

文章编号: 0253-9985(2009)05-0608-11

中国南方高演化海相层系的古温标

秦建中, 李志明, 腾格尔

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

摘要: 通过对四川盆地东北部普光 5 井等 188 块钻井样品镜质体反射率 (VR_o) 等多项热演化分析数据, 并结合沉积演化史的综合研究, 认为: ① VR_o 或固体沥青反射率等效 BR_o 及伊利石结晶度等恢复的古地温可以作为良好的古温标, 它反映的是该地层在有效受热时间内所经历的最高地层温度, 古地温增高, VR_o 或等效 BR_o 呈指数增加, 有效受热时间越长, VR_o 或等效 BR_o 也相对增大; ② 流体包裹体均一温度是研究地层所经历古温度和成藏期次最直接的古温标, 其最高流体包裹体捕获或均一温度与 VR_o 等恢复的古地温相当, 基本上代表了最高古地温, 它还是成藏期次和不同时期热史恢复的有效指标; ③ 磷灰石和锆石等 (U-Th)/He 的封闭温度也可以作为古温标, 它与定年相配合可进行成盆和隆升造山的热史恢复; ④ 高演化海相层系可根据 VR_o 或等效 BR_o 、最高包裹体均一温度、伊利石结晶度、磷灰石及锆石等 (U-Th)/He 封闭温度年龄等技术恢复最大古埋深、古地温及热史研究。

关键词: 镜质体反射率; 包裹体均一温度; (U-Th)/He 封闭温度; 伊利石结晶度; 高演化海相层系; 中国南方

中图分类号: TE121.1 文献标识码: A

A study on palaeo-geothermometer of high mature marine sequences in South China

Qin Jianzhong Li Zhiming Teng Ge'er

(Wuxi Institute of Petroleum Geology SINOPEC Exploration & Production Research Institute Wuxi Jiangsu 214151, China)

Abstract: An integrated study is carried out by analyzing sedimentary and evolution history of the Sichuan Basin and various thermal evolution analytical data (such as vitrinite reflectance) of 188 core samples from Puguang-5 and other wells in northeastern Sichuan Basin. The results show that: 1) palaeogeothermal restored by using vitrinite reflectance (VR_o) or equivalent bitumen reflectance (BR_o) and illite crystallinity can be used as good palaeo-geothermometers. It represents the maximum temperature that the strata underwent during effective heating time. The VR_o or equivalent BR_o shows exponential increase with paleotemperature increasing. Moreover, they also relatively increase along with the increasing effective heating time; 2) homogenization temperature of fluid inclusion is the most direct palaeo-geothermometer for determination of paleotemperature and timing of hydrocarbon accumulation. The highest homogenization temperature of fluid inclusion is consistent with the paleotemperature recovered from vitrinite reflectance. It represents the highest palaeotemperature and is also an effective index for timing of hydrocarbon accumulation and reconstruction of thermal histories of various stages; 3) the closure temperature of apatite and zircon (U-Th)/He can also be used as geothermometer. Combined with dating, it can be applied to restore the thermal history of basin forming and orogenesis; 4) therefore, for high mature marine sequences, the maximum paleo-burial depth, palaeogeothermal and thermal history can be restored according to VR_o or equivalent BR_o , highest homogenization temperature of fluid inclusion, illite crystallinity and closure temperature of apatite and zircon (U-Th)/He combined with dating.

Key words: vitrinite reflectance; homogenization temperature of fluid inclusions; closure temperature of apatite and zircon (U-Th)/He; illite crystallinity; high mature sequence; South China

收稿日期: 2009-08-10

第一作者简介: 秦建中 (1957-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 油气地质。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2005CB422102)。

沉积盆地热演化史与油气生成、运移和聚集成藏有着十分密切的关系^[1~3]。古温标是目前恢复沉积盆地热历史最常用方法之一。我国南方古生代海相层系经历了多期隆升与沉降的演化历史,大都处于高、过成熟状态,由于其经历的热演化历史复杂,单一方法应用于叠合盆地高演化海相碳酸盐岩地区热演化历史恢复时,均存在着不同程度的缺陷^[4]。通过对四川盆地东北部普光5井等188块钻井样品的镜质体(及固体沥青)反射率、包裹体均一温度、伊利石结晶度以及磷灰石或锆石 $U/Th-He$ 封闭温度的分析与对比研究,旨在探索这些古温标在恢复南方高演化海相层系热史等方面的适用性。

1 古温标对比

1.1 镜质体反射率与固体沥青反射率的关系

国内外学者对固体沥青反射率(BR_o)与镜质体反射率(VR_o)的关系做了大量工作^[5~9],获得了二者之间不尽相同的换算公式,如具有代表性且常用的Jacob换算公式:

$$EqVR_o(\text{等效镜质体反射率}) = 0.618BR_o + 0.4 \quad (1)$$

但是固体沥青成因复杂,由于本身性质的区别、受热条件差异、岩石导热性能的不同以及受压力和应力的影响,均可使固体沥青光性结构发生变化,尤其是在不同地区, VR_o 与 BR_o 之间的关系是不同的^[10],即使是在同一岩层中,也常见光性不同的固体沥青共生在一起,可根据地区的实际地质条件和固体沥青的光学性质建立本地区的 VR_o 与 BR_o 换算公式。

文章对普光、毛坝气田(图1a)的 VR_o 与 BR_o 进行了较深入研究,对普光5井、毛坝3井等128块不同层位、深度、岩性的岩心和岩屑样品进行了镜质体反射率(VR_o)和固体沥青反射率(BR_o)分析(图1b),具有代表性样品列于表1中。镜下观察表明,其中的49块样品含有镜质组,分布在千佛崖组(J_2q)、自流井组(J_1z)、须家河组(T_3x)、龙潭组(P_2l)和凉山组(P_1l),镜质组反射率(VR_o)在0.97%~4.82%之间;79块样品中含有固体沥青,其反射率(BR_o)在1.41%~7.49%之间。固体沥

青主要是均质沥青和小球体沥青,小球体沥青具强的各向异性,主要分布在飞仙关组(T_1f)至长兴组(P_2c)储层白云岩中。

普光5井等镜质体反射率(VR_o)随着现今埋藏深度(D, m)的增加而呈半对数增大(图1b),其回归方程为:

$$D = 2886.5 \ln VR_o + 1242.1 \quad (R^2 = 0.9648) \quad (2)$$

固体沥青反射率(BR_o)随现今埋藏深度的变化趋势与 VR_o 是一致的,也随现今埋藏深度的增加而增大(图1b),即 BR_o 基本上与 VR_o 是等效的。但是, BR_o 与 VR_o 仍有较大差异。

1)一般同层段或深度的 BR_o 值变化范围要大得多,例如普光5井在现今埋深5000~5500m时, BR_o 值可变化在2%~7%之间。这主要是因为:①所测固体沥青颗粒类型不同。例如根据光性特征储层固体沥青可分为均质固体沥青、均匀长条状固体沥青、镶嵌结构固体沥青、小球体固体沥青、针状结构固体沥青、香肠状固体沥青、微粒状固体沥青。固体沥青反射率往往指的是均质固体沥青反射率、均匀长条状固体沥青(各向异性强, ΔBR_o 大于0.5%)、小球体固体沥青(具有强的各向异性, ΔBR_o 大于1.2%)。②固体沥青的各向异性。例如,普光2井 T_1f 白云岩小球体固体沥青 BR_o 最大值平均为4.69%,最小值仅平均2.84%。③成因类型的差异。例如,普光5井所测固体沥青存在有储层热裂解演化固体沥青(主要为 T_1f 、 P_2c 等)及烃源岩中原生及次生热裂解演化固体沥青(主要为 P_2l 、 T_3x — J 等)。④固体沥青化学成分的差异。由于TSR反应等的不均衡性,可使部分偏光显微镜下相对发白色的小球体状固体沥青含硫量和反射率偏高。

