

文章编号: 1001-6112(2008)06-0591-05

湖相烃源岩研究进展

张林晔

(中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要:湖相烃源岩的沉积具有很强的非均质性,其中发育有机质富集层的优质烃源岩对陆相大油气田的形成具有控制作用,关于湖相烃源岩中有机质富集层的形成机制已引起人们广泛关注,对其认识已取得重要进展。湖相优质烃源的发育与湖盆演化过程中可容纳空间的变化、古湖泊的物理化学性质、古生产力营养的来源、气候的周期性变化等因素有着密切联系,对其成因机制的进一步研究应该注意寻找湖相富有机质沉积韵律中有机化合物与无机元素之间的依存关系,分析地质演变过程中周期性和事件性的耦合关系,探讨地质环境、生物演化、有机质富集层形成的内在联系。

关键词:古生产力;有机质富集层;生物标志化合物;微量元素;旋回地层学;湖相烃源岩

中图分类号: TE122.11

文献标识码: A

THE PROGRESS ON THE STUDY OF LACUSTRINE SOURCE ROCKS

Zhang Linye

(Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: There is distinctive heterogeneity in the deposition of lacustrine source rocks. The occurrence of high-quality lacustrine source rocks with rich-organic matter plays an important role in controlling the formation of large oil fields. It has been widely concerned about the mechanism forming rich-organic matter in lacustrine source rock and has achieved significant advance. The deposition of high-quality source rocks has close relationships with the variation of the capacities of lacustrine basins during their evolution, paleolacustrine physicochemical properties, nutrition origin of paleo-productivity, periodic variation of climate and so on. In order to study the formation mechanism of high-quality source rocks, we should try to find out the dependence relations between organic compounds and inorganic elements in sedimentary rhythms in rich-organic matter strata, analyse the coupling relation between cyclicity and incident during geologic succession, inquire into the inherent connection among geologic environment, biogenetic derivation and the formation of rich-organic matter strata.

Key words: paleo-productivity; rich-organic matter strata; biomarker; trace element; cyclostratigraphy; lacustrine source rock

1 研究现状

中国湖相烃源岩的研究工作,伴随着我国陆相油气勘探已走过了近一个世纪的历程^[1,2],尤其是20世纪70年代有机地球化学的引入,使我国湖相烃源岩的研究工作从宏观走向微观、从定性发现到定量^[3,4]。在中国东部陆相盆地大庆油田、胜利油田的发现,使我国湖相生油理论的研究更加系统化,集中体现在黄第藩等人的专著和论文中^[5]。这些研究成果系统地分析了中国古湖盆产生的构造

背景、古湖泊的类型和生物群的面貌,总结了陆相成烃的规律,并确定了一系列湖相烃源岩评价的标准,为我国湖相烃源岩的研究和评价奠定了良好的基础。

近年来,国外对湖相烃源岩也开展了大量研究工作,Carroll等^[6]对世界范围内湖相烃源岩进行了系统研究,认为湖盆的类型控制了湖相烃源油气生成的潜力,他把世界范围内湖相烃源岩的沉积分成3种基本类型,即:河湖相、波动深水相和蒸发相。河湖相烃源岩的沉积具有淡水湖相泥岩与河流三

收稿日期:2008-07-01;修订日期:2008-11-01。

作者简介:张林晔(1955—),女,教授级高级工程师,主要从事油气地球化学研究。E-mail:zhanglinye2006@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(40673041)。

角洲间互沉积的特征,盆地充填以进积作用为主,烃源岩的分布在侧向上连续性较差,沉积有机相变化明显;由于陆源有机质的输入,烃源岩中干酪根的类型 I—III 都有分布,该类烃源岩既可以生油也可以生气,生成的石油往往含蜡量高。波动深水相的盆地充填以进积和加积作用为主,在该相带沉积的烃源岩较为均质,干酪根类型以 I 型为主,往往生成石油。蒸发相的盆地充填以加积作用为主,烃源岩发育在干燥的咸化和超咸化的湖盆演化阶段,富有机质的泥岩相对较薄,但是非常富含有机质,富硫的 I 型干酪根在 R_o 为 0.45% 时即可生成低熟油。不同类型的烃源岩油气生成时间的确定还要取决于盆地经历的热历史。Carroll 等^[6]通过对湖相烃源岩和海相烃源岩的对比研究发现,湖相烃源岩最显著的特点是它的非均质性。因此,对湖相烃源岩的研究选择具有代表性的样品极为重要,否则,对其生烃潜力的评价将得出错误的结论。

