

鄂尔多斯古构造应力场与中部大气田的联系*

吴冲龙 周江羽 王根发 周 辉 张琼岩

(中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074)

各原型盆地的地层顶面高程趋势面剩余分析, 与相应的沉积基底形态分析结果证实, 鄂尔多斯盆地中部加里东期侵蚀面附近存在大型平缓隆起。将盆地基底的同沉积构造变形史分析和区域大地构造运动史分析结合起来, 拟定了早、晚燕山期的盆地构造应力作用方式和方向; 然后利用有限单元法分别模拟了盆地这两个演化阶段的古构造应力场和应变场特征, 进而探讨它们与盆地中部大型平缓隆起及大气田的成因联系。可能是下古生界的泥岩和膏盐层在挤压应力场中的垂向膨胀, 促成盆地中部的加里东期侵蚀面附近出现大型平缓构造圈闭; 低挤压应力与其他因素的叠合, 导致低压、负压环境的出现, 使中部隆起区既成为天然气运移指向区也成为天然气藏封存箱。

关键词 构造 应力场 应变场 天然气 运移 聚集 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 吴冲龙 男 52 岁 教授(博士生导师) 煤田及油气地质、数学地质

鄂尔多斯盆地的 7 个盆地原型^[1]在其各自的形成与演化阶段, 都留下了分布面积巨大并且具有相当厚度的沉积物。其中, 下古生界碳酸盐岩和上古生界含煤岩系, 是两套主要的气源岩, 具有相当大的资源潜力。目前已经在盆地中部的奥陶系顶部风化壳中发现了超大型天然气田, 但全盆地的天然气藏分布规律仍不清楚, 天然气藏的圈闭问题也还没有完全解决。近期的地震勘查与研究工作^[2]发现, 在加里东期侵蚀面附近可能存在大型平缓隆起(背斜或古地形或礁或被盖构造)。本项研究从另一个方面证实该大型平缓隆起的存在, 并且将进一步揭示它的性质、成因和形成历程。

1 加里东期侵蚀面附近大型平缓隆起

根据钻孔资料和地震资料, 对古生界各地层顶面的高程作了趋势面分析, 所获得的三次趋势剩余图(图 1)显示, 鄂尔多斯盆地中部以靖边为中心的地区, 从下马家沟组顶面到上古生界顶面, 在总体凹陷的背景下出现一个近 NS 走向的大型椭圆形低缓隆起。该大型低缓隆起略呈向上增强的趋势, 其中, 下马家沟组的变形对平缓隆起的形成贡献最大, 上马家沟组变形的叠加有明显的增强效应, 而上古生界变形的叠加仅有微弱的增强效应。从三叠系顶面到白垩系顶面, 该隆起逐步减弱并迁移和分解。

由于各套地层的变形既可能包括沉积期后的构造变形, 也可能包括自身的沉积期和准同

* 国家“八五”重点科技攻关项目子课题(85-102-01-03)的研究成果之一。

收稿日期: 1997-03-14 改回日期: 1997-05-08

沉积期变形, 仅仅依靠地层顶面高程趋势剩余分析, 既难以详细查明该中部隆起的形成演化历程, 也难以判别该中部隆起的性质。为此, 有必要将地层顶面高程趋势剩余与原始沉积厚度结

