

库车-塔北地区中生代关键变革期主要不整合及古隆起地貌特征

吴高奎¹,林畅松^{1,2},刘永福³,刘景彦¹,杨宪彰³,李浩²

[1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)海洋学院,北京 100083;

3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院,新疆库尔勒 841000]

摘要:沉积盆地关键变革期发育的主要不整合及大型古隆起的研究是揭示盆地动力学演化和油气聚集的关键。文中综合分析地震、测井及野外露头等资料,利用不整合削截点和上超点追踪等方法,揭示了库车-塔北地区中生代主要不整合、古隆起地貌特征及其对盆地动力学演化的响应关系。研究表明库车-塔北地区在中生代经历了二叠纪末、三叠纪末、侏罗纪末和白垩纪末4次关键变革,相应产生了TT、TJ、TK和TE 4个区域性角度不整合,并对盆地的构造古地貌产生了重要影响。二叠纪末的变革主要以研究区中部和西部大型古隆起带的发育为特征,不整合TT围绕构造古隆起分布,最大剥蚀量达1 200 m。三叠纪末的变革致使研究区的古隆起带发生大范围隆升,产生了广泛分布的不整合TJ,其最大剥蚀量为400 m。侏罗纪末的构造变革致使研究区中西部再次隆升,不整合TK发育,最大剥蚀量为500 m。白垩纪末的变革主要以研究区西部温宿古隆起的发育为特征,伴生的不整合TE分布范围较小,剥蚀量最大为300 m。研究区中生代的古隆起地貌可划分为高隆区、斜坡区和坳陷区等3个单元,其中斜坡区发育的不整合三角带是形成有利岩性地层圈闭的重要部位。研究表明中生代经历的4次构造变革与盆地周边发生的4次碰撞造山作用有关。

关键词:碰撞造山;变革期;不整合;古隆起地貌;最大剥蚀量;中生代;库车-塔北地区

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characteristics of major unconformities and paleo-geomorphology during the Mesozoic key transformation stages in Kuqa-Tabei area

Wu Gaokui¹, Lin Changsong^{1,2}, Liu Yongfu³, Liu Jingyan¹, Yang Xianzhang³, Li Hao²

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Ocean Science, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

3. Research Institute of Exploration and Development of Tarim Oilfield Branch Company Ltd., Korla, Xinjiang 841000, China]

Abstract: Research on major unconformities and large-scale palaeo-uplifts developed during the key transformation stages in sedimentary basins is key to revealing the basin dynamics evolution and hydrocarbon accumulation. Based on the integrated analysis of seismic, logging and outcrop data, we demonstrated the characteristics of the Mesozoic major unconformities and palaeo-geomorphology, as well as how they are influenced by the dynamics evolution of Kuqa-Tabei basins through tracking unconformity truncation and onlap points, etc. Results show that the study area in the Mesozoic underwent one four key transformation stages, namely the Late Permian, Late Triassic, Late Jurassic, Late Cretaceous stages; in turn four regional angular unconformities, namely TT, TJ, TK and TE, which have brought significant impact on the basinal tectonic palaeo-geomorphology. The transformation occurring at the Late Permian was mainly characterized by the development of large-scale palaeo-uplift belts in the central and western parts of the study area, and the unconformity TT was mainly distributed around the palaeo-uplifts with the maximum denudation thickness of 1 200 m. The tectonic movement of the Late Triassic resulted in a significant reactivation of the palaeo-uplift belts in the study area, and the unconformity TJ produced is of wide range with the maximum denudation amounting to 400 m. The tectonic movement taking place in the Late Jurassic resulted in another stage of uplifting and denudation in the central and western of the study area, and

收稿日期:2018-10-01;修订日期:2019-01-11。

第一作者简介:吴高奎(1989-),男,博士,矿产普查与勘探。E-mail:geo.vvu@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41130422);中央高校基本科研业务费优秀导师基金项目(2-9-2016-133)。

consequently the unconformity TK was developed with the maximum denudation of 500 m. The transformation of the Late Cretaceous is mainly characterized by the development of the Wensu palaeo-uplift at the western margin of the study area, and its associated unconformity TE is of limited distribution with the maximum denudation amounting to 300 m. Three geomorphologic units are recognized in the Mesozoic palaeo-highs, that is the uplift high, slope and depression areas. Around the slope area formed unconformity triangle zones, which are favorable for the development of litho-stratigraphic traps. In addition, it's believed that the four collisional orogeneses occurring around the basins had driven the formation of four transformation stages in the Mesozoic.

Key words: collisional orogenesis, transformation, unconformity, palaeo-geomorphology, maximum denudation thickness, Mesozoic, Kuqa-Tabei area

塔里木盆地是我国最大的、含油气资源丰富的典型叠合盆地^[1]。从震旦纪开始,在漫长的地质历史演化过程中,该盆地先后经历了多期次的构造变革,发育有一系列的构造不整合面及大型古隆起带,形成了复杂的盆地结构样式。多年的石油勘探结果已表明,盆地中大部分的油气聚集与盆地关键变革期所发育的不整合、古隆起的分布有着密切的关联。因此,对主要的不整合及古隆起的发育和分布特征加以研究,是揭示沉积盆地动力学演化及油气聚集的关键,现已发展成为国内外相关学科领域研究的热点问题^[2-6]。

库车-塔北地区是塔里木盆地最重要的油气勘探目标之一,诸多前人的研究^[7-12]表明,该地区在中生代期间发育有一系列构造成因的角度不整合和大型古隆起。然而,这些研究的大多数目前并未涉及到对库车-塔北地区中生代主要不整合的整体分布特征、剥蚀特征以及古隆起的发育、演化过程展开系统性研究。另外,角度不整合一般被认为是构造隆升作用的产物^[6],但其与盆地周边碰撞造山作用的响应关系,揭示尚少。

本文是基于对研究区骨架二维地震剖面、局部三维地震剖面进行详细解释,结合钻井及野外露头等资料分析,采用不整合削截点及上超点追踪等方法,探讨库车-塔北地区中生代主要不整合、古隆起地貌特征及其对盆地动力学背景的响应关系,其目的在于为塔里木盆地的动态演化分析及有利储层分布预测提供一定指导。

1 地质背景及构造-地层序列

塔里木盆地位于中国西北部,盆地平面呈菱形,面积达 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$,四周被南天山、昆仑山和阿尔金山所环绕。作为中国最典型、最大的叠合盆地,塔里木盆地的研究及油气勘探工作,历来为全球的业内、外人士所瞩目^[13]。二叠纪以后,塔里木盆地结束了海相沉积期并正式进入了内陆盆地演化阶段,盆地的地形基本上继承了海西运动时期形成的南北隆坳相间、东西分

块的地貌格局,整个盆地可分为三隆四坳7个构造单元,即库车坳陷、塔北隆起、北部坳陷、中央隆起、塔西南坳陷、塔南隆起和东南坳陷^[1]。本文的研究区主要包括塔北隆起和库车坳陷(图1)。

塔北隆起,北接库车坳陷,南邻北部坳陷,长400 km,宽80 km,其最初形成于早古生代^[1],经历了漫长的地质演化过程,发育有复杂的地质构造,目前主体为第四系覆盖^[11]。区域性重力异常资料表明,塔北隆起带在中生代时期分为温宿、西秋、新和和牙哈等4个次级古隆起^[12]。塔北隆起的含油气系统包括寒武-奥陶系含油气系统和三叠系-侏罗系含油气系统。塔北隆起具有重要的理论研究意义,其对塔里木盆地的油气勘探而言更是不可或缺,多年来塔北隆起一直吸引着众多学者的目光^[11,14-16]。

库车坳陷,位于塔里木盆地最北缘,其东起库勒、西至温宿凸起、南邻塔北隆起、北接天山南麓,整体呈EW向展布,长470 km,宽40~90 km^[12]。库车坳陷的发育演化经历了多期次的构造变革,最终在喜马拉雅运动中定格。二叠纪末,继厚层磨拉石沉积之后,库车坳陷进入了封闭的挤压挠曲型盆地发展阶段,拉开了中生代前陆盆地发展的序幕。库车坳陷之中连续沉积了一套厚达数千米的中生界陆相沉积。作为盆地油气勘探及盆山耦合解析的重要研究对象,多年来业内人士对库车坳陷的关注度有增无减^[17-20]。

综合分析地震与测井等数据,建立了研究区塔北地区中生代的构造-地层序列(图2)。在区内中生界中识别出TT、TJ、TK与TE4个区域性角度不整合界面以及TK_{1bs}一个平行不整合界面,据此可将中生界划分为4个二级层序,大体与三叠系(T)、侏罗系(J)、白垩系卡普沙良群(K_{1kp})及白垩系巴什基奇克组(K_{1bs})相当。区内的下三叠统俄霍布拉克组底部为一套粗粒辫状河三角洲沉积,与前三叠系呈高角度削截不整合接触。中三叠统克拉玛依组及上三叠统黄山街组均主要为粗粒辫状河三角洲沉积。区内的侏罗系仅

