

四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素

宋金民¹, 刘树根¹, 李智武¹, 罗平², 杨迪¹, 孙玮¹, 彭瀚霖³, 余永强¹

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油 西南油气田分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610051)

摘要:四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩主要发育在灯二段和灯四段。灯二段以凝块石和葡萄石为主, 储集空间类型有葡萄-花边状孔洞、微生物体腔孔、微生物格架孔和凝块间溶孔; 纵向上发育3个储层段, 储层沥青集中发育在桐湾I期不整合面之下117 m。灯四段则发育纹层石和叠层石, 储集空间则以窗格孔和岩溶孔洞为主, 辅以凝块间溶孔和微生物体腔孔; 亦发育3个储层段, 储层沥青发育在桐湾II期不整合面之下134.2 m。四川盆地灯影组微生物岩储层形成和分布主要受控于浅水潮坪微生物席、微生物结构、白云石化和绵阳-长宁拉张槽。广布的浅水潮坪微生物席建造是优质储层发育的基础, 微生物结构影响着储层的初始差异性, 白云石化作用是微生物岩储层形成的关键, 绵阳-长宁拉张槽控制下的风化壳岩溶和埋藏溶蚀作用决定了微生物岩优质储层的改造强度和展布, 灯影组微生物岩优质储层主要分布于绵阳-长宁拉张槽东西两侧的边缘带。

关键词:叠层石; 凝块石; 拉张槽; 微生物席; 微生物岩; 灯影组; 上震旦统; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China

Song Jinmin¹, Liu Shugen¹, Li Zhiwu¹, Luo Ping², Yang Di¹, Sun Wei¹, Peng Hanlin³, Yu Yongqiang¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract: Microbial carbonates dominate the 2nd and 4th members of the Dengying Formation in the Upper Sinian, Sichuan Basin. The 2nd member contains mainly thrombolites and graptolites with botryoidalis pores, microbe visceral pores, microbe framework pores, inter-clot dissolved pores as reservoir space. Vertically, there are three reservoir intervals with bitumen concentrated 117 m below the unconformity of the first stage of the Tongwan movement. The 4th member contains largely laminites and stromatolites, with fenestral pores and karst pores as the main reservoir spaces and inter-clot dissolved pores and microbe visceral pores as the minor reservoir spaces. Three reservoir intervals occur in the member with bitumen concentrated 134.2 m below the unconformity of the second stage of the Tongwan movement. The development and distribution of microbial carbonate reservoirs in the members are suggested to be controlled mainly by shallow water tidal microbial mat, microbial structures, dolomitization and Mianyang-Changning intracratonic sag. The widespread mat might be the foundation of high-quality reservoirs, the microbial structures be the cause of the original reservoir differences, the dolomitization be the key to the formation of the reservoirs, and the weathering karst and burial dissolution controlled by the Mianyang-Changning intracratonic sag be the determinative factor for the modification and distribution of the reservoirs. And it is predicted that high-quality reservoirs in the Formation be along both sides of the margin area of

收稿日期: 2016-07-10; 修订日期: 2017-07-05。

第一作者简介: 宋金民(1983—), 男, 博士、副教授, 碳酸盐岩沉积储层。E-mail: songjinmin@sohu.com。

基金项目: 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金项目(PLC201406); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41302086, 41472107); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214805); 成都理工大学中青年骨干教师培养基金项目(10912-KYGG201505)。

Mianyang-Changning intracratonic sag.

Key words: stromatolite, thrombolite, intracratonic sag, microbial mat, microbialite, Dengying Formation, Upper Sinian, Sichuan Basin

微生物包括细菌(bacterial)、真菌(fungi)、小型藻菌(small algae)和原生动物(protozoan),自地球演化早期就广泛存在,被称为“生物学中沉睡的巨人”^[1-2]。微生物岩为底栖微生物群落捕获和粘结碳酸盐岩颗粒,或由其诱发的矿物沉淀^[3],主要包括叠层石(stromatolite)、凝块石(thrombolite)、树枝石(dendrolite)、均一石(leiolite)、核形石(oncolite)和纹层石(laminite)等^[2,4]。新元古代是全球微生物碳酸盐岩发育的重要时期,主要在埃迪卡拉纪(文德纪/震旦纪),见于中国的四川盆地和塔里木盆地、印度、巴基斯坦、东西伯利亚地区、阿曼、北非、巴西、巴拉圭和澳大利亚^[5-10],油气勘探发现目前主要在中东地区阿曼盐盆的Huqf超群的Ara群^[7]、东西伯利亚地区的文德系^[6,11-12]和中国四川盆地的震旦系灯影组^[13-14];在北非利比亚-阿尔及利亚、印度-巴基斯坦、西澳大利亚、美国和巴西-巴拉圭地区具有良好的油气勘探前景^[6-8]。

四川盆地上震旦统灯影组微生物岩以前多称为“蓝绿藻”粘结岩^[15-16],现在称为蓝细菌粘结岩^[17-18]。其油气勘探始于20世纪60年代初,目前已发现威远、资阳、高石梯、磨溪、龙女寺和荷包场气藏,储量规模可达 $10\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[19]。关于灯影组微生物岩的结构,前人划分出层纹、叠层、绵层和粘连4种类型^[16],识别出球状、椭球状、丝状、粘球状、管状和放射状蓝细菌体^[20]。但目前对于四川盆地不同地区灯影组微生物碳酸盐岩储层类型、形成及其主控因素尚不清晰。本文选取四川盆地不同地区的典型钻井和剖面,通过剖面详测、岩心观察、微观岩石学和储层物性的研究,探讨灯影组微生物碳酸盐岩储层特征和主控因素,为下一步油气勘探提供依据。

1 地质背景

新元古代发育两个超级大陆,一个是Rodinia大陆,形成于1100 Ma,在约750 Ma开始裂解,形成南、北两个大陆;在埃迪卡拉纪(灯影期,650 Ma~550 Ma)发生泛非运动,南、北两个Rodinia裂解大陆和刚果大陆汇聚形成第二个超级大陆Pannotia(图1a),也称为大冈瓦那大陆,Pannotia超级大陆在约560 Ma裂解,形成劳伦大陆、波罗的大陆、西伯利亚大陆和冈瓦那大陆^[21]。四川盆地所在的华南陆块在该时期位于

Pannotia超级大陆的中部,毗邻印度、澳大利亚和阿拉伯地块。华南大陆扬子区在灯影组沉积期及沉积后发生地壳幕式上升运动,即桐湾运动,时限大约为20 Ma,形成了灯二段顶部、震旦系/寒武系界面处的两期不整合面^[22-23],甚至还发育下寒武统麦地坪组和筇竹寺组之间的第三期不整合面^[24]。同时,上扬子克拉通也发育拉张运动,但拉张时限尚存争议,一说在早寒武世拉张,形成“绵阳-长宁拉张槽”^[25-26](图1b),另一种观点认为观点认为在灯影期拉张形成“成都-泸州裂陷槽”^[19,27]或“绵竹-长宁克拉通内裂陷”^[28],这可能与Pannotia超级大陆汇聚-裂解的古构造环境有关。

新元古代的海洋氧气分压很低,CO₂分压很高,气候从冰室期转向温室期,广泛发育潮坪环境^[29-30]。四川盆地在灯影期主要为碳酸盐岩台地建造,厚度650~1000 m^[9,14,19],发育潮坪、台内滩、台缘滩、藻丘、泻湖、局限海盆或者深水陆棚^[31];蓝细菌较繁盛,主要为球菌属和丝状蓝细菌属^[32-33];多形成微生物席和微生物丘滩建造^[9,20,34]。根据蓝细菌的丰度、岩性和结构特征,灯影组划分为四个段:下贫藻层灯一段、中富藻层灯二段、上贫藻层灯三段和上富藻层灯四段^[16,35]。灯一段主要为微晶白云岩、藻纹层白云岩,灯二段为“葡萄-花边”构造、藻砂屑、藻凝块、藻团块白云岩,微生物丘发育,灯三段为蓝灰色泥岩夹白云岩、云泥质粉砂岩、凝灰岩,灯四段为纹层-叠层状泥晶硅化白云岩^[14,20,31,35](图1c)。

