

渭河单冲压陷盆地的厘定及其控藏作用

刘林^{1,2}, 芮会超³, 杨莉⁴

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 陕西地矿集团有限公司, 陕西省矿产资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064; 4. 陕西地矿第六地质队, 陕西 西安 710611)

摘要:盆地的结构构造是认识盆地的基础,它不仅对油气及其伴生资源的生、储、盖、圈、运、保起重要的控制作用,也是进行勘查和成藏预测的重要依据。笔者在大量高精度物探和地质资料基础上,重新厘定了控盆断裂构造性质,并在此基础上划分了渭河盆地的构造单元,就渭河断陷盆地不同结构单元的构造特征、油气及其伴生资源的成藏条件及其分布规律进行了对比。研究发现:①浅部北倾、深部南倾的秦岭北坡断裂是一条巨大的区域性逆冲断裂。②渭河盆地北山南缘断裂带的断裂非传统的张性正断层,而是受局部应力场作用下的剪性正断层,但整体为逆断层。③渭河盆地不是地堑,而是一个单冲压陷盆地。④不同盆地结构单元的油气及其伴生资源的成藏条件及其分布规律存在差异:断阶带是奥陶系的天然气有利成藏区,主要受控于断阶构造;单斜带是石炭二叠系天然气有利成藏区,主要受控于单斜构造;凹陷带天然气富集与滚动背斜、断鼻构造及砂砾岩体的发育有关;断裂带与鼻隆的交汇区是有利的水溶性氮气的成藏区。

关键词:盆地结构;动力学机制;成藏条件;新生代;渭河盆地

中图分类号: P618.130.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)02-0186-17

Definition of the Weihe Single-thrusting Compressional Basin and Its Reservoir-forming Conditions

LIU Lin^{1,2}, RUI Huichao³, YANG Li⁴

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Exploration and Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Shaanxi Geological and Mining Group Co., Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. No. Six Team of Shaanxi Geological and Mining Group Co., Ltd, Xi'an 710611, Shaanxi, China)

Abstract: The basin structure is the foundation for understanding this basin, which not only has an important control to the production, storage, coverage, entrapment, transportation and protection of the oil and gas and its associated resources, but also is a key basis for the exploration and reservoir-forming prognosis. Based on a large number of accurate geophysical exploration and geological data, the structure characters of basin-controlling fracture have been redefined in this paper, and the tectonic units of the Weihe basin have been divided. And then, the structural

收稿日期: 2017-11-25; 修回日期: 2018-01-08

基金项目: 陕西地矿集团有限公司“陕西省矿产资源勘查与综合利用重点实验室开放基金项目”(2015KC003)

作者简介: 刘林(1967-), 男, 中国地质大学在职博士, 讲师、地质高级工程师职称, 现主要从事地质矿产勘查、空间数据挖掘工作。E-mail: liulin1885@163.com

characteristics of different structural units, reservoir-forming conditions and distribution laws of oil-gas and its associated resources in Weihe basin have been compared. It is found that the northern fault of Qinling Mountain is a huge regional thrust fault, which slopes to north in shallow part and to south in deep. The southern Beishan fault in Weihe basin is not a traditional normal extensional fault, which is effected by the local stress field, with a feature of whole thrust fault. The Weihe basin is not a graben, but a single stamping compressional basin. There are differences in reservoir-forming conditions and distribution laws of oil-gas and its associated resources between different structural units of the basin. The fault belt is a favorable reservoir zone for ordovician gas, which is mainly controlled by faulted terraces. The monoclinical belt serves as a favorable reservoir zone for permo-carboniferous gas, which is mainly controlled by the monoclinical structure. The enrichment of the gas in depression belt is related to the development of rollover anticline, faulted nose structure and sandstone rock. The convergence region between fault belt and nose uplift is advantageous to water-soluble helium.

Keywords: basin structure; dynamic mechanism; reservoir-forming conditions; Cenozoic era; Weihe Basin

把渭河盆地作为地堑的认识是从1933年李连捷发表“渭河断谷之地文”开始的;1956年李春显以“对于渭河地堑的质疑”一文提出质疑,认为渭河平原西北侧的断裂是由一系列覆瓦式排列的逆断层所构成,故渭河盆地不是地堑;之后地质矿产部第三普查勘探大队做了很多深部工作,尤其是对口镇断裂的研究,依据三原附近陡坡南侧5 km的钻孔,在约2 600 m深处过上始新统进二叠系,说明是一正断层(宁崇质,1995)。至此,渭河盆地是地堑的观点渐渐得到大家的接受。之后,渭河盆地一直被作为地堑进行研究,甚至把它作为一种类型来对待。例如,杨克绳(1936)把它作为中国中生代沉积盆地箕状断陷对翘型、反翘型和单翘型3大类9种亚类之一的对翘型大类单断对翘型对待。然而,随着近年来中国大地构造环境研究的深入,尤其是“深部探测技术试验与集成”、“华北克拉通破坏重大研究”、“中国岩石圈三维结构”等专项的实施,大量新成果佐证渭河盆地大地构造位置及其成因独特,渭河盆地沉降期间并未有明显的伸张,且长期处于挤压应力环境下,其本身不断隆升。盆地新生代沉积物总体以向斜构造为主,中南部是主沉降中心,盆地构造样式以收缩构造样式为主体,未见明显的伸展构造样式。临潼隆起和北秦岭均无根。渭河盆地两侧均表现为压型构造样式。其南界秦岭北坡山前断裂是逆断层,北界口镇断裂是逆断层,北山断裂带北界是逆断层,现今表现的整体特征是挤压环境下逆冲断裂带

边沿应力场发生变化,局部垂向主应力场作用的结果。显然前人的渭河地堑认识有待进一步研究。同时随着研究工作的深入,人们渐渐的体会到,不同类型的沉积盆地,其沉积建造组合与含矿性往往不同,成矿(藏)模式也不同。揭示沉积盆地的成因类型可以做为成矿预测的一项标志。

因此,重新厘清渭河盆地的成因类型是有意义的。笔者在充分综合研究前人科研成果,尤其是近年来新的钻井地质、地球物理、地球化学等资料的基础上,开展了渭河盆地成因类型研究,重新厘定渭河盆地控盆构造特征和基底构造单元,采用冯建辉的构造模型分类,提出了渭河盆地成因类型,并结合前人成果,给出了成藏预测区,以期对认识渭河盆地形成演化及下一步油气、氦气勘查具有借鉴意义。

1 单冲压陷盆地的证据

1.1 独特的大地构造位置和应力环境

渭北盆地位于鄂尔多斯盆地与秦岭造山带之间,地处秦岭纬向构造体系、祁吕贺兰山字型构造体系、新华夏构造体系和陇西旋卷构造体系的交汇部位(权新昌,2005),构造位置极其独特,时空上表现为盆山耦合关系。其现今的构造格架则是对统一的区域动力学系统作用结果继承演化的体现。前人研究表明:其北侧鄂尔多斯盆地在加里东期由于秦岭洋盆向北俯冲及其与华北板块碰撞,区域主压应力

场方向呈北北东—南南西向和近南北向;在印支期由于羌塘地块(Qiangtang massif)与欧亚大陆碰撞拼贴,区域主压应力场方向呈北西—南东向和北北东—南南西向、南北向;在燕山期由于受欧亚大陆板块与古太平洋大陆板块碰撞,区域主压应力场方向呈北西—南东向;而喜马拉雅期由于受印度板块和太平洋板块与欧亚板块俯冲碰撞的影响,区域主压应力场方向呈北北东—南南西向(徐黎明等,2006)。其南侧

北秦岭中段自新生代以来存在 3 期应力分别为:以 $280^{\circ}\sim 310^{\circ}$ 方向拉伸为主的松弛期;以 $305^{\circ}\sim 336^{\circ}$ 方向挤压为主的压缩期(徐文龙,1991);以 $294^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 方向拉伸、 $21^{\circ}\sim 68^{\circ}$ 方向挤压的现代应力场。白相东等根据前人的研究成果,利用断块相对运动观点,结合 GPS 矢量的运动关系,得到渭河盆地现今地块运动模式和鄂尔多斯南缘中东部现今构造应力场整体为挤压应力环境(白相东等,2015)的结论(图 1)。

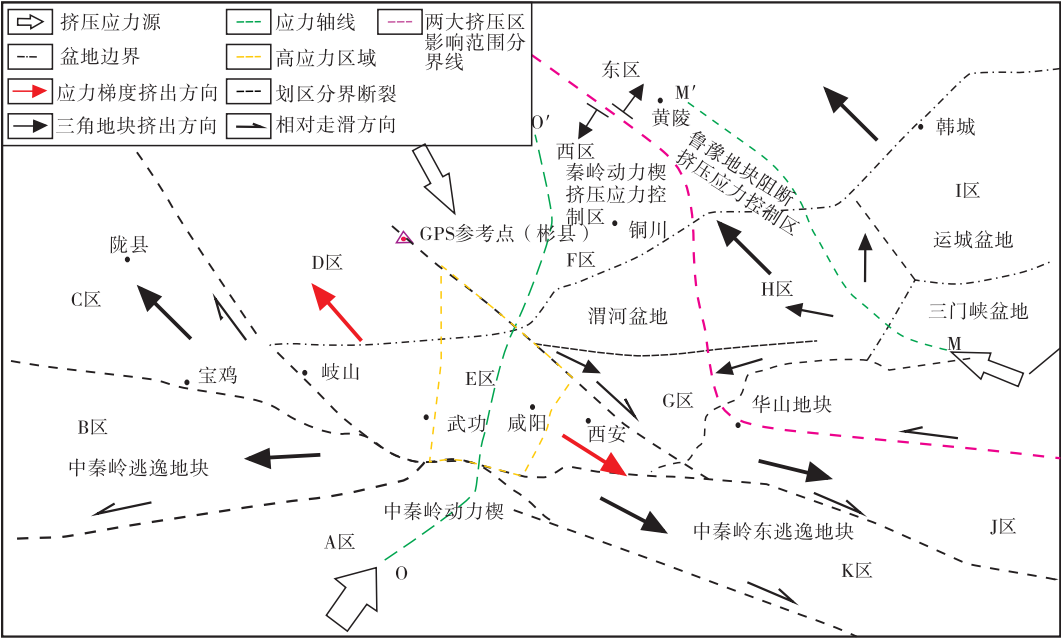


图 1 鄂尔多斯南缘现今挤压动力学模式图(据白相东等,2015)