随着勘探理论和勘探技术的发展,国内外的学者都逐渐地认识到湖相烃源岩的非均质性特征^[7,8]。对油藏形成做出贡献的往往是生烃层系中的富集有机质,如北海油田的主力烃源岩是 Kimridge 页岩^[9],鄂尔多斯盆地三叠系低渗透油气藏的主力烃源岩是长 7 段优质烃源岩^[10]。作者^[11,12]对济阳坳陷大油田做了系统油源对比工作后发现,它们均与沙四上、沙三下段有机质富集层有关^[13]。优质烃源岩在生烃层系中往往厚度不大,但有机质丰度高^[14~16],当有机质演化达到一定程度时,易产生超压并形成大油气田^[17,18]。秦建中等^[19]通过对我国典型湖相烃源岩的沉积环境、有机质含量、有机质类型和有机相、成烃演化机理、生排烃模式及油气运移和聚集规律对比研究,提出了有效烃源岩和富烃页岩是形成大中型油田的物质基础的观点。然而,以往我们在湖相生油岩的评价中常常把分布广、厚度大的烃源岩作为主力烃源岩评价,比较重视烃源岩的厚度,应用大平均的方法求取烃源岩的有机质丰度进行资源评估,忽略了优质烃源岩的发育对大油气田形成的控制作用。

因此,关于湖相优质烃源岩的形成机制问题已经受到人们普遍关注,系统分析研究湖相优质烃源岩形成条件和控制因素,有助于认识其分布规律,发现新的优质烃源岩发育的地区和层系,扩大油气勘探的发展空间。

2 古湖泊与烃源岩的形成

关于湖相烃源岩的形成机制问题,多年来也是

国内地学界备受关注的研究领域,自 20 世纪 50 年代以来,我国科研工作者就对中国境内的咸水湖、盐湖(青海湖、茶卡、大柴旦)、淡水湖(太湖、鄱阳湖、巢湖、洞庭湖)及断陷湖(云南抚仙湖、滇池、洱海)进行湖泊沉积和演化的研究,为古湖泊沉积和环境演变的研究提供了十分宝贵的材料。与此同时,国际古湖泊学的研究也取得了许多令人瞩目的研究成果,其中引人注目的是对东非裂谷湖泊的研究。以法国埃尔夫石油公司为首组织的国际合作,在 1976—1980 年期间,对肯尼亚的 Baringgo 湖—Bogoria 湖半地堑盆地,采用沉积学、地球化学和各部门微体古生物学的方法,对湖泊生油岩的沉积和该湖区 3 万年来的演变进行了系统研究,发现日照率和营养元素是造成湖泊高生产率的重要原因^[20]。随着湖泊研究资料的日益丰富,Kelts 等^[21]根据现代湖泊与古代湖泊烃源岩的资料系统综述了湖泊烃源岩的沉积环境,他们认为,水体较深、盐度中等、呈碱性的大型封闭盆地是烃源岩发育的最佳环境;这种湖泊有来自长期季节性风化产生的适当营养,缺少捕食动物,水体具有季节性分层,硫酸盐浓度低等特点。Talbot^[22]从 6 个现代非洲热带湖泊资料出发,论述了湖泊烃源岩的成因,其中特别强调了气候和湖水分层对有机质堆积过程的控制作用。作者曾经对济阳坳陷低熟油形成机制进行过研究,发现生成低熟油的有效烃源岩为咸化环境古近系沙河街组四段有机质富集层^[12],通过对其微观结构的分析发现,有机质富集层的形成与藻类季节性的生产、死亡和保存有关。刘传联等^[23]在对济阳坳陷古近系湖相泥岩进行研究的基础上,提出了藻类勃发是湖相源岩形成的一种重要机制的观点。王慧中等^[24]在对东营凹陷沙河街组湖相油页岩研究中发现,沉积韵律的变化直接受控于古气候变动引起的湖盆内部水体物理、化学与生物等要素的变化。古生物的研究资料表明,东营凹陷沙河街组沉积时期气候的演变的过程大体与巴黎盆地巴尔顿阶至期坦浦阶沉积时期相一致。姚益民通过米氏旋回的对比发现^[25],东营凹陷有机质富集层发育的沙四上和沙三下与美国绿河页岩 Tiptop 段(油页岩相)相对应。地层中的米氏旋回主要是由于气候变化从而引起沉积响应的变化。总体来看,湖泊沉积时期的气候变化是受全球性气候影响的。

