

关键层面古地貌演化剖面的建立及地质意义

张辉^{1,2},胡望水^{1,2*},李伟³,陈竹新³,郝猛^{1,2},郭先涛^{1,2},
樊仲^{1,2},GORDON Benkane^{1,2},陈章文^{1,2}

(1.长江大学地球科学学院,湖北武汉430100; 2.长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室,
湖北武汉430100; 3.中国石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:针对关键层面不同地质历史时期古地貌平面难以横、纵向灵活、精细对比的实际问题,首次提出基于关键层面古地貌三维模型的图切剖面法和基于正、反演方式的平衡剖面法的2类3型关键层面古地貌演化剖面构建方法,进而分析证实古地貌演化过程中古地貌继承、间断、变换(正变换和负变换)行为的存在,并探讨其识别标志,总结关键层面古地貌演化剖面在古地貌演化行为分析、不同构造体系下构造-沉积耦合作用剖析、递进构造变形、圈闭演化及油气成藏演化等方面的地质应用价值及意义。选取川西北震旦系顶面进行关键层面古地貌演化剖面进行实例分析,证实古地貌演化剖面的应用价值,为古地貌演化分析提供了新的思路,为局部古地貌演化精细对比提供了有效的途径,也提高了古地貌演化分析的准确性、灵活性和时空分辨率。

关键词:关键层面 古地貌演化剖面 平衡剖面 图切剖面 古地貌演化行为 地质意义

中图分类号:TE111.3

文献标识码:A

Establishment of paleo-topography evolutionary section of key strata boundary and its geological implications

ZHANG Hui^{1,2}, HU Wangshui^{1,2}, LI Wei³, CHEN Zhuxin³, HAO Meng^{1,2}, GUO Xiantao^{1,2},
FAN Zhong^{1,2}, GORDON Benkane^{1,2}, CHEN Zhangwen^{1,2}

(1. College of Geoscience, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 2. Key Laboratory of Oil & Gas Resources and Exploration Technologies, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China;
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: The paleo-topography maps of different geologic evolutionary stages are hard to be correlated with each other in horizontal and vertical with flexibly and high resolution. To solve this problem, a method for paleo-topography evolution establishment was first proposed, comprising of two types of methods and three models which included a cut-out section method based on a 3D model of key strata boundary and a balanced cross section method comprising of the same key strata boundary during different evolutionary stages based on forward and inverse modeling. Furthermore, the existence of paleo-topography evolutionary behaviors such as inheritance, hiatus and transformation (positive topography transformation or negative topography transformation) was analyzed and certified and the identification signatures during paleo-topography evolution were further discussed. The geological applications and implications of key strata paleo-topography evolution were summarized, including the analysis of paleo-topography evolutionary behaviors, tectonic-sedimentary coupling relationships under different tectonic mechanisms, progressive tectonic deformation and trap and hydrocarbon accumulation evolution. A paleo-topography evolutionary section of the Sinian top in the northwest of Sichuan Province was selected as an example to verify the geological applications and implications of paleo-topography evolution, which offered a new approach

收稿日期:2017-11-15。

作者简介:张辉(1987—),男,河南太康人,在读博士研究生,从事构造地质学与沉积盆地构造学研究。联系电话:15207181259, E-mail: 625972967@qq.com。

*通讯作者:胡望水(1963—),男,湖北孝昌人,教授,博导。联系电话:18971182089, E-mail: huwangshui@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“前陆冲断带及复杂构造区地质演化过程、深层结构与储集层特征”(2016ZX05003-001)。

for the paleo-topography evolution analysis and provided an effective way to realize fine correlation of local paleo-topography evolution, and it was also applied to improve space-time resolution, flexibility and accuracy of paleo-topography evolution studies.

Key words: key strata boundary; paleo-topography evolutionary section; balanced cross section; cut-out section; paleo-topography evolutionary behaviors; geological implication

古地貌(古构造)格局直接控制隆升剥蚀区、拗陷沉降区和过渡坡折带的空间分布特征,影响沉积相分异和物质分布,控制有利烃源岩、储集体、盖层的发育及其空间配置,进而制约油气的生成、运移和富集,一直是地质学家研究的热点领域和学科前沿,也是理论和实践创新的重要领域^[1-28]。

