



准噶尔盆地断拗转换期剥蚀厚度及其分布规律

周培兴,吴孔友,董 方,李彦颖

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266555

摘 要: 准噶尔盆地为我国重要的陆上含油气盆地,对其进行地层剥蚀厚度恢复能够有效地研究盆地演化历史以及油气资源评价。通过分析声波时差法的方法原理及其适用条件,认为此方法适用于恢复准噶尔盆地断拗转换期剥蚀地层的厚度。实际计算结果表明:断拗转换期上、中二叠统之间为主不整合,剥蚀厚度大;三叠系与二叠系之间形成次级不整合,盆地剥蚀厚度相对较大,区域位于西部盆缘地带,自北西向南东剥蚀量逐步降低,至盆地中心剥蚀量最低。各构造单元中,凸起相比于凹陷所遭受的剥蚀程度较大,反映古地貌呈现盆地西北缘高、腹部低的地形特征,同时反映准噶尔盆地断拗转换期二叠纪晚期至三叠纪早期改造具西强东弱、边缘强内部弱的特点。

关键词: 断拗转换期;剥蚀厚度;声波时差法;准噶尔盆地

DENUDATION THICKNESS AND DISTRIBUTION RULE IN THE FAULT-DEPRESSION TRANSITION PERIOD OF JUNGGAR BASIN

ZHOU Pei-xing, WU Kong-you, DONG Fang, LI Yan-ying

School of Earth Sciences and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, Shandong Province, China

Abstract: The Junggar Basin is an important onshore petroleum-bearing basin in China, and the restoration of its strata denudation thickness is effective to study the evolutionary history and evaluate the oil-gas resources. By analyzing the principle and application conditions of interval transit time method, it is considered that the method is suitable for restoring the strata denudation thickness in the fault-depression transition period of Junggar Basin. The actual calculation results show that in the fault-depression transition period, there is a major unconformity between the Upper and Middle Permian with large denudation thickness, and a secondary unconformity between the Triassic and Permian, with relatively large basin denudation thickness, located in the western basin margin zone, with the denudation gradually decreasing from northwest to southeast and reaching the lowest level at the center of basin. Among the tectonic units, the convex suffered more denudation than the sag, reflecting that the ancient landform is high in the northwestern margin and low in the central basin, and the reformation of the basin is intense in the west and weak in the east, and intense in the margin and weak in the interior during the Late Permian-Early Triassic in Junggar Basin.

Key words: fault-depression transition period; denudation thickness; interval transit time method; Junggar Basin

收稿日期:2022-05-23;修回日期:2022-10-10. 编辑:李兰英.

基金项目:国家科技重大专项专题“地层圈闭描述及有效性分析技术研究”(2017ZX05001003-004).

作者简介:周培兴(1995—),男,硕士研究生,主要从事含油气盆地分析,通信地址 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号,E-mail//peixingzhou@163.com

通信作者:吴孔友(1971—),男,博士,教授,主要从事地质构造与油气成藏研究,通信地址 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号,E-mail//wukongyou@163.com

0 引言

地层遭受剥蚀是在沉积盆地中常见的现象^[1]。倘若盆地剥蚀量普遍较小,对油气生烃和油气运聚产生的影响可忽略不计,但如果剥蚀量较大,将势必对盆地油气的生成、运移与聚集产生十分深远的影响,此时便要进行剥蚀量的恢复^[2]。对地层剥蚀厚度的恢复是定量研究盆地演化史和油气资源评价的一种重要基础工作^[3]。目前恢复剥蚀厚度的一些主流方法有地球物理学方法如声波时差法等^[4-5],地热学方法如镜质体反射率法^[6-8]、流体包裹体法等^[9],地质学方法如波动分析法^[10-11]、地质类比法^[12],地球化学方法如天然气平衡浓度法^[13]、宇宙成因核素法^[14]等。针对于每种方法都有其特殊的使用条件制约性。对比众多剥蚀厚度恢复方法,准噶尔盆地探井数量众多,测井资料丰富,运用声波时差法具有获取资料相对迅速,应用原理成熟,操作性较强,简便可行等实用性特点。

近几年,在准噶尔盆地下三叠统底部和上二叠统

顶部油气勘探均有重大发现^[15]。通过成藏条件初步分析及资源评价,该层系油气资源潜力巨大,很可能成为又一个拥有巨大储量的勘探领域^[16],多期演化造就了盆地具有多套生、储、盖组合和多期次成藏,为油气的富集创造了条件^[17]。准噶尔盆地二叠纪晚期和三叠纪早期处于强烈压陷到整体拗陷的转换期^[18],二叠系与三叠系之间、上二叠统与中二叠统之间存在不整合接触,地层接触关系复杂^[19]。断拗转换期形成的大型不整合遮挡圈闭和地层超覆圈闭,为以大型地层为主控因素的油藏形成提供了有利条件^[20-21]。要进行二叠纪与三叠纪转换期不整合结构特征及控藏作用研究,揭示不整合结构控藏规律,探明资源潜力等工作须要恢复其古地貌^[22],首先须要进行恢复剥蚀量的工作。笔者拟采用声波时差法首先对单井的剥蚀厚度进行计算,并在此基础上,辅以构造趋势法对下三叠统底部及上二叠统顶部地层剥蚀厚度的区域分布进行研究和分析(图1)。

