

塔里木盆地塔中西部地区奥陶系岩溶作用及对油气储层的制约

何碧竹^{1,2)}, 焦存礼³⁾, 贾斌峰²⁾, 汪功怀²⁾

1) 中国地质科学院地质研究所 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037;

2) 中国石化中原油田分公司 勘探开发科学研究院, 河南濮阳 457001;

3) 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要: 塔中西部地区下奥陶统—上奥陶统里塔格组, 发育了巨厚的、多种岩性的海相碳酸盐岩地层。根据对该区钻井岩芯、测井和地质化验分析资料综合研究结果, 奥陶系存在同生岩溶、风化壳岩溶、埋藏岩溶等三种不同的岩溶作用类型。同生岩溶沿上奥陶统里塔格组台地边缘相带分布, 大气成岩透镜体发育频繁, 但规模较小; 风化壳岩溶主要分布于中奥陶世中 1 低隆起及塔中 号构造带; 埋藏岩溶主要存在 3 期, 在断裂构造带及火成岩区较为发育。岩相和沉积相、岩溶作用、构造裂缝等是奥陶系岩溶储层发育的主要控制因素, 制约了不同层段、不同部位岩溶储层发育。

关键词: 岩溶作用; 主控因素; 奥陶系; 塔中西部

中图分类号: P534.42; P618.13; P642.25 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)03-395-09

Karstification of Ordovician Strata in Western Tazhong Area of Tarim Basin, Xijiang

HE Bi-zhu^{1,2)}, JIAO Cun-li³⁾, JIA Bin-feng²⁾, WANG Gong-huai²⁾

1) Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Exploration and Development Research Institute of Zhongyuan Oilfield Branch Company, Puyang, Henan 457001;

3) Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083

Abstract: There exist thick marine carbonate strata of varied lithologic characters in the Lower Ordovician-Upper Ordovician Lianglitage Formation of western Tazhong area. Based on data of drill cores, logs and laboratory tests, the authors recognized three types of karstifications in the study area, namely syn-depositional, weathering-crust, and buried ones. The syn-depositional karstification occurs mainly on the platform margin of Later Ordovician Lianglitage Formation, in which atmospheric lithogenic lens are frequently seen but their sizes are not so big. The weathering-crust karstification is developed in central Kartarke uplift. The buried karstification can be divided into three stages and are distributed in areas where faulted structural belts and igneous rocks are well developed. Lithofacies and sedimentary facies, karstification and structural fissures are main factors controlling the development of Ordovician carbonate reservoirs, which constrain the development of karst reservoir rocks in different layers and positions.

Key words: karstification; main controlling factors; Ordovician; western Tazhong area

近几年, 国内海相碳酸盐岩油气藏勘探取得了明显进展。塔里木盆地的油气勘探实践已证实, 碳

酸盐岩油气藏储层有效性明显受沉积、成岩作用、后期改造的影响。塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层发

本文为中国石化集团公司科技部项目(编号 P04027)及中国石化海相前瞻性项目(编号 YPH08110)联合资助成果。

收稿日期: 2009-04-21; 改回日期: 2009-05-14。

第一作者简介: 何碧竹, 女, 1965 年生。博士, 高级工程师。主要从事石油地质综合研究工作。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68999731。E-mail: hebizhu@vip.sina.com。

育与塔北塔河油田差别较大(陈景山, 2007; 顾家裕, 2005; 钱一雄, 2007), 尤其是塔中西部油气勘探程度较低, 岩溶作用研究程度也很低, 成为制约油气勘探的关键所在。因此, 研究碳酸盐岩岩溶作用、岩溶模式、主控因素及岩溶储层的分布对油气勘探具有重要的意义。本文通过对塔里木盆地塔中西部地区的钻井岩芯观察、测井、录井、分析化验等资料的综合分析, 论述了该区奥陶系不同类型岩溶作用的特征及分布, 探讨碳酸盐岩岩溶储层发育的控制因素, 为岩溶储层的分布预测和油气勘探提供了依据。

本文研究区位于塔里木盆地中央隆起带的卡塔克隆起西部(图 1)。

卡塔克隆起西与巴楚断隆相接, 东与古城墟隆起相连, 北为满加尔坳陷、顺托果勒低隆起、阿瓦提断陷, 南为塘古孜巴斯坳陷。在奥陶纪塔里木盆地处于海相盆地-陆棚-台地沉积环境中, 早、中奥陶世卡塔克隆起为弱镶边斜坡型碳酸盐岩台地; 晚奥陶世

早、中期卡塔克隆起与周围形成孤立台地-台地边缘-斜坡体系; 晚奥陶世晚期碳酸盐岩台地继续向隆起中心收缩, 碳酸盐岩台地淹没, 广泛发育混积陆棚相(陈景山等, 1999; 顾家裕等, 2005; 樊太亮等, 2007)。卡塔克隆起奥陶系包含下奥陶统蓬莱坝组、鹰山组、上奥陶统良里塔格组和桑塔木组, 缺失中奥陶统一间房组和上奥陶统下部恰尔巴克组。其中, 蓬莱坝组厚 200~600 m, 主要为浅灰、浅灰褐色中厚层-巨厚层状泥晶-粉晶白云岩夹白云质灰岩, 与下伏上寒武统丘里塔格下亚群为假整合接触。鹰山组厚 700~1000 m, 主要发育台地相泥晶灰岩、白云质砂屑灰岩、灰质云岩、泥晶云岩、粉晶云岩等, 与下伏蓬莱坝组为整合接触。一间房组和恰尔巴克组在卡塔克隆起缺失, 形成了区域的不整合。良里塔格组主要发育开阔台地相、台地边缘相的灰色、褐灰色泥晶灰岩、颗粒灰岩, 最厚可达 800 m, 与上覆桑塔木组局部呈整合接触。桑塔木组以发育混积陆棚

