

文章编号: 0253-9985(2011)01-0011-06

四川盆地南江杨坝地区下寒武统烃源岩形成的地球生物学条件

曹婷婷^{1,2}, 徐思煌¹, 王 约², 周 炼³, 吴 夏⁴

(1. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074 2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550003 3. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074 4. 中国地质大学 生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 运用地球生物学方法评价烃源岩形成的条件, 是对基于残余有机质分析的传统烃源岩评价方法的重要补充, 对于高演化海相碳酸盐岩地区尤为重要。在实测野外露头剖面的基础上, 通过系统分析四川盆地南江杨坝地区下寒武统各小层的沉积环境、古生物化石、岩石微量元素及总有机碳含量等特征, 利用地球生物学基本原理, 分析下寒武统烃源岩形成的生境型、海洋古生产力、古氧相及埋藏效率等条件。结果表明, 筇竹寺组底部原始有机质数量多, 发育于厌氧的沉积环境中, 有机碳埋藏效率高, 是优质烃源岩发育的有利层段。石龙洞组底部具备一般烃源岩发育的地球生物学条件。

关键词: 地球生物学; 古生产力; 古氧相; 海相烃源岩; 筇竹寺组; 南江杨坝地区; 四川盆地

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Geobiological conditions for the formation of the Lower Cambrian source rocks in Yangba area of Nanjiang County in the Sichuan Basin

Cao Tingting^{1,2}, Xu Sihuang¹, Wang Yue², Zhou Lian³ and Wu Xia⁴

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China; 3. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Evaluating conditions of source rock development by geobiological approaches is an important supplement for the traditional evaluation method of source rocks based on analyses of remnant organic matter. This method is especially suitable for source rock evaluation in areas with highly-matured marine carbonate rocks. Our study is based on observation of outcrops and focused on a systematic analysis of the depositional environment, fossil organism, trace element data and total organic carbon in the Lower Cambrian of the Yangba area in Nanjiang County, Sichuan Basin. The forming conditions for the Lower Cambrian source rocks are recognized through a study on the habitat types, oceanic paleoproductivity, paleo-oxygenation facies and burial efficiency by using geobiological principles. The results show that the lower part of the Qiongzhusi Formation has the most favorable conditions for development of high-quality hydrocarbon source rocks as it has higher original organic content, anaerobic sedimentary environment and higher burial efficiency of organic carbon. In contrast, the lower part of the Shibingdong Formation possesses basic geobiological conditions for development of ordinary source rocks.

收稿日期: 2011-01-15

第一作者简介: 曹婷婷(1986-), 女, 硕士研究生, 油气成藏。

基金项目: 中国石化股份有限公司海相油气勘探前瞻性研究项目(G0800-06-ZS-319); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项。

Key words geobiology, paleoproductivity, paleo-oxygenation facies, marine source rock, Yangba area of Nanjiang County, Sichuan Basin

我国南方海相地层沉积厚度大,发育有 4 套主力烃源岩,即下寒武统黑色炭质页岩段烃源岩、上奥陶统五峰组顶部一下志留统龙马溪组底部笔石页岩段烃源岩、下二叠统烃源岩和上二叠统碳酸盐岩烃源岩^[1]。长期的热演化和强烈的构造运动改造,使得这些烃源岩中有机质的数量和质量发生了较大的变化,基于残余有机质地化特征分析的传统烃源岩评价方法在这类高演化地区的应用面临很多困难^[2]。而新兴的地球生物学理论强调从原始生物有机质到沉积有机质,再到埋藏有机质的正演方法,为低残余有机质丰度、高热演化程度烃源岩的评价提供了新的探索途径^[3-4]。本文以四川盆地南江杨坝地区下寒武统地层为例,通过系统观察、测试该剖面地层沉积环境、古生物化石、岩石微量元素及总有机碳含量等特征,分析烃源岩形成的生境型、古生产力、古氧相及埋藏效率等地球生物学条件,指出烃源岩发育的有利层段。

