

湖相与海相碳酸盐岩烃源岩生烃条件对比

田春桃^{1,2,3}, 马素萍^{1,2}, 杨燕^{1,2,3}, 孟军⁴, 夏燕青^{1,2}

(1. 中科院 甘肃省油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中科院 油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国石油 青海油田马仙采油厂, 甘肃 敦煌 736202)

摘要: 根据分布特征、沉积环境、岩石类型、有机地球化学特征和生烃模式等方面的对比, 讨论了湖相碳酸盐岩和海相碳酸盐岩两种相同岩性、不同沉积环境烃源岩生烃条件的异同。海相与湖相碳酸盐岩烃源岩, 基本上都含有不同量的泥质成分; 它们的干酪根类型一般以Ⅰ型或Ⅱ型为主; 有机质赋存形式无太大差别, 湖相碳酸盐岩烃源岩中可能存在更多的无形态有机质; 海相碳酸盐岩有机碳含量普遍较低, 而湖相中有机质含量则变化很大; 湖相碳酸盐岩烃源岩的生烃模式相比海相研究薄弱, 但其二次成烃作用不容忽视。湖相碳酸盐岩烃源岩的形成条件受到较多因素的控制, 针对高有机质丰度湖相碳酸盐岩烃源岩形成的生物地球化学及沉积学等方面的研究尤其关键。另外, 其晚期生烃可否为湖相深层油气勘探提供充足的烃源仍是未来工作的重要方向之一。

关键词: 湖相; 海相; 生烃条件; 碳酸盐岩; 烃源岩

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Comparison of hydrocarbon generation conditions between lacustrine and marine carbonate source rocks

Tian Chuntao^{1,2,3}, Ma Suping^{1,2}, Yang Yan^{1,2,3}, Meng Jun⁴, Xia Yanqing^{1,2}

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Petroleum Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Maxian Oil Plant, Qinghai Oilfield, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: The differences of hydrocarbon-generating conditions of lacustrine and marine carbonate source rocks were discussed in various aspects, such as the distribution characteristics, sedimentary environment, rock type, organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation mode. The results show that marine and lacustrine carbonate source rocks all contain varying amounts of argillaceous components and are dominated by kerogen of type I or type II. In addition, there is no significant difference in occurrence of their organic matter, except for that lacustrine carbonate source rocks contain more amorphous organic matters. Organic carbon content of marine carbonate rocks is generally low, while that of lacustrine carbonate rocks is highly variable. The research of the hydrocarbon generation mode of lacustrine carbonate source rocks is still very weak in comparison with the marine carbonate source rocks, and the secondary hydrocarbon generation of the former should not be neglected. The formation conditions of lacustrine carbonate source rocks are controlled by many factors, the biogeochemical and sedimentological researches of lacustrine carbonate source rocks with high content of organic matters are especially important. Furthermore, the possibility of late hydrocarbon generation of lacustrine source rocks providing sufficient hydrocarbon sources for deep reservoirs of lacustrine facies is one of the important topics for future study.

Key words: lacustrine facies, marine facies, hydrocarbon generation condition, carbonate rock, source rock

我国以陆相油气田为主, 陆相生油理论的发展是我国石油地质学的特色^[1]。自20世纪60年代陆相生油理论得到肯定以来, 油气生成理论进入了陆相成油论和海相成油论并存发展的阶段^[2]。国内外油气勘探

实例表明, 湖相碳酸盐岩在一定条件下可作为一类陆相湖泊烃源岩。近年来, 在我国泌阳凹陷和柴达木盆地西部等地区发现了工业油气流, 表明湖相碳酸盐岩具有巨大的油气潜力, 极具经济价值^[3]。

收稿日期: 2012-12-20; 修订日期: 2014-05-15。

第一作者简介: 田春桃(1988—), 女, 博士研究生, 油气地球化学。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372157, 41272147); “十二五”国家油气重大专项(2011ZX05005-001-008HZ)。