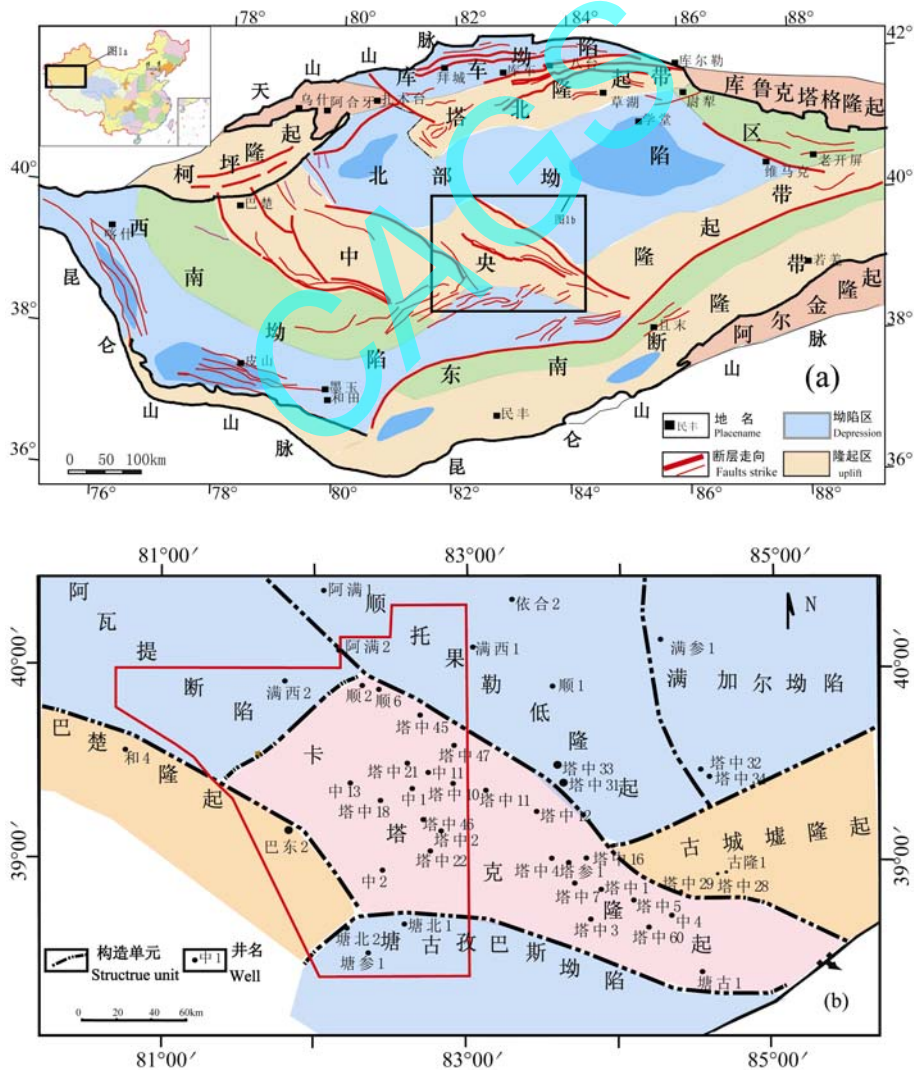


图 1 塔里木盆地构造单元划分图(a)及研究区构造单元和井位分布图(b)
 Fig. 1 Schematic structural unit map(a) and well location of researcher area in Tazhong area, Tarim basin(b)

相灰色、深灰色厚层泥岩和灰质泥岩为特征, 厚为 0~700 m, 与志留系呈不整合接触。

卡塔克隆起奥陶系地层厚逾 3000 m, 发育巨厚的海相碳酸盐岩, 构成了碳酸盐岩油气藏储层的物质基础。

1 岩溶作用类型及发育特征

岩溶作用是水流对可溶性岩石进行的, 以溶解与沉淀等化学作用为主要特征, 并伴随有流水浸蚀和沉积, 重力崩塌和堆积等机械作用的综合地质作用以及由此产生的地质现象的统称。岩溶又称喀斯特(Karst)。按岩溶形成的时间和发生的环境, 通常可将它划分为同生岩溶、风化壳岩溶和埋藏岩溶三种类型。这三种不同类型的岩溶在塔中地区奥陶系碳酸盐岩中发育良好, 并且是碳酸盐岩储层形成的主控因素。

1.1 同生岩溶

同生岩溶是指在碳酸盐岩等沉积物沉积成岩阶段, 受次级沉积旋回和海平面变化的控制, 周期暴

露或接受大气降水的淋滤而产生的岩溶。尤其含膏云坪、粒屑滩、骨架礁等碳酸盐岩沉积体, 在海退和向上变浅的沉积序列中, 伴随海平面暂时性相对下降, 时而出露海面或处于淡水透镜体内, 在潮湿多雨的气候条件下, 受到富含 CO_2 的大气淡水的淋溶, 发生选择性和非选择性的淋滤、溶蚀作用, 形成大小不一、形态各异的各种孔隙(陈景山等, 2007; 李振宏等, 2004)。它既可以选择性地溶蚀由准稳定矿物(文石、高镁方解石等)组成的颗粒或第一期方解石胶结物, 形成组构选择性溶孔、粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔, 又可发生非选择性溶蚀作用, 形成溶缝和溶洞(图 2)。

同生岩溶作用发生于同生大气成岩环境中, 主要见于潮坪、粒屑滩(台缘滩和台内滩)亚相内, 礁相中也有分布, 岩性主要为颗粒灰岩组合和礁灰岩组合。塔中地区上奥陶统良里塔格组的台地边缘相带呈近环带状环绕卡塔克隆起分布, 晚奥陶世晚期台地边缘相带具有向中央断垒带迁移的特征, 北部环

