

中下扬子地区二叠纪缺氧环境研究

吴胜和 冯增昭 何幼斌

(石油大学,北京)

提 要 在中下扬子地区二叠纪尤其是孤峰期和大隆期,缺氧环境十分发育,形成了“黑色页岩—薄层硅岩—纹层状石灰岩”的缺氧沉积组合。本区二叠纪缺氧环境的形成与当时的气候、水温、水体能量、海底地形和上升洋流有着密切的关系。根据放射虫生态、相序、沉积特征及与现代缺氧环境的对比分析,探讨了本区二叠纪缺氧环境的古水深。缺氧沉积可成为有利的生油气源岩,而不同的缺氧沉积类型可形成不同类别的生油气源岩;研究表明,本区二叠系具有良好的生油气条件。

关键词 缺氧环境 上升洋流 古水深 油气源岩

第一作者简介 吴胜和 男 30岁 副教授 沉积学 储层地质学

在中下扬子地区的二叠系中,特别是在孤峰组和大隆组中,缺氧沉积十分发育。作为一种在缺氧水体中的沉积物,可能成为有利的油气源岩。因此,对缺氧沉积进行研究,不仅对岩相古地理的恢复,而且对石油天然气的勘探,都具有十分重要的意义。

1 缺氧沉积的特征

本区二叠纪特殊的海洋地质条件,导致了不同地区不同时期出现了不同的海水含氧条件,从而出现了含氧环境(aerobic environment)和缺氧环境(anoxic environment)的分异。根据含氧量还可将缺氧环境进一步分为贫氧环境(dysaerobic environment)和无氧环境(anaerobic environment)^[1]。在本区二叠纪不同含氧条件的沉积环境中,形成了不同的古生物组合和岩石组合(详见表1)。本区二叠系缺氧沉积,除具有一般缺氧环境的沉积特征(如底栖生物稀少或缺乏、浮游生物丰富、岩石层薄且色暗、泥页岩发育等)之外,还具其独有的特征:

(1)岩石类型除黑色页岩外,薄层硅岩亦十分发育,另外还有暗色纹层状石灰岩,形成了“黑色页岩—薄层硅岩—纹层状石灰岩”的缺氧沉积组合。

(2)磷含量高(尤其在孤峰组中)。磷主要以磷结核形式产出,有的层位高达20~30%。磷结核一般呈扁椭球形,结核中含 P_2O_5 2~30%,一般为10%,局部地区形成小型工业矿床。另外,Mn、Ni、U、Cu等元素异常富集。

(3)有机质丰富。泥页岩中残余有机碳含量为0.68~3.68%,平均为2.42~3.18%;石灰岩中残余有机碳含量可达2.7%,甚至硅岩中残余有机碳含量亦可达1.31%。

表1 中下扬子地区二叠纪缺氧环境沉积特征

Table 1 Sediment characteristics of anoxic environments of Permian in the Middle and Lower Yangtze Region

| 沉积环境 | | 缺氧环境 | | 含氧环境 |
|-------|------|-----------------|-------------------|--|
| | | 无氧环境 | 贫氧环境 | |
| | | 深水盆地 | 较深水斜坡-盆地 | |
| 水体含氧量 | | <0.1ml/l | 0.1~1ml/l | >1ml/l |
| 古生物特征 | 底栖生物 | 缺乏 | 缺乏 | 底栖生物发育,生物个体大。珊瑚、藻类、腕足类、软体类、棘皮类、苔藓类、海绵水螅等繁盛 |
| | 表栖生物 | | 常见体小壳薄的腕足类、双壳类等 | |
| | 底内生物 | 放射虫、菊石发育 | 常见菊石、偶见放射虫 | 偶见菊石 |
| | 浮游生物 | 缺乏 | 偶见-常见 | 强烈 |
| 岩石特征 | 颜色 | 黑色、灰黑色 | 深灰色、黑灰色 | 浅灰、灰、深灰色 |
| | 层理 | 薄层、页状为主,少见中层 | 中层为主,次为薄层 | 厚层、块状为主,次为中层,少见薄层 |
| | 岩石类型 | 薄层硅岩、泥页岩、泥质石灰岩 | 泥页岩、石灰岩、似层状硅岩、硅岩 | 石灰岩、白云岩、泥页岩、砂岩、粉砂岩、煤岩 |
| | 其它 | 有机质丰富、磷含量高、见黄铁矿 | 有机质较丰富、磷含量较高、见黄铁矿 | 含有机质,但大部分被氧化破坏 |

