海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析

李天义[a,c]，何 生[b,c]，杨 智[a]

（中国地质大学 a.研究生院；b.资源学院；c.构造与油气资源教育部重点实验室，武汉 430074）

摘 要：从大量的研究实例出发，分析了海相优质烃源岩的发育环境及其主要控制因素。海相优质烃源岩的形成是原始生产力、沉积速率、海平面变化、上升流、海底热液活动、冰期、沉积环境和保存条件等因素综合作用的结果，当各种因素达到最优配置时，则有利于海相优质烃源岩的形成；在特定时期、特定的沉积环境中，某一种或两种因素可以影响或改变其他因素，成为影响海相优质烃源岩形成的最关键因素；对海相优质烃源岩发育环境的评价应该综合考虑该环境下烃源岩发育的广泛程度和烃源岩有机质丰度两方面因素。

关键词：海相烃源岩；控制因素；原始生产力；保存条件；沉积环境

中图分类号：TE122.111 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7849(2008)06-0063-08

我国海相地层分布面积大，层系厚，油气资源潜力巨大。近年来，海相地层油气勘探在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地都取得了令人骄傲的成就，但与广泛分布的海相地层相比，还需要进一步加强这方面的研究工作。在海相地层油气勘探过程中遇到的最直接的问题就是确定最有利勘探目标的位置，我国海相盆地特别是南方海相盆地受后期构造影响较大，不同阶段的原形盆地在纵向上叠置、横向上拼合强烈[1]，烃源岩年代老、埋藏深、热演化程度高，地表露头风化严重，部分传统评价指标已失去评价意义，基于传统有机地球化学方法评价烃源岩的理论与方法面临巨大的挑战。因此，加强海相烃源岩发育控制因素的分析，从烃源岩发育控制因素及沉积环境出发，分析优质烃源岩的时空分布特征，能够为寻找海相优质烃源岩、确定最有利的勘探靶区提供科学依据。

海相优质烃源岩的形成是原始生产力[2-4]、沉积速率[5-6]，保存条件[7-10]、海平面变化[4,11-12]、上升流[13-14]、海底热液活动[15-16]、冰期[2,17-18]和沉积环境[6,19-20]等因素综合作用的结果。笔者拟引用大量的近代研究实例来说明各种影响因素对海相烃源岩形成的控制作用，并分析海相烃源岩的主要形成环境。

1 原始生产力

国内外许多学者[2-4,21-22]认为原始生产力是控制海相沉积物中有机碳含量及烃源岩形成的最重要因素。

Clavert[21]早在1987年就指出海相沉积物中高有机碳含量是原始生产力高的结果，即使在非还原环境中如有足够丰富的有机质也可以形成高有机碳含量的海相沉积，因为丰富的有机质在其分解时可以消耗大量的氧气，造成水底缺氧并形成还原环境。张水昌等[4]进一步证实沉积体中原始生产力高不仅有利于增加烃源岩的有机碳含量，而且过剩有机质的氧化作用还会造成水体底部缺氧，有利于有机质的保存，这对于烃源岩的形成相当重要，比较而言保存条件就变得不是那么重要，特别是对气源岩。Huc[22]对Nansicaa-Images航次期间沿Luderit湾的横断面所取的3个长40 m活塞岩心的研究发现，这些深海海底富有机质的沉积物并不像纹泥层或底层水界面处底栖动物群缺失那样处于完全缺氧的状态。深海钻探75航次在532站位也观察到相似的情况，岩心样品中广泛发育的潜穴反映有生物扰动，在整个取心的第四系层段都可见到底栖生物的迹象。这表明，对于有机质含量充分、可列为源岩类的沉积物的堆积，严格的缺氧条件并不是必需的，而真正对其起决定作用的应该是原始生产力[22]。近年来又有成果表明[23-24]，近代黑海和地中海中腐泥型有机质的形成环境可能不是缺氧环境。在黑海盆地氧化环境下形成的沉积物的有机碳含量比缺氧环境下形成的高，类似的现象在加利福尼亚湾[25]及阿门

收稿日期：2008-01-08 编辑：禹华珍

基金项目：中国石油化工股份有限公司重大综合基础地质研究项目“中国南方中上扬子大陆构造与海相油气前景”；国家自然科学重点基金项目“中上扬子区域盖层形成演化与有效性评价”(40739904)；中国地质大学研究生学术探索与创新基金项目“中扬子海相多旋回叠合盆地构造抬升—剥蚀重建及热史动态研究”(CUGYJS0811)