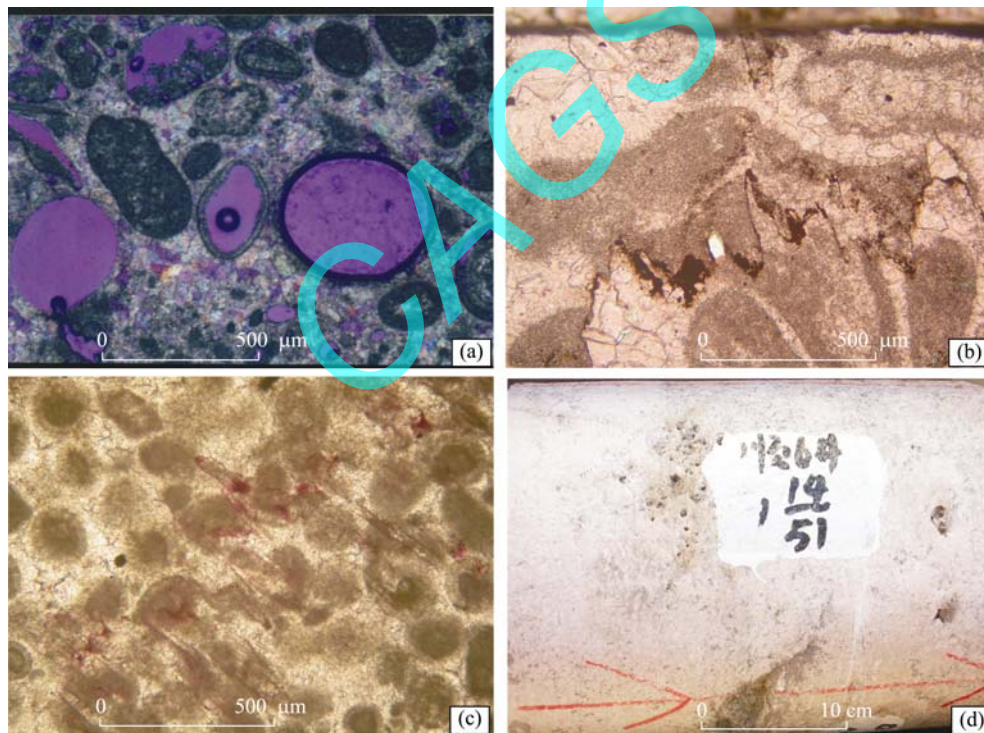


图 2 塔中西部上奥陶统良里塔格组同生岩溶特征

Fig. 2 Characteristics of syndepositional karstification in Late Ordovician Kiangligeta Formation

(a) 顺 2 井, 6798.60 m, 良里塔格组亮晶鲕粒灰岩, 粒内溶孔和铸模孔, 正交偏光, 加石膏试板; (b) 顺 6 井, 6616.77 m, 良里塔格组浅灰色亮晶砂屑藻屑灰岩, 主要为藻屑和砂屑, 其次见有砾屑和苔藓虫屑, 偶见生物壳屑, 填隙物为亮晶方解石, 在方解石内有晶间孔, 在晶间孔内常见黄褐色有机质痕迹, 正交偏光; (c) 顺 6 井, 6639.7 m, 良里塔格组亮晶鲕粒砂屑灰岩, 以薄皮鲕和表鲕为主, 鲕核主要为砂屑, 鲕粒大小在 0.15 mm-1.2 mm 之间, 砂屑粒径在 0.125-0.7 mm 之间, 填隙物为亮晶方解石, 沿缝合线有压溶缝, 铸体偏光;

(d) 顺 6 井, 6618.3 m, 良里塔格组亮晶砂屑灰岩, 溶蚀孔洞发育, 不均匀。

(a) intragranular solution pores and mould pores resulted from syndepositional karstification selective dissolution in O_3I oosparite of well Sh2, 6798.60 m, casting thin section, cross polarizer light, with gypsum test plate; (b) intercrystalline solution pores and partially filled by tawny organic matter in calcsparite filling and in O_3I oospararenite of well Sh6, 6798.60 m, cross polarizer light; (c) calcsparite filling and pressolved gap along styloite in O_3I oospararenite of well Sh6, 6798.60 m, cross polarizer light; (d) large dissolution pores and caves in O_3I calcarenite of well Sh6, core, 6618.3 m.

带较南部迁移的更为迅速(樊太亮等, 2007)。因此, 塔中西部地区奥陶系碳酸盐岩台地边缘中高能相带在海平面周期性下降期, 普遍发生同生岩溶作用。由于双层水结构的水文地质条件, 决定了同生岩溶的水运动以渗滤扩散为主, 在沉积层中形成了渗流、潜流, 形成大气成岩透镜体。高孔隙度层段集中分布于同生岩溶段上部和中下部两个部位, 大致相当于大气渗流带的上部到大气潜流带的中上部。单井剖面中识别出的大气成岩透镜体的厚度一般为4.5~50 m。纵向上孔隙发育段与胶结段间互出现。

大气渗流带中下部和大气潜流带的下部则因充填作用和胶结作用, 孔隙度降低, 甚至形成致密层。塔中地区西部完钻的顺2井取心段显示, 良里塔格组颗粒灰岩“针孔层”在垂向上与致密层频繁互层。“针孔层”的储集空间类型为颗粒的铸模孔、粒内溶孔、溶洞和溶缝, 溶洞和溶缝内可见方解石和灰绿色泥质充填物。根据测井解释的孔洞层段结合岩心、岩屑的宏观、微观岩溶特征分析, 确定顺2井良里塔格组碳酸盐岩共发育六个大气成岩透镜体(图3), 透镜体的厚度变化区间为4.5~29 m。



图3 顺2井上奥陶统岩溶发育剖面
Fig. 3 Geological column showing the development of Late Ordovician karstification in Well Shun 2

通过井间同生岩溶发育特征的对比,发现沿塔中1号坡折带良里塔格组台地边缘已钻遇礁体厚度在25~65 m,复合厚度最大达到125 m。灰泥丘厚度为20~70 m,滩的厚度5~55 m。表生期成岩作用形成了多层大气成岩透镜体,从早到晚有4~6期,厚度20~70 m。塔中西部同生岩溶具有大气成岩透镜体发育频繁,但规模较小的特征。