国内外特别是我国对湖相碳酸盐岩烃源岩的研究由来已久。黄第藩(1987)对柴达木盆地西部古近系湖相碳酸盐岩地层的生油岩特征作了专门讨论^[4],1991年,李任伟等^[5]把东濮凹陷的湖相碳酸盐岩单独列为一类生油岩,并首次提出了湖相碳酸盐岩生油岩的概念。之后,许多学者(Harris,2000;Freytet和Verrecchia,2002;Zhu等,2004;Wang等,2010;王英华等,1993;黄杏珍等,1999,2001;邵宏舜等,2002;夏青松等,2003;陈建军等,2005;王广利等,2007;孙钰等,2008;马素萍等,2011;涂建琪等,2012)^[6-19]对湖相碳酸盐岩生油岩的有机地球化学特征、生烃特征、形成条件等方面进行了大量卓有成效的研究工作,取得了重要的科学成果,不仅丰富了陆相生油的地球化学理论,而且拓展了油气勘探的新领域。尽管如此,与海相碳酸盐岩烃源岩的研究相比,前者的研究仍显得薄弱。作为不同沉积环境下形成的相同岩性的两类有着重要意义的烃源岩,对比它们之间的生烃条件,对于湖相碳酸盐岩烃源岩的研究具有重要的借鉴意义。

1 海相和湖相碳酸盐岩烃源岩分布

国外海相碳酸盐岩烃源岩主要发育在中、新生代地层,在空间上更是遍布于许多地区,如西加拿大的泥盆系、阿基斯坦盆地和中东的侏罗系、美国南佛罗里达盆地下白垩统、哥伦比亚上白垩统Laluna组、西西里盆地中新统等^[20]。相比于国外,我国的海相碳酸盐岩发育时代老,烃源岩以古生界地层为主,如我国中西部的四川、鄂尔多斯、塔里木盆地,另外在南方、西藏地区还发育有中生代海相碳酸盐岩烃源岩,在华北发育有元古宙海相碳酸盐岩烃源岩^[21-23]。

而湖相碳酸盐岩烃源岩的发育,无论是国内还是国外,大都集中在中、新生代,如美国尤因塔盆地中部的古近系绿河组,我国东濮凹陷古近系沙河街组、泌阳凹陷古近系核桃园组、柴达木盆地西部古近系和酒西盆地下白垩统下沟组及赤金堡组等地区,都不同程度的发育了典型的湖相碳酸盐岩烃源岩。

2 两类碳酸盐岩烃源岩生烃条件对比

2.1 沉积环境

2.1.1 沉积相

海相碳酸盐岩盆地良好的烃源岩往往发育在海侵体系域形成时期。海侵体系域形成期间,海平面快速上升,盆地中某些地区处于缺氧和贫氧环境中,而且沉积速率很低,海相碳酸盐岩烃源岩就发育于这样低能

环境的沉积相——开阔海台地相、局限海台地相、生物泥丘相、广海陆棚相、浅海斜坡相等^[24-25]。李大成^[26]认为在海相碳酸盐岩烃源岩的沉积环境中,陆架内盆地最为重要,其次为陆架环境。陈践发等^[27]认为欠补偿浅水-深水盆地、台缘斜坡、半闭塞-闭塞欠补偿海湾和蒸发泄湖等环境为高有机质丰度海相碳酸盐岩烃源岩发育的最有力的沉积环境。另外生物礁对寻找海相碳酸盐岩烃源岩具有指示意义,一般在台地边缘、台地内凹陷缓坡等均有生物礁丘分布,而且生物礁丘间洼地也可发育烃源岩^[28]。

湖泊是一个复杂多变的动力系统,湖相碳酸盐岩烃源岩的发育更明显地受古气候、古水动力条件和古水介质性质等因素的控制^[16]。一般认为,湖相碳酸盐岩发育于构造活动相对稳定、湖盆水体持续扩张的阶段,而且大多形成于温热的气候条件下^[29]。而湖相碳酸盐岩烃源岩主要发育在半深湖-深湖相,位于浪基面之下,水体较深,能量弱,靠湖流使上下湖水得以缓慢交换,氧气和光线不充足,生物不发育^[13]。李红等^[30]认为白云岩形成时的沉积环境具有盐度高、水体安静、强还原湖泊的特征,并认为沉积于封闭深洼及半封闭湾的静水环境有利于湖相碳酸盐岩烃源岩的发育。