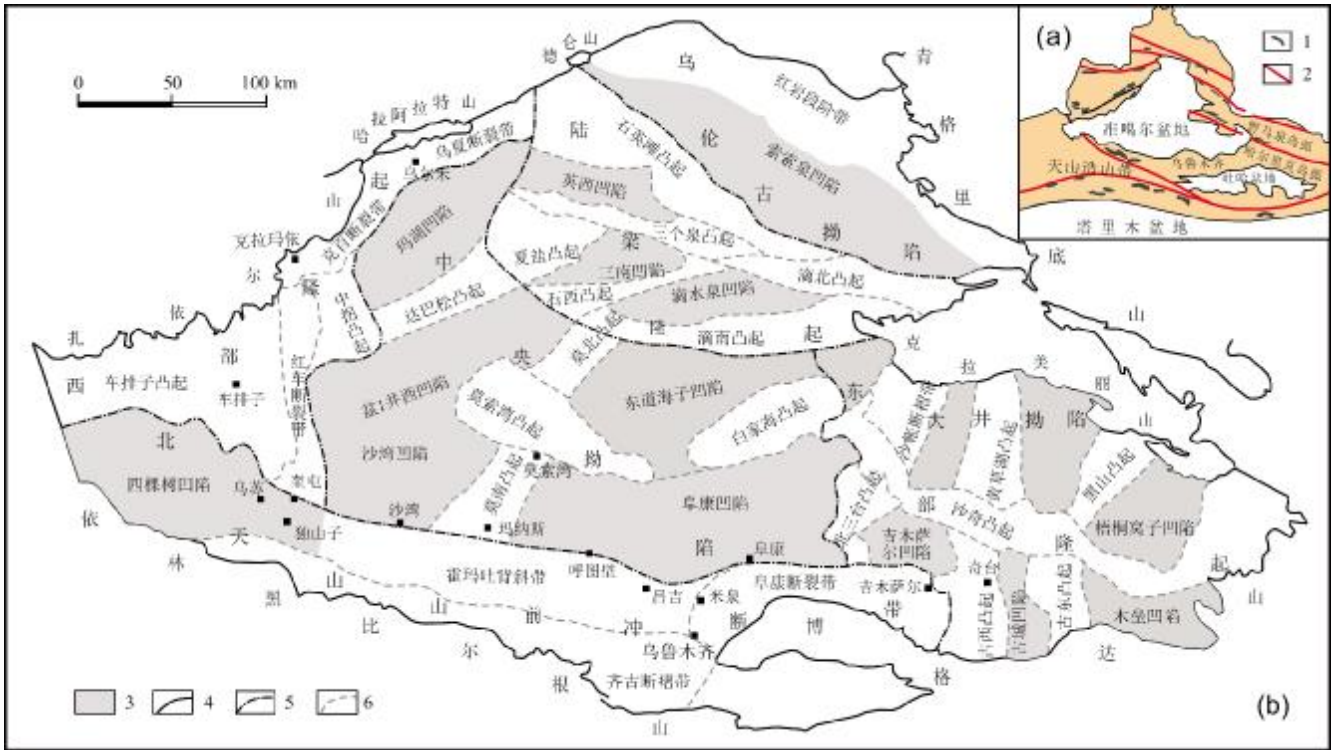


图1 准噶尔盆地大地构造位置与构造单元分布图

(据文献[23]修改)

Fig. 1 Geotectonic distribution map of Junggar Basin

(Modified from Reference [23])

1—蛇绿岩(ophiolite); 2—断裂带(fault zone); 3—凹陷(sag); 4—盆地边界(basin boundary); 5—一级构造单元边界(boundary of first-order tectonic unit); 6—二级构造单元边界(boundary of second-order tectonic unit)

1 地质背景

准噶尔盆地地处我国新疆北部,是新疆“三山两盆”空间格局体系中重要的组成部分,盆地面积约为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。经历了海西、印支、燕山和喜马拉雅多期构造运动和多旋回发育过程。大地构造位置上,准噶尔地块位于哈萨克斯坦古板块、西伯利亚古板块及塔里木古板块的交汇部位^[24],属于哈萨克斯坦板块东延部分^[25-26](图 1a)。南北向看,其夹持于西伯利亚板块和塔里木板块之间,是陆缘板块活动带的三角地区,属晚古生代的汇聚地带^[23]。无论是西伯利亚板块历次向南增生,还是欧亚板块与印度板块的碰撞或板块 A 型俯冲,都对本区的构造演化产生不同程度的影响。该盆地为一个晚古生代—中生代大型陆相挤压叠合盆地,盆地以逆冲断层与周缘山系分界,并在山前形成数个前陆拗陷。盆地自形成以来经历了复杂的构造演化,可划分为 3 隆 2 拗 5 个一级构造单元和 32 个二级构造带(图 1b)^[23]。根据钻井资料所揭示,准噶尔盆地

所发育的地层自上而下有第四系、新近系、古近系、白垩系、侏罗系、三叠系、二叠系和石炭系。盆地凸起或斜坡高部位存在众多间断面,发育超过 10 个区域性不整合^[18]。

2 构造转换期地层接触特征

中二叠世至早三叠世,在全球板块构造格局快速重整导致的块体强烈扭动与走滑作用下,北疆地区发生具有变革性质的印支运动,各造山带普遍发生了强烈的构造隆升,准噶尔周围的东准噶尔造山带、西准噶尔造山带和北天山造山带等。北疆诸陆内造山带均处于强烈隆升状态,古博格达裂谷也全面回返,准噶尔盆地进入断陷后的拗陷演化阶段,开始表现为统一的沉降拗陷(图 2),盆地相间的现代构造格局基本定形^[23]。造山带向相邻的盆地发生强烈逆冲推覆作用,在盆山过渡部位形成冲断褶皱带各类相关构造和地层剥蚀及不整合接触现象,盆地凸起或斜坡高部位存在众多间

