#### 文章编号:1673-5005(2012)03-0038-06

# 马朗凹陷芦草沟组页岩油储层成岩演化与 溶蚀孔隙形成机制

吴林钢<sup>1</sup>,李秀生<sup>1</sup>,郭小波<sup>2</sup>,罗权生<sup>3</sup>,刘晓健<sup>2</sup>,陈 旋<sup>3</sup>,姜振学<sup>2</sup> (1.中国石油大学石油工程学院,北京 102249;2.中国石油大学地球科学学院,北京 102249; 3.中国石油吐哈油田 勘探开发研究院,新疆哈密 839009)

摘要:通过场发射环境扫描电子显微镜、X 射线衍射等试验手段,对三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组页岩油储层成岩演 化特征与溶蚀孔隙形成机制进行研究。结果表明:二叠系芦草沟组泥页岩为低孔、特低渗储层,主要经历了压实、胶 结、交代以及溶解等成岩作用;有机质热演化与无机矿物成岩演化在时空上相对应,有机质生经高峰、孔隙度高值 区、伊利石含量高值区在同一深度出现;生烃过程形成的酸性流体溶解不稳定矿物,形成溶蚀孔隙,同时为伊利石化 提供 K<sup>\*</sup>;矿物溶蚀孔和有机质残留孔是页岩油重要的储集空间,伊利石化可加速钾长石溶解,并造成矿物的体积收 缩,对储集空间的形成具有明显促进作用;泥页岩中溶蚀孔隙的形成与有机质生烃、油气初次运移同步。 关键词:页岩油;储层;成岩演化;溶蚀孔隙;形成机制;马朗凹陷 中图分类号:TE 122.2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.007

# Diagenetic evolution and formation mechanism of dissolved pore of shale oil reservoirs of Lucaogou formation in Malang sag

WU Lin-gang<sup>1</sup>, LI Xiu-sheng<sup>1</sup>, GUO Xiao-bo<sup>2</sup>, LUO Quan-sheng<sup>3</sup>, LIU Xiao-jian<sup>2</sup>, CHEN Xuan<sup>3</sup>, JIANG Zhen-xue<sup>2</sup>

College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
 College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
 Research Institute of Exploration and Development of Tuha Oilfield, PetroChina, Hami 839009, China)

Abstract Based on the analysis of field emission ESEM, X-ray diffraction, the characteristics of diagenetic evolution and the formation mechanism of dissolved pores of Lucaogou formation shale oil reservoir in Malang sag were systematically researched. The results show that Permian Lucaogou formation shale oil reservoir is characterized by low porosity and ultralow-permeability. The reservoir mainly experienced compaction, dissolution, cementation and metasomatism. Organic matter and inorganic mineral diagenetic evolution are corresponding at space and time, because peak period of hydrocarbon-generating, high porosity and high illite content occur at the same depth. The acid fluid generated by hydrocarbon formation can dissolve unstable minerals and therefore form dissolved pores, which provides K\* for illitization at the same time. Dissolved pores and organic-matter pores are the major storage spaces of shale oil. Illitization accelerates the dissolution of potassium feldspar and causes mineral volume contraction, which obviously promotes the formation of secondary pores. The progress of the formation of dissolved pores is synchronized with hydrocarbon generation and the primary migration of oil.

Key words: shale oil; reservoirs; diagenetic evolution; dissolved pores; formation mechanism; Malang sag

美国页岩油气勘探开发获得了巨大成功,在非 常规油气领域提出了一系列理论、技术创新。2011 年美国政府能源机构再次强调了页岩油、页岩气在 美国国内油气生产中的重要性,倡导大力开展非常 规油气资源勘探<sup>[12]</sup>。在中国和世界其他国家,页岩 油资源分布范围广、资源潜力大<sup>[3]</sup>。新疆三塘湖盆 地位于阿尔泰山系和天山山系之间,南邻吐哈盆地, 西邻准噶尔盆地,是在早古生代基底上发展起来的

,

作者简介:吴林钢(1962-),男(汉族),浙江诸暨人,博士研究生,主要从事油气藏评价与开发部署等研究工作。

收稿日期:2011-10-16

基金项目:国家"973"重点基础研究发展规划项目(2011CB201105)

