

## 油气田古地貌恢复方法研究进展

赵永刚<sup>1</sup>, 王东旭<sup>2,3</sup>, 冯强汉<sup>4</sup>, 张栋梁<sup>5</sup>, 王少飞<sup>2,3</sup>, 冯永玖<sup>2,3</sup>, 付晓燕<sup>2,3</sup>, 南喜祥<sup>6</sup>

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 3. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 4. 中国石油长庆油田分公司第三采气厂, 内蒙古 乌审旗 017300; 5. 中国石油长庆油田分公司第九采油厂, 宁夏 银川 750006; 6. 中国石油集团测井有限公司青海事业部, 甘肃 敦煌 736202)

**摘要:** 目前已在较广的学科范围及其领域内应用到古地貌研究成果, 古地貌恢复更是与油气田勘探开发关系密切。随着石油工业的快速发展, 油气田古地貌恢复方法的研究有了比较明显的进展。通过分析近些年兴起的代表性古地貌恢复方法, 总结中国油气田古地貌恢复方法研究的主要进展。

① 古地貌恢复方法的理论基础多元化: 分析古构造、古水系、古流向和沉积相等的综合性研究是沉积学古地貌恢复法的关键所在; 将基准面和最大洪泛面结合进行基准面旋回对比来反映沉积前古地貌形态, 是高分辨率层序地层学古地貌恢复法的核心思路; 依据三级地貌概念模式指导微地貌精细刻画, 是井区尺度岩溶微地貌恢复法的主要优势; 碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法的主要原则是寻找等时地质体, 确定台地浅滩的暴露时间, 利用颗粒岩的厚度对暴露浅滩的微地貌进行有效恢复。② 古地貌恢复方法的实用性越来越强: 鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、塔里木盆地和四川盆地的油气田实例说明, 虽然在采用这些古地貌恢复方法时, 定量研究的手段均有待加强, 但仍然为油气田储层预测和油气富集有利区优选提供了重要支撑, 其应用前景广阔。③ 古地貌恢复方法之间优势互补, 趋于综合研究: 沉积学古地貌恢复法目前应用比较成熟; 高分辨率层序地层学古地貌恢复法的研究工作处于起步阶段; 井区尺度岩溶微地貌恢复法适合于潮坪为主的碳酸盐岩台地; 碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法适用于滩体发育的碳酸盐岩台地。不同方法的综合研究是油气田古地貌恢复方法发展的必然趋势。

**关键词:** 古地貌; 恢复方法; 沉积学; 高分辨率层序地层学; 井区尺度; 沉积期; 油气田

**中图分类号:** P931; P531 **文献标志码:** A

## Review on Palaeomorphologic Reconstruction Methods in Oil and Gas Fields

ZHAO Yong-gang<sup>1</sup>, WANG Dong-xu<sup>2,3</sup>, FENG Qiang-han<sup>4</sup>, ZHANG Dong-liang<sup>5</sup>,  
WANG Shao-fei<sup>2,3</sup>, FENG Yong-jiu<sup>2,3</sup>, FU Xiao-yan<sup>2,3</sup>, NAN Xi-xiang<sup>6</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-permeability Oil and Gas Fields, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 4. No. 3 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Wushen Banner 017300, Inner Mongolia, China; 5. No. 9 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Yinchuan 750006, Ningxia, China; 6. Qinghai Business Division, Logging Co., Ltd., CNPC, Dunhuang 736202, Gansu, China)

**Abstract:** At present, the paleogeomorphology has been widely used in many subjects and their

收稿日期: 2017-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372118, 61401355); 国家科技重大专项项目(2011ZX05044-3); 中国石油科技创新基金项目(2011D-5006-0103)

作者简介: 赵永刚(1976-), 男, 甘肃泾川人, 副教授, 工学博士, E-mail: yg\_zhao@126.com。

application fields. Paleogeomorphologic reconstruction has close relations with exploration and development of oil and gas fields. With the rapid development of petroleum industry, the study on palaeomorphologic reconstruction methods has relatively obvious progresses in oil and gas fields. These representative new palaeomorphologic reconstruction methods in recent years were analyzed, and the main research progresses in oil and gas fields of China were summarized. ① The theoretical basis of palaeomorphologic reconstruction methods is diversified. Firstly, the key of sedimentology paleogeomorphic reconstruction method is the comprehensive study on paleostructure, paleo-drainage-system, paleocurrent direction, sedimentary facies, etc.; secondly, the core thought of high resolution sequence stratigraphy reconstruction method is to reflect the palaeogeomorphic form of pre-depositional stage by means of base-level cycle correlation based on the combination of base-level and maximum flood flooding surface; thirdly, the karst microtopography reconstruction method of well area scale has an obvious advantage, which is that the conceptual model of three-level paleogeomorphology could guide fine characterization of microtopography; fourthly, the main principle of carbonate rock microtopography reconstruction method on the depositional stage is choosing the isochronous geologic body, confirming platform shoal exposed time and effectively reconstructing microtopography of exposed shoal by means of grainstone gross-thickness. ② The practicability of palaeomorphologic reconstruction methods is better and better. Examples of application in Ordos Basin, Bohai Bay Basin, Tarim Basin and Sichuan Basin illustrate that they can provide an important support for the reservoir prediction and favorable area optimization, while the ways of quantitative research are relatively poor. These methods still have broad application prospects in oil and gas fields. ③ Complementary advantages exist among palaeomorphologic reconstruction methods, while they have a trend to comprehensive research. Sedimentary paleogeomorphic reconstruction method is one of relatively mature methods in its application field at present; the research work of high resolution sequence stratigraphy reconstruction method is yet at its beginning stage; karst microtopography reconstruction method of well area scale is well applied to the carbonate platform of tidal flat development; carbonate rock microtopography reconstruction method is appropriate for the carbonate platform with the development of beach body. The comprehensive study of different reconstruction methods is an inevitable trend for palaeomorphologic reconstruction in oil and gas fields.

**Key words:** palaeomorphology; reconstruction method; sedimentology; high resolution sequence stratigraphy; well area scale; depositional stage; oil and gas fields

## 0 引言

地貌就是地球表面的形态。地貌学作为地球科学中介于自然地理学和地质学间的一门边缘科学,主要研究地表的形态、成因、分布及其发育规律<sup>[1]</sup>。古地貌恢复目前已经成为地貌学研究的重要领域之一。古地貌是地史时期的地表形态,绝大多数目前已经消失,部分残缺不全,或埋藏于地下或出露于地表,因此,古地貌恢复难度大,研究进展缓慢。近年来,随着石油工业的快速发展,带动了石油地质理论与技术创新,油气田古地貌恢复方法的研究也随之取得了较明显的进展。本文立足于油气田实

例,在回顾油气田古地貌恢复历程及方法的基础上,通过分析近年来出现的备受关注的油气田古地貌恢复方法,得出中国油气田古地貌恢复方法研究的一些主要进展。

## 1 油气田古地貌恢复的历程及方法

国外古地貌研究起步于20世纪50年代,将古地貌与油气勘探直接联系起来的论述首见于Thornpurpy 1954年发表的《石油勘探中地貌学的运用》一书中<sup>[2]</sup>。该著作着重从潜伏喀斯特地形、带状砂和交角不整合等方面,探讨了油气聚集中不整合侵蚀面的重要作用。目前已在较广的学科范围及其

领域内应用到古地貌研究成果<sup>[3-9]</sup>。中国真正重视油气田古地貌开始于20世纪70年代中后期,主要是将古地貌研究与油气田勘探开发紧密联系起来,近些年发展迅速,涌现出一批代表性成果。如鄂尔多斯盆地前侏罗纪古地貌研究<sup>[2,10-18]</sup>、石炭纪古地理格局及古地貌单元研究<sup>[19]</sup>、奥陶系碳酸盐岩气田的发现及古地貌研究<sup>[20-31]</sup>、渤海湾盆地碳酸盐岩古潜山地貌研究<sup>[32-35]</sup>、古近纪沉积期古地貌研究<sup>[36-42]</sup>、塔里木盆地塔河油田奥陶系古地貌研究<sup>[43-49]</sup>、塔河油田石炭系古地貌分析<sup>[50]</sup>、塔中地区奥陶系古地貌研究<sup>[51-55]</sup>、塔北地区奥陶纪岩溶古地貌刻画<sup>[56-58]</sup>、四川盆地内与区域不整合有关的古地貌恢复研究<sup>[59-67]</sup>、沉积期微古地貌恢复研究<sup>[68-69]</sup>等。从油气田实例看,中国油气田古地貌恢复工作的重要进展是确定了研究工作的核心内容是恢复古地貌形态和划分古地貌单元,其次是分析古地貌与沉积体系、层序地层、储层及油气藏分布的关系,并将油气富集区的有效预测与特定的古地貌单元联系起来<sup>[12-18,28,31]</sup>,从而丰富了中国的油气成藏模式<sup>[16]</sup>。