2)深度在2500~4000m的灰岩(T_2l)中的均质固体沥青的反射率明显大于相邻 T_3x 的镜质体反射率(2%~3%),但 BR_o 按Jacob公式换算的等效镜质体反射率($EqVR_o$)与实测 VR_o 接近。

因此, BR_o 要进行综合分析后才能用于等效镜质体反射率值的换算,具体地区、层段、岩性及热演化史具体分析和判断,不能用统一公式简单进行换算。

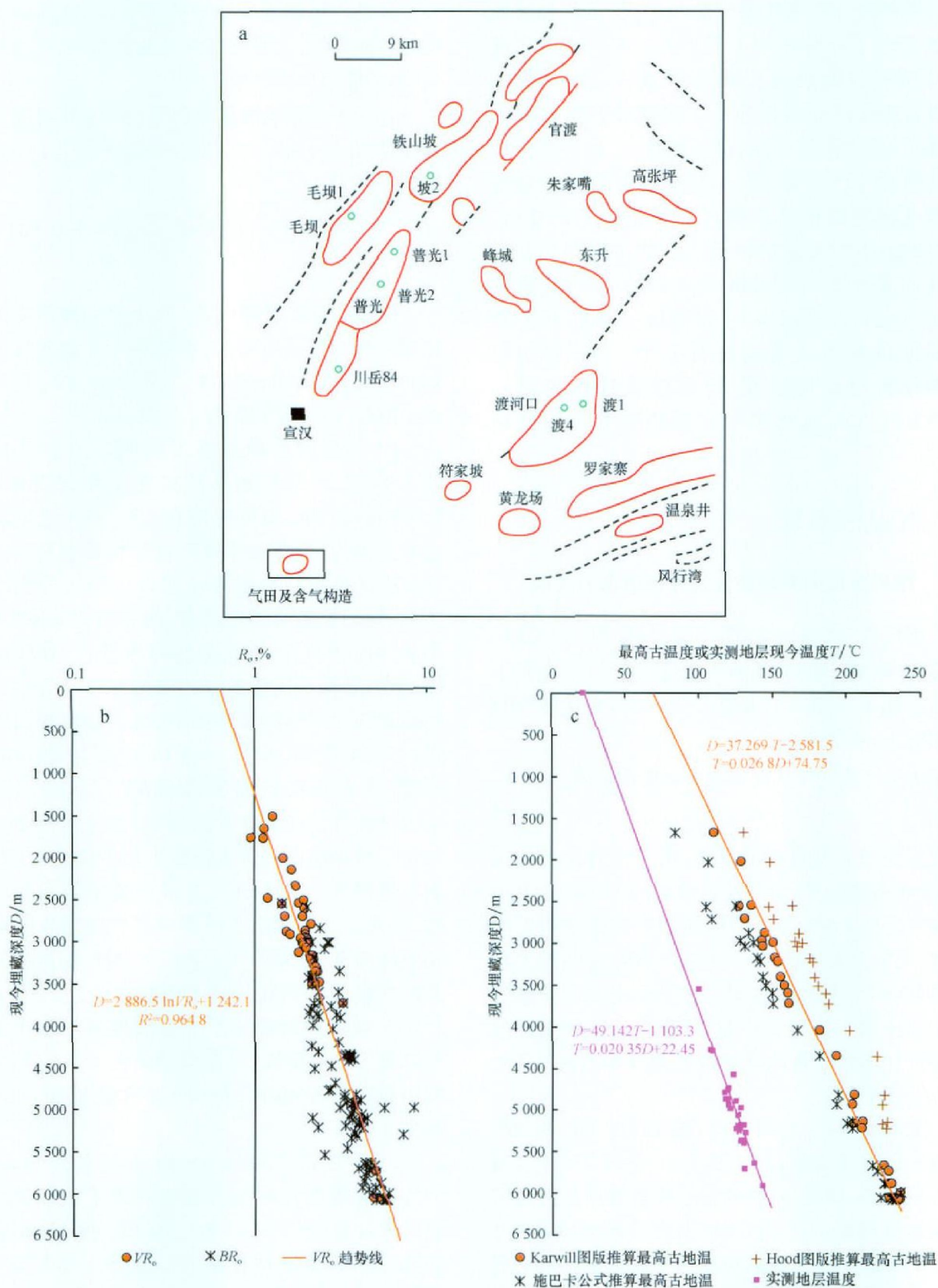


图 1 沉积有机质成熟度、温度与受热时间的 Karweil 图解

Fig. 1 Karweil diagram of maturity and temperature of organic matter vs. heating time

- a. 普光、毛坝气田位置; b. 镜质体反射率 (VR_o)、固体沥青反射率 (BR_o) 与现今埋藏深度 (D) 的关系;
c. 镜质体反射率 (或等值 BR_o) 实测值使用 3 种方法恢复的古地温及实测地层温度 (T)

表 1 川东北普光地区普光 5 井等代表性样品镜质体反射率 (或等值 BR_o) 实测值恢复的古地温

Table 1 Palaeogeothermal recovered from vitrinite reflectance or equivalent bitumen reflectance of representative samples from Puguang 5 and other wells in Puguang area of the northeastern Sichuan Basin