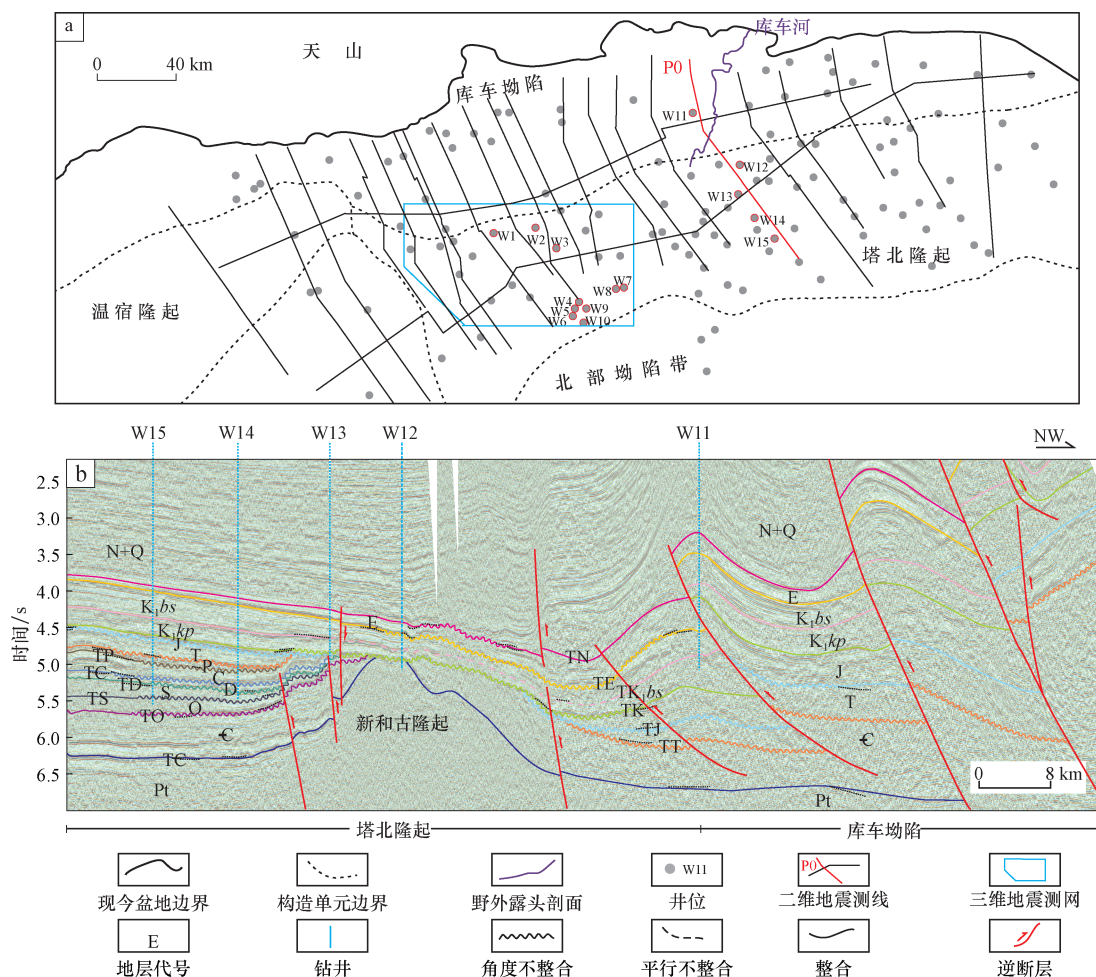


图1 库车-塔北地区主要构造单元(a)和二维地震剖面P0(剖面位置见图1a)上主要不整合及古隆起的发育(b)

Fig. 1 Main tectonic units in Kuqa-Tabei area(a) and the development of major unconformities and palaeo-uplifts on 2-D seismic profile P0(b) (see Fig. 1a for the location of profile P0)

残留下侏罗统阳霞组,残余厚度为0~300 m,主要发育粗粒辫状河三角洲沉积,与下伏三叠系呈微角度不整合接触。区内的白垩系缺失中白垩统和上白垩统,残余的下白垩统以平行不整合界面TK₁bs为界分为卡普沙良群与巴什基奇克组,其中卡普沙良群残余厚度为0~390 m,自下而上又分为亚格列木组、舒善河组和巴西改组。亚格列木组发育辫状河三角洲沉积,与下伏侏罗系明显呈角度不整合接触。舒善河组主要发育滨浅湖泥质粉砂岩,巴西改组则主要发育三角洲粉砂岩。巴什基奇克组残余厚度为0~700 m,主要为辫状河三角洲细砂岩沉积。

2 研究资料及方法

研究中运用的资料数据包括研究区23条二维地震剖面、塔北西部三维地震、近150口单井及库车河野外露头(图1)。

不整合的组合特征和剥蚀量分布研究,作为不整

合研究的重要内容,可为再造古隆起地貌和寻找岩性地层圈闭提供重要信息。当前主要是基于钻井资料,采用镜质体反射率法、古孔隙或声波测井等方法用以估算不整合剥蚀量^[6,21]。然而,因可用的钻孔数据有限且埋深过大,采用上述方法研究不整合剥蚀量分布比较困难。本次研究主要是在地震剖面上对不整合面进行层拉平,识别不整合面下伏残余地层的初始削截点并基于其几何性质外延恢复出“末期上超点”以建立起下伏地层原始的上超尖灭模型,最后结合钻井数据标定出该不整合的剥蚀量。不整合的剥蚀带范围,即为该不整合面上覆层序沉积初期的古隆起范围。层序沉积末期的古隆起范围,则由不整合剥蚀量估算时所恢复的“末期上超点”来界定。依据古隆起的初期和末期范围,可将古隆起地貌划分为高隆区、斜坡区和坳陷区3个单元(图3)。高隆区在整个层序沉积时期持续剥蚀供源,对应层序沉积末期的古隆起范围,该部位发育有不整合叠合带。斜坡区是上超不整合三角带及削截不整合三角带的发育位置。坳陷区对应平行不整合/整合带。

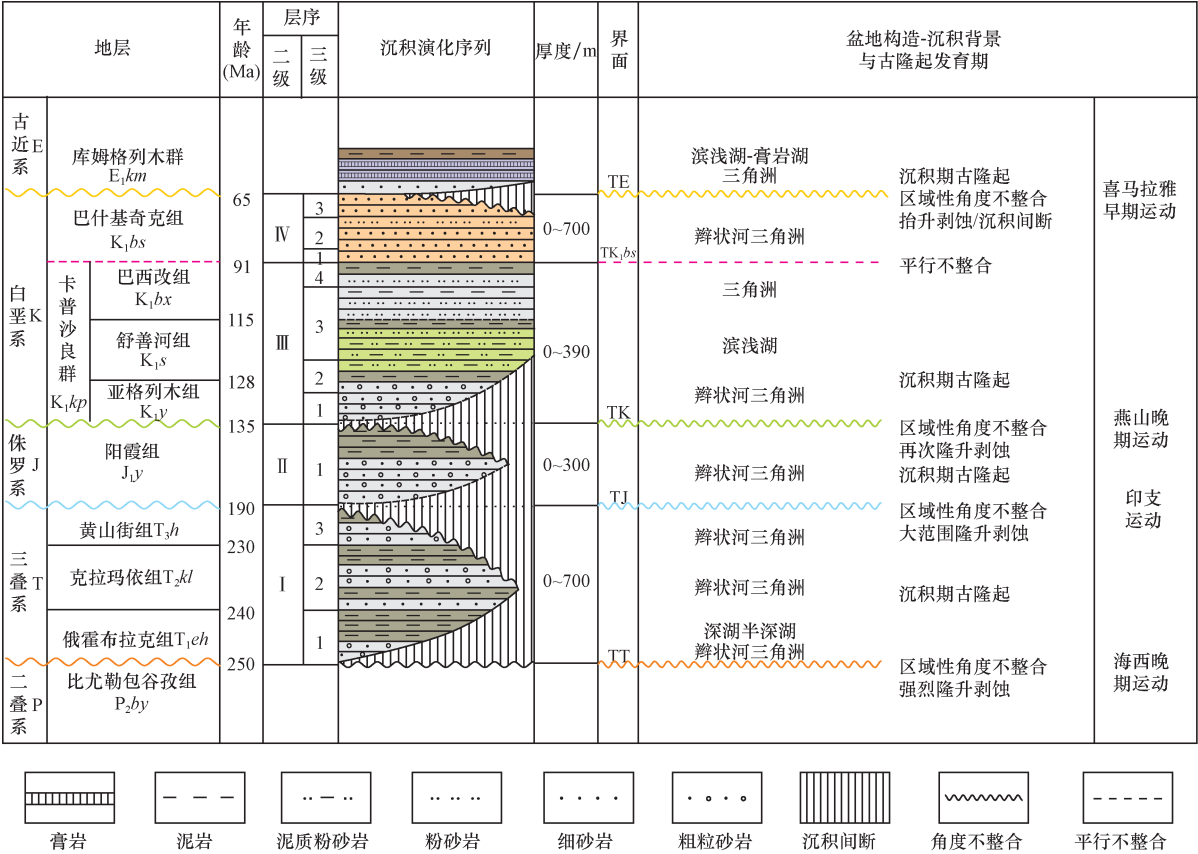


图 2 塔北地区中生代构造-地层序列

Fig. 2 The Mesozoic tectono-stratigraphic sequence of Tabei area

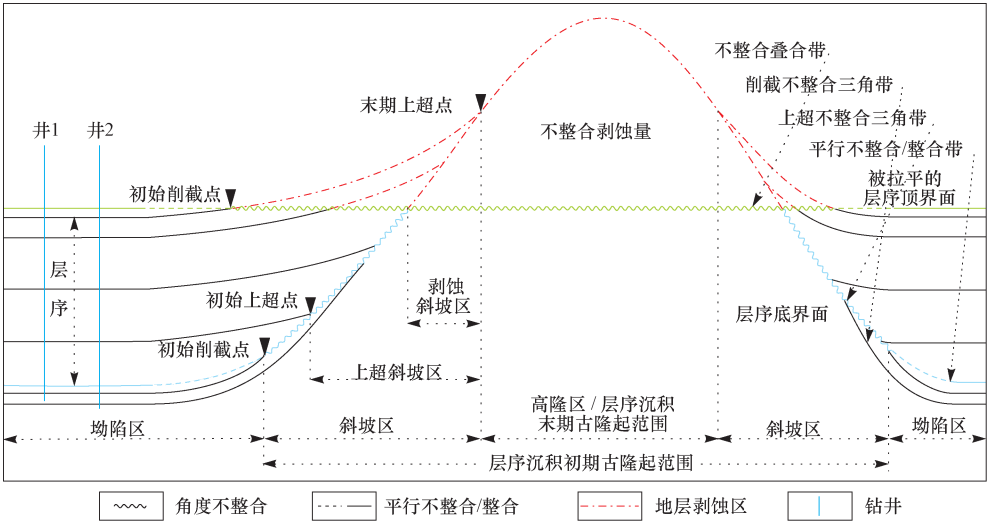


图 3 不整合剥蚀量计算、古隆起地貌单元划分方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing the calculation of unconformity denudation amount and division of palaeo-geomorphology units

3 主要不整合结构特征和剥蚀量分布

基于对研究区 23 条二维地震剖面、塔北西部三维地震、近 150 口单井及库车河野外露头等资料的综合分析,在中生界内识别出 4 个主要的区域性高角度至低角度不整合(TT,TJ,TK 和 TE),分别形成于二叠纪