Fig. 1 Kinetic model diagram in Southern Ordos margin tectonic belt

可见,渭河盆地在加里东期、印支期、燕山期以及喜马拉雅期均处于挤压应力环境下。出现的松弛是 $280^{\circ}\sim 310^{\circ}$ 和 $294^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 方向的,是相对南北向和北西—南东向挤压应力而言。渭河盆地现今构造应力场乃为挤压应力环境。

1.2 与邻区一致的压型构造样式

渭河盆地南邻北秦岭是大地构造上地处北秦岭山前断裂与丹凤断裂带之间的特殊地带,在构造单元上属北秦岭褶皱带(徐文龙,1991)。该带自北而南依次出露宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群、松树沟蛇绿岩片和丹凤岩群,各岩群之间均以大型剪切带和断裂为界,相互逆冲叠置。在北秦岭内部虽然存在明显的南北差异,并可以大体以洛南—栾川断裂为界,将其分为南部带和北部带,南部带主要出露元古宇变质结晶基底和元古宇—古生界沉积建造。而

北部带主要出露华北型的基底和盖层建造(董云鹏等,2003)。但无论组成如何,其整体构造样式显示为向北逆冲推覆的厚皮叠瓦状逆冲推覆构造,属于典型的挤压构造样式。另外,其东南部的宜鲁构造带也具有南→北向逆冲的叠瓦状推覆构造,且上地壳缩短率为 52%(宋传中等,2009)。

渭河盆地北邻渭北隆起位于鄂尔多斯盆地南缘,北接陕北斜坡,与其具有统一的结晶基底(肖晖等,2013),是鄂尔多斯盆地重要的组成部分。出露地层由老到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,缺失地层为志留系一下石炭统和上白垩统,地层总体呈近东西—北东东向展布。构造以逆冲构造为特征,构造应力总体表现为挤压应力,且由南向北由强到弱,构造变形规模从大到小(毛明陆,1997)。在麟

游—永寿一带表现为逆冲褶皱带,主要发育近东西向展布的逆冲断裂和褶皱,规模巨大(图 2)。在彬县—铜川一带表现为逆冲断褶带,主要发育北东向展布的逆冲断裂(图 3)。断距多小于 1 000 m,断面上陡下缓,具犁式特征,断面多南倾,组合形式呈叠瓦状。

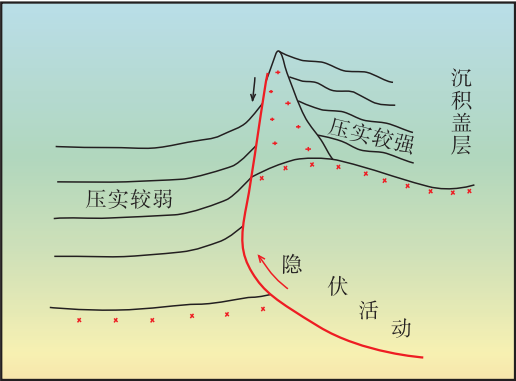


图 2 基底断块隐伏逆冲使上覆地层呈视正断层状图
Fig. 2 Base fault block buried thrust to the overlying strata is considered normal fault

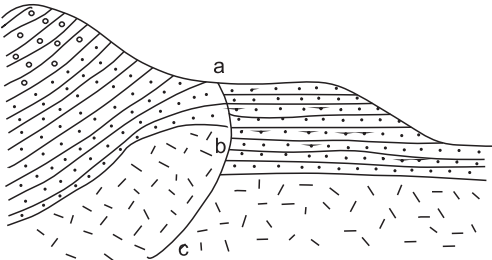


图 3 逆断层-视正断层图(据徐开礼,1989)
Fig. 3 Thrust fault-apparent normal fault a-b
apparent normal fault b-c thrust fault

渭河盆地受区域构造应力控制,盆地断裂内构造十分发育,形成东西向和北东向断裂构造控制着盆地边界,区域性东西向断裂控制盆地沉积,北西向控制着基底的隆升,即“凸-凹-凸-凹”的类似对拼三角组成的菱形格局。盆地主凹陷区内的渭河断裂、口镇-关山断裂、杜康沟断裂在剖面上为逆冲型,组成“Y”字型结构,导致地壳分层次断褶压缩,断堑区形成向斜带。盆地总体呈北浅南深的“残破”波箕状基底,不发育伸展构造调节带的压型小断陷,独立凹陷基底呈西浅东深的“残破”波箕状基底,盆地沉积物总体以向斜构造为主,中南部是主沉降中心,发育于向斜两侧的主干断裂为逆冲型。例如,渭河断裂带北侧的下古生界沉积岩系以发育自南而北推冲的

不对称紧闭褶皱及其相应的逆冲叠瓦状断层为特征,中生界的岩系也以发育轴向近东西的宽缓褶曲和压扭性断层为特点(彭建兵,1992),南侧均为逆冲断裂。整体构成收缩构造样式特征。

1.3 独特的边界构造

渭河盆地边界断裂成因的争论是渭河盆地成因类型认识的核心。渭河盆地南缘断裂带是渭河盆地的南界,西起宝鸡,东到陕西潼关,全长 310 多千米,是区内规模最大、活动性最强烈的断裂,其对渭河盆地的形成和演化具有决定性的作用。以往人们将蓝田以东称为华山山前断裂,以西称为秦岭北缘断裂(张安良等,1992)。

华山山前断裂是渭河盆地南缘边界断裂的东段,西起蓝田,东至潼关,总体走向北东,倾向北西,倾角 65°,断裂带宽度数十米至数百米。带内构造角砾岩和糜棱岩发育,局部可见几厘米至几十厘米厚的薄层状断层泥,总长度约 100 km,是一个复杂的深大断裂。虽然 1988 年国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组、李永善(1992)以南盘为古老的片麻岩和花岗岩,北盘为盆地的黄土和冲积物,将其厘定为新生代时期强烈活动的正断层,但其强烈的压型构造特征得到公认。

秦岭北缘断裂是渭河盆地南缘边界断裂的西段,西起宝鸡,东至蓝田,长约 200km,宝鸡—周至段走向北西,过周至转为东西,断层面总体北倾,倾角 60°~80°。该断裂是明显的地貌分界线,南侧山地与北侧平原相对高差大于 500 m,沿线可见断层三角面,角砾岩、糜棱岩等破碎带痕迹。其宝鸡段下马营黄土(Q2)与花岗岩(γ_3^3)呈断层接触。益门附近,古老的太古宙地层逆冲于年轻的早第三系之上。宝鸡温水沟、眉县西汤峪、兰田汤峪等一系列温泉沿断裂带出露,水温高达 60℃。秦岭北坡 72 峪内多有悬谷出现,峡外洪积扇发育,河多流短,表明它是一条至今仍在活动的复杂断裂带(王景明,2012)。

由上断裂构造特征可以看出,北降南升是前人对断层认识的主要依据。众所周知,正断层、逆断层、平移断层是按照断层两盘相对运动方向划分的,在通常情况下(即主应力 δ_1 水平的情况下),正断层和逆断层常常被作为伸展构造样式和挤压构造样式的典型代表。因而,在通常情况下(即主应力 δ_1 水平的情况下),正断层也往往被作为断陷盆地伸展构造环境判别的证据,这无可非议。但这一划分并不

足以反映自然界中所有正断层和逆断层的成因机制,在研究中前提条件是关键。这一前提即主应力 δ_1 水平的情况下,并非正断层形成的充要条件。在断层成因分析中,尤其是安德生(E. M. Andson)模式和哈弗奈(Hafner)模式2个被广泛接受的断层的成因模式中,水平拉张是正断层的形成有利条件,但不是唯一条件,除了水平拉张之外,地块上隆也是正断层的形成有利条件。换句话说,在挤压背景下的隆升地区,差异性升降,也可形成正断层。因此,对断层认识中,如不考虑应力状态,则易把视正断层认为正断层,得出其成因是张应力状态(王颂禹,1997)的错误论断。可见,依次作为该断裂是拉张环境下产物,就有待商讨。

近年来,随着深部物探的展开,大量成果涌现。北秦岭-渭河地堑-鄂尔多斯南部的深反射大炮数据揭示北秦岭莫霍面反射的双程走时约为13 s,自南向北缓慢抬升变浅至12.5 s,显示北秦岭不存在山根。进入渭河地堑,莫霍面加深至15 s左右(李洪强等,2016),显示渭河盆地两侧的莫霍界面呈不对称上隆。这与渭河盆地Moho面隆升的传统认识相悖。

榆林-咸阳-涪陵地震剖面揭示沿涪陵-咸阳-榆林剖面在大陆内部形成的伸抵结晶地壳顶部的基底断裂带,是在东南亚板块向北,西伯利亚板块向南,两大板块近北南向挤压作用下形成的。口镇-关山逆冲大断裂略向南倾斜,向下延伸可达10 km左右。秦岭北侧基底逆冲大断裂,向下延伸可抵12 km左右(滕吉文等,2014)。且具上部北倾下部南倾,总体南倾的特征。

西安拗陷深地震反射剖面,桩号33~35 km的南北两侧,Moho过渡带反射还表现出了明显不同的反射组构;桩号33 km以北,Moho过渡带反射表现一系列产状近乎水平的叠层结构;而在剖面桩号35 km以南,Moho过渡带出现北倾的反射,并与附近的反射事件RA发生干涉。很明显,桩号33~35 km下方,Moho面出现了明显的错断。从这些现象推断,此处应该存在一个高角度的深大断裂,断距达7~10 km左右,初步认为倾向南(任隽等,2013)。此外,鸡深反射剖面揭示了10条断裂,若根据各断裂错断的上部地层TE的形态判定,它们都是正断层,但是如果结合Tg及其下面的波组形态总体来看,陇县-马召断裂浅部为正断层,深部为逆断层,而总体表现为视正断层(即逆断层)。

综上所述,可以得出以下结论。

(1)在不同深度表现为不同性质,但整体显示逆冲断裂性质的现象是渭河盆地南缘控盆边界和控制沉积的近东西向断裂的特点,是渭河盆地断裂继承性发展演化的结果。

(2)浅部北倾、深部南倾的秦岭北坡断裂是一条巨大的区域性逆冲断裂。它既是无根体北秦岭向北逆冲的边界断裂,也是构成鄂尔多斯盆地南缘渭河盆地处地层受压下陷,渭北隆起区受压隆起构造格架的单冲边界断裂。