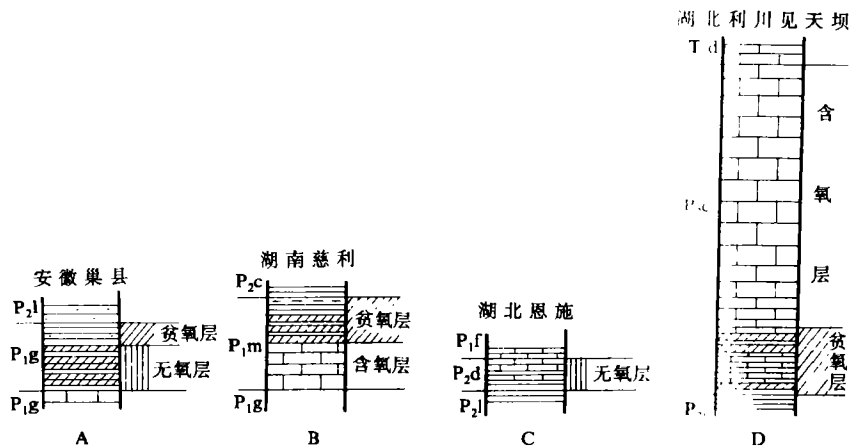


图1 典型剖面孤峰组和大隆组缺氧沉积纵向分布特征

- A. 安徽巢县孤峰组,下部为无氧沉积,上部为贫氧沉积; B. 湖南慈利茅口组(相当于孤峰组),下部为含氧沉积,上部为贫氧沉积; C. 湖北恩施大隆组,全组均为无氧沉积; D. 湖北利川见天坝长兴组(相当于大隆组)底部为贫氧沉积,中、上部为含氧沉积

Fig. 1 Vertical distribution of anoxic sediments of Gufeng and Dalong Formations of Permian at several typical sections