2 不同地区微生物岩结构类型

川西南地区以雅安天全龙门剖面、金石1井、威113井和资1井为代表,龙门剖面灯影组残留灯一段和灯二段,厚465.41 m,顶部与下奥陶统不整合接触。微生物碳酸盐岩发育在灯二段,厚419.16 m,主要有葡萄石(图2a)、凝块石、纹层-叠层石(图2b)、绵层-凝块石、核形石(图2c)和球粒岩。金石1井灯二段钻厚192 m,微生物岩主要有葡萄石、凝块石、纹层石和球粒岩;灯四段厚244 m,多为泡沫绵层石、纹层石、叠层石(图2d)和凝块石。资阳地区资1井灯三段和灯四段均被剥蚀殆尽,灯二段残厚450 m,主要发育泡沫绵层石、凝块石(图2e)、葡萄石、核形石和纹层叠层石(图2f)。威

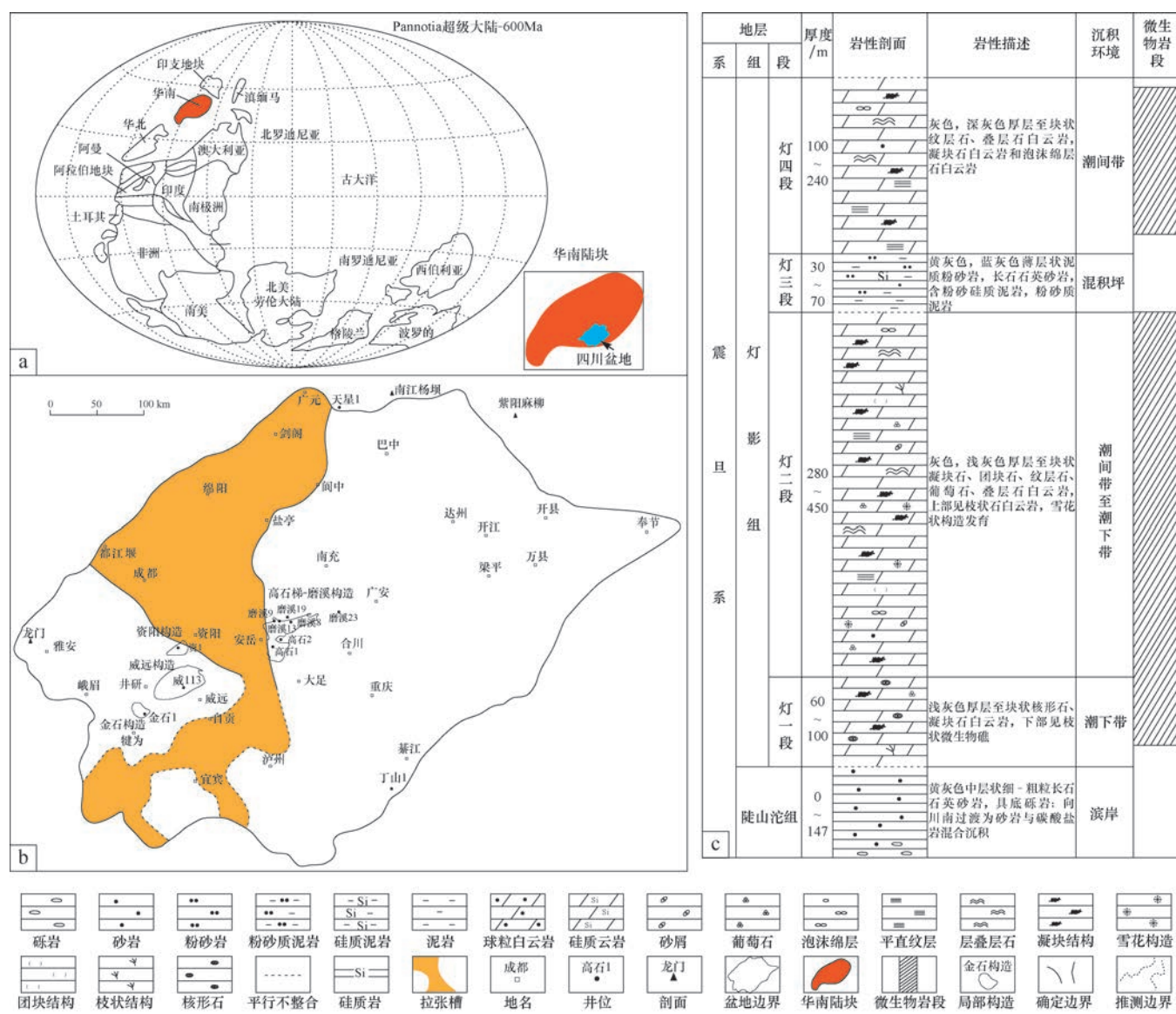


图1 四川盆地震旦纪灯影期地质背景及研究区位置^[21, 25-26]

Fig. 1 Geological settings of the Sinian Dengying stage and the locations of the study area in Sichuan Basin

a. 构造古背景; b. 早寒武世绵阳-长宁拉张槽及剖面位置; c. 灯影组综合柱状图

远地区威113井灯二段厚480 m,主要为葡萄石、凝块石(图2g)、核形石和泡沫绵层石(图2h);灯四段残厚40 m,发育包壳颗粒岩和纹层石(图2i)。

川东南地区丁山1井灯影组未钻穿,发育灯二段、灯三段和灯四段^[36],灯二段厚854 m,主要为凝块石、纹层石和葡萄石,局部夹鲕粒;灯三段厚240 m,主要为叠层石和纹层石;灯四段厚22 m,主要为纹层石。

川中地区磨溪9井灯二段钻厚188.6 m,磨溪19井钻厚96 m,主要为凝块石(图3a)、葡萄石(图3b)、枝状石、核形石和泡沫绵层石;磨溪9井灯四段厚357.6 m,主要有叠层石、纹层石(图3c)和凝块石。高石2井灯二段钻厚85 m,主要为凝块石、泡沫绵层石(图3d)和包壳颗粒岩;灯四段厚346.5 m,主要为叠层

石(图3e)、凝块石和纹层石。

川北地区以杨坝剖面 and 天星1井为代表。杨坝剖面灯二段厚442 m,主要为凝块石、核形石、泡沫绵层石、枝状石(图3f)、葡萄石和包壳颗粒岩;灯四段厚239.9 m,主要为纹层石、叠层石、凝块石和泡沫绵层石。天星1井灯二段钻遇300 m,主要发育葡萄石、凝块石(图3g)和泡沫绵层石;灯四段厚360 m,主要为纹层石和叠层石;川东北地区以麻柳剖面为代表,灯二段厚86 m,主要为纹层石、叠层石(图3h)、凝块石和泡沫绵层石;灯四段厚度为144 m,主要为核形石(图3i)和叠层石。