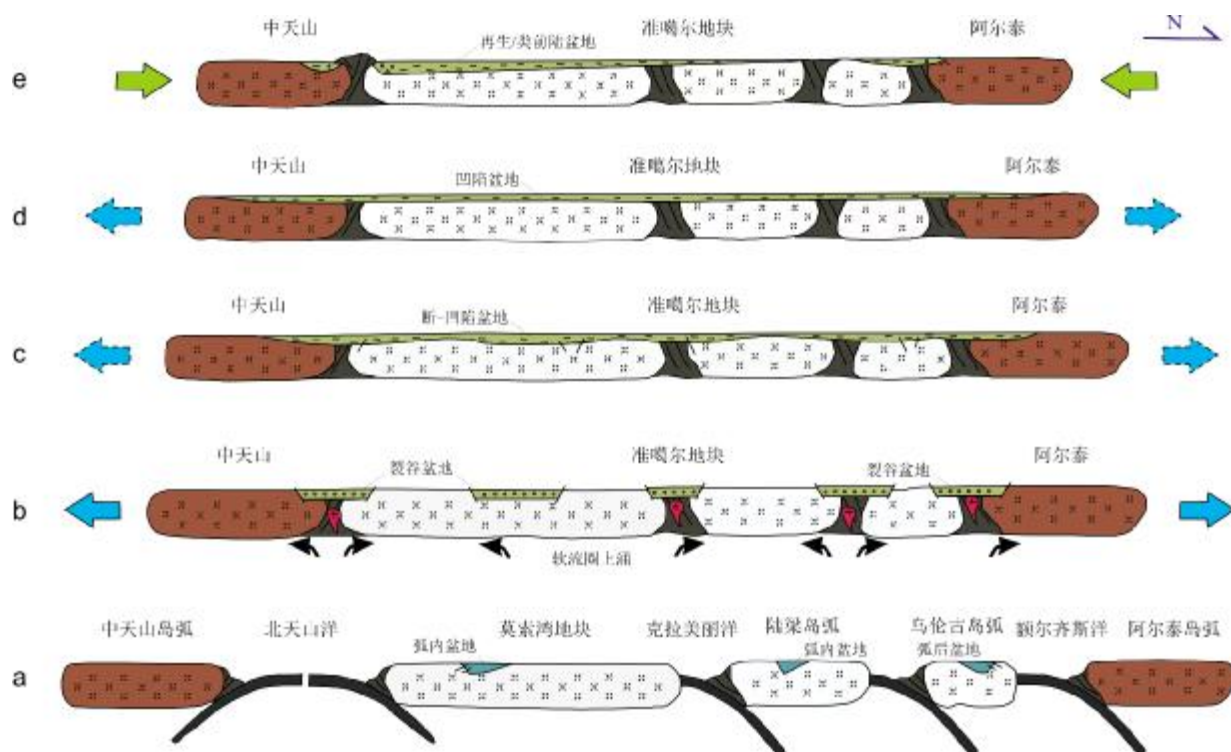


图 2 准噶尔盆地演化模式图

Fig. 2 Evolution model of Junggar Basin

a—石炭纪(弧相关盆地)(Carboniferous, arc-related basin); b—石炭纪末—早二叠世(后碰撞裂谷盆地)(Late Carboniferous-Early Permian, post-collisional rift basin); c—中二叠世—早三叠世(陆内断—拗陷盆地)(Middle Permian-Early Triassic, intracontinental fault-depression basin); d—侏罗纪—古近纪(热沉降成因的凹陷盆地)(Jurassic-Paleogene, depression basin of thermal subsidence origin); e—新近纪—第四纪(后方前陆盆地)(Neogene-Quaternary, rear arc foreland basin)

断面,大部分缺失中、下二叠统,上二叠统上乌尔禾组超覆沉积于凸起之上,与下伏地层呈角度不整合接触,三叠系—侏罗系披覆其上,隆起幅度较小。

3 地层剥蚀量计算方法及适用性分析

声波时差法是起源于 Athy^[27] 关于泥岩孔隙度与深度之间的指数关系模型式:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-kD} \quad (1)$$

式中, φ 为岩石孔隙度; φ_0 为地表岩石孔隙度; k 为指数常数; D 为岩层埋深(m)。

声波时差值取自测井资料,其概念为声波从钻孔传到地面接收器的时间,声波时差受孔隙度、岩性、流体含量等一系列因素影响。Wyllie 等人通过大量实验,得出在具有均匀分布的小孔隙的固结地层中,传播时间与孔隙度之间呈线性关系^[28],即不同深度的声波传播时间与孔隙度之间的变化可以据此进行相互类比,表示处于正常压实的情况下可用指数函数方法来表达声波时差与深度间的关系:

$$\Delta t = \Delta t_0 e^{-kD} \quad (2)$$

式中, Δt 为泥岩声波时差 ($\mu\text{s}/\text{m}$); Δt_0 为地表泥岩声波时差 ($591 \sim 689 \mu\text{s}/\text{m}$)^[29]。

Magara^[4] 于 1976 年率先提出声波时差法求取剥蚀厚度,并首次应用于西加拿大盆地的泥质岩类地层。当不整合面以上的沉积物厚度小于剥蚀厚度时,将不整合面以下的泥岩的压实趋势上推延至古地表处,取此古地表与不整合面之间的相对深度差值即为剥蚀厚度(图 3)。

能否利用泥岩压实规律恢复剥蚀厚度,其关键因素不在于地层的厚度,而是不整合面之上新地层对其下伏老地层,与被剥蚀的地层在遭受剥蚀前对老地层所施加的静压力是否具一致性,新地层的沉积是否改变了下伏地层的压实格架^[30]。