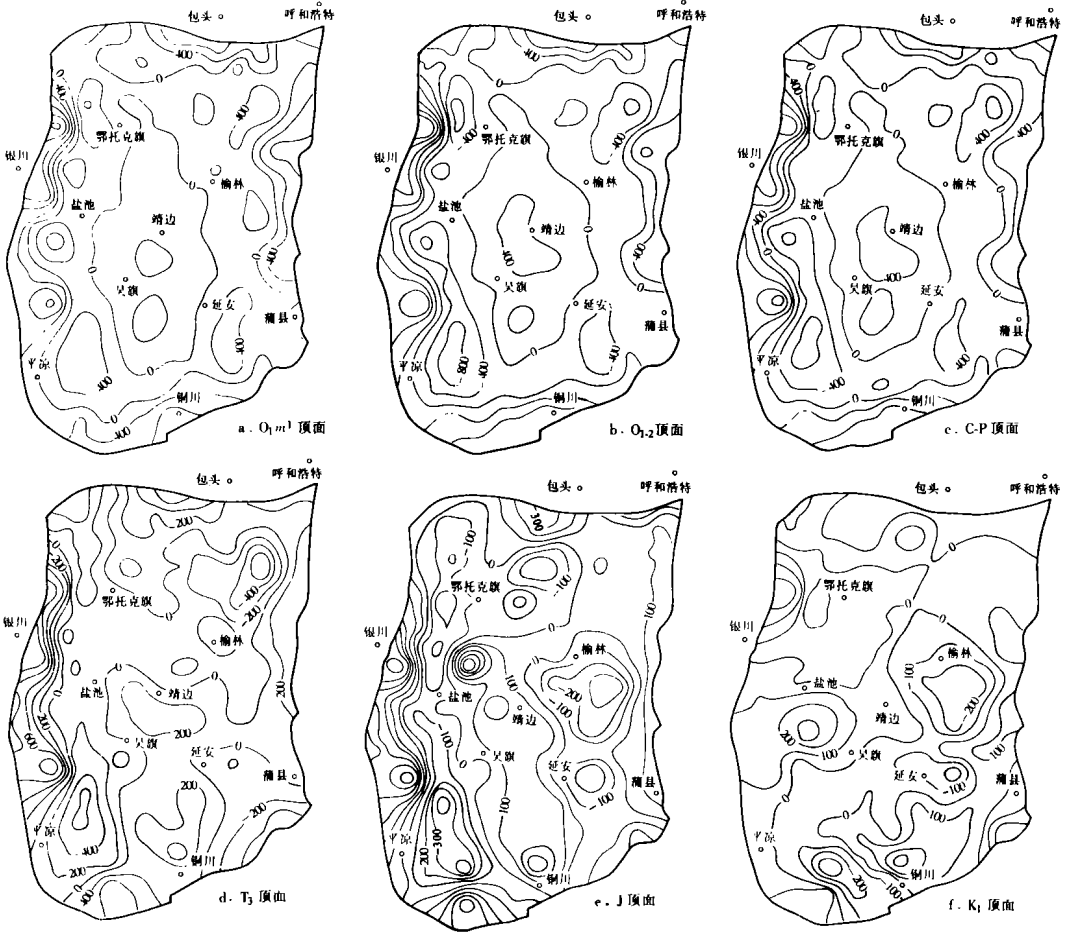


图 1 鄂尔多斯盆地各套地层顶面高程三次趋势剩余图(单位: m)

合起来分析, 亦即将各套地层的沉积期后构造变形与其自身的同沉积变形结合起来分析。在大型叠合盆地的演化过程中, 由于区域大地构造背景的变化, 沉降中心与沉降轴的位置和性质总是不断地变化着的, 但每个原型盆地都有相对稳定的沉降中心和沉降轴, 显示出各构造演化阶段基底都有相对强烈挠曲应变区。地层原始等厚度(经过压实校正)图(图 2)表明, 加里东期侵蚀面附近的大型平缓隆起在晚古生代至早中生代还没有出现。从早侏罗世开始, 各原型盆地同沉积期的沉降中心位置及基底顶面形态, 越来越接近该椭圆形低缓中部隆起。也就是说, 鄂尔多斯盆地中部加里东期侵蚀面附近的大型平缓隆起, 是从早侏罗世开始发育, 经过中、晚侏罗世的改造、强化, 至白垩纪才定型的。由于该隆起形成、演化所涉及的时间很长, 范围和幅度都很大, 并且实际上已经在侏罗-白垩系中造成了大型同沉积背斜, 难以用古地形差异和礁体的存在来解释, 推测是在盆地外围板块的相互作用下, 伴随盆地基底变形与沉降而发生的沉积盖层构造变形。大量研究成果表明, 盆地古构造应力场和应变场既是盆地构造演化的控制因素^[3~5], 也是油气运移、聚集的一种驱动和封存因素^[6~9]。