综上所述,四川盆地灯二段和灯四段的生物碳酸盐岩在不同地区的岩石结构差异性不大,具有全盆地

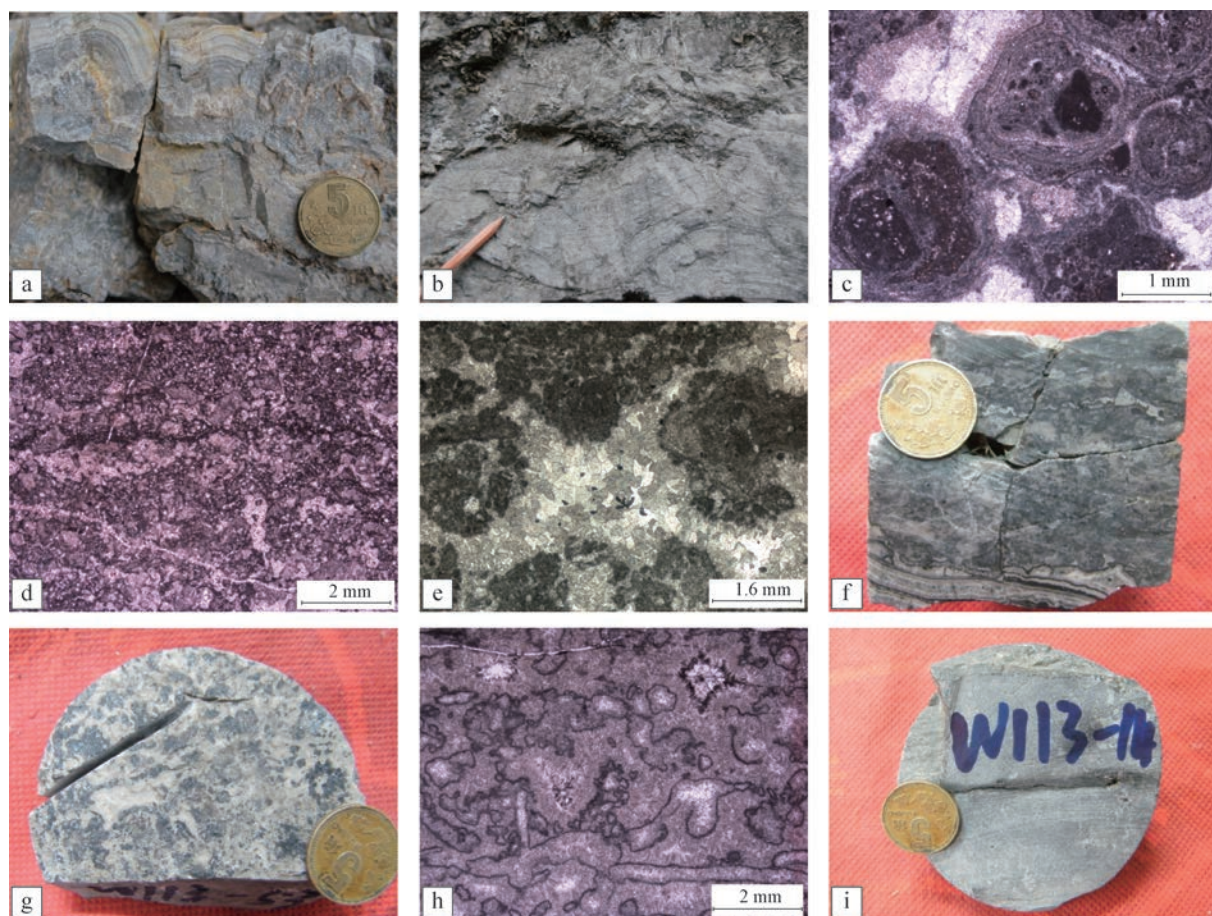


图2 四川盆地西南部灯影组微生物碳酸盐岩岩石结构类型

Fig. 2 Rock texture of the Dengying Formation microbial carbonates in the southwest Sichuan Basin

a. 葡萄石,灯二段,天全剖面;b. 纹层-叠层石,埋深4 042.95 m,灯二段,天全剖面;c. 核形石,灯二段,单偏光,天全剖面;d. 泡沫绵层结构形成的叠层石,埋深3 855.20 m,灯四段,金石1井;e. 凝块石,埋深4 042.95 m,灯二段,单偏光,资1井;f. 纹层-叠层石,发育凝块结构,埋深4 031.3 m,灯二段,资1井;g. 凝块石,埋深3 093.34 m,灯二段,威113井;h. 泡沫绵层石,埋深3 133.44 m,灯二段,威113井;i. 纹层石,埋深3 009.52 m,灯四段,威113井

相似性。灯二段微生物岩结构有葡萄石、核形石、泡沫绵层石、包壳颗粒岩、叠层石、凝块石、球粒岩、枝状石和纹层石,以凝块石和葡萄石为主;灯四段则发育叠层石、纹层石、球粒岩、凝块石和泡沫绵层石,以纹层石和叠层石为主。

3 微生物岩储层特征

3.1 储集空间类型

四川盆地灯影组微生物碳酸盐岩储层主要发育在灯二段和灯四段,其储集空间类型共有8类^[9],进一步分为三大类,第一类是组构选择性孔隙,主要有葡萄-花边状孔洞、微生物体腔孔、格架孔、凝块内溶孔和鸟眼孔;第二类是非组构选择性孔隙,主要有岩溶孔洞和溶蚀裂缝;第三类是过渡类孔隙,主要有凝块间溶孔和晶间(溶)孔。

四川盆地灯二段微生物岩的储集空间以组构选择性孔隙为主,主要有葡萄-花边状孔洞、微生物体腔孔为主,金石地区以葡萄-花边状孔洞为主,威远-资阳地区发育孤立状岩溶孔洞(图4c)和葡萄-花边状孔洞(图4d),川中和川北地区则发育凝块间溶孔(图4e)、微生物格架孔(图4f)、葡萄-花边状孔洞和微生物体腔孔,川东南丁山地区以凝块间溶孔为主,川东北麻柳剖面以顺层溶缝和凝块间溶孔为主。

四川盆地灯四段微生物岩的储集空间兼具组构选择性和非组构选择性孔隙,以窗格孔和岩溶孔洞为主,辅以凝块间溶孔、晶间溶孔、微生物体腔孔、顺层溶缝和构造溶蚀缝。川中地区以孤立状溶蚀孔洞(图4g)和岩溶孔洞(图4h, i)为主,金石地区则发育晶间溶孔和窗格孔(图4j),威远-资阳地区发育岩溶相关的裂缝-孔洞,川北地区以窗格孔和微生物体腔孔(图4k)为主,川东南丁山地区以顺层溶缝和窗格孔为主,川东北麻柳剖面则发育粒间溶孔和顺纹层窗格孔(图4l)。

