $75\text{Ma} \pm$ 、 $128\text{Ma} \pm$,较老组分年龄与同一样品FT年轻组分年龄基本一致,代表研究区奥陶系地层在燕山期最早抬升时间,较年轻组分年龄反映 $75\text{Ma} \pm$ 的又一次构造抬升,长度分布呈偏峰状且分布较宽(图2),表明样品经过的热历史比较复杂。对于岐山曹家沟二叠系下石盒子组砂岩样品qsc-12,磷灰石裂变径迹在 $P(\chi^2) < 5\%$ 的情况下得出的为混合年龄,中心年龄($155 \pm 12\text{Ma}$)与高斯拟合得到的年龄($134\text{Ma} \pm$)在误差范围内一致,小于地层实际年龄 $270 \sim 250\text{Ma}$,表明二叠系最早抬升时间为 $134\text{Ma} \pm$,二叠系顶部镜质体反射率大于1.5%,经历过高温退火。此外,结合前人在此地

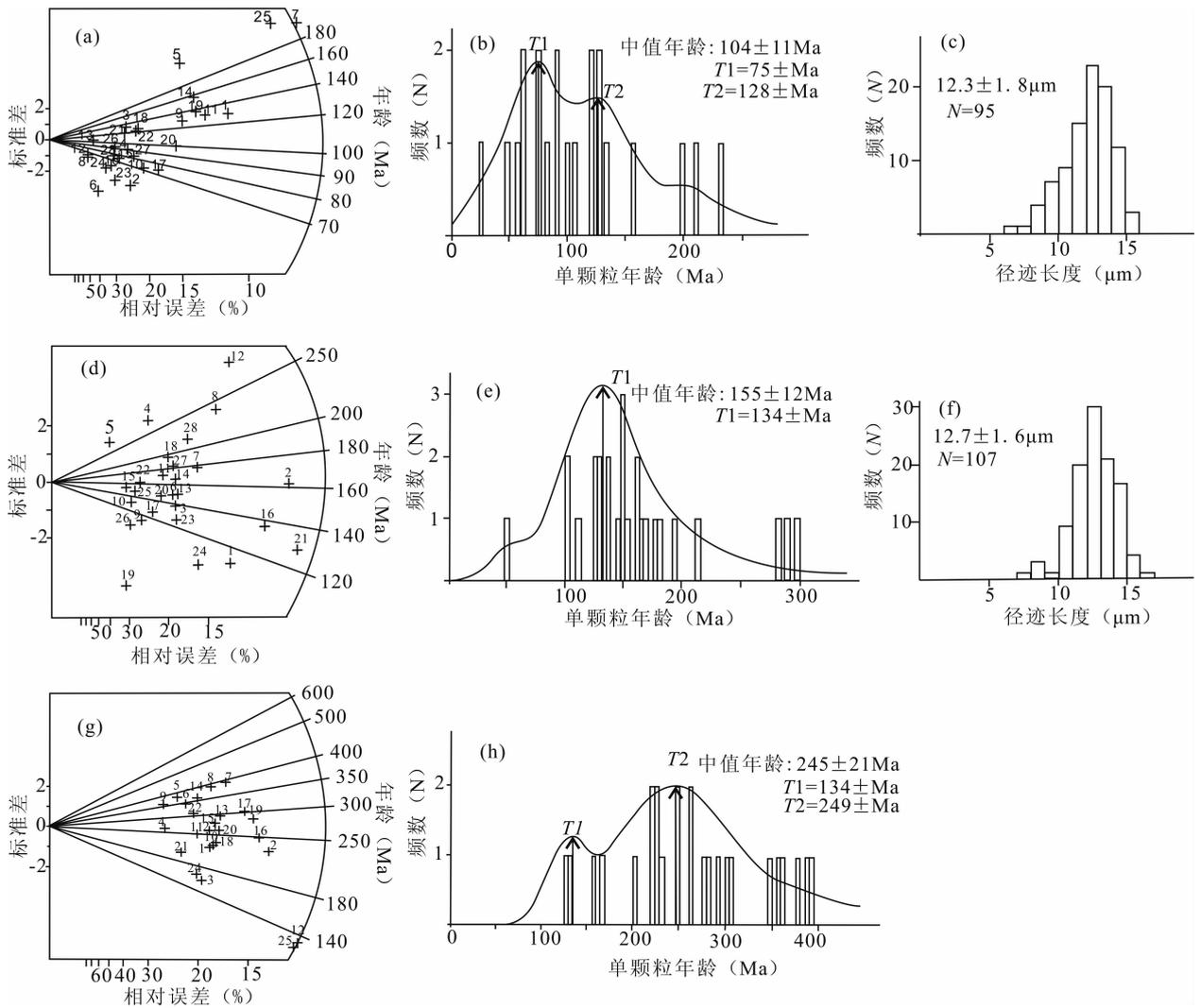


图 2 渭北隆起西南缘样品裂变径迹年龄组分分解及长度分布特征

Fig. 2 Estimating age populations in a mixed distribution of AFT analysis and length distribution in the southwestern margin of Weibei uplift

(a) — qsc-11, 单颗粒年龄雷达图; (b) — qsc-11, 单颗粒年龄分布直方图及高斯拟合曲线; (c) — qsc-11, 径迹长度分布直方图; (d) — qsc-13, 单颗粒年龄雷达图; (e) — qsc-13, 单颗粒年龄分布直方图及高斯拟合曲线; (f) — qsc-13, 径迹长度分布直方图; (g) — qsc-11, 锆石单颗粒年龄雷达图; (h) — qsc-11, 锆石单颗粒年龄分布直方图及高斯拟合曲线