塔中西部地区良里塔格组碳酸盐岩中常见同生岩溶作用,但所生成的各种溶蚀孔洞缝随后多被充填,能作为有效孔隙保存下来的主要沿塔中1号坡折带的台地边缘镶边体系分布。沉积微相以礁核、礁坪和滩相为最好,其次为丘坪相。岩性以颗粒灰岩段礁灰岩、生屑灰岩、砂屑砾屑灰岩以及鲕粒灰岩为主;储集空间以孔洞型为主,伴随少量构造缝、溶解缝和压溶缝。储集体形态以透镜状为主,层间和层内非均质性较强。顺2井奥陶系良里塔格组岩石中裂隙、溶洞、溶孔较发育,常规测井资料及成像测井资料综合解释,Ⅰ类储层7层,厚38.8 m,Ⅱ类储层1层厚3.6 m,Ⅰ类、Ⅱ类储层共8层合计厚42.4 m。

1.2 风化壳岩溶

风化壳岩溶又称不整合面岩溶、侵蚀面岩溶等,它是指可溶性岩层在出露地表的表生成岩环境中,大气淡水对不整合面以下地层的淋滤改造过程中所发生的岩石的溶蚀。它的形成与重要的海平面下降或构造运动造成的陆地大面积暴露有关。风化壳岩溶作用的动力因素主要是水、溶入水中的 CO_2 和可溶性岩层(袁道先等,2008;许效松等,2005; Vilasi N et al., 2009)。

塔中地区风化壳岩溶的形成和发育,主要与卡塔克隆起受加里东中期、加里东晚期及海西早期的构造运动有关,在中下奥陶统和上奥陶统形成了两个构造控制的暴露面,在表生成岩作用下,大气降水与地下水和混合水构成循环体系,形成地质历史中的溶蚀系统。溶蚀最直接的结果是暴露的碳酸盐岩溶解、溶蚀,孔隙度增加,渗透性增大,组成了面状分布的风化壳岩溶带。风化壳岩溶在区域不整合面下,发育有风化残积层、高角度溶沟和溶缝、落水洞及其杂色角砾岩、大型溶洞及地下暗河充填物、坍塌层及坍塌角砾岩等。发育完整的风化壳岩溶序列,从不整合面向下一般由地表岩溶带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带等四个岩溶带构成(许校松等,2005;陈景山等,2007)。

塔中西部中1井鹰山组上部碳酸盐岩的风化壳岩溶作用发生于中奥陶世大湾期至晚奥陶世艾家山早期,与加里东中期Ⅰ幕运动有关。依据该井鹰山组取芯、测井资料解释,进行了岩溶垂向剖面恢复。中1井鹰山组上部碳酸盐岩受风化壳岩溶作用影响的深度从5350 m到5512 m,厚161 m,从不整合面向下可划分出垂直渗流岩溶带(5350~5363 m)、水平潜流岩溶带(5363~5384 m和5432~5484 m)、深部缓流岩溶带(5484~5512 m)等三个岩溶带(图4)。

塔中西部地区奥陶系地层共经历了中奥陶世末、奥陶纪末~志留纪初、志留纪末~泥盆纪初、晚泥盆世中期四个阶段的四期风化壳岩溶作用的改造,各期岩溶作用的强度在不同构造带上存在差异,对储层的影响也不尽相同。发生在中奥陶世末的第一期(加里东中期Ⅰ幕)岩溶在塔中1号断裂带以西广泛分布,但岩溶作用的深度范围比较小,一般影响不整合面以下70 m以内的地层,最深的可达100 m;奥陶纪末~志留纪初(加里东中期Ⅱ幕)第二期岩溶主要影响塔中Ⅱ号构造带及中奥陶世中1低隆起中1井~中12井一带,岩溶影响范围到不整合面以下200 m。第三期(加里东晚期)和第四期(海西早期)岩溶主要作用在塔中Ⅱ号构造带。塔中Ⅱ号构造带现今的岩溶特征是后期风化壳岩溶作用叠加的结果。

塔中地区风化壳岩溶作用对储集空间的发育程度有明显的控制作用,储集空间类型受控于不同的岩溶古地貌单元。根据岩溶发育的古地貌背景及构造特征,又可以分为古潜山型和斜坡型。下奥陶统碳酸盐岩古潜山型风化壳岩溶储层在塔中Ⅱ号带以及南部的潜山带发育,沉积相为半局限台地和局限台地相,岩性以灰云岩段灰岩、云岩为主;储集空间以孔洞型为主,伴随大量构造缝、溶解缝和压溶缝和大型溶洞。储集体形态以厚层不规则状透镜状为主,隔层不规则,层间和层内非均质性极强,溶洞充填严重,距潜山风化壳100 m以内多被充填,无好储层。风化壳岩溶垂向上划分为垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带。垂直渗流带厚度9~140 m,古潜山越高垂直渗流带厚度越大;水平潜流带23~106 m,古潜山越高水平潜流带越薄。下奥陶统碳酸盐岩斜坡型风化壳岩溶储层在塔中10号带以及两侧发育,沉积相为半局限台地和局限台地相,岩性以灰云岩段灰岩、云岩为主;储集空间以孔洞型为主,伴随中等—少量构造缝、溶解缝和压溶缝和中小型溶洞。储集体形态以层状为主,隔层较规则,

