https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.057



米兰科维奇旋回定量恢复碳酸盐岩地层剥蚀量:以塔 里木盆地轮南古隆起奥陶系为例

马德波,王 媛,陈秀艳,王 珊,杨 敏,杜德道

中国石油勘探开发研究院,北京100083

摘 要: 剥蚀量定量恢复对盆地构造研究意义重大.以塔里木盆地轮南古隆起奥陶系一间房一鹰山组为例,通过钍钾比(Th/K)曲线的米兰科维奇旋回分析定量恢复碳酸盐岩地层剥蚀量,取得3项认识:(1)一间房一鹰山组米兰科维奇旋回特征清晰,较长偏心率周期(413 ka、125 ka)不发育,短偏心率周期(95 ka)、斜度周期、岁差周期较为发育.(2)一间房一鹰山组发育86个短偏心率周期旋回,通过对比剥蚀区与内幕区短偏心率周期旋回数量差异,定量恢复8口井剥蚀量.(3)一间房一鹰山组剥蚀区位于H6-TS2-TS1-LG36井以北,存在西北部、北部两个剥蚀中心,剥蚀量分别超过300 m和250 m.研究成果证实米兰科维奇旋回分析可实现碳酸盐岩地层剥蚀量定量恢复,对海相盆地古构造恢复具有良好的借鉴意义.

关键词:剥蚀量恢复;米兰科维奇旋回分析;塔里木盆地;古构造复原;碳酸盐岩;构造地质.
中图分类号: P548;P535
文章编号: 1000-2383(2023)08-2933-14
收稿日期:2023-01-29

Quantitative Restoration of Eroded Carbonate Strata Thickness by Milankovitch Cycle: A Case Study of Ordovician Strata in Lunnan Paleo-Uplift, Tarim Basin

Ma Debo, Wang Yuan, Chen Xiuyan, Wang Shan, Yang Min, Du Dedao

PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

Abstract: It is of great significance to quantitatively restore eroded strata for tectonic study in a basin. In this paper, through spectral analysis of the ln (Th/K) curve, an indicator of climate variation resulting from Milankovitch cycles, the eroded strata of Ordovician Yijianfang and Yingshan formations are quantitatively restored on Lunnan paleo-uplift of Tarim Basin. The following three results are concluded: (1)Milankovitch cycles are characterized by undeveloped longer eccentricity period (413 ka, 125 ka), well developed short eccentricity period of 95 ka, slope period and precession period in Yijianfang and Yingshan formations. (2) There are 86 short eccentricity periods developed in Yijianfang and Yingshan formations. Erosion thicknesses in 8 wells are restored quantitively by comparing the amount of Milankovitch cycles in short eccentricity period in denudation zones and inside strata. (3)Distributed in the north of well zone H6-TS2-TS1-LG36, the denudation zones include northwestern and northern centers, with an erosion thickness of over 300 m and 250 m respectively. It is approved that Milankovitch cycle analysis is a proxy for quantitative restoration of eroded carbonate strata and provide insight for paleo-structures restoration in marine carbonate basins.

作者简介:马德波(1983-),男,高级工程师,博士,主要从事含油气盆地构造分析与油气地质研究工作.ORCID:0000-0002-1015-755X. E-mail: 315875367@qq.com

引用格式:马德波,王媛,陈秀艳,王珊,杨敏,杜德道,2023.米兰科维奇旋回定量恢复碳酸盐岩地层剥蚀量:以塔里木盆地轮南古隆起奥陶系 为例.地球科学,48(8):2933-2946.

Citation: Ma Debo, Wang Yuan, Chen Xiuyan, Wang Shan, Yang Min, Du Dedao, 2023. Quantitative Restoration of Eroded Carbonate Strata Thickness by Milankovitch Cycle: A Case Study of Ordovician Strata in Lunnan Paleo-Uplift, Tarim Basin.*Earth Science*, 48(8):2933-2946.

基金项目:中国石油天然气股份有限公司"十四五"专项"海相碳酸盐岩致密储层成藏机理、富集规律与勘探评价技术研究"(No. 2021DJ0504);中国石油天然气股份有限公司科技项目"新区新领域综合地质研究与风险目标评价"(No. 2022KT0406).

Key words: restoration of eroded strata thickness; Milankovitch cycle analysis; Tarim Basin; paleo-structure restoration; carbonate strata; structural geology.

0 引言

剥蚀作用是沉积盆地中普遍存在的地质现象, 剥蚀量恢复对研究盆地的构造演化史、沉积埋藏 史、有机质热演化史和地下流体场的形成演化具有 重要意义(马永生等,2006),因此,剥蚀量恢复一直 是油气地质研究中的一项重要工作.前人对如何进 行剥蚀量恢复开展了大量的工作,总结起来,常用 的剥蚀量恢复方法分为4类(袁玉松等,2008):地层 结构分析或地层趋势厚度法、地热指标法、测井技 术法、沉积波动分析法,这些方法在不同地区剥蚀 量恢复中取得了较好的应用效果,但应用在碳酸盐 岩地层剥蚀量恢复中具有一定的局限性,特别是应 用在塔里木盆地这种多旋回叠合盆地剥蚀量恢复 中局限性尤为明显(张小兵等,2011).具体来看,地 层结构分析法或地层趋势厚度法主要基于地层构 造变形形态、残留地层的趋势往外延伸恢复被剥蚀 地层的厚度.由于该类方法简单实用,很多学者尝 试利用该方法恢复了塔里木盆地不同地区不同时 期的剥蚀量(李坤等,2007). 但这类方法受地震资 料品质及解释人员主观认识的影响较大,缺乏定量 约束,不同人员应用同一方法得到的结果可能差别 比较大.地热指标法利用表征地层古地温信息的指 标进行剥蚀量恢复(郭超等,2022;王嘉琦等, 2022),常用的为镜质体反射率法(R_o),碳酸盐岩地 层中很难找到类似指标,目前文献中仅见到王铁冠 等利用 R。数据对塔河一轮南油田关键不整合面的 地层剥蚀量进行了恢复(王铁冠等,2010).测井技 术法主要利用剥蚀前后地层孔隙、压力的变化,常 用的是利用泥岩的声波时差,该方法常用于碎屑岩 地层的剥蚀量恢复,在碳酸盐岩地层中应用较少 (李德勇等,2015;庞玉茂等,2019). 沉积波动分析 法主要基于地层沉积旋回恢复地层剥蚀量,前人尝 试利用该方法在塔东地区、满加尔周缘、塔中地区 进行地层剥蚀量的恢复,有一定效果,但由于缺乏 先验信息的约束,沉积旋回数量的确定有一定的困 难(张一伟等,2000;金之钧等,2005;姜素华等, 2007). 综上所述, 地层趋势厚度法、地层结构外延 法是目前应用较多的剥蚀量恢复方法,但这些方法 缺乏单井剥蚀量恢复的定量约束.对于碳酸盐岩地 层剥蚀量恢复,亟需要研发更加定量化、精细化的 方法.

