

国外石油勘探开发参考资料

(综合译文集)

胜利油田勘探开发规划研究院情报组

一九七七年十二月

目 录

俄克拉何马城油田的石油来源于不整合面以下保存下来的生油层的二次生油·····	(1)
对《俄克拉何马城油田的石油来源于不整合面以下保存下来的生油层的二次生油》一文的讨论·····	(8)
对《讨论》一文的答复·····	(13)
石油生成的时间——温度关系·····	(16)
利用粘土矿物及无机和有机地球化学指标评价页岩的成岩程度和生油能力·····	(23)
砂岩储集层的分布和连续性·····	(44)
注二氧化碳和烃混相驱采油的现状·····	(58)
注碱性水和乳化液采油的现状·····	(70)
注表面活性剂或胶束溶液采油的现状·····	(81)
路易斯安那州海上某些高含水油藏的注水效果·····	(92)
用罗马尼亚油田开发的平均参数预测采收率·····	(100)

俄克拉何马城油田的石油来源于不整合面以下保存下来的生油层的二次生油

〔美〕 G·W·韦伯

证据和以前的解释

俄克拉何马城构造是靠近俄克拉何马城马哈古潜山带的南端的一个大背斜构造，在其东侧有一条落差约610米的断层。下奥陶统阿尔布克白云岩在宾夕法尼亚系奇罗基页岩以下(即不整合面以下)沿着被断层切割的顶部分布，其长度约6.4公里。在不整合面以下其西面由中和下奥陶统及更年青的碳酸盐岩、页岩和砂岩所环绕。该油田从阿尔布克组中已产出比重为0.8348的原油318万立方米，从油溪砂岩中产出原油1,590万立方米，从中奥陶统威尔科克斯砂岩中产出七千多万立方米油，还有相当于几千万立方米油的天然气。在一1,646米有共同的油水界面，其上油柱最大厚度为213米。显然，在很多单独的油层之间连通相当好。向南和向西有区域性倾斜，因此储集层能从邻近的安纳达柯盆地获得油源。一些上复的宾夕法尼亚储集层(一般很薄)也产油。这是因为不整合面以上还有背斜构造。

有一些井在不整合面附近的储油层中发现沥青，并在这个储油层以上的宾夕法尼亚层的最下部发现沥青碎屑，这说明了在宾夕法尼亚纪早期奥陶系油藏遭受剥蚀而破坏时已储存了大量的原油。在地层被剥蚀去约610米时，渗出的油苗风化为沥青。而且当时出露的威尔科克斯砂岩的颗粒也变为油湿性，这说明在该砂岩被剥蚀后油逸出来时曾经断续地变为干燥的砂岩。克纳彭指出，在广阔的中堪萨斯隆起上的埃尔沃什和鲁塞尔郡内，宾夕法尼亚系以下的阿尔布克油藏顶面附近中也存在着类似的关系。阿尔布克组以上保存有中奥陶系盖层时，阿尔布克组的原油为绿色。但是，在阿尔布克组受到早宾夕法尼亚时期的剥蚀的油藏中，原油含沥青，并由于溶解了不整合面附近的沥青而呈黑色，而只是该层的更下部原油才呈绿色。证据使人不得不相信克纳彭和其他很多人的解释是正确的，他们认为：很多早期油损失了，而现在在阿尔布克层发现的油气是第二次生油时生成的“晚期油”，这些“晚期油”是在圈闭形成后才进入其中的，“晚期油”中部分溶解了第一次生油的沥青残渣。然而另一些人支持一次生油假说。现把不同的假说及对这些假说的评价简述如下：

1. 油气连续不断地生成并稳定地向构造中运移，有许多油气成为油苗流出而损失掉，其余部分在油苗变成沥青而形成封闭时保存下来。可是莱复生(1945年)观察到，已发现的油藏(含气丰富而接近溢出)只聚集在埋藏于深处的圈闭之中。油气看来不可能从宾夕法尼亚纪早期至最晚到二叠纪这一期间连续生成。

2. 原油是以分散状态储集的。很多奥陶系的油气在圈闭形成前可能都是分散的，到后来才运移入圈闭之中。然而构造主要是在宾夕法尼亚纪发育形成的，那时应有很多油运移进入整个圈闭中。看来以下情况是不可能的，即：这样大量的油仍然保持分散状态，而仅仅在后期没有更大的区域构造变形的情况下才运移聚集。

3. 当圈闭（由于剥蚀）而不封闭的时候油藏被圈闭在下倾方向，只有当圈闭再次形成时，原油才能再次运移。没有见到过关于这方面的可靠的证据，因为这最多不过是一个偶然情况。

4. 因为油面低于地下水面，并且大气降水是向下流动的，因而已存在的油没有通过剥蚀面全部排出。莱复生（1945年）观察到：这个在发现时几乎饱含油气的圈闭，假如在大气压力下充有气体，则要（比实际）约大200倍，从而推翻了以上假说。相反，莱复生断定大多数或全部烃类是在埋藏深度等于或大于目前的深度（1,829米）时运移进去的。

5. 由于油苗被风化形成焦油所造成的封闭，原先生成的石油没有全部从露头处逸出。莱复生和贝利（1967年）同意姆斯基和克拉松的这种观点，并提出：很多油从奥陶系地层逸出，结果形成沥青封闭，从而保存了剩下的石油，这与在加里福尼亚州的柯林加油田特姆勒勒组的焦油砂岩层保存了一个油藏的情况是一样的。然而，这么多的油气在面积达许多平方公里的宽阔的露头处能被有效地封闭起来是值得怀疑的。看来莱复生原先所认为的，起码多数的油气一定是在圈闭被埋藏很长时间后才运移入圈闭的观点是最正确的。

6. 与以上所说的假说不同，有人认为奥陶系的油逸出后，由上复的奇罗基组页岩供给油并向下穿过不整合面或通过东部的断层运移到圈闭中。然而不少人认为奥陶系可以二次生油。因为本地区奥陶系的油和盐水不同于宾夕法尼亚系油藏中的油和盐水。有人提出：宾夕法尼亚系与奥陶系盐水不相似表明它们的起源不同。还有人提出：在俄克拉何马州和堪萨斯州典型的奥陶系油是很相似的，而宾夕法尼亚系原油与奥陶系的油是根本不同的。当然，由于宾夕法尼亚系多数产气，原油性质的资料很少。

尽管很难证明他们的差别，但是有人还认为：奥陶系和宾夕法尼亚系的油是有差别，并且油源不同。

7. 奥陶系生油岩本身形成两种不同的油，第一次生成的油散失并形成焦油和油湿砂岩。第二次生成的油是在圈闭封闭（即古潜山被盖层覆盖——译者）以后或者更晚的另一个生油阶段中生成的。这个二次生油的假说比任何其它假说更符合油田的实际情况。而且现在还有其他研究成果可支持这种假说。