作者简介：李天义(1982—)，男，现正攻读矿产普查与勘探专业博士学位，主要从事海相油气成藏体系与成藏动力学研究。

边缘海[26]等地区也有发现。

对原始生产力研究的另外一个方面是通过研究能够反映原始生产力高低的元素与沉积岩中有机质丰度之间的关系来研究原始生产力对烃源岩形成的控制作用。磷元素是生物生息繁衍的必须营养元素，磷参与生物的大部分新陈代谢活动，海水中磷的分布明显受生物作用控制，生物死亡后其遗体中所含的磷将随生物体一起沉积于水底。因此，磷酸盐矿物和海绿石是鉴别具有高有机质产率的重要标志，高含磷沉积地层也就反映了高原始生产力。因此，通过分析沉积物中元素磷的丰度，就可以了解沉积物形成时水体中原始生产力的高低。陈践发等[6]通过研究华北北部中、新元古界磷元素与有机碳质量分数的关系，发现青白口系下马岭组磷质量分数与有机碳丰度有较好的对应关系(图 1)。近年的研究[27-29]发现生源 Ba 通量与有机碳通量具有惊人的相似性，而且 Ba 保存下来以后可以长期稳定，因此 Ba 元素也能够反映海洋原始生产力的高低。腾格尔等[30]通过研究鄂尔多斯盆地南部部分烃源岩层 Ba 元素分布的特征，发现 w(Ba)与总有机碳质量分数 w(TOC)呈较好的对应关系(图 2)。从图 1,2 中可以看出，烃源岩有机碳质量分数与原始生产力呈明显的正相关，即原始生产力越高，有机碳质量分数越高。

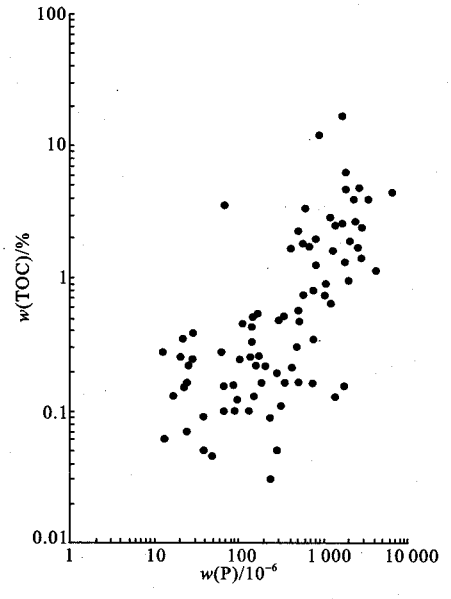

图 1 华北中、新元古界磷元素与有机碳质量分数关系[6]

Fig. 1 Plot of P vs. the total of organic carbon in Middle-Upper Proterozoic sediments in the North China

2 沉积速率

陈荣书等[31]指出沉积速率大一般有利于有机质的迅速埋藏，受破坏越少，有机质保存下来越多。但沉积速率的增大，只有与原始有机质供应成比例增长时才能保持较高的有机质丰度，否则沉积物堆积速率过大会稀释有机质，反而使有机质丰度降低。Rullkotter 等[32]指出在海相沉积中富含有机碳的沉积物分布区域的沉积速率相对均较小，而在有机碳质量分数低的区域则表现出很高的沉积速率。腾格尔等[30]通过对鄂尔多斯盆地的研究认为往往沉积速率相对较小，低能、缺氧的沉积环境下形成的烃源岩的 w(TOC)>0.2%；而 w(TOC)<0.2%的层段则多为浅水、快速沉积。Lynne 等[5]通过对大洋沉积物中有机碳质量分数与沉积速率之间关系(图 3)

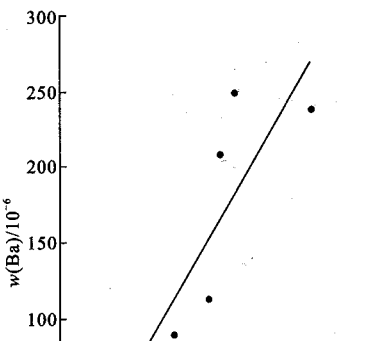

图 2 鄂尔多斯盆地南部 w(Ba)与 w(TOC)关系[30]

Fig. 2 Plot of barium vs. the total of organic carbon in the south of Ordos Basin

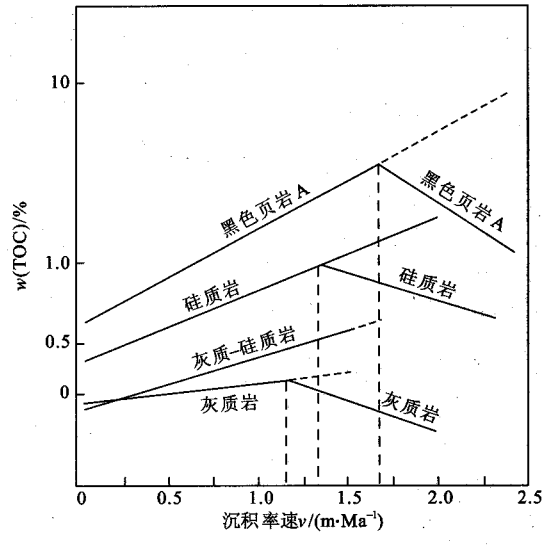

图 3 有机碳质量分数与沉积速率关系[5]

