

伸展构造盆地的平衡剖面及其构造意义

——以松辽盆地南部为例

颜丹平^{1,2}, 田崇鲁³, 孟令波⁴, 张建增², 周美夫⁵

(1. 教育部岩石圈构造、深部过程及探测技术重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 石油大学地质科学系, 北京 102249; 4. 吉林油田勘探开发研究院, 吉林松原 138000; 5. 香港大学地球科学系, 香港)

摘要: 挤压构造的平衡地质剖面分析已经广泛应用于造山带构造分析, 但伸展构造区的平衡地质剖面分析实例仍然很少。运用盆地分析的技术与方法, 分层序或阶段将地质构造依次恢复、地层逐层回剥, 并通过在松辽盆地南部吉林两井油田扶余油层 4 条剖面的实践, 复原出不同时代盆地构造与地层发育的连续剖面, 揭示出松辽盆地南部主要构造样式是以浅表构造层次的负花状构造及深层剥离断层发育为特征; 断层生长指数、盆地的伸展史和伸展量等参数显示, 晚白垩世是构造转型的重要阶段, 此前主要为走滑构造样式形成阶段, 此后则主要为伸展滑脱构造发育阶段。在此基础上, 提出松辽盆地具有伸展—走滑双重力学构造性质, 可能是一个弧后构造盆地。

关键词: 平衡地质剖面; 伸展盆地; 构造变形史; 两井油田; 松辽盆地。

中图分类号: P54 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)03-0275-06

作者简介: 颜丹平(1964—), 男, 博士, 副教授, 主要从事构造地质学、盆地构造及构造地球化学的教学与研究。E-mail: yandp@cugb.edu.cn

平衡地质剖面是指可以把剖面上的变形构造通过几何学原则全部复原成合理的未变形状态的剖面。为了建立合理的地质横剖面, Dahlstrom^[1]和 Depaor^[2]等总结了 2 条原则: (1) 对在几何学上合理的横剖面, 在不间断的情况下, 其岩层的长度是一致的; (2) 在一个特定的地质环境下, 只可能存在一套特定的构造。平衡剖面要求剖面线平行于构造运动方向, 即垂直于构造带的走向, 其基本约束条件是变形前后物质的体积不变, 即“体积不变原则”, 在垂直构造走向的剖面上表现为“面积不变原则”。归纳起来即是, 如果一条构造剖面能够复原至未变形的状态, 那么它就是一条合理的地质横剖面。目前, 上述原则大多运用于挤压构造变形的定量研究以及在此基础上进行的构造复原实践中, 如: 在 Appalachians^[3,4]、Andes^[5]、Alps^[6,7]、天山^[8]、Pyrenean^[9]和喜马拉雅^[10]等造山带中绘制的平衡地质剖面及构造复原剖面, 不仅使造山带构造得到了合理而令人

信服的解释, 而且可以定量描述变形形成和发育过程。近年来, 利用深部地震资料绘制的平衡地质剖面则使其精度大大提高^[10,11]。

然而在伸展构造区, 特别是伸展构造盆地中, 地层与构造往往是同步发展的, 即在构造发生、发展的同时, 伴随着老地层的逐步埋藏和新地层的沉积。而且受区域性阶段性构造运动的影响, 盆地演化也显示出阶段性, 这又往往形成构造变形的叠加; 此外, 地层的压实作用与剥蚀作用也是张性盆地构造演化中普遍存在的问题。因此, 如何合理地、定量地对伸展盆地构造进行解析是盆地构造分析中的一个难点。目前, 这方面的研究尚处于探索之中^[12~14]。

笔者遵循盆地构造分析的基本思路, 运用盆地反演的技术与方法, 分层序或阶段将地质构造依次恢复、地层逐层回剥进行压实恢复。通过在松辽盆地南部吉林两井油田扶余油层 4 条剖面的实践, 复原出不同时代盆地构造变形与地层的连续剖面, 以此揭示松辽盆地南部主要含油层的演化过程与构造发展历史。通过计算断层生长指数、盆地的伸展史、断层滑脱深度等参数, 综合分析总结盆地基本构造样