2 缺氧沉积的分布

缺氧沉积在二叠系各组均有分布,但以孤峰组和大隆组最为发育。根据 23 条基干剖面
和 55 条辅助剖面,编绘了孤峰组和大隆组的缺氧沉积分布图(图 2、3)。

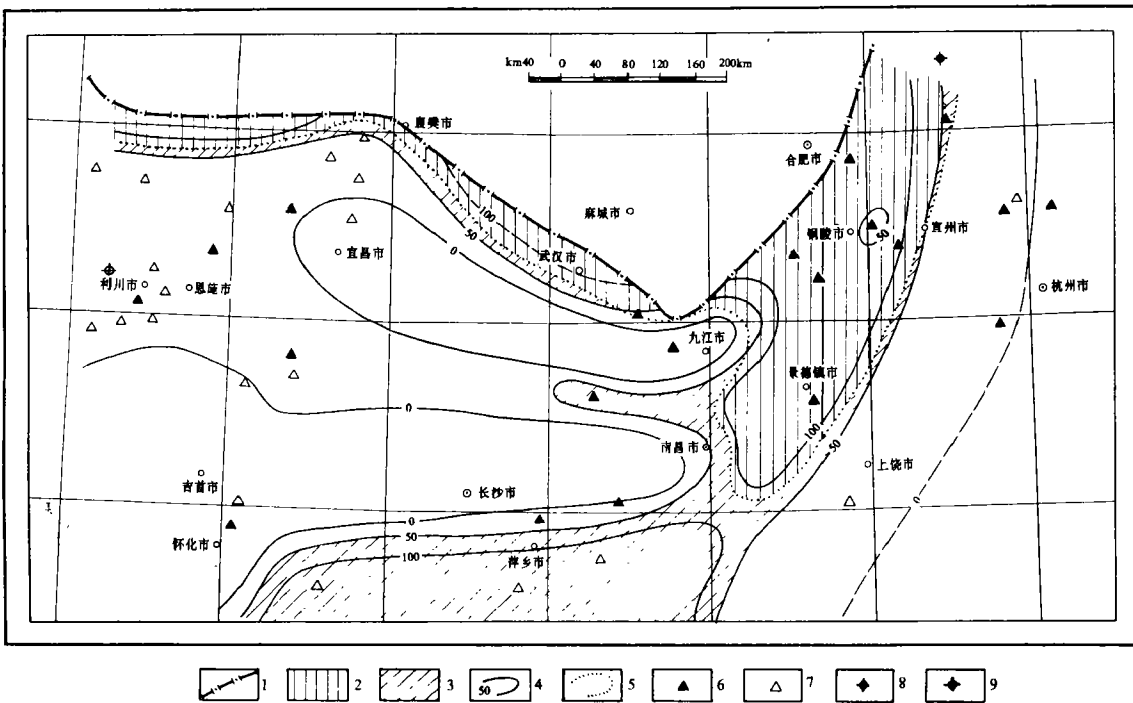


图 2 中下扬子地区二叠系孤峰组(茅口组)缺氧沉积分布图

1. 板块界线 2. 无氧沉积分布区 3. 贫氧沉积分布区 4. 缺氧沉积含量(%)等值线
5. 无氧沉积与贫氧沉积分界线 6. 基干露头剖面 7. 辅助露头剖面 8. 基干钻井剖面 9. 辅助钻井剖面

Fig. 2 Sketch map of anoxic sediments of Gufeng Formation of Permian
in the Middle and Lower Yangtze Region

孤峰组的缺氧沉积十分发育,其分布亦有一定的规律。在下扬子及其以南地区,缺氧沉积主要发育于其西北部,且大部分为无氧沉积;东南部缺氧沉积较少(含量低于 50%),其类型主要为贫氧沉积;自东南向西北,缺氧沉积含量增加(从 0~100%),缺氧沉积类型从贫氧沉积变为无氧沉积(图 2)。岩相古地理研究表明^[2],自东南向西北,古地理单元依次为碎屑滨海—斜坡—盆地。在中扬子及其以南区,缺氧沉积在平面上呈“三带”分布(三个“缺氧沉积带”与两个“含氧沉积带”交互)(图 2),其中北带(中扬子北缘地区)既发育无氧沉积,又发育贫氧沉积,且愈往北无氧沉积愈发育;中带的缺氧沉积类型为贫氧沉积,其含量一般小于 50%;南带主要发育贫氧沉积,且愈向南含量愈高,大部分地区贫氧沉积含量达 100%。这种分布格局充分反映了中扬子地区孤峰期“二台三盆、台盆相间”的古地理格局。

大隆组的缺氧沉积亦十分发育,它广泛分布于本区北部,局部分布于中扬子南部地区(图3),这种分布格局十分清楚地反映了当时沉积环境的分异,即北部为统一的缺氧盆地和斜坡,中部及下扬子东南部为广阔的含氧环境(碳酸盐台地和碎屑滨海),中扬子南部地区为贫氧盆地。系统的岩相古地理研究已经证明了这一点。