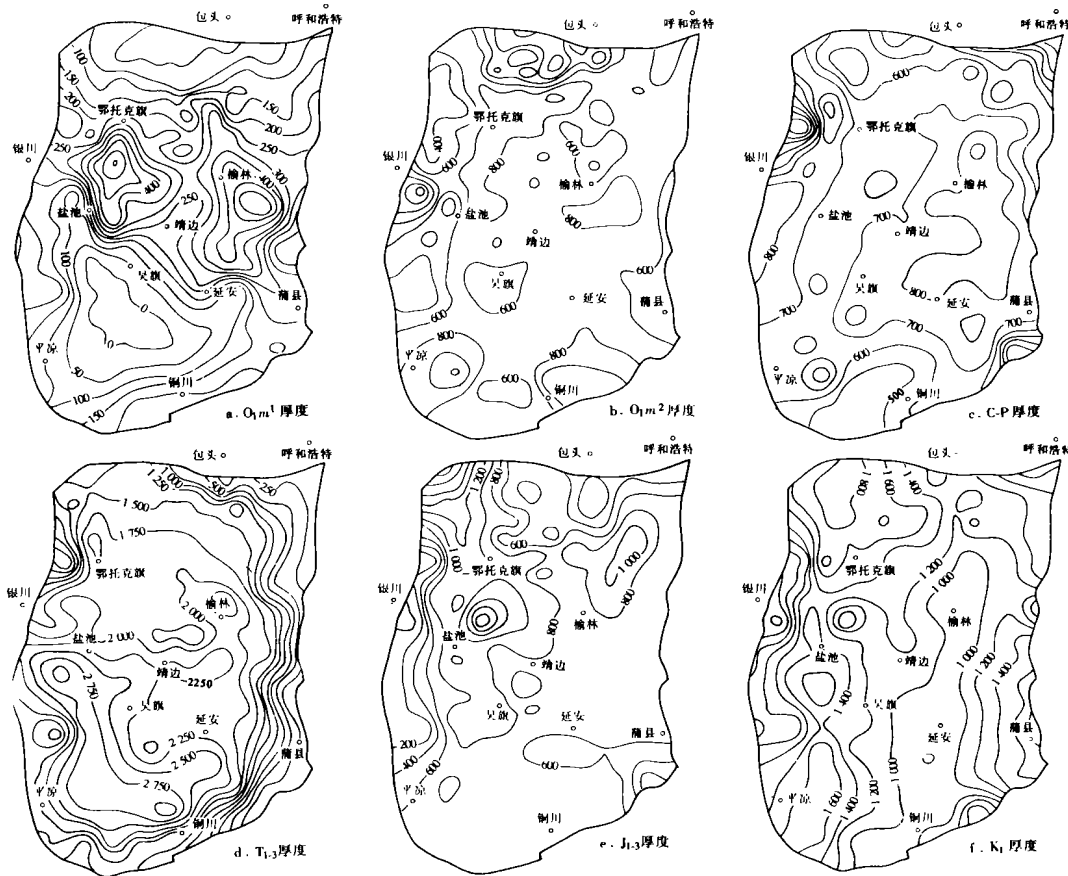


图 2 鄂尔多斯盆地各套地层原始等厚线图(单位:m)

2 同沉积构造变形及外力分析

大区域板块相互作用的背景分析可提供盆地构造演化外力的作用方式、方向和强度的定性认识。盆地基底的沉降方式、位置、速率、幅度和沉积物的性质、分布以及其中同沉积构造的性质、型式,都可以看作是对盆地外力作用方式、方向和强度的响应。因此,通过构造应变场来研究构造应力场,又通过构造应力场来理解构造应变场,是我们研究盆地古构造应力场和应变场的基本方法^[5]。在反映盆地基底挠曲变形特征的诸因素中,盆地沉降中心与沉降轴的性质、位置和幅度的意义最为突出,应当着重加以分析。

