

济阳坳陷古近系湖相沉积的分子地层学

王广利^{1,2}, 王铁冠^{1,2}, 张林晔³

1. 中国石油大学教育部油气成藏机理重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249

3. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015

摘要: 渐新世是济阳坳陷湖盆发育和烃源层形成的重要时期. 运用分子地层学的理论和方法, 探讨了它在含油气盆地不同领域的应用. 结果表明, 分子地层学研究有助于确定湖相烃源岩中大量分布的无定形有机质的来源, 揭示古沉积环境重建中微生物(包括细菌、古细菌和某些藻类)的存在和类型, 进行沉积相的精细划分以及层序地层格架的建立和完善. 分子地层学在石油地质研究中可以发挥独特的作用, 具有良好的应用前景.

关键词: 分子地层学; 分子化石; 微生物; 沉积环境; 有机相; 层序地层.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2008)03-0371-06

收稿日期: 2008-01-18

Molecular Stratigraphy in the Lacustrine Jiyang Super Depression of Eocene

WANG Guang-li^{1,2}, WANG Tie-guan^{1,2}, ZHANG Lin-ye³

1. Key Laboratory for Petroleum Accumulation Mechanisms of Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Faculty of Natural Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Geoscience Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, China

Abstract: Jiyang depression, one of the most important oil-bearing basins in eastern China, has been studied with the theory and method of molecular stratigraphy. Eocene was the main period of the basin formation. The results suggest that molecular stratigraphy is helpful to determine the source of the amorphous solid organic matter which is widely dispersed in lacustrine source rocks, open out the existence and types of the microbe in paleoenvironment rebuilding, finely distinguish the organic facies, and build and consummate the sequence stratigraphy framework. Molecular stratigraphy provides a new important stratigraphical technique in petroleum geology, which may be especially valuable where methods based on paleontology failed.

Key words: molecular stratigraphy; molecular fossils; microbe; paleoenvironment; organic facie; sequence stratigraphy.

分子地层学(molecular stratigraphy)是近年来国际上新兴的一门边缘学科,它应用分子有机地球化学的理论和方法,来研究和认识漫长的隐生宙的演化、地球上生命的起源和进化以及近代环境的变迁等重大地学基础项目,开辟了地层学研究的一条新的有效途径,已经成为当今国际上地学发展的边缘领域之一,引起国内外广泛关注.

分子地层学的研究始于 20 世纪 80 年代中叶, Brassell *et al.* (1986)通过分析赤道附近大西洋 8 m

以上沉积物中来源于 *Prymnesiophyte* 藻的 C_{37} 酮类分子化石的相对丰度变化,发现它所指示的过去 50×10^4 a 以来海洋表面温度的变化与有孔虫钙质骨架中 $\delta^{18}O$ 反映的信息具有良好的相关性,从而将分子地层学的理论和方法引入到近代环境变迁的研究中. Xie *et al.* (2002)和梁斌等(2005)随后根据古土壤中分子化石的分布揭示出第四纪以来气候的变迁. Brocks *et al.* (2003a, 2003b)依据西澳大利亚 Pilbara 克拉通盆地距今 $27.8 \times 10^8 \sim 24.5 \times 10^8$ a

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 40703011).

作者简介:王广利(1973—),男,讲师,从事有机地球化学研究. E-mail: sydxwgl@yahoo.cn

的极低变质页岩中分子化石的地质地球化学信息,重建了该时期的古生态环境。丰富的 2-甲基藿烷表明当时蓝细菌已是重要的初级生产者,光合作用在距今 27×10^8 a 以前已经发生。甾烷系列的广泛分布则表明在这个时期地球上真核生物已经出现,比生物化石提供的证据早 9×10^8 a。甾烷和蓝细菌的伴生现象揭示此时一些地区表层水的溶解氧浓度至少已经达到现今水平的 1%,因此能够支撑有氧呼吸作用的正常进行。Dutkiewicz *et al.* (2006) 研究了加拿大 Elliot 湖地区一个大约 24.5×10^8 a 的河流相变砾岩中含油包裹体的分子地球化学特征,古元古代含油包裹体分子标志物的组成进一步表明当时大气中含氧量足以满足真核生物生存的需要。但是这种含氧量水平持续了相当长的时间,至少到 16.4×10^8 a 前 (Brocks *et al.*, 2005)。