目前流行于国内外的古地貌恢复方法概括起来主要有:印模法<sup>[13,17,21,56,59]</sup>、残余厚度法<sup>[22]</sup>、填平补齐法<sup>[28]</sup>、层拉平法<sup>[24,40,47]</sup>、沉积学分析法<sup>[12,16]</sup>、误差模拟法<sup>[46]</sup>、层序地层学古地貌恢复法(包括高分辨率层序地层学古地貌恢复法)<sup>[19,34,44,48,70]</sup>、回剥法<sup>[71]</sup>、井震联合恢复法<sup>[26-27,39,42,52]</sup>和碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法<sup>[68-69]</sup>等。研究人员通常是将几种方法组合来恢复古地貌<sup>[14-16,18,25-27,29,35,46,51,53,60,63-64,72-74]</sup>。早期广泛应用的古地貌恢复方法都是比较传统和经典,例如残余厚度法、印模法和填平补齐法等。古地貌恢复实践中,研究人员往往重视残余厚度和印模厚度,机械地遵循“填平补齐”原则,使古地貌恢复变得简单且便于操作,但也带来了明显问题,即图叠图误差大致使古地貌恢复的精度低,如果遇到地层剥蚀严重的情况,基本上束手无策。沉积学古地貌恢复法、高分辨率层序地层学古地貌恢复法、井区尺度岩溶微地貌恢复法及碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法是近年来兴起的古地貌恢复方法。

## 2 古地貌恢复方法研究进展

沉积学古地貌恢复法、高分辨率层序地层学古地貌恢复法、井区尺度岩溶微地貌恢复法及碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法由于基于沉积学的综合性研究,具有等时意义的基准面旋回对比,建立三级地貌概念模式及碳酸盐岩台地滩体迁移变化,使其在古

地貌恢复中表现出自己的特色,并具有明显的技术优势,从而受到广泛关注。笔者通过分析这些主要古地貌恢复方法的理论基础、应用实例和存在问题等,得出中国油气田古地貌恢复方法研究的一些具体进展。

### 2.1 沉积学古地貌恢复法

沉积学是研究沉积物、沉积过程、沉积岩和沉积环境的科学<sup>[75]</sup>。实践证明,沉积环境分析基本上就是古地貌学研究的核心内容之一<sup>[76]</sup>,但事实上,在传统的古地貌恢复中,研究人员往往忽略沉积学的综合性研究。目前,研究人员已经意识到从沉积学入手是恢复古地貌的一个重要途径。

#### 2.1.1 理论基础

沉积学古地貌恢复法就是利用各种基本的地质图件(主要包括沉积前的古地质图、地层厚度等值线图、砂岩厚度等值线图、岩相古地理图等,这些图件是互相补充、相互修正完善的),并通过开展古构造、古水系、古流向和沉积相等的综合性研究,从而达到认识沉积前古地貌形态的目的<sup>[12]</sup>。

该方法恢复古地貌的主要工作内容包括:利用古地质图件,从区域上了解研究区的古地形,明确各地区的剥蚀程度,并确定其古构造格局;在认识该地区古构造格局及发育特点的基础上,判断构造沉降区和抬升区的分布位置;认识该地区地层发育和分布特点及沉积体系在时空的配置演化规律;根据该地区沉积相的研究成果恢复古环境,分析古地貌;该地区古地形特征的研究主要借助于古流向的研究及物源的综合分析;最终确定出剥蚀区和沉积区在当时的分布位置及大致范围,并通过对沉积体系背景及发育状况的了解,判别当时该地区沉积体系的具体类型、特点与水动力特征,同时对该地区地层的时空配置关系和地形总体式样也会有比较清楚的认识<sup>[12,77]</sup>。

#### 2.1.2 应用实例

该方法恢复古地貌的基本流程:利用沉积相标志及韵律大致确定古地貌类型;录井、测井技术相结合,综合分析古侵蚀面特征;利用古水系预测法等地质分析方法,精细落实古地貌形态;利用三维地质建模手段,重塑古地貌形态。

赵俊兴等在恢复鄂尔多斯盆地前侏罗纪古地貌的同时,揭示了该盆地侏罗纪沉积前的古地貌特征,主要应用了沉积学原理及其分析方法<sup>[12]</sup>。该盆地侏罗纪沉积前总体显现为西高、中陷和东缓的向东及东南方向开口的似盆状构造式样的古地形地貌特

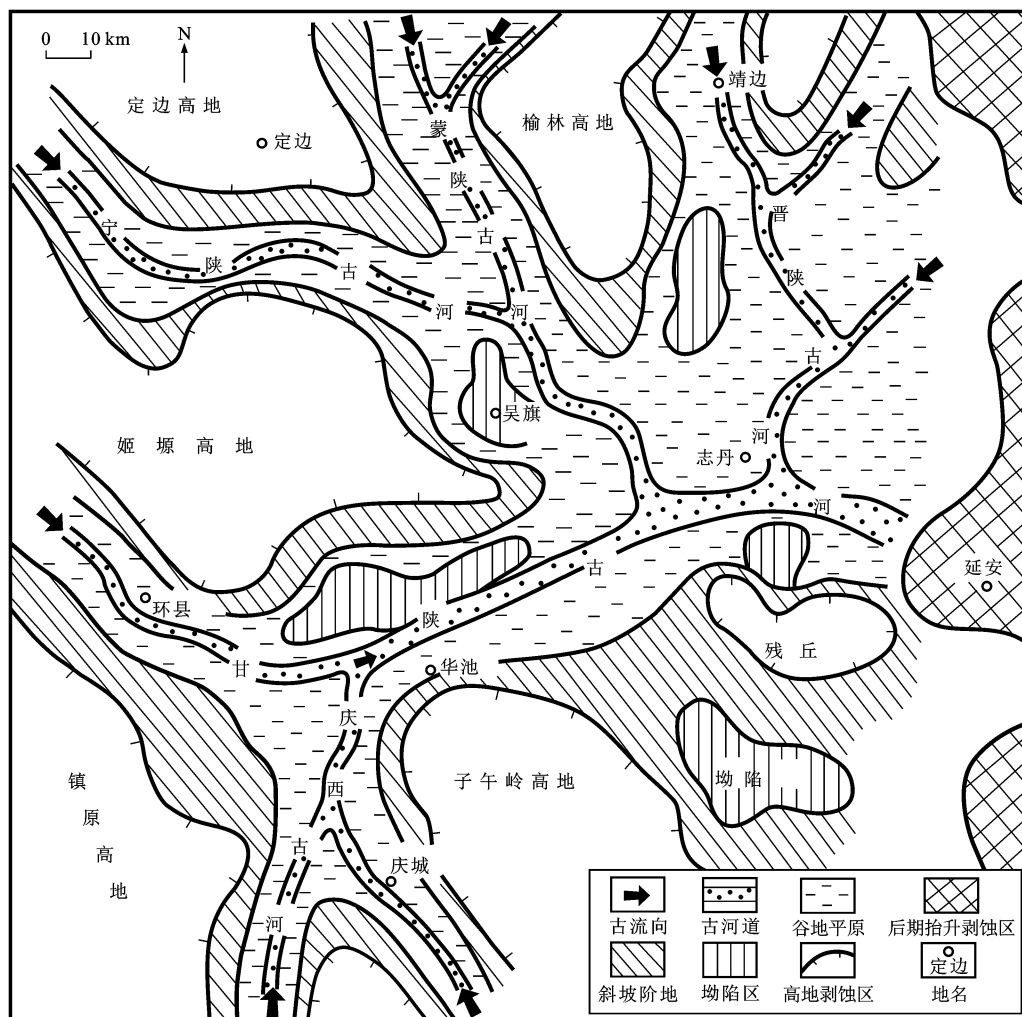
征;该盆地划分出古河道、斜坡阶地区、谷地平原区、拗陷区和高地剥蚀区等地貌单元类型(图1)。同时,通过对该盆地前侏罗纪古地貌特征与下侏罗统沉积相分布及侏罗系油藏分布关系的研究,赵俊兴等探讨了沉积前古地貌对后期油藏的具体控制作用,认为古地貌不但控制了盆地地下侏罗统地层、沉积相和储盖组合特征,而且也影响甚至控制了该地区侏罗系油藏的分布<sup>[12]</sup>。