2.1 早燕山期

晚三叠世末的印支运动造成了鄂尔多斯盆地东高西低、北高南低的古地形。印支运动之后,鄂尔多斯盆地经短期整体隆升后进入挠曲-差异沉降阶段。早侏罗世的盆地沉降轴大致沿吴旗东-靖边西-鄂托克旗一线,呈 NS 向延伸,盆地呈一近似 EW 对称的大型宽缓凹陷(图 2d);至中侏罗世末期,沉降中心偏于西缘鄂托克旗-盐池-环县一带,盆地东、南部大面积抬升遭受剥蚀,基底西陡东缓,沉降轴转为 NNE 方向(图 2e),这表明在燕山运动中期,盆地西侧的挤压力逐渐增强。此构造格局一直持续到白垩纪末。晚侏罗世时盆地整体隆起,沉积范围仅

限于盆地西北缘,发育一套楔状的冲积扇体系粗碎屑沉积物,反映了晚侏罗世盆地西北边缘有过短暂的NE-SW向挤压力。因此,从整个侏罗系看,盆地沉降轴位于吴旗西-盐池东-鄂托克旗-临河一线,略呈NNW向延伸的反“S”形(图2e);两个沉降中心,分别位于吴旗西侧至鄂托克旗南侧地区和盆地西北角。其中,早、中侏罗世沉降幅度达1 600 m以上,沉降速率约为40 m/Ma。

盆地基底在早燕山期的变形史及挠曲-差异沉降盆地原型的形成、演化史,与盆地周围的大地构造运动史密切相关。在盆地西南外侧,中特提斯洋从早侏罗世开始迅速扩张,推动羌塘微陆群进一步向中朝-塔里木陆块挤入,所产生的冲模效应和滑移线场使祁连和阿拉善向东挤出,造成鄂尔多斯盆地西缘的贺兰山一带出现南北向褶皱隆起;在中朝陆块的东部,库拉板块转向西北俯冲^[10]。盆地基底早、中侏罗纪的变形,正是东西两侧不平衡挤压作用的结果。华北陆块的南侧和北侧未发现显著的板块相互作用事件。因此,这个时期施加于研究区的板块相互作用力可归纳为:西侧强大的东西向挤压力和东侧的北西向较弱挤压力。到了晚侏罗世晚期,中特提斯洋北支闭合^[11],冈底斯地块向北与中朝-塔里木陆块拼合,所产生的冲模效应和滑移线场使早侏罗纪形成的贺兰山隆起进一步发育。

2.2 晚燕山期

自早白垩世早期开始,盆地恢复沉降,两个沉降轴分别位于盆地东、西两侧。西部沉降轴与侏罗纪相近,沿环县-盐池-鄂托克旗一线略呈NNE至近NS走向(图2f),有两个沉降中心,分别位于沉降轴南端的庆阳西-泾川一带和北端的鄂托克旗以北地区;东沉降轴只有一个沉降中心,位于沉降轴南端的蒲县一带。两个沉降轴之间为一走向NNE至近NS的长条形低缓同沉积隆起。盆地内部基底大致呈两陷夹一隆的变形格局,周缘基底均有翘起的趋势。盆地内部沉降幅度均大于1 000 m,沉降轴所在处可达1 600 m以上,沉降速率约为30~50 m/Ma。下白垩统志丹群基本局限于现今盆地的范围内,其分布范围最终显示了鄂尔多斯盆地的现今构造轮廓特征。上白垩统在盆内缺失,表明鄂尔多斯中生代大型凹陷盆地的发育历史结束。盆地基底的上述变形特征,反映遭受了东西两侧的强烈挤压和南北两侧的微弱挤压。