老地层的压实规律是否被改变可根据斜率为 C_0 的拟合曲线与新地层斜率为 C_n 的拟合曲线的关系进行判断。斜率相等时,当不整合面以上新沉积的地层厚度小于地层剥蚀厚度时声波时差法才能使用。斜率不相等时,地层的拟合曲线关系有图 4 所示的 4 种情况:当 $C_0 > C_n$ 时,剥蚀面以下的地层压实规律未被破坏,新沉积的地层厚度小于或大于剥蚀厚度(图 4a、b),均能应用声波时差法恢复剥蚀厚度;当 $C_0 < C_n$ 时,如果新

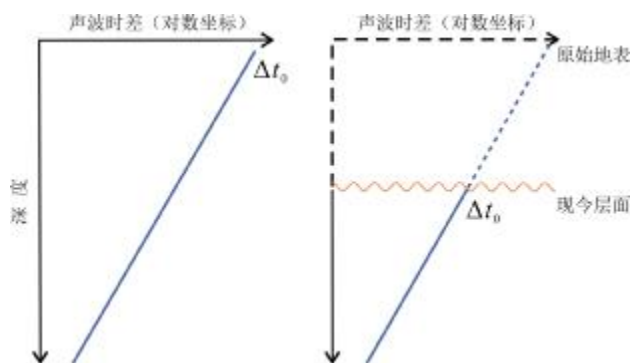


图 3 泥岩声波时差与深度关系

(据文献[4]修改)

Fig. 3 Relation between interval transit time and depth of mudstone

(Modified from Reference [4])

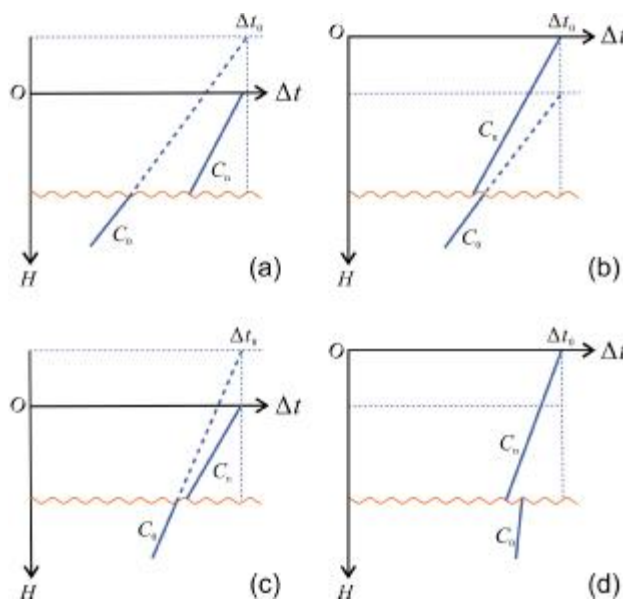


图 4 声波时差法适用条件关系

(据文献[30]修改)

Fig. 4 Applicability analysis of interval transit time method

(Modified from Reference [30])

地层对老地层施加的静压力比被剥蚀地层剥蚀前对老地层施加的静压力小时(图 4c),可应用声波时差法恢复剥蚀厚度;当老地层存在欠压实情况(图 4d),则不能应用声波时差法计算剥蚀厚度。

4 剥蚀厚度恢复及控制因素

4.1 声波时差法计算单井剥蚀厚度

在对单井的剥蚀量求取过程中,选取的泥岩层厚度应不低于 2 m,且声波时差数据需取自泥岩相对稳

定的层段. 在读数过程中须遵循声波时差上下曲线相应的下降趋势, 选取能够反映孔隙度随深度的变化而规律变化的声波时差数值. 根据测井资料, 分析盆内探井的压实曲线求取平均值 Δt_0 为 $650\text{ }\mu\text{s/m}$ 左右. 结合声波测井曲线及岩性资料, 选取不整合面附近优势泥岩的声波时差数据经对数转换后, 通过优化数据后作散点图趋势线, 将趋势线延伸至古地表声波时差对数值读取不整合造成的剥蚀厚度. 以位于中拐凸起中部 JL-2 井为例(图 5), 其百口泉组底部不整合面位于

3 960 m 处, 上乌尔禾组底部不整合面位于 4 244 m, 不整合面上下均有较厚的泥岩层分布(表 1).

表 1 JL-2 井不整合面附近泥岩层段
Table 1 Layers of mudstone near the unconformity of JL-2 well

顶界深度/m	底界深度/m	厚度/m	颜色	岩石名称
3796	3804	8	褐色	泥岩
3841	3862	21	褐色	含砾泥岩
3866	3872	6	褐色	泥岩
3874	3876	2	灰褐色	含砾泥岩
3910	3912	2	褐色	含砾泥岩
3936	3940	4	褐色	含砾泥岩
3960	4010	50	褐红色	泥岩
4036	4042	6	褐色	砂质泥岩
4044	4060	16	褐色	泥岩
4076	4084	8	褐灰色	砂质泥岩
4112	4116	4	褐灰色	泥岩
4156	4160	4	灰色	砂质泥岩
4262	4266	4	褐灰色	砂质泥岩
4266	4286	20	褐色	泥岩
4288	4300	12	灰褐色	泥岩
4302	4328	26	深灰色	泥岩
4328	4334	6	灰色	砂质泥岩
4338	4358	20	深灰色	砂质泥岩