(a) — qsc-11, single particle age radar map; (b) — qsc-11, single particle age distribution histogram and Gaussian fitting curve; (c) — qsc-11, track length distribution histogram; (d) — qsc-13, single particle age radar map; (e) — qsc-13, single particle age distribution histogram and Gaussian fitting curve; (f) — qsc-13, track length distribution histogram; (g) — qsc-11, Zircon single particle age radar map; (h) — qsc-11, Zircon single particle age distribution histogram and Gaussian fitting curve

区已发表的裂变径迹冷却年龄及峰值年龄, 绘制了研究区及相邻构造单元地层-AFT 年龄关系图(图 3), AFT 年龄与地层缺失的时间具有很好的对应性, 按照年龄的集中程度, 我们将峰值年龄分为三组: 138~128Ma(晚侏罗世末—早白垩世早期), 86~69Ma(晚白垩世), 50~40Ma(始新世), 样品大部分年龄都落在 89~69Ma 之间, 表明晚白垩世是研究区主要抬升期, 是燕山期挤压构造变动的结果。

根据上述裂变径迹年龄分析结果可知, 岐山—

麟游地区主要经历了三次构造抬升, 其中最早抬升时间为晚侏罗末—早白垩世早期(138Ma), 这在整个渭北隆起上都是较早的, 指示了燕山早期的区域构造变动, 也反映了渭北隆起早期构造变形具有西强东弱的特点; 86~69Ma 的裂变径迹年龄对应抬升时间为晚白垩世, 该期年龄分布广泛, 反映了整体隆升的特点, 研究区全面进入后期改造阶段; 始新世(50~40Ma)抬升年龄可能是研究区新生代构造运动的开始, 与新生代渭河盆地初始发育有关。

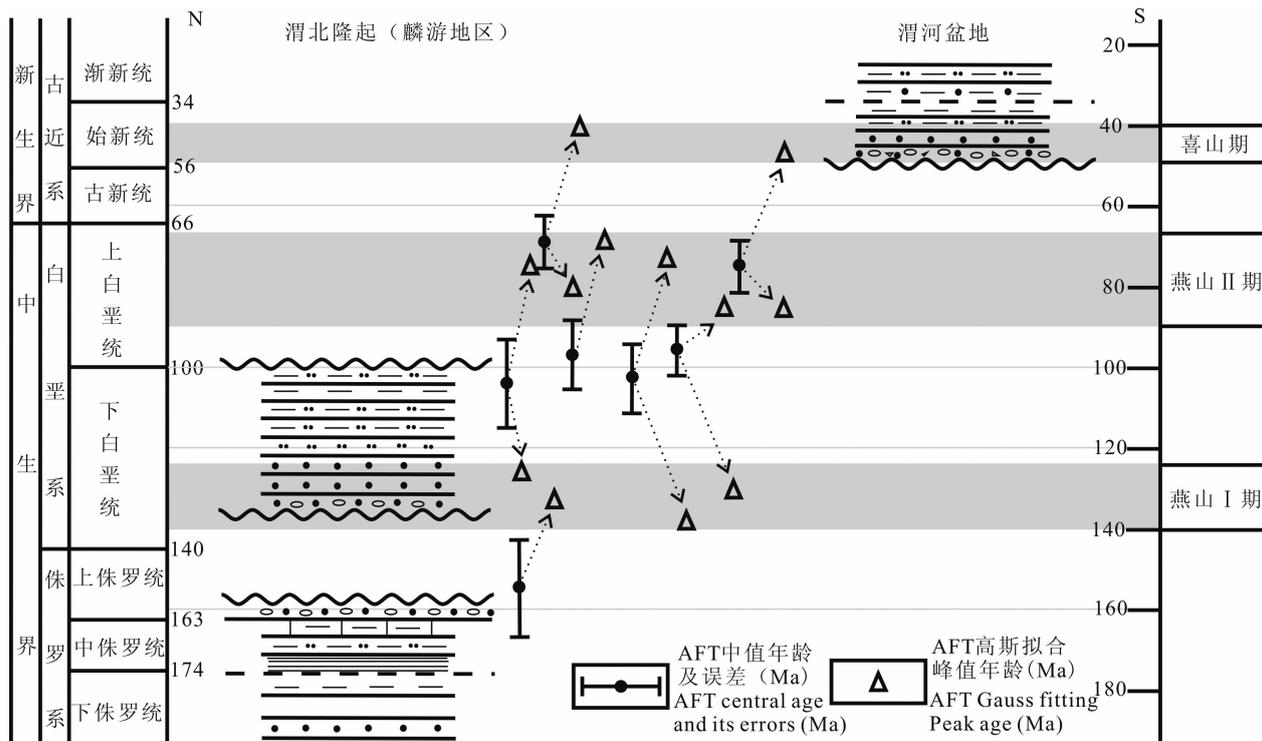


图 3 渭北隆起西南缘磷灰石裂变径迹峰值年龄—地层及与构造运动的对比关系

Fig. 3 The comparison of apatite fission-track ages with strata, and tectonic movements in the southwestern margin of Weibei uplift