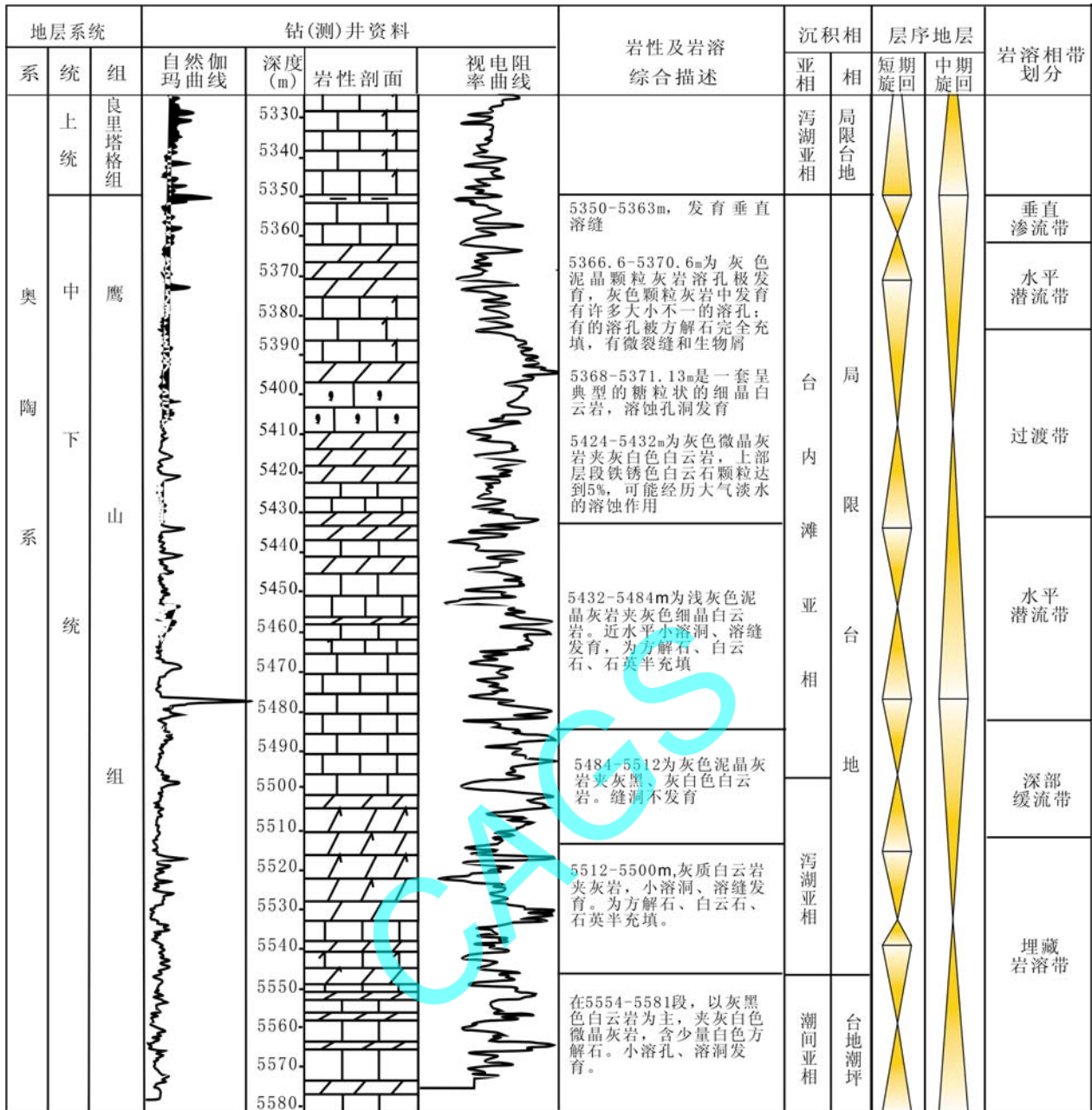


图 4 塔中西部中 1 井奥陶系鹰山组风化壳岩溶发育剖面图

Fig. 4 Columnar section showing the weathering karstification of Middle Ordovician Yingshan Formation in Well Zhong 1

层间和层内非均质性较强。距风化壳顶 50 m 以内多发育第一套优质储层，其下受层序界面控制发育多套储层。

1.3 埋藏岩溶

埋藏岩溶作用指碳酸盐岩在中-深埋藏阶段，是富含有机质(与烃类排出有关)及还原环境下的含 H₂S、F⁻、Cl⁻、B⁻、HCO₃⁻、CO₂⁻³ 等侵蚀性流体或具有高矿化度卤水(地层水)发生溶蚀有关的现象及过程(夏日元, 2006; Davies G R et al., 2006; 钱一雄, 2007; JIN Z J et al., 2009; Beabington-Penney et al., 2008)。埋藏岩溶作用所产生的孔隙一般可分为组构

选择型和非组构选择型两种类型。组构以微孔为主，主要包括粒间溶孔和晶间溶孔两种类型。非组构选择型主要包括溶扩构造缝、溶扩压溶缝、溶蚀孔洞及溶扩孔洞。埋藏岩溶形成的有效储集空间主要为溶蚀孔洞、溶缝、晶间溶孔、溶扩孔洞及溶扩构造缝。埋藏岩溶的鉴别一般只有通过微观条件分析，才能加以识别。塔中地区奥陶系碳酸盐岩从沉积至今，经历了多次构造—成岩旋回改造，相应地也发育了多期埋藏岩溶作用。塔中西部奥陶系碳酸盐岩中的埋藏溶蚀孔隙以非组构选择型为主，组构选择型相对少见(图 5)。