Fig. 3 Relationship between the total of organic carbon and the sedimentary rate

的研究发现，在大洋沉积物中，黑色页岩和灰质岩中有机碳质量分数随沉积速率的增大都存在一个先增大后减小的过程；对于硅质-灰质岩，随沉积速率的增大会出现两种不同的变化趋势：第一种变化趋势是其有机碳质量分数一直增大，他们认为这主要是由于沉积环境原始生产力增大的结果；第二种变化趋势与黑色页岩和灰质岩的特征相似，其有机碳质量分数随沉积速率的增大呈先增大后减小的变化趋势。因此，在原始生产力一定的情况下，随沉积速率的增大，沉积物中有机碳质量分数一般先增大后减小。陈践发等[6]做了类似的模拟实验，结果表明沉积物中有机质质量浓度随 $CaCO_3$ 注入频率的增大存在一个先增大后减小的过程(图 4)。蔡进功等[33]研究发现海水中的有机质主要以微颗粒状或被黏土矿物表面吸附等形式沉淀，沉积速率太慢会延长有机质在氧化环境中消耗、分解的时间，不利于水体底部缺氧环境的形成，有机质被大量消耗，使沉积岩中的 w(TOC)降低；但沉积速率太快会造成大量无机颗粒的稀释，也会使沉积岩中的 w(TOC)降低。

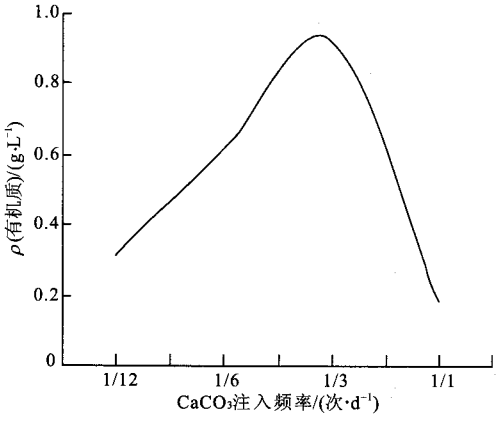

图 4　$CaCO_3$ 注入频率与有机质质量浓度模拟关系[6]

Fig. 4　Modeling relationship between the sedimentary rate of $CaCO_3$ and the abundance of organic matter

3　海平面变化

海平面的升降变化对烃源岩的控制作用主要通过改变沉积环境的状态来实现[4,11-12]。海平面的相对变化可以改变沉积环境的原始生产力、水动力条件及氧化还原条件等。相对海平面上升可引起水体分层，并在海水底部造成水体缺氧，使沉积界面处于氧化—还原界面之下，该环境的形成，一方面，可抑制底栖生物的发育，降低有机质的氧化分解速率，提高有机质埋藏量和保存率；另一方面，在厌氧细菌作用下，沉积有机质中类脂组分被优先保存和富集而使有机质类型倾向于腐泥型，有机质丰度增高。赵宗举等[39]对塔里木盆地的研究发现，海相盆地中沉积有机质含量变化与相对海平面—沉积水体深度变化之间存在良好的对应关系；最大海侵时期也就是沉积水体总体变深的时期，所形成的沉积物中有机质含量相对最高。这可能是最大海泛期所造成的沉积环境更趋于还原环境，从而更有利于沉积有机质的保存。高志前等[40]认为海相烃源岩在纵向上的发育受海平面升降变化的控制。田景春等[41]通过对中国南方震旦系—二叠系海相地层的野外地质调查，认为最大海泛期对应了中国南方烃源岩的最佳发育时期。这与蔡勋育等[42]的研究结果相似。而中国南方早二叠世和晚二叠世末期发生了较大规模的海侵[43]，与中国南方上、下二叠统区域性分布的烃源岩也有较好的对应关系。

4　上升流

上升流对有机质丰度高的烃源岩形成的控制作用主要通过改变环境的原始生产力和保存条件来实现，一方面，上升流所带来的底部的营养盐有利于生物的发育，从而较大幅度地提高原始生产力；另一方面从底层带来的底层水氧含量低，有利于缺氧环境的形成[13-14]。近年来对上升流的研究主要是针对现代上升流和古代上升流沉积物展开的。

Riley 等[44]研究发现在现代浅海上升流区，海水中溶解的硅高达 50 μg /L(非上升流区仅 14 μg / L)，大洋上升流区为 100(大西洋)～175(太平洋) μg/L，并含有大量营养盐(主要为硝酸盐和磷酸盐)，从而造成上升流系统内部生物过量发育，生物特别繁盛，甚至在水体底部形成缺氧环境，沉积富有机质的黑色页岩和灰岩。纳米比亚近海本格拉海流控制地区是当今最多产上升海流系统的地区，在不同的站位对与该上升海流系统共生的海底沉积物进行了取样，样品分析结果表明浅水海台区(＜150 m)的表层沉积物中总有机碳的平均质量分数为 9%，在本格拉海流最活跃和最稳定的 Luderitz 湾和 Walvis 湾，总有机碳质量分数最高能达到 25%[22]。高志前等[40]对比了上升流区和远洋黑色页岩的有机碳质量分数，发现在存在上升流活动地区(如秘鲁和阿曼的大陆边缘)的现代海洋沉积物中，通常具有较高的总有机碳质量分数，一般大于 3%；而在现代远洋沉积物中，其总有机碳质量分数的平均值通常不到 0.5%。于炳松等[45]指出塔里木盆地北部下寒武统底部的黑色页岩形成于一种受上升流共同影响的次氧化条件下的大陆边缘环境中，上升流将盆地深处的大量有机质带到陆棚环境中沉积，同时引起生物繁盛，并使该环境处于缺氧状态，使得有机质得以很好地保存。吕炳全等[46]通过对