1 地球生物学基本原理

地球生物学是描述生物系统与地球系统的相互作用机制、过程及演化历史的一门学科^[5],它将地球生物学、生物地质学及地球化学等学科引入烃源岩的分析研究中,从生物与环境作用两方面描述烃源岩形成过程中有机质的变化过程。这一过程可由地球生物相来体现。地球生物相作为地球生物学研究的主要内容,是通过研究生物与环境之间的相互作用,来揭示初级生物生产力—沉积有机质—埋藏有机质的演化过程^[6]。

地球生物相特征参数包括生物学与地质学两方面 4 个具体参数。生物学参数又包括生境型和海洋古生产力。生境型是指不同地区或不同时代由群落反映的生物的生存环境^[7];古生产力是反映海洋中的生物在生长过程中固定的有机物的数量;二者结合可以用来恢复原始有机质的数量。生境型是根据地层沉积环境及古生物化石等来划分的;而某些微量元素则可以用来反映古生产力,研究表明钡 (Ba)、钼 (Mo)、硅 (Si)、磷 (P)、铁 (Fe) 等元素与海洋中某种生物生长及有机质的改造有关,可作为海洋古生产力的指标^[8-10]。其中,生源钡 [Ba

表 1 古氧相微量元素判断指标
Table 1 Trace element index for recognizing paleo-oxygenation facies

判断指标	富氧沉积环境	贫氧沉积环境	厌氧沉积环境
V/Cr 值	< 2.00	2.00~ 4.25	> 4.25
Ni/Co 值	< 5.00	5.00~ 7.00	> 7.00

(xs)]与有机碳通量的相关性很好,其富集程度反映了海洋古生产力的高低。Ba(xs)可由实测的沉积物中总 Ba 和总 Ti 经陆源校正后获得^[10-13]。

地质学参数又包括古氧相和有机质的埋藏效率。古氧相反映水体中溶解氧的含量;埋藏效率则是指最终保存下来的那部分有机质与初始生产力中总有机质的比值;二者共同反映有机质的沉积和保存条件。一般来说,缺氧环境有利于有机质的保存,这也是形成优质烃源岩的重要条件之一^[14-15]。Jones 等^[16]通过对西北欧晚侏罗世暗色泥质岩研究表明,V/Cr 及 Ni/Co 比值对古缺氧环境的判识较可靠(表 1)。这些微量元素的指标同样也适用于碳酸盐岩的评价^[17-18]。埋藏效率的大小与有机碳的埋藏量有密切的关系,较高的埋藏效率反映有机碳埋藏数量多。已有研究表明,自生钼 [M(a)]和 Mo 同位素与有机碳的堆积速率存在一定的相关性,可以很好的反映有机碳埋藏量的变化^[19-20]。

2 地质背景

四川南江杨坝地区位于扬子地台北缘,在构造上位于通南巴构造以北、南秦岭米仓山推覆构造南缘,其东北侧为大巴山弧形冲断构造带(图 1)。该剖面地层出露较完整,寒武系地层从下到上依次出露筇竹寺组、仙女洞组、阎王碛组和石龙洞组。野外露头观测到筇竹寺组底部为黑色薄层的炭质泥岩,下部发育有灰黑色粉砂岩泥岩,中部发育有深灰色—灰黑色泥质粉砂岩,并夹有灰白色薄层粉砂岩,上部为灰色厚层钙质泥岩,部分发育薄层泥灰岩;仙女洞组底部见浅灰色薄层状生物碎屑灰岩,下部多为鲕粒灰岩,上部发育有灰色—深灰色的瘤状灰岩,部分层位见有泥质灰岩,顶部发育薄层的灰质白云岩,厚约 90 m;阎王碛组多发育灰白色中—粗粒的石英砂岩、粉砂岩及砾