渭北隆起不同区块具有差异隆升的特点(Wang Jianqiang et al., 2010; Ren Zhanli et al., 2015)。这一点不仅表现在研究区裂变径迹记录的最早抬升年龄(138~128Ma)早于隆起带其它地区,而且在研究区内部,从南向北,裂变径迹年龄也呈现一定的规律性,南部奥陶系及二叠系样品记录的最早抬升年龄(138Ma)明显早于北部三叠系样品的年龄(69Ma),86~69Ma的裂变径迹记录的抬升年龄在南部和北部均有记录,从而表明研究区抬升冷却具有南部最先抬升、后期整体抬升的特点。这与野外观测到的地质事实具有一致性,研究区从南向北,地层依次变老,反映的南部抬升剥蚀量大于北部。

4 抬升冷却史模拟及热演化史重建

磷灰石裂变径迹法不仅可以提供抬升冷却的时间,还可结合年龄和长度这两个参数进行热史模拟,从而获得更多演化过程信息,对于混合年龄和经受过热扰动的数据,通过热史模型可以进一步揭示出快速冷却幕的时间、冷却前的温度及样品首次进入退火带的时间(Gleadow et al., 1986; Yamada et al., 1995; Ketcham et al., 2000; Zhou Zuyi et al., 2001a, 2001b)。本次模拟采用磷灰石裂变径迹退火

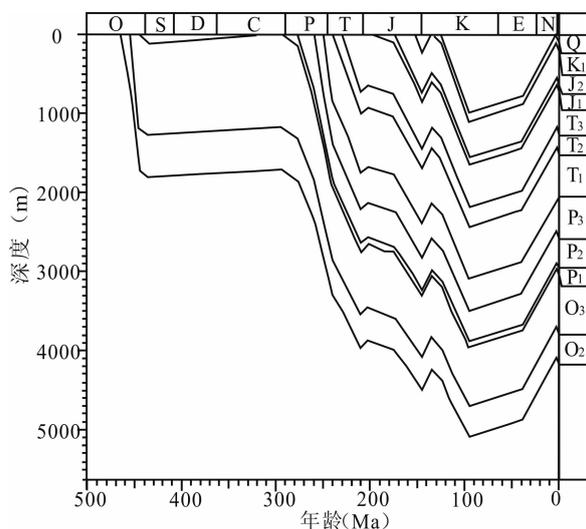


图 4 渭北隆起西南缘北部典型井(淳 2 井)埋藏史图

Fig. 4 Burial history of typical well (Chun 2 well) in the north of the southwestern margin of Weibei uplift

扇形模型,运用 AFTSolve 软件对磷灰石样品进行热史(温度—年代)模拟,输入实验测定的年龄、长度等值,选择 Laslett(Durang 磷灰石)退火模型,径迹初始长度定为 16.3 μ m,拟合时选用限制任意搜索项(CRS),曲线拟合采用 Monte Carlo 算法,拟合曲线次数选取 20000 条,与结晶 c 轴平行的裂变径迹

表 1 渭北隆起西南缘磷灰石、锆石裂变径迹测试分析数据

Table 1 Apatite and zircon fission track data in study area in the southwestern margin of Weibei uplift

采集位置	样号	层位	矿物	颗粒数(N)	自发径迹条数(Ns)	自发径迹密度 $\rho_s(10^3/cm^2)$	诱发径迹条数 Ni	诱发径迹密度 $\rho_i(10^3/cm^2)$	$P(\chi^2)$ 检验%	中心年龄 $\pm 1\sigma$ (Ma)	池年龄 $\pm 1\sigma$ (Ma)	峰值年龄(Ma)	长度 $L \pm 1\sigma$ (μm)(N)
岐山曹家沟	qsc-11	O ₃ p	磷灰石	28	1443	6.837	2525	11.964	0	104±11	132±8	75,128	12.3±1.8(95)
岐山曹家沟	qsc-11	O ₃ p	锆石	25	6280	218.041	959	33.296	0	245±21	246±15	134,249	
岐山曹家沟	qsc-12	P ₃ x	磷灰石	28	1568	5.625	2352	8.437	0	155±12	154±9	134	12.7±1.6(107)
麟游南*	ly-1	T ₂ e	磷灰石	28	920	5.188	2589	14.6	2.0	97±8	100±7	69	13.0±1.6(100)
麟游南*	ly-2	P ₃ s	磷灰石	26	1298	3.286	3575	9.05	0.5	102±8	105±7	74,138	12.8±1.6(101)
麟游南*	ly-3	P ₂ x	磷灰石	28	1400	2.165	5600	8.66	0.5	75±6	74±4	50,86	13.1±1.5(103)
麟游南*	ly-4	P ₃ s	磷灰石	26	1439	3.049	4540	9.62	0	95±7	97±6	85,132	12.9±1.4(101)
麟游南*	ly-5	O ₃	磷灰石	24	931	4.867	4299	22.47	2.5	69±6	67±4	40,83	13.3±1.5(92)

注: * 表示数据来源于来自于(Xiao Hui et al., 2013); ①N=颗粒数;Ns = 自发 FT(裂变径迹)条数; ρ_s = 自发 FT 密度; Ni = 诱发 FT 条数; ρ_i = 诱发 FT 密度; $P(\chi^2) = \chi^2$ 检验概率;年龄 $t \pm \sigma$ =FT 年龄 \pm 标准差; $L \pm \sigma$ = 平均 FT 长度 \pm 标准差;N=封闭 FT 条数;②当 $P(\chi^2) < 5\%$,磷灰石裂变径迹年龄为 Central age(中心年龄),当 $P(\chi^2) > 5\%$,磷灰石裂变径迹年龄为 Pooled age(冷却年龄)。