(3)略向南倾斜,向下延伸可达10 km左右的口镇-关山逆冲大断裂性质的厘定,充分说明主要控盆构造特征。这与人地堑成因的实验研究所揭示的在伸张作用下形成地堑的断层是正断层相悖。同时,这些特征恰好与反映单冲压陷盆地的断裂特征一致,且可解释由于受太平洋板块、菲律宾(海)板块、印度大陆、西伯利亚陆块以及地球自转、公转中的动力(高纬度向低纬度方向的挤压力)的联合作用,尤其是印度大陆由南向北的挤压强烈,北秦岭岩石圈地幔拆沉,深部物质流(软流圈物质)从西往东流动(耿树方等,2012)。

基底断裂的存在是相对稳定地块(地体)基底的一种普遍想象,基底断裂的逆冲隐伏活动同样也是其基底挤压收缩变形的一种重要形式。基底断裂隐伏活动造成上盘上拱使上覆地层抬升,而断裂活动下降盘受压产生沉降,这样深大断裂在空间上就表现为浅部视正断层,深部逆断层的特点(图2)。可见,渭河盆地南缘断裂带是压扭性逆冲断层的解释更符合实际。这与王颂禹(1997)在试论断层分类中逆断层的一种视正断层表现形式一致(图3)。

北山南缘断裂:渭河盆地北山南缘断裂是渭河盆地的北部边界,是由一系列由南向北形成年代逐渐变新的阶梯状断层组成的,其主体分布于渭河盆地北部的北山南缘,地貌上是北侧的基岩山地、黄土残塬和南侧的渭北黄土台塬的分界线,走向北东—北北东,倾向南东,倾角 $40^{\circ}\sim 80^{\circ}$,全长约168 km,是一条以垂向运动为主,垂直差异升降特征明显的复杂活动构造带。习惯上我们将其称为渭河盆地北缘断裂带,但纵观前人研究,无论是对该断裂的位置、分段,还是断裂的性质以及活动时代的认识,都存在分歧。

徐煜坚等大致以泾河、洛河、黄河为界,将北缘断裂带划分为3段;田勤虎等人(2012)以口镇-关山

断裂为界,将北缘断裂带分为西段和东段 2 部分。从分段上看,田勤虎划分的东段包括了徐煜坚划分的中段和东段。本次研究为与渭北构造分区对应,采用东西两段划分。西段由岐山-店头断裂、龙岩寺-乾县断裂和杨庄镇-口镇断裂 3 条斜列的北东向边界断裂组成,整体性较好。东段由新兴-马额断裂、耀县-白水断裂和韩城-合阳段组成(田勤虎等,2012)。

实地调查发现断裂带各段特征基本一致。带内断层具有平滑的断层面,构造岩具有明显的分带性特征(图 4、图 5),强烈挤压形成的伴生小褶皱。带内的第四纪断层分布较广,且绝大部分可见平直的清晰的滑动面和擦痕,但多数断距较小,为 4~20 m。

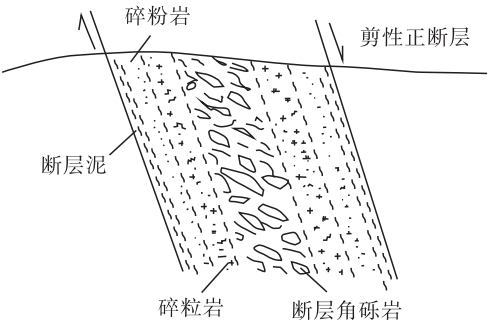


图 4 断层构造岩的理想分带图

Fig. 4 Ideal division of fault-related rocks

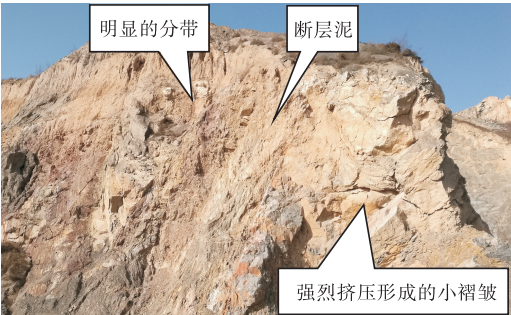
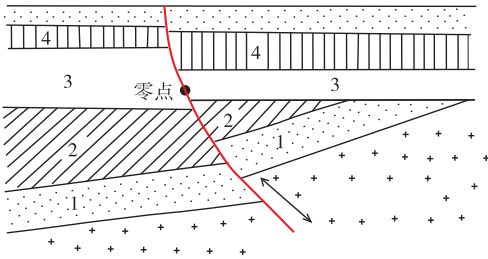


图 5 渭北断层构造岩的分带图

Fig. 5 The division of fault-related rocks in the Weihe basin

由以上特征可以发现,该带内断层并不具有传统张性断层的一般特征:粗糙的断层面,多呈棱角状、次棱角状,排列杂乱无章但破碎不强的断层角砾岩,以及上下盘附近没有强烈挤压形成的伴生褶皱,而是具有平滑的断层面、强烈破碎的构造岩,厚层状断层泥及明显的构造岩分带性分带和强烈挤压形成的伴生小褶皱。这些都是剪切正断层的典型特征,前人以构造反转解释。陈冒彦等(1997)认为盆地各主干伸展

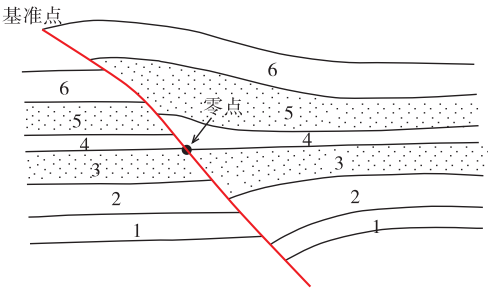
断裂都是区域性的,具有明显挤压特征和复杂的活动历史。尤其是在新生代以前,它们有的是逆冲推覆构造,有的则是在压扭性机制下形成的高角度逆冲断层,都具有不同程度的挤压变形。但在新生代以后,构造发生了反转,有的断层上盘相对下盘沿原断层面回落,有的借助主断裂面附近的次生断裂面重新发育成新的“正断层”,这样在浅部剖面上则显示逆断层被正断层所截,而在深部剖面上各断裂又归并回原来的逆冲主断面。根据陈冒彦等的论述(陈冒彦等,1997)可以看出,挤压特征是早期的、区域性的,也是目前公认的,但是带内南早北晚,总体呈现由南向北由盆地中心向边缘逐渐过度发展的特征,与拉张说相悖。那么新生代区域伸展作用下的反转就有待商讨。因为纵观至今渭河盆地的众多研究成果,却少见反转构造证据的陈述。笔者详细梳理渭河盆地高精度物探成果发现:渭河盆地不但不存在早期上隆晚期沉降者的负反转构造(图 6)。相反,在秦岭北坡断裂处甚至出现疑似早期沉降晚期上隆者的正反转(图 7)。可见新的物探成果并不支持陈冒彦等的负反转说。至于反转构造发生的条件挤压应力场反转为伸展应力场就更有待商讨了。



1、2. 反转前层序;3. 反转期层序;4. 反转后层序

图 6 负反转断裂剖面模式图

Fig. 6 Negative inversion fault section model



1. 前裂陷层序; 2~5. 同裂陷层序; 6. 后裂陷层序

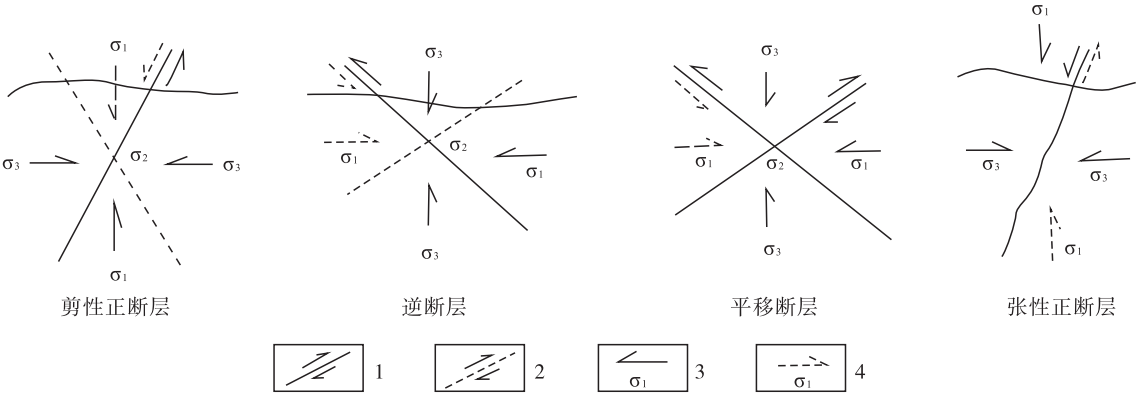
图 7 正反转断裂剖面模式图

Fig. 7 Positive inversion fault section model

近年来,众多学者(王建强等,2010;毛明陆,1997;任战利等,2015;吴中海等,2003;万景林等,2000;刘建辉等 2010)利用磷灰石裂变径迹分析渭北隆起的抬升期次及过程,其中代表成果有:王建强等认为的分别发生于 146 Ma±,114~83 Ma,59~63 Ma 的 3 期次抬升冷却事件;肖晖等认为的发生于 146~125 Ma;107~83.8 Ma 和 40~27.3 Ma 的 3 期抬升事件;任战利等认为的 102~107 Ma 主要发生在渭北隆起南带的隆升,100~40 Ma 渭北隆起整体缓慢抬升,40~30 Ma 渭北隆起的主要隆升期,以及 40 Ma 之后尤其是 5.6 Ma 之后隆升速率加快。对华山裂变径迹研究结果表明,华山晚白垩世以来也经历了持续的隆升过程。其中吴中海认为的 57~42 Ma、32~22 Ma 和约 8 Ma 以来是华山相对快速的隆升期,而 120~57 Ma、42~32 Ma 和 22~8 Ma,华山也处于相对缓慢隆升之中。万景林认为的华山山体抬升在 20.59~29.26 Ma,主峰、北峰样品按高度分别排序,高度与年龄表现为“正序”。刘建辉等对秦岭太白山的磷灰石裂变径迹研究结果表