新研究成果的应用

菲力普（1965年）指出干酪根向原油转化需要高温（约在95°C），这就表明：埋藏要达到中到深的深度才行，但科德尔对这个结论提出异议，他认为最大深度仅需1,524米，而在1,524—2,743米范围石油生成最丰富。然而菲力普进一步观察到：石油的生成没有固定的深度，更有可能的是石油生成取决于当地的地温梯度、时代、深度和生油岩的热历史。

史。康兰（1974年）得出了达到主要成油阶段所要求的时间和温度之间的关系。这样，在受热时间长时只须相对较低的温度，而在年青的地层中生成石油则需要较高的温度。时间的对数与绝对温度的倒数的关系曲线表明这些参数呈线性关系。普塞（1973年）进一步指出干酪根开始裂解所需深度的改变取决于当地地温梯度。他举了几个例子并叙述了确定古温度的方法。

威廉斯和道（1974年）对威里斯顿盆地的原油类型、生油岩以及油藏进行了研究。道发现尼克松（1973年）对西部白垩系地层的研究成果也适用于威里斯顿盆地的古生界。两者都是在约2,134米的深度开始生成石油。俄克拉何马城地区的古生代地层缺少蒸发岩，但是俄克拉何马城地区所具有的碳酸盐岩夹碎屑岩的剖面与威里斯顿盆地的古生界地层是相似的。因此有理由假设在俄克拉何马城地区古生界地层中石油大量生成所需的深度为2,134米。俄克拉何马城附近不整合面下的古生界地层厚度在1,219米和1,524米之间，向南在安纳达柯盆地厚度达3,353米到3,658米。按这种设想，俄克拉何马城地区直到密西西比纪时期石油生成是很少的。然而沿下倾方向（向南和南东）在离俄克拉何马城80—160公里处的安纳达柯盆地内阿尔布克组和中奥陶统地层的深度已足以生成石油。作者相信，运移至俄克拉何马城油田的早期形成的油在圈闭隆起并遭受剥蚀时已散失。

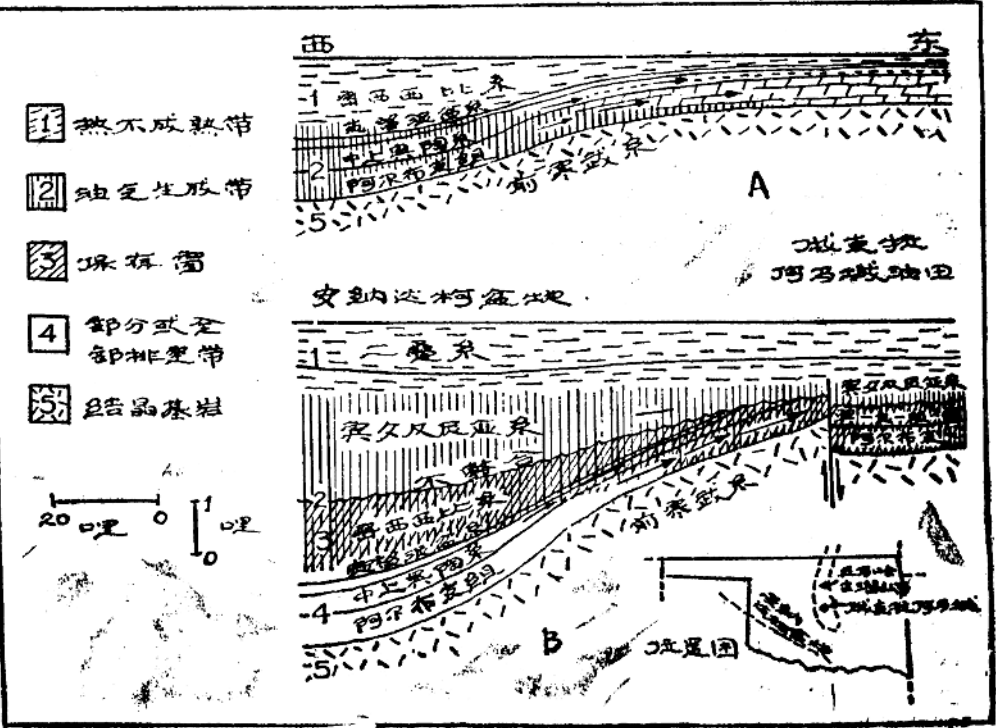


图1 从俄克拉何马城油田到安纳达柯盆地的古构造剖面
(表示油气的生成深度和运移过程)

A: 密西西比纪末; B: 二叠纪末

只是在最后形成不整合圈闭时才被二次生油所生成的油填充。

图1表示所提出的地质历史和二次生油的机理。图1A是在密西西比纪末期从安纳达柯盆地到俄克拉何马城的古构造剖面。可以看出大量生成石油带的顶界(这一界限实际上是渐变的,为了清楚起见划了一条明显的界线)由于地层从俄克拉何马城向南和西南方向加厚横切了这些地层。这样,在较年青的地层向南与隆起的距离逐渐加大的同时,它们还逐渐变深而进入能大量生成石油的界线以下。第一次“早期”生成的油在出露和受到剥蚀前形成于有利地带,并运移到上升的构造中,在那里又由于剥蚀而逸失,只剩下沥青、油湿性砂岩作为它的遗迹。

俄克拉何马城(构造)的上升并局部受到剧烈剥蚀与该区广泛的出露水面、停止沉降并遭受不同厚度剥蚀是一致的。相应地,当剥蚀进行时地下地层的温度稳定下来或甚至下降。因此在较深的地层中石油的生成一定很慢或者可能基本上停止,而较浅地层的干酪根仍保持不变,因而干酪根被保存下来,成为不整合面下面的二次生油的油源。

经剥蚀后这个地区又被奇罗基组页岩不整合地复盖起来,当圈闭变成封闭以后,几千英尺的宾夕法尼亚系和二叠系地层沉积下来,上覆层中可能还有中生界地层。在俄克拉何马城地区一些构造继续发育,不过这也许主要是由于差异压实的缘故。当沉积继续时,奥陶系地层比原来埋藏得越来越深,地下温度重新开始升高,在该地区的奥陶系和更年青的地层又开始生油。埋藏更深的石油和干酪根还产生大量天然气,这些油气有许多运移到俄克拉何马城的圈闭中,并可能以古索(1954年)所推测的方式置换了一些油。图1B为二叠纪末安纳达柯盆地——俄克拉何马城的古构造剖面,此时宾夕法尼亚系的大部分和所有前宾夕法尼亚地层都已热成熟。在宾夕法尼亚纪和二叠纪时期奥陶系地层二次生成的油(晚期油),沿横向运移进俄克拉何马城构造,尽管(该油田各油层)具有统一的油水界面而且阿尔布克碳酸盐岩具有裂缝,表明在构造高处也可能存在着垂向连通和垂向运移。这种二次生油过程消耗了俄克拉何马城以及从它向盆地方向去的地区的至少是前宾夕法尼亚系岩石中的干酪根。在宾夕法尼亚系储集层中也聚集了一些油,这可能大部分来自宾夕法尼亚系本身的生油层。