样品号	深度 /m	层位	岩性	镜质体 反射率 VR_o %	固体沥青 反射率 BR_o %	测点 数 /个	伊利石 结晶度 (IC)/($^{\circ}$)($\Delta 2\theta$)	Karwill图版 推算的最高 古地温 / $^{\circ}C$	施巴卡公式 推算的最高 古地温 / $^{\circ}C$	Hood图版 推算的最高 古地温 / $^{\circ}C$
MB3—84	1 676 ~1 679	$J_1 z$	浅灰细砂岩	1. 14		29		110	84	130
MB3—111	2 027 ~2 030	$J_1 z$	碳质页岩	1. 45		30		129	107	148
PG5—1—1	2 557. 37	$J_2 q$	泥岩	1. 75		27	0. 57	135	125	163
PG5—41	2 568 ~2 572	$J_2 q$	深灰色泥岩	1. 42		26		127	104	147
PG5—50	2 715 ~2 720	$J_1 z$	深灰色泥岩	1. 47		23		131	108	150
PG5—60	2 880	$J_1 z$	煤屑	1. 91		50		144	133	167
PG5—70	2 973 ~2 978	$T_3 x$	深灰色泥岩	1. 80		20		142	128	165
PG5—73	2 975 ~3 035	$T_3 x$	煤屑	1. 98		200		150	137	170
PG5—78	3 048 ~3 055	$T_3 x$	深灰色泥岩	1. 86		33		143	131	166
PG5—88	3 177	$T_3 x$	煤屑	2. 02		50		151	139	175
PG5—94	3 225 ~3 229	$T_3 x$	深灰色泥岩	2. 06		25		153	141	177
PG5—2—2	3 403. 96	$T_3 x$	煤线	2. 11		27		155	143	178
PG5—115	3 507. 50	$T_3 x$	泥岩	2. 15		50	0. 42	158	145	181
PG5—123	3 601 ~3 606	$T_2 l$	深灰色灰岩		2. 25	28		160	149	186
PG5—134	3 730 ~3 735	$T_2 l$	黑色泥云岩		2. 28	21	0. 42	161	150	188
MB3—258	4 050 ~4 053	$T_1 f$	浅灰色灰岩		2. 70	30	0. 41	182	167	202
MB3—13—2	4 355. 01	$P_2 c$	灰色白云岩		3. 15	24		193	182	220
PG2—4	4 828. 77	$T_1 f^3$	灰岩		3. 60	20		205	194	225
PG2—9	4 942. 46	$T_1 f^2$	灰岩		3. 55	25		204	193	224
PG5—5—1	5 146. 70	$P_2 c$	白云岩		3. 97	20		211	204	227
PG5—6—3	5 166. 30	$P_2 c$	白云岩		3. 80	8	0. 38	205	200	224
MB3—27—1	5 224. 76	$P_1 m$	深灰色灰岩		3. 95	10		210	204	226
PG5—284—2	5 669. 50	$P_2 l$	泥岩		4. 56	16		225	217	
PG5—291	5 737. 50	$P_2 l$	泥岩	4. 72		8		228	221	
PG5—10—3	5 883. 79	$P_1 m$	泥灰岩		4. 97	4	0. 36	229	226	
PG5—10—8	5 889. 30	$P_1 m$	泥灰岩		4. 92	4	0. 36	230	225	
PG5—316	6 002. 50	$P_1 q$	灰岩		5. 52	6		236	236	
PG5—321	6 059	$P_1 l$	煤屑	4. 82		50		228	223	
PG5—321	6 059	$P_1 l$	灰岩		5. 13	2		232	229	
PG5—11—3	6 071. 80	$C_2 h$	灰岩		5. 24	15		233	231	
PG5—11—4	6 076. 60	$S_{1-2} h$	灰岩		5. 30	12		235	232	
PG5—11—5	6 077. 20	$S_{1-2} h$	泥岩		5. 21	17	0. 35	234	230	

1. 2 最高古地温恢复

镜质体 (及固体沥青) 反射率与烃源岩有机质成熟度一样, 主要控制因素是所经历的最高古地温和有效古地温所持续的时间以及有机质类型、沉积、成岩环境、岩石类型等。温度和时间是控制镜质体 (及固体沥青) 反射率的两个最重要的动力学参数, 温度与时间在某种程度上存在相互补偿的关系, 即高温短时间的作用可产生与低温长时间的作用相似的结果, 即温度是主控因素, 时间起补偿作用。现今实测地温或地温梯度并不等于历史上的最高古地温或古地温梯度, 而后者对有机质的热演化或油气的生成或镜质体 (及固体沥青)

反射率比前者还要重要, 即历史上的最高古地温或古地温梯度及古埋藏深度是镜质体 (及固体沥青) 反射率的最重要控制因素。

应用 VR_o 恢复最高古地温 (或古地温梯度) 的方法或公式较多, 这里选用了常用的 3 种方法。

1) Karwill—Bostick 图解法, 它是利用温度— VR_o —有效恒温时间三者之间的关系来恢复最高古地温的, 这里的有效恒温时间不是说地质时代越老, 有效恒温时间就越长, 而是必须研究它的沉积构造发育史来大致推算古温度的有效恒温时间。从普光 5 井的沉积演化史来看, 有效恒温时间约 70 Ma $\pm$ 20 Ma 年, 在 J_3 末— K_1 时进入最高有效受热时间, 约在 40 Ma 年开始大量抬升剥蚀

逐渐脱离最高有效受热时间。其代表性样品实测 VR_o (或等效 BR_o) Kawill 恢复的古地温列于表 1 中, 可以看出, 最高古地温 (T , $^{\circ}C$) 随现今埋藏深度 (D , m) 的增加而呈直线增大 (图 1c), 回归方程为:

$$D = 37.269T - 2581.5 \text{ 或}$$

$$T = 0.0268D + 74.75 \quad (R^2 = 0.9785) \quad (3)$$

结果显示, J_3 末期— P_1 早期最高古地温梯度约为每百米 $2.68^{\circ}C$, 大于现今地温梯度每百米 $2.04^{\circ}C$ 。比如, 普光 5 井现今埋深 5 000 m 时, 现今地层温度为 $124^{\circ}C$; 而 J_3 末期— P_1 早期, 最高古地温约为 $209^{\circ}C$, 高出现今地层温度 $85^{\circ}C$ 。

2) Hood^[11] 认为, VR_o 或烃源岩成熟度主要取决于所经历的最高古地温和温度不低于最高古地温 $15^{\circ}C$ 范围内的受热时间, 这段时间才是有效受热时间, 提出用有机变质标尺和有效受热时间衡量最高古地温, 其代表性样品实测 VR_o (或等效 BR_o) 恢复的古地温也列于表 1 中, 可以看出, 其恢复的最高古地温随现今埋藏深度的变化趋势与 Kawill 恢复的最高古地温相似, 只是同一样品约比 Kawill 恢复的最高古地温高出 $15 \sim 20^{\circ}C$ (图 1c 表 1)。

3) 施巴卡^[12] 提出了计算古地温公式:

$$T_c = (\lg VR_o + 0.87 - 0.149 \lg t_b) / 0.0045 \quad (4)$$

T_c 为古地温, $^{\circ}C$; t_b 为有效受热时间, Ma 。本文也用这种方法计算了普光 5 井等代表性样品的最高古地温 (表 1)。可以看出, 其最高古地温随现今埋藏深度的变化趋势与 Kawill 和 Hood 等恢复的最高古地温基本相似, 只是同一样品约比 Kawill 恢复的最高古地温低 $2 \sim 25^{\circ}C$, 温度越高, 差距越小 (图 1c 表 1), 约比 Hood 恢复的最高古地温低 $22 \sim 45^{\circ}C$, 也是温度越高, 差距越小 (图 1c 表 1)。

它们的差别主要是方法不同及建立方法所选地区和样品不同所引起的。实际上, 根据 VR_o 恢复古地温除与经历的最高古地温和有效持续时间外, 还与原始样品的起始温度和升温速率有关, 这已经得到模拟试验的证实。因此, 根据 VR_o (或等效 BR_o) 恢复古地温要结合本地区的沉积构造演化史, 确定好有效受热时间, 选用合适的恢复方法, 本文认为 Kawill 图版恢复的古地温相对适中且可靠一些。

1.3 伊利石结晶度恢复最高古地温

伊利石结晶度 (IC) 主要反映的是高一过成熟阶段或成岩变质阶段的最高古温标。普光 5 井等岩心及岩屑样品实测伊利石结晶度与 VR_o (或等效 BR_o) 具有较好的线性关系 (图 2)。当伊利石结晶度大于 $0.42^{\circ}(\Delta 2\theta)$ 时, 对应 VR_o 约小于 3%; 当伊利石结晶度小于 $0.25^{\circ}(\Delta 2\theta)$ 时, 对应 VR_o 约大于 6.5%, 进入浅变质带。