近年来,分子地层学的研究开始聚焦于重大突变地质事件(龚一鸣等, 2002; Grice *et al.*, 2005; Xie *et al.*, 2005; 谢树成等, 2006; 黄俊华等, 2007; 王红梅等, 2007)。Xie *et al.* (2005) 和 Grice *et al.* (2005) 分别对显生宙最大的生物集群灭绝事件,即发生在二叠系—三叠系界线附近的事件,开展了分子地层学的研究。Xie *et al.* (2005) 研究我国浙江长兴煤山 D 剖面时发现 2-甲基藿烷指数的变化在地层学上与动物灭绝高峰有很好的耦合关系,这种耦合关系显示了微生物和动物的变化是紧密关联的,可能表明微生物和动物对外界环境条件(如营养波动)的同时响应,也可能是二者之间生态耦合的反映(如食物压力和对生态空间的争夺)。Grice *et al.* (2005) 通过对芳基类异戊二烯烃和碳、硫同位素等分子地层剖面的分析,发现绿硫菌十分丰富,表征当时广泛分布的透光、静水的沉积条件,硫化物带来的毒性是集群灭绝事件的重要推动力之一。龚一鸣等(2002)对晚泥盆世弗拉阶/法门阶(或称 F/F 事件)界线上、下分子地层剖面的研究表明, F/F 之间的生物集群绝灭时间是中泥盆世晚期以来环境不断恶化的结果。对于晚泥盆世不断恶化的生态系统而言,多次天体撞击事件无异于雪上加霜,高温导致水体的高蒸发量、较高盐度和水柱底层缺氧是低纬度礁生态系统与浅海相生物集群灭绝的最直接杀手。分子地层学的研究还表明,在新元古代“雪球”事件期间,仍然有营光合作用的细菌和真核生物存活 (Olcott *et al.*, 2005)。

自 20 世纪 80 年代初开始,分子有机地球化学已经在烃源岩评价、原油组群划分、油—源对比等领

域得到广泛应用,并成为油气勘探中的一个基本环节。可以预期,分子地层学研究可以极大地拓展和深化分子有机地球化学在石油地质领域的应用。本文以我国东部重要的含油气盆地之一——济阳坳陷为例,来探讨分子地层学在石油地质中的应用。

1 分子地层学在地层古生物研究中的应用

济阳坳陷沙河街组古生物已开展过大量研究(王秉海和钱凯, 1992; 徐金鲤等, 1997)。最常见的浮游藻类化石主要包括沟鞭藻和疑源类化石、绿藻类的葡萄藻 (*Botryococcus*) 化石和盘星藻 (*Pediastrum*) 化石,还有颗石藻化石。除保存较好的藻类化石层以外,在页岩和油页岩中均发现了由大量颗粒状藻质碎屑组成的纹层。它们大多分散于无定形之中或者密集成层出现,颗粒直径大小大多在 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ 之间,圆形到椭圆形,表面粗糙,轮廓线波浪状,形态上与同一标本上的沟鞭藻囊孢中的核状物十分相似,据此推测这些颗粒体很可能是未被完全分解的沟鞭藻残留体。三芳甲藻甾烷和甲藻甾烷是沟鞭藻及其祖先在古代沉积物中 2 种重要的存在形式,并且它们几乎专一性地由沟鞭藻体内的甲藻甾醇提供 (Robinson *et al.*, 1984; Summons *et al.*, 1992; Thomas *et al.*, 1993; Volkman *et al.*, 1993)。在沙河街组四段上部 (Es_4^{F})、三段下部和中部 (Es_3^{F} 和 Es_3^{H})、一段 (Es_1) 等主要的烃源层中,三芳甲藻甾烷指数稳定分布在 $0.50 \sim 0.96$ 之间,丰富的三芳甲藻甾烷、甲藻甾烷强有力地支持这些无定形物质是沟鞭藻降解的产物。

分子地层学的研究表明除了藻类外,包括细菌、古细菌在内的各类微生物也是沙河街组有机质重要的组成部分。如芳基类异戊二烯化合物预示着绿硫菌的发育,2-甲基藿烷则指示蓝细菌的贡献,丰富的植烷、六环藿烷等均与盐湖相中嗜盐菌有关,大量的二苯并噻吩系列化合物则是硫酸盐还原菌作用的结果。