近年来,随着旋回地层学的发展,米兰科维奇 旋回分析法引入到地层剥蚀量恢复中.该方法在碎 屑岩地层中取得良好应用效果(姚益民等,2011;范 婕等,2018;赵军等,2018),但在碳酸盐岩地层中应 用还只是初步的尝试(郭颖等,2015;江青春等, 2018).其原因在于碎屑岩地层岩性变化可以较好 的记录气候变化,进而记录米兰科维奇旋回信息; 但碳酸盐岩地层中缺乏能够记录米兰科维奇旋回 信息的有效曲线.

本文针对塔里木盆地轮南古隆起奥陶系一间 房一鹰山组碳酸盐岩地层剥蚀量恢复难题,通过选 取碳酸盐岩地层气候变化指示性曲线开展频谱分 析,挖掘一间房一鹰山组碳酸盐岩地层中蕴含的米 兰科维奇旋回信息,以此来定量恢复剥蚀量,取得 较好的效果.

1 区域地质背景

轮南古隆起位于塔北隆起中东部,是以寒武 系一中下奥陶统碳酸盐岩为主体、北东向展布的前 中生界隆起(图1).北侧以轮台断裂为分界线与轮 台凸起分割,南侧以南倾斜坡逐渐过渡至北部坳 陷,西侧为英买力低凸起的东斜坡,东侧以东倾陡 坡过渡至草湖凹陷,包含轮南低凸起、哈拉哈塘凹 陷两个次级构造单元,总面积约1.4万km².

受盆地周缘多期洋盆闭合影响,轮南古隆起经 历寒武纪一早中奧陶世前古隆起、晚奧陶世古隆起 形成、晚泥盆一早石炭世叠加改造、晚二叠世一三 叠纪古隆起定型、侏罗纪一古近纪古隆起埋藏和新 近纪以来构造掀斜6个演化阶段(马德波等,2020). 其中晚奧陶世、晚泥盆一早石炭世、晚二叠世三个 控制轮南古隆起演化的关键时期对整体形态影响 较大,造成一间房一鹰山组碳酸盐岩地层遭受多期 次剥蚀. 地震剖面揭示研究区碳酸盐岩地层最下剥 蚀到鹰山组. 多期剥蚀作用下的一间房一鹰山组发 育大规模岩溶缝洞型储层,是塔河一哈拉哈塘海相 大油气田的主要储集类型(马德波等,2018).

研究区地层发育较为齐全,发育震旦系至泥盆

系海相沉积地层、石炭系至二叠系海陆交互相沉积 地层和中新生界陆相沉积地层(何登发等,2005). 本文讨论的主要目的层为奥陶系,自上而下可细分 为上统桑塔木组(O₃s)、良里塔格组(O₃l)及吐木休 克组(O₃t),中统一间房组(O₂y),中一下统鹰山组 (O₁₋₂y)、下奥陶统蓬莱坝组(O₁p).一间房一鹰山组 为一套连续沉积的碳酸盐岩台地沉积,鹰山组下部 为含云灰岩、云质灰岩、灰质白云岩,鹰山组上部一 一间房组为厚层状粉晶或砂屑灰岩.

2 数据和方法

2.1 所利用的数据

轮南古隆起奥陶系钻井较多,但钻穿一间房一 鹰山组的钻井数量有限.论文选取该区钻穿一间 房一鹰山组的12口钻井,开展碳酸盐岩地层剥蚀量 恢复(位置见图1b).这12口钻井的选取基于两方面 考虑:一是从平面位置来看(图1b),4口井一间房一 鹰山组碳酸盐岩未遭受剥蚀(红点),8口井一间 房一鹰山组碳酸盐岩遭受剥蚀(蓝点).一间房一鹰 山组碳酸盐岩未遭受剥蚀的4口井主要用来确定总 的米兰科维奇旋回数,另外8口井需要计算其剥蚀 量.二是所选钻井都具有相对较全的测井曲线,特 别是具有完整的GR、自然伽马能谱测井曲线,满足 后续进行米兰科维奇旋回分析.

2.2 剥蚀量恢复方法

2.2.1 可行性分析 米兰科维奇旋回分析法能否 用于轮南古隆起一间房一鹰山组碳酸盐岩地层剥 蚀量,取决于两个方面:一是研究区一间房一鹰山 组碳酸盐岩地层是否记录了米兰科维奇旋回信息; 二是一间房组与鹰山组之间是否为连续沉积.对 此,本文进行了系统调研分析,具体如下:

(1)米兰科维奇理论认为,地球轨道参数的周期性变化引起地球表面日照量的周期性变化,进而导致地球气候的周期性变化,气候的周期性变化又控制着沉积地层的旋回性变化,这些旋回性记录称为米兰科维奇旋回(吴怀春等,2011).地球轨道参数是影响米兰科维奇旋回的关键因素,主要包括偏心率(eccentricity)、斜度(obliquity)和岁差(precession).每个参数具有随地质时代变化的时间周期,前人已通过古生物地层、古地磁、同位素年代资料等确定不同地质时代的地球轨道参数(Berger *et al.*, 1992;田军等,2022),见表1.

国内外众多研究实例表明,台地相碳酸盐岩沉

积序列和远洋/半远洋沉积序列容易保存良好的米 兰科维奇旋回信息(Da Silva and Boulvain, 2006; Spahn et al., 2013). 诸多学者采用磁化率、自然伽 马、牡钾比等测井曲线作为指示性曲线,通过频谱 分析证实塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩地层中包含 有与天文轨道周期有关的米兰科维奇旋回信息,且 对古水深变化敏感的牡钾比曲线 ln(Th/K)是识别 旋回信息的有效工具(赵宗举等, 2010;张运波等, 2011; Li et al., 2016; Fang et al., 2019; 马雪莹等, 2021). 这些工作为本文通过米兰科维奇旋回分析 恢复碳酸盐岩地层剥蚀量奠定理论基础.