山间叠合盆地;盆地主要经历了前晚石炭世基底形成的板块构造运动和晚石炭世以来盆地沉积盖层形成发展的板内构造运动两大阶段<sup>[4]</sup>。马朗凹陷芦草沟组泥页岩为一套陆相近海湖盆沉积,黄志龙<sup>①</sup>研究认为,芦草沟组泥页岩为一套优质烃源岩,处于低成熟—成熟早期阶段,生成的大量烃类滞留于烃源岩中,形成页岩油;泥页岩中所含大量微米—纳米级次生孔隙是页岩油重要的储集空间。页岩油赋存形式和富集程度与泥页岩储集空间类型及形成机制 有很大关系。因此,笔者依据泥页岩有机地球化学与无机地球化学分析数据、扫描电镜观察等,对马朗凹陷芦草沟组页岩油储层成岩演化与次生溶蚀孔隙形成机制进行研究。

## 1 页岩油储层特征与成岩作用

#### 1.1 储层特征

盆地呈北西-南东向带状展布,长约 500 km,宽 约 40~70 km,面积约为 2.3×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。马朗凹陷位 于三塘湖盆地的西南部,是该盆地主要的富烃凹陷 (图 1)<sup>[4]</sup>。马朗凹陷芦草沟组页岩油储层 250 个柱 塞样品物性测试显示, 72.2% 的样品孔隙度低于 8.0%, 74.99% 的样品渗透率低于 0.05×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 低于 1×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup> 的样品占 82.4%,属于典型的低 孔—特低渗型储层(图 2)。芦草沟组泥页岩矿物组 成中,石英含量一般为 20%~40%,长石含量一般 为 20%~30%,碳酸盐岩含量一般为 5%~48%。



图 1 研究区构造位置平面图 Fig. 1 Sketch map of structural location of research area





Fig. 2 Reservoir properties of shale oil of Lucaogou formation in Malang sag

#### 1.2 成岩作用类型

芦草沟组泥页岩储层在沉积埋藏过程中,主 要经历了压实作用、胶结作用、溶解作用和交代作 用等成岩作用类型:①压实作用一方面使岩石致 密化,物性变差,另一方面可使刚性颗粒产生裂 缝、微裂缝,纹层岩形成层间滑脱缝,改善储层物 性,镜下可见塑性矿物弯曲和刚性矿物的破裂现 象;②胶结作用作为一种重要的化学成岩作用,在 泥页岩中同样存在,芦草组泥页岩主要发生灰质 胶结、自生黏土矿物胶结等,胶结作用一方面使孔 隙空间变小,喉道变窄,储层物性变差,另一方面 在一定程度上可以抑制压实作用,有利于原生孔 隙的保存,此外胶结物的溶解又是次生孔隙的主 要成因;③溶解作用主要为有机质热演化过程中 形成的酸性流体对泥页岩中不稳定矿物的溶蚀,如长石溶蚀、碳酸盐岩溶蚀;④交代作用在本区泥 页岩中不易观察,电镜下可见石英交代钾长石形 成自生石英晶体的沉淀。

页岩油为典型的源、储同体的非常规油气,储 层成岩演化是一种复杂的有机、无机流体—岩石 反应及伴随的物理变化过程,众多学者研究泥页 岩成岩演化的重点多是放在其对临近砂岩成岩演 化及次生孔隙形成的影响或其他地质方面<sup>[56]</sup>。 本文主要从有机质地球化学和无机地球化学角度 分析泥页岩的成岩演化及其次生溶蚀孔隙的形成 机制。