2 分子地层学在沉积相划分和古沉积环境重建中的应用

Hughes *et al.* (1995) 采用二苯并噻吩 (DBT)

与菲(P)的比值衡量二苯并噻吩的丰度,研究表明 DBT/P 值取决于[Fe]和[S]的相对含量,可标志 pH 值的变化;而 Pr/Ph 值取决于氧化—还原程度,体现 Eh 的变化。二者相结合,可以表征沉积水体和早期成岩作用环境,进而有效地区分出海相碳酸盐岩、混合型海相碳酸盐岩和湖相碳酸盐岩、湖相粘土岩、海相和湖相页岩、河流/三角洲相页岩和煤等 5 种岩类的氧化、还原/富硫、还原/缺硫、还原/酸性和还原/高盐等 5 种沉积环境。由图 1 可以看到,渤南洼陷所有样品 DBT/P 均大于 1,为 1.0~7.6, Pr/Ph 均小于 1,落在碳酸盐岩的区域内,部分样品甚至达到了 Hughes *et al.* (1995)划定的海相碳酸盐岩生油岩的范围内,反映了渤南洼陷古近纪湖盆独特的沉积环境。

甲基化甾烷的组成可能取决于古沉积环境的变化。盐湖相、近物源相沉积中以 3—甲基甾烷为主,半深湖—深湖相中以 4—甲基甾烷为主,滨浅湖相介于二者之间(Wang *et al.*, 2006)。东营凹陷 Es_4^+ 湖盆内自北向南的相带分布,依次由陡坡带闭塞深湖相、中央闭塞深湖相,演变为缓坡带浅湖—半深湖相、滨浅湖相以及近物源浅湖相。随着沉积相带的变化,3—甲基甾烷的丰度和烷基化甾烷的组成也随之递变。深湖相中 3—甲基甾烷丰度最低,仅占全部 C_{30} 甲基甾烷的 24%~42%;浅—半深湖相与深湖相中相差不大,为 24%~35%;滨浅湖相中有所增加,占到 42%~44%;在近物源浅湖相中则迅速增至 56%~72%,达到 C_{30} 甲基甾烷总量的一半以上,成为甲基甾烷中最主要的成分;在盐湖相中 3—甲基甾烷最为富集,高达 63%~79%。

已有的研究表明济阳拗陷沙四段时期为咸化湖泊,但分子化石的证据表明不同凹陷(或洼陷)沉积环境仍然存在明显差别。东营凹陷沙四上亚段盐度很高,为咸水到半咸水的沉积,古盐度平均为 31‰。分子化石和碳同位素结果表明,德弗兰藻属沟鞭藻、颗石藻、定鞭金藻类钙质超微化石以及原生动物纤毛虫和化能自养菌、嗜盐菌等大量出现,展现出一个藻类具极高生产力且水体发生盐度分层的湖泊。正构烷烃单体碳同位素在两处出现了负异常(图 2),一处是在 $C_{22} \sim C_{26}$,碳同位素为 $-30\text{‰} \sim -31\text{‰}$,并以 C_{23} 最轻,为 -31.45‰ ,这种分布与绿河页岩和柴达木盆地西部第三系咸水湖相原油类似,反映了营化学自养的细菌特别是食甲烷菌的贡献(Santos Neto *et al.*, 1998);另一处负异常在 C_{37} ,碳同位素为

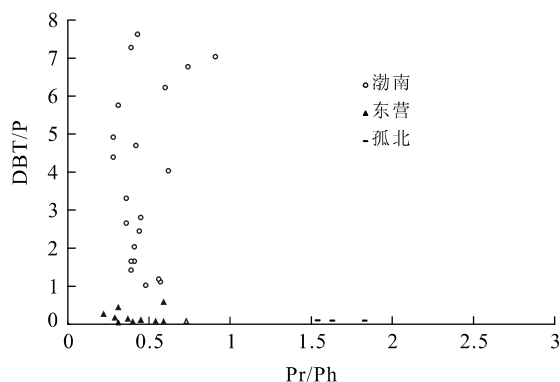


图 1 Es_4^+ 不同地区烃源岩中 DBT/P 与 Pr/Ph 关系图

Fig. 1 DBT/P ratios versus Pr/Ph ratios in the different areas of Es_4^+ source rock formation