古地貌的建立方法有古地质图恢复法^[1-3]、地层厚度法(宝塔图法)^[4-5]、沉积学法^[6-8]、层序地层学(补偿厚度印模法)^[9-15]、残余厚度印模法^[2-3,14,16]、地震层拉平技术和三维可视化技术^[8,17-19]、误差模拟法^[20]、沉降分析与拗陷强度法^[21-22]、地震属性法、地震地貌学法、地震沉积学法^[23-29]。目前层序地层学法和地层厚度法应用最广。上述方法建立的古地貌图可以很好地反映平面上地貌起伏变化及其地质效应,虽可以将不同地质历史时期的古地貌图进行对比,追溯古地貌演化过程,但缺少较准确的对比途径,因此存在较大误差。由于平面上古地貌恢复须先完成目标区域所有地震测线的解释,工作量较大,不适于快速认识关键部位的古地貌演化。而针对关键层面不同地质历史时期的古地貌演化剖面却能很好地解决目标区域重点构造古地貌演化及其横纵向对比问题,这却是平面古地貌图难以实现的,且目前针对关键层面古地貌演化剖面鲜有报道。

为此,笔者提出基于关键层面古地貌三维模型的图切剖面法和基于正、反演方式的平衡剖面法的2类3型关键层面古地貌演化剖面构建方法,建立关键层面古地貌演化剖面,分析其在构造变形、圈闭

演化、构造-沉积耦合作用等方面的地质意义,并选取川西北震旦系顶面进行关键层面古地貌演化剖面分析,为古地貌演化分析和对比提供有价值的研究实例,以期更好地服务油气圈闭评价、勘探靶区优选工作。

1 关键层面古地貌演化剖面的建立

1.1 图切剖面法

图切剖面建立的前提是古地貌三维模型的构建,即选择合适的古地貌建立方法,建立关键层面不同地质历史时期的古地貌平面图,将不同地质历史时期古地貌三维曲面放置于同一深度空间格架中,建立关键层面古地貌三维模型。模型构建完成后,根据研究需要,选择切穿研究区的基干测线,提取关键层面古地貌三维模型中不同地质历史时期古地貌在基干测线上的投影数据,最终得到该测线关键层面不同地质历史时期的古地貌演化剖面。从构建思路上看,该方法具有正、反演结合的特点,首先构建三维模型为反演过程,图切剖面为正演过程。该方法需在建立古地貌图前解释所有地震测线,建立三维栅格等时地层格架,工作量较大;但建立古地貌三维模型后,图切剖面的建立则相对较为容易。图切剖面法适用于地震资料解释工作基本完成的条件下,很难快速认识剖面线上关键层面的古地貌演化历程。图1为利用基于川西北震旦系顶面不同地质历史时期古地貌三维模型建立的图切剖面获取的任意地震测线的震旦系顶面古地貌演

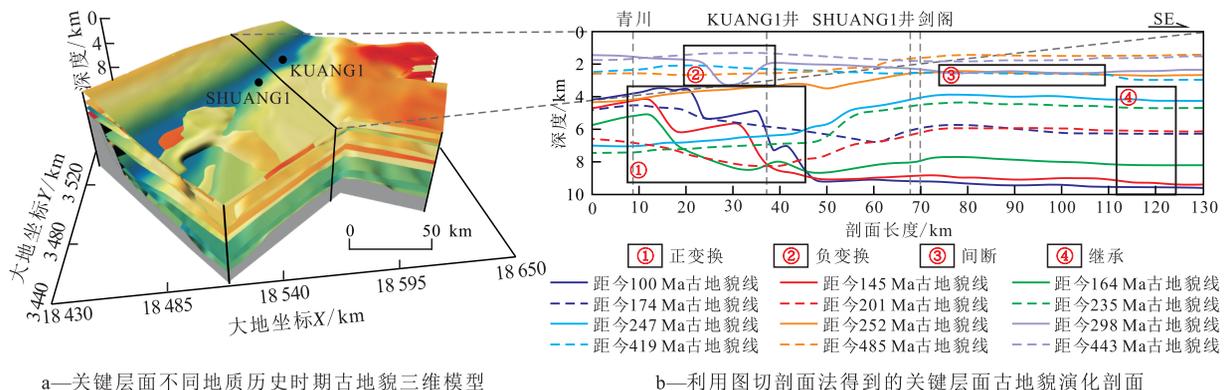


图1 图切剖面法建立关键层面古地貌演化剖面示意

Fig.1 Schematic maps showing how cut-out section method was utilized to establish paleo-topography evolutionary section

化剖面。其中,图 1a 为基于层序地层格架,利用地层厚度法,结合压实校正和古水深校正,得到的关键层面不同地质历史时期古地貌三维模型;图 1b 为沿着图 1a 中测线位置,利用图切剖面法从古地貌三维模型中投影得到的关键层面古地貌演化剖面。