研究区东部,从早白垩世末期起,库拉-太平洋板块对中朝-塔里木陆块的挤压作用显著增强,至晚白垩世更为剧烈^[11];东北远方的锡霍特-阿林带及神居古潭带的小洋盆,也于此时闭合^[10]。研究区西部,特提斯洋北支闭合之后,冈底斯地块与中朝-塔里木陆块持续相互作用,使盆地仍然遭受向东的挤压力。但鄂尔多斯盆地在早白垩世的再次挠曲沉降,以及随后在晚白垩世的整体抬升遭受剥蚀,可能主要与东侧挤压作用的增强有关。西伯利亚板块和扬子亚板块微弱的持续作用,可能是鄂尔多斯盆地南北两侧基底遭受微弱挤压变形的原因。

3 古构造应力场、应变场模拟

根据研究需要,以盆地基底及奥陶系在早、晚燕山期的古构造应力场和应变场为模拟对象,采用二维有限单元模型,将盆地基底的古应力场、应变场简化为“平面应力问题”和“平面应变问题”。考虑到在相对稳定的古构造应力场长期作用下,盆地基底及内部岩系均将产生弹塑性变形,其应力与应变之间不可能是线性的,作者采取逐步调整材料弹性模量和泊松比的增量法,将弹塑性变形的非线性应力应变关系,转化为弹性变形的线性关系来求得近似解。

3.1 模拟模型的设计

为了进行比较和鉴别,在上述地质分析所得到的外力作用方式基础上,对各构造期均设计

了多种不同受力方案及边界位移约束方案。

3. 1. 1 介质的选择

水平切面: 该项模拟分为盆地古老基底水平切面模拟和奥陶系水平切面模拟两个部分。鄂尔多斯盆地的古老基底为下元古亚界和太古界的变质岩系, 考虑到它们经受强烈变质之后物理性质趋向均一, 将其视为单一材料。奥陶系的水平切面选在上马家沟组中部。模型介质的分布按实际岩相、岩性分布情况进行综合, 力学参数按表 1 给定。

表 1 古构造应力-应变场模拟选用的岩石力学参数^[12]

力学参数	E/MPa	μ	C_i/MPa	$\varphi_i/(^{\circ})$	Cr/MPa	$\varphi_r/(^{\circ})$	$\rho/10^5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	R_t/MPa
盆地基底	54 300	0. 216 5	1. 3	38	0. 6	35	0. 031	8
白云岩	46 500	0. 252 5	0. 9	34	0. 4	34	0. 027	6
泥岩、基底岩石	45 000	0. 252 2	0. 7	36	0. 3	25	0. 024	5
石膏白云岩灰岩互层	40 000	0. 280 0	0. 5	37	0. 2	33	0. 029	4
白云岩、灰岩互层	45 100	0. 251 9	1. 0	35	0. 4	34	0. 027	6
灰 岩	44 900	0. 251 3	1. 1	37	0. 4	33	0. 027	7
膏 岩	35 000	0. 270 0	0. 8	36	0. 3	34	0. 028	4
砂 岩	37 400	0. 244 3	1. 5	40	0. 5	35	0. 027	8
泥 岩	20 000	0. 282 2	0. 6	31	0. 15	30	0. 025	5
砂岩、泥岩互层	30 000	0. 250 0	1. 0	35	0. 3	20	0. 026	7
砂、泥、煤互层	25 000	0. 255 0	0. 8	37	0. 25	32	0. 025	6

垂向剖面: 为了解早燕山期天然气运移时盖层在垂向上的构造应力、应变状态, 选择了一条从盆地西南的平凉开始, 向东北过中部大气田到绥德的大剖面来实施模拟。该剖面模型介质的分布按实际岩相、岩性分布情况而定, 各项力学参数也按表 1 给定。