国内外学者的研究工作表明,湖相优质烃源岩的形成在一定的构造背景下主要与 3 方面的因素有关:1)古湖泊的生产力;2)良好的保存条件;3)气

候的变化。而气候的变化与湖泊生产力及保存条件之间隐含着内在联系。

3 优质烃源岩形成控制因素研究

3.1 古湖泊的生产力

关于形成优质烃源岩的古湖泊生产力的研究主要集中在3个方面:1)古湖泊生产力组成;2)古湖泊生产力的计算;3)古湖泊生产力的营养来源。

近年来,无论在海相和陆相地层中,人们的研究工作均发现优质烃源岩的形成与浮游藻类具有密切关系^[26~29],初级生产力主要为浮游植物(藻类)和一些边缘水生生物,次级生产力则主要为一些微体动物如介形虫、腹足类等^[30]。而细菌对于有机质富集层形成的贡献,由于它缺少有形态的化石被保留下来,人们对于它的认识还很局限。现代海洋细菌的研究发现,营养丰富的海岸,海洋浮游细菌可达 6.3×10^9 个/L,即使在4200 m贫营养的深海中细菌数量也有 3.4×10^7 个/L^[31,32],细菌生产力是海洋食物网的重要组成部分^[30]。海洋蓝细菌在热带和温带海洋对总初级生产力的贡献达20%~80%^[33],在世界大多数的海区对总初级生产力的贡献达60%。在湖泊环境,由细菌产生的有机质可能超过藻类的有机质^[21]。细菌能形成深水生物席,如苏黎世湖中的化学自养硫细菌的丝状群体*beeggiatoa*繁殖于70~110 m水深沉积物与水的界面上,形成白色条脉状节网。作者在研究济阳拗陷烃源岩时,发现了大量来自细菌生源的生物标志化合物^[34]。尤其是细菌来源的2-甲基藿烷,3 β -甲基甾烷,与藻类来源的生物标志化合物具有消长关系^[35]。有机生物地球化学技术与古生物学的结合有可能更加全面地认识湖泊古生产力的组成^[36,37]。

湖泊古生产力的估算方法,常用的有3种,即有机碳法、古生物法和碳同位素法^[30]。近年来无机元素在海洋古生产力的计算中得到快速发展,如营养元素磷的埋藏速率峰值与大洋缺氧事件之间有着良好的对应关系^[38],营养元素铁、硅对海洋生产率更具有重要作用^[39]。微量元素Ba, Mo, Al^[40], Sr/Ca, Al/Ti都在某种程度上反映古海洋生产力的变化^[41]。古湖泊生产力的估算应进一步探讨古海洋生产力估算方法在古湖泊研究中的适用性^[42]。综合应用有机法(有机碳法、氢指数、氧指数、生物标记化合物)、无机元素法、同位素法研究湖泊古生产力对湖相优质烃源岩形成的控制作用。

关于湖泊古生产力营养元素的来源,一般认为由于在暖湿的气候条件下化学风化作用使富含营

养元素的磷灰石、碳酸岩盐、玄武岩或流纹岩向湖泊提供了营养物质,使其生产力升高;季节性回水有利于藻类勃发^[23],形成有机质富集层。然而对东非裂谷湖泊的研究发现,肯尼亚的Baringo湖与Bogoria湖相距不过20 km,前者很少有生产力,后者却产有丰富的蓝藻细菌,差别在于前者是淡水湖,后者却是高盐度的盐湖,并有热液作用。热液活动区的生物以细菌为主^[43,44]。

金强^[45]对断陷盆地含油气的研究认为,水下火山喷溢环境是优质烃源岩赖以形成的先导因素。鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的发育,湖底热水、火山喷发的火山物质的沉积水解起了关键作用^[46]。海底热水活动对塔里木盆地寒武系玉尔吐斯坦富有机质沉积层段的形成具有明显影响^[47]。而石军柱^[48]提出的火山喷发引起的海流使有机质富集的认识也给我们很多启发。科学发展到今天,我们应该吸纳各研究领域取得的进展,进一步寻找有机与无机之间的内在联系,分析地质演变过程中的周期性和事件性耦合关系,重新审视湖相优质烃源岩形成的机制问题。