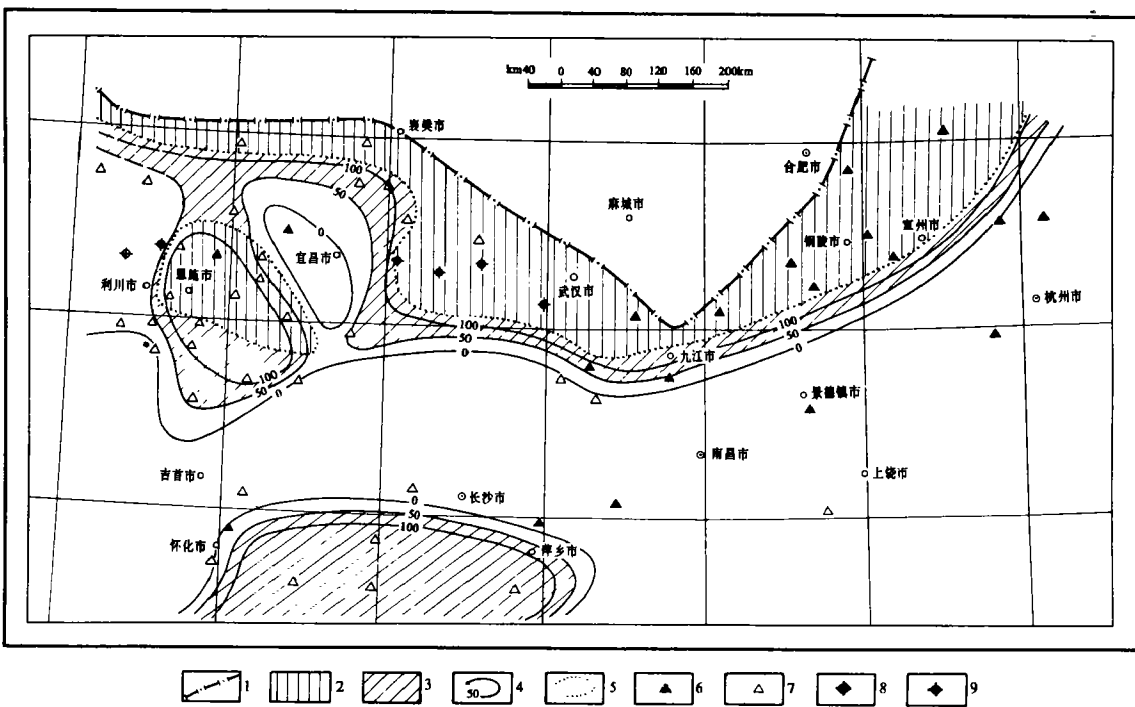


图3 中下扬子地区二叠系大隆组(长兴组)缺氧沉积分布图

1. 板块界线 2. 无氧沉积分布区 3. 贫氧沉积分布区 4. 缺氧沉积含量(%)等值线
5. 无氧沉积与贫氧沉积分界线 6. 基干露头剖面 7. 辅助露头剖面 8. 基干钻井剖面 9. 辅助钻井剖面

Fig. 3 Sketch map of anoxic sediments of Dalong Formation of Permian in the Middle and Lower Yangtze Region

3 缺氧环境的形成原因

缺氧环境的形成原因很多,但从本区二叠纪的具体情况来看,缺氧环境的形成与当时的气候、水温、水体能量、海底地形和上升洋流有着密切的关系。

3.1 气候、水温、水体能量及海底地形的影响——停滞缺氧成因

在二叠纪,本区处于低纬度热带地区^[3],表层海水温度高,季节温差小,水体能量低,这一方面导致表层混合水体较薄,另一方面导致水体垂向混合作用弱,即表层含氧水体下沉幅度不大而难以与深层水体混合。同时,本区台、盆相间的海底地形在一定程度上限制了横向水体的广泛交换。这样,就使较深层水体供氧不足和氧含量急剧降低,从而形成半封闭型的

停滞缺氧环境。这种机理是本区二叠纪陆表海内部形成缺氧环境的主要原因。

3.2 上升洋流的影响

低纬度地区上升洋流的活动是本区形成缺氧环境的重要因素。从古地理格局来看,本区处于低纬度地区^[3],又位于当时古陆(华夏古陆)之西北,且与外海相通。从现代上升洋流的形成和分布规律来看,这类地区十分有利于上升洋流的发育,如在纳米比亚西海岸和秘鲁西海岸,上升洋流导致了近岸陆棚长达 700~1000km 的狭长缺氧环境^[4]。本区二叠纪表层浅水中生物异常丰富,缺氧沉积中有机质富集、磷含量高、硅质生物尤其是放射虫化石发育,均表明了当时上升洋流的存在。上升洋流一般为贫氧但富含营养物(磷酸盐和硝酸盐类)和硅质的海流,它可促使表层水域中的生物高度繁盛,这些生物遗体沉至水底增加了深水环境中的耗氧条件,从而在上升洋流之下形成缺氧环境。

在有利的气候、温度及上升洋流影响的条件下,海水深度是决定缺氧环境存在与否的最直接因素。在碳酸盐台地和碎屑滨海,因水体较浅,海水与大气混合作用强,海底处于含氧环境;而在较深水的斜坡和盆地,由于前述两种原因,水体中供氧不足或耗氧过多,从而形成缺氧环境。本区二叠系各组缺氧和含氧沉积的分异正是在不同水体深度条件下形成的。根据上述分析,我们建立了本区二叠纪缺氧环境的沉积模式(图 4)。