朱静等在分析区域构造背景、沉积地层发育特点及沉积背景的基础上,根据各层组砂岩厚度和地层厚度的变化趋势,通过获取关键性参数(如古流向、古地形高差、坡度等),参考地震剖面,利用印模法、残余厚度法和沉积学分析法综合恢复鄂尔多斯盆地陇东地区前侏罗纪古地貌<sup>[16]</sup>。其古地貌划分为侵蚀河谷(分为一、二、三级古河谷,其中三级古河谷不但使古地貌趋于复杂化,同时也影响着油气的

富集)、古隆起斜坡带(有合适的圈闭条件即可富集成藏)、古阶地(常与延长组裂缝系统一起构成石油的输导体系)、河间丘(侏罗系油藏分布的重点地区之一)、古高地。与赵俊兴等恢复古地貌的工作成果<sup>[12]</sup>相比,朱静等不但采用沉积学分析法恢复出鄂尔多斯盆地陇东地区前侏罗纪古地貌形态,而且首次做出其三维模拟还原图,使鄂尔多斯盆地前侏罗纪古地貌恢复工作更进一步,同时还总结出6类古地貌油藏成藏模式<sup>[16]</sup>。

### 2.1.3 存在问题

沉积学古地貌恢复法的定量化手段需要进一步加强,从而影响了古地貌的恢复精度;该方法能够实现相对古地貌恢复,但还做不到恢复绝对古地貌。恢复绝对古地貌时,恢复剥蚀厚度、脱压实校正及校正古水深等问题都属于需要解决的难题<sup>[39]</sup>,虽然可以利用指示古水深的生物或岩矿进行古水深校正,



图件引自文献[12],有所修改

图1 鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌

Fig. 1 Palaeogeomorphology of Ordos Basin Before Jurassic Deposition



但是沉积学古地貌恢复法由于定量研究的手段不足等,使剥蚀厚度恢复和脱压实校正等问题仍不能得到很好的解决。该方法虽然存在着上述不足与缺陷,但是它仍然是目前在油气田应用比较成熟的古地貌恢复方法之一。

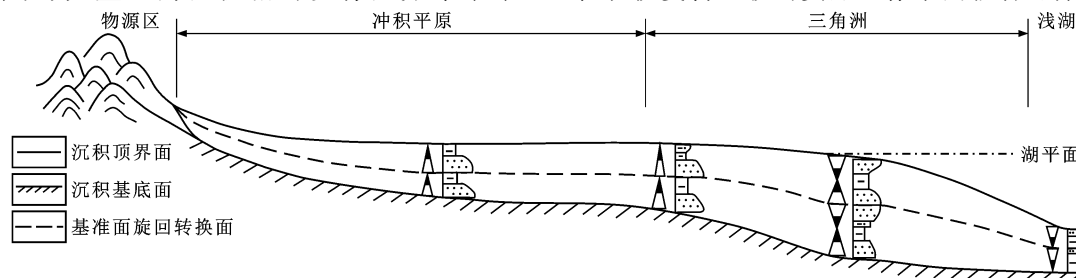
## 2.2 高分辨率层序地层学古地貌恢复法

高分辨率层序地层学(High Resolution Sequence Stratigraphy)分为传统高分辨率层序地层学和现代高分辨率层序地层学。“可容纳空间”、“相对海平面变化”、“强制性海退”等概念的提出,标志着传统高分辨率层序地层学的形成,层序和体系域划分精度的提高也缘于这些研究成果。但是,传统高分辨率层序地层学未能构成独立的理论体系,只是补充和完善了层序地层学理论体系<sup>[78]</sup>。Cross提出了现代高分辨率层序地层学,吸收并发展完善了Wheeler提出的基准面概念,将基准面视作高分辨率层序地层学的核心,地层基准面原理、体积分配原理、相分异原理和旋回等时对比法则共同构成了现代高分辨率层序地层学完整的理论体系。现代高分辨率层序地层学问世后立即受到油气地质工作者的广泛关注。以其理论和方法为指导,前人在油气勘探开发领域开展了多方面的研究工作,但总的来看,其应用大多局限于储层的精细对比方面<sup>[78]</sup>。高分辨率层序地层学古地貌恢复法就是将基准面和最大洪泛面结合进行基准面旋回对比来反映沉积前古地貌形态。利用该方法恢复古地貌的研究工作目前处于起步阶段<sup>[70]</sup>,在一些地方进行了应用研究<sup>[19]</sup>。

### 2.2.1 理论基础

赵俊兴等从理论基础、技术方法(分单一沉积体系和多种沉积体系组合两种情况)及基准面旋回级次的选择等方面论证认为,高分辨率层序地层学古地貌恢复法能够得到某一基准面旋回沉积前的原始古地貌形态<sup>[70]</sup>,因此,该方法恢复古地貌是可行的。

通常认为,盆地内沉积相的发育及分布常常



图件引自文献<sup>[70]</sup>,有所修改

图2 冲积平原(河流)-三角洲-浅湖沉积体系基准面形态与沉积物响应关系

Fig. 2 Base-level Shape and Depositional Characteristics of a System of Alluvial Plain(River)-delta-shallow Lake

受控于沉积前古地貌。对沉积地层进行高分辨率的等时地层对比是可以通过由基准面旋回变化所控制的地层单元结构类型、叠加式样及其在基准面旋回中所处的位置与沉积动力学关系等方面来进行的,因此,利用该方法进行沉积前古地貌恢复是建立在确定等时基准面的基础上的。利用该方法恢复沉积前古地貌时,虽然基准面作为其参考界面,但是对比时所使用的基准面旋回级次应针对研究需要来具体选择<sup>[70]</sup>。

该方法恢复古地貌的首要工作就是对比参照面的选择。沉积盆地中的等时基准面一般都是连续光滑曲面。不同地方的曲率大小不同,这是因为它们处于不同的沉积体系中。可以以基准面作为对比参照面来恢复出下伏地层沉积前的原始古地貌形态(图2)<sup>[70]</sup>;在实际的地层等时对比中,具有更好的实际操作性的参照面通常是最大洪泛面,因此,该方法的技术关键是等时性基准面与最大洪泛面结合进行地层对比来反映沉积前古地貌形态<sup>[77]</sup>;应用该方法恢复古地貌过程中,还应考虑压实作用影响,主要是为了提高恢复精度,目前多使用压实率系数进行原始沉积厚度的校正。

### 2.2.2 应用实例

吴贤顺等以鄂尔多斯盆地为例,从高分辨率层序地层学角度研究了层序地层中古地貌对储层发育的影响,分析了随基准面旋回的变化而对不同类型储层发育能够产生影响的主要古地貌类型(古凸起和下切沟谷)<sup>[19]</sup>。古凸起和下切沟谷之所以对储层预测和识别具有明显的指导作用,主要是由于这些古地貌类型在基准面变化的不同时期对沉积物的体积分配和相分异均产生过比较明显的影响<sup>[19]</sup>。

### 2.2.3 存在问题

基准面与最大洪泛面结合进行基准面旋回对比来反映沉积前古地貌形态是一个理想的研究思路,但在恢复古地貌的实际工作中面临着可操作性不尽

如人意,开展工作难度相对较大的诸多问题。将沉积学分析法与高分辨率层序地层学古地貌恢复法组合恢复油气田古地貌让研究人员看到了新的希望。

## 2.3 井区尺度岩溶微地貌恢复法

### 2.3.1 理论基础

应用现代岩溶理论,在恢复二级地貌的基础上,根据地貌组合形态对三级地貌进行精细刻画,是恢复研究碳酸盐岩岩溶微地貌的主要方法<sup>[56]</sup>。就规模而言,含油气盆地碳酸盐岩岩溶古地貌恢复有盆地、油气田和井区3个尺度。盆地尺度岩溶古地貌恢复以鄂尔多斯盆地和四川盆地已有成果具有代表性<sup>[21,23-26,29,43,60,63,66]</sup>,油气田尺度岩溶古地貌恢复也不乏实例<sup>[22,27-31,35,46,49-50,69]</sup>,而井区尺度岩溶微地貌恢复正处于探索之中<sup>[44,47,56-57]</sup>。虽然“应用现代岩溶理论,在恢复二级地貌的基础上,根据地貌组合形态对三级地貌进行精细刻画”这一思路仍然适用于井区尺度岩溶微地貌的恢复,但是井区尺度岩溶微地貌恢复由于工区面积小,以开发井为主,探井少及要求恢复的精度高等诸多因素的影响,使其古地貌恢复工作不能完全按照盆地或油气田尺度古地貌恢复的思路和研究流程进行。笔者在恢复井区尺度岩溶微地貌的实践中发现,“根据地貌组合形态对三级地貌进行精细刻画”实际上恢复微地貌的精度很低,原因是所参考的地貌组合形态属于“现代岩溶地貌”的范畴,与所要恢复井区实际的微地貌组合形态有着较大差异。笔者曾针对鄂尔多斯盆地苏里格气田桃2井区马家沟组五段,尝试利用“比较岩溶地质学”观点,“古今结合”建立三级地貌概念模式,指导岩溶微地貌的精细刻画,从而较高精度地恢复了井区尺度岩溶微地貌。