3.2 有机质的保存

原始生物产率与沉积有机质富集程度之间并不总是存在线性关系^[49],东非裂谷西段4个湖泊,生产力以Albert湖最高,但表层沉积中的有机碳含量却是最低的,其原因是Albert湖水浅、风大,湖水扰混湖底充氧,有机质难于保存^[50]。有机质的聚集和保存是形成优质烃源岩的另一个重要因素,以目前的研究工作来看,湖水分层、沉积速率、硫酸盐含量都与有机质的保存有着密切关系。湖水的分层现象是湖泊系统的重要特征,湖水的分层可以造成底水缺氧,有利于有机质的保存^[21]。引起分层的原因主要是由于温度、盐度造成湖水密度变化,从而形成温跃层和盐跃层。有机质在湖底沉积中能否得到保存与含氧水体的接触时间有关,沉降速率越高,沉积速度越大,和含氧水体接触的时间越短,越有利于保存。然而,另一方面,快速的沉积速率也会对有机质聚集起稀释作用。什么样的沉积速率在什么条件下对湖相有机质的聚集最有利还有待开展系统研究工作。硫酸盐是湖泊中氧化剂的另一来源,湖泊中有机物氧化能力将很大程度上取决于湖水中硫酸盐的初始浓度。Howarth和Teal(1979)指出,仅是硫酸盐的还原作用,就足以消耗生产力较高的海洋盐沼中的全部有机质产量,每年75 mol的硫酸盐还原能力就能氧化碳1800 g/m²,以至几乎无保存能力,在这些环境中,

硫酸盐迅速地转化为菱铁矿。以上的研究表明,湖盆的化学性质控制了有机质的聚集和保存。无论是湖水分层、沉积速率和硫酸盐含量,它们都和底水的含氧量有关,集水盆地化学性质的研究使我们能更进一步了解底水含氧的来源、氧化能力、对有机质富集层形成的影响。在这方面,我国陆相盆地开展的研究工作还比较少。

3.3 古气候

构造和气候变化是控制湖相烃源岩沉积的 2 个主要因素,构造运动和断裂活动控制着盆地古地理面貌,决定着盆地蓄水空间的形成与消亡。而气候的变化控制着降雨量、蒸发水量,从而控制着河水的注入及沉积物的供应,并进一步影响着湖盆面的变化。而优质烃源岩的发育与湖盆面变化有着密切关系,富集有机质一般赋存于页理发育的湖相页岩和油页岩中,Anderson^[51]研究发现,气候变化才是纹层形成的最广泛的控制因素。湖泊中的生物作用和化学作用都与太阳辐射、季风或风驱湖泊上涌有关,甚至太阳辐射也是冰川溶解节律的动力源^[52];气候的冷热干湿影响了水体分层、湖流、降水、沉积物充填,甚至温度、盐度的变化在一定程度上也受气候的控制。近年来以米兰柯维奇旋回为代表的高频旋回地层学也已经证明在构造背景稳定的前提下^[53,54],气候旋回是控制盆地沉积过程的根本因素^[55~57]。然而,从气候周期性变化的角度出发,研究湖相优质烃源岩沉积的机理尚未开展研究工作。

4 存在的问题

国内外对湖相烃源岩形成机制的研究已取得了一些重要进展,但对许多问题的研究正处于探索阶段,尤其对湖相优质烃源岩的形成条件和控制因素的研究还很不深入和系统,主要存在以下几方面的科学问题:1)什么样的构造和气候背景容易发育湖相优质烃源岩? 2)湖泊高生产力的营养来源? 物理和化学条件是什么? 3)形成优质烃源岩的主要湖泊生物的面貌和定量评估? 4)湖泊有机质保存的控制因素是什么? 5)在湖相优质烃源岩形成的过程中,生产力是关键还是缺氧环境是关键? 6)湖相优质烃源岩沉积的韵律性、周期性的变化是否受某种因素控制着?