(2)前人对于塔里木盆地奥陶系一间房组与鹰 山组的接触关系开展了大量研究工作,认为一间 房一鹰山组之间的接触关系在盆地不同地区有差 异.阿克苏一塔中北坡鹰山组与一间房组之间存在 沉积间断(杜品德等,2017;赵治信等,2018),但研 究区所处的塔北隆起-北部坳陷-间房-鹰山组 之间为连续沉积,主要有两方面证据:从塔北隆 起一北部坳陷钻井的牙形刺资料来看,鹰山组为弗 洛阶上部一大坪阶一达瑞威尔阶底部,一间房组为 达瑞威尔阶中下部(赵宗举等,2006;Liu et al., 2016;尚凯等,2018),两者之间为连续沉积,累计持 续时间大约12 Ma. 从测井、地震等地球物理资料来 看,钻/测井资料上一间房与鹰山组之间没有明显 的测井曲线的变化,地震资料上两者之间也没有明 显的反射界面,印证了塔北隆起一北部坳陷一间 房一鹰山组为连续沉积的观点.

综上所述,轮南古隆起奥陶系一间房一鹰山组 为连续沉积,且记录了米兰科维奇旋回信息,因此, 通过米兰科维奇旋回分析恢复一间房一鹰山组碳 酸盐岩地层剥蚀量是可行的,且地层缺少的米兰科 维奇旋回数代表的就是被剥蚀地层的旋回数.

2.2.2 主要方法步骤 利用米兰科维奇旋回分析 恢复地层剥蚀量的主要方法步骤包括确定覆盖区 单井米兰科维奇旋回数量、确定剥蚀区单井米兰科 维奇旋回数量、计算剥蚀区单井剥蚀量.具体步骤 如下:

(1)调研前人研究成果,确定中奥陶世米兰科 维奇旋回固有周期(偏心率周期、斜度周期、岁差周期)及相互之间的比值,如表1所示.

(2)选择对米兰科维奇旋回敏感的指示性曲线,确定适当的采样间隔,进行合理采样.碳酸盐岩地层常用的指示性曲线为GR曲线、钍钾比曲线 ln



图1 轮南古隆起奥陶系碳酸盐岩顶面构造图与骨干地震剖面

Fig. 1 Tectonic unit division of Tabei uplift and location map of the study area

a.轮南古隆起奧陶系碳酸盐岩页面时间构造图;b.过研究区东西向地震剖面(剖面位置见图1a);c.过研究区北西-南东向地震剖面(剖面位置 见图1a);∈.寒武系底;O.奧陶系底;O3t.上奧陶统吐木休克组底;S.志留系底;C.石炭系底;P.二叠系底;T.三叠系底;J.侏罗系底;K.白垩 系底;E.古近系底

| 0 | \cap | 0 | 7 |
|---|--------|---|---|
| Δ | Э | ð | 1 |

| Tał | ble 1 | Middle Ordovician milankovic cycle cycle and its proportional relationship (according to Berger et al., 1992) | | | | | | | | |
|-----|-------|---|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|--|
| 基准 | 隹 | | 偏心率周期(ka |) | 斜度周期 | 岁差周期(ka) | | | | |
| 周期 | 抈 | $413.000(E_3)$ | $125.000(E_2)$ | $95.000(E_1)$ | $36.578(O_2)$ | $30.134(O_1)$ | $19.131(P_2)$ | $16.263(P_1)$ | | |
| | | 1.000 | 0.303 | 0.230 | 0.089 | 0.073 | 0.046 | 0.039 | | |
| | | - | 1.000 | 0.760 | 0.293 | 0.241 | 0.153 | 0.130 | | |
| 比伯 | 直 | - | - | 1.000 | 0.385 | 0.317 | 0.201 | 0.171 | | |
| | | - | - | - | 1.000 | 0.814 | 0.517 | 0.440 | | |
| | | - | - | - | - | 1.000 | 0.635 | 0.540 | | |

表1 中奥陶世米兰科维奇旋回周期及相互之间比例关系(据 Berger et al., 1992)



Fig. 2 ln (Th / K) curve and spectrum analysis results of well AD16
 a. ln(Th/K)曲线与最大熵频谱;b. 与中奥陶世固有周期的对应关系

(Th/K). 钍钾比曲线通过两种元素比值可以尽可能的排除非天文轨道力的影响,更适于作为古气候替代指标.为保证后续得到好的频谱分析曲线,必须有足够多的数据点.通过笔者在研究区的实验,一间房一鹰山组ln(Th/K)曲线至少要有150m,论

文用的采样间隔为0.125 m,即至少有1200个数据 点才能得到较理想的频谱曲线.

(3)对指示性曲线 ln(Th/K)进行带通滤波预处 理、频谱分析(最大熵方法或小波变换),得到频谱 分析结果(图 2a).带通滤波预处理的目的是剔除掉 低频背景(构造沉降信息,整体趋势)和高频噪声 (干扰信号),更好的保留与天文轨道周期有关的米 兰科维奇旋回信息.频谱分析能够估算不同频率的 功率谱,定义为单位频带内信号的功率,即信号功 率在不同频率范围内的分布情况.频谱分析的作用 就是评估能量较高的非随机频段是否与米兰科维 奇旋回的频率吻合,具体操作采用德国不莱梅大学 Boris Priehs 基于 Matlab 开发的 Redfit 软件,选择置 信度为 90% 的峰值频率进行分析(宋翠玉等, 2022).图 2a 中左侧两列为 AD16 井 GR、ln(Th/K) 曲线,第三列为 ln(Th/K)曲线的最大熵频谱,代表 随深度变化,ln(Th/K)不同频率(旋回个数/米)能 量的变化,图中蓝色线所画区域展开即图 2b.

(4)通过频谱峰值频率计算旋回厚度,进而得 到旋回厚度比.对所有频谱峰值点进行编号(a、b··· f),读取每个峰值谱对应的频率 $f(f_a,f_b, \cdots,f_t)$.计算每 个峰值频率对应的旋回厚度h(h=采样间隔/峰值频率f),计算旋回厚度相互之间的比值(图 2b).

(5)通过地层旋回厚度比值与天文周期参数之间的固有比值对比,确定沉积地层是否记录了轨道旋回周期.将第(4)步中计算的地层旋回厚度比值与步骤(1)中确定的米氏旋回周期参数比值两者之间进行比对,确定步骤(4)中每个频谱峰值点对应的米氏旋回周期.

(6)地层剥蚀量计算.选取地层未遭受剥蚀的 井,确定出所研究目的层发育的总旋回数.确定遭 受剥蚀钻井残留地层的旋回数,两者相减即为被剥 蚀地层的旋回数,乘以旋回厚度,即为被剥蚀地层 厚度.

3 结果

3.1 内幕区一间房-鹰山组米兰科维奇旋回数量的确定

为了确定研究区一间房一鹰山组完整的米兰 科维奇旋回特征,选取内幕区钻穿鹰山组的4口深 钻井(H6、TS1、TS2、LG36),对其一间房一鹰山组 ln(Th/K)曲线按照0.125m采样间隔开展小波变换 频谱分析,确定研究区一间房一鹰山组峰值频率、 平均旋回厚度,进而确定内幕区一间房一鹰山组米 兰科维奇旋回数量.