从川东北地区伊利石结晶度与 VR_o 及 BR_o 之间具有好的对应关系, 结合沉积埋藏史的恢复, 镜质体反射率、固体沥青反射率和伊利石结晶度均可以作为研究地层沉积埋藏演化最高受热史一种有效的古温标。例如, 当伊利石结晶度 (IC) 为 $0.42^{\circ}(\Delta 2\theta)$ 时, VR_o 推算的古地温约为 $160^{\circ}C$ 左右 ($150 \sim 188^{\circ}C$)。即可以利用镜质体反射率与最高古地温的关系建立伊利石结晶度与最高古地温的关系, 各地所建立的伊利石结晶度—温度关系式还存在差异, 这可能是伊利石结晶度除了温度控制外, 时间也是不容忽视的因素。

2 成藏过程 (期次) 地层温度

矿物流体包裹体均一温度被认为是包裹体捕获温度或成矿温度的下限温度, 沉积地层中均一温度主要使用盐水溶液包裹体测定。水溶液包裹体的均一温度不必经过压力校正, 等同于或接近于捕获温度, 代表当时的古地温^[13]。利用专用软件, 通过对石油包裹体、盐水包裹体的均一温度和

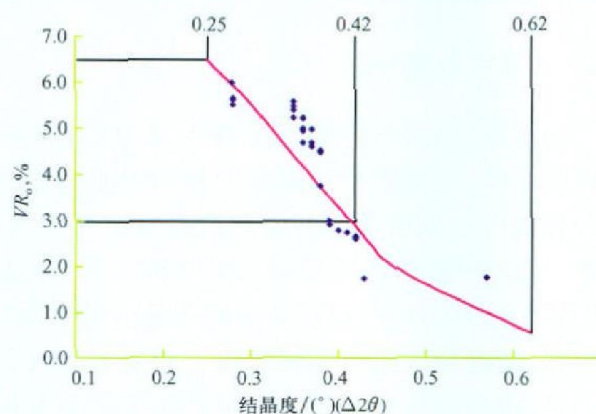


图 2 川东北地区镜质体 (沥青) 反射率与伊利石结晶度之间的关系

Fig. 2 Relationship between vitrinite (bitumen) reflectance and illite crystallinity in the northeastern Sichuan Basin

捕获温度及捕获压力的模拟计算模拟计算结果认为,伴生的烃包裹体均一温度一般低于盐水包裹体均一温度 $20 \sim 35^{\circ}\text{C}$,而盐水包裹体均一温度一般低于捕获温度 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 。例如,塔里木盆地 TP2—一包一2样品中,第一期盐水包裹体均一温度为 81°C ,伴生的烃包裹体均一温度为 61°C ,它们的捕获温度为 90°C ;第二期盐水包裹体均一温度 126°C ,伴生的烃包裹体均一温度 92°C ,捕获温度为 147°C 。

但是,流体包裹体均一温度与地质时期形成的流体来源有关,如果成岩流体来自地层本身,则形成的流体包裹体均一温度与地层古地温一致,如果成岩流体来自深部热水或与火成岩活动有

关,其均一温度应高于周围地层的古地温,代表瞬时高温状态,相反,如果成岩流体来源于上部地层及地表水,则形成的流体包裹体均一温度可能低于地层古地温。因此,根据岩石测定的流体包裹体均一温度与埋藏深度的关系,可以求出不同时期形成包裹体时的古地温梯度,重现古地温的演化。

根据普光气田普光 5、普光 2 井等 P_2c 及 T_1f 储层中流体包裹体的赋存产状、均一温度、盐度、密度等大致可划分为四期。其中盐水包裹体三期(图 3):第一期是沥青+气包裹体,它可能是印支期(T_2-T_3)相对低温(小于 75°C)形成的稠油包裹体,之后又经历高温演化而形成的沥青+气包裹

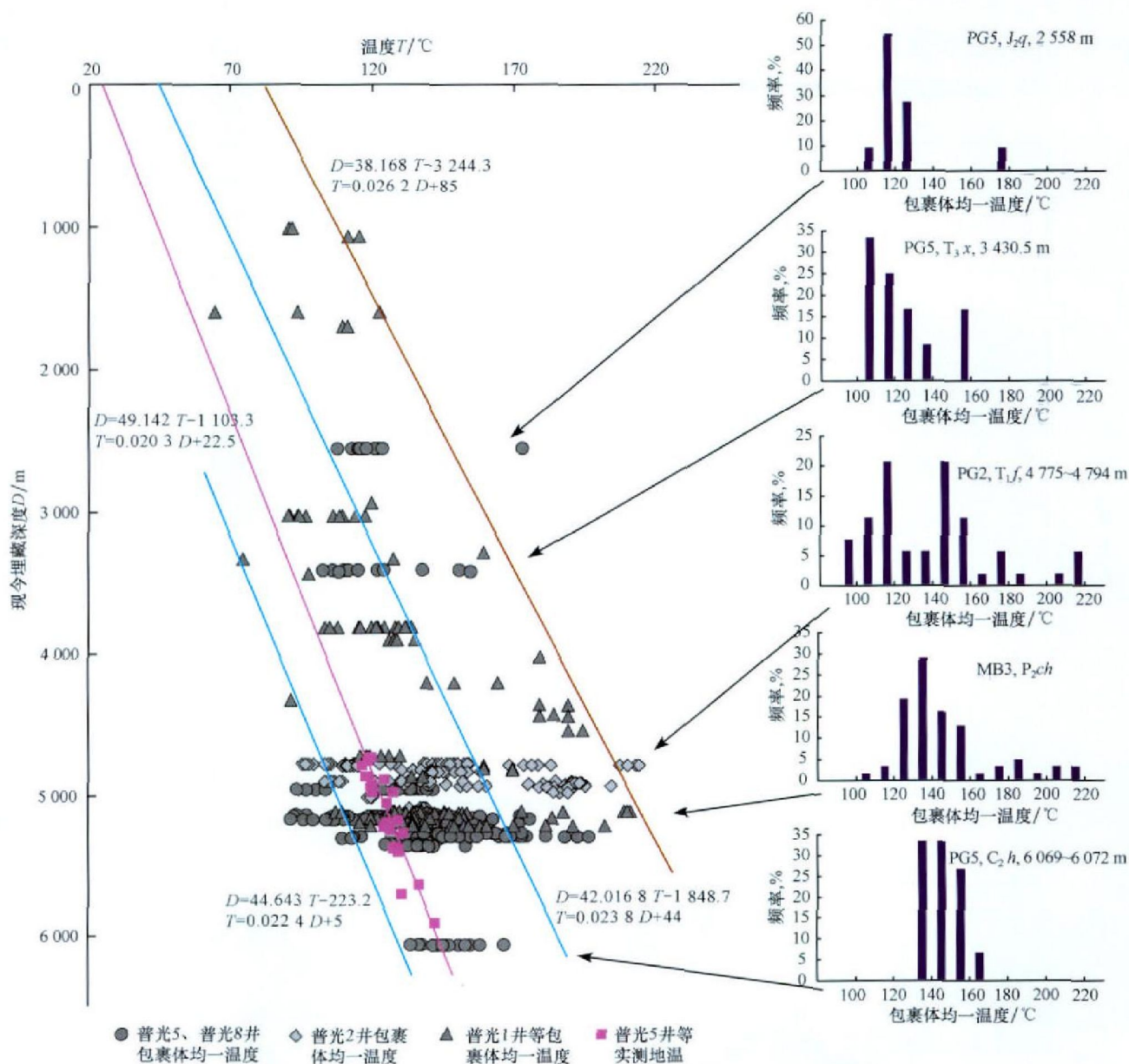


图 3 普光 5 井等实测地层温度和流体包裹体均一温度与现今埋深的关系

Fig 3 Relationship between present burial depth and measured formation temperature & homogenization temperature of fluid inclusion in Puguang-5 and other wells