1.2 平衡剖面法

平衡剖面在构造演化分析、构造运动过程及局部构造成因机制、断层相关褶皱、隐伏断层预测研究中应用广泛,但其在关键层面古地貌演化研究中却很少应用,这也是平衡剖面应用的新方向(图 2)。平衡剖面法适用于早期二维地震勘探或欲快速认识古地貌演化过程的情况,其将关键层面古地

貌演化分析放置于平衡剖面制作过程中,仅需一个二维地震资料解释模型即可实现,对资料基础的要求没有图切剖面法高。

关键层面古地貌演化剖面构建的前提是建立测线平衡剖面,平衡剖面可以按正演或反演 2 种思路编制。所谓正演,是指地层从未变形状态向变形状态演化的过程,图 2a 为从沙二段沉积时期之前至现今的演化过程,即为正演过程;所谓反演,是指地层从变形状态恢复至未变形状态的演化过程,图 2a 所示从现今恢复至沙二段沉积时期之前平衡剖面的过程为反演过程。利用平衡剖面法构建关键层面古地貌演化剖面,即按照构造-沉积演化的先后顺序,选择不同平衡剖面中的相同关键层面(一般是基底或重要构造转换面),将其放置于同一深度格架剖面中,进而建立关键层面古地貌演化剖面,也可以将该方法称为同层异时纵向叠置法。例如选取图 2a 中的新生界底面(孔店组底面)作为关键层面,按照正演或反演顺序,将新生界底面不同地质历史时期古地貌线放置在同一深度框架内,进而得到新生界底面古地貌演化剖面(图 2b)。该过程可以反映利用平衡剖面建立关键层面古地貌演化剖面的基本流程。

2 关键层面古地貌演化剖面的地质意义

2.1 揭示古地貌演化行为

古地貌演化过程存在继承、间断和变换 3 种行为(图 1b,图 2b),分别具有波动旋回、停滞和突变陡崖属性。古地貌继承是指在相同构造体制下古地貌变化沿着相同的趋势进行,古地貌随着时间增量的变化具有相似趋势增量。古地貌间断指古地貌在某一地质历史时期出现停滞现象,或者变化非常微弱,可以忽略,从而导致局部晚期古地貌线与早期古地貌线重合,构造因素或沉积间断是该行为的主控因素;古地貌线是关键层面古地貌三维模型在不同地质历史时期的古地貌曲面或不同地质历史时期的平衡剖面中关键层面在同一观测剖面上的投影线,不同古地貌线代表该剖面位置上关键层面在不同地质历史时期的古地貌起伏特征,具有时空演化意义。古地貌变换则是一种实质性突变,是构造机制转换的直接体现;其至少经历 2 次不同性质和构造体制的构造运动的叠加作用,因此为反转构造的重要表现形式。通过关键层面在不同地质历史时期的古地貌演化剖面可以很清晰地分析古地