明,秦岭太白山新生代以来也发生了 2 期抬升事件:一个是约 48 Ma 的小幅度加速抬升冷却;另一个是 9.6 Ma 的大幅度快速抬升冷却。

可见,新生代渭河盆地南北两边皆为抬升状态。如前述诉,渭河盆地在加里东期、印支期、燕山期以及喜马拉雅期均处于挤压应力环境下。出现的松弛是 280°~310°和 294°~340°方向的,是相对南北向和北西—南东向挤压应力而言。渭河盆地现今构造应力场乃为挤压应力环境。换句话说,渭河盆地新生代不存在伸展应力场。又据渭北北山南缘断裂一线数个大的采石场挖出的新鲜断面观察到的北山南缘断裂,可见清晰的平滑的断层面、明显的构造岩分带性分带和强烈挤压形成的伴生小褶皱,且断层顶部的黄土层并没有次生构造痕迹。因此,根据这些特征认为,渭河盆地北山南缘断裂带的断裂是剪性正断层,而非传统的张性正断层。由剪性正断层空间应力状态可知,渭北隆起区南部边沿应力场是区域应力环境下的一个典型的局部应力场,该部最大主应(动)力 σ_1 垂直向上(图 8),断层两盘相互作用力较弱。



1.实际形成的断层; 2.未形成的共轭断层; 3.实际主应(动)力; 4.平衡主应力

图 8 断层形成的应力状态图解(据陈刚等,2005)

Fig. 8 State of stress in the formation of faults

1.4 渭河阶地及山前冲洪积物垂向剖面特征

河流阶地是区域环境演化的直接证据。阶地的形成是构造运动、基准面升降和气候变化等作用的结果。现今研究成果表明(SEHUMM,1973),受基准面升降变化影响的河流,距基准面的距离一般小于 400 km,显然,渭河阶地的形成与基准面的变化没有关系。渭河阶地上覆风成黄土的底部都是古土壤,且渭河中游古洪水滞流沉积物表明渭河中游在

3 200~2 800aBP 间发生过 3 次古洪水事件,说明渭河在全新世大暖期晚期向以干旱和寒冷为标志的全新世晚期气候转折,表明气候变化在阶地形成中发挥一定的作用(王恒松等,2012)。模拟地貌试验表明,一定的构造抬升速率是阶地的形成和保存的必要条件。虽然构造抬升速率不能直接与河流下切速率对应,但河流下切速率更易获得,且在一定程度上反映了地表抬升的趋势。因此,可利用河流下切速

率分析阶地形成和保存的控制因素。渭河流域内上、中、下游不同区段的阶地序列的研究结果(GAO, et al., 2016 ; 陈云等, 1999; SUN et al., 2005)表明, 河流下切速率总体呈现“快、慢、快”的特征, 且与昆黄运动和共和运动耦合, 说明新生代夹持于秦岭山脉和黄土高原之间的渭河盆地, 整体受秦岭造山带和鄂尔多斯盆地的隆升作用, 产生巨大的地势比降。显然, 巨大的地势比降是河流快速下切的主要因素。因此, 渭河阶地是构造运动和气候变化共同作用的结果, 但构造抬升是渭河非对称阶地和上叠型阶地的形成主因。

1.5 渭河盆地 Moho 特征

渭河盆地 Moho 特征是渭河盆地的深部结构构造的地球物理学证据, 长期以来一直是众多学者关注的热点。人们对渭河盆地 Moho 的研究较多, 20 世纪 90 年代中期以前由于受观测资料及研究方法的限制, 人们对渭河盆地 Moho 的认识仅限于个别剖面和一些零星分散的点, 不能有效地揭示盆地剖面间莫霍界面的连续性和莫霍界面全貌。此时期代表性成果有陕西省地震局《关中陕南地壳厚度图工作报告》和陕西省地矿局物探队《陕西省 1:50 万区域重力调查成果报告》。《关中陕南地壳厚度图工作报告》中, 利用陕西测震台网记录到的 7 次人工爆破与邻区 10 个中强地震资料, 计算得到 40 个测点的地壳厚度(姜家兰等, 1986), 并采用内插法绘制了关中陕南 Moho

等深度图(图 9)。《陕西省 1:50 万区域重力调查成果报告》中采用不同场的不同计算方法, 发现陕西省莫霍面的埋深, 自东向西由浅变深, 南北向上为南北浅中部深(申安斌, 1997)。随后, 渭河盆地 Moho 隆升成了压倒性的说法, 虽然 20 世纪 90 年代中期以前受观测资料及研究方法的限制, 前人对渭河盆地 Moho 的认识仅仅基于一些零星分散的点和极少的个别剖面, 精度不高。物探学者仍在不断地努力, 以期揭示渭河盆地 Moho 的准确特征, 可多数地质人员并未理会, 仍然把渭河盆地 Moho 隆升作为渭河盆地拉张说的深部结构的物探证据。2000 年以后, 随着科学技术的发展, 观测资料激增、研究方法取得突破, 有关渭河盆地 Moho 特征的研究成果也较多, 其中横跨渭河盆地的剖面有旬邑-泾阳-丹凤-西峡北西向剖面(任隽等, 2012), 广货街-黄陵的北北东剖面(徐树斌等, 2013), 和 2 条近南北向剖面(贾萌等, 2015; 李洪强等, 2016)(图 10)。此外, 平顶山南-韩城-洛川北西向剖面(陆一锋等, 2012)跨越盆地东边界, 任泉等(2012)的成果解释了鄂尔多斯盆地东南部的 Moho 特点。人们对盆地 Moho 的认识逐步加深。尤其是 2013 年中国地质科学院下达陕西省地热资源现状调查评价与区划项目, 2015 年陕西工程勘察研究院提交的《陕西省地热资源现状调查评价与区划报告》, 报告在对老资料和新资料研究的基础上, 给出了陕西省域莫霍面等深线示意图(图 10)。

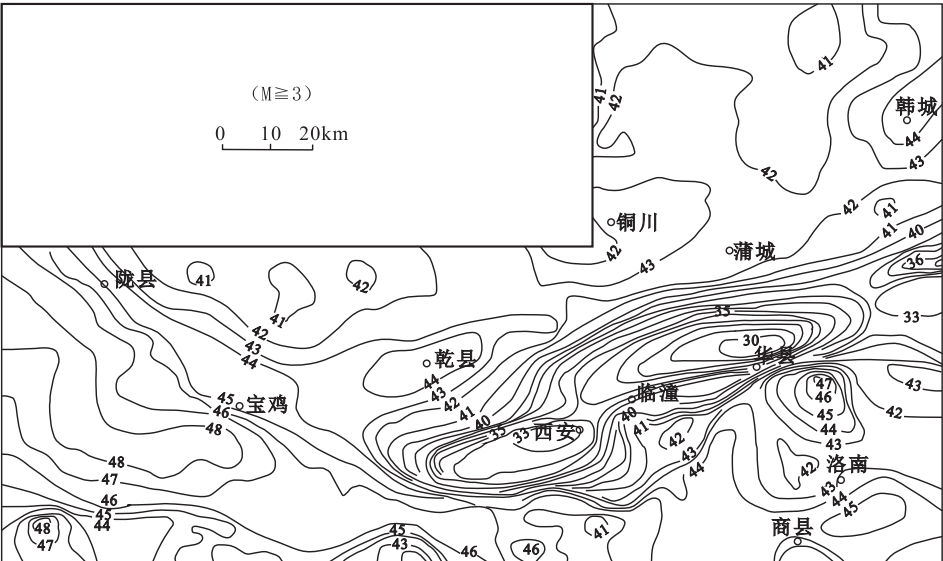
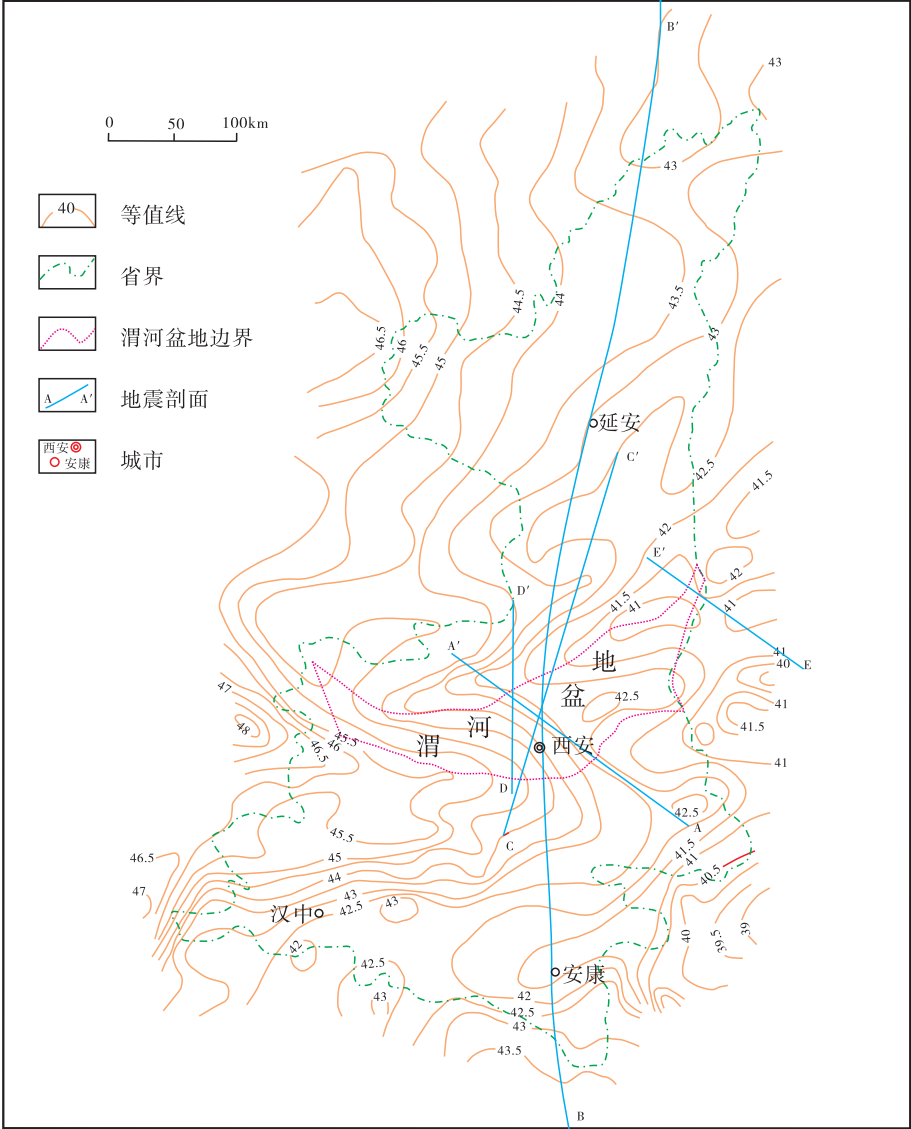