### 2.3.2 应用实例

碳酸盐岩台地泛指以碳酸盐岩沉积为主、地形较平坦的浅水沉积环境。鄂尔多斯盆地苏里格气田桃2井区马家沟组五段碳酸盐岩台地以潮坪发育为特色,滩体较少见到。结合沉积相与岩溶地貌来看,该井区奥陶系古地貌属于潮坪岩溶地貌。应用“残余厚度法+印模法”恢复该井区奥陶系古地貌基本形态;确定岩溶古地貌单元划分的定量指标;建立三级古地貌发育的概念模式;重点表征三级古地貌分布特征。桃2井区奥陶系二级地貌主要属于岩溶斜坡,岩溶台地边缘(简称“溶台边缘”)仅分布于研究区西缘。二级地貌单元岩溶斜坡中主要识别出4种三级地貌类型,即坡地、残丘、洼地和支沟槽。依据研究区前石炭纪古地质图及古地貌单元划分的地质

依据,主要洼地分布线近似呈“S”型将该井区分隔成东、西两部分。西部自工区西界至主要洼地分布线形成西部残丘群,且自溶台边缘向洼地分布线方向,残丘发育程度明显增加;东部同样形成东部残丘群,自工区东界向主要洼地分布线方向,残丘发育程度也明显增加。根据上述特征,建立了研究区奥陶系岩溶斜坡中三级地貌发育的概念模式(图3)。在该模式的指导下,编制桃2井区奥陶系岩溶古地貌图,共识别出22处残丘、3处洼地和3处支沟槽,同时重点表征了岩溶微地貌残丘的分布特征。

### 2.3.3 存在问题

井区尺度岩溶微地貌恢复法虽然适合于潮坪发育且相对平坦的碳酸盐岩台地井区微地貌恢复,但是它首先要采用“残余厚度法+印模法”恢复古地貌基本形态,因此,编制残余厚度图和印模厚度图所选标志层是否为等时面及对两图叠合后的判识程度都直接影响到古地貌恢复的精度。

## 2.4 碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法

碳酸盐岩台地上地貌相对较高地区由于海水能量相对较高,就比较容易淘洗冲走灰泥,结果使得测井的自然伽马值相对较低;碳酸盐岩台地上地貌相对较低地区由于海水能量相对较低,就容易沉淀灰泥,使得自然伽马值相对较高;碳酸盐岩斜坡-盆地相区由于海水深而且平静,灰泥就更易于沉淀,使得自然伽马值相对碳酸盐岩台地相区要高得多。据此原理,利用测井曲线上的自然伽马平均值近似反映沉积期地貌差异,由此可以大致得到碳酸盐岩沉积期微地貌的地形起伏状况<sup>[68]</sup>。位于台地内部的微地貌高地处的储层质量要好于相对低洼的区域,海退期其暴露的几率往往比较高,因此,通过储层研究来反推沉积期微地貌形态就有很大的可能性<sup>[69]</sup>。这是目前研究碳酸盐岩沉积期微地貌的一种比较系统、实用的方法。

### 2.4.1 理论基础

陆表海碳酸盐岩台地以地形起伏较小为特征。虽然现今没有该类型碳酸盐台地发育的例证,但地质历史时期在克拉通盆地中该类型台地却特别发育。中国华北地台奥陶纪马家沟期、扬子地台震旦纪灯影期,北美地台寒武纪—奥陶纪,欧洲西部晚二叠世和三叠纪—侏罗纪,中东地区第三纪都曾发育典型的陆表海碳酸盐岩台地<sup>[79]</sup>。

陆表海碳酸盐岩台地内浪基面通常为几米,且台内水体扰动的深度也较浅;在相对的海退期,碳酸盐岩微地貌高地处多发育浅滩(台内滩),台内滩通

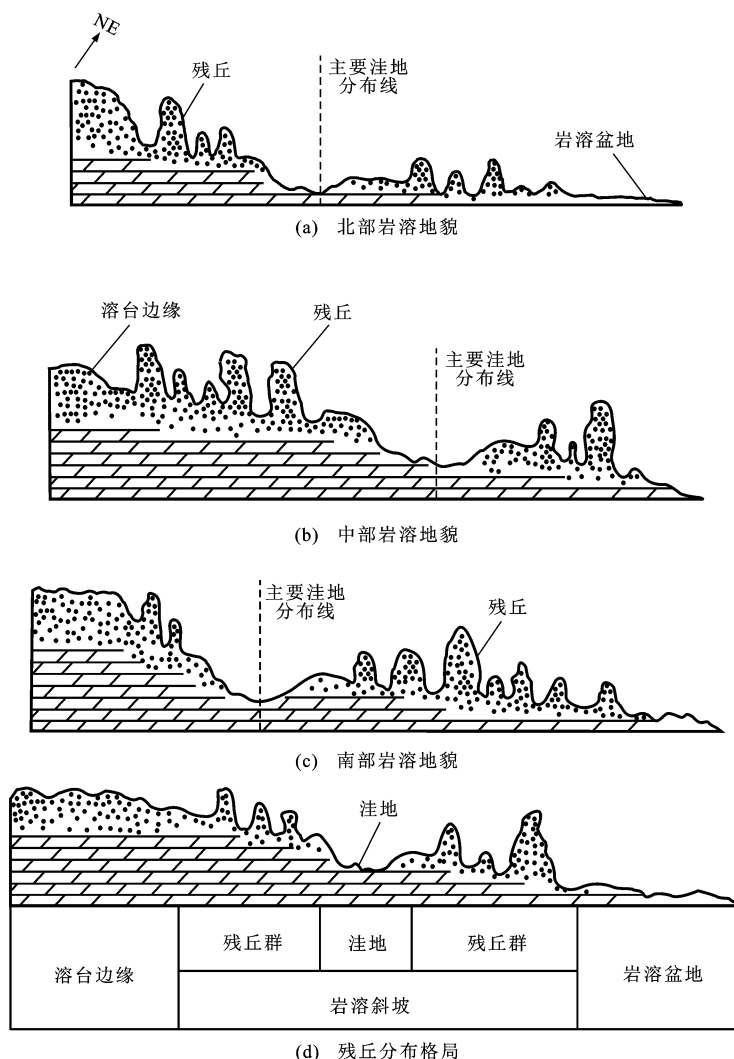


图3 桃2井区奥陶系三级岩溶地貌概念模式

Fig. 3 Conceptual Model of Ordovician Three-level Karst Paleogeomorphology in Tao2 Well Area

常处于浪基面之上<sup>[80]</sup>。台内滩的沉积速率一般高于台内其他微相<sup>[81]</sup>,从而使地貌差异变得较明显。因为明显的加积作用,台内滩沉积之后,在压实作用的影响下,碳酸盐颗粒容易形成明显的颗粒格架,滩体的压实率也就会低于细粒沉积体,导致不同微相的沉积厚度差异比较明显,从而造成地貌差异<sup>[82]</sup>,这也说明台地内部沉积期微地貌的有效恢复几乎可以不考虑压实校正。据此推断,陆表海碳酸盐岩台地内部某一时期由于滩体迁移变化所影响的颗粒岩厚度可比较有效地恢复其形成时的微地貌。

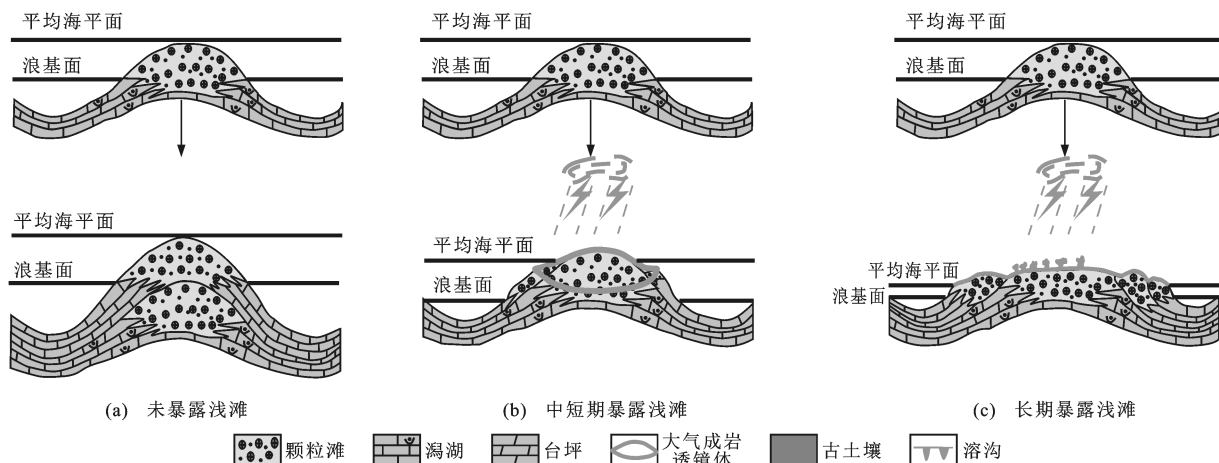
碳酸盐岩台地内部微地貌高地的浅滩(台内滩)通常属于未暴露的浅滩。较其他区域,该类浅滩区的沉积速率一般要大些,台内滩颗粒岩的厚度可以用来近似地反映微地貌的高低起伏[图4(a)]。就同生期暴露的浅滩而言,其主要包括中短期暴露浅滩和长期暴露浅滩。中短期暴露浅滩由于无明显的