对这些问题的深入研究,将有助于我们系统地探讨盆地的气候、地质条件与湖水的物理、化学性质及湖泊生产力和有机质堆积之间的内在联系,从一个新的角度重新认识陆相生油理论,为油气勘探

的进一步深入提供保障。

参考文献:

- 尚慧芸. 我国陆相生油层地球化学指标的探讨[A]. 见:石油勘探研究报告集(第二辑)[M]. 北京:中国工业出版社,1963
- 黄第藩,陈克造. 青海湖第四纪沉积物中沥青的形成与陆相石油成因问题[J]. 地质学报,1964,44(2):171~190
- 傅家谟,史继扬. 石油演化理论与实践 I:石油演化的机理与石油演化的阶段[J]. 地球化学,1975,(2)
- 汪本善,盛国英,栗能先等. 正烷烃在石油地球化学中的应用[J]. 地球化学,1975,(4):258~272
- 黄第藩. 中国陆相油气生成[M]. 北京:石油工业出版社,1982
- Carroll A R, Bohacs K M. Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins[J]. AAPG Bulletin, 2001,85(6):1033~1053
- 王秉海,钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 东营:石油大学出版社,1992
- 邓宏文,钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1993
- Stein R, Rullkötter J, Welte D H. Accumulation of organic-carbon rich sediments in the late Jurassic and Cretaceous Atlantic Ocean: A synthesis [J]. Chem Geol, 1986,56(1-2):1~32
- 杨华,张文正. 论鄂尔多斯盆地长 7 段优质油源岩在低渗透油气藏富集中的主导作用:地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005,34(2):147~154
- 张林晔,孔祥星,张春荣等. 济阳拗陷第三系优质烃源岩的发育及其意义[J]. 地球化学,2003,3(1):35~42
- 张林晔,张春荣. 低熟油生成机理及成油体系:以济阳拗陷牛庄洼陷南部斜坡为例[M]. 北京:地质出版社,1999
- 张林晔,刘庆,张春荣等. 东营凹陷成烃与成藏关系研究[M]. 北京:地质出版社,2005
- 朱光有,金强. 东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究[J]. 沉积学报,2003,21(3):506~512
- 张水昌,张宝民,王飞宇等. 塔里木盆地两套海相有效烃源岩: I 有机质性质、发育环境及控制因素[J]. 自然科学进展, 2001,11(3):261~268
- 刘华,李凌,吴智平. 胶莱盆地烃源岩分布及有机地球化学特征[J]. 石油实验地质,2006,28(6):574~580
- Hunt J M. The generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartment [J]. AAPG Bull, 1990,74(1):1~12
- 许晓明,刘震,谢启超等. 渤海湾盆地济阳拗陷异常高压特征分析[J]. 石油实验地质,2006,28(4):345~349
- 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京:科学出版社,2005
- Tiercelin J J, Thouin C, Kalala T, et al. Discovery of sub-lacustrine hydrothermal activity and associated massive sulfides and hydrocarbons in the north Tanganyika trough[J]. East African Rift Geology, 1989,17:1053~1056
- Kelts K. 湖相烃源岩的沉积环境:绪论[A]. 见:汪品先,刘传联编. 古湖泊论文集[G]. 北京:海洋出版社,1991. 68~77
- Talbot M R. 湖相生油岩的成因:来自热带非洲湖泊的资料[A]. 见:汪品先,刘传联编. 古湖泊论文集[G]. 北京:海洋出版社,1991. 52~67

