

塔里木盆地始新统卡拉塔组极热事件记录

张现军¹, 刘宣威^{2,3}, 王睦童¹, 姜福杰^{2,3}, 王东辰¹, 燕卓越^{2,3}, 陈君青^{2,4},
孙海涛^{2,3}, 张京伟^{2,3}

(1. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000; 2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 4. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249)

摘要: 古新世至早始新世是新生代重要的气候转折期, 多次极热事件的发生导致地球表层碳汇能力减弱, 海平面多次发生波动。始新世以来, 海相沉积在中国仅有3处区域保留有记录, 塔西南卡拉塔组保留了这一阶段完整的海侵记录, 是研究新生代古气候及特提斯洋演化的重要层位。本文针对卡拉塔组记录的极端气候沉积特征展开研究, 结果显示: ①卡拉塔组记录了可信的天文旋回周期, 沉积时间持续6.6 Ma, 与卢特阶一致; ②卡拉塔组观察到风暴序列中的5个组成部分, 即粒序层理、平行层理、丘状交错层理、波状层理和块状泥岩层, 表明塔里木盆地区域沉积期处于风暴频发的热带-亚热带低纬度地区; ③受沉积相和水动力差异影响, 发育了10种类型的鲕粒, 即原生沉积成因的放射鲕、同心鲕、表鲕、复鲕、椭圆形鲕和偏心鲕以及后生改造成因的泥晶鲕、变形鲕、负鲕和白云化鲕。始新世中期, 异常气候事件推动了海平面上升, 海水进入塔里木盆地, 事件持续至卢特阶结束。沉积期内, 温室效应控制下风暴作用频发, CO₂ 浓度升高, 海水蒸发量变大, 大陆风化作用加剧, 长期恶化的环境使得生物化石具有机会主义选择特征。本文对新生代异常气候的研究, 补充了中国区域的海相剖面证据。

关键词: 塔里木盆地; 卡拉塔组; 风暴作用; 鲕粒; 极热事件

中图分类号: P534.61⁺3, P532

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)04-0839-16

Records of extreme heat events from the Eocene Karatal Formation in the Tarim Basin

ZHANG Xian-jun¹, LIU Xuan-wei^{2,3}, WANG Mu-tong¹, JIANG Fu-jie^{2,3}, WANG Dong-chen¹, YAN Zhuo-yue^{2,3},
CHEN Jun-qing^{2,4}, SUN Hai-tao^{2,3} and ZHANG Jing-wei^{2,3}

(1. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration, Beijing 102249, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. School of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The Paleocene to Early Eocene was an important climate transition period in the Cenozoic Era, with multiple extreme heat events leading to a weakening of the earth's surface carbon sink capacity and fluctuations in sea levels. Since the Eocene epoch, marine sediment has been recorded in only three areas in China, and the Karatal Formation in southwest Tarim retains a complete record of marine transgression during this period, making it an important stratum for studying the Cenozoic paleoclimate and the evolution of the paleo-Tethys Ocean. This article focuses on the study of extreme climate sedimentary characteristics recorded by the Karatal Formation. The results show that: ① the Karatal Formation records a reliable astronomical cycle, with a depositional duration of 6.6 Ma, consistent with the Lutetian Stage; ② Five components of the storm sequence, namely grain sequence bedding, parallel bedding, mound cross bedding, wavy bedding and massive mudstone, observed in the Karatal Formation,

收稿日期: 2024-03-08; 接受日期: 2025-02-19; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872128)

作者简介: 张现军(1977-), 男, 硕士, 一级工程师, 研究方向: 碳酸盐岩石油地质、油气藏开发, E-mail: 903663064@qq.com。

indicating that the Tarim Basin was in the tropical-subtropical low-latitude area where storms frequently occurred during the sedimentary period; ③ Affected by differences in sedimentary facies and hydrodynamics, 10 types of ooids have developed, including radial ooid, concentric ooid, superficial ooid, complex ooid, elliptical ooid, and eccentric ooid of primary sedimentary origin, as well as micritic ooid, deformed ooid, negative ooid, and dolomitized ooid of secondary alteration origin. In the middle Eocene, abnormal climate events pushed up sea level and seawater entered the Tarim Basin, which lasted until the end of the Lutetian Stage. During the sedimentation period, under the control of greenhouse effect, storms occurred frequently, CO_2 concentration increased, seawater evaporation increased, and continental weathering intensified. The long-term deterioration of the environment resulted in opportunistic selection characteristics of biological fossils. This article supplements the research on abnormal climate in the Cenozoic era in China with evidence from marine profiles.