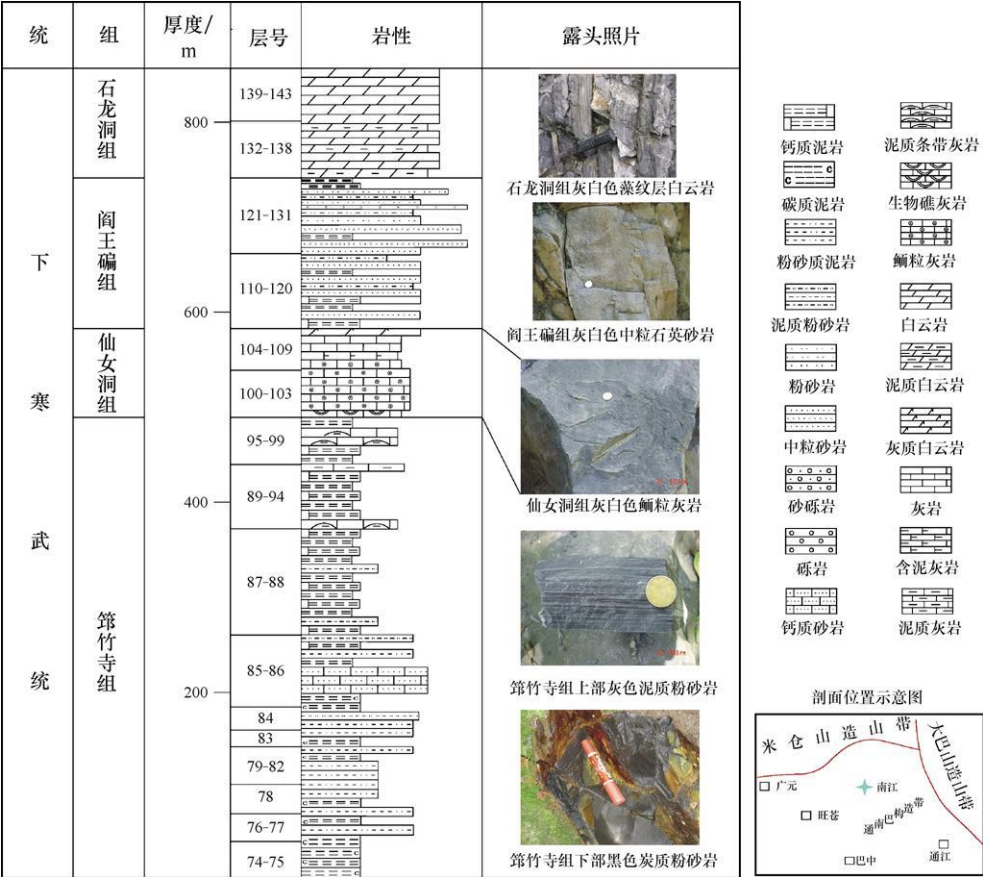


图 1 四川盆地南江杨坝地区地理位置及下寒武统地层柱状图

Fig. 1 Location and the stratigraphic column of the Lower Cambrian in Yangba area of the Nanjiang County, the Sichuan Basin

岩, 部分层位见有钙质砂岩; 石龙洞组以发育白云岩及泥质白云岩为主。

3 样品采集及测试

本次研究的样品采自四川省南江杨坝镇寒武系露头剖面。筇竹寺组、仙女洞组、阎王碛组及石龙洞组地层(共为 70 个小层), 每一小层采集 1~ 3 个样品, 共计 95 个样品。样品采集过程中, 尽可能采集未经风化的新鲜样品, 将其粉碎至 200 目的粉末后分析。其中, 总有机碳含量的测试是在中石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所利用 LE-CO CS- 200 仪器完成的; 微量元素的测试是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室分别采用 ICP- MS 电感耦合完成。