图 9 渭河地区地震与莫霍面等值线关系图(据谢振乾, 2011)地壳厚度资料来自陕西省地震局 1985 年“关中陕南地壳厚度图工作报告”

Fig. 9 Relationship between seismic and Moho isoline in Weihe area



A - A'. 旬邑-泾阳-丹凤-西峡北西向剖面; B - B'. 安康-延安近南北向剖面; C - C'. 广货街-黄陵的北北东剖面; D - D'. 咸阳西近南北向剖面; E - E'. 平顶山南-韩城-洛川北西向剖面

图 10 陕西省域莫霍面等深线示意图 (据杜明等, 2015)

Fig. 10 Sketch map of Moho depth isoline in Shaanxi Province

由图 10 可知,渭河盆地下部 Moho 不存在 3km 隆升。这与李洪强等 2016 年深反射大炮南北向剖面的研究成果一致,且结合李洪强等深反射大炮研究成果分析认为:①秦岭微地块莫霍面自南向北抬升,北秦岭不存在山根。②进入渭河地堑,莫霍面加深至 15s 左右,地堑两侧的莫霍界面呈不对称上隆(李洪强等,2016)。③西安东北部东西向沉降带向西部延伸。④鄂尔多斯盆地莫霍面呈翘斜状,总体东浅西深,南浅北深。这恰好为单冲挤压凹陷提供了完美的深部证据。

1.6 模型反演和沙箱实验

1.6.1 模型反演

地堑是典型的伸展构造,拉张过程中必然产生一定的伸展量。据此 WERNICKE 和 BURCHIFEL 通过几何学与运动学分析,提出了较系统的伸展计算模式(ERNICKE,1982)。1988 年 EUGEN · Artyushkov 基于对西西伯利亚盆地和汾渭地堑的研究,根据汾渭地堑剖面伸展率远小于按照伸展的解释形成盆地所必需的扩展率 0.3,认为渭河盆地在沉降期间没有明显的伸展。1969 年 DAHLSTROM 提

出平衡剖面,现已广泛应用于地学领域,用来恢复地层伸展、挤压变形的原始环境和生长断层等古构造。笔者利用渭河盆地典型的礼泉剖面 and 固市剖面,以剖面上地层长度不变、各地层厚度不变和地层沿同一断层位移量一致为原则,通过手工恢复法恢复得到平衡剖面。发现无论礼泉剖面还是固市剖面 N_1 、 N_2^{2-1} 、 N_2^3 虽被断层错断,但水平断距很小,水平断距与垂直断距相比可忽略不计。平衡后的地层长度 L 大于现在盆地宽度,说明受扬子地台和鄂尔多斯盆地南北挤压环境的影响,作为盆地沉积主体地层开始缩短,表现为挤压特征。利用拉伸构造区古构造恢复简单校正法(刘池洋,1988)验证,则伸展量为 -1.2 km 。而陈跃辉(1994)旋转平面状正断层控边盆地模型验算,盆地破裂深度仅为 2.6 km 。显然,这些从伸张作用出发的模型的测量结果,并不支持渭河盆地拉张说。但却从另一方面印证了平衡剖面的结果,为渭河盆地挤压说提供了证据。

此外,小震断层面解反演区域平均应力场(JULIEN,1980)也是一种模型反演方法,以汾渭地震带为例的用小震断层面解反演平均应力场的结果(杜兴信,1993)(表 1),与单冲压陷盆地的结论一致。

表 1 平均应力场反演结果表(杜兴信,1993)(°)

Tab. 1 The results of mean stress field inversion(°)

参数 地区	σ_1		σ_2		σ_3		R
	走向	仰角	走向	仰角	走向	仰角	
渭河盆地	63	41	314	21	204	42	0.45

1.6.2 沙箱实验

构造物理模拟实验是模拟、再现构造变形过程与成因机制的有效方法。近年来,构造物理模拟研究在挤压地区取得了丰硕的成果,不仅表明构造物理模拟是一种模拟、再现逆冲褶皱系统演化过程的有效工具,而且现有的沙箱实验成果也对新区的研究具有重要的借鉴作用,尤其是为建立冲断带演化的新运动学模型开展的模拟实验对地表作用、冲断结构与冲断层活动特点的了解有重要的借鉴意义(宁飞等,2009)。因此,通过分析渭河盆地大地变形过程中所受的区域构造应力场、几何条件、先存构造条件、基地性质以及地貌条件等主要控制条件,提取建模条件,利用相似理

论建立实验模型,分析实验结果,不仅可以了解研究区的详细构造演化过程(包括不同断层的形成、扩展、活动等演化特征),而且也可用实验模型来反演、例证该地区的构造成因机制和边界作用条件(童亨茂等,2009),这必将为揭示渭河盆地成因机制提供有力的证据。

渭河盆地是位于鄂尔多斯盆地南缘的叠加盆地,其发展演化过程中所处的是同一个区域应力场,它们不仅有着共同的基底,而且有着相似的沉积物,尤其是渭北隆升区,由近年来的新的科研资料可知,渭北隆升与渭河盆地古生代、中生代地层连续。可见,它的发展演化与渭河盆地的发展演化是一个复杂、完整的有机整体,有着密不可分的联系。渭河盆地北部断裂是在渭北隆起和渭河盆地共同的应力场作用下的结果,研究时应从全局出发,不可将渭河盆地与渭北隆起割裂。且由渭河隆起区出露的寒武纪和奥陶纪地层可知,该套地层软硬相间,由此可见,鄂尔多斯盆地基底由北向南逐渐变深,至渭河盆地以南下插到北秦岭一下,北秦岭被翘起。因此,渭河盆地北部断裂构造建模条件应为基底收缩,单侧挤压条件。

渭河盆地南缘构造位置独特,南邻北秦岭由于长期的挤压造山运动,基底已经初步形成一个相对的、高密实度的刚体,再次遭受南北向的挤压时,基底收缩量已经很小,可以忽略不计。但北秦岭及其以南是秦岭地区强烈的挤压区,挤压应力由南向北。因此,综合分析渭河盆地大地变形过程中所受的区域构造应力场、几何条件、先存构造条件、基底性质以及地貌条件等主要控制条件,提取的渭河盆地南缘-秦岭北麓的挤压建模条件即可简化为基底无收缩,单侧挤压条件。

利用松散石英砂、橡皮布构建了主要用于剖面构造研究的基底收缩单侧挤压模型和基底无收缩单侧挤压模型。由基底收缩单侧挤压模型砂箱实验(周建勋等,2002)可知,随着挤压量增大,后冲断层首先出现,并迅速向应力方向扩展,其后,后冲断层数量,早期形成的断层倾角增大,最终形成以后冲叠瓦式断层为特征的压型构造样式(图 11)。可见,基底无收缩单侧挤压剖面模型实验结果与鄂尔多斯盆地南缘构造样式、挤压构造特征以及演化结果一致。由基底无收缩单侧挤压模型砂箱实验(周建勋等,2002)可知,随着挤压量的增大,前冲断层首先出现,

并迅速向应力方向扩展,其后,在应力方向前端出现模型边界处出现高角度后冲断层,最后形成以高角

度后冲断层为边界,以前冲叠瓦式断层为特征的压型构造样式(图 12)。

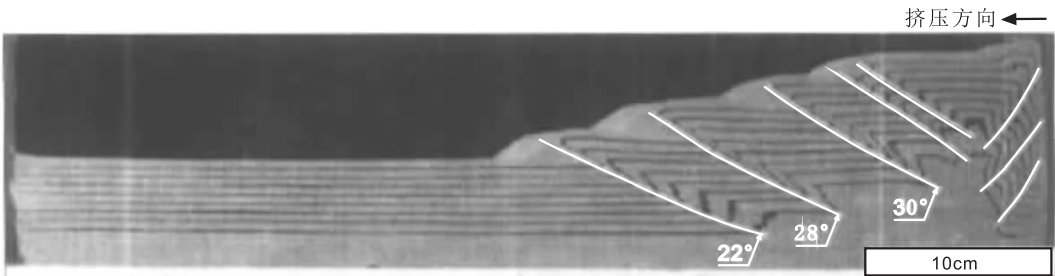


图 11 基底收缩单侧挤压剖面模型试验结果图(据周建勋等,2002)

Fig. 11 Experimental result of the section-model compressed from one direction with contractive substrate

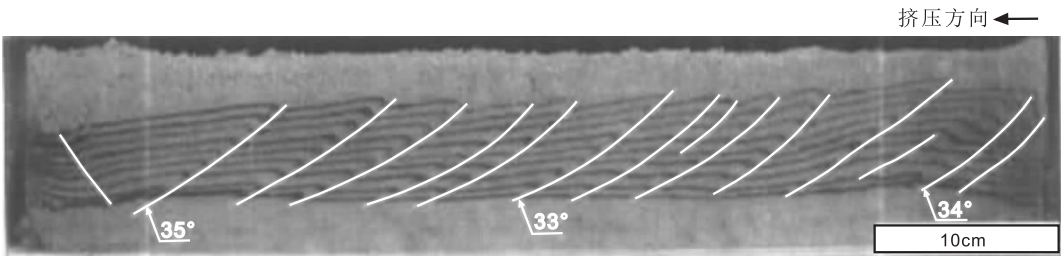


图 12 基底无收缩单侧挤压剖面模型试验结果图(据周建勋等,2002)

Fig. 12 Experimental result of the section-model compressed from one direction without contractive substrate

所以,渭河盆地处在独特的大地构造环境中,其应变特征也很独特,对其研究分析必须把区域构造应力场和局部应力场统一起来整体考虑。渭北地区显示的以后冲叠瓦断层发育为特征的构造,北秦岭显示的以高角度后冲断层为边界,以前冲叠瓦式断层为特征的压型构造样式。充分说明,在渭河盆地北部基底的收缩,南部基底的对冲和上升是渭河盆地形成的主要作用。

综上所述,渭河盆地在各个地史时期均处于挤压应力环境下,前人给出的松弛方向是断块受压的挤出逃逸方向。主体收缩构造样式和断裂发展顺序表明渭河盆地不存在伸展的应力环境。

浅正深逆总体显示逆冲断裂性质的现象,是渭河盆地断裂上下盘在挤压应力作用下差异性上升的结果,差异性上升是渭河盆地控盆断裂的主要表现形式,垂直变形是区域演化的主体特征,上升而非沉降才是区域构造活动总体特征。浅部北倾、深部南倾的秦岭北坡断裂是一条巨大的区域性逆冲断裂,它既是无根体北秦岭向北逆冲的边界断裂,也是构成鄂尔多斯盆地南缘渭河盆地地层受压下陷,渭