古生代扬子地块东南缘地质剖面的分析，认为该区新元古界富有机质沉积物是在古特提斯海中上升流作用下形成的，上升流水体中富营养盐和 SiO_2，在古生代低纬度的扬子地块东南缘生物大量繁殖，引发缺氧事件，从而形成上述硅质和磷质沉积以及有机质丰富的烃源岩、石煤和磷矿层等；他们同时发现区内烃源岩的有机质丰度与上升流的强度呈正相关关系。

5 海底热液

对现代海底热流体的调查研究发现，从浅海到深海广泛存在海底热液活动，这些热液活动与海相优质烃源岩的形成有重要关系[15-16]。在海底热流体活动区，有大量的非光合作用生物群落，生物繁盛，并具有较高的密度和多样性。Karl 等[47]通过对 Galapagos 热流体活动区的研究，指出与热流体活动有关的生物群落的生产力是海洋表面生产力的 3.9 倍。而热流体活动区的生物生产力一般与热液活动强度呈正比关系[48]。同时热流体会在距离该流体喷口上方 200～400 m 深的水体中，造成与热流体还原物质密切相关的还原菌繁盛[49]，它们对深海沉积物中有机物的保存有着极其重要的贡献。

As、Hg、Pb、Zn、P、Cu、Zn、Co、Ni、V 等微量元素往往是海底热液沉积物中的富集元素。因此，研究海底热液活动对烃源岩形成的影响主要通过研究与海底热液有关的微量元素及其组合与 w(TOC) 之间的关系来实现。孙省利等[50]指出华北新元古界青白口系下马岭组地层中的 w(TOC) 与海底热流体活动有关的微量元素 P、Cu、Zn、Co、Ni、V、Ba 及其组合 Co＋Ni、Cu＋Pb＋Zn 呈正相关关系；该地区地质地球化学特征同时也表明，在下马岭组富有机质沉积层段形成时，盆地拉张沉降作用强烈，海底热流体活动与之密切相伴，因此海底热流体活动可能是导致该富有机质沉积层段形成的重要因素之一。近年来通过对塔里木盆地下寒武统底部玉尔吐斯组富有机质沉积层的精细研究发现，该岩层中的 w(Al)/w(Al＋Fe＋Mn) 和 w(Si)/w(Si＋Al＋Fe) 值与海底热水沉积环境的比值相近；同时该层段中明显富集 As、Hg、Pb、Zn、Cu、Co、P、V、Ba 等微量元素，w(Ba)/w(Sr) 值分布在 21.2～158.1 之间，硅质岩的 w(LREE)/w(HREE) 值为 1.01～3.56，以上数据均显示该层段具有明显的海底热水沉积特征[51]。而最为重要的是该组地层有机碳质量分数与表征海底热水活动的地球化学参数 w(Ba)/w(Sr) 值等具有明显的正相关性，这又表明海底热水活动对沉积有机质的富集有明显的控制作用[51]。

6 冰 期

近年来关于冰期对烃源岩形成的控制作用的研究主要是通过对比冰期沉积物中有机碳质量分数与非冰期沉积物中有机碳质量分数[17-18]来完成，同时对冰期有机质富集的原理进行了较为深入的分析研究。

目前，已经观测到最后一期冰期在太平洋和大西洋所形成有机质的沉积记录（图 5）[2]。其中 L1 是加拉帕哥斯群岛西侧观测到的近代冰期与间冰期沉积物中有机碳质量分数分布曲线，图 5 中冰期所形成的沉积物中有机碳质量分数明显超过间冰期；L2 是巴拿马盆地中心南部地区的取样结果，冰期沉积物中有机碳质量分数的增加更加明显[2]。在非洲西北部海岸[52]、几内亚盆地[53]及赤道西太平洋地区[54-55]等地也发现了类似的特征。国内学者[20,55]分析研究了南沙海区南部近 30 ka 来沉积物中有机碳质量分数及堆积速率的变化曲线，堆积速率曲线的变化趋势明显表现为冰期远大于全新世，其中冰期有机碳堆积速率是全新世的 1.5～2.4 倍。

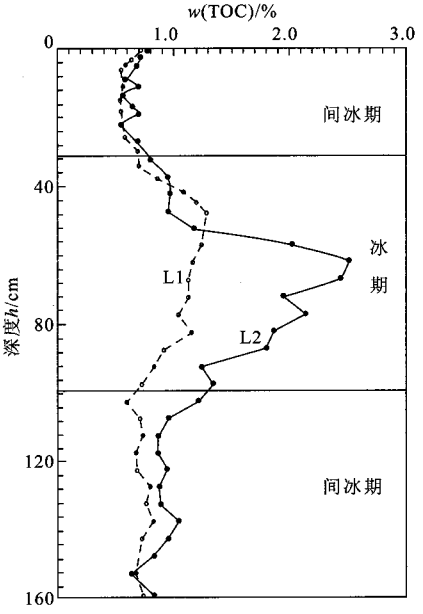

图 5 近代冰期与间冰期沉积物中的有机碳质量分数分布[2]

Fig. 5 Distribution of the organic carbon with depth in Late Pleistocene glacial and inter-glacial