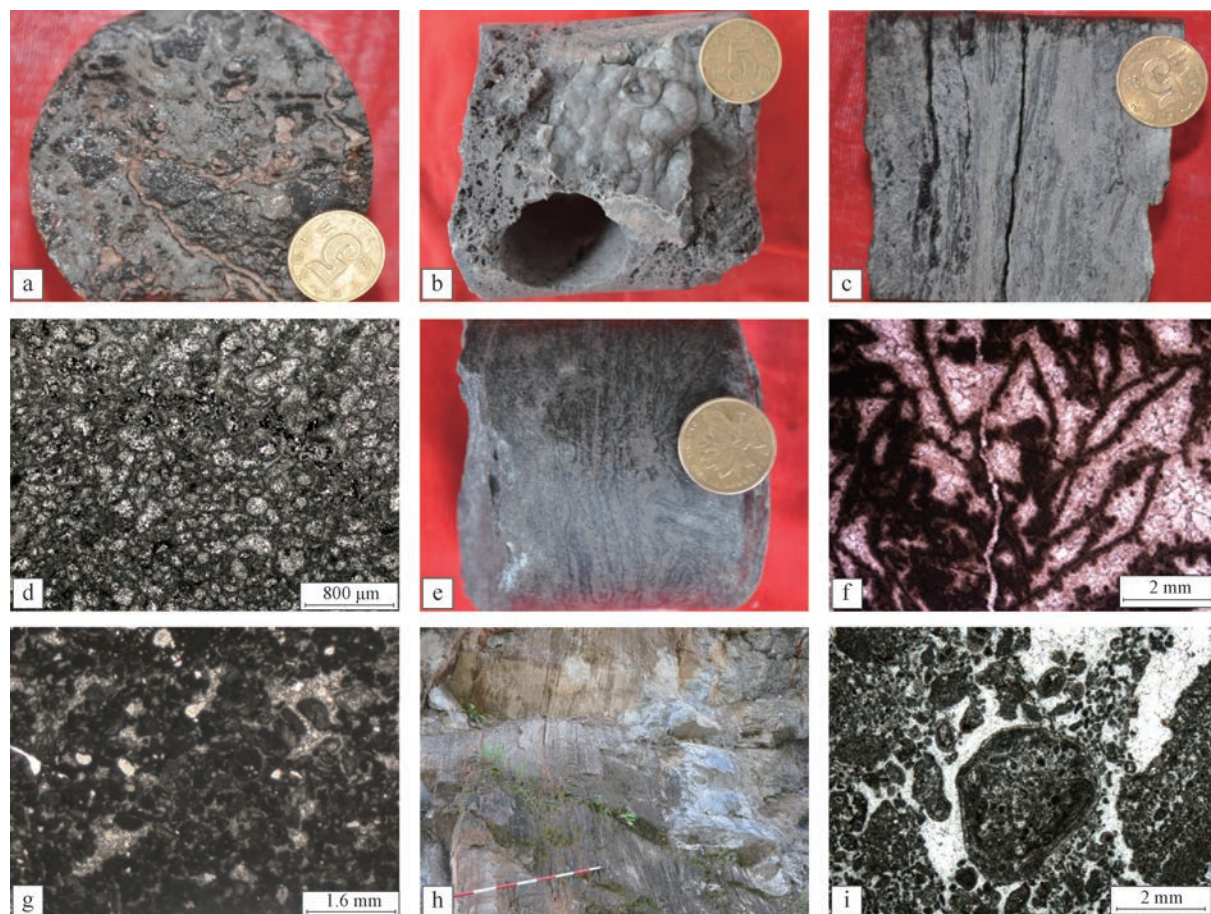


图3 四川盆地中部和北部地区灯影组微生物碳酸盐岩岩石结构类型

Fig. 3 Rock texture of the Dengying Formation microbial carbonates in the central and north Sichuan Basin

a. 凝块石, 12-5/48, 埋深 5 439.98 m, 灯二段, 磨溪 9 井; b. 葡萄石, 14-9/30, 埋深 5 422.27 m, 灯二段, 磨溪 19 井; c. 纹层石, 4-26/26, 埋深 5 048.30 m, 灯四段, 磨溪 9 井; d. 叠层石, 倒伏状叠层结构, 1-4/57, 埋深 5 011.64 m, 灯四段, 高石 2 井; e. 泡沫绵层石, 埋深 5 397.88, 灯二段, 高石 2 井; f. 枝状石, 为似表附菌 (Epiphiton), 灯二段, 单偏光, 杨坝剖面; g. 凝块石, 埋深 2 536.57 m, 灯二段, 天星 1 井; h. 纹层-叠层石, 灯二段, 麻柳剖面; i. 核形石, 灯四段, 麻柳剖面

3.2 微生物岩储层物性特征

四川盆地灯影组微生物碳酸盐岩主要为低孔低渗型储层。物性分析显示, 对于灯二段微生物碳酸盐岩储层, 金石地区的孔隙度介于 3.02% ~ 4.05%, 平均为 3.695%, 渗透率多小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 资阳地区的孔隙度平均为 1.53%, 一般在 1% ~ 7.9%, 集中在 1% ~ 2%, 全直径渗透率为 $(0.002\ 25 \sim 88.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $5.66 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而对于灯四段微生物岩储层, 金石地区的孔隙度介于 0.99% ~ 2.51%, 平均为 1.7%; 威远地区的孔隙度为 0.03% ~ 9.16%, 平均为 2.1%, 集中分布在 1% ~ 5%, 渗透率为 $(0.1 \sim 23.4) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 集中在 $(0.1 \sim 1.92) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [37]。川中地区小样塞样品平均孔隙度为 3.24%, 平均渗透率为 $1.092 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 全直径岩心平均孔隙度为 4.2%, 平均渗透率为 5.95×10^{-3}

μm^2 (水平)、 $1.209 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (垂直) [14]; 高石 1 井的孔隙度在 0.57% ~ 8.22%, 平均为 1.89%, 全直径平均 2.45% ~ 4.85%, $(1.005 \sim 8.02) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 全直径平均为 $4.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。川东南丁山 1 井灯影组孔隙度介于 0.78% ~ 3.52%, 平均值为 1.69%, 以 1% ~ 2% 为主, 渗透率介于 $(0.006\ 3 \sim 0.396) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.051 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [36]。

3.3 微生物岩储层纵向分布特征

以资料较为详尽的川北地区杨坝剖面为例, 来探讨微生物岩储层纵向分布特征。杨坝剖面灯影组微生物碳酸盐岩储层发育在灯一段、灯二段和灯四段, 灯一段微生物岩储层主要发育在灯一段/灯二段界线附近, 厚 24.3 m, 为凝块石-核形石。灯二段微生物岩储层厚度 190.1 m, 发育于凝块粘结岩、微生物礁(屑)岩和纹层粘结岩中, 储集空间主要为微生物格架孔、体腔

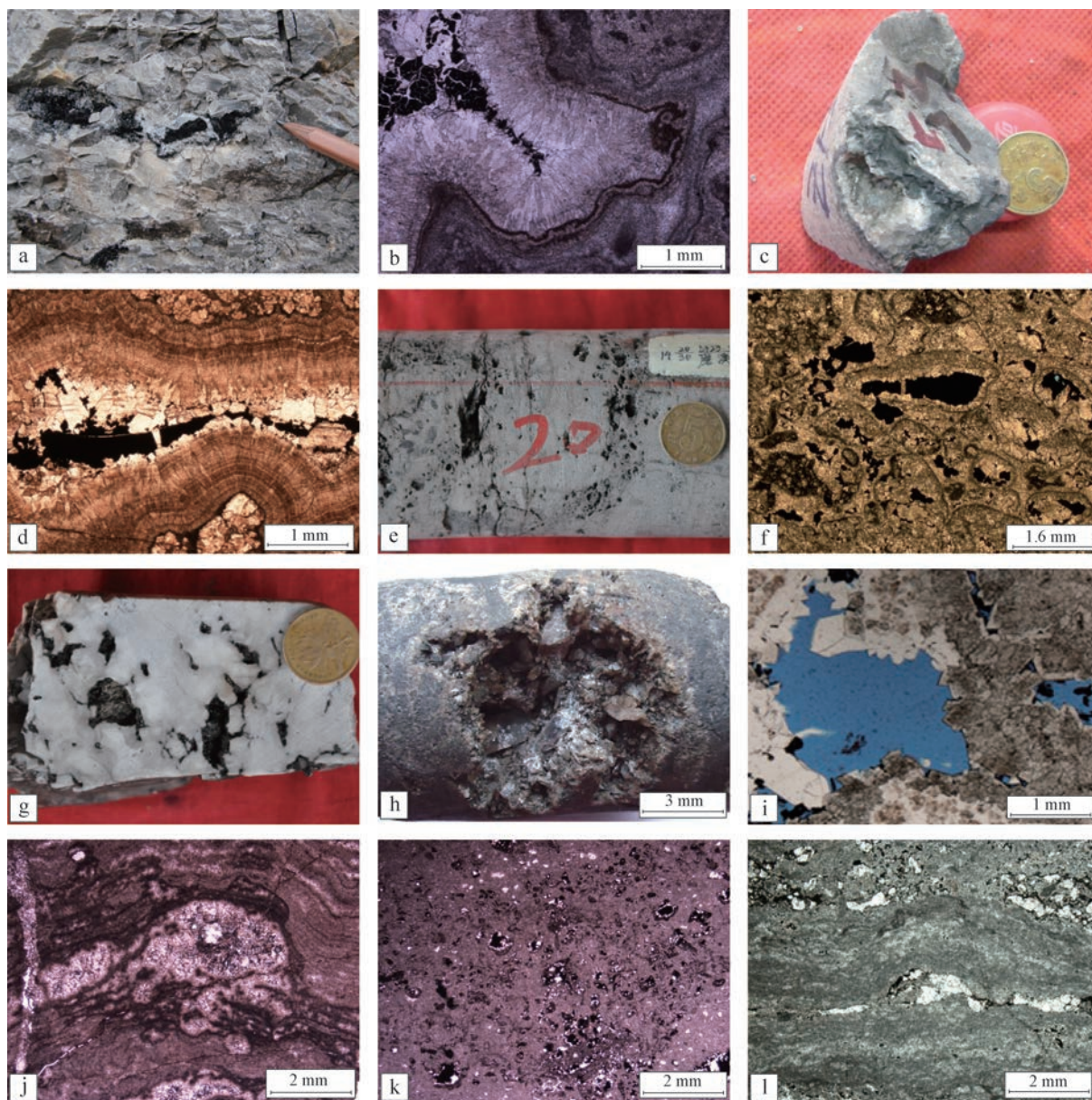


图4 四川盆地灯影组微生物碳酸盐岩储层储集空间类型

Fig. 4 Reservoir space types of the Dengying Formation microbial carbonates in the Sichuan Basin