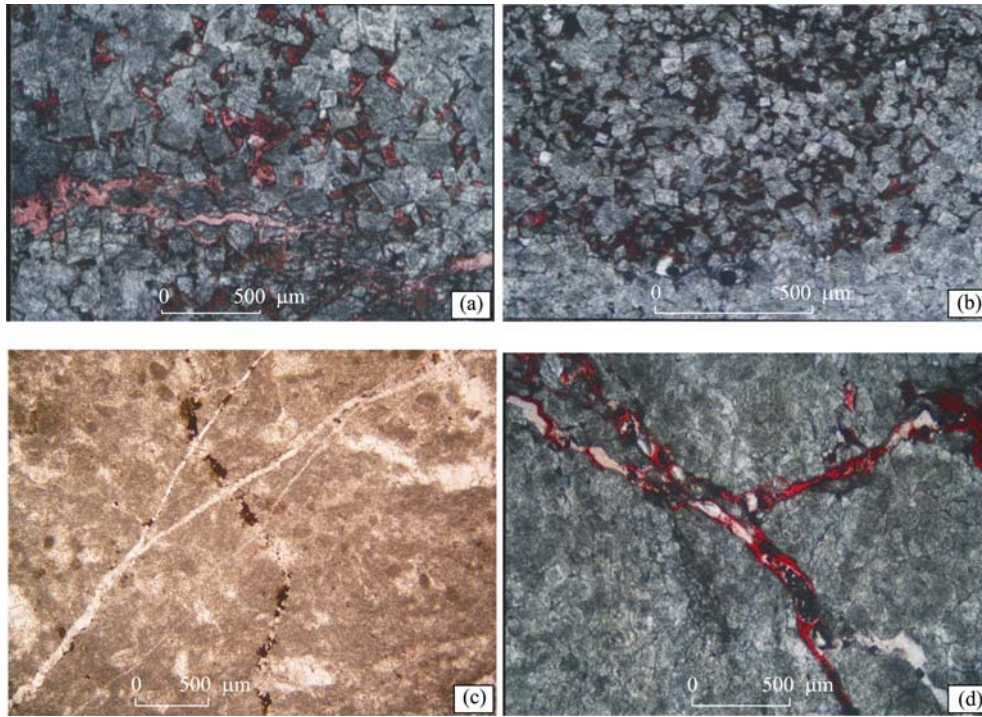


图 5 塔中西部奥陶系埋藏岩溶特征

Fig. 5 Microphotograph showing burial karstification in western Tazhong

(a) 中 13 井, 5973.5 m, 奥陶系鹰山组, 细晶云岩, 第三期(喜山期)构造缝未被充填, 沿裂缝扩溶并形成晶间溶孔, 铸体片, 单偏光; (b) 中 13 井, 5973.5 m, 奥陶系鹰山组, 细晶云岩, 孔洞充填物中的方解石或白云石的晶间和晶内溶孔, 铸体片, 单偏光; (c) 顺 6 井, 6704.2 m, 奥陶系良里塔格组, 粒屑灰岩, 微裂缝比较发育, 早期裂缝被方解石充填, 中期裂缝充填方解石, 晚期沿裂缝进行溶蚀, 另可见少量串珠状溶孔沿缝合线分布, 溶孔内有褐黑色有机质, 正交偏光; (d) 中 1 井, 5367.6 m, 奥陶系鹰山组, 具砂屑幻影的细晶云岩, 第二期(海西期)构造缝充填后, 被埋藏岩溶作用改造、扩溶, 形成扩溶缝, 并为黑色沥青半充填, 铸体片, 单偏光。

(a) dissolution expanded fissures and intercrystalline solutional pores formed by the buried corrosion along the microfracture in O_{1ys} finely crystalline dolomite of well Zh13, 5973.5 m, casting thin section, plain polarized light; (b) intercrystalline solutional pores and intracrystalline solutional porosity of dolomite and calcite filling in caves in O_{1ys} finely crystalline dolomite of well Zh13, 5973.5 m, casting thin section, plain polarized light; (c) microfissures developed, calcite filling in early and middle microfissures, corrosion along later microfractures and partially filled by black organic matter in O_{2l} grainstone of well Sh6, 6704.2 m, cross polarizer light; (d) structural fissures and small-scale caves and dolomite filling formed by the weathering karstification late reworking by the buried corrosion, and partially filled by black bitumen in O_{1ys} finely crystalline dolomite of well Zh1, 5367.6 m, casting thin section, plain polarized light.

塔中地区奥陶系埋藏岩溶作用与其所经历的构造运动密切相关, 该区埋藏岩溶作用至少发育有三期(陈景山, 2007)。第一期埋藏岩溶作用发生于晚加里东期至早海西期, 在全区均有分布, 但其溶蚀作用较弱, 该期溶蚀作用所形成的孔隙, 经历了后期改造, 其特征已不易识别。第二期埋藏岩溶作用主要发生在晚海西期至印支期, 在塔中 I 号断裂带西侧表现较强烈, 但其形成的缝洞多为方解石和萤石充填, 该期埋藏岩溶作用和晚海西期的构造作用是形成塔中 45 井的裂缝-孔洞型储层的关键。该期埋藏岩溶作用也表现为对早海西期风化壳岩溶作用所形成的孔洞缝及其填充物的改造。第三期埋藏岩溶作用发生于燕山期至喜山期, 是在再次深埋藏的成岩环境中进行的, 这一期埋藏岩溶作用主要沿晚期构造缝和已有的孔洞缝扩大溶蚀, 形成溶扩构造缝、溶缝、小型孔洞、串珠状孔洞。主要发育于塔中 I 号构造带和中 1—中 11—中 12 井一带, 发育裂

缝-孔洞型、裂缝-孔隙型或孔隙-裂缝型储层。目前, 埋藏岩溶作用虽可以识别, 但埋藏岩溶发生的时间及期次研究仍存在局限性, 需采取流体包裹体分析及同位素测年等方法进一步确定。

2 岩溶作用对储层的控制

2.1 岩相和沉积相是控制岩溶储层发育的物质基础
表生岩溶作用下, 灰岩的溶蚀能力较白云岩强; 在灰岩中, 颗粒灰岩的溶蚀能力大于泥晶灰岩; 在白云岩中, 结晶粗大的白云岩的溶蚀能力又高于微晶白云岩。原生孔渗性较好的台缘高能相带的颗粒灰岩有利于埋藏条件下的流体流动, 从而有利于埋藏岩溶的进行; 白云岩在深埋条件下, 其溶蚀能力较其在浅埋和表生条件下有明显增强。塔中西部地区中下奥陶统鹰山组主要处于局限台地-开阔台地相带中, 其岩相构成以白云岩为主, 局部含有云质灰岩和灰岩; 上奥陶统良里塔格组, 相带分异比