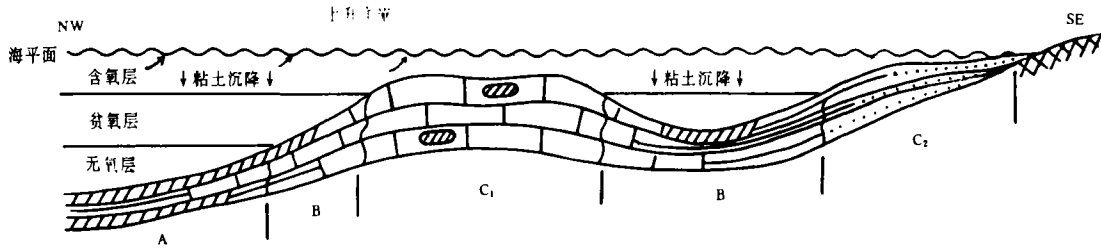


图 4 中下扬子地区二叠纪缺氧环境沉积模式

- A. 无氧环境(深水盆地): 硅质生物和薄层硅岩发育,有机质丰富,泥质沉积发育,碳酸盐沉积少;
 B. 贫氧环境(较深水盆地和斜坡): 硅质生物与钙质(浮游和底内)生物共生,有机质较丰富,泥质沉积发育,有碳酸盐沉积;
 C. 含氧环境: C₁ 碳酸盐台地: 钙质生物大量繁盛,碳酸盐沉积发育,具硅质团块;
 C₂ 碎屑滨海和三角洲: 陆源碎屑沉积发育,海陆生物共生

Fig. 4 Sedimentary model of anoxic environments of Permian in the Middle and Lower Yangtze Region

4 缺氧环境水体深度的探讨

关于本区二叠纪海域的水体深度,许多学者进行了探讨和研究。不少学者根据放射虫硅岩的产出认为二叠纪海域的深度可达碳酸钙补偿深度(CCD)之下^[5,6,7]。我们认为,本区缺氧环境的沉积水体不会很深,并未达到 CCD 深度。下面,从放射虫生态、相序和沉积特征,以及现代缺氧环境的水深来探讨本区二叠纪缺氧环境的古水深。

放射虫硅岩是本区二叠纪缺氧环境的特征岩性,其分布甚广,几乎在本区所有的缺氧盆

地中,都能见到放射虫的踪迹。放射虫是硅质浮游生物,其生长发育要求丰富的养料、足够的硅质和适宜的水体环境,而并不要求水深。虽然现代的放射虫软泥主要分布在较深的环境,如深海沟,但在我国东海陆架上亦有放射虫的分布。麦克布赖德和福克(Mcbride and Folk, 1979)甚至认为意大利侏罗系放射虫岩可以形成于潮坪环境⁽⁸⁾。本区二叠纪放射虫的发育得力于特定的有利条件,即活跃的上升洋流为放射虫的生长提供了丰富的养料,海水中丰富的硅质(上升洋流所携带的硅质以及火山物质的海解和准平原化陆地的化学风化作用所形成的硅质)为放射虫的发育提供了丰富的物质基础。然而,层状的放射虫硅岩仅发育于缺氧环境,而在滨海带、碳酸盐台地和台缘带等含氧环境中从未出现,这说明放射虫硅岩的发育与缺氧环境有着密切的关系。在缺氧环境中,钙质底栖生物难以生长,而硅质生物则因缺少竞争对手而得以繁盛;另一方面,缺氧环境中安静的水体有利于浮游生物的沉降,而水体中氧含量低则有利于硅质生物的保存。由此可见,放射虫硅岩的发育并不要求很深的水体,它与碳酸盐补偿面(CCD)没有必然的联系;在养料和硅质供应充分的条件下,放射虫在缺氧环境中即可得以很好的发育和保存。

从本区缺氧沉积相序及其特征来看,缺氧环境的水体深度不是很大。相序分析表明,缺氧沉积(包括放射虫硅岩)与滨岸三角洲碎屑岩呈过渡关系;另外,在薄层硅岩中,虽然缺乏大型钙质底栖生物,但却保存部分钙质浮游生物(如菊石)和一些小型钙质底内生物(如双壳类、腕足类等),说明本区二叠纪缺氧环境的水体不深,至少没有达到 CCD 的深度。