DBT/P, 二苯并噻吩与菲之比; Pr/Ph, 姥姣烷与植烷之比

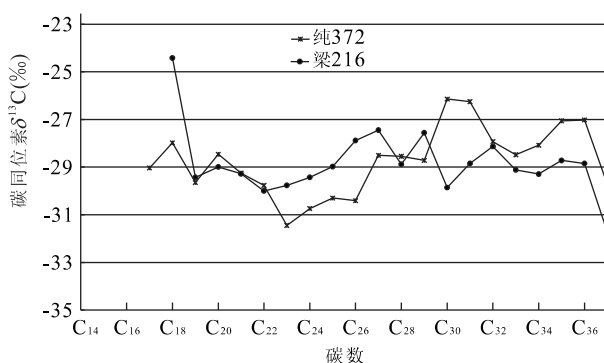


图 2 Es_4^+ 烃源岩正烷烃单体碳同位素分布

Fig. 2 Distributions of individual *n*-alkane carbon isotope in Es_4^+ source rocks

-31.75‰ ,在我国柴达木盆地和江汉盆地具有同样的分布,据报道它来源于定鞭金藻类浮游植物。该类化石大多产自海相,或者咸化湖泊,颗石藻是其中一类,在济阳拗陷沙四段上部和沙一段下部产出的渤海网帘石藻属于该类,因此颗石藻类钙质超微化石很可能是碳同位素负异常的 nC_{37} 的来源。Grice *et al.* (1998)认为较轻的碳同位素的形成是由于其他藻类的先期勃发将水体中溶解的富集 ^{13}C 的重碳酸盐耗尽,之后颗石藻才开始繁衍,而徐金鲤等(1997)恰好认为东营凹陷颗石藻的勃发是在沟鞭藻之后。可见,正是由于沟鞭藻的勃发吸收了 ^{13}C 才导致颗石藻类贫 ^{13}C ,其中 C_{18} 的碳同位素值可达 -24.4‰ ,极度富含 ^{13}C 。因此,东营凹陷沙四上亚段沉积时期是一个盐度分层的咸化湖泊,滞水层中硫酸盐浓度低,因而硫酸盐还原菌和绿硫菌不甚发育,而食甲烷菌十分活跃,对有机质的破坏减弱,因而东营沙四上

亚段含硫量相对较低,但有机质保存相对较好.该类湖泊最大的特点是沟鞭藻、颗石藻等具高生产力,以富含甲藻甾烷、三芳甲藻甾烷、24—降胆甾烷等分子化石为主要特征.

渤南洼陷沙四上亚段以纹层状泥质灰岩、泥灰岩和灰质泥岩沉积为主,泥质纹层发棕黄—棕褐色荧光,灰质纹层不发光或发褐黄—暗褐色荧光,可见有机质富集层.正烷烃具强烈的偶碳优势,罗 3 井主峰碳为 C_{28} ,OEP 为 0.54~0.64; $iC_{20} \sim iC_{25}$ 类异戊二烯化合物丰富,具有高丰度的 $C_{28}4$ —甲基甾烷、17,21— C_{24} 断藿烷,丰富而完整的 2—甲基藿烷系列、 $C_{28} \sim C_{34}$ 30—降藿烷系列和 $C_{32} \sim C_{35}$ 六环藿烷系列,发育芳基类异戊二烯化合物,甾烷/藿烷比值很低.这些标志物的出现与某些古细菌、细菌和蓝细菌等微生物有关,它们是有机质最重要的贡献者.同时,极其丰富的有机含硫化化合物表明了当时硫酸盐还原菌的活跃和滞水层的广泛分布.绿硫菌的出现进一步反映了当时透光和静水的条件,滞水层仍然具备足够的光线,使得绿硫菌可以利用硫酸盐还原菌的代谢产物硫化氢进行光合作用,合成自身需要的营养.岩石中来源于陆源碎屑的铁含量较低,为

0.57%~2.28%,平均 1.1%,即陆源碎屑的输入较少.因此,渤南洼陷沙四段沉积时期盐跃层长期存在,水体的永久性分层使得滞水层古细菌和细菌活跃,有机质经历强烈改造,缺氧和富含硫化物,而表层水含氧,蓝藻、沟鞭藻和其他浮游生物可以繁衍,可与今天的黑海类比.这样一种生烃环境必然决定了它所生成的油气富含有机含硫化化合物,并表现出碳酸盐岩所特有的分子特征,如 $DBT/P>1$,重排甾烷、 C_{30} 重排藿烷极不发育,富含 2—甲基藿烷和 30—降藿烷系列等.

