

苏北第三系成熟演化指标 与深度关系的 3 种模式

陈安定

(中国石化 江苏油田分公司 地质科学研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 在苏北盆地下第三系, 4 项成熟演化参数 (R_o 、甾烷成熟指标 SM 、蒙脱石层间比 S 、裂变径迹) 与深度呈由浅变深的平行线分布关系。分析认为, 这些样品分别产生于不同的构造- 沉积埋藏史背景, 浅的代表构造抬升型, 最深的代表短时加温型, 次深的代表长时加温型。3 种模式的建立为构造抬升地区恢复地层剥蚀量提供了可选择的依据。

关键词: 剥蚀量; 构造抬升; 时温模型; 成熟度; 苏北盆地

中图分类号: TE122. 1

文献标识码: A

近年来, 笔者曾就苏北下第三系源岩的“浅熟”及其形成背景、苏北箕状盆地构造抬升及盆地形成的动力学机制等进行过阐述^[1-4], 指出第三纪晚期的构造抬升和“退化型埋藏史”是造成源岩“浅”熟的主要原因。浅熟的主要表现是相同的热演化指标对应深度偏浅。浅熟主要出现在箕状凹陷的外斜坡和凸起等构造部位, 深凹和内斜坡处的源岩成熟门限深度仍然是正常的。苏北盆地还存在着另一种地球化学现象——盆地东部盐城、海安凹陷深凹的源岩相对西部高邮、金湖凹陷的深凹源岩来说, 同样的热演化指标所对应的深度明显偏大。前面的差别出现在同一凹陷或不同凹陷的不同构造单元之间, 后面的差别出现在苏北东部和西部不同凹陷的深凹之间。研究表明, 热演化指标对应深度的偏浅、偏深、适中 3 种分布, 分别对应了“构造抬升”、“短时加温”和“长时加温”3 种埋藏史类型, 这 3 种埋藏史类型在其它盆地也是广泛存在的。

地质背景是一切地球化学现象的根源, 3 种类型的出现主要和本区早第三纪晚期的构造抬升史、沉降史有密切关系, 关于这一点已有文章阐述, 在此不作重复^[3,4]。本文着重展示深度- 热演化指标 3 种分布模式的地球化学资料, 以及在恢复地层剥蚀量上的应用。

1 热演化指标原理

多年来的研究证实, 镜质体反射率、甾烷热演化

参数、粘土矿物、裂变径迹等热成熟度指标或热演化参数的增长均符合化学动力学反应方程, 取决于温度、时间两项主要因素。

1.1 温度因素

温度是引起热成熟度指标变化的第一因素。镜质体反射率 R_o 、甾烷成熟指标 $SM = C_{29} - 20S / (20S + 20R)$, 简称 SM , 随埋深增加而变大, 具不可逆性。不过, 后者只适用于 $R_o < 1\%$ 的低熟阶段和偏腐泥的泥岩干酪根。

地表沉积时形成的蒙脱石, 转入地下埋藏后向伊/蒙混层矿物转变, 随后通过伊/蒙混层中蒙脱石层的不断减少, 逐步向伊利石、高度结晶化伊利石转变, 这同样是一个不可逆演化过程。但是, 如果重新抬升到地表接受风化淋滤则可出现“返祖”现象(有实际资料证明)。

裂变径迹是矿物中所含铀放射性元素在裂变过程中对矿物晶体产生的辐射伤痕。此伤痕经化学腐蚀扩大为“刻槽”后可在显微镜下统计出密度、长度。裂变径迹密度除了和铀含量有关外, 主要和冷却时间有关。裂变径迹遇热将“退火”消失或变短, 遇冷又重新显现, 表现出独特的“生、灭可逆”性质。沉积盆地地热史重建和构造抬升研究主要利用了它的“退火”效应^[5]。

1.2 时间因素

时间是引起热成熟度指标变化的第二因素。例如, 采用室内短时加温的方法, 至 300~ 350 °C 时才能使源岩 R_o 达到 1% 左右, 在自然条件下达到这一