2.1.2 水介质条件

海相碳酸盐岩烃源岩的形成环境大多以还原、咸水、弱碱性和弱水动力条件为主要特征^[31]。高有机质丰度海相碳酸盐岩的形成往往同时受到了多种地质因素的控制,刘光鼎(2011)阐述了海相烃源岩大量堆积的两大有利条件(丰富的生产力和还原性保存条件),认为海水的深层缺氧有利于烃源岩的保存^[32],在此基础上,王清晨(2011)提出了“缺氧控源”的论点。可见水介质条件对于海相碳酸盐岩烃源岩的发育起着极其重要的作用。

原生的湖相碳酸盐岩沉积基本上都是化学沉积的产物,按其沉积时的水介质条件可分为硬水湖的沉积产物和卤水湖的沉积产物。而具有生油能力的湖相碳酸盐岩沉积多形成于卤水湖中,如东濮凹陷古近系沙河街组和泌阳凹陷古近系核桃园组等^[4]。盐湖中的碳酸盐岩形成于气温高、蒸发作用强的常年咸水湖、季节性盐湖、盐湖边缘的风化壳和含盐泥坪中^[16]。有利于厚度大、分布稳定的湖相白云岩形成的沉积水体的水化学类型应为碳酸盐型,古水介质应为偏碱性,pH值大于9^[11]。

2.2 岩石类型

海相碳酸盐岩烃源岩主要是暗色石灰岩及白云岩

类和它们与粘土矿物形成的各种过渡类型岩石,其碳酸盐含量一般大于20%,例如灰岩、白云岩、泥质灰岩、泥质白云岩、灰质泥岩、钙质页岩或钙质泥岩和含钙页岩等^[2,33]。黄籍中等^[24]认为泥质泥晶灰岩,生物泥-粒泥岩-泥粒岩微相,应该是碳酸盐岩烃源岩的主要岩类。梁狄刚等^[34]认为富含生物席(藻席、线叶植物席等),且一般都含泥质,在30%~50%以上,发育于深水陆棚相的海相碳酸盐岩可成为烃源岩。

湖相与海相相比,一般面积小,四周近邻古隆起,地形反差大,陆源碎屑物质经过短距离搬运直接进入深水湖盆,呈现出多物源、近物源、粗碎屑和相变快的沉积特点^[2]。受沉积特征的影响,湖相碳酸盐岩的岩性更为复杂多变,它由湖相泥岩与湖相碳酸盐岩组成互层甚至是纹层状沉积,水平层理发育,非均质性明显^[35]。例如,我国柴达木盆地西部古近系湖相碳酸盐岩烃源岩是由泥岩、灰岩、灰质泥岩、泥灰岩、云质泥岩及泥质白云岩和石膏、盐岩等各种岩石组成的互层沉积;而泌阳凹陷古近系核桃园组湖相碳酸盐岩沉积却以白云岩沉积为主,灰岩和泥质灰岩沉积较少,整体上为一套暗色泥质白云岩、白云质泥岩夹薄层粉、细砂岩的浅湖相沉积^[4]。程克明等^[36]认为湖相碳酸盐岩生烃与其藻纹层(或有机质纹层)的分布密切相关,因为源岩中有机质纹层的发育常常伴随其高有机质丰度和高生烃潜力的出现而出现。

可见,无论是海相还是湖相,碳酸盐岩烃源岩几乎都是不纯的,都含有一定量的泥质成分。但碳酸盐岩中泥质与有机质丰度、排烃能力是否相关仍存在争论,碳酸盐岩中泥质的作用仍有待进一步研究^[37]。

2.3 有机地球化学特征

2.3.1 沉积有机质

1) 成烃母质及有机质类型

普遍认为海相烃源岩的生烃母质以菌藻类为主,海相碳酸盐岩的有机质多属于偏腐泥型,干酪根类型为I-II₁型,多以II₁型干酪根为主。如鄂尔多斯盆地中部地区下古生界碳酸盐岩有机质类型基本上为I型和II型,表现出腐泥型母质特征,其原始生源主要是菌藻类和水生浮游生物^[38]。

湖相碳酸盐岩的干酪根类型一般也为I型或II型。如泌阳凹陷,丰富的藻类体和陆源有机质经细菌改造而“腐泥化”成I型和II型,其碳酸盐岩烃源岩中干酪根的O/C原子比值非常低,绝大部分都在0.05以下,H/C原子比值的变化范围为0.66~1.12,在范式坐标图上干酪根类型的点群基本都落在I型干酪根演化线的左侧^[39]。另外,王广利等^[15]在研究济阳坳陷渤南洼陷沙河街组下部湖相碳酸盐岩时发现,该区