体;第二期(盐水第一期)主要是燕山早期(J_{1+2})充填在白云岩重结晶后晶间溶洞的亮晶方解石中的流体包裹体,其盐度 NaCl 平均高达 13.03%,密度平均 1.04 g/cm^3 ,盐水包裹体均一温度分布在 $96 \sim 130^\circ\text{C}$ 之间,主峰温度在 $106 \sim 116^\circ\text{C}$ 之间;第三期(盐水第二期)是燕山期(K_{1+2})主要产于溶洞石英晶体及方解石脉中的包裹体,其盐度 NaCl 平均 11.37%,密度平均 0.966 g/cm^3 ,盐水包裹体均一温度分布在 $174 \sim 216^\circ\text{C}$ 之间,主峰温度在 $180 \sim 195^\circ\text{C}$ 之间,多呈长椭圆、长方形和不规则形态分布;第四期(盐水第三期)主要是喜马拉雅期产于方解石脉及溶蚀充填方解石中的包裹体,其盐度 NaCl 变化在 5.32% ~ 11.22% 之间,平均只有 8.18%,密度平均 0.98 g/cm^3 ,盐水包裹体均一温度分布在 $139 \sim 161^\circ\text{C}$ 之间,主峰温度在 $146 \sim 156^\circ\text{C}$

之间(图 3 图 4)。

普光 2、普光 5 井等储层实测包裹体均一温度随埋藏深度的变化趋势,基本上分期次呈直线分布(图 3)。第二期(盐水第一期)古地温梯度(每百米 2.24°C)略高于现今地温梯度(每百米 2.03°C);到燕山期(K_{1+2}),第三期(盐水第二期)古地温梯度相对达到最高,在每百米 2.65°C 左右;喜马拉雅期第四期(盐水第三期)古地温梯度(每百米 2.38°C)相对逐渐变低,到现今地温梯度逐渐降到每百米 2.03°C (图 4)。即古热流从燕山早期(J_{1+2})到燕山中期逐渐增高,可能在燕山中期强烈构造活动(K_1 末与 K_2 初)时古热流达到高峰,喜马拉雅期(尤其是 40 Ma 之后)整体隆升剥蚀,古热流却逐渐降低,直到现今相对最低的地温梯度或热流值(图 4)。也就是说,川东北海相现

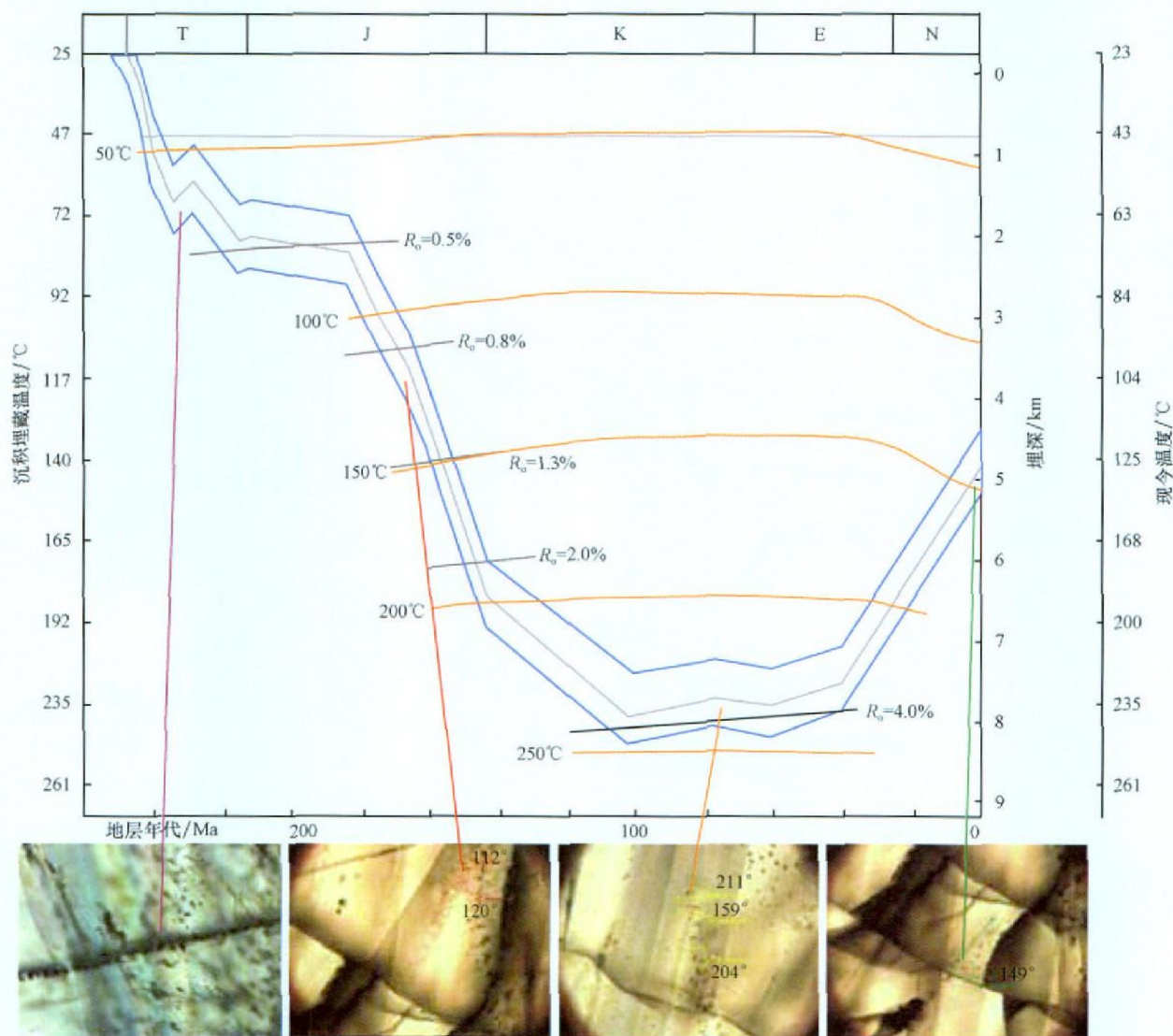


图 4 川东北普光地区 P_2c-T_1f 沉积与古温度演化过程示意图

Fig 4 Map showing sedimentary and paleotemperature evolution of P_2c-T_1f in Puguang area of the northeastern Sichuan Basin

今的热演化程度应是在燕山中、晚期形成的,这时埋藏深度最大(大于现今埋深约 3 km),地温梯度或古热流值相对最高。

3 磷灰石、锆石 (U—Th) /He 封闭温度

不同矿物其 (U—Th) /He 体系的封闭温度差别较大,磷灰石的 He 封闭温度较低为 75℃,锆石的 (U—Th) /He 封闭温度认为在 170 ~ 190℃ 之间^[14 15]; 榍石 (U—Th) /He 封闭温度为 191 ~ 218℃^[16]。目前国际上的研究实例均采用将 (U—Th) /He 方法与 VR_0 、裂变径迹甚至 K/Ar Ar/Ar 等其他同位素定年技术结合起来进行,以便利用不同矿物 (U—Th) /He 封闭温度的不同,综合起来对复杂热史轨迹进行恢复。本次分析样品主要取自川东北普光 5 井等钻井岩心 5 个和岩屑 1 个,通江北面诺水河旁寒武系—白垩系剖面野外新鲜露头样品 6 个,磷灰石和锆石的 (U—Th) /He 年龄测试工作是在澳大利亚 CSIRO 完成的,井下样品测试结果见图 5 和表 2。