末、三叠纪末、侏罗纪末和白垩纪末(图 4,图 5)。相对高角度的不整合面、下伏地层的变形或铰链、伴生的逆断层或褶皱构造,共同表明不整合的发育主要是与构造挤压、隆升有关^[3]。

3.1 二叠系顶不整合(TT)

不整合 TT 可区域性追踪,在研究区中部,尤其是

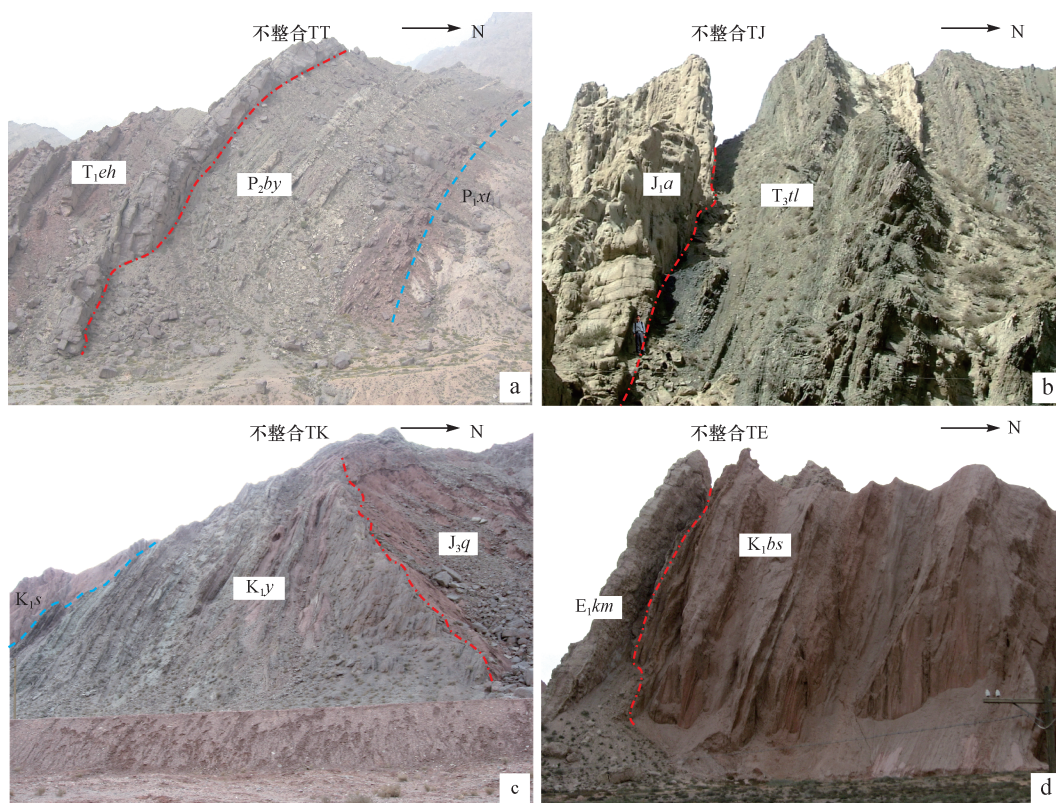


图4 库车-塔北地区中生代主要不整合接触关系(库车河西岸野外露头剖面,位置见图1)

Fig. 4 Contact pattern of the Mesozoic major unconformities observed on outcrop profiles, west bank of the Kuqa River(see Fig. 1 for the location of the Kuqa River)

a. TT不整合;b. TJ不整合;c. TK不整合;d. TE不整合

P₂by. 上二叠统比尤勒包谷孜组,顶部主要为杂色含砾粗砂岩;T₁eh. 下三叠统俄霍布拉克组,底部为杂色砾岩;T₃tl. 上三叠统塔里齐克组,顶部为暗色泥岩;J₁a. 下侏罗统阿合组,主要为灰白色砾岩、粗砂岩;J₃q. 上侏罗统齐古组,主要为红色泥岩;K₁y. 下白垩统亚格列木组,主要为杂色中砾岩;K₁bs. 下白垩统巴什基奇克组,主要为棕红色细砂岩;E₁km. 古近系库姆格列木群,主要为灰色底砾岩

塔北西部三维工区内的许多地震剖面上,不整合面之下存在有明显的高角度削截现象(图5,图6a)。测井资料表明,不整合面TT广泛发育于上覆的下三叠统俄霍布拉克组与下伏的上二叠统沙井子组之间,局部见三叠系直接覆盖于石炭系、泥盆系、志留系,甚至奥陶系之上^[22]。在库车河西岸野外露头上,不整合面TT上下的岩性突变清晰可见,表现为下三叠统俄霍布拉克组杂色砾岩直接上覆于中二叠统比尤勒包谷孜组杂色含砾粗砂岩(图4a)。

对大量的地震剖面进行精细解释,发现不整合TT在剖面上和平面上具有一定的组合样式和分布特征。从古隆起构造高部位向隆起斜坡、盆地拗陷区过渡,不整合TT的组合分布样式可分为高隆区的不整合叠合带、斜坡区的不整合三角带以及拗陷区的平行不整合/整合带(图5)。在塔北地区,可见不整合TT对下伏二叠系的强烈削蚀,局部地区甚至削蚀寒武系,使得不整合TT与古生代所发育的多个区域性角度不整合发生叠合(图1b,图5)。不整合TT的剥蚀量估算结果表

明,不整合面TT的剥蚀带主要分布在研究区的西部及中部地区,占地面积约34 880 km²(图8a)。不整合TT剥蚀明显、剥蚀量相对较厚的剥蚀带主要位于温宿、西秋、新和及牙哈等四个次一级古隆起的核部。在新和古隆起西南部的英买力地区,其剥蚀量超过1 000 m,剥蚀地层甚至包括奥陶系灰岩(图6b)。不整合TT的分布范围之广、剥蚀量之大以及原始地层局部有平行褶皱构造发育(图5a),均表明在二叠纪末,研究区因受构造应力挤压而经历了一次非常强烈的构造隆升、剥蚀作用,研究区中部发育有大型古隆起带^[7]。

3.2 三叠系顶不整合(TJ)

不整合TJ形成于三叠纪末,该不整合可通过观察多条地震剖面上沿古隆起带呈现的高角度的削截现象来识别(图5),可区域性追踪。钻井资料显示,不整合TJ是上覆下侏罗统阳霞组辫状河三角洲砂砾岩、粗砂岩与下伏上三叠统黄山街组滨浅湖泥岩的分界线^[23],不整合面之下缺失上三叠统塔里齐克组,不整合面之

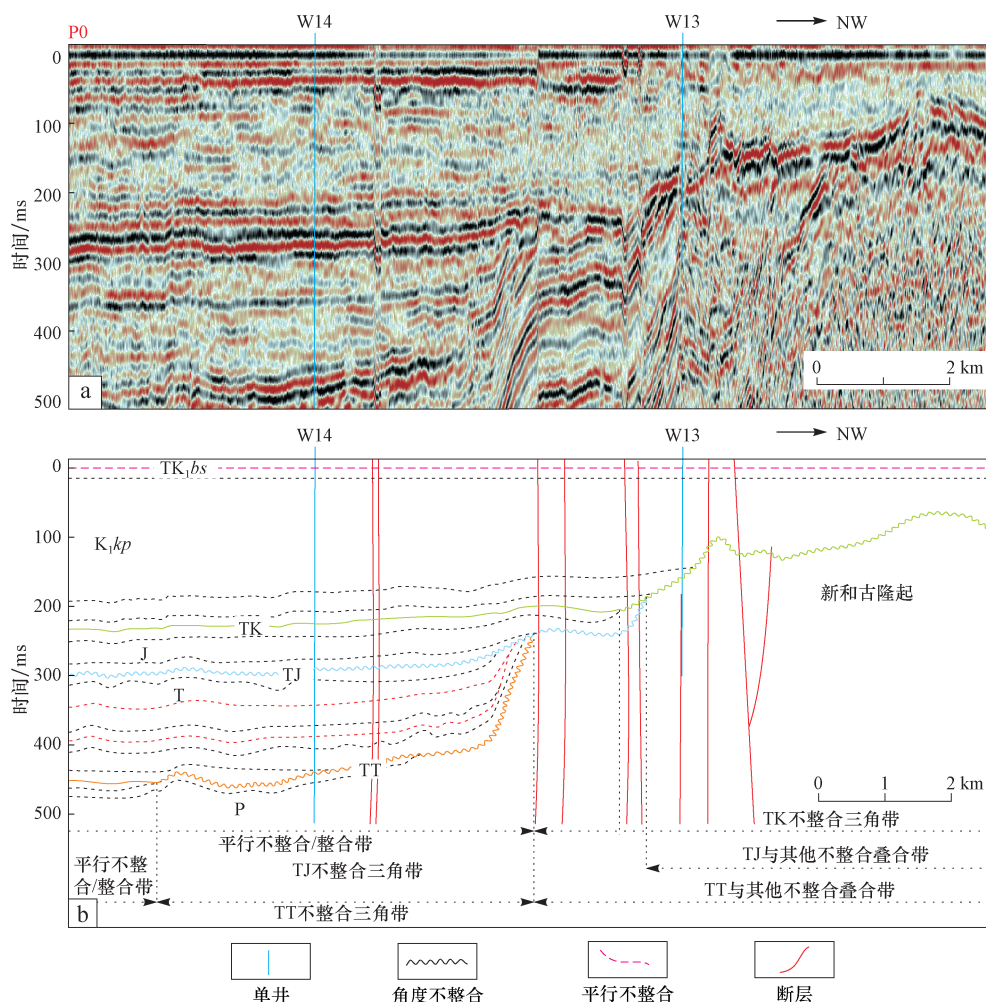


图5 库车-塔北地区中生代主要不整合结构特征(剖面位置见图1中P0)

Fig. 5 Structural characteristics of the Mesozoic major unconformities in Kuqa-Tabei area (see Fig. 1 for the location of seismic profile P0)

上缺失下侏罗统阿合组。在库车河西岸野外露头上,不整合面 TJ 上下的岩性突变亦清晰可见,表现为下侏罗统阿合组灰白色砾岩、粗砂岩与上三叠统塔里齐克组暗色泥岩呈现直接接触(图 4b)。