3.1.1 频谱分析与平均旋回厚度图3为内幕区4 口钻井一间房一鹰山组ln(Th/K)小波变换频谱曲线,可以看出,4口井的ln(Th/K)小波变换频谱曲 线都发育一定数量的峰值点.为了确定这些峰值点

与米兰科维奇旋回周期之间的对应关系,读取每个 峰值谱对应的频率f,计算出每个峰值频率对应的旋 回厚度 h(h=采样间隔/峰值频率 f),最后,得到旋 回厚度相互之间的比值.经过对比,旋回厚度相互 之间的比值与中奥陶世米氏旋回基准周期比例基 本相近,两者之间的误差均小于5%.以H6井为例, 通过对H6井一间房一鹰山组(6 692~7 415 m井 段)的ln(Th/K)测井曲线进行频谱分析表明,H6井 一间房一鹰山组存在米兰科维奇旋回周期(图3 (a)).图 3a 中纵坐标表示相对强度,横坐标表示频 率(旋回个数/m),图 $3a + a_b,c_d,e$ 的峰值频率分 别为0.0148、0.0390、0.0460、0.0750、0.0840、对应 的旋回厚度为 8.4 m、3.19 m、2.72 m、1.67 m、1.48 m,对应的旋回厚度比分别为1:0.380:0.320:0.200: 0.176. 根据Berger中奥陶世米兰科维奇旋回周期方 案(Berger et al., 1992)计算的天文周期 95 ka(E₁)、 $36.5 \text{ ka}(O_2)$, $30.1 \text{ ka}(O_1)$, $19.1 \text{ ka}(P_2)$, $16.2 \text{ ka}(P_1)$ 之间的比率为1:0.385:0.317:0.201:0.171. 虽然根 据峰值频率计算出的旋回厚度比较薄,旋回厚度比 才是是否包含有米兰科维奇旋回信息的主要参数. 从H6井旋回厚度比来看,图3中a/b/c/d/e旋回厚 度比与天文周期 E_1 、 O_2 、 O_1 、 P_2 、 P_1 之间的比值一致, 由此可以认为8.4m的旋回与95 ka的偏心率周期对 应,3.19 m、2.72 m的旋回分别与 36.5 ka、30.1 ka的 地轴斜率周期对应,1.67 m、1.48 m的旋回分别与 19.1 ka、16.2 ka的岁差周期相对应.

用同样的方法,对内幕区另外3口井的一间 房一鹰山组ln(Th/K)测井曲线进行频谱分析,频谱 分析结果见图3,计算出的旋回厚度见表2.可以看 出,内幕区4口井较长偏心率周期都不发育,短偏心 率周期、斜度周期、岁差周期都比较发育,且相互之 间的比值与中奥陶世米式旋回基准周期比例之间 的误差都小于5%,因此认为计算结果可信.这个结 果也与前人对野外露头利用磁化率进行米兰科维 奇旋回分析,得出的认识是一致,即较长偏心率周 期不发育,95 ka短偏心率周期较为发育.

3.1.2 内幕区一间房-鹰山组旋回数量 H6 井一 间房一鹰山组 6 692~7 415 m,共计 723 m,95 ka短 偏心率周期平均旋回厚度为 8.4 m,因此该井包含 86 个短偏心率旋回.TS1 井一间房一鹰山组 5 573~6 557 m,视厚度为 984 m,地层倾角 15°,所以 地层真厚度为 950.5 m.TS1 井 95 ka短偏心率周期 平均旋回厚度为 10.96 m,因此 TS1 井包含 86.7 个



Fig. 3 ln (Th/K) wavelet transform spectrum of Yijianfang Yingshan formation in inner area 横坐标频率表示单位厚度内地层旋回变化的次数,即厚度为1m的一段地层中所包含的旋回个数;纵坐标为"功率"或"能量";a. H6井;b. TS1 井;c. TS2井;d. LG36井

短偏心率旋回(图 3b). TS2 井一间房一鹰山组 5 520~5 590 m,共计 868 m,95 ka短偏心率周期平均 旋回厚度为 10 m,因此 TS2 井包含 86.8 个短偏心率 旋回(图 3c). LG36 井一间房一鹰山组 5 942.5~6 705.0 m,95 ka短偏心率周期平均旋回厚度为 7.55 m,视厚度 762.5 m,地层倾角为 28°,地层真厚度为 671 m,因此 LG36 井包含 88.87 个短偏心率旋回(图 3d).该井计算出的米兰科维奇旋回数比上述 3 口井 多 2 个旋回,其原因可能是该井地层倾角过大 (28°),造成钍/钾比曲线较真实地层的钍钾比曲线 有拉伸,旋回特征有变化.

通过内幕区4口井一间房一鹰山组米兰科维奇 旋回的分析,确定研究区一间房一鹰山组共记录了 86个95ka短偏心率周期旋回,以此作为依据恢复 剥蚀区8口井一间房一鹰山组的剥蚀量.

3.2 剥蚀区单井一间房-鹰山组地层剥蚀量计算

图4为一间房一鹰山组遭受剥蚀的6口井代表 性的ln(Th/K)小波变换频谱曲线,表3为计算出的 这8口井的平均旋回厚度.可以看出,除YQ4井发 育413ka长偏心率周期外,其他井较长偏心率周期 不发育,短偏心率周期、斜度周期、岁差周期都比较 发育,相互之间的比值与中奥陶世米式旋回基准周 期比例之间的误差几乎都小于5%,因此本文认为 计算结果可信.论文接下来利用每口井包含的95 ka短偏心率周期旋回来计算一间房一鹰山组剥 蚀量.

QG5井缺失一间房组,鹰山组6655~7180m, 共计 525 m,95 ka 短偏心率周期平均旋回厚度为 9.04 m,因此该井包含58个短偏心率旋回,与该区 完整的86个短偏心率旋回相比差28个旋回,因此 剥蚀量为253 m(图4a). YQ5井也缺失一间房组,该 井未钻穿鹰山组,仅钻揭鹰山组182 m. 通过地震计 算鹰山组厚度为555 m,95 ka短偏心率周期平均旋 回厚度为11.7 m,因此该井包含50.5个短偏心率旋 回,与完整旋回相比差35.5个旋回,剥蚀量为390.5 m(图 4c). AD16 井钻揭鹰山组 333.5 m, 未钻穿鹰 山组,通过地震计算的鹰山组厚565m,短偏心率旋 回平均旋回厚度为10m,因此该井包含56.5个短偏 心率旋回,与完整旋回相比差29.5个旋回,剥蚀量 为 295 m(图 4c). 通过类似的方法,依次算得 YQ6、 LS2、S88、YQ4、LX4井一间房一鹰山组剥蚀量分别 为 26.8 m、147.0 m、72.8 m、115.2 m、282.4 m.