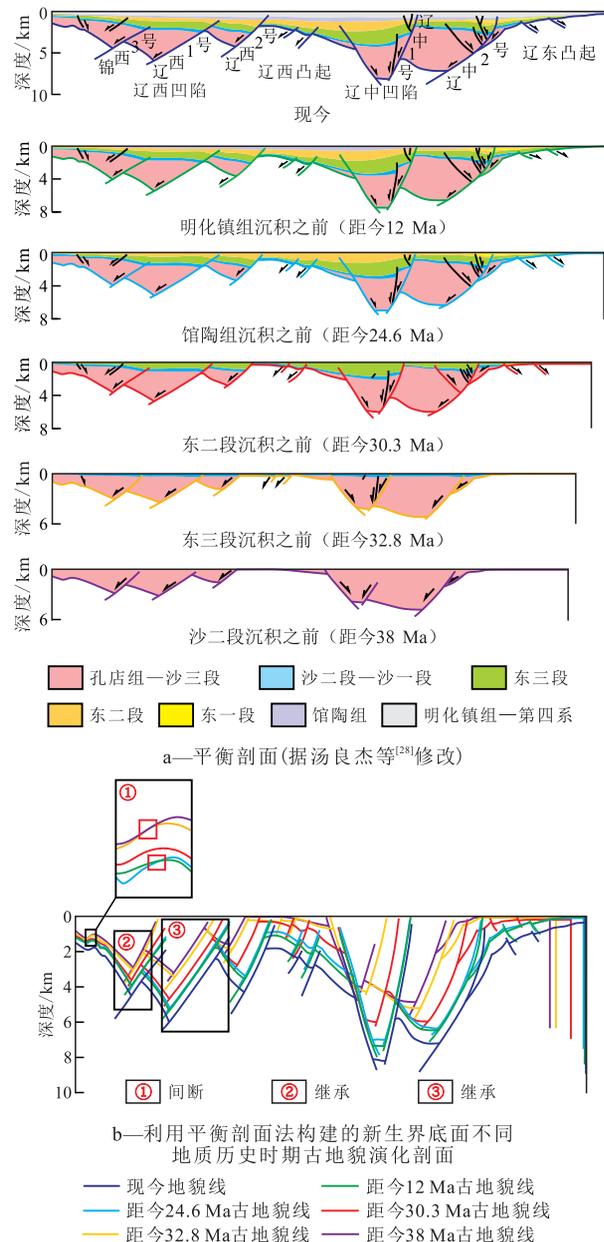


图 2 平衡剖面法建立关键层面古地貌演化剖面示意
Fig.2 Schematic maps showing how balanced cross section method was utilized to establish paleo-topography evolutionary section

貌的继承和变换过程。具体而言,古地貌继承表现为不同地质历史时期古地貌线演化具有时序性,空间上按时序依次变深,不会出现不同时期古地貌线相互切割和重合的现象。古地貌变换具有穿时性,空间上不按时序分布,且深浅不一。古地貌变换可以分为正变换和负变换2种形式。正变换即相对早期地貌变低趋势而言,晚期地貌出现明显升高现象,对应于早期拉张体制、晚期挤压体制的正反转构造作用;负变换即相对早期地貌增高趋势而言,晚期地貌呈现显著下降特征,受控于早期挤压机制、晚期拉张机制的负反转构造作用(图1b)。图3为关键层面基本构造样式的古地貌演化行为,实际古地貌演化过程为这些类型古地貌演化行为基于地质实际选择性组合形式,但地质背景和实际构造过程不同则具有不同的古地貌演化历程,需要具体分析。

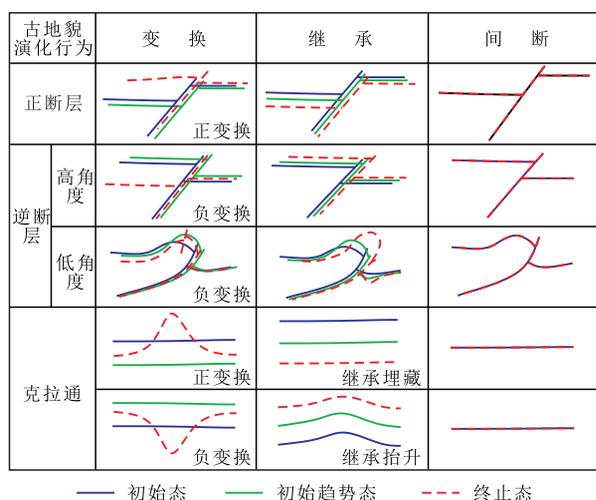


图3 关键层面基本构造样式的古地貌演化行为

Fig.3 Paleo-topography evolutionary behaviors of basic structural styles of the key strata boundary

2.2 反映构造-沉积耦合作用过程

构造-沉积耦合作用过程复杂多变、类型繁多,导致其产物的结构、构造内幕细节错综复杂,整体上可以分为4类5型构造-沉积耦合模式,即离散背景下的盆岭耦合模式、挤压体制下的盆山耦合模式、扭动背景下的盆岭盆山耦合模式和克拉通背景下的隆坳模式、台盆(槽)模式^[30-32]。这些构造-沉积耦合模式均可通过关键层面古地貌演化剖面中相邻的不同地质历史时期古地貌线的接触方式和形态来表征。关键层面古地貌演化晚期地貌线与早期地貌线交叉,且晚期地貌线位于早期地貌线之上的范围为抬升剥蚀区,晚期地貌线位于早期地貌线之下的部分为沉降沉积区(进而又可以根据坡度和高程差分为坡折带和坳陷区),交叉点处为平衡位

置,这即为古地貌演化2区1点的基本格局。构造-沉积耦合模式可以根据剥蚀区、沉积区的地貌形态及其组合特征加以区分。同时相邻地质历史时期的古地貌线之间厚度的变化趋势可以反映隆起和坳陷的相对位置,减薄方向对应地层超覆方向,增厚方向指向坳陷中心,中间过渡为斜坡区,其地质演化反映构造-沉积耦合作用过程。