蚀刻的最大直径(Dpar)为 1.5 μm 。

为了获得符合研究区地质事实的高质量模拟结果,我们选取以下几点作为模拟的边界条件:①设定地表现今温度为 15 $^{\circ}C$,根据样品所在地层的年龄确定为模拟的初始时间;②研究区现今地温梯度为 3.12 $^{\circ}C/100m$,中生代晚期最大古地温梯度为 3.5~4.5 $^{\circ}C/100m$,镜质体反射率表明样品经历高温退火;③根据实验测试获得的裂变径迹长度、年龄和样品所处的地质背景,确定热史模拟过程中关键地质事件的温度和时间;④结合研究区北部典型井的埋藏史图(图 4),对样品完全退火之前的热史路径进行约束。模拟结果的检验,一般用软件输出的 K-S Test(长度拟合度)和 Age GOF(年龄拟合度)检验参数表示,若两者均大于 5.0%,认为模拟过程是比较可信的,若都超过 50.0%,则认定模拟结果可信。

本文以研究区已掌握的地质背景和边界条件作为约束条件,利用南部曹家沟奥陶系平凉组以及二叠系下石盒子组样品的 AFT 数据进行模拟。样品概率检验 $P(\chi^2)$ 等于 0,但以多种地质条件作为约束,仍可以提供有用的热史信息。奥陶系样品 qsc-11 模拟得到的年龄平均值为 130Ma,模拟径迹长度为 12.5 μm ,年龄拟合度 Age GOF 为 0.87、K-S Test 为 0.47,在地质约束条件下获得了较好的模拟结果(表 2、图 5a),从温度演化路径可以看出,样品自形成以后,先快速埋深,后经加里东运动,发生轻微抬升,300~158Ma 经历持续埋藏过程,158Ma 左右,样品达到最大埋藏深度,158~130Ma,样品快速抬升至部分退火带,130~40Ma 为缓慢抬升,40Ma 以来快速抬升,最终抬升至地表,裂变径迹年龄记录了样品穿过部分退火带的时间,大致对应于 135Ma。

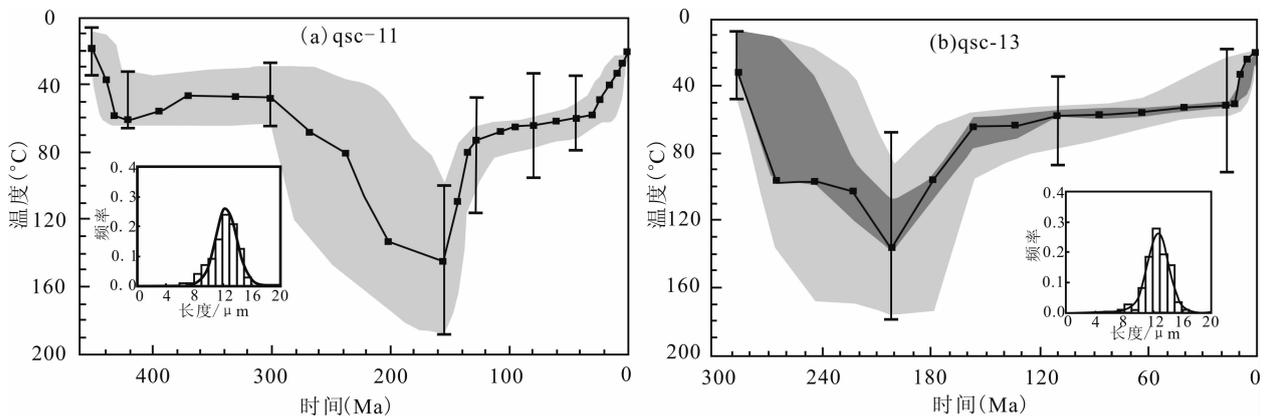


图 5 渭北隆起西南缘岐山—麟游地区 AFT 热史模拟图

Fig. 5 Thermal history based on AFT inverse modeling of Qishan-Linyou area in the southwest of Weibei uplift (a) —Ordovician in Caojiagou of Qishan; (b) —Permian in Caojiagou of Qishan; The dark areas represents a better fitting path, light areas represents an acceptable path, “The solid black line” represents the best fitting path

表2 渭北隆起西南缘磷灰石裂变径迹热史模拟结果

Table 2 Thermal simulation results of AFT from the southwestern margin of Weibei uplift

样品及层位	实测径迹长度(μm)	模拟径迹长度(μm)	实测年龄(Ma)	拟合年龄(Ma)	最老径迹年龄(Ma)	长度拟合度	年龄拟合度
qsc-11(O ₃ p)	12.3	12.5	132	130	159	0.47	0.87
qsc-13(P ₃ x)	12.7	12.7	154	153	186	0.61	0.91

二叠系样品 qsc-13 模拟得到的年龄平均值为 153Ma, 模拟径迹长度为 12.7 μm , 年龄拟合度 Age GOF 为 0.91、K-S Test 为 0.61(表 2、图 5b), 单从检验参数上来看, 模拟结果较好, 但考虑到研究区已有地质事实, 可信度值得商榷, 主要表现在模拟得到样品最早在三叠纪末(200Ma)已发生大规模抬升, 但目前麟游地区广泛分布有早中侏罗世地层, 侏罗纪煤层较发育, 表明研究区当时处于近岸湖泊—沼泽环境, 地层并未大规模抬升, 同时结合研究区构造变形特征研究及淳 2 井的埋藏史图(图 4), 可以推测二叠纪最早抬升时间也大致对应晚侏罗世。另外, 通过奥陶系样品裂变径迹热史模拟与研究区北部淳 2 井的埋藏史图对比可知, 两者在反映构造抬升时间上基本具有一致性, 差异主要表现在构造抬升的速率以及早白垩世演化历史的不同, 主要原因在于淳 2 井位于研究区最北部, 构造抬升时间相对较晚, 早白垩世仍处于伸展背景下的坳陷沉积阶段, 沉积了一套厚度巨大的粗碎屑岩石。