3.3 一间房-鹰山组剥蚀量平面分布与合理性分析3.3.1 一间房-鹰山组剥蚀量分布 图 5 为研究区

| | | | 旋回厚度(m) | | | | | | | |
|------|-------|-----------|---------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|--|--|
| 井名 | 가다 가는 | 偏心率周期(ka) | | | 斜度周期(ka) | | 岁差周期(ka) | | | |
| | 尖 別 | 413 | 125 | 95 | 36.578 | 30.134 | 19.131 | 16.263 | | |
| | | (E_{3}) | (E_2) | (E_1) | (O ₂) | (O_1) | (P ₂) | (P_1) | | |
| | 厚度 | | | 8.40 | 3.19 | 2.72 | 1.67 | 1.48 | | |
| H6 | 比值 | | | 1 | 0.380 | 0.320 | 0.200 | 0.176 | | |
| | 误差 | | | 0 | 1.36% | -2.15% | 1.09% | -3.04% | | |
| TS1 | 厚度 | | | 10.96 | 4.24 | 3.92 | 2.23 | 1.88 | | |
| | 比值 | | | 1 | 0.386 | 0.350 | 0.203 | 0.172 | | |
| | 误差 | | | 0 | -0.20% | -4.00% | -0.20% | -0.10% | | |
| TS2 | 厚度 | | | 10 | 3.92 | 3.31 | 1.92 | 1.75 | | |
| | 比值 | | | 1 | 0.392 | 0.330 | 0.192 | 0.175 | | |
| | 误差 | | | 0 | -1.86% | -4.28% | 4.33% | -2.59% | | |
| | 厚度 | | | 7.55 | 2.79 | 2.40 | 1.54 | 1.28 | | |
| LG36 | 比值 | | | 1 | 0.370 | 0.318 | 0.205 | 0.170 | | |
| | 误差 | | | 0 | 3.93% | -0.20% | -1.76% | 0.70% | | |



Table 2 Calculation of Milankovitch cycle thickness of Yijianfang Yingshan formation in inner are





一间房一鹰山组地层剥蚀量平面分布图,可以看出,一间房一鹰山组剥蚀区主要位于研究区北部H6-TS2-TS1-LG36井以北,剥蚀量为0~390 m.剥蚀 量最大的地区位于研究区西北侧YQ5-SC2井周围, 剥蚀量超过300 m;另外还有1个局部剥蚀厚值区, 位于LX4井周围,剥蚀量大于250 m.

3.3.2 合理性分析 研究区中下奥陶统被剥蚀地 层主要为一间房一鹰山组,因此图5一间房一鹰山 组剥蚀量分布也代表了中下奥陶统地层剥蚀量.考 虑到研究区一间房一鹰山组沉积时为相对稳定的 大型碳酸盐岩台地,原始沉积地层厚度变化不大, 现今残余厚度的横向变化为构造剥蚀的结果.因此,残余厚度与剥蚀量有一定的镜像关系,残余厚 度可以用来验证剥蚀量恢复结果的合理性.

图 6 显示中下奥陶统残余厚度存在两个低值 区,与图 5 米兰科维奇旋回法计算的剥蚀厚度高值 区具有较好的对应关系.反映了通过米兰科维奇旋 回法计算的一间房一鹰山组剥蚀厚度合理、可信. 通过与前人地层延伸法恢复的剥蚀量对比(李坤 等,2007),发现米兰科维奇旋回恢复的地层剥蚀量 具有两个优势:一是剥蚀量厚度更加贴近实际.论 文恢复的剥蚀量厚度最大 390 m,趋势厚度法恢复

| | | 旋回厚度(m) | | | | | | |
|--------|----------|-----------|-------------------|-------------------|---------|-------------------|---------|---------|
| -H. 64 | <u> </u> | 偏心率周期(ka) | | 斜度周期(ka) | | 岁差周期(ka) | | |
| 开名 | 尖别 | 413 | 125 | 95 | 36.578 | 30.134 | 19.131 | 16.263 |
| | | (E_{3}) | (E ₂) | (E ₁) | (O_2) | (O ₁) | (P_2) | (P_1) |
| | 厚度 | | | 9.04 | 3.35 | 2.88 | 1.79 | 1.55 |
| QG5 | 比值 | | | 1 | 0.371 | 0.319 | 0.198 | 0.171 |
| | 误差 | | | 0 | 3.53% | -0.63% | 1.26% | -0.03% |
| | 厚度 | | | 11.70 | 4.44 | 3.82 | 2.38 | 2.03 |
| YQ5 | 比值 | | | 1 | 0.378 | 0.325 | 0.203 | 0.173 |
| | 误差 | | | 0 | 1.72% | -2.70% | -0.94% | -1.07% |
| | 厚度 | | | 10.00 | 4.06 | 3.37 | 2.08 | 1.77 |
| AD16 | 比值 | | | 1 | 0.403 | 0.335 | 0.206 | 0.176 |
| | 误差 | | | 0 | -4.68% | -5.72% | -2.85% | -2.86% |
| | 厚度 | | | 13.14 | 5.07 | 4.08 | 2.67 | 2.26 |
| YQ6 | 比值 | | | 1 | 0.386 | 0.310 | 0.203 | 0.172 |
| | 误差 | | | 0 | -0.10% | 0.70% | -0.20% | -0.10% |
| | 厚度 | | | 10.50 | 3.97 | 3.55 | 2.10 | 1.85 |
| LS2 | 比值 | | | 1 | 0.377 | 0.337 | 0.199 | 0.176 |
| | 误差 | | | 0 | 1.90% | -6.40% | 0.80% | -2.90% |
| S88 | 厚度 | | | 10.40 | 3.97 | 3.30 | 2.12 | 1.79 |
| | 比值 | | | 1 | 0.381 | 0.316 | 0.204 | 0.172 |
| | 误差 | | | 0 | 1% | 0.20% | -1.50% | -0.70% |
| | 厚度 | 41.35 | | 9.60 | 3.76 | 3.10 | 1.89 | 1.59 |
| YQ4 | 比值 | | | 1 | 0.391 | 0.323 | 0.197 | 0.166 |
| | 误差 | | | 0 | -1.50% | -1.90% | 1.90% | 2.90% |
| LX4 | 厚度 | | | 13.40 | 5.20 | 4.19 | 2.75 | 1.98 |
| | 比值 | | | 1 | 0.388 | 0.313 | 0.205 | 0.148 |
| | 误差 | | | 0 | -0.80% | 1.30% | 2.00% | 13.40% |

表 3 剥蚀区一间房-鹰山组米兰科维奇旋回厚度计算表 Table 3 Calculation of Milankovitch cycle thickness of Yijianfang Yingshan formation in denudation area

的最大剥蚀量 500 多米,考虑到整个一间房一鹰山 组最厚1000 m左右,残留地层都在 600 m以上,因 此,最大剥蚀量难以超过 500 m. 二是从剥蚀量厚度 趋势来看,米兰科维奇旋回恢复的地层剥蚀量更符 合区域地质背景.趋势厚度发恢复的最大剥蚀量中 部厚,北部薄,这与北部抬升更强的背景明显不符 合.同时,米兰科维奇旋回恢复的地层剥蚀量具有 一个劣势,主要是该方法通过单井的分析来恢复剥 蚀量,没有趋势厚度法利用地震数据恢复的剥蚀量 资料密度大.