式及发育演化的阶段。在此基础上,对松辽盆地构造性质及盆地构造类型进行了探讨。

1 地质背景

松辽盆地是在兴蒙造山带华力西造山作用基础上发育起来的,其主体成盆时期是从侏罗纪开始,并在早白垩世中期,形成了统一的“古松辽盆地”^[15]。

两井油田扶余油层位于松辽盆地南部中央坳陷带。经吉林两井油田钻孔揭示,钻遇地层自下而上有:白垩系泉头组三段、四段、青山口组、姚家组、嫩江组及第三系与第四系。两井油田泉头组四段扶余油层资料最为丰富,其顶面构造埋深 1 600~1 900 m,其构造总体面貌为向西南倾斜的斜坡区,构造倾角约为 3° ,并发育有向西南倾的让字井鼻状构造和北西、北东走向呈条状断块的首字井条状构造,并形成垒、堑相间的构造格局(图 1)。

油田基本特征是高角度正断层极为发育,断层延伸不远,约 3~5 km,长者 10~15 km,断距 20~60 m,一般 30 m 左右,以北北西向为主。断层在图 1 北段中部和南东区域分别构成复杂的断层聚合带,但在 2 个区之间形成明显的构造转换带,断层发育明显减少(图 1)。

2 两井油田平衡地质剖面与构造发育史剖面

2.1 岩石力学基本参数

为综合分析张性盆地的构造变形史、伸展史和沉降—埋藏史,必须从地层发育的角度对沉积地层进行压实恢复和剥蚀恢复。这首先需要获得沉积岩石的基本岩石力学参数,如杨氏模量、泊松比、平均密度、内聚力、内摩擦角和抗张强度等。

根据吉林两井油田地震解译、地质测井和钻井资料的综合资料成果^①,将区内主要地层划分为 K_2-Q 、 K_1 (嫩江组)、 K_y (姚家组)、 K_q (青山口组)、 K_q^4-I (泉四段 1 沙组)、 K_q^4-II (泉四段 2 沙组)、 K_q^4-III (泉四段 3 沙组)、 K_q^4-IV (泉四段 4 沙组)和下伏地层共 9 个层位。其中在泉四段 5 个层位中获得了系统的岩心样品,并在北京科技大学岩

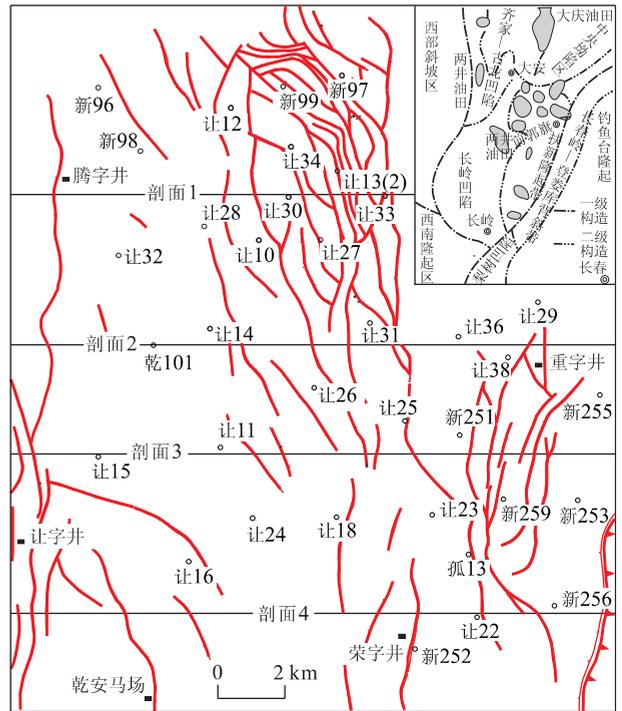


图 1 两井油田扶余油层顶面构造(右上角插图为松辽盆地南部构造略图,据①修改)