北隆起区受压隆起构造格架的单冲边界断裂。

盆地北部地层总体连续,盆地中心沉降区地层呈显著的向斜特征。对略向南倾斜,向下延伸可达 10 km 左右的渭河和口镇-关山逆冲大断裂性质的厘定,盆地两侧地块抬升的时间和断裂具有由盆地中心向外变新的趋势,充分说明控制盆地沉积中心的主要构造特征。

盆地北界断裂带的特征显然与 1982 年钟嘉猷等地堑成因的实验(钟嘉猷等,1982)研究所揭示的在伸张作用下形成地堑的断层是正断层,主要断裂几乎都在地堑的最外缘,形成地堑的断层的年龄是盆地中心新,越往外缘越老的规律相悖。相反却与挤压应力场下形成的地堑的断层,发育次序规律一致。但断层倾向相反,故也不存在渭河盆地是挤压应力形成的地堑的可能。

基底收缩单侧挤压模型和基底无收缩单侧挤压模型较好的模拟了渭河盆地两侧的应力环境,实验结果与邻区构造特征以及演化结果一致。

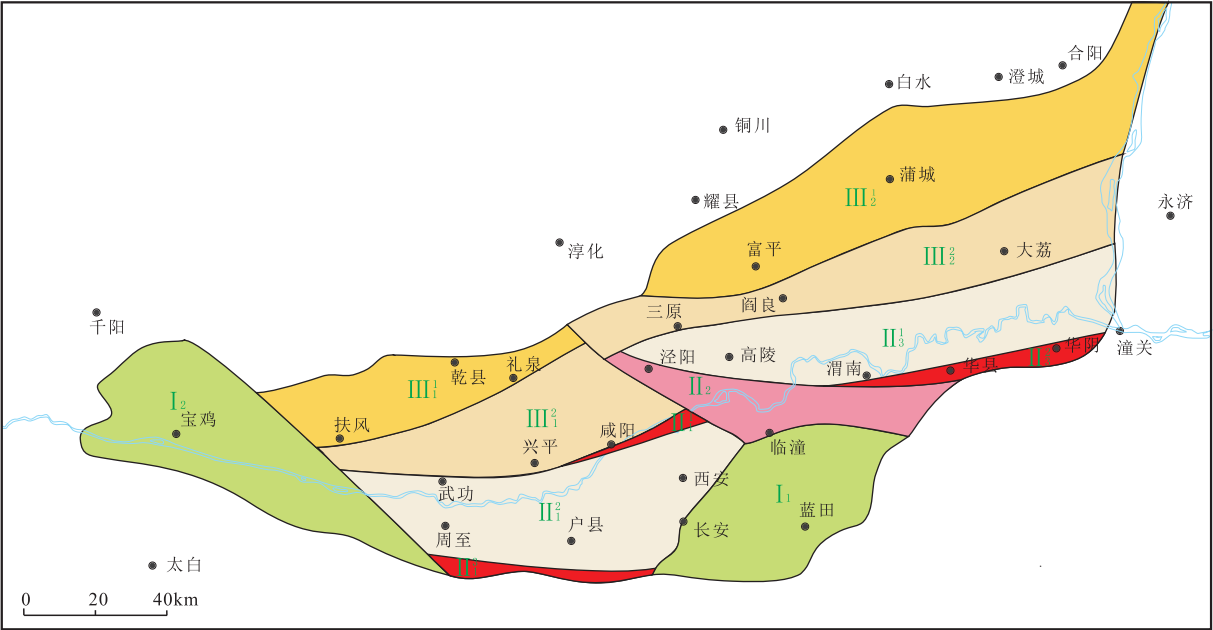
另外,渭河盆地地处中国著名的活动构造带,垂直差异性升降明显,新生代以来,盆地沉积物厚度达

6~7 km,相对于邻区地壳垂直升降幅度达8~10 km(EUGEN,1988)。而渭河盆地内断层虽切断地层,但断距很小,地层几乎是连续,说明没有明显的伸展,且相对于巨大垂向升降,水平小断距可忽略不计。所以认为渭河盆地不是地堑而是一个单冲压陷盆地。

2 渭河盆地的构造单元

基于单冲断陷盆地厘定,则渭河盆地就有了秦岭北坡逆冲构造南盘(北秦岭)受压由南向北逆冲,北盘渭河盆地受压凹陷,渭北地区受挤作用隆起的

格架。进而依据盆地断裂规模和展布、基岩出露与基岩起伏、沉积岩厚度变化,以及以重磁力场的特点,按照“中华人民共和国石油天然气行业标准”对含油气盆地构造单元划分(SY/T 5978-94),重新划分了渭河盆地的构造单元,自南向北划分出南部隆起、中部拗陷和北部斜坡等一级构造单元3个,临蓝隆起、宝鸡隆起、西安凹陷泾阳鼻隆、固市凹陷、中部斜坡和东部斜坡等二级构造单元7个,咸阳断裂带、西安凹陷、户县断裂带、固市凹陷、华县断裂带、礼泉单斜带、咸阳单斜带、蒲城断阶带和大荔单斜带等三级构造单元10个,构造单元整体呈现出自南向北凸、盆、斜、阶的非对称格局(图13)。



I. 南部隆起; I₁. 临蓝隆起; I₂. 宝鸡隆起; II. 中部拗陷; II₁. 西安凹陷; II₁¹. 咸阳断裂带; II₁². 西安凹陷; II₁³. 户县断裂带; II₂. 泾阳鼻隆; II₃. 固市凹陷; II₃¹. 固市凹陷; II₃². 华县断裂带; III. 北部斜坡; III₁. 中部斜坡; III₁¹. 礼泉断阶带; III₁². 咸阳单斜带; III₂. 东部斜坡; III₂¹. 蒲城断阶带; III₂². 大荔单斜带

图 13 渭河盆地构造单元划分图

Fig. 13 Map showing Structural unit division of the weihe Basin

3 不同盆地结构单元的成藏条件差异性

经典的油气成藏理论将油气的成藏条件概括为生、储、盖、圈、运、保6个字。渭河盆地是发育于鄂尔多斯盆地南缘的叠合盆地,具有二元结构特征。这使得它与鄂尔多斯盆地存在明显的一致性和相似性。据此可依据成矿系列、煤系矿产等理论和鄂尔

多斯盆地已发现的多种矿产资源的耦合关系(图14),对渭河盆地的成矿远景预测。同时,独特的盖层结构和错综复杂的断裂体系使得盆地内部不同结构单元的盖层沉积充填结构、构造样式等方面均存在着明显的差异性,这也导致了盆地内部不同构造单元的生、储、盖、圈类型以及运移体系的类型大不相同,进而也使盆地内不同结构单元发育的成藏类型也具有明显的差异。

3.1 断阶带

渭河盆地断阶带位于北部乾县、富平、蒲城一线,其北以北山断裂为界,北邻渭北隆起,南部以扶风-礼泉断裂和富平-蒲城断裂为界,与盆地单斜带相接,以富平断阶带最为典型。断阶带新生代盖层为第四纪和新近系,厚度一般小于1 000 m,呈南厚北薄,东厚西薄的特点。古盖层为下古生界奥陶系、寒武系,各期地层发育较全,厚度大。构造主要表现为断阶,断裂发育顺序是南早北新。但蒲城一线断裂多向北倾,乾县一线多向南倾。该构造单元缺乏有效氦源岩,新生代盖层缺乏有效烃源岩,古盖层烃源岩为蓟县系含藻白云岩烃源、下古生界奥陶系海相烃源岩。因此,该区不是氦气资源的有利成藏区,油气勘探应以蓟县系含藻白云岩烃源、下古生界奥陶系海相烃源岩为重点。

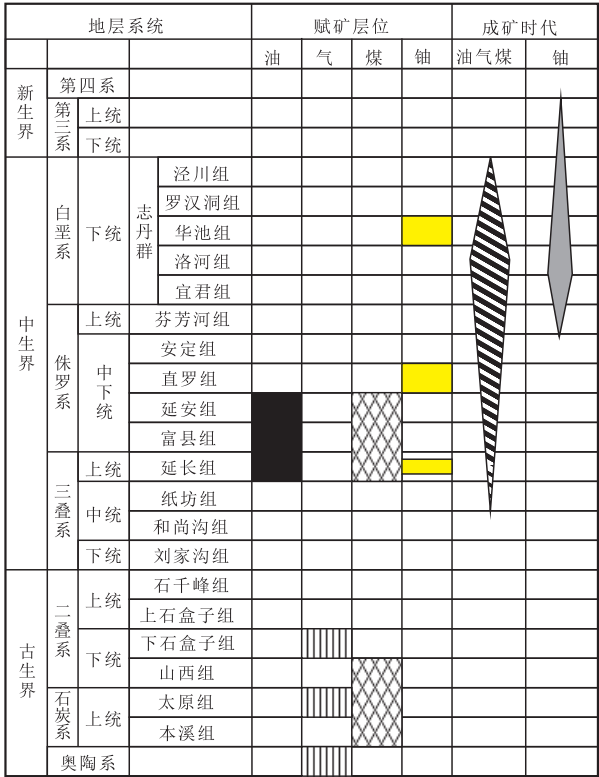


图 14 多种矿产的赋矿层位-成矿时代
组合关系图(据陈刚等,2005)

Fig. 14 Relation of forming time and bearing sequences of multiple energy resources in Ordos basin

3.2 单斜带

渭河盆地单斜带位于北部兴平、咸阳、三原、大荔一线,北以扶风-礼泉断裂和富平-蒲城断裂为界,

南以渭河断裂和关山断裂为界,北邻渭河盆地北部断阶带,南与盆地中部坳陷相接,在平面上呈北东向展布,构造剖面样式总体呈一南倾单斜构造。

新生代沉积盖层和其下古盖层各期地层发育较全。新生代沉积盖层厚约2 500~3 500 m,各期地层发育较全,具有界面较为清晰、南倾、平缓的特征。古盖层沉积盖层厚度相对较小,也具有南倾、平缓的特征,但详细划分困难。该结构单元的烃源岩有蓟县系含藻白云岩烃源、下古生界奥陶系海相烃源岩、上古生界煤系烃源岩、中生界三叠系延长组长7碳质泥岩烃源岩、侏罗系延安组煤系烃源岩和新生代张家坡组六套烃源岩氦源岩,主要是张家坡组灰黑色泥岩和石炭、二叠系烃源岩,储层主要为张家坡组、灞河组砂体及石炭、二叠系砂体。氦源岩有白垩系、侏罗系、三叠系以及二叠系和石炭系的高自然伽马异常层,主要是中侏罗统直罗组和下白垩统志丹群,储层主要为新生代砂体和断裂构造带。盖层是上覆第四纪黄土和新近系及石炭二叠系泥岩。运输体系种类较多,有源岩、断层、砂体、不整合面以及源岩-断层-骨架砂体-圈闭。因而,该区是油气及其伴生资源的有利成藏区。