4 烃源岩形成的地球生物学条件

烃源岩形成的地球生物学条件可通过地球生

物相的 4 个特征参数来评价, 即生境型、古生产力、古氧相及埋藏效率。

4.1 生境型

结合研究区地质背景, 通过对杨坝剖面的实际观测, 对下寒武统地层的生境型进行了划分(图 2)。其中, 筇竹寺组发育于滨海潟湖—陆棚—浅海的沉积环境, 生境型以 III₁ 和 III₂ 为主, 底部为 IV₁ 型, 这一环境对生物的大量繁盛十分有利, 同时也为原始有机质的形成提供了大量的物质来源。仙女洞组发育在高位体系域的台地边缘环境, 生境型主要以 II₁ 型为主; 阎王碛组沉积在前滨—近滨的环境中, 生境型包括 II₁ 和 II₂ 型; 石龙洞组多发育于近滨环境, 其中下部生境型为 II 型, 上部发育 II₁ 型。

4.2 古生产力

从杨坝地区生物成因钡 [Ba(xs)] 随深度变化的曲线(图 2)可以看出, 杨坝地区古海洋中 Ba(xs)

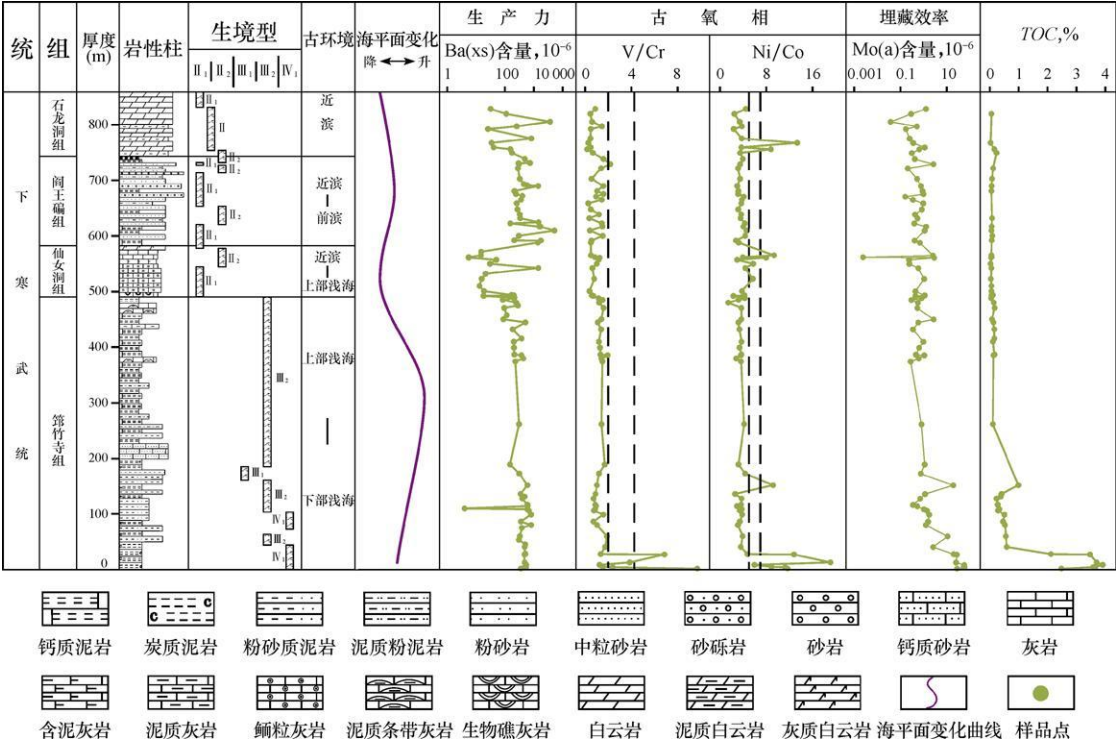


图 2 四川南江杨坝剖面下寒武统发育的地球生物学条件

Fig 2 Geobiological conditions for the development of the Lower Cambrian on Yangba profile in Nanjiang the Sichuan Basin