2.3 反映递进构造变形过程

关键层面古地貌演化剖面可以反映递进构造变形过程。对于单一剖面,关键层面相邻地质历史时期水平方向剖面长度和构造形态的规律性变化可以反映构造形变的递进过程;如在递进冲断褶皱过程中,古地貌演化晚期关键层面的剖面长度会不断缩短,褶皱逐渐紧闭,甚至出现倒转现象,断层也会变得平缓,断距不断扩大,前陆盆地挠曲也会发生响应性变形过程(图1)。在递进拉张块断及其相关褶皱形成过程中,古地貌演化晚期关键层面的剖面长度不断增大,滚动背斜出现逐渐紧闭特征,垂向上断距不断增加(图2)。对于多剖面横、纵向对比分析,可以反映递进变形中的差异变形过程。此外,在平行和垂直构造走向的2个方向分别建立关键层面古地貌演化剖面,可以很好地反映扭动机制下拉张部位和挤压部位的递进变形过程。

2.4 反映圈闭演化及油气成藏演化过程

根据关键层面古地貌演化剖面,可以通过不同地质历史时期关键层面的几何形态变化呈现圈闭演化过程。在不同地质历史时期、不同古地貌演化阶段,关键层面褶皱的形成从无到有,圈闭几何面积从小到大的发育过程,再从大到小的调整改造过程,直至最后定型,均可以很好地反映圈闭演化过程。此外,其他构造圈闭的演化也可以通过相似的方法进行分析。在进行圈闭演化分析时,结合古地貌演化过程中的生储盖组合分析及单井埋藏史、生烃史、热史分析也可以进行油气成藏演化过程分析,进而揭示油气成藏地质要素和成藏环节的演化过程。

3 实例分析

选取川西北基于震旦系顶面各地质历史时期古地貌三维模型图切割面得到的古地貌演化剖面,详细说明古地貌演化剖面的解释方法及地质意义。

由川西北震旦系顶面的古地貌演化剖面(图1b)可以看出,震旦系顶面在奥陶纪之前(距今485 Ma)的古地貌具有东高西低特征,向西发育2级陡

坡。研究区寒武系具有向西增厚的趋势,分布连续稳定且厚度较大。志留纪之前(距今443 Ma),研究区古地貌具有东西高、中间低的特征,此时龙门山古隆起和川中古隆起开始隆升,在双探1井以西志留纪之前古地貌线位于奥陶纪之前古地貌线以上,说明在该范围内地层发生抬升并遭受剥蚀,双探1井以东地区奥陶系具有东西厚、中间薄的变化趋势,在东部边界位置志留纪之前古地貌线与奥陶纪之前古地貌线重合,表明该处发生了沉积间断。泥盆纪—石炭纪之前(距今419 Ma),研究区古地貌具有西高东低特征,整体古地貌线位于志留纪之前古地貌线以下,表明该处为连续稳定沉积,志留系具有向东增厚的趋势。二叠纪之前(距今298 Ma),研究区古地貌线除矿1井以西局部范围内低于泥盆纪—石炭纪之前古地貌线外,其他地区均位于泥盆纪—石炭纪之前古地貌线之上,泥盆系—石炭系仅在矿1井以西局部沉积,地层中间厚、两边薄且沉积厚度较大,但分布有限,其他位置上覆地层大范围暴露地表遭受剥蚀。早三叠世之前(距今252 Ma),研究区古地貌线在剑阁以西范围内均位于二叠纪之前古地貌线之下,剑阁以东范围存在部分重合,在古地貌线重合部分的东南部,早三叠世之前古地貌线也回归至二叠纪之前古地貌线以下。研究区二叠系呈中部薄、东西部厚的分布特征,中部古地貌线重合位置出现沉积间断,其他均为正常沉积。中三叠世之前(距今247 Ma),古地貌线整体位于早三叠世之前古地貌线以下,研究区下三叠统连续沉积,整体具有西厚东薄趋势。晚三叠世之前(距今235 Ma),古地貌线整体位于中三叠世之前古地貌线之下,研究区中三叠统连续、稳定沉积,整体呈西薄东厚趋势,但由于该套地层厚度相对较薄,因此趋势不太明显。早侏罗世之前(距今201 Ma),古地貌线除在青川附近切穿晚三叠世和中三叠世之前古地貌线外,其他范围均处于晚三叠世之前古地貌线以下,表明青川附近上覆地层裸露地表、遭受剥蚀,其他范围为正常沉积。上三叠统自西北向东南厚度先增加再减薄。中侏罗世之前(距今174 Ma),古地貌线在剑阁以西范围内位于早侏罗世之前古地貌线之上,使得上覆地层抬升剥蚀,剑阁以东地区相反,下侏罗统正常沉积,具有中间厚、两边薄的分布特征,在剖面边缘2条相邻古地貌线重合,出现沉积间断。晚侏罗世之前(距今164 Ma),古地貌线整体位于中侏罗世之前古地貌线以下,但在青川附近褶皱明显,表明龙门山冲断褶皱作用已传播至青川,中侏罗统整体具有向东减薄的趋势。白垩纪之