# 2 泥页岩有机质成岩演化与次生孔隙 形成

#### 2.1 有机质成岩演化特征

马朗凹陷现今地温梯度一般为 2. 2 ~ 2. 4 ℃/ 100 m, 芦草沟组泥页岩最大埋深约 4. 3 km。有机 地球化学分析表明,该泥页岩镜质体反射率  $R_{o}$  — 般为 0.4% ~0.9%,岩心抽提物中成熟度参数  $C_{29}$ 甾烷  $w\alpha\alpha\alpha(20S)/w\alpha\alpha\alpha(20S+20R)$  与  $C_{29}$  甾烷 w(ββ)/ $w(\alpha\alpha+\beta\beta)$  —般为 0.2 ~0.4,泥页岩处于 低成熟—成熟早期阶段。镜质体反射率( $R_{o}$ )作为 碎屑岩成岩阶段划分的主要依据,按碎屑岩成岩 演化阶段划分标准(SY/T 5477-2003),芦草沟组 泥页岩处于中成岩阶段 A 期的早期。黄志龙等<sup>①</sup> 根据生烃转化率  $S_1/(S_1+S_2)$  和 w(氯仿沥青"A")/w(TOC)等参数分析,确定  $R_0 = 0.55\% ~$ 0.75%为芦草沟组泥页岩主生烃段,对应深度为 1.8~2.9 km,并建立有机质的成岩、生烃演化模 式(图 3)。







#### 2.2 有机成因次生孔隙形成

经氩离子抛光芦草沟组泥页岩样品表面,在 场发射环境扫描电子显微镜下可见发育有机质 孔,如H10井2.2971km白云质泥岩中可见有机 质孔(能谱分析元素主要为C),孔隙空间大小在 几十纳米至几百纳米(10<sup>-9</sup>m)之间(图4)。有机 质孔为有机质热演化过程中形成的生烃残留孔 隙,一般形状较规则,多呈凹坑状、蜂窝状,由于泥 页岩的非均质性,其大小、数量和密度都有较大变 化<sup>[7]</sup>。对同一样品孔隙度与总有机碳含量分析, 二者呈正相关关系(图 5(a))。Daniel 等<sup>[8]</sup> 研究 认为 TOC 含量为 6.41% 的泥页岩,达到生干气窗 时,会产生 4.3% 的体积孔隙。孔隙度、总有机碳 含量与深度的关系显示,有机质孔的发育与成熟 度关系不明显(图 5(b)、5(c))。因此,芦草沟组 页岩油储层有机质孔发育主要受总有机碳含量控 制,且二者成正比。







① 黄志龙. 条湖—马朗凹陷二叠系芦草沟组页岩油气藏地质条件综合评价. 内部报告, 2011.





## 3 无机矿物成岩演化与溶蚀孔隙形成

#### 3.1 无机矿物成岩演化特征

黏土矿物成岩演化是无机矿物成岩演化研究的 重要内容。研究区高岭石含量随深度变化不明显, 始终小于 20%,所以自生高岭石含量很少;绿泥石 含量出现一个平缓高值段,之后递减且含量一般小 于 20%;伊利石含量呈现由小变大再减小的过程, 伊/蒙混层含量与伊利石呈镜像关系,含量由大变小 再增大,2.325 km 处的伊利石含量达 100%,伊/蒙 混层为零。在深度 2.0 km(图 6,a 线)与 2.6 km (图 6,c 线)之间,伊利石高值区对应于伊/蒙混层 低值区,应是伊/蒙混层向伊利石转化造成的,绿泥 石出现高值区,但不明显,同时孔隙度也为高值区。 在约 2.3 km 处(图 6,b 线),孔隙度、伊利石、伊/蒙 混层同时出现变化拐点。可见,芦草沟组页岩油储 集空间的形成与黏土矿物的成岩演化存在密切关 系。





## 3.2 无机矿物溶蚀孔隙的形成机制

氢离子抛光的岩石表面于扫描电镜下可见无机 矿物溶蚀孔隙发育(图7(a)、(b)),溶蚀孔隙主要 是有机质生烃造成的酸性流体对不稳定矿物(长 石、碳酸盐岩等)的溶蚀而形成。孔隙度与黏土矿 物成岩演化关系显示,伊利石化对芦草沟组页岩油 储集空间的形成具有重要的贡献,绿泥石化和高岭 石化的作用不明显(图6),伊利石化在致密储层中 的积极作用已被众多研究所证实<sup>[9-10]</sup>。芦草沟组页 岩油储层中伊利石的形成机制主要是:

蒙脱石+4.5K<sup>+</sup>+8Al<sup>3+</sup>→伊利石+Na<sup>+</sup>+2Ca<sup>2+</sup>+ 2.5Fe<sup>3+</sup>+2Mg<sup>2+</sup>+3Si<sup>4+</sup>. 芦草沟组沉积时期火山活动频繁,沉积有火山 灰物质,可导致芦草沟组泥页岩中原始蒙脱石含量 较高,在 K\*和 Al<sup>3+</sup>供应充足的情况下,蒙脱石便可 经伊蒙混层向伊利石大量转化,从而使伊利石含量 增加。蒙脱石向伊利石转化是成岩演化中钾长石克 服溶解动力学屏障的重要机制<sup>[11]</sup>。Berger 等<sup>[12]</sup>实 验研究认为,蒙脱石向伊利石转化是一个低能耗的 自发反应,有机质的成熟可以加速钾长石的溶解,增 加蒙脱石伊利石化的反应速率,同时形成溶蚀孔隙。 蒙脱石向伊利石转化脱出层间水,导致层间塌陷,颗 粒体积收缩也增加孔隙度<sup>[13]</sup>。



(c) H21井, 2.5902 km灰质泥岩, 溶蚀痕迹与自生石英

图 7 马朗凹陷芦草沟组泥页岩中溶蚀孔隙特征

#### Fig. 7 Characteristics of dissolved pores of Lucaogou formation shale in Malang sag

其次,还可存在另一种伊利石化过程<sup>[14]</sup>: 钾长石+2/3H<sup>+</sup>→2/3K<sup>+</sup>+1/3 伊利石+2SiO<sub>2</sub>(sq).

Thyne 等<sup>[14]</sup>认为此过程是一个钾长石快速溶 解、伊利石快速形成的过程,生成的 SiO<sub>2</sub> 溶液最终 结晶形成固态 SiO<sub>2</sub>,可看作伊利石、石英交代钾长 石。理论分析表明,钾长石的摩尔体积为 108.87 cm<sup>3</sup>/mol、伊利石摩尔体积为 140.71 cm<sup>3</sup>/mol、SiO<sub>2</sub> 的摩尔体积为 22.688 cm<sup>3</sup>/mol<sup>[15]</sup>,此反应固体体积 减少约 16.6 cm<sup>3</sup>/mol,相应造成储集空间的增大,而 且石英增加了储层的抗压实能力。芦草沟组泥页岩 自然断面扫描电镜观察,可见溶蚀痕迹和自生石英 的沉淀现象(图 7(c)),可见烃类的存在并没有阻 止泥质岩中矿物的溶解和伊利石、石英的沉淀。

# 4 有机质与无机矿物演化的联系及其 地质意义

Abid 等<sup>[16]</sup>研究有机质热成熟作用与伊利石化 关系时认为,前者造成的孔隙流体地球化学性质的 变化对伊利石化的作用可能较温度的影响要大。蒙 脱石伊利石化与其稳定存在需要弱碱性到碱性的流 体介质,而矿物溶解形成溶蚀孔隙需要酸性流体介 质<sup>[13]</sup>。有机质成岩演化与黏土矿物成岩演化特征 表明,有机质生烃高峰与伊利石化高峰、孔隙度高值 区相对应(图6),可见,芦草沟组泥页岩中酸性和碱 性流体介质环境是共同存在的。芦草沟组现今地层 水主要为 NaHCO, 型, 芦草沟组沉积于咸水—半咸 水的古水体环境,水体安静、还原性强,原始地层水 为碱性[17-18]。随着沉积成岩演化,该泥页岩成为一 套致密层,渗透率普遍极低,其中流体性质主要受原 始沉积水、有机质演化、黏土矿物成岩演化等的内部 因素影响,且原始沉积水性质影响最大,宏观地层水 性质为碱性<sup>[19]</sup>。在与钾长石毗邻的微观环境中,有 机质生烃形成酸性流体,溶蚀钾长石等不稳定矿物; 当 K<sup>+</sup>达到一定浓度便发生蒙脱石伊利石化。伊利 石化对酸性流体的消耗以及形成的碱金属离子,有 利于保持黏土矿物稳定存在的宏观碱性环境。因 此,马朗凹陷芦草沟组页岩油储层次生孔隙形成需 要泥页岩具备良好的生烃能力,且具备适量钾长石、 碳酸盐岩等易溶矿物。