Fig. 1 Tectonic map on the peak surface of Fuyu oil-bearing layer in Liangjing area and a tectonic outline of southern Songliao basin in the insert

石力学实验室进行了岩石力学测试,获得了系统的岩石力学参数,其他层位岩石力学参数则根据吉林油田研究院有关沙泥岩比值计算获得,断层参数主要根据对吉林油田、辽河油田、胜利油田和中原油田等的综合研究实践基础而推断得出^②。由上述试验、计算和推断获得的所有岩石力学参数如表 1 所示。

2.2 平衡地质剖面与构造发育史剖面

运用中国地质大学(北京)和石油勘探开发科学研究院共同研制的盆地构造模拟软件(BSMD)^[16],对两井地区 4 条综合地质构造剖面(图 1)进行了平衡剖面解释,并分析和反演了构造发育史剖面(图 2)。这些构造剖面具有以下基本特征:

(1)扶余油层主要发育高角度正断层,断层有规律地组合成地堑—地垒构造样式。从平面上分析,断层发育极不均一。在图 1 北段中部及南东区域密集发育,断层延伸长度较大,而其他区域则表现规模小、发育程度低的特点。

在平衡地质剖面上,如果将上述断层向深部延

①吉林油田勘探开发研究院. 两井油田扶余油层(新增)石油探明储量报告,1997.

②田崇鲁,颜丹平. 低渗透致密储层裂缝精细描述技术及发育规律研究. 石油天然气总公司研究报告,2000.

表 1 各主要构造模拟层系岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters for the simulating beds

层系	E/MPa	泊松比 μ	$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	c/kPa	$\phi/(\text{°})$	F/MPa
K_2-Q	1.80	0.140	2.350	31.4	41.0	3.79
K_1	1.90	0.145	2.400	31.4	38.0	3.79
K_y	2.10	0.153	2.433	32.1	31.0	3.40
K_q	2.20	0.158	2.461	32.1	41.0	3.40
K_q^4-I	2.30	0.170	2.454	36.1	28.7	3.62
K_q^4-II	2.33	0.180	2.433	36.1	31.85	3.74
K_q^4-III	2.35	0.183	2.524	37.1	40.9	3.74
K_q^4-IV	2.38	0.184	2.524	37.1	30.8	3.62
下伏地层	2.41	0.215	2.590	36.5	40.0	3.68
断层	1.50	0.150				

主要岩性: K_2-Q . 松散的砂、砾; K_1 . 河湖相粉砂、泥岩; K_y . 泥岩夹粉砂岩; K_q . 粉砂与泥岩互层; K_q^4-I . 粉砂岩为主; K_q^4-II . 粉砂岩为主; K_q^4-III . 粉砂岩为主; K_q^4-IV . 粉砂岩为主; E . 杨氏模量; c . 内聚力; ϕ . 内摩擦角; F . 抗张强度; 资料来源: 泉头组四段为实测, 测试者: 北京科技大学王宝学等, 其他则根据油田研究院有关砂泥岩比值计算获得。

伸, 断层组合成一个清晰的负花状构造(图 2d 最为典型)。实际上, 由于扶余油层及其上覆和下伏地层深度有限(均在 2 000 m 左右, 图 1), 因此, 平衡地质剖面所勾绘的仅为这一负花状构造的顶部。由表 2 可知, 平衡地质剖面的拆离断层深度在 4.5~8 km, 说明上述断层产状变缓并构成构造滑脱的部位远在扶余油层之下, 上述断层密集区域为负花状构造的花心区; 但这一深度比长英质岩石脆-韧性过渡的 10~15 km 正常深度要小得多。根据油田勘探资料, 推测这是区内高地热流值作用的结果。