从测试结果中 (图 5; 表 2) 可获知如下信息。

1) 普光地区 $J_2 s-T_3 x$ 钻井砂岩岩心、岩屑样品以及通江诺水河 $K_1 c-E_2 d$ 地表样品随埋藏深度或现今实测地层温度的增大,磷灰石 He 年龄逐渐减小 (图 5a), 均体现出典型的磷灰石经历封闭温度之后的 (U—Th) /He 年龄演化特征,反映出该

区磷灰石 (U—Th) /He 年龄的封闭温度约为 85℃ 左右 (此时 He 年龄接近为零), 即普光地区地表样品也曾经历了 75℃ 以上的最高地层温度。

普光地区 $J_2 s-T_3 x$ 钻井样品锆石 (U—Th) /He 年龄变化范围相当宽,单颗粒年龄介于 49.9 ~ 251.9 Ma 之间,主要分布在 50 ~ 80, 130 ~ 215 和 246 ~ 252 Ma 3 个主峰区 (图 5b)。50 ~ 80 Ma 的锆石 (U—Th) /He 主峰区年龄小于实际地层沉积年龄, 130 ~ 215 Ma 则与实际地层沉积年龄相当, 而 246 ~ 252 Ma 大于实际地层沉积年龄, 即只有前者有可能反映出该区样品刚刚接近锆石 He 年龄 (U—Th) /He 封闭温度 (170 ~ 190℃) 的年龄。实际上,第一个 He 年龄主峰的样品现今埋藏深度在 2 500 ~ 3 400 m 之间,现今地温在 75 ~ 92℃ 之间,包裹体最高均一温度及 VR_0 恢复的最高古地温约在 150 ~ 170℃ 之间,处于锆石 (U—Th) /He 封闭温度附近。因此,普光地区井深超过 2 500 m 可能逐渐接近锆石 (U—Th) /He 的 170 ~ 190℃ 封闭温度。即普光地区 2 500 ~ 3 400 m 的井下样品曾经历了接近 180℃ 的最高地层温度。

2) 根据不同盆地或地区的沉积—抬升剥蚀演化史,磷灰石、锆石的 (U—Th) /He 年龄可能有三种解释 (图 6), 一是代表沉积物源区的年代,这时锆石样品的 (U—Th) /He 年龄大于实际地层沉积年龄 (He 尚未热散失,例如图 6a 或表 2 中现今埋深小于 2 500 m 的锆石颗粒); 二是代表沉积地

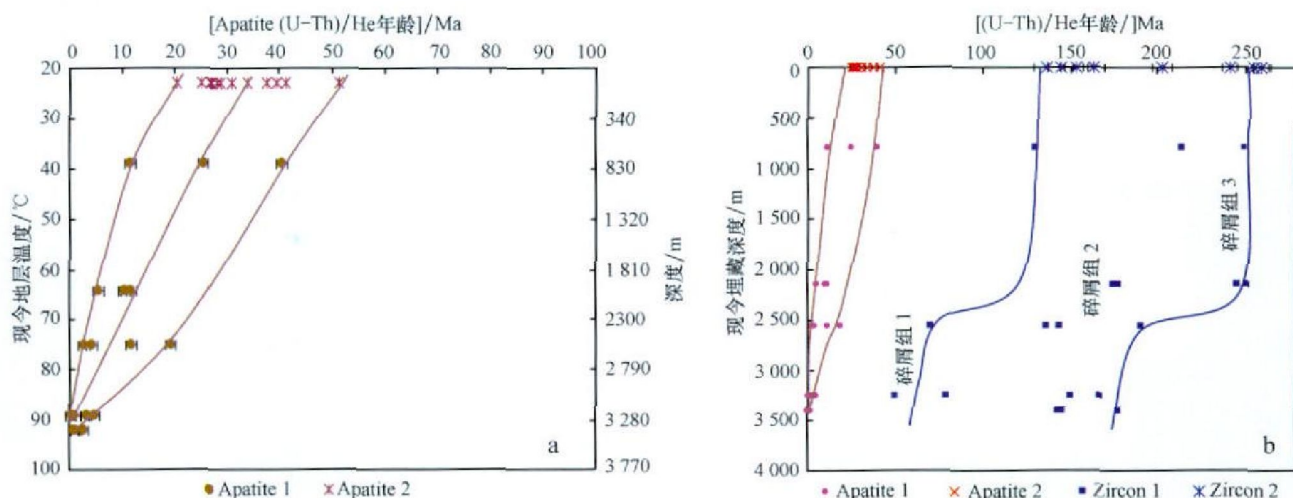


图 5 川东北磷灰石和锆石 (U—Th) /He 年龄与现今埋藏深度及现今地层温度的关系

Fig 5 Relationship between (U—Th) /He age of apatite and zircon and present burial depth & formation temperature in the northeastern Sichuan Basin

Apatite1. 普光 5 井等 $T_3 x-J_2 p$ 钻井样品磷灰石 (U—Th) /He 年龄; Apatite2. 通江剖面等 $J_2 p-K_1 c$ 地表露头样品磷灰石 (U—Th) /He 年龄;

Zircon1. 普光 5 井等 $T_3 x-J_2 p$ 钻井样品锆石 (U—Th) /He 年龄; Zircon 2. 通江剖面等 $J_2 p-K_1 c$ 地表露头样品锆石 (U—Th) /He 年龄

表 2 川东北普光 5 井等井下样品磷灰石、锆石 (U-Th)/He 年龄与封闭温度

Table 2 Age and closure temperature of apatite and zircon (U-Th)/He in core samples from Puguang-5 and other wells in the northeastern Sichuan Basin

样品号	层位	井深 /m	现今地层 温度 /℃	磷灰石 颗粒编号	[磷灰石 (U-Th)/He 年龄] /Ma	磷灰石 经历温 度 /℃	锆石颗 粒编号	[锆石 (U-Th)/He 年龄] /Ma	锆石经历 温度 /℃
PG5-2-1	T ₃ x	3 403.00	92	137280-1	0.8	封闭温度 大于 85℃	137281-1	146.4	小于或接近沉积 年龄, 接近封闭 温度 170℃
				137280-2	1.4		137281-2	144.0	
				137280-3	0.9		137281-3	144.1	
				137280-4	2.7		137281-4	178.4	
PG2-3-1	T ₃ x	3 247.06	89	137282-2	1.1	封闭温度 大于 85℃	137283-1	49.9	小于或接近沉积 年龄, 接近封闭 温度 170℃
				137282-3	3.4		137283-2	167.5	
				137282-4	4.9		137283-3	79.2	
				137282-1	0.4		137283-4	150.8	
PG5-1-2	J ₁ q	2 557.80	75	137276-1	11.8	封闭温度 大于 85℃	137277-1	191.1	小于或接近沉积 年龄, 接近封闭 温度 170℃
				137276-2	2.8		137277-2	144.6	
				137276-3	19.2		137277-3	136.9	
				137276-4	4.3		137277-4	70.7	
MB3-1-1	T ₃ x	2 135.16	64	137278-1	10.8	封闭温度 大于 85℃	137279-1	178.4	大于或接近沉积 年龄, 未达到封闭 温度 170℃
				137278-2	11.8		137279-2	246.3	
				137278-3	5.6		137279-3	251.9	
				137278-4	10.5		137279-4	175.0	
PG5	J ₂ s	794.00 (岩屑)	39	137286-1	40.5	封闭温度 大于 85℃	137287-1	214.5	大于沉积年龄, 未达到封闭 温度 170℃
				137286-2	11.6		137287-2	130.2	
				137286-4	25.5		137287-4	250.2	
TJ0705	J ₃ p	地表 (露头)	25±	137274-1	30.9	封闭温度 大于 85℃	137275-1	144.1	大于沉积年龄, 未达到封闭 温度 170℃
				137274-2	33.9		137275-2	152.8	
				137274-3	25.2		137275-3	136.4	
				137274-4	37.5		137275-4	163.2	