不稳定矿物溶蚀需要一个相对开放的环境,流 体流动可以降低溶解物质浓度,使溶蚀作用进一步 加强。泥页岩中流体可来源于地层水和蒙脱石层间 水的析出,流动动力是成岩演化形成的局部超压,流 动通道可以是微裂缝。泥页岩有机与无机物质成岩

• 43 •

演化过程中,水体流动直接影响油气初次运移。油 气生成的同时形成酸性流体,酸性流体溶蚀不稳定 矿物,形成次生孔隙,次生孔隙越发育,排出溶解物 质所需的流动水体也就越多,油气的初次运移也就 越明显,从而影响页岩油的滞留、富集。

## 5 结 论

(1)马朗凹陷芦草沟组页岩油储层为一套低 孔、低渗一特低渗储层,主要经历了压实作用、溶解 作用、胶结作用和交代作用,同时存在有机质成岩演 化和无机矿物成岩演化两种成岩演化过程。

(2)成岩演化形成的有机质孔和无机矿物溶蚀 孔是页岩油重要的储集空间。有机质孔的发育主要 受有机质含量控制,二者成正比关系;无机矿物溶蚀 孔隙主要由钾长石、碳酸盐岩等溶蚀形成,伊利石化 过程促进了钾长石的溶解,也造成矿物体积的收缩, 增大了泥页岩的储集空间。

(3) 芦草沟组泥页岩中, 有机、无机成岩演化同时发生、相互联系, 泥页岩中溶蚀孔隙的形成与油气 生成、油气初次运移同步。

#### 参考文献:

[1] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37
 (6):641-653.

ZOU Cai-neng, DONG Da-zhong, WANG She-jiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(6);641-653.

- [2] THOMAS C K. The economic impact of shale gas extraction: a review of existing studies [J]. Ecological Economics, 2011,70:1243-1249.
- [3] 邹才能,张光亚,陶十振,等. 全球油气勘探领域地质 特征,重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开 发,2010,37(2):129-145.
  ZOU Cai-neng, ZHANG Guang-ya, TAO Shi-zhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (2):129-145.
- [4] 柳益群,李红,朱玉双,等,白云岩成因探讨:新疆三塘 湖盆地发现二叠系湖相喷流型热水白云岩[J]. 沉积 学报,2010,28(5):861-867.

LIU Yi-qun, LI Hong, ZHU Yu-shuang, et al. Permian lacustrine eruptive hydrothelmal dolamites, Santanghu Basin, Xinjiang Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010,28(5):861-867. [5] 袁静,赵澄林.水介质的化学性质和流动方式对深部 碎屑岩储层成岩作用的影响[J].石油大学学报:自然 科学版,2000,24(1):60-63.

YUAN Jing, ZHAO Cheng-lin. Influence of chemistry of fluid and circulated convection current on digenesis of petroclastic rock in deep formation [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000, 24(1):60-63.

- [6] CHAKRABARTI R, ABANDA P A, HANNIGAN R E, et al. Effects of diagenesis on the Nd-isotopic composition of black shales from the 420 Ma Utica shale magnafacies [J]. Chemical Geology, 2007,244:221-231.
- [7] 邹才能,朱如凯,白斌,等.中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J].岩石学报,2011,27(6): 1857-1864.

ZOU Cai-neng, ZHU Ru-kai. BAl Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011,27(6):1857-1864.

- [8] DANIEL M J, RONALD J H, TIM E R, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (4):475-499.
- [9] 孟万斌,吕正祥,冯明石,等. 致密砂岩自生伊利石的 成因及其对相对优质储层发育的影响;以川西地区须 四段储层为例[J].石油学报,2011,32(5):783-790. MENG Wan-bin. LÜ Zheng-xiang, FENG Ming-shi, et al. The origin of authigenic illite in tight sandstones and its effect on the formation of relatively high-quality reservoirs: a case study on sandstones in the 4th member of Xujiahe formation, western Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(5):783-790.
- [10] FRANKS S G, ZWINGMANN H. Origin and timing of late diagenetic illite in the Permian-Carboniferous Unayzah sandstone reservoirs of Saudi Arabia [J]. AAPG Bulletin, 2010,94(8):1133-1159.
- [11] 黄思静,黄可可,冯文立,等.成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成:来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J].地球化学,2009,38(5):498-506. HUANG Si-jing, HUANG Ke-ke, FENG Wen-li, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis: a case study on the upper Paleozoic Ordos Basin and Xujiahe formation, Western Sichuan depression [J]. Geochimical, 2009,38(5):498-506.