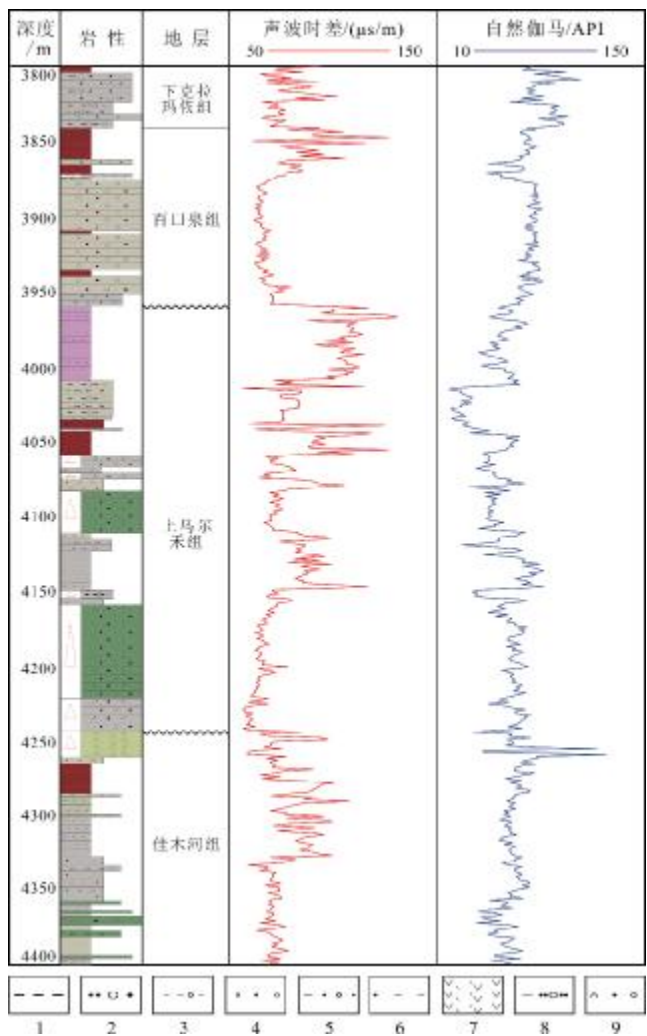


图 5 准噶尔盆地 JL-2 井声波时差测井解释成果图

Fig. 5 Logging interpretation of JL-2 well by interval transit time in Junggar Basin
1—泥岩 (mudstone); 2—含砾砂岩 (pebbly sandstone); 3—含砾泥岩 (pebbly mudstone); 4—砂砾岩 (glutenite); 5—含砾泥质细砂岩 (pebbly argillaceous sandstone); 6—砂质泥岩 (sandy mudstone); 7—英安岩 (dacite); 8—含砾泥质粉砂岩 (pebbly argillaceous siltstone); 9—凝灰质砂砾岩 (tuffaceous conglomerate)

将优选后的泥岩深度及其对应声波时差对数值投影至散点图中(图 6). 实线即地层压实拟合趋势曲线, 上覆新沉积地层压实拟合趋势线均位于老沉积地层压实拟合趋势线左侧, 新老地层斜率不等, 不整合面下地层压实规律未遭到破坏, 且新沉积的地层厚度明显高过遭受剥蚀的厚度, 该种情况符合声波时差法求取剥蚀厚度适用条件. 究其原因: 新沉积地层的整体密度要显著小于老沉积地层的整体密度, 虽然新地层沉积厚度高于老地层剥蚀厚度, 但是由于沉积物密度差异, 老沉积地层的致密程度并未遭受新地层沉积影响而改变; 且新地层沉积过后, 老沉积地层的压实规律在漫长地质历史过程中逐步调整, 加之在不整合面的形成过程中, 老沉积地层需先经过隆升而后逐渐沉降, 经历数次差异等深的成岩演化^[31]. 经散点图求取拟合方程后,

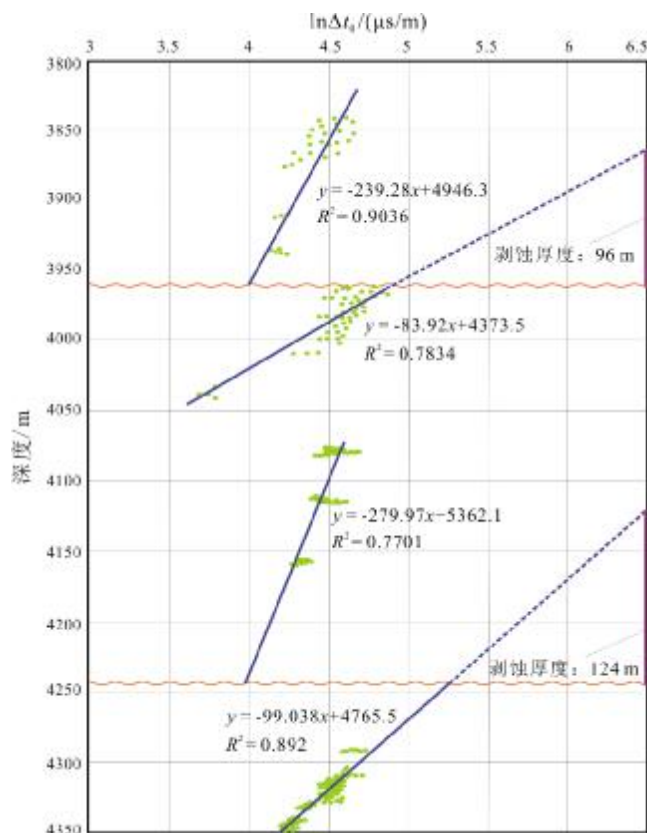


图6 JL-2井声波时差法计算剥蚀厚度散点图

Fig. 6 Scatter diagram of denudation thickness in JL-2 well computing by interval transit time