较明显,既有台地边缘高能礁滩相带颗粒灰岩和礁灰岩,也有开阔台地相泥晶灰岩。良里塔格组颗粒灰岩和鹰山组结晶白云岩溶蚀性强。

2.2 同生岩溶、风化壳岩溶作用控制了岩溶储层发育的层位和区带

同生岩溶大气成岩透镜体沿塔中 I 号坡折带的良里塔格组台地边缘相带集中分布,在塔中 12 井、塔中 15 井、塔中 161 井、塔中 162 井、塔中 24 井、塔中 30 井、塔中 42 井、塔中 44 井、塔中 45 井中至少发育 1~4 个。顺 2 井钻遇的良里塔格组碳酸盐岩共发育六个大气成岩透镜体。

风化壳岩溶受不同级别的不整合面控制,不同级别的不整合面控制了不同性质的岩溶作用。一、二级层序界面相对应的区域不整合面,由于暴露时间长,影响范围大,发生大规模的风化壳岩溶;低级别的高频层序界面导致了台缘高能相带的周期性暴露而形成多期次的与高频层序界面相对应的同生期岩溶作用;在蒸发台地边缘的潮坪环境中,高频的海平面下降可导致膏、盐薄层或团块发生同生期溶解而形成溶蚀孔洞。这些不同级别的层序界面,在后期的埋藏过程中,也是地层流体流动的主要通道,有利于埋藏条件下岩溶作用的发生。同生岩溶作用和风化壳岩溶作用形成了岩溶型储层的基本储集空间。

塔中地区奥陶系发育有加里东中期、加里东晚期、海西早期等一、二级不整合面,控制了该区的主要风化壳岩溶发育阶段(张振生, 2002)。此外,其间的众多三级和高级层序界面,是发生多期次岩溶发育的重要条件。通常岩溶高地的岩溶发育强度大,但充填也严重,故对岩溶储层的形成并不十分有利。岩溶斜坡和斜坡上的丘陵地带,既有较发育的渗流带,同时潜流带的流动条件好,是岩溶储层发育的最有利区带。岩溶谷地的充填作用严重,故对发育岩溶储层也不利。塔中西部既有岩溶高地、也有岩溶斜坡和丘陵,还有岩溶谷地,这些不同的地貌单元,控制着岩溶发育。塔中 II 号构造带北部区域,加里东中期为宽缓的岩溶斜坡发育区,其上还发育有加里东中期北北西向展布的古地貌高带和加里东晚期北西向展布的古地貌高带,构成了岩溶斜坡发育带,全带发育加里东中期 I 幕风化壳型岩溶。中 1 井区局部发育加里东中期 II 幕风化壳型岩溶,储集体形态以多层段、似层状分布为主,中 1 井揭示了在 5350~5581 m 井段发育 3 套储层的特点。

2.3 构造裂缝、埋藏岩溶作用是形成优质岩溶储层的关键

大量的钻井岩芯和测井裂缝发育与岩溶关系的统计发现,裂缝与岩溶的发育具有很好的对应关系,即裂缝发育带常是岩溶发育带。不整合面下高角度裂缝的发育对古风化壳岩溶具有重要的控制作用,而低角度裂缝通常又与埋藏岩溶发育带有很好的 consistency。裂缝对岩溶发育有促进作用(刘忠宝, 2007)。

碳酸盐岩埋藏过程中的温度、压力、流体性质(地层流体或深部热液)、烃类运移等条件,不仅可使碳酸盐岩在埋藏条件下发生溶解作用,同时也直接关系到早期形成的岩溶孔洞在埋藏条件下能否得以保存。若埋藏以后的环境条件对碳酸盐矿物是有利于溶解的,则不仅原有的溶蚀孔洞可得以保存,还可形成新的埋藏期溶蚀孔洞。反之,若埋藏条件下对碳酸盐岩矿物是过饱和的,则会有碳酸盐矿物的沉淀析出,如果发生,即使表生期发育很好的岩溶孔洞都会在埋藏期被充填而失去其储集有效性。

沿塔中 I 号构造带距 I 号断层越近,裂缝越发育,顺 2 井高角度缝发育、裂缝线密度值高,主要是因为距顺 2 井不足 1 km 处有断层发育。塔中 II 号断裂也表现出越近裂缝越发育,如塔中 17、塔中 19 等。另外,小级别断层也会促进裂缝发育,如中 12 井。印支—喜山期、海西期构造破裂及埋藏岩溶作用对礁滩型储层进一步改善,即裂缝将溶蚀孔洞进一步沟通。

3 结论

①塔中西部奥陶系存在三种类型岩溶作用,包括同生岩溶、风化壳岩溶和埋藏岩溶。岩相和沉积相是控制岩溶储层发育的物质基础;同生岩溶、风化壳岩溶作用控制岩溶储层发育的层位和区带;构造裂缝、埋藏岩溶作用是形成优质岩溶储层的关键。下奥陶统鹰山组以风化壳岩溶和埋藏岩溶为主,上奥陶统良里塔格组以同生岩溶发育为主。

②加里东中期 I 幕风化壳型岩溶主要分布在中奥陶统一间房组、上奥陶统恰尔巴克组缺失的区域,卡塔克隆起核部均有分布;加里东中期 II 幕分布于桑塔木组缺失的部分,中 1 井区及塔中 II 号构造带发育;海西期风化壳岩溶发育的区域为塔中 II 号构造带。塔中 I 号坡折带礁滩复合体同生岩溶作用发育,形成了多层大气成岩透镜体。印支喜山期、海西期构造破裂及埋藏岩溶发育,对同生岩溶、风化壳岩溶有改造作用。