湖相碳酸盐岩烃源岩中发育了一些特有的、或在泥质岩中含量很低的、与微生物活动有关的萜类化合物,并且样品中具有极低的甾烷/藿烷值(为0.10~0.28),这表明微生物是研究区湖相碳酸盐岩极其重要的生源,与以沟鞭藻、颗石藻等为主要生烃母质的咸化湖泊下形成的沙四段页岩和泥岩大不相同。

2) 有机质的赋存形式

海相碳酸盐岩烃源岩中有机质呈聚集状态和分散状态存在,其中,分散有机质可分为3类:一是吸附有机质,主要吸附于矿物岩石表面,主要来源于充填类、无定型类及碎屑类形式赋存的有机质,属于游离沥青;二是晶包有机质,主要包裹于隐晶质或细晶质矿物内,为未运移的原生有机质,结合在碳酸盐岩盐酸不溶物中,特别是粘土矿物中的有机质,在岩石中以备受束缚的晶间结合型、絮团型和浸染型有机质形式存在;三是包体有机质,主要产于结晶矿物的包裹体内,具有一定的形态,属于运移后的次生有机质^[40]。

湖相碳酸盐岩烃源岩中有机质的赋存形式与海相碳酸盐岩无太大差别,只是湖相碳酸盐岩烃源岩中或许存在更多的无形态有机质(无定型类),它的形成往往与生物降解作用有关。例如酒西盆地地下白垩统湖相碳酸盐岩烃源岩中有机质的最主要赋存形式就是无定型类,其主要生烃组分为腐泥无定形体和腐殖无定形体等^[18],而海相碳酸盐岩中很少见腐殖无定形体。

3) 有机质丰度

沉积环境、生物来源、有机质热演化以及碳酸盐岩的成岩作用共同控制着烃源岩的有机质丰度。我国海相碳酸盐岩烃源岩的有机碳含量普遍较低,一般在0.1%~1.0%之间^[26]。不同沉积环境下,其有机质含量具有明显的差异^[38,41]。虽然方解石、白云石吸附有机质的能力小于粘土矿物,并且碳酸盐岩在成岩作用中的有机质晶析作用又排除出一部分有机质,但海相碳酸盐岩中有机物质基本源于藻类等低等水生生物和菌类,机体富含蛋白质及脂肪,因此不能仅凭其现今有机碳含量而低估了他的有效成烃潜力。

由于湖相沉积环境的分割性和多样性,湖相碳酸盐岩烃源岩中有机质含量变化很大,其有机质丰度的高低可能受到更多因素的影响。柴达木盆地西部古近系湖相碳酸盐岩烃源岩中有机质的含量普遍比较低,其总有机碳含量一般均在0.4%以下,平均值只有0.32%;泌阳凹陷古近系核桃园组湖相碳酸盐岩烃源岩中有机质的含量则比较高,其总有机碳含量一般在0.23%~3.00%,高的可达4.87%,平均值达1.82%^[39]。湖相碳酸盐岩烃源岩常见有机质纹层结构,烃源岩中藻纹层的发育程度与烃源岩有机质丰度存在正相关关系,富含藻纹层的湖相碳酸盐岩优质烃

源岩有机碳含量一般在2.0%以上^[18]。

2.3.2 热演化作用

我国海相碳酸盐岩地层以古生界特别是以下古生界为主,时代较老,海相地层经受了长期且复杂的热力作用,致使海相碳酸盐岩有机质大都进入高-过成熟阶段,而未见未成熟烃源岩^[42-43]。如鄂尔多斯盆地和四川盆地海相地层中有机质演化程度普遍较高,南方地区更高,均处于高成熟及过成熟阶段,海相油气藏中只见气藏,不见油藏^[26]。目前我国的海相碳酸盐岩油气勘探现状如金之钩等认为的那样,“找到了大油田,但油气源不清楚”,因而,影响了碳酸盐岩地层油气勘探和部署^[42]。针对高-过成熟烃源岩成熟度参数的选取,是目前海相碳酸盐岩烃源岩研究的关键问题之一^[44]。