3.3 凹陷带

凹陷带位于盆地中南部,主要受秦岭北缘断裂、渭河断裂、关山断裂控制,呈东西向展布,新生代沉积厚度较大,西安、固市凹陷均超7 000 m,受其影响,物探资料对古生代、中生代地层界线揭示不清。但依据盆地钻井资料,固市凹陷存在二叠系石盒子组,西安凹陷存在白垩系。故推测西安凹陷中生代沉积与鄂尔多斯盆地中生代一致,固市凹陷可能存在三叠系以上的地层。故凹陷带中有勘探价值的烃源岩主要为新生代张家坡组和中生代三叠系延长组长7碳质泥岩烃源岩和侏罗系延安组煤系烃源岩。凹陷带构造简单,总体为一向斜构造,且仅在局部地段见有少量倾斜褶曲,未见具有一定规模的背斜。地热资料显示,地下热为2亿年的古热水,流向向东,凹陷区地下热水主要沿不整合面、断裂活动,不整合面为热流体的水平运移创造了有利的条件,频繁活动的断裂构造为流体垂向上的运移提供通道。凹陷带两侧为油气及其伴生资源的存储提供有利的场所,粗细变化沉积韵律层为油气及其伴生资源的圈闭提供了条件。因此,凹陷带两侧是渭河盆地主要的油气及其伴生资源勘查区。

3.4 断裂构造带

断层构造带是2条以上断裂构造的复合带,盆地内主要有华县断裂构造带、咸阳断裂构造带和户县断裂构造带,它们均呈东西向展布,其典型代表是华县断裂构造带。主构造面呈铲式,构造剖面样式种类单一,主要为“y”型。盆地内断裂构造带具多期活动特征,它们不仅为热流体活动提供通道,也为热流体储藏提供空间,为盆地内有利的地热的储藏区,也是有利的可溶性氮气的成藏区。

4 结论与认识

(1)浅部北倾、深部南倾的秦岭北坡断裂是一条巨大的区域性逆冲断裂。它既是无根体北秦岭向北逆冲的边界断裂,也是构成鄂尔多斯盆地南缘渭河盆地处地层受压下陷,渭北隆起区受压隆起构造格架的单冲边界断裂。

(2)渭河盆地北山南缘断裂带的断裂非传统的张性正断层,而是浅部受局部应力场作用下的剪性正断层,但整体为逆断层。

(3)渭河盆地不是地堑,而是一个单冲压陷盆地。

(4)断裂是渭河盆地最主要的控盆构造形式,盆地结构的差异性控制了各结构单元的油气及伴生资源的成藏条件和成藏规律:断阶带不是氮气资源的有利成藏区,油气勘探应以蓆县系含藻白云岩烃源、下古生界奥陶系海相烃源岩为重点。单斜带是油气及其伴生资源的有利成藏区,其北部最为有利。断裂构造带是盆地内有利的地热的储藏区,也是有利的可溶性氮气的成藏区。

参考文献(References):

宁崇质. “汾渭地堑”之厘定及其意义[J]. 地质力学学报, 1995, 1(2): 40-49.

NING Chongzhi. The collating and stipulating of “fenhe-weihe graben”, and its significace[J]. Journal of Geomechanics, 1995, 1(2): 40-49.

权新昌. 渭河盆地断裂构造研究[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(3): 1-8.

QUAN Xinchang. Weihe Basin Faulted Structure Study[J]. Coal Geology of China, 2005, 17(3): 1-8.

徐黎明, 周立发, 张义楷, 等. 鄂尔多斯盆地构造应力场特征

及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(4): 455-462.

XU Liming, ZHOU Lifa, ZHANG Yikai, et al. Characteristics And Tectonic Setting of Tectono-Stress Field of Ordos Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(4): 455-462.

徐文龙. 陕西北秦岭中段构造应力场的初步研究[J]. 地震地质, 1991, 13(2): 161-172.

XU Wenlong. A study on tectonic stress field on the middle section of northern qinling mountain in shaanxi province[J]. Seismology and Geology, 1991, 13(2): 161-172.

白相东, 迟宝明, 关成尧, 等. 鄂尔多斯南缘构造带现今地块运动模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(3): 674-682.

BAI Xiangdong, CHI Baoming, GUAN Chengyao, et al. Ordos Block Modern Movement Patterns in Southern Ordos Margin Tectonic Belt[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2015, 45(3): 674-682.

董小鹏, 张国伟, 赵霞, 等. 北秦岭元古代构造格架与演化[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(2): 115-124.

DONG Yuepeng, ZHANG Guowei, ZHAO xia, et al. The proterozoic tectonic framework and evolution of the north qinling orogen, central china[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(2): 115-124.

宋传中, 张国伟, 任升莲, 等. 秦岭-大别造山带中几条重要构造带的特征及其意义[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2009, 39(3): 368-380.

SONG Chuansong, ZHANG Guowei, REN Shenglian, et al. The research on deformation features of some structural zones in the Qinling-Dabieshan orogenic belt[J]. Journal of Northwest University(natural science edition), 2009, 39(3): 368-380.

肖晖, 李建新, 韩伟, 等. 鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起中新世代构造抬升及演化[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(5): 576-593.

XIAO Hui, LI Jianxin, HAN Wei, et al. The tectonic uplift time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south edge of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(5): 576-593.

毛明陆. 渭北隆起北部构造分析与油气成藏预测[D]. 西安: 西北大学, 1997.

MAO Minglu. The structural analysis and hydrocarbon reservoir anticipation of the northern Weibei uplift[D]. XIAN: Northwest University, 1997.

彭建兵. 渭河断裂带的构造演化与地震活动[J]. 地震地质, 1992, 14(2): 113-120.

PENG Jianbing. Tectonic evolution and seismicity of Weihe

- fault zone[J]. Seismology and Geology, 1992, 14(2): 113-120.
- 张安良, 种瑾, 米丰收. 渭河断陷南缘断裂带新活动特征与古地震[J]. 华北地震科学, 1992, 10(4): 55-62.
- ZHANG Anliang, ZHONG Jin, MI Fengshou. The characteristics of the active faults and the paleo earthquakes in the southern margin of Weihe fault [J]. North China Earthquake Sciences, 1992, 10(4): 55-62.
- 王景明. 渭河地堑断裂构造研究[J]. 地质论评, 2012, 30(3): 217-223.
- WANG jingming. A Study on the tectonics of the Weihe river Graben [J]. Geological Review, 2012, 30(3): 217-223.
- 王颂禹. 试论断层分类[J]. 上海地质, 1997, 62(2): 50-53.
- WANG Songyu. A Tentative Exposition of Fault Classification[J]. Shanghai Geology, 1997, 62(2): 50-53.
- 李洪强, 高锐, 王海燕, 等. 深反射大炮数据揭示北秦岭—渭河地堑—鄂尔多斯南部 Moho 格架[J]. 地质科学, 2016, 51(1): 67-75.
- LI Hongqiang, GAO Rui, WANG Haiyan, et al. Near vertical deep seismic reflection profile reveal the sketch of Qinling Mountains orogenic belt-Weihe garben-Ordos block's Moho by big charge shots[J]. Chinese Journal of Geology, 2016, 51(1): 67-75.
- 滕吉文, 李松岭, 张永谦, 等. 秦岭造山带与沉积盆地和结晶基底地震波场及动力学响应[J]. 地球物理学报, 2014, 57(3): 770-788.
- TENG Jiwen, LI Songling, ZHANG Yongqian, et al. Seismic wave fields and dynamical response for Qinling orogen and sedimentary basins and crystalline basement[J]. Chinese Journal Geophysics, 2014, 57(3): 770-788.
- 任隽, 冯希杰, 王夫运, 等. 深地震反射剖面揭示的渭河盆地西安拗陷的地壳精细结构[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 513-521.
- REN Jun, FENG Xijie, WANG Fuyun, et al. Fine crust structures of Xi'an sag in the Weihe basin revealed by a deep seismic reflection profile[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2): 513-521.
- 耿树方, 刘平, 郑洪伟, 等. 对中国东部中生代动力学机制的新认识[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1061-1068.
- GENG Shufang, LIU Ping, ZHENG Hongwei, et al. A tentative discussion and new recognition of Mesozoic geodynamic mechanism in eastern China[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1061-1068.
- 徐开礼, 朱志澄. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- XU Kaili, ZHU Zhicheng. Structural geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.
- 田勤虎, 李晓妮, 冯希杰, 等. 渭河盆地北缘断裂带展布及其活动性研究[J]. 国际地震动态, 2012(6): 56-56.
- TIAN Qinjian, LI Xiaoni, FENG Xijie. Primary Study on Quaternary Tectonic Events Based on Variation of Fault Activity in Weihe Basin [J]. Seismology and Geology, 2003, 25(1): 146-154.
- 陈冒彦, 王思敬, 王贵荣, 等. 陕西渭北地区新生代复合伸展构造系[J]. 中国区域地质, 1997, 16(4): 387-395.
- CHEN Maoyan, WANG Sijing, WANG Guirong, et al. Cenozoic composite extensional structural system in the Weibei area, Shaanxi [J]. Regional geology of China, 1997, 16(4): 387-395.
- 王健强, 刘池洋, 闫建萍, 等. 鄂尔多斯盆地南部渭北隆起发育时限及其演化[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(4): 22-29.
- WANG Jianqiang, LIU Chiyang, YAN Jianping, et al. Development time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south of Ordos basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, 46(4): 22-29.
- 任战利, 崔军平, 郭科, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析[J]. 科学通报, 2015, 60(14): 1298-1309.
- REN Zhanli, CUI Junping, GUO Ke, et al. Fission-track analysis of uplift times and processes of the Weibei Uplift in the Ordos Basin [J]. Science China Press, 2015, 60(14): 1298-1309.
- 吴中海, 吴珍汉, 万景林, 等. 华山新生代隆升—剥蚀历史的裂变径迹热年代学分析[J]. 地质科技情报, 2003, 22(3): 27-32.
- WU Zhonghai, WU Zhenhan, WAN Jinglin, et al. Cenozoic Uplift And Denudation History Of Huashan Mountains: Evidence From Fission Track Thermochronology Of Huashan Granite [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(3): 27-32.
- 万景林, 李齐, 王瑜. 华山岩体中、新生代抬升的裂变径迹证据[J]. 地震地质, 2000, 22(1): 53-58.
- WAN Jinglin, LI Qi, WANG Yu. The Fission Track Evidence Of Huashan Batholith Uplifting In Mesozoic-Cenozoic [J]. Seismology and Geology, 2000, 22(1): 53-58.
- 刘建辉, 张培震, 郑德文, 等. 秦岭太白山新生代隆升冷却历史的磷灰石裂变径迹析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2405-2414.
- LIU Jianhui, ZHANG Peizhen, ZHENG Dewen, et al. The cooling history of Cenozoic exhumation and uplift of the Taibai Mountain, Qinling, China: evidence from the apatite fission track (AFT) analysis [J]. Chinese Journal Of