成熟度所需温度仅 120℃左右。Hoffman、Hower (1979) 和 Pollastro(1990) 曾总结粘土矿物演变的两种模式^[6], 通常情况下, 当伊/蒙混层从无序转向有序、蒙脱石层间比(S)下降为 20% 时所对应的温度为 100~110℃, 但短时加温所对应的温度为 120~140℃。王庆隆等(1992) 曾总结我国部分盆地的磷灰石裂变径迹部分退火温度带范围, 指出裂变径迹仍存在时间-温度的互补效应^[7], 长时加温模式对应温度带范围为 65~110℃, 短时加温模式对应 79~138℃。所谓短时加温, 一般是指晚第三纪至第四纪有大幅度沉降, 此后未发生抬升, 并属于今埋深(最大埋深)的地区。

除了上述 2 种情况而外, 第 3 种情况是构造抬升引起今埋深小于古埋深, 同样的指标值对应深度大大偏浅, 甚至到了地表。下面以实际资料展示这 3 种不同类型。

2 四项指标与深度关系的 3 种模式

2.1 R_o 与深度的关系

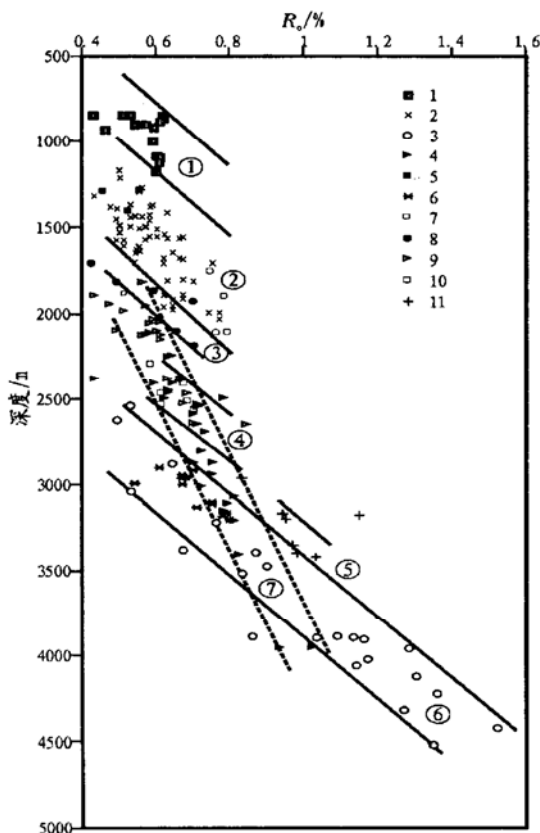


图 1 苏北盆地第三系 R_o -深度关系图

1. 洪泽西斜坡; 2. 金湖西斜坡、卞闵杨; 3. 花 2 井—真 86 井;
 4. 盐参 1 井; 5. 铁 1 井; 6. 河参 1 井; 7. 黄珏(7, 12); 8. 单 1 井;
 9. 洪泽深凹; 10. 沙埝; 11. 黄珏(11, 20)
- 洪泽西斜坡; ④金湖西斜坡、卞闵杨等;
④单 1 井; 沙埝; 黄珏(11, 20);
河参 1 井、花 2 井—真 86 井; ⑧盐参 1 井、洪泽深凹

Fig. 1 The relation of R_o to depth in northern Jiangsu Basin

苏北盆地下第三系(包括上白垩统泰州组)深度- R_o 关系见图 1。如图所示, 除洪泽深凹和盐参 1 井 R_o -深度关系表现为独特的“低斜率”外, 其余均表现为相近的变化斜率, 但相同 R_o 对应深度大不相同。其中, 从构造位置上看属于箕状凹陷外斜坡或隆起的洪泽西斜坡、金湖西斜坡、卞闵杨隆起、高邮北斜坡沙埝地区等均反映出深度偏浅现象。河参 1 井(金湖凹陷), 花 2 井、真 86 井(高邮凹陷)这 3 口井位于凹陷内斜坡和深凹带, 与斜坡、隆起的样品相比, 相同指标对应深度较大。当 R_o 均为 0.68% 时, 各地对应的深度大不一样(表 1)。据分析, 洪泽深凹地温梯度偏低可能与阜宁组大段含盐有关; 盐参 1 井(苏北盆地东部盐城凹陷)反射率梯度偏低可能与大幅度沉降时间较晚(中、上新世)有关。