大量的地震剖面的精细解释结果发现,从古隆起构造高部位向隆起斜坡、盆地坳陷区过渡,不整合 TJ 的组合分布样式也可划分为高隆区的不整合叠合带、斜坡区的不整合三角带(图 5)以及坳陷区的平行不整合/整合带。研究区局部地区,可见侏罗系直接覆盖于前三叠系之上,使得不整合 TJ 与不整合 TT 以及古生代所发育的多个区域性角度不整合发生叠合(图 1b,图 7)。不整合 TJ 的剥蚀厚度图表明,其剥蚀带主要位于研究区的西部及中部地区,整体呈东西向展布,占地约 41 680 km²(图 8b)。剥蚀量相对较厚的剥蚀带主要位于温宿-西秋、新和及牙哈古隆起的核部,其中在沿 NE 走向的新和隆起的挤压隆起高部位,其最大剥蚀厚度可达 400 m。作为研究区中生代期间发育的分布范围最广的不整合,不整合 TJ 的发育表明,在三

叠纪末—侏罗纪初,研究区发生了一次规模较大的构造变革,该事件致使古隆起(尤其是温宿古隆起)的范围明显增大。

3.3 侏罗系顶不整合(TK)

不整合 TK 形成于侏罗纪末,在塔北西部三维工区地震剖面上,可见 TK 不整合面之下呈现高角度的削截现象(图 5)。钻井资料表明,在塔北地区,其下伏侏罗系均缺失中侏罗统及上侏罗统,仅残余下侏罗统阳霞组,局部地区可见上覆白垩系卡普沙良群直接覆盖于三叠系、二叠系、志留系,甚至奥陶系之上^[24]。在库车河西岸野外露头上,不整合面 TK 之上为下白垩统卡普沙良群底部的亚格列木组杂色中砾岩,与不整合面之下的上侏罗统齐古组红色泥岩直接接触,有着明显的岩性突变(图 4c)。

多条地震剖面的精细解释表明,在研究区的中部和西部,从隆起区向盆地坳陷区过渡,不整合 TK 的组合样式分布可划分为隆起斜坡区的不整合三角带以及

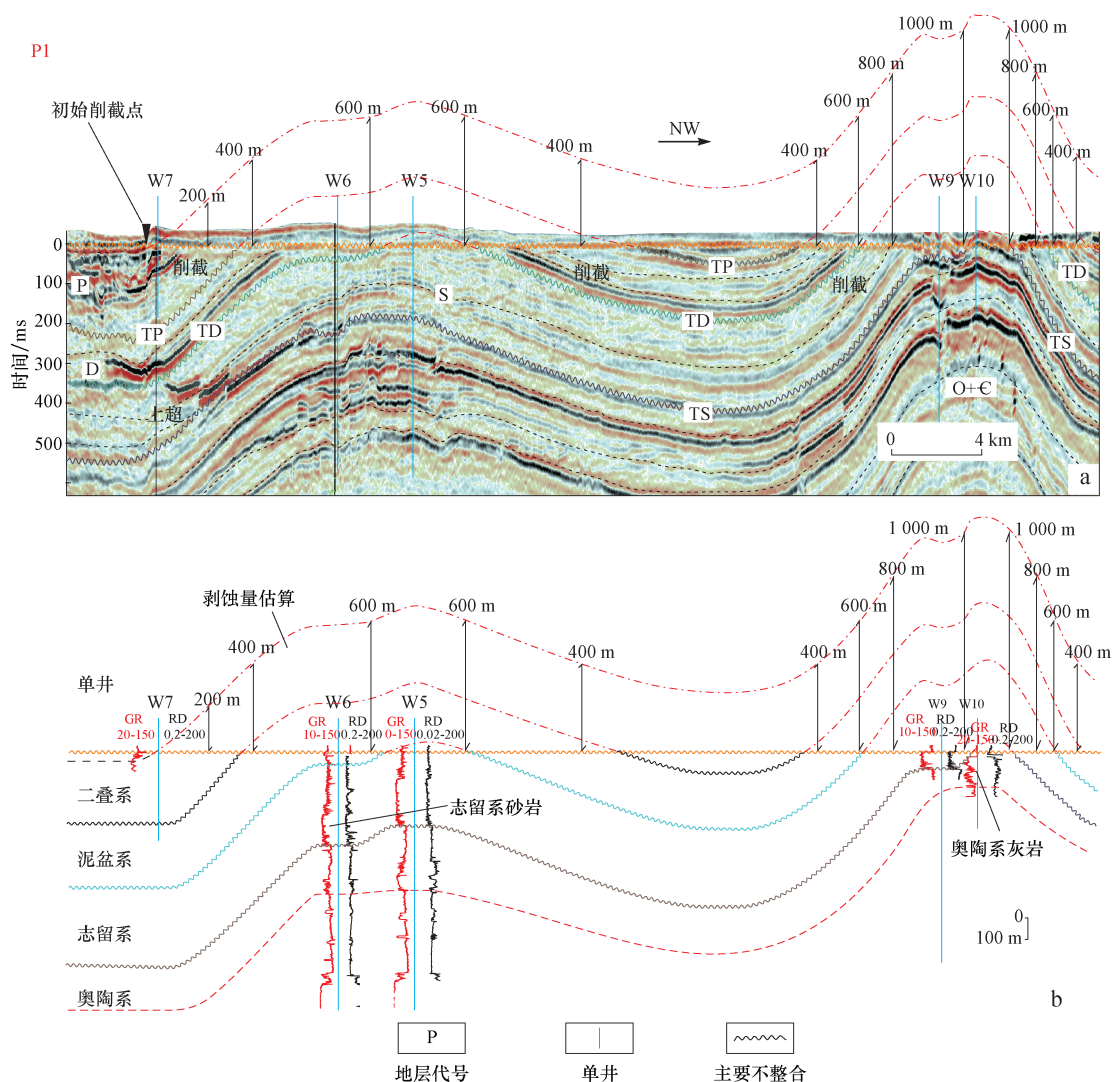


图6 库车-塔北地区地震剖面 P1 上不整合 TT 的剥蚀量估算(a)和连井剥蚀量标定(b)(剖面 P1 位置见图 8a)

Fig.6 Estimation of denudation thickness of the unconformity TT on seismic profile P1(a) and the calibrated borehole logging profile(b) in Kuqa-Tabei area(see Fig.8a for the location of seismic profile P1)

拗陷区的平行不整合/整合带(图5)。局部地区(如新和古隆起顶部)可见白垩系直接上覆于前寒武纪盆地基底之上,使得不整合 TK 与不整合 TT, TJ 以及古生代所发育的多个区域性角度不整合发生叠合(图1b,图5)。不整合 TK 的剥蚀厚度图表明,剥蚀区带主要分布在研究区西部的温宿-西秋地区、中部的新和地区以及东北部的牙哈地区,占地面积约为 3 3024 km²(图8c)。在牙哈古隆起的核部,其剥蚀带呈东西走向且剥蚀量最大,可达 500 m。较之不整合 TJ,不整合 TK 的剥蚀带分布范围较小,古隆起范围也小于侏罗纪初的古隆起范围,这可能表明侏罗纪末的构造变革强度较弱。

3.4 白垩系顶不整合(TE)

不整合 TE 形成于白垩系巴什基奇克组沉积末

期,其在地震上表现为低角度的削截现象(图7a)。钻井资料显示,其上覆地层为古近系库姆格列木群滨浅湖-膏盐湖相沉积^[25],下伏地层为大套下白垩统巴什基奇克组辫状河三角洲砂岩,不整合面之下普遍缺失中白垩统及上白垩统,且存在巴什基奇克组遭受剥蚀与减薄现象。在库车河西岸野外露头上,不整合面 TE 上下亦存在明显的岩性突变,表现为古近系库姆格列木群灰色底砾岩上覆于下白垩统巴什基奇克组棕红色细砂岩(图4d)。

在研究区西部,不整合 TE 的组合样式可划分为隆起高隆区的不整合叠合带以及隆起斜坡区的不整合三角带,并在研究区中部和东部地区过渡为平行不整合/整合带(图5)。相比于不整合 TT, TJ 与 TK,不整合 TE 的剥蚀带分布范围偏小,占地仅为 18 032 km²(图8d)。剥蚀显著区位于研究区西部的温宿古隆起