5 讨论

综合裂变径迹年龄分析以及热史模拟的结果, 我们将研究区中生代构造热演化过程分为三个阶段: 晚侏罗—早白垩世初构造抬升阶段, 早白垩世稳定沉降期, 早白垩世末以来差异构造抬升阶段, 对应于这三个构造热演化阶段, 研究区及其周缘地区存在一系列与之相耦合的地质响应。

本文裂变径迹分析最早一期抬升冷却年龄为 138~128Ma, 模拟得到的抬升时间为 158Ma \pm , 反映了研究区最早在晚侏罗世已经发生了构造挤压抬升, 并可能延续到早白垩世初。与之相对应, 晚侏罗世, 秦—祁造山带进入了强烈多旋回陆内造山过程, 盆地西南缘受到来自秦祁昆或古特提斯构造域对接叠加南北向应力作用, 最早的裂变径迹年龄正是对其的记录。另外, 秦岭造山带还发育了分布广泛的燕山期花岗岩, 已经发表的同位素测年数据^①(Zhang Benren et al., 2002; Pang Zhenshan, 2006; Gong Hujun et al., 2009; Zhang Zhaowei et al., 2010)表明这些花岗岩对应年龄在 170~120Ma 均有分布, 研究区抬升冷却年龄与秦岭燕山期花岗岩

形成时间基本吻合, 表明研究区晚侏罗世构造抬升变形受到秦岭造山带影响, 导致了鄂尔多斯盆地西南缘进入陆内变形阶段, 地层整体抬升并挤压变形, 经历复杂逆冲推覆, 普遍缺少晚侏罗世沉积, 上覆早白垩世地层与前白垩世地层多成角度不整合接触。早白垩世, 盆地南部边缘受晚侏罗世强烈挤压构造背景的影响, 可能仍处于隆起状态, 而北部处于伸展背景下坳陷盆地发育时期, 边部高, 内部低, 周缘山体遭受风化剥蚀, 沉积了一套以粗碎屑为主的山麓洪积扇堆积(图 3), Wang Jianqiang . (2010)等对麟游—彬县地区宜君砾岩进行了研究, 表明砾岩主要来自北秦岭, 暗示了当时北秦岭构造活动较为强烈。另外, 据任战利等研究, 早白垩世是鄂尔多斯盆地油气形成的重要时期, 地层埋深作用及异常地温场双重作用对地层成岩作用及烃源岩成熟生烃产生了重要的影响(Ren Zhanli, 1995, 1999; Ren Zhanli et al., 2001, 2007)。早白垩世末以来, 研究区开始整体抬升, 遭受剥蚀, 研究区裂变径迹记录的抬升年龄有两期, 86~69Ma 和 50~40Ma, 86~69Ma 大致对应于晚白垩世, 研究区普遍缺失这一时期的沉积地层记录(图 3), 下白垩统及其下伏地层受到了不同程度的剥蚀, 另外据万景林等对秦岭造山带中不同岩浆岩磷灰石裂变径迹测年的结果, 表明秦岭中广泛分布 102~66Ma、63~40Ma、30~10Ma 的裂变径迹冷却年龄(Wan Jinglin et al., 2000; Hu Shengbiao et al., 2005), 这与我们对研究区热史模拟的结果基本一致, 两者共同揭示了研究区中生代后期构造抬升过程与秦岭造山带后期演化具有一致性。研究区 50~40Ma 的冷却年龄大致对应于始新世早中期, 这可能与渭河盆地北缘翘倾作用有关, 渭河盆地新生代发生断陷沉降, 盆地记录的最早沉积地层红河组沉积年龄对应于 56Ma, 以后不同时期沉积速率变化较大, 两者年龄相当, 表明渭河盆地的沉降与渭北隆起的隆升具有一定的耦合关系。

渭北隆起西南缘复杂多变的构造—热演化历史与秦—祁—昆造山带燕山早中期强烈陆内造山过程在盆地西南缘产生的构造效应具有密切的联系, 从晚侏罗世开始的构造挤压抬升极大地影响了盆地南部油气的生成与保存, 特别是对于渭北隆起南部

来说,由于受到后期持续抬升剥蚀,早古生代到三叠纪地层从南向北依次出露地表,对油气的保存极为不利,而北部白垩系出露的广大地区,油气保存条件相对较好。根据研究区后期剥蚀量的大小以及烃源岩、盖层的发育情况,认为研究区麟游以北长武—旬邑地区可能是寻找下古生界天然气藏的有利地区(Ren Zhanli et al., 2014b)。

6 结论

(1)在对岐山—麟游地区中生代构造变形特征研究的基础上,认为燕山运动对研究区影响最大,使得研究区发生大规模构造变形及抬升;喜山运动的主要影响在于发生边缘翘倾作用,最终形成现今地貌。