的含量波动比较大,在 $4 \times 10^{-6} \sim 6\,000 \times 10^{-6}$ 之间均有分布,总体来看,早寒武世海洋古生产力总体较高,尤其在筇竹寺组下部、阎王碛组及石龙洞组底部 Baxs 含量最高,基本处于 250×10^{-6} 以上,说明这些地层发育时期海洋古生产力很高;筇竹寺组上部及石龙洞组中、上部地层中 Ba(xs) 含量略有减少,处于 $20 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ 之间,反映这个时期海洋古生产力略有降低;而仙女洞组 Ba(xs) 含量很低,约在 20×10^{-6} 以下,说明该层位沉积时海洋古生产力很低。

4.3 古氧相

杨坝地区下寒武统利用 V/Cr 值和 Ni/Co 值来反映沉积水体的古氧化还原环境(图 2)。结果表明,在筇竹寺组下部 V/Cr 值和 Ni/Co 值这两个参数较高,说明该地层整体发育于厌氧-贫氧的水体环境中,尤其是筇竹寺组底部呈现出缺氧的强还原特征(V/Cr 值 > 4.25 Ni/Co 值 > 7.0),说明有机质保存较好;从筇竹寺组中部—阎王碛组,这两个参数持续在中值—低值内波动,反映水体逐渐富氧,水体环境呈贫氧—富氧相;石龙洞组底部 Ni/Co 比值有较大的增加(其中 Ni/Co 值 > 7.0),反映水体呈厌氧相,而石龙洞组中、上部地层则处于富氧的沉积

环境,水体中含氧量较高,有机质易被氧化而损失严重。同时结合实测的总有机碳含量(TOC)来看,筇竹寺组下部有机碳含量大于 1.0% 的样品(高有机质丰度)均发育在厌氧环境中,说明厌氧的环境有利于有机质的保存,上部地层沉积时水体含氧量增加,有机碳含量明显降低。但在石龙洞组底部有机碳含量有稍微增高的现象,反映此处有机质保存条件相对较好。

4.4 埋藏效率

实验中 Mo 同位素的获取较困难,因此本文根据自生 Mo 的含量来反映有机碳的埋藏效率。研究区下寒武统地层中总有机碳含量与自生 Mo 存在很好的相关性,相关系数(R)为 0.936(图 3),在有机碳含量大于 1% 的样品中,自生 Mo 含量很高(约在 20×10^{-6} 以上)。在有机碳含量小于 0.5% 的样品中自生 Mo 含量则很低。结合图 2 说明,筇竹寺组下部自生 Mo 最富集(均处于 1×10^{-6} 以上,有的样品高达 20×10^{-6} 以上),对应实测的有机碳含量也很高(基本处于 1% 以上),说明该层位有机碳埋藏效率高,有利于烃源岩的发育;其他地层中自生 Mo 含量很低,有机碳埋藏效率低。

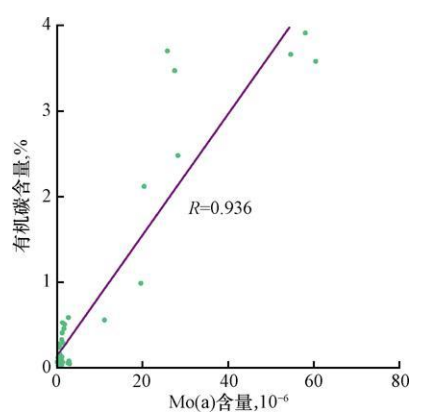


图 3 四川盆地南江杨坝剖面下寒武统地层
中有机碳含量与自生 Mo 含量之间的相关性
Fig. 3 Correlation between TOC and authigenic Mo content
of the Lower Cambrian in Yangba area of Nanjiang County
the Sichuan Basin