湖相碳酸盐岩烃源岩在有机质的热演化程度上存在迟缓效应。不同的矿物成分对有机质的热演化过程可产生明显不同的催化效应。贵阳地化所根据模拟实验结果,提出催化能力递减的矿物顺序为:钠蒙脱石—钙蒙脱石—方解石—高岭石—微斜长石。由于这种催化能力的差异,造成同一湖盆不同相带之间的烃源岩在热演化程度上存在巨大差异。如我国柴达木盆地西部古近系狮子沟盐湖面积不足1 000 km²,地温梯度为31 °C/km,由湖盆边缘向湖盆中心,地层中碳酸盐矿物的含量逐渐增加,有机质的门限深度也相应的增加,其中狮14井为2 600 m,狮18井为2 880 m,狮20井为3 740 m^[4]。

3 生烃模式

关于海相和陆相碳酸盐岩油气生成,就其机制而言并无差别,只是由于沉积环境及岩石类型、母质输入、成岩作用及排烃条件等的不同,相应油气性质方面也有较大差别。

国内外许多研究表明^[45-46],海相碳酸盐岩具有分段式生烃演化模式,即第一阶段为生物聚合物的热解聚,提供未熟油;第二阶段为干酪根的热降解,提供成熟油;第三阶段为包裹有机质和束缚有机质的释放,仍然可以提供一定数量的液态石油。也有的学者提出四阶段的成烃特征,即原始沥青解聚成烃、干酪根降解成烃、包裹有机质释放成烃和热裂解气生成^[47]。海相碳酸盐岩的生烃模式强调了早期生烃和高过成熟阶段有机质的释放或者裂解生烃的重要性,并认为碳酸盐岩的生烃范围(尤其是生油范围)宽于泥质烃源岩,其生烃高峰明显滞后与海相泥质烃源岩。

而较之海相,湖相碳酸盐岩烃源岩的生烃模式研究还相当薄弱。值得注意的是,湖相碳酸盐岩在成熟

阶段后期至高成熟阶段束缚有机质的二次成烃作用不容忽视,它是形成深层油气资源的一个重要来源。邵宏舜(2002)^[12]对泌阳凹陷古近系核桃园组湖相白云岩成烃模式的研究以及王广利等(2007)^[15]对济阳坳陷沙河街组下部湖相碳酸盐岩烃源岩的研究都表明,湖相碳酸盐岩存在早期和晚期两个成烃高峰期,浅层高峰期形成低(未)熟油,深层高峰期形成常规的成熟油。

4 研究展望

尽管与泥质烃源岩相比,湖相碳酸盐岩在地质历史中发育有限,但它仍然是陆相烃源岩中的重要部分。勘探实践表明,湖相碳酸盐岩在一定条件下即是生油层又是储集层,可作为非常规油气研究的一个方向。由于湖相环境相对于海相不稳定性更强,湖相碳酸盐岩烃源岩的形成条件亦受到更多因素的控制。针对高有机质丰度湖相碳酸盐岩烃源岩形成的生物地球化学及沉积学等方面的研究尤其关键。另外,该类烃源岩的生烃机理尚未取得实质性的成果,其晚期生烃可否为湖相深层油气勘探提供充足的烃源仍是个未知数。

参 考 文 献

- [1] 黄第藩,李晋超. 中国陆相油气生成[M]. 北京:石油工业出版社,1982:1-80.
Huang Difan, Li Jinchao. Chinese Continental Hydrocarbon Generation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982:1-80.
- [2] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京:科学出版社,2005:111-124.
Qin Jianzhong. Hydrocarbon source rocks in China[M]. Beijing: Science Press, 2005:111-124.
- [3] 初广震,张矿明,柳佳期. 湖相碳酸盐岩油气资源分析与勘探前景[J]. 资源与产业,2010,12(2):99-102.
Chu Guangzhen, Zhang Kuangming, Liu Jiaqi. Analysis and prospects of oil-gas resources in lacustrine carbonate rocks[J]. Resources & Industries, 2010, 12(2):99-102.
- [4] 妥进才,黄杏珍. 湖相碳酸盐岩生油岩研究进展[J]. 地球科学进展,1996,11(6):67-71.
Cuo Jincai, Huang Xingzhen. Advances on lacustrine carbonate source rock research[J]. Advances in Earth Science, 1996, 11(6):67-71.
- [5] 李任伟. 含蒸发岩建造湖盆生油特征及其意义——东濮凹陷油气生成地球化学研究[M]. 北京:石油工业出版社,1991:104-124.
Li Renwei. Oil generation characteristics and significance in the lake basin which is containing evaporites——geochemical studies of hydrocarbon generation in Dongpu Depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991:104-124.
- [6] Frey P, Verrecchia E P. Lacustrine and palustrine carbonate petrography: an overview[J]. Journal of Paleolimnology, 2002, 27(2):221-237.
- [7] Zhu G Y, Jin Q, Zhang S C, et al. Distribution characteristics of effective source rocks and their control on hydrocarbon accumulation: a