前(距今145 Ma),古地貌线在矿山梁以西范围位于晚侏罗世之前古地貌线之上,在矿山梁以东范围则相反,在矿山梁处2条古地貌线重合,表明矿山梁以西范围上覆地层抬升剥蚀,在矿山梁处出现沉积间断,以东范围正常沉积。研究区上侏罗统整体具有向西减薄的分布特征。晚白垩世(距今100 Ma)(自此沉积范围逐步萎缩,盆地开始全面抬升,新生界在川西北没有沉积)古地貌线在矿山梁自以东10 km处向西龙门山范围内位于白垩纪之前古地貌线以上,矿山梁以东10 km位置处2条古地貌线重合,自以东10 km处向东范围内晚白垩世古地貌线位于白垩纪之前古地貌线以下,反映龙门山冲断褶皱作用已经推进至矿山梁以东10 km左右范围内,龙门山范围内上覆地层抬升剥蚀,矿山梁以东10 km左右范围内出现沉积间断现象,以东范围内白垩系正常沉积,具有中间厚、两边薄的分布特征。

基于川西北震旦系顶面古地貌演化剖面(图1b),以龙门山地区为例,进行古地貌继承与变换分析,以期获得古地貌演化过程中相关圈闭演化的信息。自奥陶纪之前开始,研究区震旦系顶面经历了至少2次正变换、1次负变换。根据古地貌演化行为及其地质效应原理,奥陶纪之前古地貌向志留纪之前古地貌的变换过程为正变换,该过程有利于压性断层、褶皱、隆起斜坡形成的地层超覆圈闭及抬升剥蚀后沉积形成的不整合等圈闭的形成。龙门山地区泥盆纪—石炭纪之前古地貌继承志留纪之前古地貌的特征。泥盆纪—石炭纪之前古地貌向二叠纪之前古地貌的变换过程为负变换,对早期圈闭起破坏作用。此后,直至晚三叠世之前古地貌继承二叠纪之前古地貌特征。晚三叠世之前古地貌向早侏罗世之前古地貌的演化过程为正变换,此后各地质历史时期古地貌继承早侏罗世之前的古地貌特征,冲断褶皱作用不断向盆地内部扩展推进。这次正变换形成新的断层圈闭、逆断层相关褶皱圈闭以及沉积相耦合的地层超覆、岩性圈闭类型,且随龙门山的不断褶皱隆升,对圈闭不断强化改造,尤其对加里东期形成圈闭类型的改造具有重大影响。

4 结论

首次提出基于古地貌三维模型的图切剖面法和基于正、反演方式的平衡剖面法建立关键层面古地貌演化剖面,有利于剖析重点部位关键层面的古地貌演化过程及相关地质效应。通过关键层面古地貌演化剖面分析,认为其演化过程包含继承、间

断和变换3种行为,其中变换又分为正变换和负变换,分别对应于正反转和负反转构造作用;通过古地貌演化剖面分析,可以识别出4类5型构造-沉积耦合模式。通过川西北震旦系顶面古地貌演化剖面的实例分析,证实关键层面古地貌演化剖面在构造-古地貌响应、构造-沉积耦合作用、递进构造作用过程、圈闭演化和油气成藏演化分析中具有明显的优势,可以为油气勘探中圈闭优选和靶区设定提供强有力的地质依据。

参考文献:

- [1] 安作相.四川盆地三迭纪末的古地质[J].地质学报,1962,42(4):370-378.
AN Zuoxiang.Paleo-geology of Sichuan Basin at the end of Triassic[J].Acta Geologica Sinica,1962,42(4):370-378.
- [2] 郑荣才,彭军,高红灿.渝东黄龙组碳酸盐岩储层的古岩溶特征和岩溶旋回[J].地质地球化学,2003,31(1):28-35.
ZHENG Rongcai, PENG Jun, GAO Hongcan.Palaeokarst-related characteristics and cycles of carbonate reservoirs in Huanglong Formation, upper Carboniferous, eastern Chongqing[J].Geology-Geochemistry,2003,31(1):28-35.
- [3] 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 Jingli, WANG Lanping, 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.
- [4] 何明喜,刘池洋.盆地走滑变形研究与古构造分析[M].西安:西北大学出版社,1995.
HE Mingxi, LIU Chiyang.Study of basin strike-slip deformation and paleo-structures [M].Xi'an: Northwest University Press, 1995.
- [5] 丁文龙,漆立新,云露,等.塔里木盆地巴楚-麦盖提地区古构造演化及其对奥陶系储层发育的控制作用[J].岩石学报,2012,28(8):2542-2556.
DING Wenlong, QI Lixin, YUN Lu, et al.The tectonic evolution and its controlling effects on the development of Ordovician reservoir in Bachu-Markit Tarim basin[J].Acta Petrologica Sinica,2012,28(8):2542-2556.
- [6] 赵俊兴,陈洪德,时志强.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 Junxing, CHEN Hongde, SHI Zhiqiang.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.
- [7] 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——中国地质大学学报,2006,31(3):372-377.
GUO Shaobin, SUN Shaohan.Rebuilding paleogeomorphology of pre-Jurassic and oil-gas accumulation regulation in Zhoujiawan area [J].Earth Science- Journal of China University of Geoscience,2006,31(3):372-377.
- [8] 庞军刚,杨友运,李文厚,等.陆相含油气盆地古地貌恢复研究进展[J].西安科技大学学报,2013,33(4):424-429.
PANG Jungang, YANG Youyun, LI Wenhui, et al.Study development of palaeogeomorphology reconstructions in continental facies hydrocarbon basin[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2013,33(4):424-429.
- [9] 谭建财,范彩伟,宋鹏,等.琼东南盆地中中新统古沟谷和坡折带特征及油气勘探意义[J].油气地质与采收率,2017,24(3):30-36.
TAN Jiancai, FAN Caiwei, SONG Peng, et al.Characteristics of the mid-Miocene paleo ravine-slope break zones in Qiongdongnan basin and its significance for oil-gas exploration [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(3):30-36.
- [10] 淡水,邹颢,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(2):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 & Gas Geology,2016,37(2):304-312.
- [11] 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 Junxing, CHEN Hongde, XIANG Fang.The possibility of rebuilding paleogeomorphology before basin deposition by high-resolution sequence stratigraphy [J].Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition,2003,30(1):76-81.
- [12] 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 Zhihong, WU Mingdong.Technology of recovering ancient geomorphology through sequence stratigraphy—a case study in Take 6th reservoir, Tarim basin [J].Xinjiang Geology,2003,21(3):290-292.
- [13] 李道燧,张宗林,徐晓蓉.鄂尔多斯盆地中部古地貌与构造对气藏的控制作用[J].石油勘探与开发,1994,21(3):9-15.
LI Daosui, ZHANG Zonglin, XU Xiaorong.Paleogeomorphology and paleostructure controlling the gas field in the center of Ordos Basin[J].Petroleum Exploration and Development,1994,21(3):9-15.
- [14] 林红梅.渤海湾盆地车镇凹陷南坡碳酸盐岩分布主控因素[J].石油实验地质,2016,38(6):779-786.
LIN Hongmei.Main controlling factors of carbonate rock distribution on the southern slope of Chechen Sag, Bohai bay Basin [J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(6):779-786.
- [15] 刘晓娟,高飞,冯春艳.靖边东南部前侏罗纪古地貌特征及其对延9油藏的控制作用[J].特种油气藏,2012,19(5):6-11.
LIU Xiaojuan, GAO Fei, FENG Chunyan.Palaeogeomorphology of south-east Jingbian in the pre-Jurassic and its control to reservoir Yan9[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2012,19(5):6-11.