5 结论及讨论

1) 四川南江杨坝地区生境型的分布、古生产力的变化、有机质沉积及埋藏过程中的古氧相与有机碳埋藏效率均影响有机质的富集, 它们共同控制着烃源岩的发育与分布。

2) 研究区下寒武统筇竹寺组下部生境型为 IV₁ 型, 古生产力很高, 有机质沉积在厌氧的环境中, 有机碳埋藏量也很高, 具备形成优质烃源岩的地球生物学条件; 石龙洞组底部尽管发育在 II 型的生境型中, 有机碳埋藏效率相对较低, 但高古生产力及缺氧的保存条件使得其仍具备形成一般烃源岩的地球生物学条件。

3) 筇竹寺组下部残余有机碳含量高, 证实为优质烃源岩。但石龙洞组底部实测有机碳含量值却远低于传统意义的烃源岩下限值, 说明传统评价方法与地球生物学评价方法结论存在差异。

4) 碳酸盐岩烃源岩下限值目前尚存在争议, 笔者认为地球生物学方法与基于残余有机质的传统评价方法之间的差异, 正预示着前者在评价高演化海相碳酸盐岩烃源岩的过程中, 可能对传统烃源岩评价方法起到重要的补充作用。但两种方法之间的对比与互检, 尚有待于在进一步的研究中不断完善。

致谢: 本文有关地球生物学参数计算及评价部分是在殷鸿福院士的指导下完成的。同时在研究过程中, 也受到中石化前瞻性项目 (G0800-06-ZS-319) 组各位老师的指导和帮助, 在此谨向他(她)们表示感谢!

参 考 文 献

[1] 马力, 陈焕疆, 曾克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 265- 270
Ma Li, Chen Huanjiang, Zeng Kewen, et al. Marine petroleum geology and tectonics of south China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 265- 270.

[2] Xu S H, Mei L F, Yuan C P, et al. Types, evolution and pool-controlling significance of pool fluid sources in superimposed basins: a case study from paleozoic and mesozoic in south China [J]. Journal of China University of Geosciences, 2007, 18 (1): 49- 59

[3] 谢树成, 殷鸿福, 解习农, 等. 地球生物学方法与海相优质烃源岩形成过程的正演和评价 [J]. 地球科学, 2007, 32 (6): 727- 740.
Xie Shucheng, Yin Hongfu, Xie Xinong, et al. On the geobiological evaluation of hydrocarbon source rocks [J]. Earth Science, 2007, 32 (6): 727- 740

[4] 殷鸿福, 谢树成, 秦建中, 等. 对地球生物学、生物地质学和地球生物相的一些探讨 [J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 2008, 38 (11): 1- 8
Yin Hongfu, Xie Shucheng, Qin Jianzhong, et al. The discussion about geobiology, biogeology and geobiofacies [J]. Earth Science, 2008, 38 (11): 1- 8.

[5] 谢树成, 龚一鸣, 童金南, 等. 从古生物学到地球生物学的跨越 [J]. 科学通报, 2006, 51 (19): 2327- 2336.
Xie Shucheng, Gong Yiming, Tong Jinnan. Learn from the paleontology biology across the earth [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (19): 2327- 2336.

[6] 杜远生, 颜佳新, 龚一鸣, 等. 地球生物相中的生境型: 概念、模式和编图 [J]. 地球科学, 2007, 32 (6): 741- 747
Du Yuansheng, Yan Jiaxin, Gong Yiming, et al. Biohabitat types in geobiofacies: concept, model and mapping [J]. Earth Science, 2007, 32 (6): 741- 747

[7] 殷鸿福, 丁梅华, 张克信, 等. 扬子区及其周缘东吴期- 印支期生态地层学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 5- 37
Yin Hongfu, Ding Meihua, Zhang Kexin, et al. Dongwuian- indosinian late permian-middle triassic ecostatigraphy of the Yangze Region and its margins [M]. Beijing: Science Press, 1995: 5- 37

[8] Clavert S E. Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in marine sediments [C] // Brook J, Fleet A J, eds. Marine petroleum source rock. London: Blackwell Scientific, 1987: 137- 151.