(2)AFT 年龄记录研究区中生代以来经历了三次构造抬升,分别为晚侏罗—早白垩世早期(138~128Ma)、早白垩世末以来,主要是晚白垩世(86~69Ma)、始新世(50~40Ma)。研究区内部,从南向北,裂变径迹年龄也呈现一定的规律性,南部奥陶系及二叠系样品记录的最早抬升年龄(138Ma)明显早于北部三叠系样品的年龄(69Ma),86~69Ma 的裂变径迹记录的抬升年龄在南部和北部均有记录,从而表明研究区抬升冷却具有南部最先抬升、后期整体抬升的特点。热史模拟表明研究区最南部可能在晚侏罗世(158Ma)达到最大古地温,158~130Ma 快速抬升,130~40Ma 为缓慢抬升,40Ma 以来抬升速率明显加快。早白垩世伸展背景下的沉积仅局限研究区北部,早白垩世以后,研究区整体抬升。

(3)研究区中生代以来构造热演化在周缘秦岭造山带、渭河盆地具有一定的地质响应,晚侏罗世构造抬升与秦—祁造山带此时进入强烈的多旋回陆内造山过程相对应,早白垩世稳定沉降期是鄂尔多斯盆地油气成熟的关键时期,早白垩世末以来的构造抬升与秦岭造山带抬升具有一致性,始新世以来的快速隆升,与渭河盆地北缘翘倾作用有关。

注 释

- ① 任战利,崔军平,等. 2010. 国家科技重大专项课题鄂尔多斯早古生代海相沉积盆地构造演化与天然气富集成藏关系研究报告。
- ② 任战利,郭科,等. 2014. 渭河盆地基底结构与形成演化研究报告. 中国地质调查局西安地质调查中心项目报告。

References

Chen Gang, Sun Jianbo, Zhou Lifa, Zhang Huiruo, Li Xiangping, Li Xiangdong. 2007. The fission track study of the Mesozoic

tectonic uplift events in the southwest edge of Ordos Basin. *Science in China: Series D: Earth Science*, 37 (Suppl. D): 110~118(in Chinese with English abstract).

- Donelick R A, O'Sullivan P B, Ketcham R A. 2005. Apatite fission-track analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 49~94.
- Ding Lin. 1997. Advance of fission-track analysis method and its application. *Quaternary Sciences*, 17(3): 272~280. 17(3): 272~280(in Chinese with English abstract).
- Gao Feng, Wang Yuejun, Liu Shunsheng, HU Baoqing. 2000. Thermal history study in the west of the Ordos basin using Apatite fission-track analysis. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(1): 87~91(in Chinese with English abstract).
- Gallagher K, Brown R, Johnson C. 1998. Fission track analysis and its applications to geological problems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1): 519~572.
- Gleadow A J W, Duddy I R, Lovering J F. 1986. Fission track analysis; A new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential. *APEA J*, 23: 93~102.
- Gong Hujun, Zhu Laiming, Sun Boya, Li Ben, Guo Bo. 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui granitic plutons in the South Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 248~264(in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 1995. Principles and progresses on thermal regime of sedimentary basins an overview. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*. 2 (3~4): 171~180 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, Hao Jie, Fu Mingxi, Wu Weiping and Wang Jiyang. 2005. Cenozoic denudation and cooling history of Qinling-Dabie-Sulu orogens: apatite fission track thermochronology constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1167~1173 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhigang, Ren Zhanli, Chen Yulin. 2015. Thermal evolution history of Yanchang Formation in the southeastern margin of the Ordos Basin: evidence from vitrinite reflectance and apatite fission track. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 909~916 (in Chinese with English abstract).
- Ketcham R A, Donelick R A, Donelick M B. 2000. AFT Solve: A program for multi-kinetic modeling of apatite fission track data. *Geol Mater Research*, 2(1): 1~32.
- Li Xiaoming, Tan Kaixuan. 2000. Fission track dating method-present status and existing problems. *Geology Geochemistry*, 28(4): 96~100(in Chinese with English abstract).
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Wang Feng, Chen Hong. 2006. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 737~747 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Qin Mingkuan, Qi Fuchen, Xiao Shuqing, Wang Zhiming. 2008. Analysis on the Meso-Neozoic subsidence and uplift history of the periphery of Ordos basin using apatite fission track. *Uranium Geology*, 24(4): 221~232(in Chinese