3. 1. 2 边界条件的拟定

基底及盖层水平切面模拟模型的边界, 南、北和西均以推测的燕山期大盆地的边缘断裂来近似代替, 东部暂以推测的上三叠统沉积边界——黄河为界, 对其形态都作了适当简化。模型涉及的范围与上述盖层顶面高程图和地层原始厚度图相比, 东部和北部一致, 而南部和西部分别扩大至秦岭山前大断裂和阿拉善地块边界断裂。边界位移约束点尽量选择在远离油、气分布的地方, 尽可能地用边界的抵抗力来代替位移约束, 并且令边界约束点在 X 或 Y 方向的位移为 0。

剖面模拟模型的边界形态以寒武系—上三叠统沉积盖层的平衡剖面为准, 底边界为下元古亚界—太古界基底岩系顶面, 顶边界为上三叠统顶面, 西边界为推测的盆地西缘断裂, 东边界仍为黄河, 并对边界形态作了适当简化。剖面模型的边界位移约束点选择在底边上均匀分布, 仅在 Y 方向上令位移为 0, X 方向不加限制。

所有模型的外力均分解为边界结点上的 X 和 Y 方向点作用力。

3. 1. 3 有限单元的剖分

基底与盖层水平切面模拟模型采用三角形单元剖分, 共得 280 个单元, 161 个结点。剖面模拟模型用任意四边形单元剖分, 共得 279 个单元, 381 个结点。

3.2 模拟结果及地质解释

3.2.1 早燕山期

3.2.1.1 水平切面

基底 σ_3 迹线从盆地西侧向东略呈放射状撒开, 但大体上呈近东西走向, 其高值区位于盆地中部偏西地区(图 3a), 大致呈南北走向。这些情况与盆地侏罗纪基底的沉降中心和沉降轴的位置、走向及形态特征都吻合, 与整个侏罗系的厚度变化特征也相符合。奥陶系水平切面的这期应力-应变场特征与基底相比, σ_3 迹线基本相似, 也从盆地西侧向东略呈放射状撒开, 总体上仍呈近东西走向, 但 σ_3 等值线图与基底差别较大, 应力集中区主要位于盆地西部边缘和西北边缘。在盆地中部乌审旗-靖边-子长一带和绥德-宜川-铜川东部一带, 有两个 σ_3 低值区, 联合起来大致呈南北走向(图 3b)。这个 σ_3 低值区大致与奥陶系同期垂向应变高值区(图 3c)相对应, 也与前述盆地中部隆起及盆地中部及东部大气田的分布范围相符。 σ_3 低值区对早燕山期下、上古生界油气所起的聚集与封存作用, 是不应当忽视的。由于水平挤压应变及剪应变的高值区均集中于盆地西部, 那里褶皱和破裂必定十分强烈。奥陶系在那里埋藏过深, 不可能有油气前景, 但其上的三叠系和侏罗系, 具有相似的应力-应变特征, 可能找到有利的构造圈闭, 在塑性较强的泥岩中也可能找到裂缝型油、气藏。