2.2 SM 与深度的关系

甾烷成熟参数 SM 与深度关系见图 2。如图所示, 它与 R_o -深度关系曲线的总体情况一致。样品明显分为 3 种类型: 盐城 1 井、盐参 1 井为一类; 高邮深凹、金湖深凹为另一类; 洪泽凹陷及斜坡、金湖

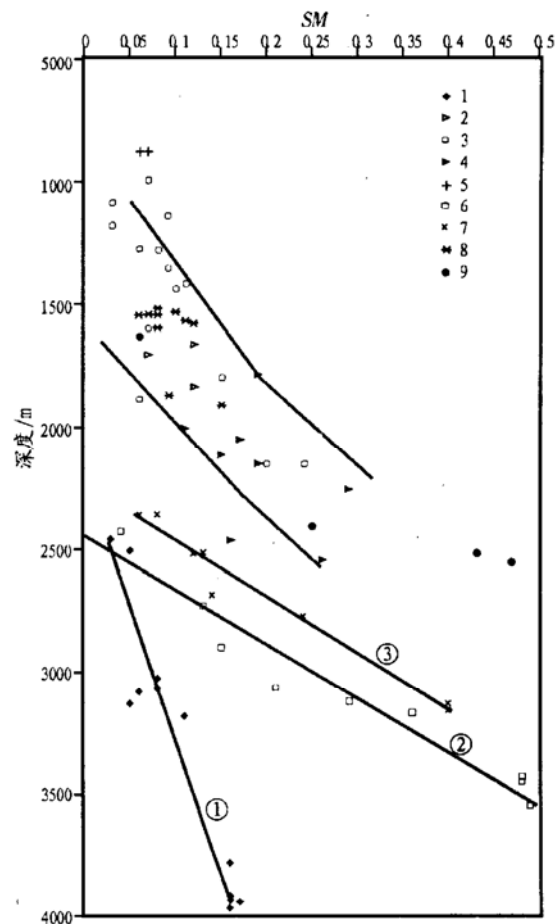


图 2 苏北盆地第三系 SM-深度关系图

1. 盐参 1 井、盐城 1 井; 2. 高邮北斜坡码头、韦庄;
3. 金湖西斜坡; 4. 洪泽深凹; 5. 洪泽斜坡;
6. 高邮深凹; 7. 金湖深凹、内斜坡; 8. 卞闵杨隆起; 9. 马家嘴盐参 1 井、盐城 1 井; ④高邮深凹; ④金湖深凹、内斜坡

Fig. 2 The relation of $\alpha\alpha C_{29}S/(S+R)$ to depth in northern Jiangsu Basin

表1 当 R_o 为 0.68% 时在各地区所对应的深度

Table 1 The corresponding depth as $R_o = 0.68\%$ in different regions

地区、井号	对应深度/m
洪泽凹陷西斜坡	1 200(趋势外延)
金湖西斜坡、卞闵杨、沙埝、黄珏断阶带	1 700
柘垛单1、李1-吕1	2 100
洪泽深凹	2 500
马家嘴、联盟庄	2 600
黄珏、雷1井	2 750
河参1	2 950
花2	3 180

表2 当 SM 为 0.15 时各地所对应的深度

Table 2 The corresponding depth as $SM = 0.15$ in variable regions

地区、井号	对应深度/m
洪泽西斜坡	1 200(趋势外延)
金湖西斜坡	1 600
塔集、卞东、码头庄	1 750
韦庄	1 900
洪泽深凹	2 000~ 2 100
应3、单1、沙8	2 300
唐港、安1、河参1	2 550
花庄、真武、曹庄、安16	2 800
盐城1、盐参1	3 800

西斜坡和卞闵杨、高邮北斜坡等属第三类, 3 种类型相同 SM 值对应深度逐渐变浅(表 2)。盐城凹陷样品不仅对应深度大, 而且变化斜率小, 但这里的实测地温梯度与高邮、金湖无太大差异, 它们的共同特点是上第三系地温梯度偏低, 分析可能与上部地层存在水交替有关。