- case study from the Dongying Sag, Eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2004, 78(6): 1275–1288.
- [8] Wang G L, Wang T G, Simoneit B R T, et al. Sulfur rich petroleum derived from lacustrine carbonate source rocks in Bohai Bay Basin, East China[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(4): 340–354.
- [9] 王英华, 周书欣, 张秀莲. 中国湖相碳酸盐岩[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1993: 1–123.
- Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. Chinese lacustrine carbonates[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993: 1–123.
- [10] 黄杏珍, 闫存凤, 王随继, 等. 苏打湖型的湖相碳酸盐岩特征及沉积模式[J]. *沉积学报*, 1999, 17(S1): 728–733.
- Huang Xingzhen, Yan Cunfeng, Wang Suiji, et al. The feature and deposit model of lacustrine carbonate rocks formed in the course of soda lake evolution[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(S1): 728–733.
- [11] 黄杏珍, 邵宏舜, 闫存凤, 等. 泌阳凹陷下第三系湖相白云岩形成条件[J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 207–213.
- Huang Xingzhen, Shao Hongshun, Yan Cunfeng, et al. Sedimentary condition of lacustrine dolomite in the Lower Tertiary Biyang Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 207–213.
- [12] 邵宏舜, 黄杏珍, 闫存凤, 等. 泌阳凹陷湖相碳酸盐岩未成熟石油的形成条件[J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 266–272.
- Shao Hongshun, Huang Xingzhen, Yan Cunfeng, et al. Conditions for the formation of immature oil in lacustrine carbonate rocks in Biyang depression[J]. *Geochimica*, 2002, 31(3): 266–272.
- [13] 夏青松, 田景春, 倪新锋. 湖相碳酸盐岩研究现状及意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2003, 23(1): 105–112.
- Xia Qingxiong, Tian Jingchun, Ni Xinfeng. Lacustrine carbonate rocks in China: An overview[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2003, 23(1): 105–112.
- [14] 陈建军, 程克明, 熊英, 等. 酒西坳陷下白垩统藻纹层灰岩生烃特征[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(6): 61–65.
- Chen Jianjun, Cheng Keming, Xiong Ying, et al. Hydrocarbon generation of laminar algal limestone of Lower Cretaceous in the Jiuxi Depression, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(6): 61–65.
- [15] 王广利, 王铁冠, 张林晔. 济阳坳陷渤南洼陷湖相碳酸盐岩成烃特征[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 62–68.
- Wang Guangli, Wang Tieguan, Zhang Linye. Hydrocarbon – generation characteristics for lacustrine carbonate source rocks in Bonan Sag of Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 62–68.
- [16] 孙钰, 钟建华, 袁向春, 等. 国内湖相碳酸盐岩研究的回顾与展望[J]. *特种油气藏*, 2008, 15(5): 1–6.
- Sun Jue, Zhong Jianhua, Yuan Xiangchun, et al. Review and prospect of the study on domestic lacustrine carbonate rocks[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2008, 15(5): 1–6.
- [17] 马素萍, 孙东, 张晓宝, 等. 酒西盆地青西凹陷下白垩统湖相烃源岩生烃动力学研究[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(2): 219–223.
- Ma Suping, Sun Dong, Zhang Xiaobao, et al. The study of hydrocarbon generation kinetics in Lower Cretaceous lacustrine source rock1, Qingxi Depression, Jiuxi Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(2): 219–223.
- [18] 涂建琪, 陈建平, 张大江, 等. 湖相碳酸盐岩烃源岩有机显微组分分类及其岩石学特征——以酒西盆地为例[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 917–926.
- Tu Jianqi, Chen Jianping, Zhang Dajiang, et al. A petrographic classification of macerals in lacustrine carbonate source rocks and their organic petrological characteristics: A case study on Jiuxi basin, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 917–926.
- [19] Harris N B. Toca Carbonate, Congo Basin: Response to an Evolving Rift Lake in Petroleum systems of south Atlantic margins[J]. *AAPG*, 2000, 73(2): 341–160.
- [20] Palacas J G. Carbonate rocks as source of petroleum: Geological and chemical characteristics and oil-source correlation[J]. London, 11th World Petroleum Congress Proceedings, 1984, 2: 31–43.
- [21] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 15–22.
- Jin Zhijun. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 15–22.
- [22] 汪泽成, 赵文智, 胡素云, 等. 我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(2): 153–160.
- Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Hu Suyun, et al. Reservoir types and distribution characteristics of large marine carbonate oil and gas fields in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2): 153–160.
- [23] 陶崇智, 白国平, 王大鹏, 等. 塔里木盆地与威利斯顿盆地古生界海相碳酸盐岩油气成藏特征对比[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 431–440.
- Tao Chongzhi, Bai Guoping, Wang Dapeng, et al. A comparison of hydrocarbon accumulation characteristics of the Paleozoic marine carbonates in Tarim Basin and Williston Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 431–440.
- [24] 黄籍中, 吕宗刚. 碳酸盐岩烃源岩判识与实践——以四川盆地为例[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(3): 8–14.
- Huang Jizhong, Lv Zonggang. How to judge carbonate rock as source rock: a case of Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16(3): 8–14.
- [25] 倪春华, 周小进, 王果寿, 等. 鄂尔多斯盆地南缘平凉组烃源岩沉积环境与地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(1): 38–46.
- Ni Chunhua, Zhou Xiaojin, Wang Guoshou, et al. Sedimentary environment and geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Pingliang Formation, southern margin of the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 38–46.
- [26] 李大成. 国内外海相油气基本地质特征及下步研究建议[J]. *海相油气地质*, 2005, 10(1): 13–17.
- Li Dacheng. Basic geological characteristics of marine facies strata and fields in China compared with in the globe[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005, 10(1): 13–17.
- [27] 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.
- Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Sunxingli, et al. Main factors influencing marine carbonate source rock formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 467–472.
- [28] 英亚歌. 浅谈海相碳酸盐岩地层与油气成藏[J]. *科技情报开发与经济*, 2010, 20(10): 154–156.