- 23 刘传联,徐金鲤,汪品先. 藻类勃发:湖相油页岩形成的一种重要机制[J]. 地质论评,2001,47(2):207~210
- 24 王慧中,梅洪明. 东营凹陷沙三下亚段油页岩中古湖泊学信息[J]. 同济大学学报,1998,26(3):315~318
- 25 姚益民,徐道一,李保利等. 东营凹陷牛38井沙三段高分别率旋回地层研究[J]. 地层学杂志,2007,31(3):229~238
- 26 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):534~537
- 27 秦建中. 青藏高原羌塘盆地有机相展布与成烃模式[J]. 石油实验地质,2006,28(3):264~270
- 28 张林晔. 富集有机质成烃作用再认识:以东营凹陷为例[J]. 地球化学,2005,34(6):619~625
- 29 孟庆强,马亮帮,邹安德等. 不同藻类热模拟实验的生烃特征对比[J]. 石油实验地质,2008,30(3):281~285
- 30 刘传联,徐金鲤. 生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例[J]. 沉积学报,2002,20(1):144~150
- 31 Hobbie J E. Use of nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy [J]. Appl Environ Microbial, 1977,33:1225~1228
- 32 Fuhman J A. Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Columbia and California [J]. Appl Environ Microbial, 1980,39(6):1085~1095
- 33 Murphy L S, Hangen E M. The distribution and abundance of phototrophic ultraplankton in the North Atlantic [J]. Limnol Oceanogr, 1985,30:47~58
- 34 王广利,张林晔,王铁冠. β -烷萘烷在中国古近系陆相沉积中的发现及其地质意义[J]. 科学通报,2006,51(2):1438~1442
- 35 王广利,王铁冠,张林晔等. 2-甲基萘烷:陆相湖盆中古沉积环境的分子化石[J]. 地质学报,2006,80(6):902~909
- 36 贾国东,彭平安. 有机生物地球化学与晚新生代古全球变化研究[J]. 地学前缘,2005,12(2):179~187
- 37 莫晓勇,孙永革. 沉积有机质分子地球化学应用于古气候古环境研究[J]. 地球与环境,2005,33(2):85~90
- 38 Föllmi K B. The phosphorus cycle phosphogenesis and marine phosphate rich deposits [J]. Earth Science Reviews, 1996,40:55~124
- 39 Van Beek P, Reyss J L, Bontep, et al. Sr/Ba ratio in the Barite: A proxy of barite preservation in marine sediments [J]. Marine Geology, 2003,199:205~220
- 40 L Yons T W, Werne J P, Hollander, et al. Contrasting sulfur geochemistry and Fe/Al and Mo/Al ratios across the last oxic-to-anoxic transition in the Cariaco Basin, Venezuela [J]. Chemical Geology, 2003,195:131~157
- 41 Stoll H M, Schrag D P. Sr/Ca Variations in Cretaceous carbonates: relation to productivity and sea level change [J]. Paleogeography Paleoclimatology, Paleogeology, 2001,168:311~336
- 42 Meyers P A, Lallier-vergès E. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary Paleoclimates [J]. Journal of Paleolimnology, 1999,21:345~372
- 43 Halbach M, Koschinsky A, Halbach P. Report on the discovery of Gallionella ferruginea from an active hydrothermal field in the deep sea [J]. International Ridge—Crest Research, 2001,10(1):18~20
- 44 Lein A Y, Gal'chenko V F, Pimenov N V, et al. Role of bacterial chemosynthesis and methanotrophy in ocean biogeochemistry [J]. geochemistry International, 1993,30(9):87~104
- 45 金强,熊寿生,卢培德. 中国断陷盆地主要生油岩中的火山活动及其意义 [J]. 地质论评,1998,44(2):135~142
- 46 张文正,杨华,杨奕华等. 鄂尔多斯盆地长7湖相优质烃源岩的发育机制[A]. 见:第十一届全国有机地球化学学术会议论文摘要汇编[G]. 昆明:会议组委会,2007.104~105
- 47 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
- 48 石军柱,刘海涛,石娜. 海相火山岩高温有助于有机物质的富集[A]. 见:第十一届全国有机地球化学学术会议论文摘要汇编[G]. 昆明:会议组委会,2007.56~57
- 49 Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to oil and Gas Exploration [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978.55~63
- 50 Katz B J. Controls on distribution of lacustrine source rocks through time and space [A]. In: Katz B J, ed. Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs, AAPG Memoir 50 [M]. Tulsa: AAPG, 1990.61~76
- 51 Anderson R V, Dean W E. Lacustrine Varve formation through time [J]. palaeogeography, Palaeoclimatology, palaeoecology, 1988,62(1-4):215~235
- 52 胡春燕,刘立. 高频湖相沉积节律研究的新进展[J]. 世界地质,1998,17(2):14~17
- 53 Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new geological time scale, with special reference to Precambrian and Neogene [J]. Episodes, 2004,27(2):83~100
- 54 Weedon G. Time-series analysis and cyclostratigraphy: examining stratigraphic records of environmental cycles [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.1~259
- 55 张海峰. 以米氏旋回为标尺进行高级别层系地层划分与对比:以准噶尔盆地中I区块为例[J]. 油气地质与采收率,2006,13(4):18~20
- 56 董春梅. 基于河水位变化的层序地层模式:以济阳拗陷孤东油田为例[J]. 石油实验地质,2006,28(3):249~252
- 57 王冠民,钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. 岩石矿物学杂志,2004,23(1):43~48

(编辑 徐文明)