(2) 在图 2 平衡地质剖面建立基础上, 通过地层的逐层回剥, 获得了平衡剖面的构造发育史剖面(图 2), 并且获得了每条平衡地质剖面中各条断层的生

长指数。断层活动速率从扶余油层至上白垩统和第四系变化不大, 以上白垩统作为分割第四系与下伏地层的界面, 部分断层只在界面以下活动, 多数断层则表现长期活动特征。

(3) 由构造发育史剖面分析, 建立并计算获得了各主要层位的伸展量值(表 2)。晚白垩世及以后的伸展量在 205~360 m, 而此前的伸展量多在 50 m 以下, 二者相差 4 倍以上, 说明上白垩统界面上下断层活动强度有明显的不同, 晚白垩世前后是构造运动阶段的重要分界线, 并形成 2 个清晰的构造演化阶段。

(4) 对比表 2 中的伸展量值, 4 条平衡地质剖面中, 剖面 1, 3 和剖面 4(南北两端)伸展量值要大于剖面 2。显示这一地区(两井油田)伸展应变量大小的大致分布是南北两端变形强, 而中部变形相对较小一些; 相应地剖面 1, 3 和 4 断层位移量要大于剖面 2。特别是早白垩世以前, 这种变形趋势尤其显著。

(5) 局部地段存在构造反转。从表 2 中的数据还发现, 4 号剖面在青山口组沉积时期出现负伸展量值, 表明发生了构造反转现象。从地质上分析, 这是由两井油田东南部近南北走向的逆冲走滑断层作用, 并造成地层缩短所致。这说明两井所在的松辽盆地在白垩纪构造演化过程中, 不是一个单纯的伸展盆地, 而更可能是兼具走滑和伸展性质的双重力学性质构造盆地, 其收缩则应为局部应力场作用所形成。

3 问题讨论

松辽盆地被认为是典型的伸展构造盆地, 并在此原则指导下对其伸展构造变形样式及形成机制进

表 2 平衡地质剖面 1~4 的伸展量

Table 2 Extension measures of balanced sections 1-4

地层	剖面 1 层长/m	断层位移/m	剖面长度/m	伸展量值/m	剖面 2 层长/m	断层位移/m	剖面长度/m	伸展量值/m
K_2-Q	17 640.29	286.844 80	17 924.00	285.279 300	17 719.83	205.891 50	17 924.00	205.028 400
K_1	17 640.29	214.847 10	17 632.10	103.330 500	17 719.83	133.622 90	17 634.55	24.168 070
K_y	17 640.29	10.307 61	17 633.22	1.620 942	17 719.83	42.657 13	17 681.74	2.279 584
K_q	17 640.29	11.169 71	17 644.32	7.602 924	17 719.83	16.804 25	17 718.43	7.698 458
K_q^4	17 640.29	35.269 62	17 675.06	35.020 130	17 719.83	20.746 03	17 714.09	7.498 456
地层	剖面 3 层长/m	断层位移/m	剖面长度/m	伸展量值/m	剖面 4 层长/m	断层位移/m	剖面长度/m	伸展量值/m
K_2-Q	17 664.13	262.317 20	17 924.00	261.095 200	17 563.09	362.763 30	17 924.00	361.836 900
K_1	17 664.13	30.935 83	17 641.51	4.161 106	17 563.09	84.586 34	17 578.23	49.863 970
K_y	17 664.13	37.497 51	17 646.07	9.718 243	17 563.09	42.094 51	17 543.67	11.337 330
K_q	17 664.13	24.140 14	17 667.62	13.819 250	17 563.09	28.801 38	17 533.02	-0.635 750
K_q^4	17 664.13	22.542 92	17 691.16	24.786 300	17 563.09	24.022 64	17 553.08	7.006 591

拆离断层深度: 剖面 1~4 分别为 4 582.95, 7 190.94, 7 296.37, 7 828.97 m。