这种假说用以下简单的分析进行进一步的评价。分别对奥陶纪末、泥盆纪末、密西西比纪末、宾夕法尼亚纪末和二叠纪末时的中奥陶统地层和阿尔布克组(以阿尔布克组中部为平均值)的埋藏时间作了计算(根据普雷斯和西维尔1974年资料的64页)。有了这些时间就可利用康兰(1974年)作的图,该图中表示了大量生油所需的最低温度与生油岩的埋藏时间的关系。这样就得出了每个奥陶系地层大量生油所需的最低温度值,即界限温度(也就是图2的表中所称的成熟温度——译者)。实际上对每个控制点都得出两个温度,一个直接来自康兰的图,另一个是从康兰的图得出的数值加 15°C ,因为康兰指出他的地下温度是不平衡的井下测量值,而是比平衡值低 15°C 。用这样得出的界限温度(即成熟温度——译者),再根据古构造剖面(图1)求出每一个时间点在俄克拉何马城和安纳达柯盆地的埋藏深度,因而就可求出相应的地温梯度(见图2的表)。这样计算出的地温梯度就是在每一个地点,当每一个时间,每一个(生油)地层开始大量生油所需的地温梯度(塞费特和赛肯1973年认为该地区是热带和亚热带气候,因而假定古生代时的平均地面温度是 21°C 。但是还可看到古温度的误差高达 10°C ,也只导致计算出的地温梯度有达10%的误差)。不合理的高计算值(例如 $8^{\circ}\text{C}/30\text{米}$)说明,在这

俄-克-拉-何-马-地-区

奥陶系地层达到成熟温度所需要的地温梯度

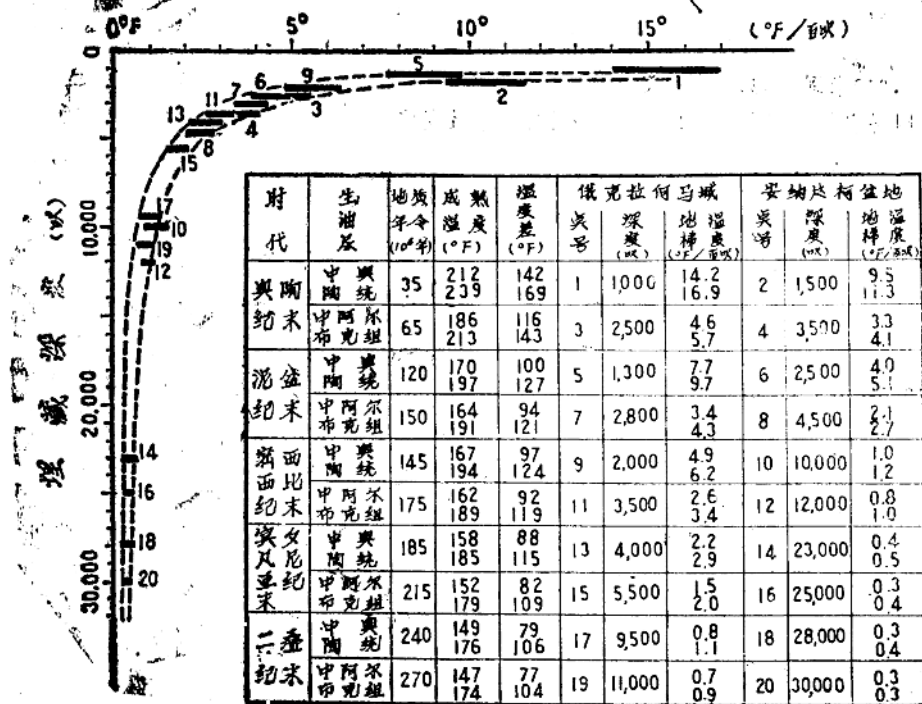


图 2. 美国俄克拉何马城地区中奥陶统和阿尔布克组中部生油层达到大量生成石油所必须的地温梯度与埋藏深度的关系。
(表中的“温度差”一栏表示成熟温度即当时生油层的地下温度与当时的地面温度之差, 用当时的深度除温度差即可得出地温梯度——译者注)

样的时间和地点实际上油还没开始大量形成, 但是正如在图 2 表中看到的那样, 界限(地温)梯度随着时间和油藏深度的增加而有规律地下降, 并包括了可以开始大量生油的那个合理值。

然后把对可能的生油层计算的界限(地温)梯度对应着不同时代和地点的合适的埋藏深度作图(见图 2, 它们以短线形式标出, 每一短线实际代表并连接两个计算出的点, 这两个点中小的值是达到从康兰 1974 年的图中求出的温度所要求的梯度, 这两个点中大的值是达到加了 15°C 的校正温度所需的梯度)。俄克拉何马城中奥陶统地层的结果值 1、5、9、13 和 17 (分别代表奥陶纪末、泥盆纪末、密西西比纪末、宾夕法尼亚纪末和二叠纪末) 组成平滑的曲线, 或者包络线。2、6、10、14 和 18 是安纳达柯盆地的

中奥陶统地层的相应结果值，它们仍组成同样的包络线。阿尔布克组的值单独绘出，但因它们基本上与中奥陶统的包络线一致，所以也一齐画入图2中。

在得到上述关系曲线之后，就可以对任何假定的（过去地质历史时期的）地温梯度值求其相应的估计界限埋藏深度（即开始大量生油的深度——译者）。用这种埋藏深度在横剖面图上从生油层向上量，就可以得出开始大量生成石油时的古地面以及这个古地面的时代。例如，如果过去的地温梯度曾经为 $1^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ ，中奥陶统（生油层）就会在埋藏到1,219米到1,829米深度处（即到密西西比纪末）开始大量生成石油（1,219米是根据康兰的图得出的温度求出；1,829米是根据这个温度值加上 15°C 求出），当时，这种情况只有在俄克拉何马城以西80到96公里处才存在。然而，如果地温梯度为 $1.7^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ ，或许在俄克拉何马城以西64公里处就可以生成大量石油。