- with English abstract).
- Naeser N D, Naeser C W, McCulloch T H. 1989. The application of fission-track dating to the depositional and thermal history of rocks in sedimentary basins//Thermal history of sedimentary basins. Springer New York, 157~180.
- Pang Zhenshan. 2006. Geological characteristics and genesis of the Mesozoic granitoids in western Henan. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for Doctoral Degree (in Chinese with English abstract).
- Qiao Jianxin, Zhao Hongge, Wang Hairan. 2012. Fission-track thermochronology: Method, Application and Latest Progress. *Geology and Resources*, 21(3): 308~312 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Nansheng, Hu Shengbiao, He Lijuan. 2004. Theory and Application of Thermal Mechanics Research in Sedimentary Basin. Beijing: Petroleum industry Press (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli. 1995. Thermal history of Ordos Basin assessed apatite fission track analysis. *Acta Geophysica Sinica*, 38(3) 339~349(in Chinese with English abstract).
- Ren ZhanLi. 1999. Research on Tectonic Thermal Evolution in Sedimentary Basins of North China (in Chinese). Petroleum Industry Press, 1~50(in Chinese with abstract).
- Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan. 2001. Recovery and comparison of geothermal gradient for Late Mesozoic sedimentary basins in the northern Part of China. *Petroleum Exploration and Development*, 28(6):1~4 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, Cui Junping, Liu Xinshe. 2007. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(6):674~684 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, Cui Junping, Xiao Yuanyuan, Xiao Hui. 2007. Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos basin. *Science China (Ser D-Earth Sci)*, 37 (Suppl II): 27~38 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Tian Tao, Li Jinbu, Wang Jiping, Cui Junping, Li Hao, Tang Jianyun, Guo Ke. 2014a. Review on methods of thermal evolution history in sedimentary basins and thermal evolution history reconstruction of superimposed basins. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(3): 1~20(in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Cui Junping, Li Jinbu, Wang Jiping, Guo Ke, Wang Wei, Tian Tao, Li Hao, Cao Zhanpeng, Yang Peng. 2014b. Tectonic-thermal history reconstruction of Ordovician in the Weibei uplift of Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2044~2056 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Cui Junping, Guo Ke, Tian Tao, Li Hao, Wang Wei, Yang Peng, Cao Zhanpeng. 2015. Fission-track analysis of uplift times and processes of the Weibei uplift in the Ordos Basin. *Chinese Science Bulletin* 60(14):1298~1308 (in Chinese with English abstract).
- Sun Shaohua, Liu Shunsheng, Wang Jiyang. 1996. The heat flow field in Ordos Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 20(1):29~37 (in Chinese with English abstract).
- Wan Jinglin, Wang Yu, Li Qi, Zhen Dewen, Li Daming. 2000. Apatite fission track study of Taibai mountain uplift in the Mesozoic-Cenozoic. *Nuclear techniques*, 28(9):712~716 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Tong Jianping, Zhao Hongge, Gao fei, Liu Chao. 2010. Development time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south of Ordos basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 46(4):22~30(in Chinese with English abstract).
- Wang Jianqiang. 2010. Mesozoic-Cenozoic basin evolution-reforming and basin-mountain coupling in southern Ordos basin. Xian: A Dissertation Submitted to Northwest University for Doctoral Degree(in Chinese with English abstract).
- Xiao Hui, Li Jianxin, Yang Han Wei, Yang Qiongjing. 2013. The tectonic uplift time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south edge of Ordos Basin, *Journal of Xi'an University of Science And Technology*, 33(5):576~593(in Chinese with English abstract).
- Yamada R, Tagami T, Nishimura S. 1995. Annealing kinetics of fission tracks in zircon: An experimental study. *Chem Geology*, 122: 249~258.
- Zhang Benren, Gao Shan, Zhang Hongfei. 2002. geochemistry of Qinling orogenic belt. Beijing: Science Press(in Chinese without English abstract).
- Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Zhao Donghong, Gao Yong-bao, Peng Suxia. 2010. Zircon U-Pb dating of Lianhuagou Pluton in East Qinling and its geological implications. *Geochemica*, 39(1):90~99(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, Zhang Tian, Guo Fangfang. 2007. On the Jurassic deformation in and around the Ordos Basin North China *Earth Science Frontiers*, 14(2):182~196(in Chinese with English abstract).
- Zhou Dingwu, Zhao Zhongyuan, Li Yinde, Jian Wanchou, Ye Jian, Chen Gang. 1994. Geological features of southwest margin of Ordos basin and it relationships with Qinling orogenic belt. Beijing geological publishing house(in Chinese without English abstract).
- Zhou Zuyi, R Donelick. 2011a. Multikinetic modelling for time-temperature history on Apatite fission track data. *Petroleum geology and experiment*, 23(1): 97~102(in Chinese without English abstract).
- Zhou Zuyi, Liao Zongting, Yang Fengli, Fu Qiang. 2001b. Fission track analysis and its application in the study of sedimentary basins. *Petroleum geology and experiment*, 23(3): 332~337 (in Chinese without English abstract).