- Ying Yage. Talking about marine carbonate formation and oil-gas accumulation [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010, 20(10): 154–156.
- [29] 周自立, 杜毓华. 湖相碳酸盐岩的沉积相与油气分布关系——以山东胜利油田下第三系碳酸盐岩为例[J]. 石油实验地质, 1986, 17(2): 123–132.
- Zhou Zili, Du Yunhua. Relationship between sedimentary facies of lacustrine carbonate rocks and oil and gas distribution [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1986, 17(2): 123–132.
- [30] 李红, 柳益群, 朱玉双. 新疆三塘湖盆地二叠系湖相白云岩形成机理初探[J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 75–81.
- Li Hong, Liu Yiqun, Zhu Yushuang. Primary study on the origin of lacustrine dolostones of Permian, Sangtanghu basin, Xinjiang [J]. Sedimentologica Sinica, 2007, 25(1): 75–81.
- [31] 倪春华, 周小进, 王果寿, 等. 海相烃源岩有机质丰度的影响因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(2): 20–23.
- Ni Chunhua, Zhou Xiaojin, Wang Guoshou, et al. Factors affecting organic matter abundance of marine source rocks [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(2): 20–23.
- [32] 刘光鼎, 杨长春, 王清晨. 有利于海相烃源岩形成的物理作用[J]. 地质科学, 2011, 46(1): 1–4.
- Liu Guangding, Yang Changchun, Wang Qingchen. Physical condition favoring formation of marine hydrocarbon source rocks [J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(1): 1–4.
- [33] 杨威, 魏国齐, 王清华, 等. 塔里木盆地寒武系两类优质烃源岩及其形成的含油气系统[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 263–267.
- Yang Wei, Wei Guoqi, Wang Qinghua, et al. Two types of Cambrian source rocks and related petroleum systems in Tarin basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 263–267.
- [34] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一) 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1–16.
- Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (part 1): distribution of four suits of regional marine source rock [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2): 1–16.
- [35] 林会喜, 彭苏萍, 杜文凤, 等. 渤海洼陷沙四上亚段碳酸盐岩成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 161–173.
- Lin Huixi, Peng Suping, Du Wenfeng, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and prospecting potentials of carbonate rocks in the Upper Es4 of Bonan Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 161–173.
- [36] 程克明, 熊英. 湖相碳酸盐岩中的优质烃源岩[J]. 第十届全国有机地球化学学术会议, 中国无锡, 2005: 29–31.
- Cheng Keming, Xiong Ying. Hydrocarbon source rocks of high quality in lacustrine carbonate rocks [J]. The 10th National Meeting on Organic Geochemistry, China Wuxi, 2005: 29–31.
- [37] 刘华, 彭平安, 刘大永, 等. 中国海相碳酸盐岩评价中有关有机质丰度下限的几点讨论[J]. 地质通报, 2006, 25(9~10): 1100–1103.
- Liu Hua, Peng Pingan, Liu Dayong, et al. Threshold of the organic matter abundance in marine carbonate source rocks in China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9~10): 1100–1103.