普塞（图1，1973年）列举了世界各地大油田的地温梯度。苏门答腊油田的地温梯度是 $2.8-3.3^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ ，而其余油田为 $1.7^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ 或更小，世界平均约为 $1.1^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ 。霍普金森和尼萨则尔1975年报道北海（是一个与安纳达柯盆地有点相似的克拉通盆地）北部的中心的地温梯度约为 $1.3^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ 。现在安纳达柯盆地和俄克拉何马城地区的地温梯度在 $0.6-0.9^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ 之间。假若俄克拉何马城古生界地层在古生代时期的地温梯度为 $1.1^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ （ $2^{\circ}\text{F}/\text{百呎}$ ）并使用在图2中的曲线，作者断定：在密西西比纪末俄克拉何马城的中奥陶统生油岩还没有成熟，只有安纳达柯盆地深部在密西西比纪的某个时期才达到了成熟。在密西西比纪末俄克拉何马城的阿尔布克组中部接近成熟，而在安纳达柯盆地，在密西西比纪早期就已成熟。这样，密西西比纪是俄克拉何马城地区的第一次生油时期，对阿尔布克组的生油层来说，（生油）深度约大于1,624米至1,676米，而对中奥陶统生油层来说，深度约大于1,676—1,828米。

采用相似的方法对时代、深度和地温梯度进行分析也可断定：在安纳达柯盆地到二叠系末期深埋的密西西比生油层已经成熟，并生成了在俄克拉何马城油田中的油，但是，在地温梯度为 $2.3-2.8^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ 的条件下，在宾夕法尼亚纪时期的（地层）出露之前，这些地层（指密西西比生油层）在安纳达柯盆地还不能成熟。由于这些数值相对较高，可能安纳达柯盆地密西西比系页岩到密西西比纪末还未成熟，这样也就不能给俄克拉何马城的第一次生油提供油源。

在作者看来，这种地热史的分析基本上是康兰研究成果的应用。它与先前的二次生油假说理所当然的一致。

普遍适用的原则

与俄克拉何马城一样，只要符合下述条件，其他不整合面下的圈闭可以认为是有含油远景的（这些油来自不整合面下的生油岩层）这些条件是：

①不整合下部剖面中有足够的生油岩与储集层伴生。

②在受侵蚀前这些生油岩尚未达到热成熟。

③该生油岩以上的岩层有足以使不整合面下的生油岩热成熟的厚度（或一度有过这样的厚度）。

第一个条件的意义是清楚的。假如生油层要第二次生油，它们必须保存于不整合面以下。假如保存的生油岩在不整合面形成以前埋藏深度还达不到热成熟，因而（生油层中的）全部或大部分有机质都还未生成石油，那么第二个条件就可能达到。在不整合面处未受剥蚀，后来在仍未热成熟的情况下又被埋藏的潜在的生油岩厚度称为“保存窗”。当保存的生油岩以上的沉积岩总厚度是以使生油岩热成熟时就达到第三个条件，这个厚度等于位于生油层上面的保存窗中的厚度加上不整合面以上的上覆地层的和。

在剥蚀开始时，地质年令为10百万年或少一些的地层，在地温梯度为 $2^{\circ}\text{F}/\text{百呎}$ （ $1.1^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ ）的条件下，其保存窗的最大厚度可达4,267米；而当地质年令为20百万年，地温梯度为 $5^{\circ}\text{F}/\text{百呎}$ （ $2.8^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ ）或 $6^{\circ}\text{F}/\text{百呎}$ （ $3.3^{\circ}\text{C}/30\text{米}$ ）时，保存窗的厚度可能有1,372米厚（如象在苏门答腊那样）。对于给定地质年令的地层的保存窗的近似厚度可以用以下方法计算：用康兰（1974年）的图确定界限温度，接着用假定的地温梯度计算达到这一界限温度的深度，典型最大值（指深度 译者）可在1,524米到2,743米范围内，但厚度会小于这个最大值，因为在不整合处侵蚀掉了一部分地层。在不整合面下第二次生油所需的最小复盖层厚度也可以根据生油层埋藏所经历的地质时间从康兰的图求出界限温度，并用假定的地温梯度求出埋藏深度，即可得出上覆层厚度。象第一次生油一样，可能大多数情况下的埋藏深度范围都是1,524米到2,713米。但是不论是地质年令或是地温梯度的极端值都会使界限深度超出这个深度范围。

所以，总的来说，不整合面以下的油气聚集可以是几种情况中的任何一种情况（所造成的）：如果保存窗中包含了在不整合面以下的整个生油岩系，而且这些生油层只是在不整合面埋藏到很深处才达到成熟的话，那么保存窗中的生油层在剥蚀期以后生成的油可以是第一次生成的油。在不整合面以上附近较年轻一些的（生油层）在剥蚀期以后生成的油可以圈闭在不整合面以下的储集层中，而这种油可以代表第一次生成的油（在它以前没有更早生成的油），也可以代表第二次生成的油（第一次生成的油在圈闭被剥蚀后逸散掉了）。俄克拉何马城油田则是另外一种情况，该油田的油由不整合面以下的生油层二次生成，第一次在剥蚀期以前，第二次在剥蚀期以后。

俄克拉何马州和堪萨斯州的另外一些油田的不整合面以下奥陶系中的石油可能与俄克拉何马城油田的油同时以同样方式形成。

其他主要的不整合面下的油藏也很可能是不整合面下生油层第二次生油的结果。并必然是类似偶然情况的结果。另一方面，如果剥蚀太深而实际上没有留下保存窗，或者虽有保存窗但是没有足够的干酪根，那么就不能第二次生成油。另外，虽然有富含油干酪根的保存窗，但是埋藏的深度和时间不够，不能使干酪根向石油转化，也不能第二次生油。可以从上述几个条件中的任何一个未获满足来寻求对不整合圈闭没有油的解释，搞清不整合面下二次生成的油的生成和聚集的条件是否满足将会有助于今后对不整合油田的勘探。

摘译自《美国石油地质家协会会刊》，1976年，
第一期，115—122页

【张志根译，章本礼校】

对《俄克拉何马城油田的石油 来源于不整合面以下保存下来的生油层 的二次生油》一文的讨论

〔美〕 D·S·斯通

在一篇关于俄克拉何马城大油田油气起源的发人深省的论文中，韦伯借助关于石油生成的最低温度环境的最新地球化学概念来构成其假说。他假设目前俄克拉何马城油田前宾夕法尼亚系油藏中的原油是原地生成的，并提出：奥陶系阿尔布克组的生油层在不整合处未受剥蚀，后来在继续热成熟时再次被埋藏，在上面沉积了宾夕法尼亚系和二叠系地层以后，这些生油层由“保存窗”第二次生成石油。