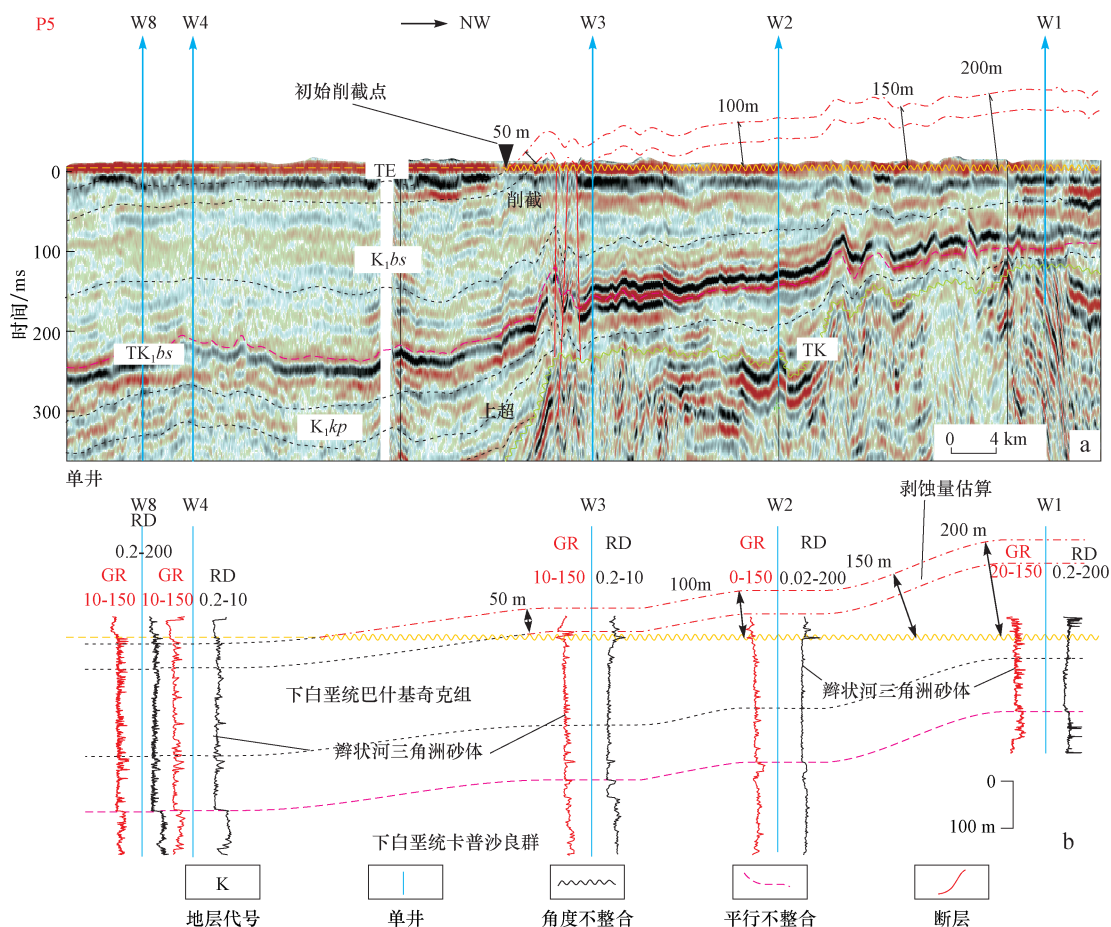


图7 库车-塔北地区地震剖面 P5 上不整合 TE 的剥蚀量估算(a)和连井剥蚀量标定(b) (剖面 P5 位置见图 8d)

Fig. 7 Evaluation of denudation thickness of the unconformity TE on seismic profile P5 (a) and the calibrated borehole logging profile (b) in Kuqa-Tabei area (see Fig. 8d for the location of seismic profile P5)

核部,剥蚀量最厚约为 300 m。在位于隆起东斜坡的 W1 井区,剥蚀厚度则为 200 m,剥蚀地层均为下白垩统巴什基奇克组(图 7b)。角度不整合 TE 的发育意味着,白垩纪末—古近纪初,研究区发生了新一期的构造隆升与剥蚀事件。

4 古隆起地貌特征

基于主要不整合的组合特征及剥蚀量分布研究结果,对研究区三叠系、侏罗系、白垩系卡普沙良群及白垩系巴什基奇克组 4 个二级层序沉积初期的古隆起范围及沉积末期的古隆起范围进行了恢复并划分了古地貌单元(图 9)。

4.1 古隆起发育和分布

不整合 TT, TJ, TK 和 TE 的结构特征和剥蚀分布表明,中生代期间,研究区塔北古隆起带是由温宿、西秋、新和和牙哈等次级古隆起所组成。

三叠系沉积初期,温宿、西秋、新和和牙哈 4 个次

级古隆起呈现连通,近东西向展布。三叠系沉积末期,4 个次级古隆起南北分化为 2 排、东西向呈雁列式展布,塔北隆起带的范围减小,在地震剖面上表现为三叠系沿古隆起不断上超(图 9a)。侏罗系沉积初期,4 个次级古隆起再次实现连通,塔北古隆起带的范围较之三叠系沉积末期有显著加大,表明在三叠纪末,研究区曾发生过一次大范围的构造隆升作用。侏罗系沉积末期,4 个次级古隆起虽仍保持连通状态,但各个次隆的范围均有所减小(图 9b),在地震剖面上可见侏罗系上超于古隆起之上。白垩系卡普沙良群沉积初期,温宿、西秋、新和和牙哈古隆起仍然连通控盆。在白垩系卡普沙良群沉积末期,西秋、新和和牙哈 3 个次级古隆起均被白垩系卡普沙良群超覆淹没。此时,温宿古隆起的范围虽有所减小,但依旧处于暴露与剥蚀状态(图 9c)。白垩系巴什基奇克组沉积时期,温宿古隆起的范围持续缩小。但在古近系沉积初期,温宿古隆起的范围再次增大(图 9d),系因白垩纪末的构造变革事件所致。

总体而言,从三叠纪末到侏罗纪初,塔北古隆起带经历了一次剧烈隆升,隆起范围明显增大;从侏罗纪到

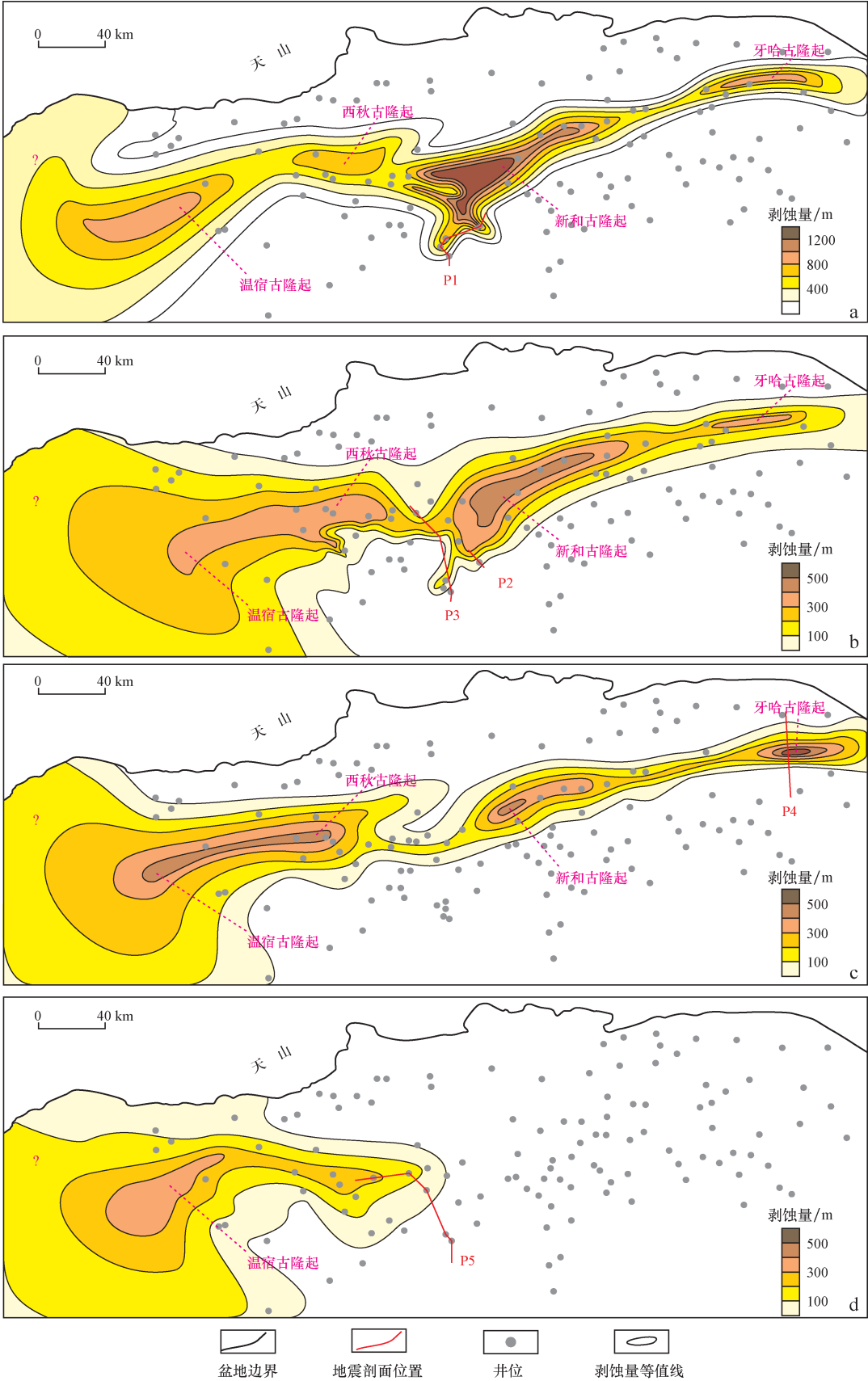


图 8 库车 - 塔北地区不整合剥蚀量分布

Fig. 8 Spatial variation of erosion thickness along the unconformities TT(a), TJ(b), TK(c) and TE(d) in Kuqa-Tabei area
a. TT 不整合; b. TJ 不整合; c. TK 不整合; d. TE 不整合