2.3 磷灰石裂变径迹年龄与深度的关系

磷灰石裂变径迹年龄-深度关系见图 3。据资料判断, 盐参 1 井磷灰石裂变径迹“部分退火带”上界为 2 600m、92℃, 下界约为 3 800m、128℃。同为盆地东部的海安凹陷梁垛油田磷灰石裂变径迹部分退火带上界为 2 250m、81.5℃, 下界延长线至 4 000 m、134℃。这两个剖面指示的温度均相似于“短时加温模式”, 实际也符合它们的晚期大幅沉降背景。处于洪泽、高邮、金湖 3 个凹陷斜坡、隆起、凸起上的样品, 以及出露地表的仪征小河口剖面下第三系至泰州组样品全部落在“标准长时加温模式”曲线(虚点线)的上方, 显示了“构造抬升”的成因属性, 大部分第三系样品的部分退火带下界深度指向 2 000~ 2 300m。当然, 要说明它们具有构造抬升特性, 首先要证明它们曾经受过“退火”, 要证明退火, 其径迹年龄必须小于地层年龄, 以上样品均符合这一要求。

图中另有苏北滨海地区滨 iv- 10 井石炭系和滨 iv - 4 井二叠系属于更典型的构造抬升参照样品。滨海地区石炭、二叠系源岩成熟度已达到 R_o 为 1.6% ~ 2.3% 的高一过熟阶段, 但今埋深仅 500~ 1 000m 深, 这显然是后期抬升所造成的。据两个剖面的裂变径迹长度(全长)和年龄资料判断, 该地区最晚一期大幅度抬升的时间为 38~ 15Ma, 对应于渐新世-中新世, 地震资料对该地区三垛事件强抬升给予了验证。

2.4 粘土与深度的关系

一共搜集了本区近 30 口井的粘土资料, 其中部分剖面或组合剖面(按相同构造单元相邻井原则组合)的粘土资料见图 4, 各剖面蒙脱石层间比(S)下降为 20% 的界线见图 5、6。如图所示, 每个剖面的 I/S 混层矿物中蒙脱石层间比均表现为一种向下变小的趋势(伊利石层逐渐增加)。当蒙脱石层间比(S)下降为 20% 时各地对应的深度不一样, 其总体面貌与以上两项资料一致, 即各凹陷斜坡处粘土矿物界线上浮变浅, 深凹处界线下沉变深。盐参 1 井界线深度最大, 为 4 200m; 花 2 井其次, 为 3 500m; 联盟庄联12、金湖深凹河参1井、黄珏油田黄20井

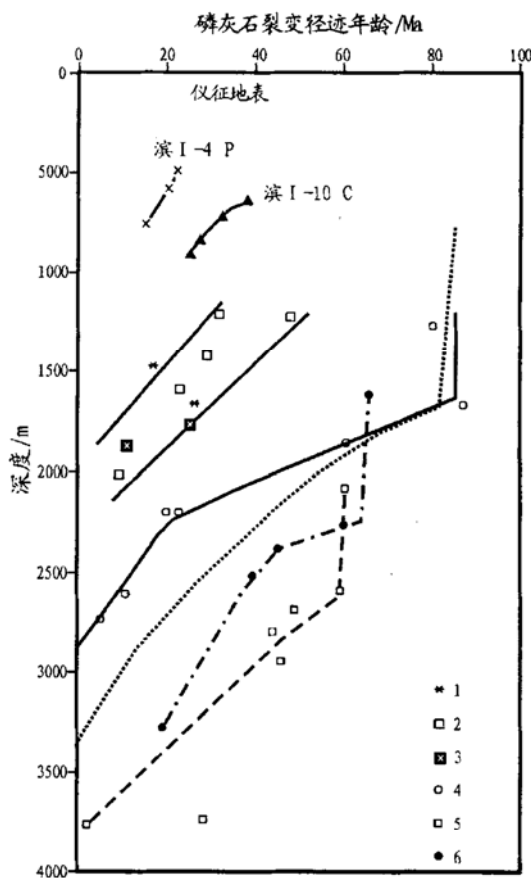


图3 苏北盆地磷灰石裂变径迹年龄-深度关系图

- 1. 吴堡低凸起(E_f-K₂t); 2. 金湖西斜坡(E_f); 3. 陈堡油田(E_f);
- 4. 柘垛凸起(E-K₂p); 5. 盐参1井(E); 6. 梁垛油田(E-K₂t)