岩溶标志,主要以选择性的颗粒内溶解孔隙和早期成岩形成的淡水胶结物为其主要的识别标志<sup>[83]</sup>;在相对的海退期,该类浅滩虽然向低地迁移运动,但其厚度一般小于微地貌高地处[图4(b)],而且因短期暴露而形成的大气成岩透镜体的厚度与浅滩厚度呈正相关关系。长期暴露浅滩以发育古土壤和不规则溶沟、溶缝为典型特征<sup>[83]</sup>;碳酸盐岩浅滩在相对海退期也向低地迁移,微地貌高地处的颗粒岩厚度一般都小于低洼处,而大气成岩透镜体的厚度与该类浅滩的厚度不呈现正相关关系[图4(c)]。因此,确定台内滩的暴露时间就成为利用浅滩厚度恢复陆表海碳酸盐岩台地内部微地貌的关键。

#### 2.4.2 应用实例

利用颗粒岩厚度在陆表海碳酸盐岩台地内部可对暴露期浅滩的微地貌进行有效恢复,但关键是要通过精细的宏观、微观分析寻找符合条件的等时地





图件引自文献[69],有所修改

图4 暴露浅滩叠置迁移模式

Fig. 4 Superposed Migration Patterns of Exposed Shallow

质体。具体流程为:等时地质体的选择以颗粒岩沉积体为主;明确储层发育形成的原因;确定浅滩(台内滩)暴露的时间;有效恢复沉积期的微地貌;应用与检验研究结果。谭秀成等以四川盆地磨溪气田下三叠统嘉陵江组嘉<sup>2</sup>亚段A层为例,利用丰富的钻孔取芯资料进行了陆表海碳酸盐岩台地内部沉积期微地貌恢复研究,取得了良好效果<sup>[69]</sup>。

#### 2.4.3 存在问题

碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法虽然有实用性,但是适用于滩体发育的碳酸盐岩台地就暴露出了它的局限性。因此,它不能取代基于“残余厚度法+印模法”及“比较岩溶地质学”的井区尺度岩溶微地貌恢复法。

井区尺度岩溶微地貌恢复法与碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法结合研究是系统恢复碳酸盐岩台地微地貌的重要手段。

### 3 结 语

(1)鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、塔里木盆地和四川盆地油气田古地貌恢复采用的方法主要有:印模法、残余厚度法、填平补齐法、层拉平法、沉积学分析法、回剥法、误差模拟法、层序地层学恢复法、井震联合恢复法、井区尺度岩溶微地貌恢复法和碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法等。“残余厚度法+印模法”恢复古地貌较为常见,与井震联合恢复法结合的趋势越来越明显。虽然井区尺度岩溶微地貌恢复法和碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法的研究难度较大,但近些年已有明显的进步。

(2)井区尺度岩溶微地貌恢复法由于考虑到工

区面积小,以开发井为主,探井少及要求恢复的精度高等诸多因素,建立三级地貌概念模式指导岩溶微地貌的精细刻画,势必能够提高井区碳酸盐岩台地潮坪岩溶微地貌的恢复精度。碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法主要是针对陆表海碳酸盐岩台地沉积期微地貌起伏差异小、难于确定的问题,从分析沉积期微地貌控制浅滩储层发育及分布状况入手,通过对台内浅滩储层研究,推测微古地貌起伏。该方法适用于老资料多,缺乏三孔隙度测井的盆地老区,对于碳酸盐岩台内浅滩储层的预测及其老层挖潜也具有重要的参考意义。因此,这两种古地貌恢复方法在碳酸盐岩油气田具有广阔的应用前景。

(3)沉积学古地貌恢复法是一项综合研究方法,以扎实的沉积学分析为基础,同时考虑古构造发育特点,需要的基本地质图件类型多;高分辨率层序地层学古地貌恢复法的关键是将基准面和最大洪泛面结合进行基准面旋回对比,但是确定对比参照面的起伏形态仍然要通过运用沉积学方法分析沉积体系来实现。沉积学分析法与高分辨率层序地层学古地貌恢复法组合是油气田古地貌恢复的必然趋势之一。井区尺度岩溶微地貌恢复法与碳酸盐岩沉积期微地貌恢复法相结合必然会进一步提高碳酸盐岩台地微地貌恢复精度。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 杨景春,李有利.地貌学原理[M].3版.北京:北京大学出版社,2012.  
YANG Jing-chun, LI You-li. Principle of Geomorphology [M]. 3rd ed. Beijing: Peking University



- Press, 2012.
- [2] 杨俊杰, 张伯荣, 曾正全. 陕甘宁盆地侏罗系古地貌油田的油藏序列及勘探方法[J]. 大庆石油地质与开发, 1984, 3(1): 74-84.
- YANG Jun-jie, ZHANG Bo-rong, ZENG Zheng-quan. Oil Pool Sequence and Exploration Methods of Jurassic Paleogeomorphologic Oil Fields in Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 1984, 3(1): 74-84.
- [3] MARTIN R. Paleogeomorphology and Its Application to Exploration for Oil and Gas[J]. AAPG Bulletin, 1966, 50(10): 2277-2311.
- [4] CARR T R, ANDERSON N L, FRANSEEN E K. Paleogeomorphology of the Upper Arbuckle Karst Surface; Implications for Reservoir and Trap Development in Kansas[R]. Tulsa: AAPG, 1994.
- [5] BRECKENRIDGE R M, OTHBERG K L, BUSH J H. Stratigraphy and Paleogeomorphology of Columbia River Basalt, Eastern Margin of the Columbia River Plateau[J]. Geological Society of America, Abstracts with Programs, 1997, 29(5): 6.
- [6] HOUSE M A, WERNICKE B P, FARLEY K A. Paleogeomorphology of the Central and Southern Sierra Nevada; Further Insights from Apatite (U-Th)/He Ages[J]. Geological Society of America, Abstracts with Programs, 1999, 31(7): 481-482.
- [7] TONY J T. Reservoir Characterization, Paleoenvironment, and Paleogeomorphology of the Mississippian Redwall Limestone Paleokarst, Hualapai Indian Reservation, Grand Canyon Area, Arizona [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1875.
- [8] FORD D C, WHITE W B. Perspectives on Karst Geomorphology, Hydrology, and Geochemistry[M]. Boulder: Geological Society of America, 2006.
- [9] FORD D, WILLIAMS P. Karst Hydrogeology and Geomorphology [M]. New York: John Wiley and Sons, 2007.
- [10] 黄第藩, 王则民, 石国世, 等. 陕甘宁地区印支期古地貌特征及其石油地质意义[J]. 石油学报, 1981, 2(2): 1-10.
- HUANG Di-fan, WANG Ze-min, SHI Guo-shi, et al. Paleogeomorphologic Features of Shaan-Gan-Ning District During the Indochinese Stage and Its Significance to Petroleum Geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 1981, 2(2): 1-10.
- [11] 郭正权, 潘令红, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系古地貌油田形成条件与分布规律[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 20-27.
- GUO Zheng-quan, PAN Ling-hong, LIU Xian-yang, et al. Formation Conditions and Distribution Law of Jurassic Paleogeomorphology Oil Field in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2001, 6(4): 20-27.
- [12] 赵俊兴, 陈洪德, 时志强, 等. 古地貌恢复技术方法及其研究意义: 以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(3): 260-266.
- ZHAO Jun-xing, CHEN Hong-de, SHI Zhi-qiang, et al. The Way and Implications of Rebuilding Palaeogeomorphology: Taking the Research of Palaeogeomorphology of the Ordos Basin Before Jurassic Deposition as Example [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(3): 260-266.
- [13] 宋凯, 吕剑文, 凌升阶, 等. 鄂尔多斯盆地定边—吴旗地区前侏罗纪古地貌与油藏[J]. 古地理学报, 2003, 5(4): 497-507.
- SONG Kai, LU Jian-wen, LING Sheng-jie, et al. Palaeogeomorphic Features of the Pre-Jurassic and Oil Reservoir of Dingbian-Wuqi Area in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(4): 497-507.
- [14] 郭少斌, 孙绍寒. 周家湾地区前侏罗纪古地貌恢复及油气富集规律[J]. 地球科学, 2006, 31(3): 372-377.
- GUO Shao-bin, SUN Shao-han. Rebuilding Paleogeomorphology of Pre-Jurassic and Oil Gas Accumulation Regulation in Zhoujiawan Area[J]. Earth Science, 2006, 31(3): 372-377.
- [15] 郭正权, 张立荣, 楚美娟, 等. 鄂尔多斯盆地南部前侏罗纪古地貌对延安组下部油藏的控制作用[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 63-71.
- GUO Zheng-quan, ZHANG Li-rong, CHU Mei-juan, et al. Pre-Jurassic Palaeogeomorphic Control on the Hydrocarbon Accumulation in the Lower Yan'an Formation in Southern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(1): 63-71.
- [16] 朱静, 李文厚, 韩永林, 等. 陇东地区前侏罗纪古地貌及油藏成藏规律研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1229-1237.
- ZHU Jing, LI Wen-hou, HAN Yong-lin, et al. Research on Paleogeomorphic Features of Pre-Jurassic and Accumulation Regularity of Oil Reservoir in the Area of Eastern Gansu, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1229-1237.
- [17] 李树同, 张海峰, 王多云, 等. 聚油古地貌成因类型及其有利成藏条件分析: 以鄂尔多斯盆地上里塬地区前侏罗纪古地貌为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 962-969.
- LI Shu-tong, ZHANG Hai-feng, WANG Duo-yun, et al.