- Geophysics, 2010, 53(10): 2405-2414.
- 王恒松, 黄春长, 周亚利, 等. 渭河中游全新世黄土剖面光释光测年及记录的古洪水事件[J]. 地质学报, 2012, 86(6): 994-1004.
- WANG Hengsong, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. OSL Dating of Holocene Loess-Paleosol Profiles in the Middle Reaches of Weihe River and Paleoflood Events [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(6): 994-1004.
- 陈云, 童国榜, 曹家栋, 等. 渭河宝鸡段河谷地貌的构造气候响应[J]. 地质力学学报, 1999(5): 49-56.
- CHEN Yun, TONG Guobang CAO Jiadong, et al. Tectonic Climate Response In The Geomorphology Of The Weihe River Valley Around Baoji, Shaanxi Province[J]. Journal of Geomechanics, 1999(5): 49-56.
- 姜家兰, 黄长林. 陕西地区地壳厚度初探[J]. 西北地震学报, 1986, 8(4): 43-51.
- JIANG Jialan, HUANG Changlin. Preliminary study on the crustal thickness in Shaanxi region[J]. Northwestern Seismological Journal, 1986, 8(4): 43-51 (in Chinese).
- 谢振乾. 拉伸型渭河盆地地震孕育发生的构造模型[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 18-60.
- XIE Zhenqian. Structural Model of Earthquake Preparation in Weihe Extensional Basin[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(3): 18-60.
- 申安斌. 陕西省莫霍面特征[J]. 陕西地质, 1997, 15(2): 58-63.
- SHEN Anbin. The Characteristic of Moho In Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi. 1997, 15(2): 58-63.
- 任隽, 彭建兵, 王夫运, 等. 渭河盆地及邻区地壳深部结构特征研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2939-2947.
- REN J, PENG JB, WANG FY, et al. The research of deep structural features of Weihe basin and adjacent areas [J]. Chinese J. Geophys (in Chinese), 2012, 55(9): 2939-2947.
- 徐树斌, 米宁, 徐鸣洁, 等. 利用接收函数研究渭河地堑及其周边地壳结构[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1651-1658.
- XU S B, MI N, XU MJ, et al. Crustal structures of the Weihe graben and its surroundings from receiver functions[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43: 1651-1658.
- 陈跃辉. 南雄断裂构造剥离作用及其与铀成矿的关系[J]. 铀矿地质, 1994(3): 168-174.
- CHEN Yaohui. Tectono-denudational process of nanxiong fault and its relations to uranium metallogenesis[J]. Uranium Geology, 1994(3): 168-174.
- 贾萌, 王显光, 李世林, 等. 鄂尔多斯块体及周边区域地壳结构的接收函数研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2474-2481.
- JIA Meng, WANG Xianguang, LI Shilin, et al. Crustal structures of Ordos block and surrounding regions from receiver functions[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2015, 30(6): 2474-2481.
- 陆一锋, 徐鸣洁, 王良书, 等. 鄂尔多斯东南缘地区的地壳结构[J]. 科学通报, 2012, 57(1): 59-64.
- LU YF, XU MJ, WANG LS, et al. Crustal structure of the southeastern margin of the Ordos Block[J]. Chin Sci Bull., 2012, 57(1): 59-64.
- 杜明, 张锦, 侯喜燕, 等. 陕西省地热资源现状调查评价与区划报告[R]. 2015, 1-184.
- DU Ming, ZHANG Jin, HOU Xiyan, et al. Survey and evaluation of geothermal resources in Shaanxi province [R]. 2015, 1-184.
- 刘池洋. 拉伸构造区古地质构造恢复和平衡剖面建立——以渤海湾盆地为例[J]. 石油实验地质, 1988(1): 36-46.
- LIU Chiyang. The Reproduction of Paleo-Structure And The Establish Of Equilibrium Profile For Extension Structure Area—An Example of Bohai Gulf Basin[J]. Experimental Petroleum Geology, 1988(1): 36-46.
- 杜兴信. 用小震断层面解反演平均应力场——以汾渭地震带为例[J]. 高原地震, 1993, 5(3): 55-61.
- DU Xingxin. Inversion of Mean Stress Field Using The Fault Plane Solution of Small Earthquakes—Taking Fen-Wei Seismic Belt[J]. Earthquake Research In Plateau, 1993, 5(3): 55-61.
- 宁飞, 汤良杰. 挤压地区物理模拟研究进展[J]. 世界地质, 2009, 28(3): 345-350.
- NING Fei, TANG Liangjie. Advances of research on physical modelling in compressional area [J]. Global Geology, 2009, 28(3): 345-350.
- 童享茂, 孟令箭, 蔡东升. 裂陷盆地断层的形成和演化—目标砂箱模拟实验与认识[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 759-774.
- TONG Hengmao, MENG Lingjian, CAI Dongsheng. Fault Formation and Evolution in Rift Basins—Sandbox Modeling and Cognition[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 759-774.
- 周建勋, 魏春光, 朱战军. 基底收缩对挤压构造变形特征影响——来自砂箱实验的启示[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 377-382.
- ZHOU Jianxun, WEI Chunguang, ZHU Zhanjun. Influence of substrate contraction on the deformational characteristics of compressional structures; insights from sandbox experiments [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9

(4): 377-382.

钟嘉猷,单家增,王在中. 地堑成因的实验研究[J]. 地质科学,1982(2):171-178.

ZHONG Jiayou,SHAN Jiazeng,WANG Zaizhong. The Experimental Study of The Formation of Graben[J]. Chinese Journal of Geology, 1982(2): 171-178.

EUGEN Artyushkov,章振铨. 裂谷与地堑[J]. 地震地质译丛,1988(6):54-60.

EUGEN Artyushkov, ZHANG Zhengquan. Rift and graben [J]. Translated Seismic Geological,1988(6):54-60.

陈刚,章辉若,周立发,等. 鄂尔多斯盆地构造与耦合成矿关系思考[J]. 西北大学学报(自然科学版),2005,35(06):783-786.

CHEN Gang, ZHANG Huiruo,ZHOU lifa, et al. Relation between tectonics and the coupling coexistence of multiple energy resources in Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2005, 35(06): 783-786.

SCHUMM SA. River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. The Journal of Geology, 1993,101(2):279-294.

GAO H S, LI Z M, JK Y P, et al. Climatic and tectonic controls on strath terraces along the upper Weihe River in central China[J]. Quat Res, 2016, 86: 326-334.

SUN J M. Long-term fluvial archives in the Fen Wei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India? Asia collision system during the Quaternary[J]. Quat Sci Rev, 2005, 24: 1279-1286.

ERNICKE B, BURCHFIEL B C. Modes of extensional tectonics[J]. Journal of Structural Geology, 1982,4(2): 105-115.

JULIEN, Ph. , CORNET, FH. Stress determination from aftershocks of the Campania-Lucania earthquake of November 23 [J]. Ann, Geophysicae, 1980, 5b, (3): 289-300, 1987.

松树沟式铬铁矿

成矿区带:北秦岭成矿带(Ⅲ-66A)。

建造构造:松树沟超基性岩体侵入于古元古界秦岭群(主要由斜长片麻岩、斜长角闪岩、大理岩构成)。超基性岩体组成:细粒橄榄岩质糜棱岩(约占75%)塑性变形显著,岩石m/f值为8.26~11.36;中粗粒橄榄岩(约占15%),多呈不同级别大小的透镜状分离体分布于橄榄岩质糜棱岩中,具半自形粒状结构和镶嵌结构,岩石m/f值为8.80~9.95;透辉岩脉沿橄榄岩片理分布。成岩纯橄岩的橄榄石粒径小于0.3mm,而成矿中粗粒纯橄岩的橄榄石粒径大于0.5mm,大者可达20~50mm(夏林圻,1980)。

成矿时代:中元古代晚期。粗粒纯橄岩-方辉橄榄岩-橄榄石-斜方辉石-铬尖晶石Sm-Nd等时线年龄 $1\,084\pm 73\text{ Ma}$ (陆松年等,2004)和 $1\,079\pm 63\text{ Ma}$ (陈志宏,2004)。

成矿组分:Cr,(Os,Ir,Ru等)

矿床(点)实例:(陕)商南县松树沟铬矿床,泥鳅凹、金沟凹铬矿点;蓝田县草坪铬矿点。

简要特征:铬铁矿矿体主要赋存于中粗粒纯橄岩和少量的块状构造方辉橄榄岩中。矿体呈透镜状。单个矿体的矿石边部为稀疏浸染状,向内为中等浸染状、稠密浸染状到致密块状。边部浸染状矿石 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值为0.493,中心致密块状矿石 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值为0.299(陈彰瑞等,1997)。矿石有用矿物主要为铬尖晶石, Cr_2O_3 平均品位22.39%,伴生铂族元素含量 $0.057\times 10^{-6}\sim 0.446\times 10^{-6}$,大部分大于 0.18×10^{-6} 。

成因认识:中元古代晚期小洋盆,地幔岩绝热减压底劈上升发生多期部分熔融事件,细粒纯橄岩-方辉橄榄岩代表难熔残余;高度熔融形成基性度高、且富挥发分和铬、镁的岩浆囊内结晶中粗粒纯橄岩-方辉橄榄岩及铬铁矿体。前者经历 $1\,200\sim 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $800\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 两阶段变形,后者仅经历 $800\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 阶段的变形(李彝等,2010)。中心的致密块状矿石是从深部向浅部的熔融过程矿质逐步累积的结果,边部的浸染状矿石则仅为浅部形成的矿质。

(中国地质调查局西安地质调查中心 杨合群)