Fig. 3 The relation of apatite fission track age to depth, in Tertiary of the northern Jiangsu Basin

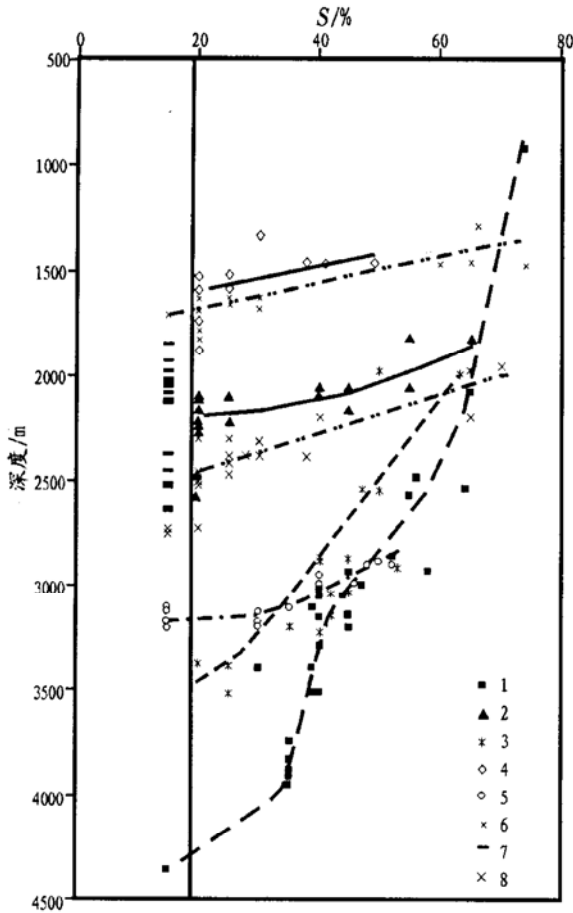


图 4 苏北盆地部分剖面第三系 S-深度关系图

- 1. 盐参 1 井; 2. 洪泽兴隆 1 井; 3. 高邮花庄; 4. 金湖杨庄;
- 5. 金湖深凹; 6. 高邮码头庄; 7. 洪泽顺 1 井; 8. 高邮沙埭