- Genetic Type of Oil-gas Accumulation Paleogeomorphology and Favorable Conditions for Petroleum Accumulation; Taking the Paleogeomorphology of Pre-Jurassic in Shangliyuan Area, Ordos Basin as an Example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 962-969.
- [18] 袁 珍,李文厚,朱 静,等.鄂尔多斯盆地陇东地区侏罗系古地貌恢复及其对石油聚集的影响[J]. *地质通报*, 2013, 32(11): 1806-1814.  
YUAN Zhen, LI Wen-hou, ZHU Jing, et al. The Restoration of Pre-Jurassic Paleogeomorphology and Its Influence on Oil Accumulation in Longdong Area[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(11): 1806-1814.
- [19] 吴贤顺,樊太亮.从古地貌谈层序格架中储层的发育规律[J]. *地球学报*, 2002, 23(3): 259-262.  
WU Xian-shun, FAN Tai-liang. The Relationship Between Palaeotopography and Reservoir Prediction in Sequence Stratigraphic Research[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(3): 259-262.
- [20] 杨俊杰.陕甘宁盆地地下古生界天然气的发现[J]. *天然气工业*, 1991, 11(2): 1-6.  
YANG Jun-jie. Discovery of the Natural Gas in Lower Palaeozoic in Shaan-Gan-Ning Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1991, 11(2): 1-6.
- [21] 拜文华,吕锡敏,李小军,等.古岩溶盆地岩溶作用模式及古地貌精细刻画:以鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳为例[J]. *现代地质*, 2002, 16(3): 292-298.  
BAI Wen-hua, LU Xi-min, LI Xiao-jun, et al. The Mode of Palaeokarstification and the Fine Reconstruction of the Palaeogeomorphology in the Karst Basin; Taking Ordovician Karst in Eastern Ordos Basin for Example[J]. *Geoscience*, 2002, 16(3): 292-298.
- [22] 代金友,何顺利.鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系古地貌研究[J]. *石油学报*, 2005, 26(3): 37-39, 43.  
DAI Jin-you, HE Shun-li. Ordovician Paleokarst Landform of Central Gas Field in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(3): 37-39, 43.
- [23] 何自新,黄道军,郑聪斌,等.鄂尔多斯盆地奥陶系古地貌、古沟槽模式的修正及其地质意义[J]. *海相油气地质*, 2006, 11(2): 25-28.  
HE Zi-xin, HUANG Dao-jun, ZHENG Cong-bin, et al. Modification and Geology Implication of Ordovician Paleogeomorphology and Paleogeosyncline Distribution Models in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2006, 11(2): 25-28.
- [24] 夏明军,戴金星,邹才能,等.鄂尔多斯盆地南部加里东期岩溶古地貌与天然气成藏条件分析[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(3): 291-298, 315.  
XIA Ming-jun, DAI Jin-xing, ZOU Cai-neng, et al. Caledonian Karst Palaeogeomorphology and the Forming Condition of Gas Pool, Southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(3): 291-298, 315.
- [25] 何 江,沈昭国,方少仙,等.鄂尔多斯盆地中部前石炭纪岩溶古地貌恢复[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(2): 8-16.  
HE Jiang, SHEN Zhao-guo, FANG Shao-xian, et al. Restoration of Pre-Carboniferous Palaeokarst Landform in Central Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(2): 8-16.
- [26] 姚泾利,王兰萍,张 庆,等.鄂尔多斯盆地南部奥陶系古岩溶发育控制因素及展布[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(1): 56-65.  
YAO Jing-li, WANG Lan-ping, ZHANG Qing, et al. Controlling Factor and Distribution of Paleo-karst Development in Ordovician of Southern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(1): 56-65.
- [27] 张银德,周 文,邓 昆,等.鄂尔多斯盆地高桥构造平缓地区奥陶系碳酸盐岩岩溶古地貌特征与储层分布[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 757-767.  
ZHANG Yin-de, ZHOU Wen, DENG Kun, et al. Palaeogeomorphology and Reservoir Distribution of the Ordovician Karstified Carbonate Rocks in the Structurally-gentle Gaoqiao Area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 757-767.
- [28] 付晓燕,杨 勇,黄有根,等.苏里格南区奥陶系岩溶古地貌恢复及对气藏分布的控制作用[J]. *天然气勘探与开发*, 2014, 37(3): 1-4, 18.  
FU Xiao-yan, YANG Yong, HUANG You-gen, et al. Palaeomorphologic Reconstruction of Ordovician Karst in Southern Sulige Gas Field and Its Effect on Reservoir Distribution[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2014, 37(3): 1-4, 18.
- [29] 王建民,王佳媛,沙建怀,等.鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶古地貌特征及综合地质模型[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2014, 44(2): 409-418.  
WANG Jian-min, WANG Jia-yuan, SHA Jian-huai, et al. Karst Palaeogeomorphology and Comprehensive Geological Model of the Ordovician Weathering Crust in the Eastern Ordos Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(2): 409-418.
- [30] 肖 玲,王起琮,米慧慧,等.鄂尔多斯盆地宜君—富县地区马家沟组顶部岩溶古地貌特征[J]. *地质科学*, 2015, 50(1): 262-273.  
XIAO Ling, WANG Qi-cong, MI Hui-hui, et al. Palaeokarst Landform of Majiagou Formation of Ordovician