地质历史上发生过多期冰川事件，奥陶纪晚期发生的大陆冰川是全球最大规模的冰川事件之一。从石油地质学角度看，这种大陆冰川活动也具有重大而深远的意义。在晚奥陶世的大陆冰川发生时，高纬度区的气温首先下降，降温后海水下沉并随着洋流循环，使大范围的海洋底部水温下降。当时大

量繁盛于表层海水中的生物不断地死亡,变为"尸体雨"沉至海底,由于底部水温低、氧化缓慢,有利于沉积有机质在水底的保存、积累。一般认为冰期沉积物中有机质埋藏量的增加是保护条件较好的结果,近年来的研究表明冰期生产力比间冰期有较大幅度的增加[20,54,56-57]。事实上,不管是何种因素,冰期对烃源岩形成的控制作用已经很明显。笔者通过资料对比发现,与冰期相对应的中、晚奥陶世(尤其是晚奥陶世)是地质历史上最重要的烃源岩形成时期之一,它在中国塔里木板块、扬子板块、华北板块及华南地区等都形成了重要的区域性烃源岩。

7　沉积环境

沉积环境对海相烃源岩的形成起着重要的控制作用,沉积环境可以综合反映原始生产力、沉积速率及保存条件等多方面的因素,能决定烃源岩的有机质类型、丰度等,因此国内外学者对沉积环境的研究较多[6,19-20]。

C&C 公司[19]通过对世界范围内 202 个海相油气田的研究结果表明,台内盆地相(烃源岩所占百分比)(42.6%)、陆棚相(25.2%)烃源岩最为发育(图 6);其次为深水陆棚相(6.9%),陆棚—盆地过渡相(4.5%)烃源岩发育相对较少。结合到具体的有机质丰度看(图 7),陆棚—盆地过渡相的平均有机碳质量分数最高,超过 8.0%;其次为台内盆地相、陆棚相、水进体系 TST 等,平均在 3%左右;三角洲相和深水陆棚相的有机碳质量分数相对较低,不到 2%。C & C 公司[19]通过综合对比烃源岩发育程度和有机质丰度,并结合更为具体的沉积环境认为前缘斜坡、淹没台地及深水盆地等有利于海相烃源岩的发育,而受限制的台地内部及近岸碳酸盐岩台地

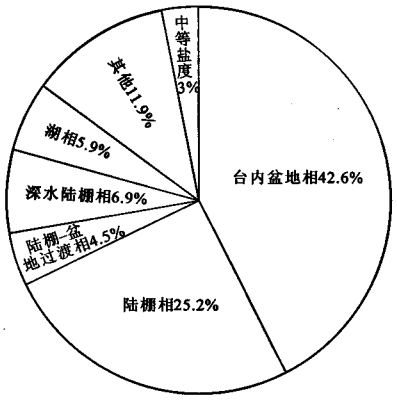

图 6　世界海相烃源岩发育环境分布统计[19]

Fig. 6　Distribution of marine source rock formation environments in the world

边缘的烃源岩发育条件一般,开阔台地和台地边缘则相对不利于海相烃源岩的发育。

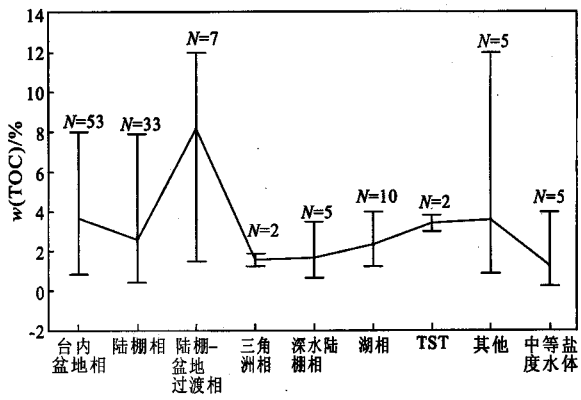

图 7　世界不同沉积环境烃源岩有机质丰度统计表[19]

Fig. 7　Statistical abundance of organic matter in different sedimentary environments in the world

笔者分析了中扬子地区海相烃源岩发育的主要环境。中扬子地区海相沉积表现出基底控制性、沉积多旋回性,主体性质稳定且层序不对称性明显,具有克拉通盆地的特点,沉积环境相对稳定[58]。从表 1[59]可以看出,在中扬子地区烃源岩发育的主要环境是广海陆棚相和台地相,其次为斜坡相,盆地相发育最少;结合不同沉积环境下所形成烃源岩的平均有机碳质量分数[w(TOC)]看,盆地相最高(2.6%),其次为开阔台地相(0.58%),广海陆棚相(0.18%)、局限台地相(0.13%)和滨岸碎屑岩相(0.10%)相对较低,台地边缘礁相(0.03%)最低。

表 1　中扬子地区海相烃源岩沉积环境统计表[59]

Table1　Formation enviroments of marine source rocks in the Middle Yangtze Area

地层	分布范围	沉积相
下二叠统	中扬子地区均有分布	斜坡相、开阔台地相
下志留统	鄂西地区 远安、当阳地区 黄冈、咸宁、武汉地区	广海陆棚相
上奥陶统	湘西北地区	广海陆棚相
	通山地区	陆棚盆地相
下寒武统	宜昌、利川、咸丰一带	台前斜坡相、广海陆棚相
	湘西北、岳阳、通山地区	广海陆棚相、台前斜坡相
	咸宁、通山地区	斜坡相、局限台地相
上震旦统	巫山、京山、长阳地区	局限台地相
	湘西北地区	台前斜坡相、局限台地相