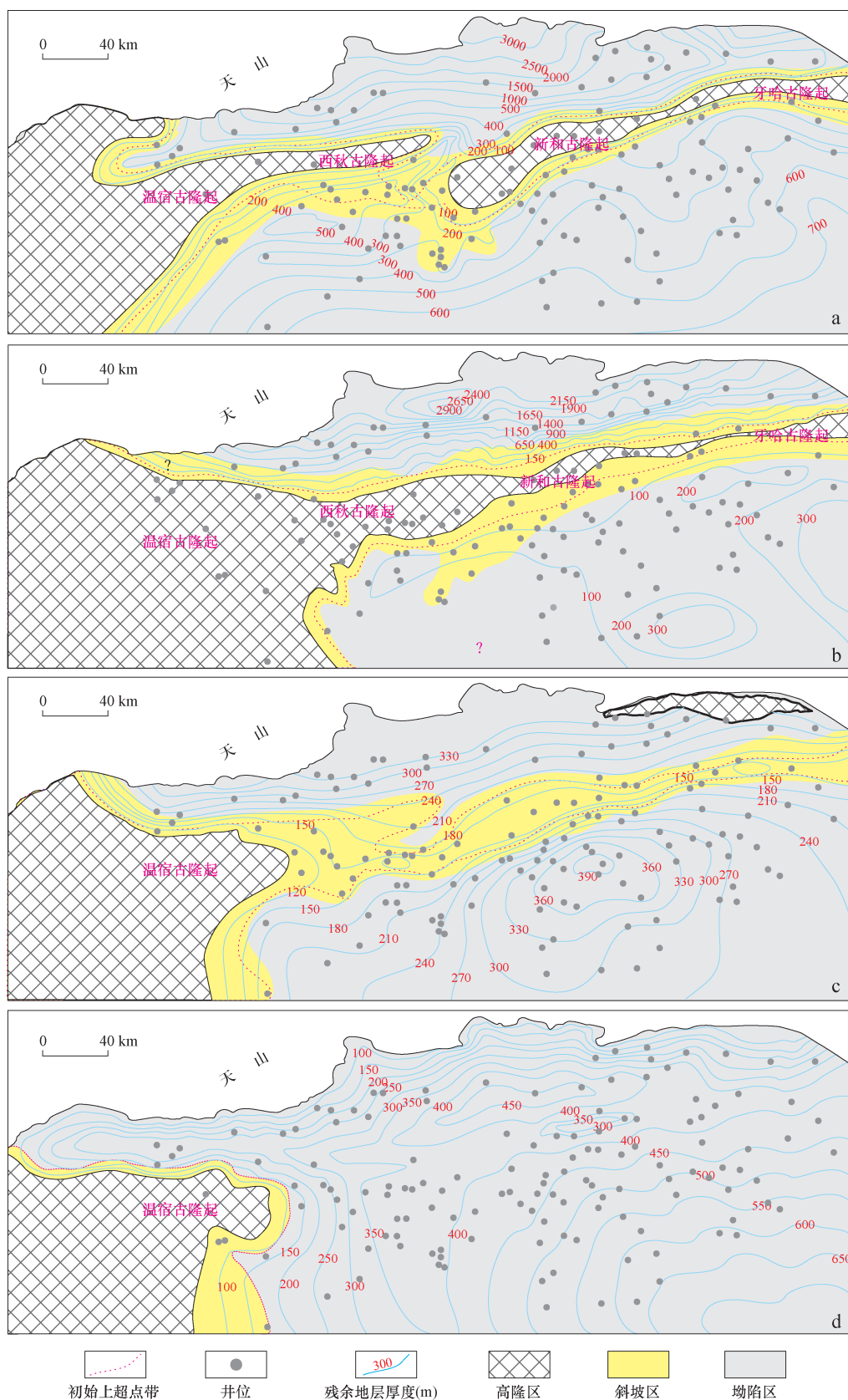


图9 库车-塔北地区三叠纪(a)、侏罗纪(b)、白垩系卡普沙良群沉积时期(c)和白垩系巴什基奇克组沉积时期(d)古地貌单元划分

Fig.9 Paleo-geomorphology units' division during the sedimentary periods of the Triassic (a), Jurassic (b), Cretaceous Kapushaliang Group (c) and Cretaceous Bashijiqi Formation (d) in Kuqa-Tabei area

白垩纪,塔北古隆起带的范围整体呈缩小趋势;白垩纪末,除研究区西侧的温宿古隆起持续暴露、剥蚀以外,中部和东部地区的西秋、新和、牙哈等古隆起均已被沉积地层超覆、淹没。

4.2 古地貌特征

三叠纪—侏罗纪,塔北古隆起带东西展布、南北控盆,研究区总体呈现出隆坳相间的构造格局,由南向北依次为北部坳陷、塔北隆起和库车坳陷,三者均近东西向展布。古隆起北陡南缓,斜坡区大体环隆起高隆区分布,隆起北侧的斜坡区范围窄于南侧。原始地层厚度方面,距离古隆起越远,地层厚度相对较厚。即坳陷区地层发育较厚,斜坡区次之。在古隆起带北部库车坳陷,三叠系局部厚达3 000 m,侏罗系局部厚达2 900 m。在古隆起带南侧的北部坳陷,三叠系厚度一般只有几百米(图9a),侏罗系厚度则在300 m以内(图9b)。

白垩系卡普沙良群沉积末期,先前“凹-凸-凹”的构造格局被打破,研究区的古地貌呈现出“西高东低”的新形态。该时期,由于西秋、新和和牙哈三大次隆被沉积地层实现超覆淹没,隆起斜坡区的发育范围较大。原始地层厚度方面,在古隆起带北侧的库车坳陷,距离古隆起越远,地层发育相对较厚。在古隆起带南侧的北部坳陷,古隆起供源有限,来自南部(大陆蚀源区)的物源占优,地层的沉降中心分布在新和古隆起的东南部,地层厚度呈环状分布,厚度普遍在400 m以内。受地形控制,古隆起斜坡区的地层厚度变化较快,坳陷区地势较平坦,地层厚度变化较慢(图9c)。

白垩系巴什基奇克组沉积末期,研究区的古地貌仍呈“西高东低”。温宿古隆起持续暴露、剥蚀在研究区西部,其斜坡区围绕高隆区分布,南坡发育范围大于北坡。原始地层厚度方面,在温宿古隆起附近及北部造山带,距离隆起或造山带越远,发育地层相对较厚。在巴什基奇克组沉积初期,新和古隆起作为水下低隆,仍然控制沉积。围绕新和水下低隆,发育有一个“内薄外厚”的环状厚度异常区,地层厚度在300 m左右。在研究区的东南角,发育地层沉降中心,朝东南方向地层逐渐加厚,梯度变化较缓,发育地层最厚为700 m。另外,在库车坳陷中部,发育有物源主要来自北部山前带的地层沉降中心,发育地层最厚达450 m(图9d)。

4.3 古隆起斜坡区不整合三角带与地层圈闭

已有的石油勘探实践表明,研究区发现的中生代油气藏大多集中在古隆起附近,而且和构造不整合形成的岩性地层圈闭密切相关^[13,26-27]。多期次的构造

隆升致使古隆起-古斜坡区发生多旋回的剥蚀、沉降,隆起斜坡区由主不整合面与次不整合面所构成的不整合三角带正是形成有利的岩性地层圈闭的重要场所。从不整合的构成样式上,不整合三角带可分为削截不整合三角带和上超不整合三角带^[3]。削截不整合三角带是由主不整合面削蚀下伏的次一级不整合所成,上超不整合三角带则是由次一级的不整合面沿主不整合面上超而成(图3)。

一期构造隆升末期,古隆起强烈剥蚀供源,初始削截点以下的斜坡区向坳陷区过渡的斜坡边缘常常广泛发育低位体系域粗碎屑沉积体(如三角洲或低位扇等)。随着构造沉降和水侵作用的发生,水侵早期的碎屑沉积体,开始沿古隆起不断上超发育,这种碎屑沉积物性较好,多是盆内重要的储集体。随着水侵范围的扩大,水侵晚期古隆起主体被沉积地层上超淹没或被完全超覆淹没,可能发育深水泥岩或泥灰岩沉积并覆盖于水侵早期所发育的碎屑体系之上,形成良好的盖层条件。因此,水进期在古隆起斜坡区广泛发育的楔状不整合上超三角带,是岩性地层圈闭形成的绝佳场所之一。另外,斜坡区不整合面之下的削截不整合三角带也是形成有利储层、圈闭的重要场所,常发育削蚀不整合油气藏。

以研究区白垩系的有利区带预测为例进行详细说明。研究区白垩系卡普沙良群自下而上,主要发育亚格列木组辫状河三角洲、舒善河组滨浅湖及巴西改组三角洲沉积,白垩系巴什基奇克组则主要发育辫状河三角洲沉积(图2)。在TK不整合界面之上,亚格列木组辫状河三角洲砂体向古隆起斜坡区的上超尖灭可作为良好的储集体,其与上覆舒善河组滨浅湖泥岩沉积,构成了良好的储盖组合。另外,向古隆起斜坡区上超尖灭的巴西改组楔状三角洲砂体以及在古隆起斜坡区发育的舒善河组滨浅湖透镜状滩坝砂体也是形成岩性地层油气藏的重要场所^[24]。在TE不整合界面之下,因遭受削蚀而上倾尖灭的白垩系巴什基奇克组辫状河三角洲砂体可作为优质储层,其上覆的古近系膏-泥岩沉积则可作为优质盖层。目前研究区白垩系各组均有油气藏发现,且主要是分布在巴西改组和巴什基奇克组的岩性地层油气藏^[24]。

5 构造背景讨论

在区域性的构造背景下对盆地抬升加以研究,认为中生代期间盆地周边发生的4次大规模碰撞造山作用对应着盆地的4期关键变革期,并造就了研究区主

要不整合的发育以及大型古隆起的隆升。

发生在二叠纪末的海西晚期运动,作为研究区中生代发生的最为强烈的一次构造运动^[28],对研究区乃至整个塔里木盆地的构造演化具有重要影响。随着盆地北部古南天山洋与盆地南部古西昆仑洋的最终闭合,塔里木古陆块成为欧亚大陆的南缘并进入了中生代陆内演化阶段^[29-30]。南天山的放射虫化石年代、蛇绿岩同位素定年结果均证实,在二叠纪末,由于南天山古洋盆的闭合,伊犁-中天山地块向南与塔里木板块发生碰撞,使得南天山造山带在塔里木盆地北缘迅速崛起并完成褶皱冲断成山^[31-32]。在区域性挤压和构造载荷的作用下,研究区下伏前三叠系发育一系列逆冲、褶皱构造并经历隆升、剥蚀^[32-33],三叠系向隆起区上超充填并以不整合接触的形式直接覆盖于二叠系、泥盆系、志留系,甚至奥陶系之上,角度不整合 TT 产生。

三叠纪末的印支运动是塔里木盆地中生代发展过程中的又一次重大转折。印支运动期间,随着古特提斯洋的俯冲、闭合,羌塘地块与塔里木板块南缘发生碰撞^[1,34],致使昆仑山造山带急剧隆升并于山前产生大规模的 A 型俯冲^[35],造成北东向的挤压应力。西昆仑地区 244~230 Ma 的闪长岩脉和花岗岩脉的测试分析结果与之相符^[36]。印支运动在研究区的另一个表现形式在于,因哈萨克斯坦板块的进一步挤压,天山山脉在 220~180 Ma 发生过一期快速隆升^[32],产生了南西向的挤压应力。磷灰石的裂变径迹分析结果^[37]以及重矿物组合特征^[38]均证实了这一说法。另外,阿尔金断裂在晚三叠世发生的左行走滑剪切^[39],可能对塔里木盆地造成了北西向的挤压应力。在整体近南北向的挤压作用下,研究区发生了大范围的构造隆升^[40-41],塔北隆起带的隆起范围明显增大,前三叠系遭受大范围剥蚀,下侏罗统不整合于三叠系、甚至更老地层之上,形成了侏罗系与前侏罗系之间的不整合面 TJ 或印支侵蚀面。