(下转第53页)

- [10] 张虎权,王廷栋,林卫东,等. 民和盆地原油地球化 学特征与油源对比[J]. 天然气地球科学,2006,17 (3);305-308.
  ZHANG Hu-quan, WANG Ting-dong, LIN Wei-dong, et al. Geochemical characteristics of crude oil and correlation of oil-source in Minhe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006,17(3);305-308.
- [11] HUANG W Y, MEINCHEIN W G. Sterols as ecological indicators [J]. Geochemica et Cosmochimica Act, 1997,43(5):739-745.
- [12] 王杰,王铁冠,陈践发,等. 松辽盆地双城—太平川 地区原油地球化学特征及其成熟度差异[J]. 海相油 气地质, 2009,14(1):65-70.
  WANG Jie, WANG Tie-guan, CHEN Jian-fa, et al. Geochemical characteristics and maturity difference of crude oil from Shuangcheng-Taipingchuan area in Songliao Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(1):65-70.
- [13] 彼得斯 K E, 莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南: 古代沉积物和石油中分子化石的解释[M]. 姜乃煌,

(上接第43页)

- [12] BERGER G, LACHARPAGNE J C, VELDE B, et al. Kinetic constraints on ilitization reactions and the effects of organic diagenesis in sandstone/shale sequences [J]. Applied Geochemistry, 1997,12:23-35.
- [13] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4 版. 北京:石油工业出版 社,2008;126-137.
- [14] THYNE G. BOUDREAU B, RAMM M, et al. Simulation of potassium feldspar dissolution and illitization in the Statfjord formation, North Sea [J]. AAPG Bulletin, 2001,85(4):621-635.
- [15] 殷辉安. 岩石学相平衡[M]. 北京:地质出版社, 1988:264-275.
- [16] ABID I, HESSE R. Illitizing fluids as precursors of hydrocarbon migration along transfer and boundary faults of the Jeanne d'Arc Basin offshore Newfoundland, Canada [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24: 237-245.
- [17] 冯乔,柳益群,郝建荣. 三塘湖盆地芦草沟组烧源岩及其古环境[J]. 沉积学报,2004,22(3):513-517.
   FENG Qiao, LIU Yi-qun, HAO Jian-rong. The source

张水昌,林永汉.译.北京;石油工业出版社,1995: 100-187.

- [14] AQUINO Neto F R, TRENDEL J M, RESTLE A, et al. Occurrence and formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and petroleums [M]. New York: John Wiley and Sons, 1983:659-676.
- [15] SIMONEIT B R T. Cyclic terpenoids of the geosphere[M]. New York; Elsevier, 1986;43-99.
- [16] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. England: Prentice Hall Inc Press, 1993; 109-126,159.
- [17] 张枝焕、杨藩、李东明、等.中国新生界成化湖相有 机地球化学研究进展[J].地球科学进展、2000,15 (1):65-70.
   ZHANG Zhi-huan, YANG fan, LI Dong-ming, et al. The example geochemistry means have an example of the program in Comparis

The organic geochemistry research progress in Cenozoic salified lake in China[J]. Advance in Earth Sciences, 2000,15(1):65-70.

(编辑 刘为清)

rock and its palaeo-environment of Lucaogou formation, Permian in Santanghu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004,22(3):513-517.

[18] 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 Yi-qun, ZHU Yu-shuang. Primary study on the origin of lacutrine dolostones of Permian, Santanghu baste, Xinjiang [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007,25(1):75-81.

[19] 王京,赵彦超,刘琨,等.鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上 古生界砂岩储层"酸性+碱性"叠加溶蚀作用与储层 质量主控因素[J].地球科学——中国地质大学学 报,2006,31(2):221-228.

WANG Jing, ZHAO Yan-chao, LIU Kun, et al. Superimposing controls of acidic and alkaline dissolutions on sandstone reservoir quality of the paleozoic Xiashihezi and Shanxi formations in Tabamiao area, Ordos Basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006,31(2):221-228.

(编辑 徐会永)