通过上述资料的对比可以看出,陆棚相、台地相烃源岩发育最为广泛;而盆地相发育的烃源岩有机质丰度最高。因此,评价烃源岩发育环境时,要同时考虑该环境条件下烃源岩发育的广泛程度和有机质质量分数两方面因素。

8 保存条件

保存条件是海相优质烃源岩形成的重要控制因素，前人对此进行了大量的研究工作[7-10]。Hunt[34]认为尽管有许多环境可形成高有机质生产率，但有机质要保存下来并形成富有机质沉积岩则需要一定的条件，一般水底缺氧环境有利于有机质的保存。而Jones[35]则引入了沉积相的概念，认为海相碳酸盐岩的生烃潜力主要取决于有机相，即沉积环境的氧化还原程度，他认为在沉积阶段和早期成岩阶段若为氧化环境的相带则有机碳含量就低，若为还原环境的相带则能够形成生烃潜力较高的细粒沉积物。赵文智[36]认为海相烃源岩的形成受原始生产力影响，但更为重要的是受保存有机质的良好环境和场所影响。

国内外学者从多方面论证了保存条件对烃源岩形成的影响作用。例如，陈践发等[6]分析了我国南海现代沉积物中氧指数与有机质丰度之间的关系，发现近代海洋沉积物中的有机碳质量分数与氧指数呈明显的负相关。杨瑞东等[37]通过对现代海洋沉积物和古代海相沉积岩的氧指数与有机碳质量分数关系的对比研究，认为氧化还原程度是海相沉积物中有机质富集的重要因素之一。苗建宇等[38]认为鄂尔多斯盆地中发育于深湖—半深湖相、相对还原条件下的烃源岩大多数为灰黑色泥岩，有机质丰度高、类型好，而发育于其他相对氧化条件下的烃源岩则一般为灰色—灰绿色泥岩，有机质丰度较低、类型较好。腾格尔等[30]指出，在缺氧条件下，沉积有机质的原始组成经历了强烈的微生物改造，蛋白质、碳水化合物等优先降解，使有机质向富氢、富脂方向转化，形成类型好、生烃潜力高的油气母质；而在相对氧化环境中有机质不易保存，即使有少量有机质被保存下来，也不存在"优先降解"，因此即使形成烃源岩，也倾向于形成腐殖型烃源岩。

从形成模式看，受保存条件影响，烃源岩的形成模式主要有两种：①在水深的情况下，水体自然分层，即表层水体主要为氧化带，原始生产力高；中间为过渡带；下面自然分层而形成还原环境。在这种情况下，表层水体高生产力产生的丰富有机质，容易在硫化氢丰富的强还原水底中保存下来。Hunt[34]认为在这种沉积模式下，底层还原水体与海底接触面积的大小对形成烃源岩的规模也有一定影响，这种模式主要发育于欠补偿盆地相台缘或陆缘斜坡相等环境。②主要发育在蒸发泻湖或闭塞海湾相沉积环境中，在这种高温、高盐环境下海水富集营养盐，生物链短，适应这种环境的菌藻类大量繁盛，死亡后沉积在相对强还原的水底，保存完好，有利于形成有机质丰度高、类型好的烃源岩。

9 结 论

海相烃源岩的形成是原始生产力、沉积速率、保存条件等因素综合作用的结果。在一定的沉积环境中，在各种因素综合作用并达到最优配置的情况下，最有利于烃源岩的形成。

在一定的沉积环境中，往往有一种或两种是最重要的控制因素。以上升流为例，上升流能同时改善沉积环境的原始生产力和保存条件，改善烃源岩的形成条件，促进海相优质烃源岩的形成。

研究发现，中扬子地区陆棚相、台地相烃源岩发育最为广泛；而盆地相发育的烃源岩有机质丰度相对较高；因此，在评价优质海相烃源岩发育的环境时，要同时考虑该环境下烃源岩发育的广泛程度和所形成烃源岩的有机质丰度两个方面；广泛发育烃源岩的沉积环境中所形成的烃源岩有机质丰度不一定最高；只有同时考虑这两方面因素，才有利于进一步缩小靶区，推动勘探工作的进行。

参考文献：

[1] 徐思煌，袁彩萍，梅廉夫，等. 叠合盆地成藏流体源类型、演化及控藏意义——以中国南方中、古生界海相地层为例[J]. 地质科技情报，2007，26(2)：59－64.

[2] Pederson T F, Calvertse S E. Anoxia vs. productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rock? [J]. *AAPG Bulletin*，1990，74：454－466.

[3] Calvert S E，Pedersen T F，Naidu P D, et al. The organic carbon maximum on the continental slope of the eastern Aribian sea[J]. *Jounral of Marine Research*，1995，53：269－296.

[4] 张水昌，张宝民，边立增，等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地学前缘，2006，12(3)：39－48.

[5] Lynne E, Ibach J. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments [J]. *AAPG Bulletin*，1982，66：170－188.

[6] 陈践发，张水昌，孙省利，等. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. 地质学报，2006，80(3)：467－472.