二叠纪时的中下扬子海主体为陆表海,其北部具有陆棚边缘的性质,并与外海相通,且受到上升洋流的影响,其古地理条件及海水缺氧机理与现代纳米比亚西海岸和秘鲁西海岸十分相似。在纳米比亚西海岸和秘鲁西海岸由上升洋流引起的缺氧环境中,贫氧层底部深度一般为 100m,很少超过 200m,而无氧层则分布在 100~500m 的深度范围内。甚至在低纬度地区的开阔海洋中,缺氧环境中的贫氧层底部深度一般不大于 300m⁽⁴⁾,而在上升洋流的影响下,其深度可上升到 100m 左右⁽⁹⁾。因此我们推测,本区二叠纪的贫氧环境深度可能大多小于 100m,而不大于 300m,无氧盆地深度则一般大于 100m,但尚未深至 CCD 深度。当然,由于古今气候及海洋化学条件的差异,上述数值可能不很准确,但其数量级则是基本正确的。

5 缺氧环境与油气源岩的形成

缺氧环境的一个重要特征是沉积物中有机质丰富,这与缺氧条件下有机质得以很好地保存有很大的关系。在本区二叠纪海域,由于有利的海洋物化条件及上升洋流的影响,海洋水体中生物十分发育。但在含氧环境的海水中形成的丰富的原始有机质因生物的进食(浮游进食、底栖进食和食泥生物进食)和细菌的降解作用而大大减少;而在缺氧环境中,海底水层的氧含量很低,钙质生物活动和喜氧细菌受到抑制,缺氧水体中及海底沉积物中的有机质得以良好的保存。地球化学分析资料表明,缺氧环境中形成的暗色石灰岩和泥页岩均可作为有利的生油气岩。根据沉积环境及其含氧条件我们将二叠系生油气岩分为三类:

I 类生油气岩:形成于无氧盆地环境。由于沉积水体中溶解氧十分稀少,十分有利于有机质的保存和演化,从而形成良好的生油气岩。这类生油岩包括泥页岩和石灰岩,其中以泥

页岩为主。本区二叠系泥页岩生油气岩最厚可达 80 多米,主要分布于湖北北部地区、湘鄂西地区、江西景德镇地区和下扬子地区;石灰岩生油气岩主要分布于鄂西地区,厚度达 30m 以上。

Ⅱ类生油气岩:形成于贫氧盆地和斜坡环境。由于沉积水体中溶解氧较为贫乏,较有利于有机质的保存和演化,从而形成较好的生油气岩。这类生油气岩亦以泥页岩为主,石灰岩次之。本区二叠系泥页岩生油气岩最厚可达 180m 以上,广泛分布于本区南部地区,另外在中扬子北缘亦有少量分布;石灰岩生油气岩最厚达 70 多米,主要分布于本区局部地区和湘鄂西地区。

Ⅲ类生油气岩:形成于含氧台地和滨岸环境。在此环境中,生物十分繁盛,原始有机质丰富。但由于水体中溶解氧含量多,故大部分有机质遭受了氧化破坏。尽管如此,仍保存有一定的残余有机质,从而亦可形成生油气岩。这些生油岩亦包括暗色泥页岩和石灰岩,但以石灰岩为主。石灰岩生油气岩主要形成于浅水台地中,在各组均有分布,但以栖霞组最为发育,且在区内分布范围广,厚度一般为 100~350m,最大可达 485m。泥页岩生油气岩主要形成于滨海静水环境,如三角洲平原沼泽,主要分布于本区南部,具体为湘中赣西地区和杭州—苏州地区的龙潭组和堰桥组,厚度为 50~200m,最大可达 225m。另外,在沼泽环境中形成的煤亦有一定的生气能力,主要生成煤成气。

从上可知,本区二叠纪缺氧环境发育,油气源岩厚度大,分布范围广,生油母质良好,有机质转化程度高,因而具有良好的生油气条件。川东鄂西地区长兴组(相当于大隆组)天然气和浙北煤山龙潭组原油的产出,以及本区多处发现的油气苗和沥青,均证明了这一点。