对于韦伯关于在俄克拉何马城构造上石油早期运移、聚集和散失的说法，一般都没有太大的不同意见，不过，第一次生成的油的生油岩（奥陶系？志留系？泥盆系？密西西比系？）或重要性都搞不清楚，因为只是在不整合面处有沥青保存。显然，现在圈闭在宾夕法尼亚系底部不整合面以下的第二次生成的油只能在奥陶系地层被宾夕法尼亚系沉积埋藏以后才能聚集，因为俄克拉何马城油田的前宾夕法尼亚系油气是聚集在一个剥蚀圈闭之中（我们称“古潜山”——译者）。俄克拉何马城油田前宾夕法尼亚油藏中的气饱和度也表明：只有达到目前的埋藏深度，其聚集才能完成。然而，有充分理由相信该圈闭中的油是来源于宾夕法尼亚系，而不是奥陶系。韦伯关于热环境、地温梯度及埋藏深度的讨论虽然颇为有趣，但作为阿尔布克组原地生油的证据则不能令人信服。

证明宾夕法尼亚系（奇罗基组）页岩是俄克拉何马城油田奥陶系油藏中原油的生油层的最有力证据是地球化学。韦伯说他“同意熟悉油田开发的地质学家的观点：奥陶系和宾夕法尼亚系油有差别并且来源不同。”从现有的关于俄克拉何马城油田原油和水的化学资料来看，他接受这种观点并不明智。因为在韦伯所引用的资料中，同样项目的数据仍然存在着差异。要证实韦伯的说法，必须假定（他列举的）这些数据无商讨余地。这个结论主要是根据各种API度（比重）、油气比、颜色对比，及类似的总的性质等得出的，这些性质受取样方法、风化和油藏条件影响很大，并且在化学上不是基本的性质。因此毫不奇怪的是：与韦伯所相信的观点相反，对俄克拉何马城油田宾夕法尼亚系和前宾夕法尼亚系的原油和水所作的分析表明他们的化学性质极为相似。

图1是根据俄克拉何马城油田25个不同的原油样品的对比指数（CI）曲线绘出的。这些原油样品（表1）来自24个不同的生产层或带，分布于不同的深度和油田的不同部位，包括一些从东翼断层下盘取得的样品。

图1中对比指数值的狭窄范围反映了这些低硫、石蜡中间基原油的高度相似性。事

实上图 2 C 中所示的(曲线的) 包络线表明: 俄克拉何马城油田的宾夕法尼亚系 和前宾夕法尼亚系地层的 25 个原油样品在基本化学组成上的变化比在附近的中陆地区的油田, 相当的古生界生产层中取得的原油样品之间的变化还要小。看来只有米斯纳砂层的样品与其余样品的差异较大。这个样品的低沸点馏份的对比指数值高可以解释为是由于样品的风化而失去了轻的石蜡烃, 或是由于不同的生油层(伍德福德?) 生成的油在不整合面处与沥青混合而形成。

自然, 对比指数固然不象一些现代分析那样复杂。但是, 只要稍微考虑一下在储集层中石油性质在运移和运移后的变化(如热成熟、生物降解等)是常见的, 就可以看出所有俄克拉何马城油田原油的对比指数曲线的包络线特别狭窄表明它们有共同的油源。

由于考虑到再充实一些地球化学鉴定资料(来说明此问题)的必要性, 作者访问了一些主要的石油公司的地球化学家, 希望他们的研究对俄克拉何马城原油的起源提供一些补充依据。令人惊讶的是, 通过这些访问, 了解到没有对这个油田的岩石和原油进行过特别的现代地球化学研究。这就特别令人失望, 因为如果能对色谱和碳同位素分析、原油的钒 镍比值进行对比, 并结合俄克拉何马城油田生油层中的有机质的热变质研究就可能确定这些原油的来源。