4 讨论

4.1 米兰科维奇旋回分析法恢复碳酸盐岩地层剥 蚀量的有效性

通过对轮南古隆起重点钻井一间房-鹰山组 ln

(Th/K)曲线开展频谱分析,发现一间房一鹰山组 碳酸盐岩记录了米兰科维奇旋回信息,且较长偏心 率周期不发育,短偏心率周期、斜度周期、岁差周期 较为发育.此认识与房强等以磁化率作为古气候替 代指标,对盆地西北部柯坪地区野外露头剖面开展 旋回地层学分析的结果一致;也与张运波等人以 ln (Th/K)作为古气候替代指标对塔中一巴楚地区鹰 山组分析结果一致.这些都反映了以一间房一鹰山 组为代表的台地相碳酸盐岩记录了米兰科维奇旋 回信息,为台地相碳酸盐岩开展定量化层序地层划 分、定量化剥蚀量恢复等提供了有效的技术方法.

总之,基于米兰科维奇旋回分析可以实现碳酸 盐岩地层剥蚀量的定量恢复,对海相碳酸盐岩盆地 古构造恢复具有良好的借鉴意义.



图5 研究区一间房一鹰山组地层剥蚀量平面图

Fig. 5 plan of stratum denudation amount of Yijianfang Yingshan formation in the study area



图 6 研究区中下奥陶统残余厚度图 Fig. 6 Residual thickness map of middle and lower Ordovician in the study area

4.2 一间房-鹰山组剥蚀量分布的构造指示意义

轮南古隆起是一个以寒武一奥陶系碳酸盐岩 为主体的叠合古隆起,经历多期构造运动叠加改 造,每一期构造运动都在中下奥陶统碳酸盐岩留下 剥蚀痕迹,因此,剥蚀量恢复结果对于该区构造演 化具有一定的指示意义.

通过本文对一间房-鹰山组剥蚀量的定量恢

复,可以看出轮南古隆起一间房一鹰山组存在两个 剥蚀量厚值中心,一个剥蚀中心位于研究区西北部 YQ5-SC2井周围,另外一个剥蚀中心位于研究区北 部LX4井周围.研究区一间房一鹰山组剥蚀量的分 布特点指示了轮南古隆起可能经历2期古隆起的复 合叠加,结合区域地震解释结果,一期为志留纪前 古隆起,核部位于研究区西北部YQ5-SC2井周围,





图 7 关键构造期轮南古隆起分布图 Fig.7 Distribution map of Lunnan paleo-uplift in key tectonic period a. 晚奥陶世;b. 晚泥盆-早石炭世

另外一期为石炭纪前古隆起,核部位于研究区北部 LX4井周围(图7).

5 结论

(1)本文以塔里木盆地轮南古隆起奥陶系一间 房一鹰山组为例,通过Th/K曲线频谱分析挖掘米 兰科维奇旋回信息,进而定量恢复碳酸盐岩地层剥 蚀量,取得较好的效果.

(2)识别米兰科维奇旋回信息是应用该方法恢 复碳酸盐岩地层剥蚀量的关键,其中包含两个重要 方面:一是选择有效的古气候、古水深变化指示性 曲线,钍钾比曲线 Th/K、自然伽马GR曲线是碳酸 盐岩地层较好的指示性曲线;二是通过频谱分析挖 掘指示性曲线中包含的米兰科维奇旋回信息,主要 是通过比较频谱分析得到的旋回厚度相互之间的 比值与固有周期(偏心率周期、斜度周期、岁差周 期)之间比值的对应关系,确定地层包含的米兰科 维奇旋回信息.

(3)轮南古隆起一间房一鹰山组米兰科维奇旋回特征清晰,较长偏心率周期(413 ka、125 ka)不发

育,95 ka短偏心率周期、斜度周期、岁差周期都比较 发育,尤其是95 ka短偏心率周期,在每口井上都有 很好的体现.研究区内幕区4口井米兰科维奇旋回 分析表明一间房一鹰山组发育86个95 ka短偏心率 周期旋回.

(4)以米兰科维奇旋回分析为依据,恢复剥蚀 区 8 口井一间房一鹰山组剥蚀量,明确一间房一鹰 山组剥蚀区主要位于研究区北部 H6-TS2-TS1-LG36 井以北,剥蚀量最大的地区位于研究区西北 侧 YQ5-SC2 井周围,剥蚀量超过 300 m;另外一个 局部剥蚀厚值区位于 LX4 井周围,剥蚀量大于 250 m.这种剥蚀量分布特点指示了轮南古隆起可能经 历核部分别位于西北部、北部两期古隆起的复合 叠加.

References

- Berger, A., Loutre, M. F., Laskar, J., 1992. Stability of the Astronomical Frequencies over the Earth's History for Paleoclimate Studies. *Science*, 255(5044): 560-566. https: //doi.org/10.1126/science.255.5044.560
- Da Silva, A. C., Boulvain, F., 2006. Upper Devonian Carbonate Platform Correlations and Sea Level Variations Recorded in Magnetic Susceptibility. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 240(3/4): 373-388. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.02.012
- Du, P. D., Zhao, Z. X., Yang, Z. L., et al., 2017. Distribution and Correlation of Late Ordovician Conodont Taoqupognathus in Tarim Basin. *Journal of Stratigraphy*, 41(4): 421-427(in Chinese with English abstract).
- Fan, J., Jiang, Y. L., Cui, X. J., et al. 2018. Unconformable Eroded Thickness Recovery by Cycle Analysis Method. *Journal of China University of Mining & Technology*, 42 (2): 323-331(in Chinese with English abstract).
- Fang, Q., Wu, H. C., Wang, X. L., et al., 2019. An Astronomically Forced Cooling Event during the Middle Ordovician. *Global and Planetary Change*, 173: 96–108. https: //doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.12.010
- Guo, C., Zhang, Z. Y., Wu, L., et al. 2022. Mesozoic-Cenozoic Coupling Process of Tianshan Denudation and Sedimentation in the Northern Margin of the Tarim Basin: Evidence from Low Temperature Thermochronology (Kuqa River Section, Xinjiang). *Earth Science*, 47(9): 3417-3430(in Chinese with English abstract).
- Guo, Y., Tang, L. J., Yue, Y., et al., 2015. Application of Cycle Analysis Method to Estimate the Denuded Strata Thickness: a Case Study of Middle-Lower Ordovician

Yingshan Formation of the Eastern Yubei Area, Tarim Basin. Journal of Chinia University of Mining & Technology, 44 (4): 664-672(in Chinese with English abstract).