a. 凝块间溶蚀孔洞内沥青充填,灯二段,龙门剖面;b. 葡萄-花边孔洞内纤状白云石-沥青充填,灯二段,单偏光,龙门剖面;c. 孤立状溶蚀孔,白云石半充填,埋深4 030.12 m,灯二段,资1井;d. 葡萄-花边结构的晶间溶孔,沥青充填,埋深3 149.21 m,灯二段,单偏光,威113井;e. 顺层发育的溶孔,白云石半充填,埋深5 423.56 m,灯二段,磨溪19井;f. 微生物格架孔,沥青充填,埋深5 430.17 m,灯二段,单偏光,磨溪19井;g. 孤立状溶蚀孔洞,白云石-沥青半充填,埋深5 033.62 m,灯四段,磨溪9井;h. 岩溶孔洞,内白云石-石英-沥青-自形石英半充填,埋深4 958.17~4 958.32 m,灯四段,高石1井;i. 岩溶孔洞内生石英半充填,埋深4 961.13 m,灯四段,单偏光,高石1井;j. 窗格孔,顺微生物叠层发育,埋深4 028.1 m,灯二段,单偏光,金石1井;k. 微生物体腔孔,白云石-沥青充填,灯四段,单偏光,杨坝剖面;l. 窗格孔,顺纹层发育,白云石-沥青充填,灯四段,单偏光,麻柳剖面

孔、葡萄-花边状孔洞和凝块间溶孔,面孔率集中在2.2%~5%;自下而上发育三个储层段(图5),第一个储层段发育在下部,厚42.8 m,主要为凝块石、核形石和纹层石,沥青不发育;第二个储层段发育在中部,厚34.5 m,为凝块石和泡沫绵层石,沥青不发育;第三个储层段靠近桐湾I期不整合面,厚112.8 m,岩石类型为纹层石、叠层石、泡沫绵层石和凝块石,储层沥青集

中发育在桐湾I期不整合面之下117 m内(图5),含量集中在2%~5%。

四川盆地北部杨坝剖面灯四段微生物岩储层主要发育在微生物浅滩和叠层粘结岩沉积微相,储集空间为凝块间溶孔、窗格孔、微生物体腔孔、顺层溶缝和构造溶蚀缝,面孔率多在2.5%~3%。灯四段微生物碳酸盐岩自下而上发育3个储层段(图6),第一个储

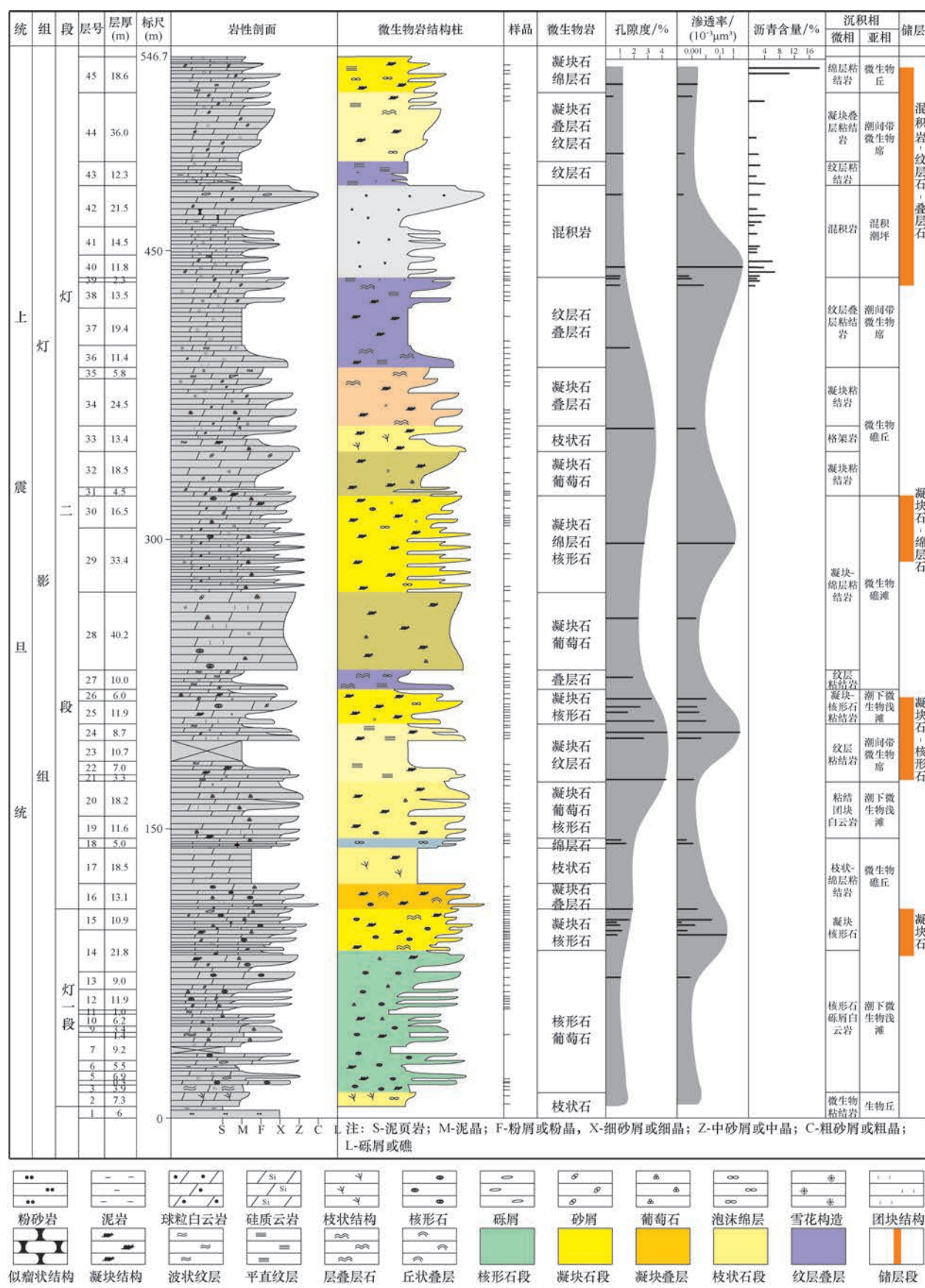


图 5 四川盆地北部杨坝剖面灯一段至灯二段微生物碳酸盐岩储层发育综合柱状图

Fig. 5 Composite column of microbial carbonate reservoirs in the 1st to 2nd members of the Dengying Formation on the Yangba cross-section of north Sichuan Basin

处于赤道中纬度带,在经历了两个冰期的震荡后,古气候转为温暖湿润^[39],沿汶川-青川-汉中-城口-巫溪一线以北为深水盆地,以南的广大地区为蓝细菌繁盛的碳酸盐岩潮坪^[14, 17],形成了广布于上扬子地台的浅水潮坪微生物席建造,局部发育微生物丘滩^[20, 34],这为四川盆地灯影组微生物碳酸盐岩储层的发育奠定了物质基础。