Fig. 4 The relation of S to depth in northern Jiangsu Basin

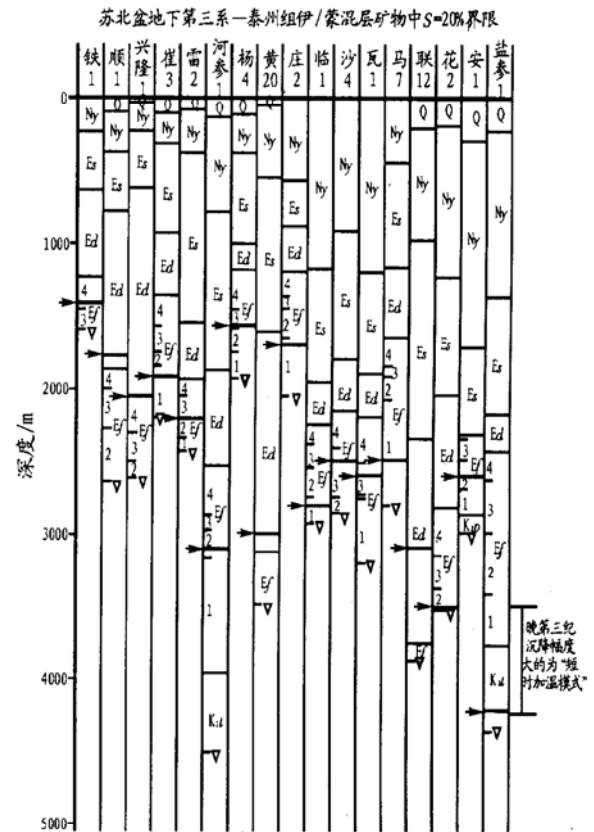


图 5 苏北盆地第三系部分剖面 S=20% 时的深度

Fig. 5 The depth as S=20% in Tertiary of the northern Jiangsu Basin

为 3 000~ 3 100m; 高邮北斜坡沙 4 井、马 7 井等为 2 500~ 2 600m, 庄 2 井 1 700m; 金湖凹陷内斜坡雷 2 井 2 000m, 西斜坡崔 3 井 1 900m, 卞闵杨隆起杨 4 井为 1 560m; 洪泽凹陷深凹兴隆 1 井、顺 1 井、斜坡处铁 1 井分别为 2 100m、1 760m、1 400m 等。总的规律是斜坡处浅、深凹处深, 东部盐参 1 井最深, 而且大部分界线均不在地层界面上。

2.5 3 种典型模式

图 7 是将实际资料简化的 3 种关系类型。尽管 4 项指标的原理各不同, 但在反映“不等深等熟、不等深等温(古地温)”这一点上却惊人地一致。这说明它们所反映的现象绝非偶然巧合, 而是代表了 3 种不同地质背景下的深度-地球化学指标分布模式:

a) 短时加温模式: 构造背景属于“晚期大幅沉降类型”。以盐参 1 井最具代表性, 实际包括盆地东部盐城、白驹、海安的深凹区, 其特点是“进化型(虽有抬升, 但终究被后期深埋所掩盖)”埋藏史。早第三纪沉降幅度小、晚第三纪-第四纪沉降幅度大。由于后期加温时间短, 其成熟演化参数在一定程度上仍停留在早第三纪时期留下的“脚印”上。

b) 长时加温模式: 构造背景属于“早期沉降类型”。以河参 1 井剖面为代表, 包括黄珏油田黄 20

与河参 1 井剖面相对照求得的 Es 末地层削蚀厚度 (Ng 主地面高度)

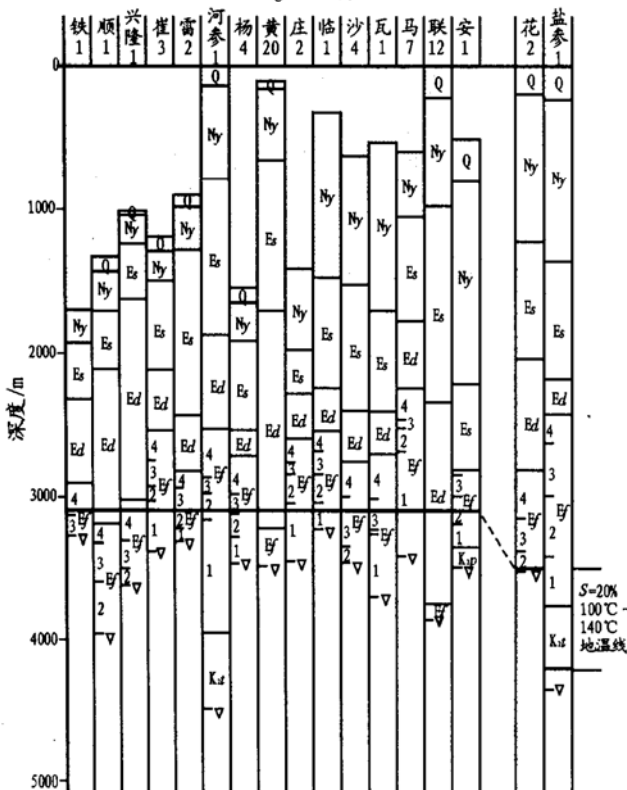


图 6 与河参 1 井 S 深度线拉平后求得的 Es 地层剥蚀厚度

Fig. 6 The erosion thickness of Es calculated by leveling their depths as S=20% in well Hecan 1