最终延伸至古地表计算得 JL-2 井二叠系上乌尔禾组底部不整合剥蚀厚度为 124 m, 三叠系百口泉组底部不整合剥蚀厚度为 96 m。

4.2 断拗转换期剥蚀厚度汇总及分布规律

对于准噶尔盆地的各测井曲线资料、岩性和分层对比资料、井网部署等地质资料进行采集整理与研究汇总,通过井震结合的技术方法,以声波测井资料中恢复的地层剥蚀厚度为主要依据,结合地震资料和构造剖面图,运用构造趋势法恢复准噶尔盆地断拗转换期部分不整合剥蚀厚度,并对二级构造单元剥蚀厚度值进行统计对比(图7)。上乌尔禾组底部不整合剥蚀厚度(图7a)远大于百口泉组底部不整合剥蚀厚度(图7b),反映断拗转换期以上、中二叠统之间为主不整合,剥蚀厚度大,三叠系与二叠系之间形成次级不整合。

以声波时差法结合构造趋势法计算百口泉组、上乌尔禾组底部不整合面剥蚀厚度,对单井的剥蚀厚度计算过后,将各井位坐标及对应剥蚀厚度经网格化处

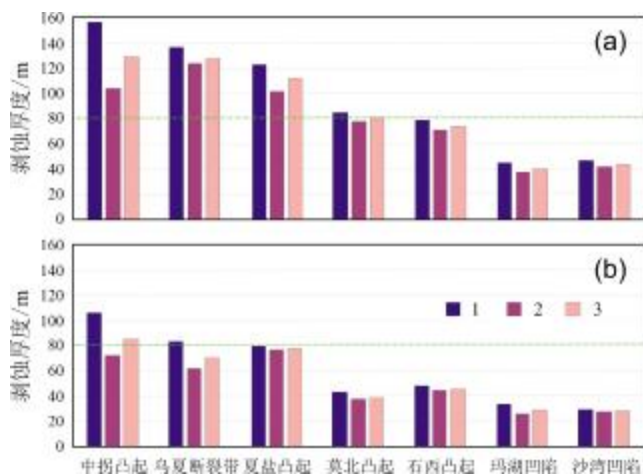


图7 断拗转换期不整合二级构造单元剥蚀厚度统计图

Fig. 7 Denudation thickness statistics of unconformity of second-order tectonic units in the fault-depression transition period

a—上乌尔禾组底部不整合(basal unconformity of Upper Wuerhe Formation);
b—百口泉组底部不整合(basal unconformity of Baikouquan Formation);
1—最大值(maximum); 2—最小值(minimum); 3—平均值(average)

理,运用成图软件绘制剥蚀厚度区域等值线图(图8)。结果显示,各构造单元中,凸起相比于凹陷所遭受的剥蚀程度均较大。断拗转换期,上乌尔禾组底部不整合最大剥蚀厚度为 155 m,位于准噶尔盆地西北缘;最小剥蚀厚度为 20 m,位于沙湾凹陷及盆 1 井西凹陷内部(图 8a)。百口泉组底部不整合最大剥蚀厚度为 106 m,位于准噶尔盆地西北缘;最小剥蚀厚度为 5 m,位于沙湾凹陷及阜康凹陷内部(图 8b)。剥蚀厚度特征总体上为西北缘往腹部逐渐递减,在盆地腹部处时逐渐减小,反映二叠纪晚期至三叠纪早期地貌呈现西北缘高程较大往盆地腹部减小的地形特征。

5 结论

1)通过对准噶尔盆地演化、泥岩压实规律、测井解释成果、二维地震剖面等资料研究,表明利用声波时差法恢复准噶尔盆地断拗转换期剥蚀地层厚度具有可行性。

2)晚二叠世—早三叠世处于海西运动晚期—印支运动早期构造运动的转折时期,在盆内广泛发育大型不整合面。准噶尔盆地在断拗转换期经历了晚海西期和早印支期的构造变形,晚海西期的影响更大,形成主不整合,奠定了从晚二叠世到早三叠世的盆地总体格局。