4.2 微生物结构影响着微生物岩优质储层的初始差异性

通过对四川盆地北部杨坝剖面的详细解剖,发现微生物结构影响着灯影组微生物岩优质储层的初始差异性,主要体现为对储层物性特征的差异性。灯一段和灯二段 32 件微生物岩样品的储层物性测试显示,核形石孔隙度为 0.73%~1.43%,渗透率为 $(0.000\ 3 \sim 0.15) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;纹层石孔隙度为 1%~4.29%,渗透率为 $(0.002\ 1 \sim 0.008\ 7) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;葡萄石孔隙度为 1.64%~2.71%,渗透率为 $(0.043\ 8 \sim 1.530\ 7) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;枝状石孔隙度为 1.03%,渗透率为 $0.000\ 9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;凝块石孔隙度为 1.01%~4.33%,渗透率为 $(0.002\ 5 \sim 4.488\ 4) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;泡沫绵层石孔隙度为 1.07%~1.18%,渗透率为 $(0.000\ 6 \sim 0.003\ 9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 7a)。储集性能:凝块石>葡萄石>枝状石>核形石>纹层石>泡沫绵层石。

川北地区灯四段 34 件微生物岩样品的储层物性测试显示,凝块石孔隙度为 2.23%,渗透率为 $4.5183 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;球粒岩孔隙度为 0.46%~1.03%,渗透率 $(0.004\ 8 \sim 0.205\ 9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;叠层-凝块石孔隙度为 1.34%~2.17%,渗透率是 $(0.000\ 6 \sim 0.000\ 9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;叠层石孔隙度是 0.9%~1.58%,渗透率是 $(0.000\ 4 \sim 0.362\ 4) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;纹层石孔隙度为 0.41%~1.31%,渗透率为 $(0.000\ 6 \sim 0.007\ 6) \times 10^{-3}$

μm^2 (图 7b)。储集性能:凝块石>叠层-凝块石>叠层石>纹层石。

4.3 白云石化作用是微生物碳酸盐岩储层形成的关键

四川盆地灯影组微生物碳酸盐岩均为白云岩,白云岩中原始的微生物结构清晰,多为原生成因或同生-准同生期白云石化^[17, 40],也有埋藏改造的特征^[41]。但微生物在低温条件下可以诱导白云石的沉淀^[42],古细菌细胞表面的羧基官能团、蓝细菌胞鞘和硫酸盐还原菌可以促进 Mg^{2+} 的富集^[43],形成原生沉淀的微生物白云石。最近的研究表明,新元古代海洋为文石-白云石海^[44],具有高 Mg/Ca 、高碱性和低硫酸盐浓度。在微生物诱导和古文石-白云石海的双重作用下,在同生-准同生期形成了广布的白云岩,而后这类微生物白云岩经历诸如沉积期岩溶、风化壳岩溶以及埋藏溶蚀的成岩改造,形成优质微生物岩储层^[18]。

4.4 风化壳岩溶和埋藏溶蚀作用决定了微生物岩优质储层的改造

近期在四川盆地西部地区发现了晚震旦世至早寒武世兴凯地裂运动形成的绵阳-长宁拉张槽^[25-26]。进一步研究表明,拉张槽的形成控制了桐湾运动二幕风化壳岩溶作用的强度和微生物岩优质储层分布,靠近拉张槽,风化壳岩溶作用强,储层溶蚀洞穴发育^[9, 45]。同时,拉张槽的形成控制了优质烃源岩的分布,距离拉张槽越近,油气充注强度越大,有机质热演化伴生的酸性流体对灯影组储层的埋藏溶蚀作用越强;油气的充注有利于储层先期孔隙的保持,储层沥青含量与储集性能呈正相关关系^[46],故平面上,灯影组微生物岩优质储层主要分布于绵阳-长宁拉张槽东西两侧的边缘带,呈近南北向展布。

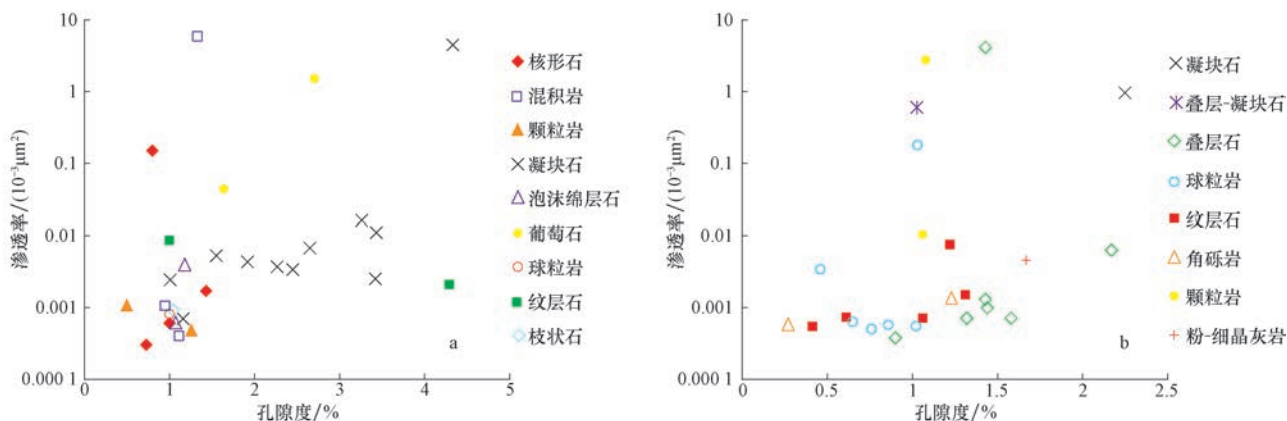


图7 川北地区灯影组微生物碳酸盐岩储层物性特征

Fig. 7 Physical properties of the Dengying Formation microbial carbonate reservoirs in the northern Sichuan Basin

a. 灯一段-灯二段; b. 灯四段

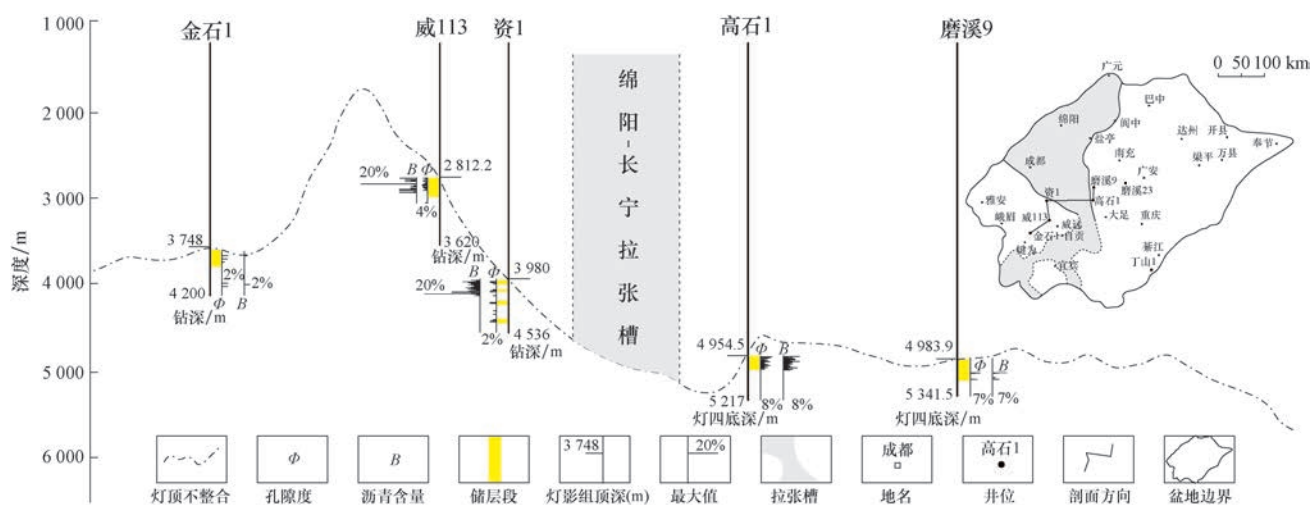


图8 四川盆地绵阳-长宁拉张槽两侧灯影组微生物岩储层差异性特征

Fig. 8 Differences in physical properties of the Dengying Formation microbial carbonate reservoirs cross the Mianyang-Changning intracratonic sag in Sichuan Basin