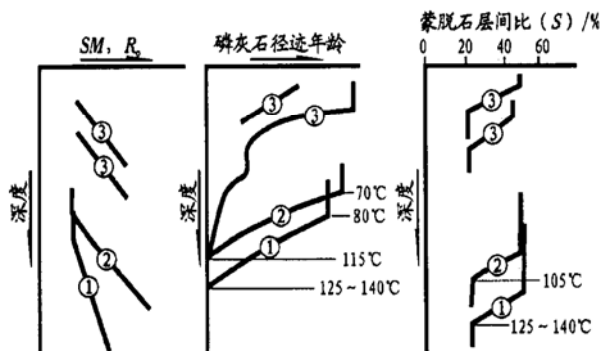


图 7 4 项地化指标、3 种典型模式的深度- 指标变化关系图
短时加温模式; ④长时加温模式; ③构造抬升模式

Fig. 7 Three types of relation of four maturity indexes (R_o , sterane parameter $\alpha\alpha C_{29} - S / (S + R)$, ratio of mixed layer illite/smectite, fission track) to depth

井剖面、联盟庄联 12 井剖面等高邮深凹边缘地带剖面。据推测, 这些剖面在早第三纪埋深较大, 抬升后补偿厚度相当, 现埋深与早第三纪末差别不大, 现今成熟度主要在早第三纪末定型, 后期增熟幅度不大。

c) 构造抬升模式: 以洪泽、金湖、高邮三个凹陷的斜坡和隆起为代表, 成熟度、古地温与现今埋深明显不相匹配, 这些剖面属于“古大于今”埋深的“退化型(V 字形)”埋藏史剖面。现今成熟度主要在最大埋深期——推断在始新世末形成。

3 求取“绝对剥蚀量”

以上 3 种类型的关系曲线显示, 长时加温模式的指标对应深度相对适中, 短时加温模式表现为深度“下沉”, 构造抬升模式表现为界线深度“上浮”。要恢复构造抬升样品的最大古埋深, 势必要选择一种与被恢复样品相近的埋藏史类型, 据地质分析, “长时加温模式”作为古埋深恢复的基准线是较为合适的。

应用 R_o 、 SM 指标恢复古埋深时, 从图中样品本身的指标- 深度关系线向下量出和“基准”关系线

表 3 多种方法推测早第三纪末地层绝对剥蚀厚度

Table 3 The stratum erosion thickness in the end of Tertiary calculated by several methods

凹陷名称	构造单元	地区	SM 法		粘土法		裂变径迹法		R _o 法		推荐采用厚度/m		
			井号	剥蚀厚度/m	平均厚/m	井号	剥蚀厚度/m	平均厚/m	井号	剥蚀量/m			
洪泽	斜坡	外带	管 1	1 690	1 755	铁 1	1 947	1 947	管 1	1 219	铁 1	1 650	1 900
			郑场 1	1 820									
	深凹	顺河次凹	顺 1	835	806.5	顺 1	1 630	1 429		950	900		
		兴隆次凹	兴隆 1	778		兴隆 1	1 228						
金湖	西斜坡	外带	南 1 等	736~1 575	1 277			旺 1	1 264				
			崔庄	814~774	794	1 514			1 700	1 500			
		刘庄	1 560~1 445	1 503			1 386						
	内斜坡				雷 2	1 286		820	1 000				
	深凹				河参 1	770			800				
	卞闵杨隆起	闵桥塔集		1 230~1 079	1 158					1 700	1 500		
高邮	北斜坡	大仪集	卞东	1 522				1 295					
			杨家坝			1 941.5							
	南斜坡	大仪集	大 1	1 378				1 378		1400			
			黄珏			黄 20	654		黄 7、11	1 950	1 900		
		黄珏	黄 7、11	1 950				黄 12、20	940	900			
			码头庄	1 522				1 197	2 000	1 800			
			韦庄	1 315						1 500			
			联盟庄	1 049			980		1 200	1 200			
	南斜坡	马家嘴	沙埝	1 025			1 109		1 500	1 500			
			沙埝	1 072			1 513.5			1 600			
柘垛			1 460										
柘垛			1 460										
吴堡低凸起	陈堡						1 984~2 317		1 800~2 000				
		宋家埭					1 948~2 407		1 800~2 200				

之间的垂向距离,即为古今埋深差,而古今埋深差加盐城组、第四系厚度即为三垛组剥蚀厚度。

粘土法求取三垛组剥蚀厚度时,将构造抬升剖面的 $S = 20\%$ 界线与长时模式剖面的这一界线对齐(3 100m),各剖面三垛组地层顶界至地面所代表的厚度即为三垛组地层剥蚀厚度,如图 6。