- in Yijun-Fuxian Area of Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(1): 262-273.
- [31] 闫海军, 何东博, 许文壮, 等. 古地貌恢复及对流体分布的控制作用: 以鄂尔多斯盆地高桥区气藏评价阶段为例[J]. 石油学报, 2016, 37(12): 1483-1494.
- YAN Hai-jun, HE Dong-bo, XU Wen-zhuang, et al. Paleotopography Restoration Method and Its Controlling Effect on Fluid Distribution: A Case Study of the Gas Reservoir Evaluation Stage in Gaoqiao, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 1483-1494.
- [32] 韩宝平. 任丘油田碳酸盐岩古潜山地貌的计算机恢复[J]. 中国岩溶, 1989, 8(3): 226-231.
- HAN Bao-ping. Geomorphic Reconstruction of Buried Carbonate Paleohills in Renqiu Oilfield on Computer[J]. Carsologica Sinica, 1989, 8(3): 226-231.
- [33] 刘栓驹, 黄杰, 王根久, 等. 碳酸盐岩潜山油藏古地貌及剩余油分布关系[J]. 石油学报, 1999, 20(2): 39-44.
- LIU Shuan-ju, HUANG Jie, WANG Gen-jiu, et al. A Study on Relations Between Ancient Landforms and Residual Oil in Carbonate Buried Hill Reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(2): 39-44.
- [34] 宋国奇, 徐春华, 樊庆真, 等. 应用层序地层学方法恢复加里东期古地貌: 以济阳坳陷沾化地区为例[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 350-354.
- SONG Guo-qi, XU Chun-hua, FAN Qing-zhen, et al. Sequence Stratigraphy Applied in the Restoration of the Caledonian Paleogeomorphology: A Case Study in Zhanhua Area, the Jiyang Depression[J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(4): 350-354.
- [35] 齐振琴, 程昌茹, 孙秀会, 等. 千米桥古潜山岩溶地貌演化及古岩溶洞穴发育特征[J]. 海相油气地质, 2008, 13(4): 37-43.
- QI Zhen-qin, CHENG Chang-ru, SUN Xiu-hui, et al. Evolution of Karst Paleogeomorphology and Development Features of Paleokarstic Caves in the Qianmiqiao Buried Hill in Huabei Oil Fields[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(4): 37-43.
- [36] 邓宏文, 王红亮, 王敦则, 等. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制: 以渤中凹陷西斜坡区下第三系为例[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 293-296, 303.
- DENG Hong-wen, WANG Hong-liang, WANG Dun-ze, et al. Control of Paleo-morphology to Stratigraphic Sequence in Continental Rift Basins: Take Lower Tertiary of Western Slope in Bozhong Depression as an Example[J]. Oil and Gas Geology, 2001, 22(4): 293-296, 303.
- [37] 张建林, 林畅松, 郑和荣, 等. 断陷湖盆断裂、古地貌及物源对沉积体系的控制作用: 以孤北洼陷沙三段为例[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(4): 24-27.
- ZHANG Jian-lin, LIN Chang-song, ZHENG Herong, et al. Controlling Action of Fractures, Palaeogeomorphology and Material Sources of Rift Lake Basin on Sedimentary System: Taking Es<sub>3</sub> Gubei Subsag as Example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(4): 24-27.
- [38] 徐长贵, 赖维成, 薛永安, 等. 古地貌分析在渤海古近系储集层预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 53-56.
- XU Chang-gui, LAI Wei-cheng, XUE Yong-an, et al. Palaeogeomorphology Analysis for the Paleogene Reservoir Prediction in Bohai Sea Area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 53-56.
- [39] 赖生华, 李晓宏. 断陷盆地沉积体系研究新思路: 从古地貌、岩性变化、水体深度到沉积体系[J]. 沉积学报, 2007, 25(5): 663-670.
- LAI Sheng-hua, LI Xiao-hong. A New Approach in Studying Depositional System Within Rift-subsidence Basin: From Paleogeomorphology, Lithologic Change and Water Depth to Depositional System[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 663-670.
- [40] 李家强. 层拉平方法在沉积前古地貌恢复中的应用: 以济阳坳陷东营三角洲发育区为例[J]. 油气地球物理, 2008, 6(2): 46-49.
- LI Jia-qiang. Application of Bedding Flattening in the Process of Rebuilding Paleogeomorphology Before Basin Deposition: A Case Study in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. Petroleum Geophysics, 2008, 6(2): 46-49.
- [41] 帅萍. 济阳坳陷古近纪古地貌特点及其对沉积的控制作用[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(3): 24-26.
- SHUAI Ping. Palaeotopographic Features and Their Depositional Control in Palaeogene Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(3): 24-26.
- [42] 王延章, 宋国奇, 王新征, 等. 古地貌对不同类型滩坝沉积的控制作用: 以东营凹陷东部南坡地区为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 13-16.
- WANG Yan-zhang, SONG Guo-qi, WANG Xin-zheng, et al. Controlling Effect of Paleogeomorphology on Deposition of Beach and Bar Sand Reservoir: Case Study of South Slope, East Dongying Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4): 13-16.
- [43] 康玉柱. 塔里木盆地古潜山油气田[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 458-463.
- KANG Yu-zhu. Oil and Gas Fields in Burial Hills of



- Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2003, 25(5): 458-463.
- [44] 康志宏, 吴铭东. 利用层序地层学恢复岩溶古地貌技术: 以塔河油田 6 区为例[J]. *新疆地质*, 2003, 21(3): 290-292.
- KANG Zhi-hong, WU Ming-dong. Technology of Recovering Ancient Geomorphology Though Sequence Stratigraphy: A Case Study in Tahe 6th Reservoir, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2003, 21(3): 290-292.
- [45] 康玉柱. 中国海相油气田勘探实例之四: 塔里木盆地塔河油田的发现与勘探[J]. *海相油气地质*, 2005, 10(4): 31-38.
- KANG Yu-zhu. Cases of Discovery and Exploration of Marine Fields in China (Part 4): Tahe Oilfield in Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005, 10(4): 31-38.
- [46] 康志宏. 塔河碳酸盐岩油藏岩溶古地貌研究[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(5): 522-525.
- KANG Zhi-hong. The Karst Palaeogeomorphology of Carbonate Reservoir in Tahe Oilfield[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(5): 522-525.
- [47] 王 萍, 袁向春, 李江龙, 等. 塔河油田 4 区古地貌对储层分布的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(3): 382-387.
- WANG Ping, YUAN Xiang-chun, LI Jiang-long, et al. Control of Paleogeomorphology on Reservoir Distribution in Block 4 of Tahe Oilfield[J]. *Oil and Gas Geology*, 2011, 32(3): 382-387.
- [48] 王家豪, 王 华, 赵忠新, 等. 层序地层学应用于古地貌分析: 以塔河油田为例[J]. *地球科学*, 2003, 28(4): 425-430.
- WANG Jia-hao, WANG Hua, ZHAO Zhong-xin, et al. Sequence Stratigraphy in Paleogeomorphology Analysis: An Example from Tahe Oilfield[J]. *Earth Science*, 2003, 28(4): 425-430.
- [49] 曹建文, 夏日元, 张庆玉, 等. 应用古地貌成因组合识别法恢复塔河油田主体区古岩溶地貌[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(3): 283-287.
- CAO Jian-wen, XIA Ri-yuan, ZHANG Qing-yu, et al. Application of Paleogeomorphic Genesis Assembly Identification Method to Recovery of Paleokarst Landform in Major Blocks of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(3): 283-287.
- [50] 韩长城, 林承焰, 鲁新便, 等. 塔河油田奥陶系岩溶地貌对储集层的控制作用[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(4): 417-422.
- HAN Chang-cheng, LIN Cheng-yan, LU Xin-bian, et al. Controlling Effects of Ordovician Karst Paleogeomorphology on Reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(4): 417-422.
- [51] 王宏语, 樊太亮, 高志前, 等. 塔中地区奥陶纪古地貌及其对储集层的控制作用[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(1): 15-19.
- WANG Hong-yu, FAN Tai-liang, GAO Zhi-qian, et al. Ordovician Palaeogeomorphology and Reservoir-controlled Process in Tazhong Area, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(1): 15-19.
- [52] 彭 莉, 刘小平, 林畅松, 等. 塔中隆起晚奥陶世古地貌及其沉积相特征[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, 44(6): 767-772.
- PENG Li, LIU Xiao-ping, LIN Chang-song, et al. Late Ordovician Palaeogeomorphology and Its Sedimentary Facies Characteristics in Central Tarim Uplift[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(6): 767-772.
- [53] 张海祖, 张好勇, 刘 鑫, 等. 塔中地区奥陶系鹰山组古地貌精细研究[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(3): 250-252.
- ZHANG Hai-zu, ZHANG Hao-yong, LIU Xin, et al. Fine Study on Yingshan Paleo-relief of Ordovician in Tazhong Area, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(3): 250-252.
- [54] 赵永刚, 陈景山, 李 凌, 等. 基于残余岩溶强度表征和裂缝预测的碳酸盐岩储层评价: 以塔中西部上奥陶统良里塔格组为例[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2015, 45(1): 25-36.
- ZHAO Yong-gang, CHEN Jing-shan, LI Ling, et al. Evaluation of Carbonate Reservoir Based on Residual Karst Intensity Characterization and Structural Fracture Prediction: A Case from the Upper Ordovician Lianglitage Formation in the West of Center Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2015, 45(1): 25-36.
- [55] 邓兴梁, 张庆玉, 梁 彬, 等. 塔中Ⅱ区奥陶系鹰山组岩溶古地貌恢复方法研究[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(2): 154-158.
- DENG Xing-liang, ZHANG Qing-yu, LIANG Bin, et al. Reconstruction of Karst Palaeogeomorphology for the Ordovician Yingshan Formation in the Central Tarim Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(2): 154-158.
- [56] 张庆玉, 陈利新, 梁 彬, 等. 轮古西地区前石炭纪古岩溶微地貌特征及刻画[J]. *海相油气地质*, 2012, 17(4): 23-26.
- ZHANG Qing-yu, CHEN Li-xin, LIANG Bin, et al. Characterization of Precarboniferous Karst Microgeo-