[7] Demaison G J，Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *AAPG Bulletin*，1980，64：1 179－1 209.

[8] Tyson R V. The genesis and palynofacies characteristics of marine petroleum source rocks[M]// Fleeta J. *Marine petroleum source rocks*. Oxford: Geological Society Special Publication，1987：47－67.

[9] Tyson R V, Pearson T H. Modern and ancient continent shelf anoxia: An overview[M]// Tyson R V，Pearson T H. *Modern and ancient continental shelf anoxia*. Oxford：Geological Society Special Publication，1991：1－24.

[10] Hartnett H E，Keil R G，Hedges J I，et al. Influence of oxygen exposure time on organic carbon preservation in continental margin sediments[J]. *Nature*，1998，391：572－574.

[11] Mann U, Stein R. Organic facies variations，source rock potential and sea level changes in cretaceous black shales of the

quebrada ocal upper magdalena valley, Colombia[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81: 556－576.

[12] Middelburg J J, Calvert S E, Karlin R. Organic-rich transitional facies in silled basins: Response to sea-level change[J]. *Geology*, 1991, 19: 679－682.

[13] David Z P, Paul K L. An upwelling model for the Phosphoria sea: A Permian, ocean-margin sea in the northwest United States[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86: 1 217－1 235.

[14] Parrish J T. Upwelling and petroleum source beds, with reference to Paleozoic[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66: 750－774.

[15] Vanaover C L, Humphris S E, Fornari D, et al. Biogeography and ecological setting of Indian Ocean hydrothermal vents[J]. *Science*, 2001, 294: 818－823.

[16] Bernd R T. Composition and origin of hydrothermal petroleum and associatedlipids in the sulfide deposits of the Rainbow Field (Mid-Atlantic Ridge at 36°N)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 2 275－2 294.

[17] Mulle P J, Erlenkeuser H. Glacial-interglacial cycles in ocean producivity inferred from organic carbonate contents Eastern North Altanic sediment cores[M]// Thiede J, Suess E. *Coastal upwelling*: Part B. New York: Plenum Press, 1983: 713－720.

[18] 贾国东，彭平安，房殿勇，等. 南沙海区南部近 30 ka 来的古生产力记录[J]. 科学通报，1998，43(18)：2 005－2 008.

[19] C & C Corparation. *Carbonate reservoirs*[M]. [S. l.]: [s. n.], 1998.

[20] 梁狄刚，张水昌，张宝民，等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘，2000，7(4)：534－547.

[21] Calvert S E. Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in the marine sediments[M]// Brooks J, Fleet A J. *Marine petroleum source rocks*. London: Geological Society Special Publication, 1987: 137－152.

[22] Huc A Y. 近海深水环境中的有机质沉积作用：对第四纪沉积物的探讨[J]. 文凤英，译. 海相石油地质，2001，8(4)：16－17.

[23] Morris R J. The formation of organic-rich deposits in two deep-water marine environments[M]// Brooks J, Fleet A J. *Marine petroleum source rocks*. London: Geologic Society Special Pulation, 1987: 153－166.

[24] Calvert S E, Bustin R M, Pedersen T F. Carbon accumulation rates and the orgin of the helocene sapropel in the Black Sea [J]. *Geology*, 1987, 15: 918－921.

[25] Calvert S E, Bustin R M, Pedersen T F. Lack of evidence for enhanced preservation of sedimentary organic matter in the oxygen minimun of the gulf of California[J]. *Geology*, 1992, 20: 692－695.

[26] Pederson T E, Shimmield G B, Prince N B. Lack of enhanced preservation of organic matter in sediments under oxygen minimum on the Oman margin[J]. *Geochemica at Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 545－551.

[27] Bishop J K B. The barite-opal-organic carbon association in oceanic particulate matter[J]. *Nature*, 1988, 332: 341－343.

[28] Francois R, Honjo S, Manganini S J, et al. Biogenic barium fluxes to the deep sea: Implications for paleoproductivity reconstruction[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(2): 289－303.

[29] Dymond J, Suess E, Lyle M, et al. Biogenic Barium fluxes in the deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(2): 163－181.

[30] 腾格尔，刘文汇，徐永昌，等. 高演化海相碳酸盐烃源岩地球化学综合判识——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 中国科学：D 辑，2006，36(2)：167－176.

[31] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉：中国地质大学出版社，1986.

[32] Rullkotter J Z. Organic matter: The driving force for early diagenesis[C]// Schulz H D, Zabel M. *Marine geochemistry*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999: 129－172.

[33] 蔡进功，徐金鲤，杨守业，等. 泥质沉积物颗粒分级及其有机质富集的差异性[J]. 高校地质学报，2006，12(2)：234－241.

[34] Hunt J M. *Petroleum Geochemistry and Geology*. 石油地质专业英语[M]. 陈红汉，李纯泉，译. 武汉：中国地质大学出版社，2005.

[35] Jones R W. Comparison of carbonate and shale source rocks [M]// Palacas J G. *Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonnate rocks*. Tulsa, Oklahoma USA: AAPG, 1984: 191－221.

[36] 赵文智. 中国海相石油地质与叠合含油气盆地[M]. 北京：地质出版社，2002.