- [38] 李贤庆, 侯读杰, 胡国艺, 等. 鄂尔多斯盆地中部地区下古生界碳酸盐岩生烃潜力探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(3): 152–157.
- Li Xianqing, Hou Dujie, Hu Guoyi, et al. The discussion on hydrocarbon-generated potential of lower paleozoic carbonates in the central part of Erdos Basin [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2002, 21(3): 152–157.
- [39] 妥进才, 曾凡刚, 黄杏珍, 等. 泌阳凹陷—湖相碳酸盐岩生油的一个实例[J]. 沉积学报, 1997, 15(sup): 64–69.
- Tuo Jincai, Zeng Fangang, Huang Xingzhen, et al. Biyang Depression—an example of lacustrine carbonate as source rocks of petroleum [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(sup): 64–69.
- [40] 王杰, 陈践发. 海相碳酸盐岩烃源岩的研究进展[J]. 天然气工业, 2004, 24(8): 21–23.
- Wang Jie, Chen Jianfa. Present situation and principal progress in the research on marine carbonate source rocks [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(8): 21–23.
- [41] 黄继文, 顾忆, 丁勇, 等. 塔里木盆地北部地区上奥陶统烃源条件[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 853–858.
- Huang Jiwen, Gu Yi, Ding Yong, et al. Upper Ordovician source rocks in northern Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 853–858.
- [42] 成海燕. 海相碳酸盐岩烃源岩的评价参数[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(12): 14–18.
- Cheng Haiyan. Evaluation parameters of marine carbonate source rocks [J]. Marine Geology Letters, 2007, 23(12): 14–18.
- [43] 刘全有, 金之钧, 高波, 等. 四川盆地二叠系烃源岩类型与生烃潜力[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 10–18.
- Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, et al. Types and hydrocarbon generation potential of the Permian source rocks in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 10–18.
- [44] 耿新华, 耿安松, 熊永强. 我国下古生界碳酸盐岩烃源岩评价研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(4): 344–349.
- Geng Xinhua, Geng Ansong, Xiong Yongqiang. Review on the evaluation of Lower Paleozoic carbonate source rocks in China [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2004, 23(4): 344–349.
- [45] Wang Z Y, Cheng K M. the hydrocarbon generation mechanism and three-stage type model of hydrocarbon generation for carbonate source rocks [J]. Science in China Series D, 1997, 40(3): 232–238.
- [46] 熊英, 程克明, 马立元. 酒西坳陷下白垩统湖相碳酸盐岩生烃研究[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 687–691.
- Xiong Ying, Cheng Keming, Ma Liyuan. Hydrocarbon generation of Lower Cretaceous lacustrine carbonate in Jiuxi Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 687–691.
- [47] 刘喜顺. 湘中坳陷上古生界碳酸盐岩烃源岩特征及生烃模式[J]. 海相油气地质, 2008, 13(1): 13–17.
- Liu Xishun. Characteristics and hydrocarbon generation model of upper paleozoic carbonate source rocks in Xiangzhong Depression [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(1): 13–17.