通过对典型剖面和横跨拉张槽的连井剖面的研究,发现与拉张槽有关的风化壳岩溶作用和埋藏溶蚀作用控制了微生物岩储层的形成和分布。川北杨坝剖面灯四段储层沥青发育在桐湾Ⅱ期不整合面(灯影组顶部)之下134.2 m内,含量在3%~15%(图6);川东南地区丁山1井储层沥青发育在灯影组顶部不整合面之下85 m范围内^[47];横向上,通过金石1—威113—资1—高石1—磨溪9井剖面,追踪其灯影组顶部不整合面,发现灯影组微生物岩储层发育在不整合面之下100~200 m,越靠近拉张槽两侧,储层厚度越大,沥青含量越高,储层物性越好(图8)。

5 结论

1) 四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩主要发育在灯二段和灯四段,具有全盆地相似性,灯二段以凝块石和葡萄石为主。灯四段以纹层石和叠层石为主。

2) 四川盆地灯影组微生物碳酸盐岩储层共发育3大类储集空间类型,即组构选择性孔隙、非组构选择性孔隙和过渡类孔隙,呈低孔低渗特征。灯二段储集空间主要为葡萄-花边状孔洞、微生物体腔孔、微生物格架间孔和凝块间溶孔。灯四段则以窗格孔和岩溶孔洞为主,辅以凝块间溶孔、晶间溶孔、微生物体腔孔、顺层溶缝和构造溶蚀缝。

3) 四川盆地北部灯影组二段微生物岩储层纵向上发育三个储层段,累积厚度190.1 m,储层沥青集中发育在桐湾Ⅰ期不整合面之下117 m,含量2%~5%。灯四段微生物岩储层自下而上亦发育3个储层段,累

积厚度121.8 m,储层沥青发育在桐湾Ⅱ期不整合面之下134.2 m内,含量在3%~15%。

4) 浅水潮坪微生物席、微生物结构、白云石化和绵阳-长宁拉张槽共同控制了四川盆地灯影组微生物岩储层形成和分布。广布的潮坪微生物席建造是优质储层发育的基础,微生物结构影响着微生物岩优质储层的初始差异性,白云石化作用是微生物岩储层形成的关键,拉张槽控制下的风化壳岩溶和埋藏溶蚀作用决定了微生物岩优质储层的改造强度和展布,灯影组微生物岩优质储层主要分布于绵阳-长宁拉张槽东西两侧的边缘带。

参考文献

- [1] Schopf J W. Earth's earliest biosphere: its origin and evolution [M]. Princeton University Press, Princeton, 1983.
- [2] Riding R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. Sedimentology, 2000, 47 (Suppl. 1): 179-214.
- [3] Burne R V, Moore I S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities [J]. Palaios, 1987, 2, 241-254.
- [4] 梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充 [J]. 地学前缘, 2007, 14 (5): 222-234.
Mei Mingxiang. Revised classification of microbial carbonates: complementing the classification of limestones [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (5): 222-234.
- [5] Craig J, Thuro J, Thusu B, et al. Global Neoproterozoic petroleum systems: the emerging potential in North Africa [M] // Craig J, Thuro J, Thusu B, et al. Global Neoproterozoic Petroleum Systems: The Emerging Potential in North Africa. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 326, 1-25.
- [6] Bhat G M, Craig J, Hafiz M, et al. Geology and hydrocarbon potential of Neoproterozoic-Cambrian Basins in Asia: an introduction [M] //

- Bhat G M, Craig J, Thurow J W, et al. Geology and Hydrocarbon Potential of Neoproterozoic-Cambrian Basins in Asia. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 366, 1-17.
- [7] Ghorri K A R, Craig J, Thusu B, et al. Global Infracambrian petroleum systems: a review [M] // Craig J, Thurow J, Thusu B, et al. Global Neoproterozoic Petroleum Systems: The Emerging Potential in North Africa. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 326, 109-136.
- [8] Hlebszevitch J C, Gebhard I, Cruz C E, et al. The 'Infracambrian System' in the southwestern margin of Gondwana, southern South America [M] // Craig J, Thurow J, Thusu B, et al. Global Neoproterozoic Petroleum Systems: The Emerging Potential in North Africa. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 326, 289-302.
- [9] 刘树根, 宋金民, 罗平, 等. 四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2016, 43 (2): 129-152.
- Liu Shugen, Song Jinmin, Luo Ping, et al. Characteristics of microbial carbonate reservoir and its hydrocarbon exploring outlook in the Sichuan Basin, China [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 43 (2): 129-152.
- [10] 李朋威, 罗平, 宋金民, 等. 微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素—以塔里木盆地西北缘上震旦统—下寒武统为例 [J]. 石油学报, 2015, 36 (9): 1074-1089.
- Li Pengwei, Luo Ping, Song Jinmin, et al. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoirs: a case study of Upper Sinian-Lower Cambrian in the northwestern margin of Tarim-Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (9): 1074-1089.
- [11] Tull S J. The diversity of hydrocarbon habitat in Russia [J]. Petroleum Geoscience, 1997, 3 (4): 315-325.
- [12] James P H, Olga K B, Alexander P G, et al. The petroleum potential of the Riphean-Vendian succession of southern East Siberia [M] // Bhat G M, Craig J, Thurow J W, et al. Geology and Hydrocarbon Potential of Neoproterozoic-Cambrian Basins in Asia. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 366, 177-198.
- [13] 魏国齐, 沈平, 杨威, 等. 四川盆地震旦系大气田形成条件与勘探远景区 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40 (2): 129-138.
- Wei Guoqi, Shen Ping, Yang Wei, et al. Formation conditions and exploration prospects of Sinian large gas fields, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40 (2): 129-138.
- [14] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 40 (3): 278-293.
- Zou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunhui, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 40 (3): 278-293.
- [15] 殷继成, 丁莲芳, 何廷贵, 等. 四川峨眉—甘洛地区震旦系地层古生物及沉积环境 [M]. 四川成都: 四川人民出版社, 1980.
- Yin Jicheng, Ding Lianfang, He Tinggui, et al. The palaeontology and sedimentary environment of the Sinian system in Emei to Ganluo Area, Sichuan [M]. Chengdu: Sichuan People Press, 1980.
- [16] 张荫本, 唐泽尧, 陈季高. 粘结岩分类及应用 [J]. 天然气勘探与开发, 1996, 19 (4): 24-33.
- Zhang Yinben, Tang Zeyao, Chen Jigao. The classification and application of boundstone [J]. Natural Gas Exploration and Development, 1996, 19 (4): 24-33.
- [17] 方少仙, 侯方浩, 董兆雄. 上震旦统灯影组中非叠层石生态系蓝细菌白云岩 [J]. 沉积学报, 2003, 21 (1): 96-105.
- Fang Shaoxian, Hou Fanghao, Dong Zhaoxiong. Non-stromatolite ecological system cyanobacteria dolostone in Dengying Formation of Upper-Sinian [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21 (1): 96-105.
- [18] 罗平, 王石, 李朋威, 等. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望 [J]. 沉积学报, 2013, 31 (5): 807-823.
- Luo Ping, Wang Shi, Li Pengwei, et al. Review and prospectives of microbial carbonate reservoirs [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31 (5): 807-823.
- [19] 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 等. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布 [J]. 石油学报, 2015, 36 (4): 416-426.
- Luo Bing, Yang Yueming, Luo Wenjun, et al. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (4): 416-426.
- [20] 彭瀚霖, 刘树根, 宋金民, 等. 川北米仓山地区灯影组微生物碳酸盐岩发育特征 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2014, 41 (2): 181-191.
- Peng Hanlin, Liu Shugen, Song Jinmin, et al. Characteristics of microbial carbonate rocks in Upper Sinian Dengying Formation of Micang Mountains, North Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41 (2): 181-191.
- [21] Christopher R Scotese. Late Proterozoic plate tectonics and palaeogeography: a tale of two supercontinents, Rodinia and Pannotia [M] // Craig J, Thurow J, Thusu B, et al. Global Neoproterozoic Petroleum Systems: The Emerging Potential in North Africa. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 326, 67-83.
- [22] 杨雨, 黄先平, 张健, 等. 四川盆地寒武系沉积前震旦系顶界岩溶地貌特征及其地质意义 [J]. 天然气工业, 2014, 34 (3): 38-43.
- Yang Yu, Huang Xianping, Zhang Jian, et al. Feature and geologic significances of the top Sinian karst landform before the Cambrian deposition in the Sichuan Basin [J]. Nature Gas Industry, 2014, 34 (3): 38-43.
- [23] 李启桂, 李克胜, 周卓铸, 等. 四川盆地桐湾不整合面古地貌特征与岩溶分布预测 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34 (4): 516-521.
- Li Qigui, Li Kesheng, Zhou Zhuozhu, et al. Palaeogeomorphology and karst distribution of Tongwan unconformity in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (4): 516-521.
- [24] 汪泽成, 姜华, 王铜山, 等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41 (3): 1-8.
- Wang Zecheng, Jiang Hua, Wang Tongshan, et al. Paleo-geomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41 (3): 1-8.
- [25] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2013, 40 (5): 511-520.
- Liu Shugen, Sun Wei, Luo Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from upper Sinian to Cambrian strata in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40 (5): 511-520.