- morphology in the West Part of Lungu Oilfield, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(4): 23-26.
- [57] 张庆玉, 秦凤蕊, 梁 彬, 等. 塔北隆起轮古7井区奥陶系岩溶地貌及岩溶储层特征研究[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 373-378.
- ZHANG Qing-yu, QIN Feng-rui, LIANG Bin, et al. Karst Landforms and Reservoir Characteristics in the Ordovician Strata of Lungu 7, Tabei Uplift[J]. Carso-logica Sinica, 2014, 33(3): 373-378.
- [58] 张庆玉, 秦凤蕊, 梁 彬, 等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩古地貌及岩溶储层发育特征[J]. 地质科技情报, 2017, 36(1): 168-175.
- ZHANG Qing-yu, QIN Feng-rui, LIANG Bin, et al. Paleogeomorphology and Karst Reservoir Development of Ordovician Carbonate in Halahatang Area, Northern Tarim Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(1): 168-175.
- [59] 洪余刚, 陈景山, 代宗仰, 等. 古地貌恢复在风化壳岩溶型储层研究中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(1): 1-5.
- HONG Yu-gang, CHEN Jing-shan, DAI Zong-yang, et al. The Application of Ancient Geomorphology Recovery to the Study on the Palaeoweathering Crust-type Karst Reservoir[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(1): 1-5.
- [60] 文华国, 郑荣才, 沈忠民, 等. 四川盆地东部黄龙组古岩溶地貌研究[J]. 地质论评, 2009, 55(6): 816-827.
- WEN Hua-guo, ZHENG Rong-cai, SHEN Zhong-min, et al. Study on the Carboniferous Palaeokarst Landform in Eastern Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2009, 55(6): 816-827.
- [61] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
- MA Yong-sheng, CAI Xun-yu, ZHAO Pei-rong, et al. Distribution and Further Exploration of the Large-medium Sized Gas Fields in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 347-354.
- [62] 罗 冰, 谭秀成, 李 凌, 等. 蜀南地区长兴组顶部岩溶不整合的发现及其油气地质意义[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 408-414.
- LUO Bing, TAN Xiu-cheng, LI Ling, et al. Discovery and Geologic Significance of Paleokarst Unconformity Between Changxing Formation and Feixianguan Formation in Shunan Area of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 408-414.
- [63] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 949-960.
- JIANG Qing-chun, HU Su-yun, WANG Ze-cheng, et al. Paleokarst Landform of the Weathering Crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and Selection of Exploration Regions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 949-960.
- [64] 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 Qi-gui, LI Ke-sheng, ZHOU Zhuo-zhu, et al. Palaeogeomorphology and Karst Distribution of Tongwan Unconformity in Sichuan Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(4): 516-521.
- [65] 肖 笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组古岩溶地貌恢复及其石油地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1992-2002.
- XIAO Di, TAN Xiu-cheng, SHAN Shu-jiao, et al. The Restoration of Palaeokarst Geomorphology of Middle Permian Maokou Formation and Its Petroleum Geological Significance in Southern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(10): 1992-2002.
- [66] 刘 宏, 罗思聪, 谭秀成, 等. 四川盆地震旦系灯影组古岩溶地貌恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 283-293.
- LIU Hong, LUO Si-cong, TAN Xiu-cheng, et al. Restoration of Paleokarst Geomorphology of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin and Its Significance, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 283-293.
- [67] 金民东, 谭秀成, 童明胜, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区灯四段岩溶古地貌恢复及地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 58-68.
- JIN Min-dong, TAN Xiu-cheng, TONG Ming-sheng, et al. Karst Paleogeomorphology of the Fourth Member of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi Area, Sichuan Basin, SW China: Restoration and Geological Significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 58-68.
- [68] 曾云贤, 刘 微, 杨 雨, 等. 罗家寨西南地区飞仙关早期沉积古地貌研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(1): 10-11.
- ZENG Yun-xian, LIU Wei, YANG Yu, et al. Research on Sedimentary Palaeotopography of Early Feixianguan Period at Southwest LuoJiazhai Area[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(1): 10-11.
- [69] 谭秀成, 聂 勇, 刘 宏, 等. 陆表海碳酸盐岩台地沉积期微地貌恢复方法研究: 以四川盆地磨溪气田嘉

- 2<sup>2</sup>亚段A层为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 486-494.
- TAN Xiu-cheng, NIE Yong, LIU Hong, et al. Research on the Method of Recovering Microtopography of Epeiric Carbonate Platform in Depositional Stage: A Case Study from the Layer A of Jia 2<sup>2</sup> Member in Moxi Gas Field, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 486-494.
- [70] 赵俊兴, 陈洪德, 向芳. 高分辨率层序地层学方法在沉积前古地貌恢复中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(1): 76-81.
- ZHAO Jun-xing, CHEN Hong-de, XIANG Fang. The Possibility of Rebuilding Palaeogeomorphology Before Basin Deposition by High-resolution Sequence Stratigraphy[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2003, 30(1): 76-81.
- [71] 蔡佳. 南阳凹陷南部断超带古近系古地貌恢复及演化[J]. 特种油气藏, 2011, 18(6): 57-60.
- CAI Jia. Reconstruction and Evolution of Paleogene Geomorphology in the Overlap Fault Belt in the South of Nanyang Sag[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, 18(6): 57-60.
- [72] 金民东, 谭秀成, 曾伟, 等. 四川盆地磨溪—高石梯地区加里东—海西期龙王庙组构造古地貌恢复及地质意义[J]. 沉积学报, 2016, 34(4): 634-644.
- JIN Min-dong, TAN Xiu-cheng, ZENG Wei, et al. Reconstruction of the Tectonic Palaeogeomorphology of Longwangmiao Formation During the Caledonian-Hercynian Period in Moxi-Gaoshiti Area, Sichuan Basin and Its Geological Significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(4): 634-644.
- [73] 周丽梅, 张江江. 海西早期岩溶改造作用及古地貌恢复: 以塔河2区为例[J]. 地质科技情报, 2015, 34(4): 51-56.
- ZHOU Li-mei, ZHANG Jiang-jiang. Early Hercynian Karst Reconstruction and Ancient Landform Recovery: Take Area 2 in Tahe Oilfield as an Example[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(4): 51-56.
- [74] 淡永, 邹灏, 梁彬, 等. 塔北哈拉哈塘加里东期多期岩溶古地貌恢复与洞穴储层分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 304-312.
- DAN Yong, ZOU Hao, LIANG Bin, et al. Restoration of Multistage Paleogeomorphology During Caledonian Period and Paleokarst Cavernous Reservoir Prediction in Halahatang Area, Northern Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2016, 37(3): 304-312.
- [75] 赵澄林. 沉积学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- ZHAO Cheng-lin. Principle of Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [76] 谢又予. 沉积地貌分析[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
- XIE You-yu. Depositional Geomorphology Analysis[M]. Beijing: China Ocean Press, 2001.
- [77] 吴丽艳, 陈春强, 江春明, 等. 浅谈我国油气勘探中的古地貌恢复技术[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(4): 559-560, 586.
- WU Li-yan, CHEN Chun-qiang, JIANG Chun-ming, et al. Paleogeomorphic Restoring Techniques in China's Hydrocarbon Exploration[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(4): 559-560, 586.
- [78] 张尚锋. 高分辨率层序地层学理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- ZHANG Shang-feng. Theory and Practice of High-resolution Sequence Stratigraphy[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [79] 梅冥相, 马永生, 周丕康, 等. 碳酸盐沉积学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- MEI Ming-xiang, MA Yong-sheng, ZHOU Pi-kang, et al. Introduction to Carbonate Sedimentology[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [80] 谭秀成, 刘晓光, 陈景山, 等. 磨溪气田嘉二段陆表海碳酸盐岩台地内滩体发育规律[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 995-1001.
- TAN Xiu-cheng, LIU Xiao-guang, CHEN Jing-shan, et al. Shoal Development Within the Epicontinental Carbonate Platform, Jia 2 Member, Lower Triassic, Moxi Gas Field, Central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 995-1001.
- [81] WILSON J L. Carbonate Facies in Geologic History[M]. New York: Springer, 1975.
- [82] 赵路子. 碳酸盐岩隐蔽滩相储层特征及预测模型[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- ZHAO Lu-zi. Characteristics and Forecast Model of Carbonate Subtle Shoal Reservoir[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [83] SALLER A H, DICKSON J A D, MATSUDA F. Evolution and Distribution of Porosity Associated with Subaerial Exposure in Upper Paleozoic Platform Limestones, West Texas[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1835-1854.