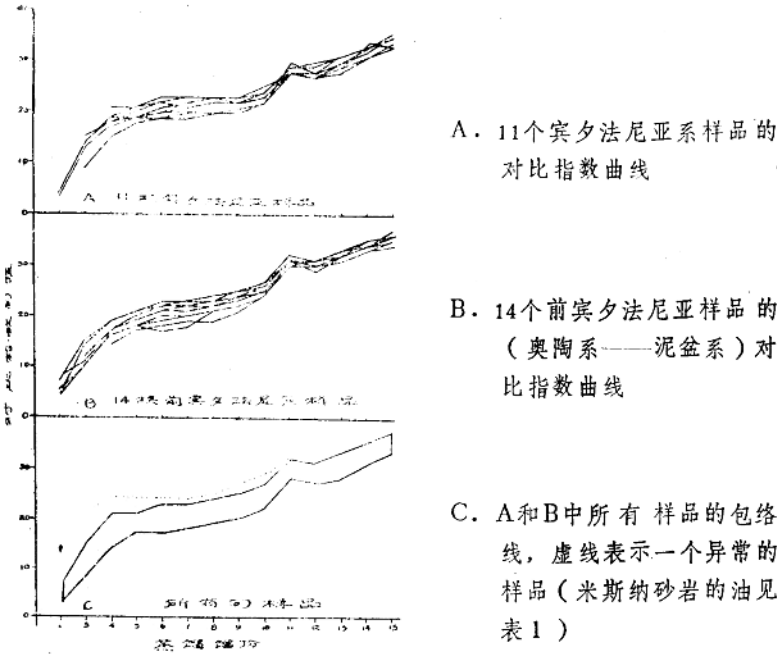


图 1 俄克拉何马城油田 25 个生产层的原油性质对比

表 1 俄克拉何马城油田原油分析数据

序号	样品号	产层名称	深度 (米)	比重	硫 (重量百分比)	总汽油和石脑油 (%)	残余物 (%)	第五馏份的对比指数
宾夕法尼亚样品								
1	38008	帕胡斯卡砂岩	902—906	0.7870	.11	47.0	8.7	21
2	38231	第二帕胡斯卡砂岩	926—1030	0.7870	.12	48.0	8.4	20
3	38277	霍维尔砂岩	1198	0.8179	.14	29.7	13.2	19
4	38007	第一唐卡瓦砂岩	1221—1226	0.8328	.17	24.6	19.0	21
5	38010	第三唐卡瓦砂岩	1052	0.7682	.10	49.1	6.1	19
6	38006	上莱顿砂岩	1420—1423	0.7909	.13	44.0	10.2	19
7	38282	莱顿砂岩	1497—1585	0.8260	.25	31.5	19.2	19
8	35311	钵状砂岩	1692—1709	0.8270	.16	27.1	15.1	19
9	32135	第一钵状砂岩	1759—1764	0.8280	.23	31.1	22.8	18
10	36023	克利夫兰砂岩	1952	0.8468	.28	24.7	28.3	18
11	38280	不整合砂岩	1981—2024	0.8358	.16	25.5	26.8	22
前宾夕法尼亚样品								
12	32204	米斯纳砂岩 (泥盆系)	1928—2059	0.8529	.17	19.5	28.4	24
13	32134	第三玛依灰岩 (泥盆系)	2018—2035	0.8299	.17	28.9	25.1	20
14	30001	底特利特砂岩 (奥陶系)	1953—1962	0.8299	.17	28.5	25.1	19
15	30388	辛普逊砂岩 (奥陶系)	1936—1987	0.8388	.17	26.5	29.2	18
16	31210	下辛普逊砂岩 (奥陶系)	1996—2008	0.7818	.14	51.0	17.6	18
17	29762	科莱因砂岩 (奥陶系)	1936	0.8299	.17	28.6	25.9	19
18	29760	硅质灰岩 (奥陶系)	1981	0.8299	.19	28.5	24.1	19
19	32100	斯库兰砂岩 (奥陶系)	1863—1955	0.8228	.15	28.8	26.3	21
20	32104	文勒耳砂岩 (奥陶系)	1959—2001	0.7758	.12	58.3	30.3	21
21	32109	约翰逊砂岩 (奥陶系)	1906—1932	0.8309	.17	28.9	25.4	20
22	32257	约翰逊砂岩 (奥陶系)	1945	0.8241	.14	31.0	23.3	19
23	30341	威尔科克斯砂岩 (奥陶系)	2013—2021	0.8309	.11	27.5	29.0	18
24	31209	阿尔布克砂岩 (奥陶系)	1815—1946	0.8348	.18	75.8	26.4	17
25	29766	阿尔布克灰岩 (奥陶系)	1993	0.8251	.16	31.9	24.7	21

除了原油对比数据, 其他方面在原油来源问题上也有重要意义。与韦伯所说的相反, 希尔等(1937)指出, 甚至前宾夕法尼亚系不整合面以上和以下的地层的产出水都极为相似(图2)。尽管这一相似性不直接与证明奥陶系储集岩的油来源于宾夕法尼亚系有关, 但它揭示了在某些地质时期可能存在着穿过不整合面而连通的情况。所有前宾夕法尼亚系的水的相似性当然与所解释的奥陶系储集层在油田各部位(东翼断层的两边)的流体相互连通相一致。该油田具有共同的油水界面同时油藏中的油的比重具分层性, 更说明了流体的连通性。

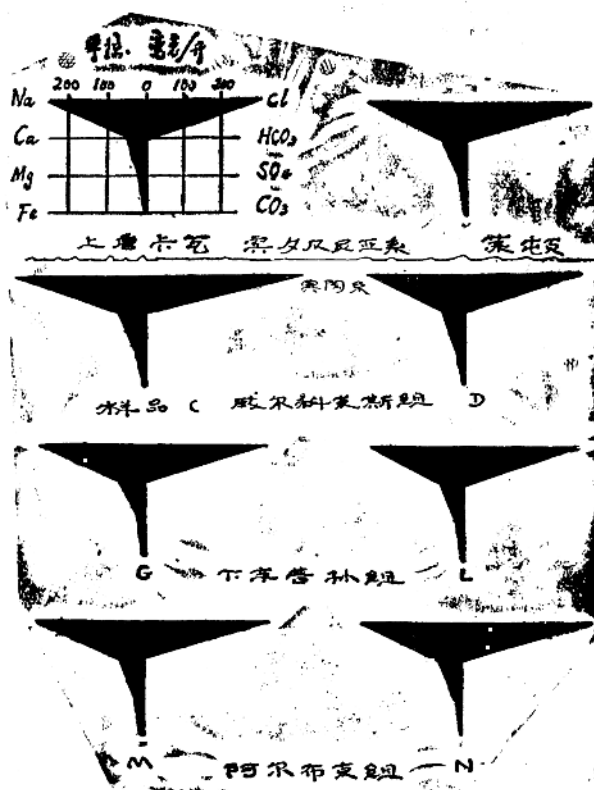


图2 俄克拉何马城油田宾夕法尼亚系和前宾夕法尼亚系几个水样的成分

在中陆地区, 宾夕法尼亚系和前宾夕法尼亚系的水动力系统之间一般有很大的压力差异, 这是另一个非常重要的因素。拉松(1971)的宾夕法尼亚系和奥陶系(水动力)系统的静水压图表明: 在落基山前沿附近宾夕法尼亚系的静水压面比奥陶系的高762米(相当于75.6公斤/厘米²), 在中堪萨斯隆起则要高305米(30.2公斤/厘米²), 在俄克拉何马州沿尼马哈古潜山带则要高0到152米(15.1公斤/厘米²)。已有的数据表明俄克拉何马城油田所有地层都有相当正常的静水压力梯度, 不过没有关于这个油田在发现时(1928)的原始井底压力的完全可靠的数据。尽管认为在俄克拉何马城或在尼马哈古潜

山带或中堪萨斯隆起的其他地方“发现时的压力”不会与石油运移时的压力一样，但宾夕法尼亚系对于一般欠压的前宾夕法尼亚系的相对超压与石油是从宾夕法尼亚系的生油层或储集层穿过不整合面向下运移，或穿过断层（即穿过俄克拉何马城东翼大断层）侧向运移是一致的。有理由说，长期暴露的前宾夕法尼亚系的“溶蚀型”油藏的碳酸盐岩在宾夕法尼亚沉积后应该是相对受压的。

很难接受以下观点：足够的未成熟油源物质（“干酪根”？）在压实、成岩、石化和反复的上升、侵蚀、埋藏、上升、侵蚀、埋藏（至少反复三次）后仍保存了下来，并且在约150百万年的期间内，在宾夕法尼亚系地层沉积以后生成了十亿桶石油。在密西西比纪末，在安纳达柯盆地南部阿尔布克组上面至少有3,000多米厚的岩石，有谁知道在奥陶纪末、志留纪末、泥盆纪末，或密西西比纪末，在（油气能）运移到俄克拉何马城油田来的范围内这些地层埋藏多深，温度是多少？如果接受韦伯关于由安纳达柯盆地侧向运移的说法，那么他的“第二次生成的”油（假定在安纳达柯盆地这些油真是在沉积了宾夕法尼亚系和二叠系以后由奥陶系岩石中生成的）就应该是“第五次生成”的油。作者不能接受这一观点。阿德勒指出：“宾夕法尼亚系的巨厚暗色泥岩是安纳达柯盆地——俄克拉何马州中部最重要的生油层。”而且，作者还没有在文献中见到沿俄克拉何马城古潜山或其他地方阿尔布克组含有重要的有机生油物质。