[37] 杨瑞东，朱立军，王世杰，等. 贵州寒武系底部碳同位素负异常的地层学和生物学意义[J]. 地质学报，2005，79(2)：157－165.

[38] 苗建宇，赵建设，李文厚，等. 鄂尔多斯盆地南部烃源岩沉积环境研究[J]. 西北大学学报：自然科学版，2005，35(6)：771－776.

[39] 赵宗举，周新源，郑兴平，等. 塔里木盆地主力烃源岩的诸多证据[J]. 沉积学报，2005，26(3)：10－15.

[40] 高志前，樊太亮，李岩，等. 塔里木盆地寒武系、奥陶系烃源岩发育模式及分布规律[J]. 现代地质，2006，20(1)：69－76.

[41] 田景春，陈洪德，张翔，等. 凝缩段特征及其与烃源岩的关系——以中国南方海相震旦系、中三叠统为例[J]. 石油与天然气地质，2006，27(3)：378－383.

[42] 蔡勋育，韦宝东，赵培荣. 南方海相烃源岩特征分析[J]. 天然气工业，2005，25(3)：20－22.

[43] 左景勋，童金南，赵来时. 中国南方早三叠世岩相古地理分异演化与板块运动的关系[J]. 地质科技情报，2003，22(2)：29－34.

[44] Riley T P, Skirrow G T. 化学海洋学[M]. 崔清晨，译. 北京：海洋出版社，1981：405－410.

[45] 于炳松，王黎栋，陈建强，等. 塔里木盆地北部下寒武统底部黑色页岩形成的次氧化条件[J]. 地学前缘，2003，10(4)：545－550.

[46] 吕炳全，王红罡，胡望水，等. 扬子地块东南古生代上升流沉积相及其与烃源岩的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质，2004，24(4)：29－35.

[47] Karl D M, Wirsen C O, Jannasch H W. Deep sea primary production at the Galapagos hydrothermal vents[J]. *Science*, 1980, 207: 1 345－1 347.

[48] Haymon R. Volcanic eruption of the mid-ocean ridge along the East Pacific Rise crest?: Direct submersible observation of seafloor phenomena associated with an eruption event in April [J]. *Earth Planetary Science Letter*, 1993, 119: 85－101.

[49] Lein A Y. Role of bacterical chemosynthesis and methanotrophy in ocean biogeochemistry[J]. *Geochemistry International*, 1993, 309: 87－104.

[50] 孙省利，陈践发，刘文汇，等. 海底热水活动与海相富有机质层形成的关系——以华北新元古界青白口系下马岭组为例[J]. 地质论评，2003，49(6)：588－595.

[51] 陈践发,孙省利,刘文汇,等.塔里木盆地下寒武统底部富有机质层段地球化字特征及成因讨论[J].中国科学:D辑,2004,34(增刊):107-113.

[52] Muller J W, Evlenkeuser H, Grafenstein R V. Glacial-interglacial cycles in ocean productivity inferred from organic carbon contents in Eastern North Atlantic sediment cores[M]// Thiede J, Suess E. *Coastal upwelling*. Part B. New York: Plenum Press,1983:365-398.

[53] Morris R J,Carteny M J,Weaver P P E. Sapropelic deposits in a sediment from the Guinea Basin, South Atlantic[J]. *Nature*,1983,309:611-614.

[54] Lyle M D. Climate forced organic carbon burial in equatorial Atlantic and Pacific oceans[J]. *Nature*,1988,335:529-532.

[55] 张江勇,汪品先,成鑫荣,等.赤道西太平洋晚第四纪古生产力变化:ODP807A孔的记录[J].地球科学:中国地质大学学报,2007,32(3):303-312.

[56] 贾国东,彭平安,房殿勇,等.南海南部约30 ka来沉积有机质的生物输入特征[J].海洋地质与第四纪地质,2001,21(1):7-11.

[57] Shen G T,Dunbar R B,Colgan M W,et al. EI Nino and little ice age effects on upwelling in the eastern tropical Pacific[J]. *Chemical Geology*,1988,70:198.

[58] 周雁,王成善,陈洪德,等.中扬子区海相沉积盆地性质研究[J].地质科技情报,2002,21(2):13-18.

[59] 陈开远.中下扬子地区成油气地质条件类比及选区评价[R].北京:中国地质大学,2003.

The Marine Source Rock Formation Conditions and Control Factors

LI Tian-yi[a,c], HE Sheng[b,c], YANG Zhi[a]

(a. *Graduate School*; b. *Faculty of Earth Resources*; c. *Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: The formation of the marine fine source rocks are controlled by primary production, sedimentary rate and preservation together. This paper first analyses the main factors for marine source rocks in the order of the sediment organic matter formation, sediment and preserve; and then introduces the impersonality factors such as the sea level change, uplift flow, oceanic heat flow and glacial age which could influence the formation and distribution of the marine source rocks and could change into key factors at the special epoch and special environments. Finally it discusses the sedimentary environments for the marine source rocks. The research results indicate that: ① the formation of the marine source rocks is the result of several factors, with one or two as the key factor which can influence or change other factors; ② evaluation of the sedimentary environments for the marine source rocks should consider both the development of source rocks under this environment and the organic content.

Key words: marine source rock; control factor; primary production; preservation; sedimentary environment