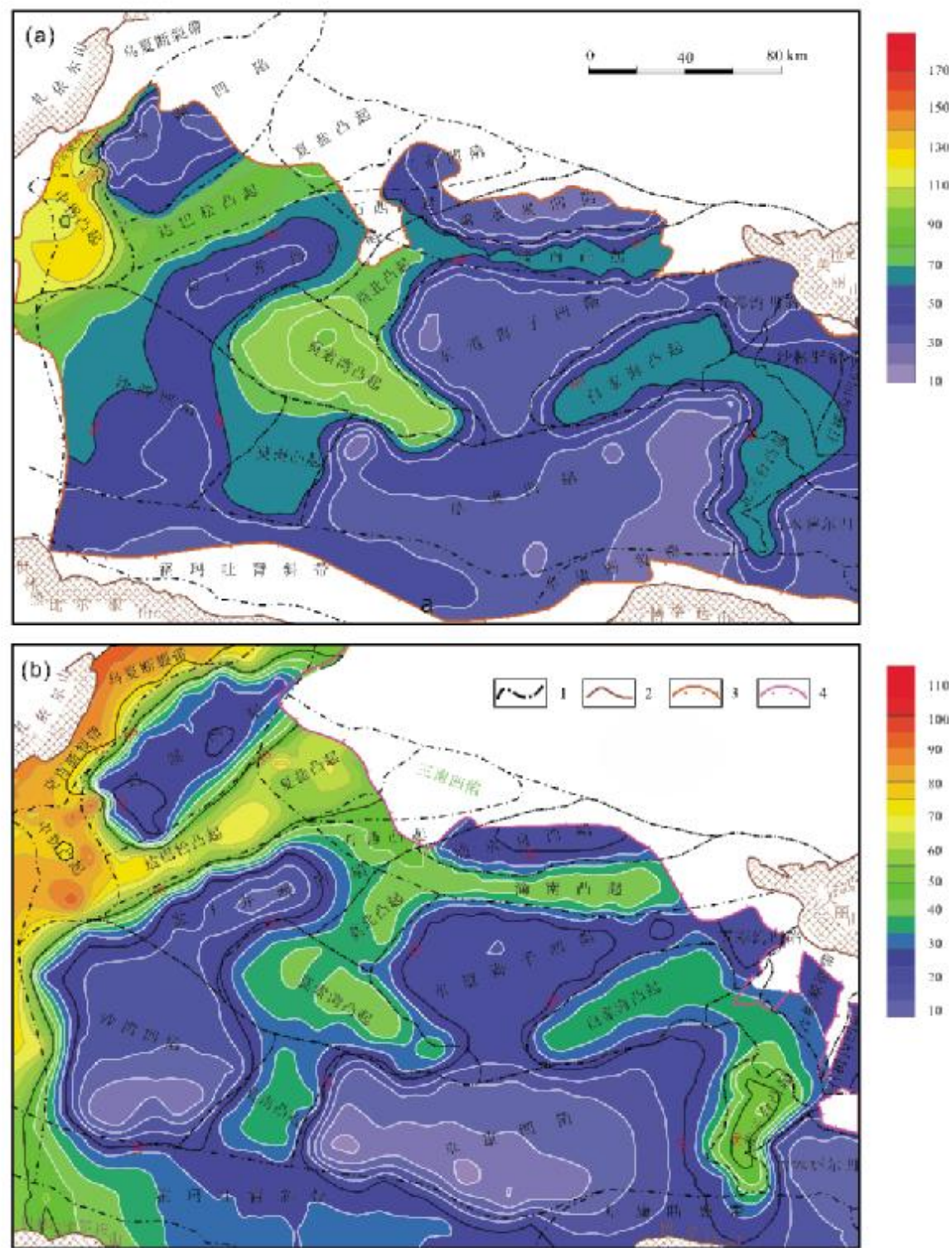


图 8 准噶尔盆地断拗转换期不整合剥蚀厚度等值线图

Fig. 8 Denudation thickness contour of unconformity in the fault-depression transition period of Junggar Basin

a—上乌尔禾组底部不整合 (basal unconformity of Upper Wuerhe Formation); b—百口泉组底部不整合 (basal unconformity of Baikouquan Formation); 1—构造单元分界线 (boundary of tectonic unit); 2—山体边界线 (boundary of mountain body); 3—二叠系上乌尔禾组地层尖灭线 (stratigraphic pinch-out line of Permian Upper Wuerhe Formation); 4—三叠系百口泉组地层尖灭线 (stratigraphic pinch-out line of Triassic Baikouquan Formation)

3)针对剥蚀厚度分布规律研究,表明准噶尔断拗转换期古地貌呈现准噶尔盆地西北缘高、腹部低的地形特征,反映出其盆地改造具有西部强东部弱、边缘强内部弱的特点。

参考文献(References):

- [1]曹强,叶加仁,王巍. 沉积盆地地层剥蚀厚度恢复方法及进展[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(6): 41-46.
Cao Q, Ye J R, Wang W. Methods of eroded strata thickness restoration in sedimentary basins and its advancement [J]. China Petroleum Exploration, 2007, 12(6): 41-46.
- [2]付晓飞,李兆影,卢双舫,等. 利用声波时差资料恢复剥蚀量方法研究与应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(1): 9-11.
Fu X F, Li Z Y, Lu S F, et al. Recovering denudation thickness by interval transit-time[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(1): 9-11.
- [3]李建军. 声波时差法对临清坳陷东部地区上古生界顶部剥蚀量的恢复[J]. 低渗透油气田, 2011(3): 38-43.
Li J J. Recovery of Upper Paleozoic top erosion amount in northeastern Linqing depression with interval transit time method[J]. Low Permeability Oil & Gas Field, 2011(3): 38-43.
- [4]Magara K. Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of Western Canada Basin[J]. AAPG Bulletin, 1976, 60(4): 554-565.
- [5]彭清华,周江羽,揭异新. 声波时差法对南堡凹陷东营组剥蚀量的恢复[J]. 断块油气田, 2009, 16(6): 50-53.
Peng Q H, Zhou J Y, Jie Y X. Erosion thickness restoration of Dongying Formation reservoir in Nanpu Depression by using interval transit time method[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(6): 50-53.
- [6]胡圣标,汪集咏,张容燕. 利用镜质体反射率数据估算地层剥蚀厚度[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4): 42-45.
Hu S B, Wang J Y, Zhang R Y. Estimation of the amount of uplift and erosion across an unconformity using vitrinite reflectance data[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(4): 42-45.
- [7]佟彦明,宋立军,曾少军,等. 利用镜质体反射率恢复地层剥蚀厚度的新方法[J]. 古地学报, 2005, 7(3): 417-424.
Tong Y M, Song L J, Zeng S J, et al. A new method by vitrinite reflectance to estimate thickness of eroded strata [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(3): 417-424.
- [8]Dow W G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 79-99.
- [9]刘斌. 利用流体包裹体计算地层剥蚀厚度——以东海盆地3个凹陷为例[J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 172-176, 180.
Liu B. Calculation of denuded strata thickness by fluid inclusion data: A case study of three depressions in the East China Sea Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(2): 172-176, 180.
- [10]赵力彬,黄志龙,高岗,等. 恢复地层剥蚀厚度的一种新方法——包裹体测温法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(1): 15-19.
Zhao L B, Huang Z L, Gao G, et al. A new method for estimating the removed thickness of sediment using homogenization temperature of fluid inclusions [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006, 21(1): 15-19.
- [11]李京昌. 沉积盆地古应力场研究的新方法——波动分析法[J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 149-151, 138.
Li J C. Undulation analysis served as a new method to the paleostress field study of a sedimentary basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(2): 149-151, 138.
- [12]袁玉松,郑和荣,涂伟. 沉积盆地剥蚀量恢复方法[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 636-642.
Yuan Y S, Zheng H R, Tu W. Methods of eroded strata thickness restoration in sedimentary basins [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 636-642.
- [13]李伟. 恢复地层剥蚀厚度方法综述[J]. 中国海上油气(地质), 1996, 10(3): 167-171.
Li W. Summary of reconstruction of strata denudation thickness [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996, 10(3): 167-171.
- [14]刘彧,王世杰,刘秀明. 宇宙成因核素在地质年代学研究中的新进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 386-397.
Liu Y, Wang S J, Liu X M. New advance of cosmogenic nuclides dating in geochronology research [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 386-397.
- [15]匡立春,唐勇,雷德文,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系百口泉组扇控大面积岩性油藏勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 14-23.
Kuang L C, Tang Y, Lei D W, et al. Exploration of fan-controlled large-area lithologic oil reservoirs of Triassic Baikouquan Formation in slope zone of Mahu Depression in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(6): 14-23.
- [16]石杏茹. 从凹陷区走向世界之巅——新疆油田凹陷区砾岩油藏勘探理论与玛湖特大型油田发现纪实[J]. 中国石油石化, 2018(4): 16-17.
Shi X R. From depression to top of the world: theoretical technology of exploration of conglomerate reservoir in Sagland Area of Xinjiang oilfield and documentary of discovery of Mahu Mega Oilfield [J]. China Petrochem, 2018(4): 16-17. (in Chinese)
- [17]吴孔友,查明,王绪龙,等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识[J]. 地球学报, 2005, 26(3): 217-222.
Wu K Y, Zha M, Wang X L, et al. Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(3): 217-222.
- [18]李攀,李永强,经俭波,等. 准噶尔盆地西北部P-T转换期不整合的发育演化特征及意义[J]. 古地学报, 2020, 22(4): 697-714.