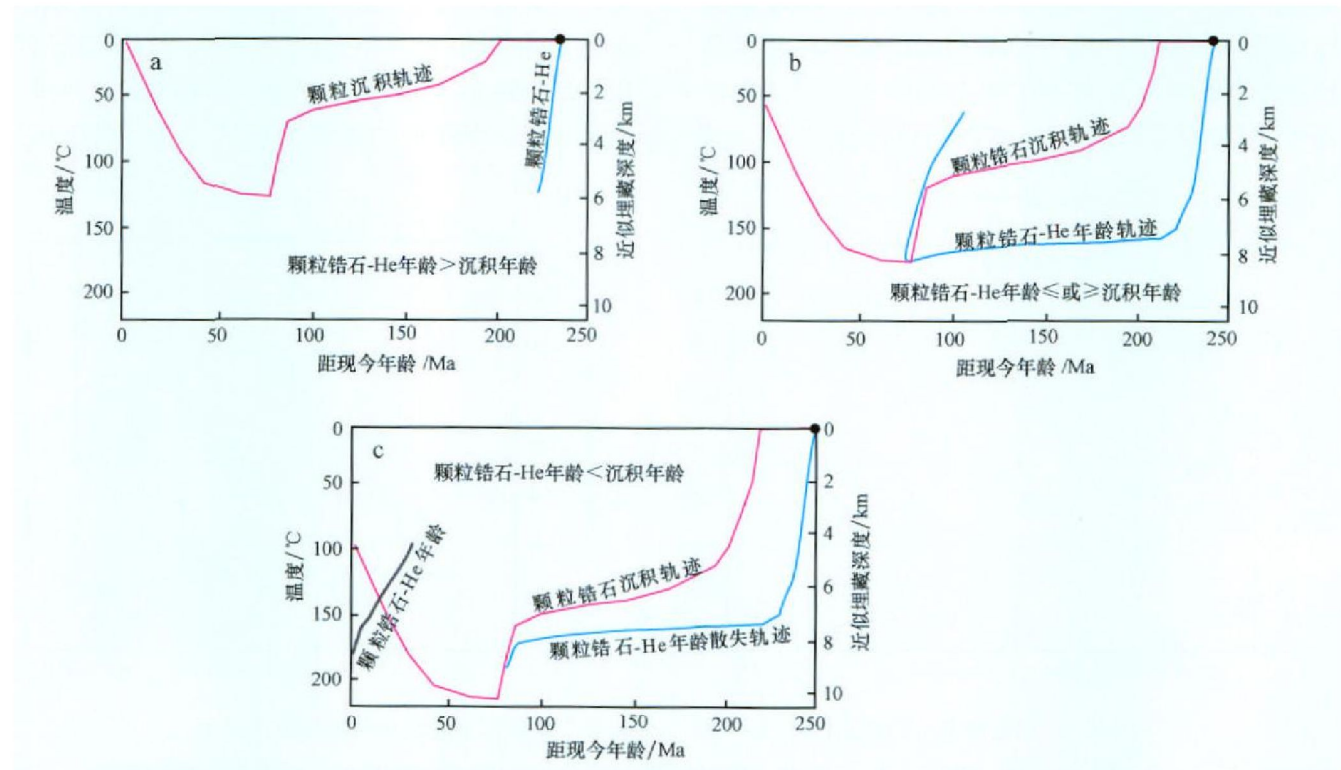


图 6 理想锆石 He 保留区 (a)、部分保留区 (b) 和未保留区 (c) 与沉积轨迹关系示意图
Fig. 6 Relationship between sedimentary track and ideal zircon He reserved area (a), partly reserved area (b) and unreserved area (c)

层埋深大于封闭温度之后又隆升或抬升剥蚀埋深又小于封闭温度之后的年龄, 这时样品 (U—Th)/He 年龄小于或远小于实际地层沉积年龄 (He 完全热散失之后的新增值, 例如图 6c 或表 2 中的所有磷灰石颗粒), 它代表的是隆升剥蚀年代; 三是代表沉积物源区年代与沉积地层埋深接近封闭温度之间的年龄, 这时样品 (U—Th)/He 年龄部分样品小于或部分样品等于甚至大于实际地层沉积年龄 (He 部分热散失或部分保留, 例如图 6b 或表 2 中现今埋深大于 2 500 m 的锆石颗粒), 它代表的是地层沉积接近封闭温度的年龄。

普光地区 J₂s—T₃x 钻井砂岩岩心样品磷灰石的 He 年龄介于 0.4~40.5 Ma 之间, 平均值介于 1.5~25.9 Ma 之间, 均远小于样品沉积时代年龄, 且随着样品时代的变老磷灰石 He 年龄逐渐变小 (图 5)。这与地层年代越新抬升剥蚀时间越早是一致的。例如, 普光 5 井 T₃x 地层在第四纪时期 1.5 Ma (±1.2 Ma) 才开始抬升至磷灰石的 He 封闭温度 85℃ 左右, 普光 5 井 J₂s 地层样品的 He 年龄平均值是 25.9 Ma 该地层约在 25.9 Ma (±15 Ma) 已经抬升至磷灰石的 He 封闭温度 (85℃), 而通江诺水河野外露头剖面 J₃p 样品磷灰石的 He 年龄也远小于样品沉积时代年龄, 平均值是 31.9 Ma (±6.7 Ma), 表明该地层约在 31.9 Ma (±6.7 Ma)

已经抬升至磷灰石的 He 封闭温度 (85℃)。即川东北普光地区地层开始大量冷却隆升剥蚀的时间约在第三纪至第四纪 0~40 Ma (±6 Ma) 之间。在此期间的剥蚀速率约为 65~175 m/Ma 平均约为 100 m/Ma (相当于 2.2℃/Ma 的降温)。同时, 在此期间的抬升剥蚀厚度约为 3 000 m 左右 (图 5)。

4 古温标综合研究

针对南方高演化海相层系的特点, 本文共筛选出镜质体反射率 (VR_o) 及固体沥青反射率 (BR_o)、伊利石结晶度、流体包裹体捕获或均一温度 (最高值) 和磷灰石、锆石、榍石 (U—Th)/He 封闭温度及磷灰石裂变径迹等古温标及成熟度指标 (表 3)。此外, 干酪根 H/C 原子比和烃源岩脱气甲烷碳同位素等可作为有机质成熟度的辅助指标, 可根据实际地质条件来选择。