很有意思的是，沿尼马哈古潜山带和中堪萨斯隆起（古潜山带）宾夕法尼亚系以下被剥蚀的区域中重要的原生地层油气藏只存在于宾夕法尼亚系内。前宾夕法尼亚系地层中的油气藏基本上是削蚀型油藏（即古潜山油藏——译者）和构造油藏，而且几乎总是紧靠宾夕法尼亚系不整合之下。离不整合面远的前宾夕法尼亚系地层中没有地层油气藏，而且这些地层受到剧烈的风化意味着在剥蚀区内任何前宾夕法尼亚系油气藏都被破坏（只是偶尔有沥青残余）。在中堪萨斯隆起轴部，宾夕法尼亚系不整合之下的前寒武系基岩中有油藏。没有地质学家对这些油来源于宾夕法尼亚系生油层提出疑问。

结 论

根据俄克拉何马城油田许多生产层的油水化学分析资料，作者不同意前宾夕法尼亚系油藏中的原油来源于前宾夕法尼亚系地层的观点。韦伯的说法难于解释的是，与他的说法相反，俄克拉何马城油田的奥陶系油藏和宾夕法尼亚系油藏的原油在化学上并无差别，而且，看来在中陆地区大多数宾夕法尼亚系以下的削蚀圈闭中的油也并非基本上是有差别的。此外，不象中陆地区北部的奥陶系阿尔布克组或辛普逊组那样，宾夕法尼亚系奇罗基组黑色泥岩是良好的生油岩。俄克拉何马城油田中被泥岩所包围的宾夕法尼亚系油藏中的油是原地生成的油是没有怀疑的。

作者相信复盖在油藏之上的生油层生成的油穿过不整合面向下运移到下伏岩层是合乎道理的，这与侧向运移同样普遍。北美大陆最大的油气田普鲁德霍湾油田是一个削蚀圈闭，其中侏罗系与密西西比系储集层含油，资料表明其油来自复盖在不整合面上白垩系生油层。在超覆层系中这种向下运移也是重要的，在这种情况下作为生油层的海相页岩超覆在底砂岩之上。例如，在加利福尼亚州，油从中新统林肯泥岩运移到下伏的瓦奎罗斯砂岩；在怀俄明州，由中白垩系莫利页岩进入下伏的墨地砂岩。在中陆地区，宾夕法

尼亚系原油穿过断层向前宾夕法尼亚系储集层的二次运移也可能是一种起作用的机理。

在没有更高级的地球化学资料的情况下, 现有的资料明显有利于如下结论: 俄克拉何马城油田, 可能还有中陆地区的其它一些削蚀型油藏(即我们所称的古潜山油藏——译者)中的油是宾夕法尼亚系生成的。

摘译自《美国石油地质家协会会刊》,

1977年, 第4期, 第620—628页

【章本礼译, 胡济世校】

对《讨论》一文的答复

〔美〕G·W·韦伯

首先, 本人并不反对石油由上部的生油岩穿过不整合面向下运移的说法。显然, 在俄克拉何马城, 这种运移途径也是有可能的, 但同样还存在本人提出的在不整合面下生油并运移的可能性, 另找一些例子就可以充分地证明这一点。以下四个例子中关于保存窗的情况与我对俄克拉何马城的解释是一致的。

北海南部和格罗宁根附近的一些气田(总储量很大)的储集层为二叠——三叠系砂岩, 气藏被含有机质少的红层和蒸发岩所覆盖, 并不整合地与下伏的上石炭系含煤地层接触。在中生代时期, 在煤和碳质页岩达到很深的埋藏深度以后, 就生成了天然气(当然, 火成岩侵入也对这些地层加过热)。在这些气田中, 晚期成熟的不整合面以下的生气层为不整合面以上的储集岩提供了气源。

侏罗系储油的北海北部的油田(包括派波、布伦特、斯塔福约等特大油田)的油源为上侏罗系金默利吉页岩, 该页岩与其他老地层一起, 经历过强烈的断裂, 并经历了广泛的隆起和剥蚀。但是, 残留的页岩被白垩系和第三系地层所埋藏, 并生成了大量石油。在这些油田中不整合面以下的生油岩为不整合面以下的油藏提供了油源。

阿尔及利亚的哈西·迈萨乌德大油田可能与俄克拉何马城最为相似, 其中, 一套地台相层系(包括生油层)受到一次或多次剧烈的剥蚀, 并在以后的埋藏过程中生成大量原油, 仅一个油田(聚集在不整合面以下的寒武系储集层中)就蕴藏了250亿桶(39.7亿米³)石油。这里有一套较厚的古生界地层, 有寒武系和奥陶系砂岩及晚志留系黑色页岩和泥盆系地层。这些地层在泥盆纪上升并受到剥蚀, 后来又进一步受到海西造山运动的影响, 并受到了进一步的剥蚀, 致使哈西·迈萨乌德油田只剩下了寒武系地层, 在离油田最少也有40公里的地方残留有志留系地层。后来又发生了海西运动后期的断裂活动和广泛的火山活动, 最后该地区下沉并沉积了有机质贫乏的三叠系盐层和红层以及2,700米或更厚的更年青的地层。已肯定哈西·迈萨乌德油田的主要生油层是志留系地

层,并且肯定石油是在中生代和以后的时期第二次生成的,而第一次生成的油已在前三叠纪的剥蚀过程中散失。油在不整合面下运移了几十公里,最后进入哈西·迈萨乌德古潜山圈闭的寒武系储集层。与哈西·迈萨乌德在同一隆起上,并在其南南西方向80公里处的爱尔·阿格勒布——爱尔·加西油田一带也有相同的地层情况和志留系生油岩——寒武系储集岩关系,这表明保存窗生油在阿尔及利亚是普遍而重要的现象。

最后,储量约为70万亿呎³(19,800亿米³)的阿尔及利亚的哈西·墨耳气田为构造圈闭气田,储集层为下二叠——三叠系砂岩,上复盐岩和页岩盖层,很象北海南部的情况。未确定其生油层,但以“地下露头”形式(即不整合面以下的老地层露头——译者)分布在气田西南方向几英里处的黑色、一般含碳质的志留——泥盆系页岩可初步认为是其生气层。这与哈西·迈萨乌德和爱尔·阿拉勒布——爱尔·加西油田的情况很相似。显然,阿尔及利亚北部的志留系生油层在石炭系地层将其掩埋之前曾出露水面并部分受到剥蚀,然后在海西运动中又进一步变形并受到剥蚀,且部分被火成岩所覆盖,最后被非海相沉积物所埋藏。直到白垩系早期,即生油层沉积后275—300百万年,哈西·尔·墨耳构造才聚集天然气。