3 分子地层学在地层层序研究中的应用

分子地层学的研究可以为层序地层格架的建立提供证据.济阳坳陷沙四段至沙三段是水进体系域到高位体系域发展的过程,沙四上亚段为水进体系域,沙三下亚段为高位体系域早期,沙三中亚段为高位体系域晚期,这 3 个时期也是济阳坳陷烃源岩形成的最重要阶段.从分子地层的演变规律来看(图 3),正构烷烃从沙四上亚段的偶碳优势($OEP=0.42 \sim 0.86$)演变至沙三下亚段的弱奇碳优势

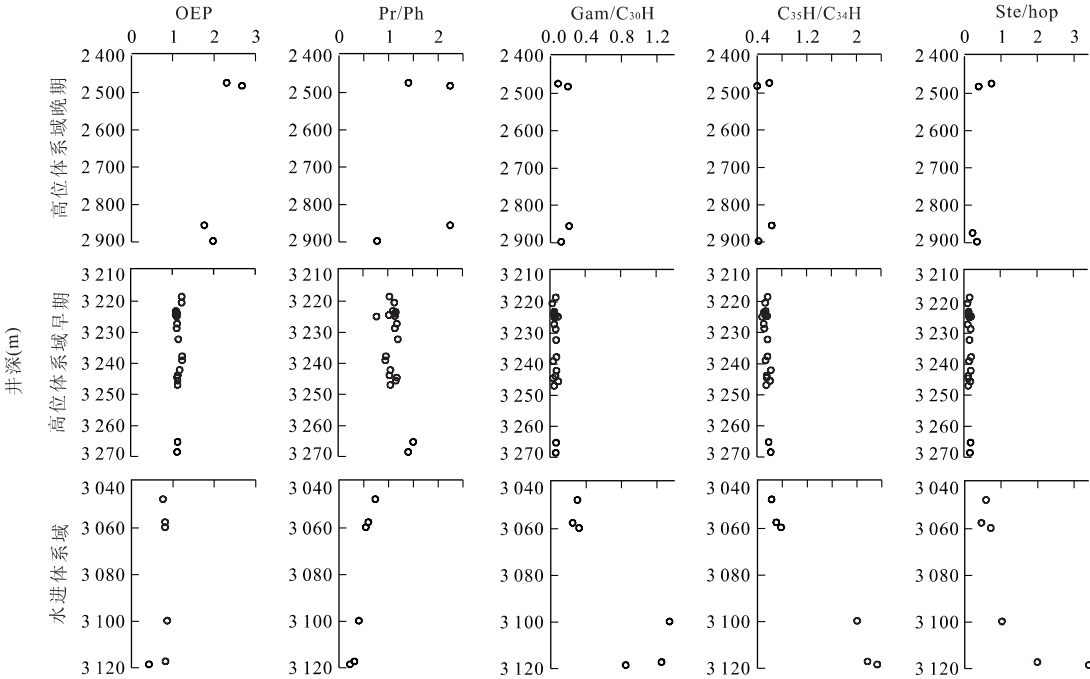


图 3 济阳坳陷始新世一个二级层序($Es_4^u \sim Es_3^m$)的分子地层

Fig. 3 Molecular stratigraphy of $Es_4^u - Es_3^m$ sequence in Eocene Jiyang depression

OEP, 奇偶优势;Pr/Ph, 姥姢烷与植烷之比;Gam/ $C_{30}H$, 伽玛蜡烷与 C_{30} 藿烷之比; $C_{35}H/C_{34}H$, C_{35} 藿烷与 C_{34} 藿烷之比;Ste/hop, 规则甾烷与 17 α —藿烷之比