- He, D. F., Jia, C. Z., Li, D. S., et al., 2005. Formation and Evolution of Polycyclic Superimposed Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 26 (1): 64-77(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Q. C., Hu, S. Y., Jiang, H., et al., 2018. Calculation and Inducement of Lacuna in the Mid-Permian Maokou Fm of Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 5(4): 351-359(in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. H., Xu, X. M., Kang, H. M., et al., 2007. Calculation of the Denuded Amount of the Cenozoic Prototype Basin under the Restriction of the Wave Analysis Method: an Example of Huimin Depression. *Periodical of Ocean University of China*, 37 (4): 641-646(in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., Zhang, Y. W., Chen, S. P., 2005. Tectono-Sedimentary Fluctuation Process in Tarim Basin. Science In China (Ser. D Earth Science), 35(6): 530-539(in Chinese with English abstract).
- Li, D. Y., Guo, T. Y., Jiang, X. D., et al., 2015. Erosion Thickness Recovery and Tectonic Evolution Characterization of Southern East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 36 (6): 913-923(in Chinese with English abstract).
- Li, K., Zhao, X. K., Shen, Z. M., et al., 2007. Application of Trend Thickness Method in Denudation Recovery in the Akekule Lobe of Tarim Basin. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 29 (5): 415– 419(in Chinese with English abstract).
- Li, M. S., Ogg, J., Zhang, Y., et al., 2016. Astronomical Tuning of the End-Permian Extinction and the Early Triassic Epoch of South China and Germany. *Earth and Planetary Science Letters*, 441: 10-25. https://doi.org/ 10.1016/j.epsl.2016.02.017
- Liu, C. G., Qi, L. X., Liu, Y. L., et al., 2016. Positive Carbon Isotope Excursions: Global Correlation and Genesis in the Middle-Upper Ordovician in the Northern Tarim Basin, Northwest China. *Petroleum Science*, 13(2): 192–203. https://doi.org/10.1007/s12182-016-0096-3
- Ma, D. B., Chen, L.X., Tao, X. W., et al., 2018. The Tectonic Evolution and Its Petroleum Geological Significance in Halahatang Area, Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 53 (1): 87-104(in Chinese with English abstract).
- Ma, D. B., Yang, M., Du, D. D., et al., 2020. Analysis of the Superposition Process of Multiphase Active Paleo-Uplift: Taking the Lunnan Paleo-Uplift in the Tarim Basin as an

Example. *Acta Petrologica Sinica*, 36(11): 3523-3536(in Chinese with English abstract).

- Ma, X. Y., Lu, Y. Z., Fan, R., et al., 2021. Cyclostratigraphic Studies of the Middle-Upper Ordovician at Dawangou Section, Kalpin, Xinjiang and Their Geological Implication. *Journal of Stratigraphy*, 45 (1): 29-37(in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., Lou, Z. H., Guo, T. L., et al., 2006. An Exploration on a Technological System of Petroleum Preservation Evaluation for Marine Strata in south China. Acta Geological Sinica, 80 (3): 406-417(in Chinese with English abstract).
- Pang, Y. M., Guo, X. W., Zhang X H, et al., 2019. Denudation of Indosinian Unconformity and Tectonic Evolution in the Central Uplift of South Yellow Sea Basin: Insights from CSDP-2 Well. *Geotectonica et Metallogenia*, 43 (2): 235-245(in Chinese with English abstract).
- Shang, K., Lv, H. T., Cao, Z. C., et al., 2018. Distribution and Significance of Middle Ordovician Yijianfang Formation in Shuntuoguole Lower Uplift, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40 (3): 353-361 (in Chinese with English abstract).
- Song, C. Y., Lv, D. W., 2021. Advances in Time Series Analysis Methods for Milankovitch. Acta Sedimentologica Sinica,40(2):380-395 (in Chinese with English abstract).
- Spahn, Z. P., Kodama, K. P., Nereo, P., 2013. High-Resolution Estimate for the Depositional Duration of the Triassic Latemar Plateform: A New Magnetostratigraphy and Magnatic Susceptibility Cyclostratigraphy from Basinal Sediments at Rio Sacuz, Italy. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14(4):1245-1257.
- Tian, J. Wu, H. C., Huang, C. J., et al., 2022. Revisiting the Milankovitch Theory from the Perspective of the 405 ka Long Eccentricity Cycle. *Earth Science*, 47(10): 3543-3568 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Q., Li, Z. X., Liu, K., 2021. Restoration of Yanshanian Denudation in the Eastern Qaidam Basin: Evidence from Geophysics and Thermochronology. *Earth Science Frontiers*, 1–15. https://doi.org/10.13745 /j.esf.sf. 12.6 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. G., Dai, S. F., Li, M. J., et al., 2010. Stratigraphic Thermohistory and its Implications for Regional Geoevolution in the Tarim Basin, NW China. *Science China Earth Sciences*, 53(10): 1495–1505 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H. C., Zhang, S. J, Feng, Q. L., et al., 2011. Theoretical Basis, Research Advancement and Prospects of Cyclostratigraphy. *Earth Science*, 36 (3): 409–428 (in Chi-

nese with English abstract).