侏罗纪末,燕山晚期运动发生。随着新特提斯洋的关闭,拉萨地块向北与塔里木南缘的羌塘地块发生拼贴、碰撞,形成南北向的挤压应力^[32,42-43]。晚侏罗世一早白垩世的构造沉降-沉积速率以及剥蚀速率曲线的异常峰值,磨拉石砾岩沉积的发育以及地震剖面上挤压构造的发育,均表明构造挤压造成了隆升剥蚀,另外,其在时间上与拉萨地块和欧亚大陆发生碰撞的时间相一致,这被认为意味着有应力发生传递的远程构造响应存在^[44]。另外,有关磷灰石裂变径迹的测试结果表明,在 160~130 Ma 天山曾发生又一期快速隆升^[37]。区域性的构造挤压作用致使研

究区再次发生构造隆升、剥蚀并普遍缺失中、上侏罗统,白垩系卡普沙良群与前白垩系呈不整合接触,产生了主要不整合 TK。

在晚白垩世,科希斯坦岛弧与拉萨地体发生碰撞(约 80 Ma),研究区全区因而发生了一次抬升,这可能是中、上白垩统缺失的原因之一^[45-46]。随后,在白垩纪末—古近纪初(约 65 Ma),喜马拉雅早期运动发生。期间,脱离非洲的印度板块与欧亚板块发生陆-陆碰撞^[47],并持续汇聚、向北推挤,最终致使特提斯洋消失,相应地,青藏高原隆升、喜马拉雅山脉崛起。由于喜马拉雅山脉崛起效应的远程传递,研究区仍然处于以南北向挤压为主的构造应力场中^[18,32,42,48]。另外,印度板块与欧亚板块的碰撞还导致青藏高原的北边界,即阿尔金断裂发生了由深及浅的韧性走滑^[49],这对研究区或许造成了西北向的挤压作用。在此构造背景下,研究区发生新一期抬升、剥蚀,研究区中新世沉降特征、砾岩特征和天山隆升速率的研究结果证实了这一说法^[20,43]。以中、上白垩统的普遍缺失、下白垩统巴什基奇克组及前白垩系的侵蚀为标志的不整合 TE 发育^[40,50]并标志着研究区中生代构造-沉积演化的终结。

6 结论

1) 在库车-塔北地区中生界中识别出 TT, TJ, TK 和 TE 4 个主要不整合,分别形成于二叠纪末、三叠纪末、侏罗纪末和白垩纪末 4 个关键变革期。角度不整合 TT 剥蚀量最大,角度不整合 TJ 分布范围最广,角度不整合 TE 分布范围最小。主要不整合的分布样式可划分出高隆区不整合叠合带、斜坡区不整合三角带及坳陷区平行不整合/整合带,识别这些不整合带的发育和分布,对于恢复古地貌、寻找岩性地层圈闭而言意义重大。

2) 中生代的构造变革对库车-塔北地区的古地貌产生了重要影响。二叠纪末,研究区中西部剧烈隆升、发育古隆起带,研究区呈现出南北隆坳相间的构造格局。三叠纪末,研究区中西部的隆起带范围明显增大并南北分割侏罗纪湖盆。侏罗纪末,研究区中西部再次隆升剥蚀,研究区在白垩系沉积末期呈现出“西高东低”的古地貌形态,发育大范围的隆起斜坡。白垩纪末,温宿古隆起范围增大,研究区发生整体抬升。

3) 不整合及古隆起地貌特征控制着岩性地层圈闭的发育和分布。斜坡区低位域发育的粗碎屑沉积和

水进早期发育的楔状碎屑沉积是良好的储层,水进晚期的泥岩或泥灰岩沉积则是良好的盖层。斜坡区不整合面下的削截不整合三角带也是形成有利储层、圈闭的重要场所。

4) 库车-塔北地区中生代经历的4次关键变革是对盆地周边4次碰撞造山作用的响应。二叠纪末的南天山褶皱冲断成山并与塔里木板块北缘发生碰撞,是研究区发生构造变革、形成不整合TT的诱因。三叠纪末,昆仑山及天山隆升,研究区遭受构造挤压,古隆起范围急剧增大并发育不整合TJ。侏罗纪末的构造隆升及不整合TK的发育是对拉萨地体与欧亚大陆发生拼贴、碰撞的构造响应。白垩纪末,因喜马拉雅山脉崛起效应的远程传递,研究区再次遭受挤压隆升并产生不整合TE。

参 考 文 献

- [1] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社,1997:1-438.
Jia Chengzao. Tectonic characteristics and petroleum in Tarim Basin of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:1-438.
- [2] Carter D. 3-D seismic geomorphology: Insights into fluvial reservoir deposition and performance, Widuri Field, Java Sea[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87: 909-934.
- [3] 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 等. 塔里木早古生代原盆地古隆起地貌和古地理格局与地层圈闭发育分布[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 189-197.
Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleohigh geomorphology and paleogeographic framework and their controls on the formation and distribution of stratigraphic traps in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 189-197.
- [4] 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育分布的制约[J]. 中国科学:地球科学, 2009(3): 306-316.
Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleogeographic geomorphology of the Paleozoic central uplift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(6): 823-834.
- [5] He B, Jiao C, Xu Z, et al. The paleotectonic and paleogeography reconstructions of the Tarim Basin and its adjacent areas (NW China) during the late Early and Middle Paleozoic[J]. Gondwana Research, 2016, 30: 191-206.
- [6] Lin C, Yang H, Liu J, et al. Distribution and erosion of the Paleozoic tectonic unconformities in the Tarim Basin, Northwest China: significance for the evolution of paleo-uplifts and tectonic geography during deformation[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 46: 1-19.
- [7] 余海波, 漆家福, 杨宪章, 等. 塔里木盆地库车坳陷中生界构造古地理分析[J]. 高校地质学报, 2016, 22(4): 657-669.
Yu Haibo, Qi Jiafu, Yang Xianzhang, et al. The Mesozoic Tectonic Palaeogeographic Analysis in Kuqa Depression of Tarim Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(4): 657-669.
- [8] 李勇, 漆家福, 师俊, 等. 塔里木盆地库车坳陷中生代盆地性状及成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(5): 829-842.
Li Yong, Qi Jiafu, Shi Jun, et al. Characteristics of Mesozoic Basin in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(5): 829-842.
- [9] 吕修祥, 金之钧, 周新源, 等. 塔里木盆地乌什凹陷-温宿凸起油气勘探前景[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(1): 17-21.
Lu Xiuxiang, Jin Zhijun, Zhou Xinyuan, et al. Oil and gas exploration prospect in Wushi sag and Wensu uplift of Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2006, 30(1): 17-21.
- [10] 汤良杰, 万桂梅, 王清华, 等. 库车西秋里塔格构造带中、新生代构造演化[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(2): 167-171.
Tang Liangjie, Wan Guimei, Wang Qinghua, et al. Tectonic evolution of the western Qiulitage tectonic belt in Mesozoic and Cenozoic, Kuqa depression[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2008, 30(2): 167-171.
- [11] 李日俊, 杨海军, 张光亚, 等. 重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2466-2478.
Li Yuejun, Yang Haijun, Zhang Guangya, et al. Redivision of the tectonic units of Tabei Rise in Tarim Basin, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2466-2478.
- [12] 余海波, 漆家福, 师俊, 等. 塔里木盆地库车坳陷西秋古隆起的形成及其演化[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 524-535.
Yu Haibo, Qi Jiafu, Shi Jun, et al. Paleo-uplift formation and evolution in the Xiqiu structural belt of the Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(2): 524-535.
- [13] 庞雄奇, 周新源, 姜振学, 等. 叠合盆地油气藏形成、演化与预测评价[J]. 地质学报, 2012, 86(1): 1-103.
Pang Xiongqi, Zhou Xinyuan, Jiang Zhenxue, et al. Hydrocarbon reservoirs formation, evolution, prediction and evaluation in the superimposed Basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(1): 1-103.
- [14] 徐国强, 刘树根, 李国蓉, 等. 塔中、塔北古隆起形成演化及油气地质条件对比[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 114-119.
Xu Guoqiang, Liu Shugen, Li Guorong, et al. Comparison of tectonic evolutions and petroleum geological conditions in Tazhong and Tabei palaeohighs in Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 114-119.
- [15] 陈践发, 苗忠英, 张晨, 等. 塔里木盆地塔北隆起天然气轻烃地球化学特征及应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 271-276.
Chen Jianfa, Miao Zhongying, Zhang Chen, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gas in the Tabei Uplift of the Tarim Basin and their implications[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 271-276.
- [16] 刘永福, 赵建华, 范秋海, 等. 塔北隆起中部白垩系卡普沙良群层序地层格架及沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1113-1122.
Liu Yongfu, Zhao Jianhua, Fan Qiuhai, et al. Study on the sequence stratigraphy and depositional systems of the Kapushaliang Group of Cretaceous in the Central Tabei Uplift[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6): 1113-1122.