(OEP=1.09~1.23)直至沙三中亚段的强奇碳优势(OEP=1.76~2.67),反映出水进体系域阶段生源以细菌和低等水生生物为主,向上至高位体系域陆生高等植物贡献逐渐加大。甾烷/藿烷比值在水进体系域早期很高,为1.02~3.40,平均2.14,水进体系域晚期明显降低,为0.46~0.71,平均0.59,至高位体系域早期降至最低,为0.09~0.20,平均0.15,而高位体系域晚期又略有增加,为0.22~0.74,平均0.42,进一步反映出水进体系域早期藻类(特别是沟鞭藻)的贡献最大。进入高位体系域后细菌活动强烈,对有机质进行了改造,自身又参与生烃母质的构成;在高位体系域晚期,包括高等植物在内的陆源碎屑供应量大大增加,有机质多呈分散状态,细菌繁衍条件变差。反映水体盐度的伽玛蜡烷指数,在水进体系域早期为0.85~1.34,晚期为0.25~0.32;高位体系域早期为0.03~0.09,高位体系域晚期为0.08~0.21。总体上看,随着淡水的大量注入,湖盆水体盐度逐渐降低。 C_{35}/C_{34} 藿烷的演化与伽玛蜡烷指数一致,Pr/Ph的演化与伽玛蜡烷指数恰好相反,表明在古湖盆底部的氧化还原性与盐度之间关系密切,高盐度和水体分层是形成强还原环境的重要条件。

4 结论

分子地层学已经在近代环境变迁、前寒武纪古生态环境重建和重大突变地质事件取得了令人瞩目的成果。对济阳拗陷始新世沙河街组的初步研究结果表明,分子地层学研究有助于确定湖相烃源岩中大量分布的无定形有机质的来源,揭示古沉积环境重建中微生物(包括细菌、古细菌和某些藻类)的存在和类型,进行沉积相的精细划分以及层序地层格架的建立和完善。分子地层学在石油地质研究中可以发挥独特而重要的作用,在石油地质中具有良好的应用前景。

References

- Brassell, S. C., Eglinton, G., Marlowe, I. T., et al., 1986. Molecular stratigraphy: A new tool for climatic assessment. *Nature*, 320: 129—133.
- Brocks, J. J., Buick, R., Summons, R. E., et al., 2003a. A reconstruction of Archean biological diversity based on molecular fossils from the 2.78 to 2.45 billion-years-old Mount Bruce Supergroup, Hamersley basin, western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4321—4335.
- Brocks, J. J., Buick, R., Logan, G. A., et al., 2003b. Composition and syngeneity of hydrocarbons molecular fossils from the 2.78 to 2.45 billion-years-old Mount Bruce Supergroup, Pilbara Craton, western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4289—4319.
- Brocks, J. J., Love, G. D., Summons, R. E., et al., 2005. Biomarker evidence for green and purple sulphur bacteria in a stratified Palaeoproterozoic sea. *Nature*, 437: 866—870.
- Dutkiewicz, A., Volk, H., George, S. C., et al., 2006. Biomarkers from Huronian oil-bearing fluid inclusions: An uncontaminated record of life before the Great Oxidation Event. *Geology*, 34: 437—440.
- Gong, Y. M., Li, B. H., Wu, Y., 2002. Molecular stratigraphy of the Devonian Frasnian-Famenian transition in Guangxi. *Progress in Natural Science*, 12(3): 292—297 (in Chinese).
- Grice, K., Cao, C. Q., Love, G. D., et al., 2005. Photic zone euxinia during the Permian-Triassic superanoxic event. *Science*, 307: 706—709.
- Grice, K., Schouten, S., Peters, K. E., et al., 1998. Molecular isotopic characterisation of hydrocarbon biomarkers in Palaeocene-Eocene evaporitic, lacustrine source rocks from the Jiangnan basin, China. *Organic Geochemistry*, 29: 1745—1764.
- Huang, J. H., Luo, G. M., Bai, X., et al., 2007. The organic fraction of the total carbon burial flux deduced from carbon isotopes across the Permo-Triassic boundary at Meishan, Zhejiang Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 767—773 (in Chinese with English abstract).
- Hughes, W. B., Holba, A. G., Dzou, L. I., 1995. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum sources rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(17): 3581—3598.
- Liang, B., Xie, S. C., Gu, Y. S., et al., 2005. Distribution of *n*-alkanes as indicative of paleovegetation change in Pleistocene red earth in Xuancheng, Anhui. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(2): 129—132 (in Chinese with English abstract).
- Olcott, A. N., Sessions, A. L., Corsetti, F. A., et al., 2005. Biomarker evidence for photosynthesis during Neopro-