[9] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 海相地层无机参数与烃源岩发育环境的相关研究——以鄂尔多斯盆地为例 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (4): 411- 421.
Tenger, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. Study on relation between inorganic parameters in marine deposits and developmental environment of hydrocarbon source rocks taking Ordos basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26 (4): 411- 421

- [10] 黄永建, 王成善, 汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展 [J]. 地质前缘, 2005, 12(2): 163–170
Huang Yongjian, Wang Chengshan, Wang Yunliang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 163–170
- [11] 陈建芳. 古海洋研究中的地球化学新指标 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 402–410
Chen Jianfang. New geochemical proxies in paleoceanography studies [J]. Advances in Earth Sciences, 2002, 17(3): 402–410
- [12] Franco R S, Honjo S J, Manganini G E, et al. Biogenic barium fluxes to the deep sea: implications for paleoproductivity reconstruction [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9: 289–303
- [13] Taylor M. The continental crust: its composition and evolution [M]. United States: Blackwell Scientific, 1985: 25–30.
- [14] Pederson T T, Calvert S E. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 454–466
- [15] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 缺氧环境及地球化学判别标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例 [J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 305–372
Tenger, Liu Wenhui, Xu Yongchang. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying indices [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 305–372
- [16] Jones B J, Manning A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1994, 111(1–4): 111–129
- [17] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 无机地球化学参数与有效烃源岩发育环境的相关研究 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(2): 193–200.
Tenger, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. Correlative study on parameters of inorganic geochemistry and hydrocarbon source rocks formative environment [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(2): 193–200.
- [18] 胡明毅. 塔北柯坪奥陶系碳酸盐岩地球化学特征及环境意义 [J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(2): 158–163
Hu Mingyi. Geochemical characters and environmental significance of Ordovician carbonate rocks in Keping area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(2): 158–163.
- [19] Meyers S R, Sageman B B, Lyons T W. Organic carbon burial rate and the molybdenum proxy: theoretical framework and application to Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event 2 [J]. Palaeoceanography, 2005, 20: 2002–2020.
- [20] Zhou Lian, Zhang Haiqiang, Wang Jin, et al. Assessment on redox conditions and organic burial of siliciferous sediments at the latest Permian Dalong formation in Shangsi, Sichuan, South China [J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19(5): 496–506.

(编辑 高岩)

(上接第 10 页)

- global changes of sea level [J]. AAPG Memoir, 1997, 26: 63–97.
- [10] Galloway W. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis (1): architecture and genesis of flooding surface bounded depositional units [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(2): 125–142
- [11] Cross T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 322–350
- [12] Wilson J L. Carbonate facies in geologic history [M]. New York: Springer, 1975: 471.
- [13] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 123–124
Feng Zhenzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies paleogeography of the Cambrian and Ordovician in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 123–124.
- [14] 张师本, 倪寓南, 龚福华, 等. 塔里木盆地周缘地层考察指南 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 9–16.
Zhang Shibei, Ni Yunnan, Gong Fuhua, et al. A guide to the stratigraphic investigation on the periphery of the Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 9–16.
- [15] 徐怀大, 樊太亮, 韩革华, 等. 新疆塔里木盆地层序地层特征 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 166–191
Xu Huaida, Fan Tailiang, Han Gehua, et al. Sequence pattern of the Tarim basin, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 166–191.
- [16] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1–12
Qi Lixin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1–12.
- [17] 云露, 翟晓先. 塔里木盆地塔深 1 井寒武系储层与成藏特征探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 726–732
Yun Lu, Zhai Xiaoxian. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoirs and hydrocarbon accumulation in well Tashen-1, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 726–732.
- [18] 李慧莉, 钱一雄, 沙旭光, 等. 塔里木盆地卡塔克隆起西北倾没端良里塔格组碳酸盐岩储层发育特征与影响因素 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 69–77
Li Huili, Qian Yixiong, Sha Xuguang, et al. Development characteristics and influencing factors of carbonate reservoirs in the Ordovician Liangliage Formation at the northwest pitching end of the Katakong Uplift, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 69–77.

(编辑 高岩)