其实,阿尔及利亚早古生代地层在埋藏之前的120到150百万年时期内,曾经经历了压实、成岩、石化,而且在沉积时大概还经历过广泛的泛溢,露出水面,以及两次(或多次?)的侵蚀。但是,何以这些残留的(有机质)在埋藏后150百万年还足以生成大量的油气,为特大油田和世界第三位的大气田提供油(气)源。显然,出露和部分剥蚀的过程并不一定破坏克拉通地区沉积地层的油气生成能力,这是与斯通的观点相抵触的。看来,在评价现有油田(如俄克拉何马城油田)和未来的远景区时怀疑保存窗这一假说是不明智的。如果纠缠于不整合面下的油藏是“第二次生成”甚至还是“第五次生成”的话,就不能发现象哈西·迈萨乌德这样的大油田。

斯通还指出,不整合面以上的宾夕法尼亚系页岩相对于不整合面以下地层是超压的,尤其是在俄克拉何马城以西的地区是这样。不能认为不整合面以下的地层在埋藏以后一点也不发生进一步的侧向运移。重新发生的压实作用(可能还伴随有蒙脱石去水作用)会使不整合面以下地层中的压力上升,加强了位于不渗透的宾夕法尼亚系页岩盖层以下地层中的侧向运移,从而可使象俄克拉何马城这样的圈闭被不整合面以下生油层生成的油所填充;宾夕法尼亚系地层中的持续超压表明它和不整合面以下的地层似乎处于几乎完全分隔的水动力系统。在阿尔及利亚,地层被埋藏和因此而引起的压力上升肯定不能阻止在那里的不整合面以下发生大规模运移。因此斯通在压力方面的论据看来并不令人信服。

不整合面处的沥青碎屑和威尔科克斯砂岩的亲油性质表明,第一次生成的油已聚集在俄克拉何马城圈闭中,然后又散失了。特别是,阿尔布克组中的油很可能来自阿尔布克组的生油层,这是因为泥岩夹层会阻止油从其他生油层(如泥盆系的伍德福德页岩)“向下”运移。这种情况至少要持续到宾夕法尼亚纪的剥蚀把这套地层剥蚀之前,在剥蚀时期,伍德福德页岩生成的油在进入阿尔布克组内之前首先是逸散掉了。作者认为俄克拉何马城的奥陶系地层必定会有相当的生油能力,但也许斯通是正确的,他认为奥陶系不能产生大量油气,并且其他生油层(如伍德福德)对于不整合前油的生成更有意义。然而,如果油来自奥陶系,油就是从80公里外生成并向俄克拉何马城运移,如果是来自更年青、更浅且不广泛成熟的伍德福德页岩,油则要在约160公里外生成并向俄克

拉何马城运移。因此，这些地层在剥蚀期以后的埋藏过程中，其中余留下的不成熟部分变为成熟并在不整合面以下生油，由于在整个地层剖面中加热和成熟作用是向上逐步蔓延的，奥陶系和（或）伍德福德在上复的宾夕法尼亚系可以生油之前就可能已形成石油但未能进行运移（尽管伍德福德组生成的油在宾夕法尼亚纪的隆起和剥蚀之前不会运移到奥陶系油藏，在前宾夕法尼亚系地层发生倾斜和埋藏之后则这种运移就会更容易地进行。正如哈西·迈萨乌德油田那样，其油是从许多英里的远处，在不整合面下从志留系生油层进入寒武系油藏的）。于是，至少俄克拉何马城第二次生成的油的开头部分是来自不整合面以下的保存窗。如果斯通是对的，即那里发现的油是来自宾夕法尼亚系页岩，这就会提出这样的问题：在它之前的保存窗生成的油到哪里去了？

在俄克拉何马城圈闭中明显缺乏保存窗生成的油可以用几种说法来解释，不过不一定十分满意。最简单的一种可能也许是保存窗生成的油很少，但前述讨论表明，这主要是第一次生成的油，而第二次生成的油也很可能是相当多的。还有一个可能是这些油圈闭于别处而未到达俄克拉何马城的圈闭内，但如斯通所述，关于下倾方向有地层圈闭的油的证据很少，何况宾夕法尼亚系以后的构造为油向圈闭运移提供了更好的通道。再一个可能性就是保存窗的油比重高，被后来进入圈闭的低比重宾夕法尼亚系原油取代而离开圈闭，但只有假定油在圈闭中不能混和，这一假设才能成立。

最有价值的假说是在大多数保存窗生成的油在运移时，俄克拉何马城构造尚未形成或者幅度很低，这使得运移着的油穿过俄克拉何马城往北或东北运移到其他圈闭中去或直接成为油苗而散失，但随着后来闭合幅度加大，仍捕集了大量后来生成的宾夕法尼亚系油。在宾夕法尼亚纪的大部分时期（至少到帕胡斯卡组沉积前），俄克拉何马城构造是持续发育，沉积也在持续进行。以下可能是有的：由于构造发育缓慢保存窗中生成的油运移经过俄克拉何马城（但未被圈闭或只少量被圈闭——译者），因而以后可以圈闭更多的宾夕法尼亚系生成的油。

总的来说，斯通关于宾夕法尼亚系超压力会完全阻止流体在下伏的不整合面以下的地层中运移的观点看来太简单化了，他的关于保存下来的这些地层的生油能力会因剥蚀而破坏的说法在哈西·迈萨乌德高产大油田面前显然是站不住脚的，哈西·迈萨乌德油田就是由相似的不整合面下的生油层提供的油源的。

我的文章发展了以下观点：不整合面以下的地层中可以残留作为油源物质的有机质，它埋藏到深处以后就可生成石油，俄克拉何马城油田看来就是保存窗生油的一个明显的例子。尽管这还不那么清楚。如果其油来自奥陶系和（或）伍德福德组，那么地球化学方面的依据就是令人信服的。如果认为油是来自宾夕法尼亚系，那么就不能解释为什么在不整合面下丰富的生油层莫名其妙地就不能生成烃类，而第二次生成的油又损失了。然而，不管那种情况很清楚的是：与斯通所说的相反，这种保存窗可以形成大油田，即使不算俄克拉何马城油田，阿尔及利亚和北海也是很好的例子。

摘译自《美国石油地质家协会会刊》，1977年，

第4期，第628—630页

【章本礼译，胡济世校】