- erozoic glaciation, *Science*, 310: 471—474.
- Robinson, N., Eglinton, G., Brassell, S. C., et al., 1984. Dinoflagellate origin for sedimentary 4-methylsteroids and 5-stanols. *Nature*, 308: 439—441.
- Santos Neto, E. V. D., Hayes, J. M., Takaki, T., 1998. Isotopic biogeochemistry of the Neocomian lacustrine and upper Aptian marine-evaporitic sediments of the Potiguar basin, northeastern Brazil. *Organic Geochemistry*, 28: 361—381.
- Summons, R. E., Thomas, J., Maxwell, J. R., et al., 1992. Secular and environmental constraints on the occurrence of dinosterane in sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 2437—2444.
- Thomas, J. B., Marshall, J., Mann, A. L., et al., 1993. Dinosteranes and other biological markers on dinoflagellate-rich marine sediments of Rhaetian age. *Organic Geochemistry*, 20(1): 91—104.
- Volkman, J. K., Barrett, S. M., Dunstan, G. A., et al., 1993. Geochemical significance of the occurrence of dinosterol and other 4-methyl sterols in a marine diatom. *Organic Geochemistry*, 20(1): 7—15.
- Wang, B. H., Qian, K., 1992. Geological research and exploration practice in Shengli Petroleum Province. China University of Petroleum Press, Dongying, 54—48 (in Chinese).
- Wang, G. L., Zhang, L. Y., Wang, T. G., 2006. Identification and significance of 3β -alkyl steranes in the Eocene lacustrine sediments and petroleum of China. *Chinese Science Bulletin*, 51(13): 1628—1632.
- Wang, H. M., Ma, X. R., Liu, D., et al., 2007. Chemical variation from biolipids to sedimentary organic matter in modern oceans and its implication to the geobiological evaluation of hydrocarbon source rocks. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 748—754 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Huang, X. Y., Huang, J. H., et al., 2006. Molecular fossil records as a proxy of the biotic and environmental events during critical geological periods. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 208—217 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Yin, H. F., et al., 2005. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 434: 494—497.
- Xie, S. C., Wang, Z. Y., Wang, H. M., et al., 2002. The occurrence of a grassy vegetation over the Chinese Loess Plateau since the last interglacier: The molecular fossil record. *Science in China (Ser. D)*, 45(1): 53—62.
- Xu, J. L., Pan, Z. R., Yang, Y. M., et al., 1997. Dinoflagellates and acritarcha in the Eocene of Shengli Oilfield, Shandong Province, East China. China University of Petroleum Press, Dongying, 5—40 (in Chinese).

附中文参考文献

- 龚一鸣, 李保华, 吴治, 2002. 广西泥盆系弗拉阶—法门阶之交分子地层研究. *自然科学进展*, 12(3): 292—297.
- 黄俊华, 罗根明, 白晓, 等, 2007. 浙江煤山 P/T 之交碳同位素对有机碳埋藏的指示意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(6): 767—773.
- 梁斌, 谢树成, 顾延生, 等, 2005. 安徽宣城更新世红土正构烷烃分布特征及其古植被意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(2): 129—132.
- 王秉海, 钱凯, 1992. 胜利油区地质研究与勘探实践. 东营: 石油大学出版社, 34—48.
- 王红梅, 马相如, 刘邓, 等, 2007. 从生物脂类化合物到沉积有机质的变化及其对正演烃源岩有机质形成的启示. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(6): 748—754.
- 谢树成, 黄咸雨, 黄俊华, 等, 2006. 重大地质突变期生物与环境事件的分子化石记录. *地学前缘*, 13(6): 208—217.
- 徐金鲤, 潘昭仁, 杨育梅, 等, 1997. 山东胜利油区早第三纪沟鞭藻类和疑源类. 东营: 石油大学出版社, 5—40.