- Yao. Y. M., Xu. X. H., Liu. C. R., et al. 2011. Calculation of Denudation amount with Milankovitch Cycle Method: a Case Study in Biyang Sag. *Petroleum Geology & Experiment*, 33(5): 460-467 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y. S., Zheng, H. R., Tu, W., 2008. Methods of Eroded Strata Thickness Restoration in Sedimentary Basins. *Petroleum Geology & Experiment*, 30 (6): 636-642 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. B., Lv, H. T., He, J. J., et al., 2011. Multi-Stage Erosion Restoration of Superimposed Basins and Its Application. *Journal of Oil and Gas Technology*, 33 (5): 7— 11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. B., Zhao, Z. J., Yuan, S. Q., et al., 2011. Application of Spectral Analysis to Identify Milankovitch Cycles and High-Frequency Sequences: Take the Lower Ordovician Yingshan Formation of Mid-Tarim Basin as an Example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41(2): 400-410 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. W., Jin, Z. J., Liu, G. C., et al., 2000. Study on the Formation of Unconformities and the Amount of Eroded Sedimentation in Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 7 (4): 449-457 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Cao, Q., Fu, X. D., 2018. Recovery of Denuded Strata Thickness Based on Milankovitch Astronomical Cycles. *Petroleum Geology & Experiment*, 40 (2): 260– 267 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. J., Chen, X., Pan, M., et al., 2010. Milankovitch Cycles in the Upper Ordovician Lianglitage Formation in the Tazhong-Bachu Area, Tarim Basin. Acta Geologica Sinica, 84 (4): 518-536 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. J., Zhao, Z. X., Huang, Z. B., 2006. Ordovician Conodont Zones and Sedimentary Sequences of the Tarim Basin, Xinjiang, NW China. *Journal of Stratigraphy*, 30 (3): 193–203 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. X., Wu, M. Z., Lai, J. R. 2018. Unconformity between Lower Ordovician and Overlying Strata in Tarim Basin. *Xingjiang Petroleum Geology*, 39 (5): 530-536 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 杜品德,赵治信,杨芝林,等,2017.塔里木板块晚奥陶世桃曲坡 牙形石属的分布及对比.地层学杂志,41(4):421-427.
- 范婕,蒋有录,崔小君,等,2018.恢复不整合剥蚀厚度的旋回分 析法.中国矿业大学学报,47(2):323-331.
- 郭超,张志勇,吴林,等,2022.中新生代天山剥蚀与塔里木盆地 北缘沉积耦合过程:新疆库车河剖面的低温热年代学证 据.地球科学,47(9):3417-3430.

- 郭颖,汤良杰,岳勇,等,2015.旋回分析法在地层剥蚀量估算中的应用——以塔里木盆地玉北地区东部中下奥陶统鹰山组为例.中国矿业大学学报,44(4):664-672.
- 何登发,贾承造,李德生,等,2005.塔里木多旋回叠合盆地的形 成与演化.石油与天然气地质,26(1):64-77.
- 江青春,胡素云,姜华,等,2018.四川盆地中二叠统茅口组地层 缺失量计算及成因探讨.天然气工业,38(1):21-29.
- 姜素华,许新明,康恒茂,等,2007.波动分析约束下的原型盆地 剥蚀量恢复——以惠民凹陷为例.中国海洋大学学报(自 然科学版),37(4):641-646.
- 金之钧,张一伟,陈书平.2005.塔里木盆地构造-沉积波动过 程.中国科学(D辑:地球科学),35(6):530-539.
- 李德勇,郭太宇,姜效典,等,2015.东海陆架盆地南部剥蚀厚度 恢复及构造演化特征.石油与天然气地质,36(6):913-923.
- 李坤,赵锡奎,沈忠民,等,2007."趋势厚度法"在塔里木盆地阿 克库勒凸起地层剥蚀量恢复中的应用.物探化探计算技 术,29(5):415-419.
- 马德波,陈利新,陶小晚,等,2018.塔里木盆地哈拉哈塘地区构 造演化及其油气地质意义.地质科学,53(1):87-104.
- 马德波,杨敏,杜德道,等,2020.多期活动古隆起复合叠加过程 解析——以塔里木盆地轮南古隆起为例.岩石学报,36(11): 3523-3536.
- 马雪莹, 卢远征, 樊茹, 等, 2021. 新疆柯坪大湾沟中、上奥陶统 旋回地层学研究及其地质意义. 地层学杂志, 45(1):29-37.
- 马永生,楼章华,郭彤楼,等,2006.中国南方海相地层油气保存 条件综合评价技术体系探讨.地质学报,80(3):406-417.
- 庞玉茂,郭兴伟,张训华,等,2019.南黄海中部隆起印支面剥蚀 量恢复与演化过程——来自CSDP-2井的证据.大地构造 与成矿学,43(2):235-245.
- 尚凯,吕海涛,曹自成,等,2018.塔里木盆地顺托果勒低隆起一 间房组分布及地质意义.石油实验地质,40(3):353-361.
- 宋翠玉,吕大炜,2022.米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进

展.沉积学报,40(2):380-395.

- 田军,吴怀春,黄春菊,等,2022.从40万年长偏心率周期看米 兰科维奇旋回理论.地球科学,47(10):3543-3568.
- 王嘉琦,李宗星,刘奎,2022.达木盆地东部燕山期剥蚀量恢复: 来自地球物理和低温热年代学的证据.地学前缘:1-15.
- 王铁冠,戴世峰,李美俊,等,2010.盆地台盆区地层有机质热史 及其对区域地质演化研究的启迪.中国科学:地球科学,40 (10):1331-1341.
- 吴怀春,张世红,冯庆来,等,2011.旋回地层学理论基础、研究 进展和展望.地球科学,36(3):409-428.
- 姚益民,徐旭辉,刘翠荣,等,2011.米氏旋回剥蚀量计算方法在 泌阳凹陷的应用.石油实验地质,33(5):460-467.
- 袁玉松,郑和荣,涂伟等.2008.沉积盆地剥蚀量恢复方法.石油 实验地质,30(6):636-642.
- 张小兵,吕海涛,何建军,等,2011.叠合盆地同层多期剥蚀量恢 复研究及应用.石油天然气学报,33(5):7-11.
- 张一伟,金之钧,刘国臣,等,2000.塔里木盆地环满加尔地区主 要不整合形成过程及剥蚀量研究.地学前缘,7(4):449-457.
- 张运波,赵宗举,袁圣强,等,2011.频谱分析法在识别米兰科维 奇旋回及高频层序中的应用——以塔里木盆地塔中一巴 楚地区下奥陶统鹰山组为例.吉林大学学报(地球科学版), 41(2):400-410.
- 赵军,曹强,付宪弟,等,2018.基于米兰科维奇天文旋回恢复地 层剥蚀厚度——以松辽盆地X油田青山口组为例.石油 实验地质,40(2):260-267.
- 赵治信,吴美珍,赖敬容,2018.塔里木盆地下奥陶统与上覆地 层间的不整合.新疆石油地质,39(5):530-536.
- 赵宗举,陈轩,潘懋,等,2010.塔里木盆地塔中一巴楚地区上奥 陶统良里塔格组米兰科维奇旋回性沉积记录研究.地质 学报,84(4):518-536.
- 赵宗举,赵治信,黄智斌,2006.塔里木盆地奥陶系牙形石带及 沉积层序.地层学杂志,30(3):193-203.