裂变径迹法求取剥蚀量时,以 70~ 115 °C 标准窗口温度勾画的磷灰石径迹年龄-深度关系线为基准线(图 3 中虚点线)。首先选择出径迹年龄小于地层年龄的样品(如大于则说明它从未埋藏至“退火”温度线以下),然后将样品点垂直下落至基准线上,两者垂直距离即为古今埋深差,古今埋深差加盐城组、第四系厚度即为三垛组地层剥蚀厚度。宏观上判断它曾经受多高的退火温度则看它的径迹长度,如为 14 μ m 左右全长,说明它曾经受 > 115 °C 完全退火;如为 < 14 μ m 半长,说明经受的是 70~ 115 °C 部分退火带退火。

对经受部分退火带退火的样品,求取最高古地温时,还有一种近似算法为:

$$T(^\circ\text{C}) = 70(^\circ\text{C}) + 45(^\circ\text{C}) \times (1 - AP/D)$$

式中: AP 为磷灰石径迹年龄; D 为母岩年龄或地层年龄。

应指出的是,使用裂变径迹法推算的古地温一般来说都偏低。因为现今测定的径迹年龄应包括经部分退火残留的径迹年龄(此年龄与温度密切相关)和抬升后新累积的年龄两部分。按理应将后一部分

年龄减去,但当测定样品不能构成完整剖面(样品点少)时,尚不易确定出新累积年龄而未能减掉,所以,根据实测年龄计算的古地温一般来说是偏低的。

4 种地化方法求取的早第三纪末地层剥蚀厚度见表 3,由于各种方法原理不同,干扰因素不一,求出的剥蚀厚度不尽一致,在某些剖面上也有相近的。表中同时给出推荐使用的剥蚀量数据,这里的剥蚀量为“绝对剥蚀量”。根据 E_s 残留厚度与 E_s 绝对剥蚀量相加的结果, E_s 原始沉积厚度一般都在 2 000m 左右。深凹带将参照此厚度“设定”剥蚀量(因本区缺失渐新世地层,深凹带必然也接受剥蚀),高邮深凹约 700m,金湖深凹约 800m,洪泽深凹如表所示——约 900~ 1 000m。

参考文献:

- [1] 陈安定. 苏北下第三系源岩“浅”熟的构造背景[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(4): 6- 10.
- [2] 陈安定. “未熟油”与“未熟生烃”异议[J]. 地质论评, 1998, 44(5): 470- 477.
- [3] 陈安定. 苏北箕状断陷形成的动力学机制[J]. 高校地质学报, 2001, 7(4): 408- 418.
- [4] 陈安定. 苏北盆地第三纪构造抬升的地震地层证据及相对剥蚀量[J]. 小型油气藏, 2002, 7(4): 4- 9.
- [5] Naser. Thermal history of sedimentary basins: fission track dating of subsurface rocks[J]. SEPM, 1979, 26: 109- 112.
- [6] Pollastro. Considerations and applications of the illite/smectite geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of Miocene to Mississippian age[J]. Clay and Clay Minerals, 1993, 41(2): 119- 135.
- [7] 周中毅, 潘长春, 等. 沉积盆地古地温测定方法及其应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 1992.

THREE MODELS OF RELATIONSHIP BETWEEN THE MATURITY INDEXES AND THE DEPTH IN THE NORTHERN JIANGSU TERTIARY BASIN

CHEN An-ding

(Geological Research Institute, JOECO, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: The relationship between the four maturity indexes (R_o , sterane parameter $\alpha\alpha\alpha C_{29} - S/(S + R)$, mixed layer of illite/smectite and fission track) and the depth in the northern Jiangsu Tertiary Basin showed a parallel distribution from shallow to deep. The samples for study were from different sedimentary and structural settings with variable bury history. The shallow one represented structural uplift, the deepest one underwent short time heating, and the medium was long time heating type. It provided optional bases for estimation of erosion thickness in uplift areas.

Key words: erosion thickness; structural uplift; time-temperature model; maturity; northern Jiangsu Basin