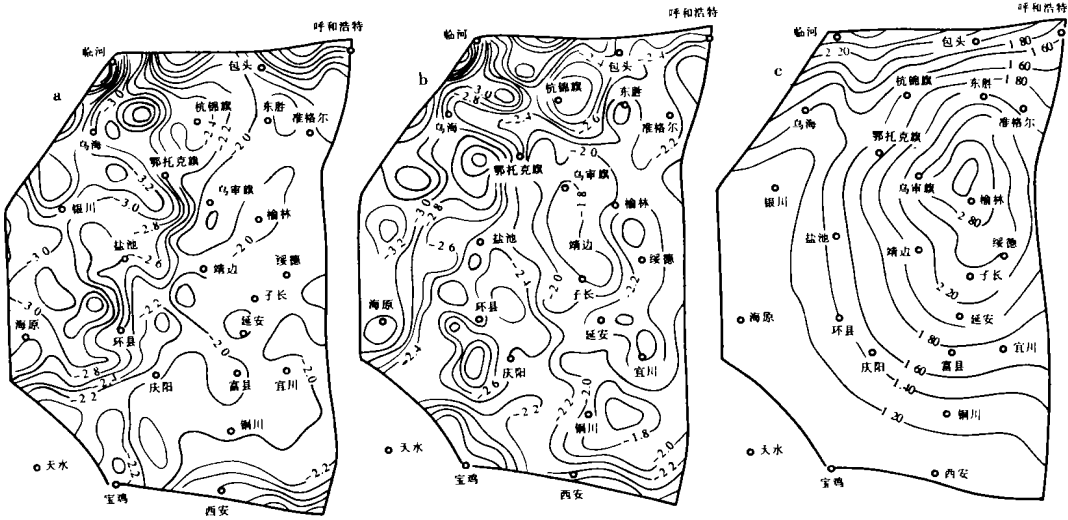


图 3 鄂尔多斯盆地早燕山期古构造应力、应变场水平切面模拟结果

a—盆地基底主压应力等值线图; b—奥陶系主压应力等值线图; c—奥陶系垂向应变等值线图

3.2.1.2 垂向剖面

几个模拟模型的受力和边界位移约束方案大同小异, 其计算结果较为一致。这些方案的受力方式均由盆地西南边界向东北挤压, 东北边界上或施加小的阻挡力, 或加上位移约束, 底边界通常是加上垂直方向位移约束或施加一小的向上顶托力; 上边界仅在一个方案中加了向下的点作用力, 用以模拟盖层的重力作用。模拟所得的 σ_3 迹线均为向西南倾的直线状, 分布较为均匀, 双轴均为压应力。在盆地中部相当于奥陶系的位置上和盆地东部相当于上古生界的位置上, 出现了 σ_3 和 σ_1 低值区(图 4)。这一情况与水平应力场特征相似, 都说明了中部奥陶系大气田和东部晚古生界大气田的出现不是偶然的。水平应力场和垂向应力场特征一致揭

程三次趋势剩余图揭示的中部隆起相似。这种情况的出现可以归结为,盆地中部奥陶系马家沟组厚层泥岩、膏盐及泥灰岩,在双轴挤压构造应力场中承受了最大的水平压缩,引起最大的垂向膨胀应变。这种垂向膨胀应变,不但导致加里东期侵蚀面附近产生大型平缓隆起,还造成盆地内部早白垩世的沉降基底呈两陷夹一隆的缓波状起伏。

在鄂尔多斯盆地中部的乌审-靖边-榆林一带,下古生界上部 and 上古生界的烃源岩目前正处于成熟到高成熟阶段,普遍具有高产气能力。在这种情况下,加里东期侵蚀面附近大型平缓隆起的持续发育,无疑是很有意义的。钻井资料测算结果表明,这个地区的奥陶系处于负压环境^[13]。这种负压环境的出现,很可能是低挤压应力与其他因素叠加作用的结果,它可能使这里成为天然气运移的指向区和油气聚集的封存箱。

4 几点认识

(1) 将各套地层的顶面高程趋势剩余与原始沉积厚度结合起来分析,亦即将各套地层的沉积期后构造变形与其自身沉积期的同沉积变形结合起来分析,是详细查明盆地构造的形成演化历程,判别该构造性质的有效方法。

(2) 将盆地同沉积变形史分析和区域大地构造史分析结合起来,拟定盆地各演化阶段的构造应力作用方式和方向,然后利用有限单元法进行平面和剖面模拟,可以有效地再造盆地各演化阶段的古构造应力场和应变场,并揭示其与天然气运移、聚集的关系。

(3) 加里东期侵蚀面附近确实存在着大型平缓隆起。它是燕山期古构造应力场控制下的奥陶系构造应变的结果,与那里奥陶系中的巨厚泥岩和膏盐岩产生塑性变形——垂向膨胀有直接联系。