参 考 文 献

陈刚, 孙建博, 周立发, 章辉若, 李向平, 李向东. 2007. 鄂尔多斯

- 盆地西南缘中生代构造事件的裂变径迹年龄记录. 中国科学(D)辑, 增(I): 110~118.
- 丁林. 1997. 裂变径迹定年方法的进展及应用. 第四纪研究, 17(3): 272~280.
- 高峰, 王岳军, 刘顺生, 胡宝清. 2000. 利用磷灰石裂变径迹研究鄂尔多斯盆地西缘热历史. 大地构造与成矿学, 24(1): 87~91.
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 李彝, 郭波. 2009. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成特征及其地质意义. 岩石学报, 25(2): 248~264.
- 胡圣标, 汪集肠. 1995. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展. 地学前缘, 2(4): 171~180.
- 胡圣标, 郝杰, 付明希, 吴维平, 汪集肠. 2005. 秦岭—大别—苏鲁造山带白垩纪以来的抬升冷却史——低温年代学数据约束. 岩石学报, 21(4): 1167~1173.
- 黄志刚, 任战利, 陈玉林. 2015. 鄂尔多斯盆地东南缘延长组地层热演化史——来自镜质组反射率和磷灰石裂变径迹证据. 地质学报, 89(5): 909~916.
- 李小明, 谭凯旋. 2000. 裂变径迹定年方法的研究现状及存在的问题. 地质地球化学, 28(4): 96~100.
- 刘池洋, 赵红格, 王锋, 陈洪. 2006. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性. 地质学报, 79(6): 737~747.
- 刘武生, 秦明宽, 漆富成, 肖树青, 王志明. 2008. 运用磷灰石裂变径迹分析鄂尔多斯盆地周缘中生代沉降隆升史. 铀矿地质, 24(4): 221~232.
- 庞振山. 2006. 河南省西部地区中生代花岗岩类地质特征及成因. 中国地质大学博士学位论文. 北京.
- 乔建新, 赵红格, 王海然. 2012. 裂变径迹热年代学方法应用及其研究展望. 地质与资源, 21(3): 308~312.
- 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 2004. 沉积盆地热体制研究的理论与应用. 北京: 石油工业出版社.
- 任战利. 1995. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史. 地球物理学报, 38(3): 339~349.
- 任战利. 1999. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究. 北京: 石油工业出版社.
- 任战利, 赵重远. 2001. 中生代晚期中国北方沉积盆地地热梯度恢复及对比. 石油勘探与开发, 28(6): 1~4.
- 任战利, 张盛, 高胜利, 崔军平, 肖媛媛, 肖晖. 2007. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义. 中国科学: D 辑, 37(A01): 23~32.
- 任战利, 田涛, 李进步, 王继平, 崔军平, 李浩, 唐建云, 郭科. 2014a. 沉积盆地热演化史研究方法 with 叠合盆地热演化史恢复研究进展. 地球科学与环境学报, 36(3): 1~20.
- 任战利, 崔军平, 李进步, 王继平, 郭科, 王维, 田涛, 李浩, 曹展鹏, 杨鹏. 2014b. 鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造—热演化史恢复. 地质学报, 88(11): 2044~2056.
- 任战利, 崔军平, 郭科, 田涛, 李浩, 王维, 杨鹏, 曹展鹏. 2015. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析. 科学通报, (14): 1298~1309.
- 孙少华, 李小明, 龚革联, 等. 1997. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究. 科学通报, 42(3): 306~309.
- 万景林, 王瑜, 李齐, 郑德文, 李大明. 2000. 太白山中、新生代抬升的裂变径迹年代学分析研究. 核技术, 28(9): 712~716.
- 王建强, 刘池洋, 闫建萍, 赵红格, 高飞, 刘超. 2010. 鄂尔多斯盆地南部渭北隆起发育时限及其演化. 兰州大学学报: 自然科学版, 46(4): 22~30.
- 王建强. 2010. 鄂尔多斯盆地南部中生代演化——改造及盆山耦合关系. 西北大学.
- 肖晖, 李建新, 韩伟, 等. 2013. 鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起中生代构造抬升及演化. 西安科技大学学报, 33(5): 576~582.
- 张本仁, 高山, 张宏飞. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社.
- 张照伟, 李文渊, 赵东宏, 高永宝, 彭素霞. 2010. 东秦岭莲花沟岩体锆石 U-Pb 年代学研究及其地质意义. 地球化学, 39(1): 90~99.
- 张岳桥, 廖昌珍, 施炜, 张田, 郭芳芳. 2007. 论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形. 地学前缘, 14(4): 182~196.
- 周鼎武, 赵重远, 李银德, 李银德, 剪万筹, 叶俭, 陈刚. 1994. 鄂尔多斯盆地西南缘地质特征及其与秦岭造山带的关系. 北京: 地质出版社.
- 周祖翼, R Donelick. 2001a. 基于磷灰石裂变径迹分析数据的时间—温度历史的多元动力学模拟. 石油实验地质, 23(1): 97~102.
- 周祖翼, 廖宗廷, 杨凤丽, 傅强. 2001b. 裂变径迹分析及其在沉积盆地研究中的应用. 石油实验地质, 23(3): 332~337.

The Meso-cenozoic Tectonic Thermal Evolution of the Qishan-Linyou Areas in Weibei Uplift of Ordos Basin and Its Response in Geology: Evidence from Fission-track Analysis

QI Kai^{1,2)}, REN Zhanli^{1,2)}, CUI Junping^{1,2)}, YU Qiang¹⁾, CAO Zhanpeng¹⁾,
YANG Peng¹⁾, DENG Yaren¹⁾, ZHANG Mengting¹⁾

1) *Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069;*

2) *State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, 710069*

Abstract

Based on the study of tectonic deformation features in the Qishan-Linyou areas in the southwest of Weibei uplift, and combined with fission-track analysis as well as thermal evolution simulation, this paper discussed the Meso-cenozoic tectonic -dynamic thermal evolution and its response in geology. The results show that Yanshan movements were associated with largest impact on tectonic deformation in the study area, and there may be three times of uplift process, which occurred in the end of Jurassic to Early Cretaceous (138 ~ 128Ma), Late Cretaceous (86 ~ 69Ma) and Eocene (50 ~ 40Ma). The spatial distribution of AFT ages suggests that the time of uplift and cooling in the study area is characteristic of early in than in north, was the overall uplift taking place later. The results of the thermal evolution simulation indicate that the southern areas reached largest in palaeogeotherm in 158Ma, and had experienced rapid uplift during the period from 158 to 130 Ma, slow uplift between 130 and 40 Ma, and further rapid uplift after 40 Ma. Corresponding, the Meso-cenozoic tectonic thermal evolution in the study areas remained a close contact on adjacent units. The uplift in Late Jurassic tectonic should be relative to the process that the Qin-Qi orogen entered a strong multi cycle intracontinental orogenic period. The early Cretaceous stable subsidence stage was the key period to mature oil and gas in Ordos Basin. The tectonic uplift in the late Cretaceous was consistent with Qinling orogenic belt. The rapid uplift in Eocene was caused by the tilting effect of the northern margin, which was associated with the formation of Weihe Basin.

Key words: tectonic deformation; fission-track analysis; thermal evolution simulation; Qishan-Linyou; Weibei uplift; Ordos Basin