- [16] 韩杰,洪涛,朱永锋,等.轮古油田奥陶系潜山洞穴型储层发育特征及油气分布控制因素[J].油气地质与采收率,2016,23(5):1-8.
HAN Jie, HONG Tao, ZHU Yongfeng, et al. Characteristics of Ordovician buried-hill cave reservoir and controlling factors of petroleum distribution of Lungu oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 1-8.
- [17] 李宗杰,王勤聪.塔北超深层碳酸盐岩储层预测方法和技术[J].石油与天然气地质,2002,23(1):35-41.
LI Zongjie, WANG Qincong. Method and technique for prediction of super-deep carbonate reservoirs in North Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 35-41.
- [18] 刘小平,孙冬胜,吴欣松.古岩溶地貌及其对岩溶储层的控制——以塔里木盆地轮古西地区奥陶系为例[J].石油实验地质,2007,29(3):265-269.
LIU Xiaoping, SUN Dongsheng, WU Xinsong. Ordovician palaeokarst landform and its control on reservoirs in west Lungu region, the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 265-269.
- [19] 田雨,张兴阳,朱国维,等.古地貌对台内滩储层分布及气藏特征的控制作用——以阿姆河盆地台内滩气田为例[J].天然气地球科学,2016,27(2):320-329.
TIAN Yu, ZHANG Xingyang, ZHU Guowei, et al. Controlling effects of paleogeomorphology on intraplateform shoal reservoirs distribution and gas reservoirs characteristics: Taking intraplateform shoal gasfields of the Amu Darya Basin as examples [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 320-329.
- [20] 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 Zhihong. The karst palaeogeomorphology of carbonate reservoir in Tahe oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 522-525.
- [21] 刘文均,郑荣才,李祥辉.龙门山泥盆纪沉积盆地的古地理和古构造重建[J].地质学报,1999,78(2):109-119.
LIU Wenjun, ZHENG Rongcai, LI Xianghui. Reconstruction of palaeogeography and palaeotectonics of a Devonian sedimentary basin in the Longmenshan area, Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 78(2): 109-119.
- [22] МСТИСЛАВСКАЯ Л П.滨里海巨型台向斜东南部油气聚集的古构造条件[J].任俞,译.新疆石油地质,2002,23(4):351-355.
МСТИСЛАВСКАЯ Л П. Ancient structural evolution of hydrocarbon accumulation in southeastern part of giant syncline of Caspian Seashore basin [J]. REN Yu, trans. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(4): 351-355.
- [23] 冯延状,宋维琪,刘仕友.利用地震资料进行古地形恢复方法研究及应用[J].地层学杂志,2007,31(增刊II):527-531.
FENG Yanzhuang, SONG Weiqi, LIU Shiyu. Study and application of ancient landform recovering method using geological data [J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(Supplement II): 527-531.
- [24] 张长宝,罗东坤,徐晟,等.土库曼斯坦阿姆河右岸区块礁滩体地震地质综合识别方法[J].油气地质与采收率,2016,23(4):64-69.
ZHANG Changbao, LUO Dongkun, XU Sheng, et al. Integrated seismic and geologic studies of reef-beach body recognition technology in Amu Darya Right Bank, Turkmenistan [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 64-69.
- [25] ZENG Hongliu, BACKUS M M, BARROW K T, et al. Stratal slicing, Part I: Realistic 3-D seismic model [J]. Geophysics, 1998, 63(2): 502-513.
- [26] ZENG Hongliu, HENTZ T F, WOOD L J. Stratal slicing of Miocene-Pliocene sediments in Vermilion Block50-Tiger Shoal area, offshore Louisiana [J]. The Leading Edge, 2001, 20(4): 408-418.
- [27] ZENG Hongliu. Stratal slicing makes seismic imaging of depositional systems easier [EB/OL]. [2006-06-04]. http://www.searchanddiscovery.net/documents/2006/06036zeng_gc/images/zeng.pdf.
- [28] 王治国,尹成.地震地貌学的发展及应用前景[J].石油地球物理勘探,2014,49(2):410-421.
WANG Zhiguo, YIN Cheng. Progress and prospects of seismic geomorphology [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(2): 410-421.
- [29] 汤良杰,万桂梅,周心怀,等.渤海盆地新生代构造演化特征[J].高校地质学报,2008,14(2):191-198.
TANG Liangjie, WAN Guimei, ZHOU Xinhui, et al. Cenozoic geotectonic evolution of the Bohai basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(2): 191-198.
- [30] 刘和甫,夏义平,殷进垠,等.走滑造山带与盆地耦合机制[J].地学前缘,1999,6(3):121-132.
LIU Hefu, XIA Yiping, YIN Jinyin, et al. Coupling mechanism of strike-slip orogen and basin [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 121-132.
- [31] 刘和甫,汪泽成,熊保贤,等.中国中西部中-新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析[J].地学前缘,2000,7(3):55-72.
LIU Hefu, WANG Zecheng, XIONG Baoxian, et al. Coupling analysis of Mesozoic-Cenozoic foreland basin and mountain system in central and western China [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 55-72.
- [32] 刘和甫,梁慧社,李晓清,等.中国东部中-新生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制[J].地学前缘,2000,7(4):477-486.
LIU Hefu, LIANG Huishe, LI Xiaoqing, et al. The coupling mechanism of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 477-486.

编辑 邹澍滢