(4) 盆地中部超大型天然气田的低压和负压环境,可能是构造应力场与其它因素叠加作用的结果。这种叠加作用使这里既成为天然气运移指向区,也成为天然气藏封存箱。因此,古构造应力场的控制,可能是盆地中部奥陶系顶面风化壳天然气藏形成的因素之一。

参 考 文 献

- 1 孙肇才,谢秋元,杨俊杰. 鄂尔多斯盆地——一个不稳定的克拉通内部叠合盆地的典型. 见:朱夏,徐旺编. 中国新生代沉积盆地. 北京:石油工业出版社,1990. 148~ 168
- 2 谢秋元. 鄂尔多斯盆地石油地质特征及今后找油方向. 见:地质矿产部石油地质研究所. 石油与天然气地质文集(3). 北京:地质出版社,1991. 75~ 92
- 3 Illies J H. Two stages Rhinegraben rifting. In: Ramberg I B, Neuman E R, ed. Tectonics and geophysics of continental rifts. Note advanced study institutes series. Dordrecht, Boston, London: Reidel, 1978. 63~ 71
- 4 马杏垣. 论伸展构造. 地球科学——武汉地质学院学报, 1982, 18(3): 18~ 22
- 5 吴冲龙. 阜新盆地古构造应力场研究. 地球科学——武汉地质学院学报, 1984, (2): 43~ 52
- 6 du Rouchet J. Stress fields, a key to oil migration. AAPG Bull, 1981, 65(1): 74~ 85
- 7 沈淑敏,郑芳芳,刘文英. 中国东南大陆边缘地区构造应力场特征与东海盆地油气运移规律. 见:中国地质科学院地质力学研究所. 中国地质科学院地质力学研究所刊,第12号. 北京:地质出版社,1989. 1~ 76
- 8 李平鲁. 珠江口盆地构造应力场与油气聚集. 广东地质, 1992, 7(4): 71~ 85
- 9 李定龙. 四川威远地区构造应力场模拟及阳新统裂缝分析. 石油勘探与开发, 1994, 21(3): 33~ 45
- 10 Maruyama S, Sakai H. Tectonics of Asia as a composite continent. Monograph Assoc Geol Collab Japan, 1986, (31): 487~ 518
- 11 王鸿祯,刘本培,李思田. 中国及邻区大地构造划分和构造发展阶段. 见:王鸿祯,杨森楠,刘本培编. 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉:中国地质大学出版社,1990. 3~ 34

- 12 水利部水电科学研究院. 岩石力学参数手册. 北京: 水利电力出版社, 1991
- 13 王少昌, 郝石生. 鄂尔多斯地区下古生界天然气分布特征及远景. 见:《天然气地质研究论文集》编委会主编. 天然气地质研究论文集(第 2 集). 北京: 石油工业出版社, 1989. 49~ 56

RELATIONSHIP BETWEEN PALEO-TECTONIC STRESS FIELDS AND MAJOR GAS FIELDS IN ORDOS BASIN

Wu Chonglong Zhou Jiangyu Wang Genfa Zhou Hui Zhang Qiongyan
(Resources Institute, China University of Geosciences, Wuhan)

Abstract

Residual trend surface analysis on elevation of stratigraphic top surface of prototype basins and the analysis on the geometry of corresponding sedimentary basements indicate that a large flat uplift close to the Caledonian erosional surface exists in the central Ordos Basin. Combining the analysis of syndepositional tectonic deformation in the basements with that of regional tectonic history, ways and directions of the tectonic stress in early and late Yenshan stages are determined. Then the tectonic stress field and strain field of the two stages are simulated by using finite element method, and their genetic relationships to the above-mentioned large flat uplift and big gas fields in the central Ordos Basin are studied. It is considered that vertical expansion of Early Paleozoic mudstone and gypsum-salt rock layers in compressional stress field might promote the formation of large flat structure trap close to the Caledonian erosional surface where the gas fields are situated. The superimposition of low compressional stress and other factors resulted in negative pressure environment, the central part of the basin became the accumulation area and container for natural gas.