- nce & Technology Edition), 2013, 40(5): 511–520.
- [26] 钟勇, 李亚林, 张晓斌, 等. 四川盆地下组合张性构造特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 498–510.
Zhong Yong, Li Yalin, Zhang Xiaobin, et al. Features of extensional structures in pre-Sinian to Cambrian strata, Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(5): 511–520.
- [27] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 2014, 03: 268–277.
Du Jinhui, Zou Caineng, Xu Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 03: 268–277.
- [28] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪一早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 24–35.
Wei Guoqi, Yang Wei, Du Jinhui, et al. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin [J]. Nature Gas Industry, 2015, 35(1): 24–35.
- [29] Partin C A, Bekker A, Planavsky N J, et al. Large-scale fluctuations in Precambrian atmospheric and oceanic oxygen levels from the record of Uinshales [J]. Earth Planet Sci Lett, 2013, 369–370: 284–293.
- [30] Planavsky N J, Reinhard C T, Wang X L, et al. Low Mid-Proterozoic atmospheric oxygen levels and the delayed rise of animals [J]. Science, 2014, 346: 635–638.
- [31] 刘静江, 李伟, 张宝民, 等. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. 古地理学报, 2015, 17(6): 735–753.
Liu Jingjiang, Li Wei, Zhang Baomin, et al. Sedimentary palaeogeography of the Sinianian Upper Yangtze Region [J]. Journal of paleogeography, 2015, 17(6): 735–753.
- [32] Tomitani A, Knoll A H, Cavanaugh C M, et al. The evolutionary diversification of cyanobacteria: Molecular phylogenetic and paleontological perspectives [J]. Proc Natl Acad Sci 2006, 103: 5442–5447.
- [33] Andrew H. Knoll. Paleobiological perspectives on early Microbial evolution [J]. Cold Spring Harb Perspect Biol 2015, 7: 1–18.
- [34] 李凌, 谭秀成, 曾伟, 等. 四川盆地震旦系灯影组灰泥丘发育特征及储集意义[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 666–673.
Li Ling, Tan Xiucheng, Zeng Wei, et al. Development and reservoir significance of mud mounds in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 666–673.
- [35] 斯春松, 郝毅, 周进高, 等. 四川盆地灯影组储层特征及主控因素[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2014(3): 266–273.
Si Chunsong, Hao Yi, Zhou Jingao, et al. Characteristics and controlling factors of reservoir in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014(3): 266–273.
- [36] 施泽进, 彭俊, 王勇. 川东南地区灯影组储层特征及其控制因素研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 1–8.
Shi Zejin, Peng Jun, Wang Yong. Reservoir features and controlling factors of Dengying Formation in Southeast Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(1): 1–8.
- [37] 朱瑜, 桑琴, 吴昌龙, 等. 威远气田震旦系灯影组储层特征研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2010, 12(5): 11–14.
Zhu Yu, Sang Qing, Wu Changlong, et al. Reservoir characteristics of the Sinian Dengying Formation in the Weiyuan Gasfield, Sichuan [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2010, 12(5): 11–14.
- [38] Grotzinger J P, Knoll A H. Proterozoic stromatolites: Evolutionary mileposts or environmental dipsticks? [J] Annu Rev Earth Planet Sci, 1999, 27: 313–358.
- [39] Coppold M, Powell W. A Geoscience Guide to the Burgess Shale: Geology and Paleontology in Yoho National Park [M]. Burgess Shale Geoscience Foundation, British Columbia, Canada. 2000.
- [40] 王士峰, 向芳. 资阳地区震旦系灯影组白云岩成因研究[J]. 岩相古地理, 1999, 19(3): 21–29.
Wang Shifeng, Xiang Fang. The origin of the dolostones from the Sinian Dengying Formation in the Ziyang district, Sichuan [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1999, 19(3): 21–29.
- [41] 郭铁, 谢淑云, 张殿伟, 等. 川南地区灯影组白云岩地球化学特征及流体来源论[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 721–730.
Wu Tie, Xie Shuyun, Zhang Dianwei, et al. Geochemical characteristics and fluid origin of the Dengying Formation dolomites in southern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 721–730.
- [42] Lith Y V, Warthmann R, Vasconcelos C, et al. Sulphate-reducing bacteria induce low-temperature Ca-dolomite and high Mg-calcite formation [J]. Geobiology, 2003, 1(1): 71–79.
- [43] Kenward P A, Fowle D A, Goldstein R H, et al. Ordered low-temperature dolomite mediated by carboxyl-group density of microbial cell walls [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(11): 2113–2125.
- [44] Ashleigh V S H, Malcolm W W, Russell N D. Neoproterozoic aragonite-dolomite seas? Widespread marine dolomite precipitation in Cryogenian reef complexes [J]. Geology, 2011, 39(9): 871–874.
- [45] 宋金民, 刘树根, 孙玮, 等. 兴凯裂运动对四川盆地灯影组优质储层的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 658–670.
Song Jinmin, Liu Shugen, Sun Wei, et al. Control of Xingkai taphrogenesis on Dengying Formation high quality reservoirs in Upper Sinian of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(6): 658–670.
- [46] 崔会英, 张莉, 魏国齐. 四川盆地威远—资阳地区震旦系储层沥青特征及意义[J]. 石油实验地质, 2008, 30(5): 489–498.
Cui Huiyin, Zhang Li, Wei Guoqi. Characteristics of the Sinian reservoir bitumen in Weiyuan-Ziyang areas of the Sichuan Basin and its significance [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2008, 30(5): 489–498.
- [47] 刘树根, 马永生, 蔡勋育, 等. 四川盆地震旦系—下古生界天然气成藏过程和特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 33(4): 345–354.
Liu Shugen, Ma Yongsheng, Cai Xunyu, et al. Characteristic and accumulation process of the natural gas from Sinian to Lower Paleozoic in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 33(4): 345–354.