- [17] 吴朝东,林畅松,申延平,等.库车坳陷侏罗纪沉积环境和层序地层分析[J].沉积学报,2002,20(3):400-407.
Wu Chaodong, Lin Changsong, Shen Yanping, et al. Sequence stratigraphy and depositional environments of the Kuiche depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(3):400-407.
- [18] 曾联波.库车前陆盆地喜马拉雅运动特征及其油气地质意义[J].石油与天然气地质,2004,25(2):175-179.
Zeng Lianbo. Characteristics and petroleum geological significance of Himalayan orogeny in Kuqa foreland basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2):175-179.
- [19] 何登发,周新源,杨海军,等.库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):19-32.
He Ddengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa Depression, Tarim Basin: A clue from new shot seismic data[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2009, 33(1):19-32.
- [20] 高志勇,朱如凯,冯佳睿,等.库车坳陷侏罗系-新近系砾岩特征变化及其对天山隆升的响应[J].石油与天然气地质,2015,36(4):534-544.
Gao Zhiyong, Zhu Rukai, Feng Jiarui, et al. Jurassic-Neogene conglomerate characteristics in Kuqa Depression and their response to tectonic uplifting of Tianshan Mountains[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4):534-544.
- [21] 刘景彦,林畅松,喻岳钰,等.用声波测井资料计算剥蚀量的方法改进[J].石油实验地质,2000,22(4):302-306.
Liu Jingyan, Lin Changsong, Y Yueyu. A quantitative model of compaction trend using sonic well logs: applied to erosion amount estimation in the Xihu depression, East China Sea[J]. Petroleum Science, 2000, 22(4):302-306.
- [22] 张响响,林畅松,刘景彦,等.塔里木盆地草湖凹陷古生界上泥盆统底和三叠系底构造不整合面剥蚀量估算[J].石油地球物理勘探,2007,42(3):331-333.
Zhang Xiangxiang, Lin Changsong, Liu Jingyan, et al. Evaluation of denudation of structural unconformable surface for Paleozoic upper Devonian bottom and Permian bottom in Caohu depression of Tarim basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(3):331-333.
- [23] 张丽娟,钟大康,李越,等.塔北隆起侏罗系阳霞组沉积特征[J].地层学杂志,2009,33(3):241-248.
Zhang Lijuan, Zhong Dakang, Li Yue, et al. The Jurassic fluvial facies in the North Tarim Uplift, Xinjiang[J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(3):241-248.
- [24] 徐桂芬,林畅松,刘永福,等.塔北西部早白垩世卡普沙良群沉积期古隆起演化及其对沉积的控制作用[J].地球科学,2016,41(4):619-632.
Xu Guifen, Lin Changsong, Liu Yongfu, et al. Evolution of Palaeo-Uplift and its controlling on sedimentation of Kapushaliang Group of early Cretaceous in Western Tabei Uplift[J]. Earth Science, 2016, 41(4):619-632.
- [25] 陈龙,林畅松,李浩,等.塔北隆起西部库姆格列木群底砂岩段沉积特征[J].东北石油大学学报,2017,41(5):23-32.
Chen Long, Lin Changsong, Li Hao, et al. Sedimentary characteristics of the lower sandstone part of Kumugeliemu Group in the Western Tabei uplift[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2017, 41(5):23-32.
- [26] 翟光明,宋建国,靳久强,等.板块构造演化与含油气盆地形成和评价.北京:石油工业出版社,2002:1-461.
Zhai Guangming, Song Jianguo, Jin Jiuqiang, et al. Plate tectonic evolution and its relationship to petroliferous basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:1-461.
- [27] 耿玉海,李江海,贺电.塔里木盆地塔北隆起西部圈闭类型、分布及空间组合规律[J].北京大学学报(自然科学版),2008,44(2):193-200.
Geng Yuhai, Li Jianghai, He Dian. Trap types, distribution and the law of spatial combination in the west Tabei uplift, Tarim Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(2):193-200.
- [28] 田作基,胡见义,宋建国.塔里木库车前陆盆地构造格架和含油气系统[J].新疆石油地质,2000,21(5):379-383.
Tian Zuojie, Hu Jianyi, Song Jianguo. Tectonic framework and petroleum system of Kuqa Foreland Basin, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(5):379-383.
- [29] 李曰俊,宋文杰,买光荣,等.库车和北塔里木前陆盆地与南天山造山带的耦合关系[J].新疆石油地质,2001,22(5):376-381.
Li Yuejun, Song Wenjie, Mai Guangrong, et al. Characteristics of Kuqa and northern Tarim Foreland Basins and their coupling relation to South Tianshan Orogen[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(5):376-381.
- [30] 许志琴,李思田,张建新,等.塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J].岩石学报,2011,27(1):1-22.
Xu Zhiqin, Li Sitian, Zhang Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):1-22.
- [31] 李曰俊,杨海军,赵岩,等.南天山区域大地构造与演化[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):94-104.
Li Yuejun, Yang Haijun, Zhao Yan, et al. Tectonic framework and evolution of South Tianshan, NW China[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2009, 33(1):94-104.
- [32] 何碧竹,许志琴,焦存礼,等.塔里木盆地构造不整合成因及对油气成藏的影响[J].岩石学报,2011,27(1):253-265.
He Bizhu, Xu Zhiqin, Jiao Cunli, et al. Tectonic unconformities and their forming: Implication for hydrocarbon accumulations in Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):253-265.
- [33] 左银辉,李佳蔚,李文正,等.塔里木盆地中、新生代“热”岩石圈厚度演化[J].地球物理学进展,2015,30(4):1608-1615.
Zuo Yinhuai, Li Jiawei, Li Wenzheng, et al. Mesozoic and Cenozoic thermal lithospheric thickness evolution in the Tarim Basin[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4):1608-1615.
- [34] 高先志,陈发景,马达德,等.中、新生代柴达木北缘的盆地类型与构造演化[J].西北地质,2003,36(4):16-24.
Gao Xianzhi, Chen Fajing, Ma Dade, et al. Tectonic evolution of the Northern Qaidam Basin during Mesozoic and Cenozoic eras[J]. Northwestern Geology, 2003, 36(4):16-24.
- [35] 张臣,郑多明,李江海.柯坪断隆古生代的构造属性及其演化特征[J].石油与天然气地质,2001,22(4):314-318.
Zhang Chen, Zheng Duoming, Li Jianghai. Attribution of Paleozoic structures and its evolution characteristics in Keping Fault-Uplift[J].

- Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 314-318.
- [36] 计文化, 周辉, 李亚民. 西昆仑新藏公路 118~323 km 段基性、酸性岩脉 K-Ar 年龄[J]. 地质通报, 2005, 24(3): 243-245.
- Ji Wenhua, Zhou Hui, Li Yamin. K-Ar ages of basic-acid dikes of the 118-323 km section of the Xinjiang-Tibet Highway in the West Kunlun[J]. Regional Geology of China, 2005, 24(3): 243-245.
- [37] 陈正乐, 万景林, 刘健, 等. 西天山山脉多期次隆升-剥露的裂变径迹证据[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 97-106.
- Chen Zhengle, Wan Jinglin, Liu Jian, et al. Multi-stage uplift and exhumation of the West Tianshan Mountain: Evidence from the apatite fission-track dating[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2006, 27(2): 97-106.
- [38] 赵雪松, 高志勇, 冯佳睿, 等. 库车前陆盆地三叠系-新近系重矿物组合特征与盆山构造演化关系[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 68-77.
- Zhao Xuesong, Gao Zhiyong, Feng Jiarui, et al. Triassic-Neogene heavy minerals' assemblages characteristics and basin-orogen tectonic evolution relationship in the Kuqa Foreland Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 68-77.
- [39] 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据[J]. 科学通报, 2001, 46(16): 1333-1338.
- Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. Geological and chronological evidence of Indo-Chinese strike-slip movement in the Altyn Tagh fault zone[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(16): 1333-1338.
- [40] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中新生代构造应力场及其油气运聚效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(增刊): 98-106.
- Zeng Lianbo, Tan Chengxuan, Zhang Mingli. The Mesozoic-Cenozoic tectonic stress field and the petroleum migration and accumulation effect in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 34(supplement): 98-106.
- [41] 杨克绳. 塔里木盆地的构造演化[J]. 海洋地质前沿, 2005, 21(2): 25-29.
- Yang Kesheng. Tectonic evolution of the Tarim Basin[J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(2): 25-29.
- [42] 何治亮, 高山林. 中国西部燕山运动及其对油气成藏的控制[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 419-427.
- He Zhiliang, Gao Shanlin. The Yanshanian movement and its control over hydrocarbon accumulation in western China[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 419-427.
- [43] 戴福贵, 杨克绳, 刘东燕. 塔里木盆地地震剖面地质解释及其构造演化[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 747-760.
- Dai Fugui, Yang Kesheng, Liu Dongyan. Geological interpretation of the seismic profile in Tarim Basin and tectonic evolution of this area[J]. Geology in China, 2009, 36(4): 747-760.
- [44] 阎福礼, 卢华复, 贾东, 等. 塔里木盆地库车坳陷中、新生代沉降特征探讨[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(1): 31-39.
- Yan Fuli, Lu Huafu, Jia Dong, et al. The Meso-Cenozoic subsidence features of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Journal of Nanjing University (natural sciences), 2003, 39(1): 31-39.
- [45] 贾承造, 陈汉林, 杨树锋, 等. 库车坳陷晚白垩世隆升过程及其地质响应[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 1-5.
- Jia Chengzao, Chen Hanlin, Yang Shufeng, et al. Late Cretaceous uplifting process and its geological response in Kuqa Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 1-8.
- [46] 陈书平, 金之钧, 孙海龙. 库车前陆区中-新生代盆山波动耦合[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 24-29.
- Chen Shuping, Jin Zhijun, Sun Hailong. Mesozoic-Cenozoic basin-mountain wave coupling in Kuche foreland[J]. Journal of Xi'an Petroleum University (natural science edition), 2004, 19(4): 24-29.
- [47] 丁孝忠, 林畅松, 刘景彦, 等. 塔里木盆地白垩纪-新近纪盆山耦合过程的层序地层响应[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 144-157.
- Ding Xiaozhong, Lin Changsong, Liu Jingyan, et al. The sequence stratigraphic response to the basin-orogene coupling process of Cretaceous-Neogene in Tarim Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 144-157.
- [48] 刘训. 中国西北盆地地区中-新生代古地理及地壳构造演化[J]. 古地理学报, 2004, 6(4): 448-458.
- Liu Xun. Palaeogeography of the Meso-Cenozoic and crustal tectonic evolution of basin-mountain area in Northwestern China[J]. Journal of Paleogeography, 2004, 6(4): 448-458.
- [49] 刘永江, 葛肖虹, 叶慧文, 等. 晚中生代以来阿尔金断裂的走滑模式[J]. 地球学报, 2001, 22(1): 23-28.
- Liu Yongjiang, Ge Xiaohong, Ye Huiwen. Strike-slip model for Altyn Tagh Fault developed since Late Mesozoic[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(1): 23-28.
- [50] 邬光辉, 李启明, 肖中尧, 等. 塔里木盆地古隆起演化特征及油气勘探[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 124-130.
- Wu Guanghui, Li Qiming, Xiao Zhongyao, et al. The evolution characteristics of palaeo-Uplifts in Tarim Basin and its exploration directions for oil and gas[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2009, 33(1): 124-130.

(编辑 董立)