- Li P, Li Y Q, Jing J B, et al. Unconformities formed during the P-T transition in the northwestern Junggar Basin: Nature, evolution and implications[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(4): 697-714.
- [19] 陈业全, 王伟锋. 准噶尔盆地构造演化与油气成藏特征[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(3): 4-8.
- Chen Y Q, Wang W F. Structural evolution and pool-forming in Junggar Basin[J]. *Journal of University of Petroleum, China*, 2004, 28(3): 4-8.
- [20] 吴孔友, 查明, 柳广弟. 准噶尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 53-57.
- Wu K Y, Zha M, Liu G D. The unconformity surface in the Permian of Junggar Basin and the characters of oil-gas migration and accumulation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(2): 53-57.
- [21] 刘建国, 孙钰, 李世银, 等. 济阳拗陷断拗转换期基本特征研究[J]. *特种油气藏*, 2007, 14(1): 34-36, 40.
- Liu J G, Sun Y, Li S Y, et al. Study of the basic features of fault-sag transition stage in Jiyang Depression [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2007, 14(1): 34-36, 40.
- [22] 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 J X, Chen H D, Shi Z Q. 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.
- [23] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 845-861.
- He D F, Zhang L, Wu S T, et al. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 845-861.
- [24] 吴庆福. 准噶尔盆地构造演化与找油领域[J]. *新疆地质*, 1986, 4(3): 1-19.
- Wu Q F. Structural evolution and prospects of Junggar Basin [J]. *Xinjiang Geology*, 1986, 4(3): 1-19.
- [25] 陈哲夫, 康玉柱, 杜焕民, 等. 新疆优势矿产勘查开发战略探讨[J]. *决策咨询通讯*, 1997, 8(2): 29-31.
- Chen Z F, Kang Y Z, Du H M, et al. Exploration and development strategy of advantageous minerals in Xinjiang[J]. *Decision-Making & Consultancy*, 1997, 8(2): 29-31. (in Chinese)
- [26] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[C]//石油大学(北京)盆地与油藏研究中心成立十周年成果选编(1993—2003). 2003.
- Cai Z X, Chen F J, Jia Z Y. Types and tectonic evolution of Junggar Basin[C]//*Proceedings of the Selected Results for the 10th Anniversary of the Establishment of the Research Center for Basins and Reservoirs of the University of Petroleum (Beijing) (1993-2003)*. 2003. (in Chinese)
- [27] Athy L F. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 1930, 14(1): 1-24.
- [28] Spiegler K S, Yoest R L, Wyllie M R J. Electrical potentials across porous plugs and membranes: Ion-exchange resin-solution systems[J]. *Discussions of the Faraday Society*, 1956, 21(1): 174-185.
- [29] Schlumberger. Log Interpretation principles/applications [M]. Sugar Land: Schlumberger Well Service Inc., 1989.
- [30] 牟中海, 陈志勇, 陆廷清, 等. 柴达木盆地北缘中生界剥蚀厚度恢复[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(1): 35-37.
- Mou Z H, Chen Z Y, Lu T Q, et al. The recovery of Mesozoic formation erosion thickness in the north margin of Qaidam basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(1): 35-37.
- [31] 瓦尔特 H. 费特尔. 异常地层压力: 在油气资源勘探、钻井和开采中的应用[M]. 宋秀珍, 译. 北京: 石油工业出版社, 1982.
- Fittle W H. Abnormal formation pressure: Application in exploration, drilling and exploitation of oil and gas resources[M]. Song X Z, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982. (in Chinese)