参 考 文 献

- [1] Kammer, T. W., Brett, C. E. and Boardman, D. R., 1986, *Lethaia*, 19(2): 109~121.
- [2] 冯增昭,何幼斌,吴胜和等,1991,中、下扬子地区二叠纪岩相古地理。北京:地质出版社。
- [3] 张正坤,1984,中朝地块与扬子地块在古生代末期是太平洋古陆的一部分。中国地质科学院院报,第九号。地质出版社。45~54。
- [4] Demaison, G. J. and Moore, G. T., 1980, *A. A. P. G.* 64(8): 1179~1209.
- [5] 童玉明,周祖勋,1985,鄂东南下二叠统茅口组放射虫硅质岩的成因初探,沉积学报,第3卷,第1期,67~74页。
- [6] 孔庆玉,龚与颀,1987,苏皖地区下二叠统放射虫硅质岩形成环境探讨。石油与天然气地质,8(1): 86~89。
- [7] 朱洪发等,1989,论华南孤峰组和大隆组硅质岩成因,分布规律及其构造机制,石油实验地质,11(4): 341~348。
- [8] McBride, E. F. and Folk, R. L., 1979, Features and origin of Italian Jurassic radiolarites deposited on continental crust. *Jour. Sed. Petrology*, Vol. 49, 837~868.
- [9] 费希尔, A. G. 和阿瑟, M. A., 1977, 王英华等译, 1987, 远洋领域中的长缓变化。见 Cook, H. E. 和 Enos, P. 编(1977), 冯增昭等译(1987), 深水碳酸盐环境。北京:地质出版社。17~44。

Study on Anoxic Environments of Permian in the Middle and Lower Yangtze Region

We Shenghe Feng Zengzhao He Youbin

(The University of Petroleum, Beijing, 102200)

Abstract

Anoxic environments developed best in Permian, especially in Gufeng and Dalong Stages in the Middle and Lower Yangtze region. Special complex of anoxic sediments of "black shale—chert—limestone" was formed in this kind of environments. According to palaeoecology and sedimentary petrology, anoxic sediments can be divided into two kinds, dysaerobic and anaerobic sediments. Anaerobic sediments are characterized by black and dark—grey, thin—bedded or laminated, organic—rich, and phosphoric—rich chert, shale and mud—bearing limestone, which are devoid of benthic fossils and biodisturbance, but bear plankton fossils, e. g. radiolaria and Ammonoids. Dysaerobic sediments are characterized by black—grey and dark—grey, thin or middle—bedded, organic—rich and phosphoric—rich shale, mud—bearing limestone and chert, which are devoid of epifaunal fossils, but bear infauna, plankton fossils and biodisturbance.

The distribution of anoxic sediments of Permian in the study area, is closely related to the framework of lithofaces and palaeogeography. Anoxic sediments of Gufeng Formation are distributed in the north and south of Lower Yangtze region, and those of Dalong Formation in the north of Lower and Middle Yangtze region, both of which are closely related to deeper slope and basin.

There are two main origins of anoxic environments of Permian in the region. One is the euxinic origin. Under the palaeogeographic conditions of low paleolatitude of Permian, high temperature of marine water, low energy of marine water and subaqueous relief of "twofold platform and basin" result in the euxinic condition of deeper water layers. The other origin is the influence of upwelling. The active upwelling coming from the northward ocean promotes high biologic productivity, and in turn the recycling of dead organic matter in the water column creates a very high oxygen demand which can trigger anoxic conditions in deeper water layers under the upwelling. The distribution of anoxic and aerobic environments is determined by the depth of marine water. The sedimentary model of anoxic environments of Permian in the region is established on the basis of comprehensive analysis.

The depth of sea floor of anoxic environments is analyzed from the viewpoint of palaeogeography, petrology, and comparative study of modern anoxic environments. It is estimated that the sea floor of anoxic environments of Permian in the study area is not very deep. The depth of dysaerobic environments is less than 300m, and anaerobic environments less than carbonate compensation depth(CCD).

Abundant organic matter in the anoxic sediments may result in the formation of potential hydrocarbon source beds. According to the difference of various anoxic sediments, We classified three kinds of potential hydrocarbon source beds, and estimated the distribution of those beds in the study area. Research shows that there are excellent conditions of the formation of oil and gas in Permian of the Lower and Middle Yangtze region.