镜质体反射率或等效固体沥青反射率及伊利石结晶度等恢复的古地温可以作为良好的古温标, 它反映的是该地层在有效受热时间内所经历的最高地层温度。例如有效受热时间为 50~90 Ma 左右时, 如果 VR_o 或等效 BR_o 变化在 1.3%~2.0%, 伊利石结晶度约在 0.5~0.45° (Δ2θ) 之间, 则该地层所经历的最高古地温约为 130~170℃; 如果

表 3 高演化海相层系的古温标及成熟度指标
Table 3 Palaeogeothermometer and maturity index for high mature marine sequences

有机质演化阶段		成岩阶段	VR _o 或等效 BR _o , %	VR _o 或等效 BR _o 或伊利石结晶度恢复的最高古地温 /℃ (有效受热时间 50~90 Ma)	伊利石结晶度 / (°) (Δ2θ)	最高流体包裹体捕获 (或均一) 温度 /℃	[磷灰石、锆石、榍石 (U—Th)/He 封闭温度] /℃	生成产物
未成熟		早成岩	<0.5	<50	0.62~0.42	<50		生物气 (甲烷)
成熟	低成熟	晚成岩早期	0.4~0.7	50~90		50~95	75℃ ± (磷灰石)	稠油
	成熟	晚成岩中期	0.7~1.3	85~140		90~150	120℃ ± (磷灰石裂变径迹退火温度)	原油 轻质油
高成熟		晚成岩后期	1.3~2.0	130~170		135~180	180℃ ± (锆石)	凝析油气 湿气
过成熟	早期	极低变质带	2.0~3.0	150~220		162~220		干气 (甲烷)
	中期	浅变质带	3.0~6.5	190~240	0.42~0.25	220~250	210℃ ± (榍石)	
	晚期	变质带	>6.5	>235	<0.25	>250		

VR_o 或等效 BR_o 变化在 2.0% ~ 3.0%, 伊利石结晶度约在 $0.45 \sim 0.42^\circ (\Delta 2\theta)$ 左右, 则该地层所经历的最高古地温约 $150 \sim 220^\circ\text{C}$ (表 3)。 VR_o 或等效 BR_o 或伊利石结晶度等主要受热及有效受热时间的控制, 地层所经历的最高古地温越高, VR_o 或等效 BR_o 越高 (呈指数增加), 伊利石结晶度越小; 最高古地温越有效受时间越长, VR_o 或等效 BR_o 也相对增大, 伊利石结晶度也相对偏低一些。

矿物流体包裹体的捕获或均一温度是研究地层所经历古温度和成藏期次最直接的古温标。一般其最高流体包裹体捕获或均一温度期次的温度与 VR_o 或等效 BR_o 及伊利石结晶度等恢复的古地温基本相当。例如有效受热时间为 $50 \sim 90 \text{ Ma}$ 左右时, VR_o 或等效 BR_o 变化在 1.3% ~ 2.0% 时恢复的古地温约为 $130 \sim 170^\circ\text{C}$, 这与最高流体包裹体捕获 (或均一) 温度约为 $135 \sim 180^\circ\text{C}$ 基本相当 (表 3)。除此之外, 它还是成藏期次和不同时期热史恢复的有效指标。

磷灰石、锆石和榍石等 (U-Th)/He 的封闭温度也可以作为古温标, 它与 (U-Th)/He 年龄相配合是造山和成盆的热历史及复杂热史轨迹进行恢复的有效方法。不同矿物其 (U-Th)/He 体系的封闭温度差别较大, 磷灰石的 He 封闭温度较低为 $75^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 锆石的 (U-Th)/He 封闭温度认为 $180^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 榍石 (U-Th)/He 封闭温度为 $191 \sim 218^\circ\text{C}$, 还有萤石、橄榄石、辉石、角闪石、石榴子石、磁铁矿等矿物 (U-Th)/He 封闭温度各不相同, 与裂变径迹等定年技术结合起来一起可构成一个温度与年代对应系列 (表 3), 恢复成盆和隆升或造山的热历史。

5 结语

1) VR_o 或等效 BR_o 及伊利石结晶度等是恢复古地温的良好古温标, 其反映的是地层在有效受热时间内所经历的最高地层温度。

2) 南方高演化海相层系可根据 VR_o 或等效 BR_o 最高包裹体均一温度、伊利石结晶度、磷灰石裂变径迹及磷灰石、锆石、榍石 (U-Th)/He 封闭温度及年龄等与埋藏深度的变化恢复历史时期的最大古埋藏深度或古地温。

3) 可根据主要成岩期次包裹体的捕获或均一温度与构造运动、磷灰石裂变径迹及磷灰石、锆

石、榍石等 (U-Th)/He 封闭温度年龄相结合, 恢复不同地质时期的热史。

参 考 文 献

- 1 赵重远, 刘池洋, 任战利. 含油气盆地地质学及其研究中的系统工程 [J]. 石油与天然气地质, 1990 11(1): 108 ~ 113
- 2 金之钧, 王清晨. 中国典型叠合盆地油气成藏研究新进展——以塔里木盆地为例 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(3): 281 ~ 294
- 3 任战利, 刘丽, 崔军平, 等. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2008 29(4): 502 ~ 506
- 4 邱楠生, 李慧莉, 金之钧. 沉积盆地古生界碳酸盐岩地区热历史恢复方法探索 [J]. 地质前缘, 2005 12(4): 561 ~ 567
- 5 Jacob H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen (migration) [J]. International Journal of Coal Geology 1989 11(1): 65 ~ 79
- 6 丰国秀. 岩石中沥青反射率与镜质组反射率之间的关系 [J]. 天然气工业, 1988 8(3): 20 ~ 25
- 7 刘德汉, 史继扬. 高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨 [J]. 石油勘探与开发, 1994 21(3): 113 ~ 115
- 8 Pamell J, Monson B, Geng A. Maturity and petrography of bitumens in the Carboniferous of Ireland [J]. International Journal of Coal Geology 1996 29: 23 ~ 38
- 9 刘文斌, 秦建中, 孟庆强, 等. 川东北地区飞仙关组—长兴组储层沥青反射率及含硫量特征 [J]. 地质学报, 2008 82(3): 373 ~ 379
- 10 Riediger C L. Solid bitumen reflectance and Rock-Eval $T_{\max}$ as maturation indicators: an example from the Nordegg Member Western Canada Sedimentary Basin [J]. International Journal of Coal Geology 1993 22(3-4): 295 ~ 315
- 11 Hood D, Gutjahr C M, Heacock R L. Organic metamorphism and the generation of petroleum [J]. AAPG Bulletin 1975 59: 986 ~ 996
- 12 Shibaoka M. Hydrocarbon generation in Gippsland basin, Australia—Comparison with Cooper Basin [J]. AAPG Bulletin 1978 62(7): 1151 ~ 1158
- 13 Emery D, Robinson A. Inorganic geochemistry: application to petroleum geology [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1993. 25 ~ 95
- 14 Reiners P W, Farley K A, Hickes H J. He diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of zircon: initial results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte [J]. Tectonophysics 2000 349(1-4): 297 ~ 308
- 15 Reiners P W, Spell T L, Nicolescu S et al. Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparison with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta 2004 68(8): 1857 ~ 1887
- 16 Reiners P W, Brady R, Farley K A, et al. Helium and argon thermochronometry of Gold Butte block, south Virgin Mountains, Nevada [J]. Earth and Planetary Science Letters 2000 178: 315 ~ 326