致谢: 本文在研究过程中, 得到许志琴院士、董树文研究员、陈景山教授、李海兵研究员及中原油田欧阳睿高级工程师的帮助, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 陈景山, 李忠, 王振宇, 谭秀成, 李凌, 马青. 2007. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. 沉积学报, 25(6): 858-868.
- 陈景山, 王振宇, 代宗仰, 马青, 蒋裕强, 谭秀成. 1999. 塔中地区上奥陶统台地镶边体系分析[J]. 古地理学报, 1(2): 8-17.
- 樊太亮, 于炳松, 高志前. 2007. 里木盆地碳酸盐岩层序地层特征及其控油作用[J]. 现代地质, 21(1): 57-65.
- 顾家裕, 张兴阳, 罗平, 罗忠, 方辉. 2005. 塔里木盆地奥陶系台地边缘生物礁、滩发育特征[J]. 石油与天然气地质, 26(3): 276-283.
- 李振宏, 郑聪斌. 2004. 古岩溶演化过程及对油气储集空间的影响——以鄂尔多斯盆地奥陶系为例[J]. 天然气地球科学, 15(3): 247-252.
- 刘忠宝, 孙华, 于炳松, 樊太亮, 蒋宏忱. 2007. 裂缝对塔中奥陶系碳酸盐岩储集层岩溶发育的控制[J]. 新疆石油地质, 28(3): 289-291.
- 钱一雄, Conxita Taberner, 邹森林, 尤东华, 王蓉英. 2007. 碳酸盐岩表生岩溶与埋藏溶蚀比较——以塔北和塔中地区为例[J]. 海相油气地质, 12(2): 1-7.
- 夏日元, 唐建生, 邹胜章, 梁彬, 金新峰, 姚昕. 2006. 碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用[J]. 地球学报, 27(5): 503-509.
- 许效松, 杜佰伟. 2005. 碳酸盐岩地区古风化壳岩溶储层[J]. 沉积与特提斯地质, 25(3): 1-7.
- 袁道先, 章程. 2008. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报, 29(3): 355-365.
- 张振生, 李明杰, 刘社平. 2002. 塔中低凸起的形成和演化[J]. 石油勘探与开发, 29(1): 28-31.

References:

- BEAVINGTON-PENNEY S J, NADIN P, Clarke V Ed, MCQUILKEN J, BAILEY H W. 2008. Reservoir quality variation on an Eocene carbonate ramp, El Garia Formation, offshore Tunisia: Structural control of burial corrosion and dolomitisation[J]. Sedimentary Geology 209: 42-57.
- CHEN Jing-shan, LI Zhong, WANG Zhen-yu, TAN Xiu-cheng, LI Lin, MA Qing. 2007. Paleokarstification and reservoir distribution of Ordovician carbonates in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 25(6): 858-868 (in Chinese with English abstract).
- CHEN Jing-shan, WANG Zhen-yu, DAI Zong-yang, MA Qing, JIANG Yu-qiang, TAN Xiu-cheng. 1999. Study of the middle and upper Ordovician rimmed carbonate platform system in the Tazhong area, Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 1(2): 8-17 (in Chinese with English abstract).
- DAVIES G R, SMITH L B. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview[J]. American

- Association of Petroleum Geologists Bulletin. 90: 1641-1690.
- FAN Tai-liang, YU Bing-song, GAO Zhi-qian. 2007. Characteristics of Carbonate Sequence Stratigraphy and Its Control on Oil-gas in Tarim Basin[J]. Geoscience, 21(1): 57-65 (in Chinese with English abstract).
- GU Jia-yu, ZHANG Xing-yang, LUO Ping, LUO Zhong, FANG Hui. 2005. Development characteristics of organic reef-bank complex on Ordovician carbonate platform margin in Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology. 26(3): 276-283 (in Chinese with English abstract)
- JIN Zhi-jun, ZHU Dong-ya, HU Wen-xuan, ZHANG Xue-feng, ZHANG Jun-tao, SONG Yu-cai. 2009. Mesogenetic dissolution of the middle Ordovician limestone in the Tahe oilfield of Tarim basin, NW China[J]. Marine and Petroleum Geology. 26: 753-763.
- LI Zhen-hong, ZHENG Cong-bin. 2004. Evolution process of palaeokarst and influence to reservoir- A case for Ordovician of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 15(3):247-252 (in Chinese with English abstract).
- LIU Zhong-bao, SUN Hua, YU Bing-song, FAN Tai-liang, JIANG hong-cheng. 2007. The control of fractures on Karst in Ordovician carbonate reservoirs in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology. 28(3): 289-291 (in Chinese with English abstract).
- QIAN Yi-Xiong, Conxita Taberner, CHU Sen-lin, YOU Dong-hua, WANG Rong-ying. 2007. Diagenesis comparison between epigenetic karstification and burial dissolution in carbonate reservoirs--an instance of Ordovician carbonate reservoirs in Tabei and Tazhong regions, Tarim basin[J]. Marine Petroleum Geology 12(2), 1-7.
- VILASI N, MALANDAIN J, BARRIER L, CALLOT J, AM-ROUCH K, GUILHAUMOU N, LACOMBE O, MUSKA K, ROURE F, SWENNEN R. 2009. From Outcrop and Petrographic Studies to Basin-Scale Fluid Flow Modelling: The Use of the Albanian Natural Laboratory for Carbonate Reservoir Characterisation[J]. Tectonophysics, 1-62.
- XIA Ri-yuan, TANG Jian-sheng, ZOU Sheng-zhang, LIANG Bin, JIN Xin-feng, YAO Xin. 2006. Palaeo-karst Research of the Carbonate Oil-gas Field and Its Application to Oil- Gas Exploration and Development[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(5): 503-509(in Chinese with English abstract).
- XU Xiao-song, DU Bai-wei. 2005. The palaeoweathering crust-type karst reservoir rocks in carbonate rocks[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 25(3):1-7(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian, ZHANG Cheng. 2008. Karst Dynamics Theory in China and its Practice[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(3): 355-365(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhen-sheng, LI Min-jie, LIU She-ping. 2002. Generation and evolution of Tazhong low uplift[J]. Petroleum Exploration and Development, 29(1): 28-31(in Chinese with English abstract).