Key words: Tarim Basin; Karatal Formation; storm action; ooid; extreme heat events

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41872128)

现代地球正处于晚新生代大冰期长期降温过程中,然而自人类开启工业革命以来,人类活动造成大量有机碳燃烧,气温出现反常的短时上升现象(Zachos *et al.*, 2003),生态系统急剧恶化,生物种属及丰度急剧减少,21世纪以来每年物种灭绝率已经达到了千分之一,表明生物大灭绝可能正在发生中(Bosboom *et al.*, 2014b; Huber *et al.*, 2018)。在这一阶段气候演化的研究成为21世纪研究的重点和难点,制约研究的难点有三个:①人类活动对环境的影响具有差异性,不同区域人类活动主导下出现的温室气体的排放量或吸收汇难以定量;②全球现代海洋沉积物只能记录持续到目前的沉积过程,难以对未来气候的走势进行预测;③当前灭绝事件发生迅速,且处于灭绝事件发生的初始阶段,时间尺度小,难以进行精细研究和预测。因此,当前研究的热点聚焦于采用将古论今的地质思维,找到可参考的深时研究对象。

由于距今时代近,古新世至始新世极热事件(PETM)及其之后的异常气候事件与现今温室地球具有强可对比性,因而受到关注。然而近20年,全球范围内针对古近纪以来气候事件的报道多见于海相沉积剖面及钻孔,陆相地层由于沉积连续性差且难以建立精确年龄锚点,普遍缺乏强有力的年代框架,对陆相沉积背景下的事件记录研究相对困难(胡修棉等, 2017; 席党鹏等, 2020)。古新世至中始新世作为典型的气候转折期,气候处于温室条件向冰室条件过渡阶段,两极冰盖增长,全球海平面逐渐降低。这一长期的海退事件显著限制了亚洲内陆的水分来源,改变了中亚的古气候条件,亚洲内陆逐渐转入陆相沉积,因此,国内相应的海相沉积记录稀缺

(周志毅, 2001; 王元青等, 2019)。

在塔里木盆地,印度-亚洲板块的渐进式活化与多期次的极热事件共同导致了海平面的短时波动,古特提斯海水沿阿莱依海道涌入盆地内,形成了一个大型海湾。在中-新生代地层中保留了5期海侵记录(Zachos *et al.*, 2003; Bosboom *et al.*, 2014b; 王元青等, 2019)。在东部盆地逐渐进入陆相沉积的背景下,塔西南坳陷留存了古新世至始新世宝贵的海相地层,是研究新生代全球气候事件与古特提斯洋演化的重要载体(周志毅, 2001; 邵龙义等, 2007)。卡拉塔尔组沉积期,塔西南区域位于亚热带低纬度地区,受控于季风气候和温室效应共同影响,发育了一系列特征沉积现象,可以为未来的气候和古海洋演化机制研究提供参考。

基于此,以塔里木盆地中-新生代卡拉塔尔组作为研究层位,选取取心相对连续的钻孔记录为研究样本,以旋回地层学及沉积学为手段,对塔西南区域卡拉塔尔沉积期的碳酸盐沉积特征进行解剖,以期极热事件伴随的环境演化研究提供中国地区的海相剖面证据。

1 区域地质概况

塔里木盆地是我国最大的中-新生代盆地,其主体受控于南缘西昆仑-阿尔金弧形山链和北缘天山山链限制盆地边缘,自中白垩世以来,多次极热事件导致海平面波动,由西部阿莱依海峡作为沟通特提斯海水的通道,盆地整体形成了一个被围限的巨型海湾(图1)。在东亚地区主体气候干旱化的背景下,塔里木盆地白垩系-古近系保留了完整的海相沉

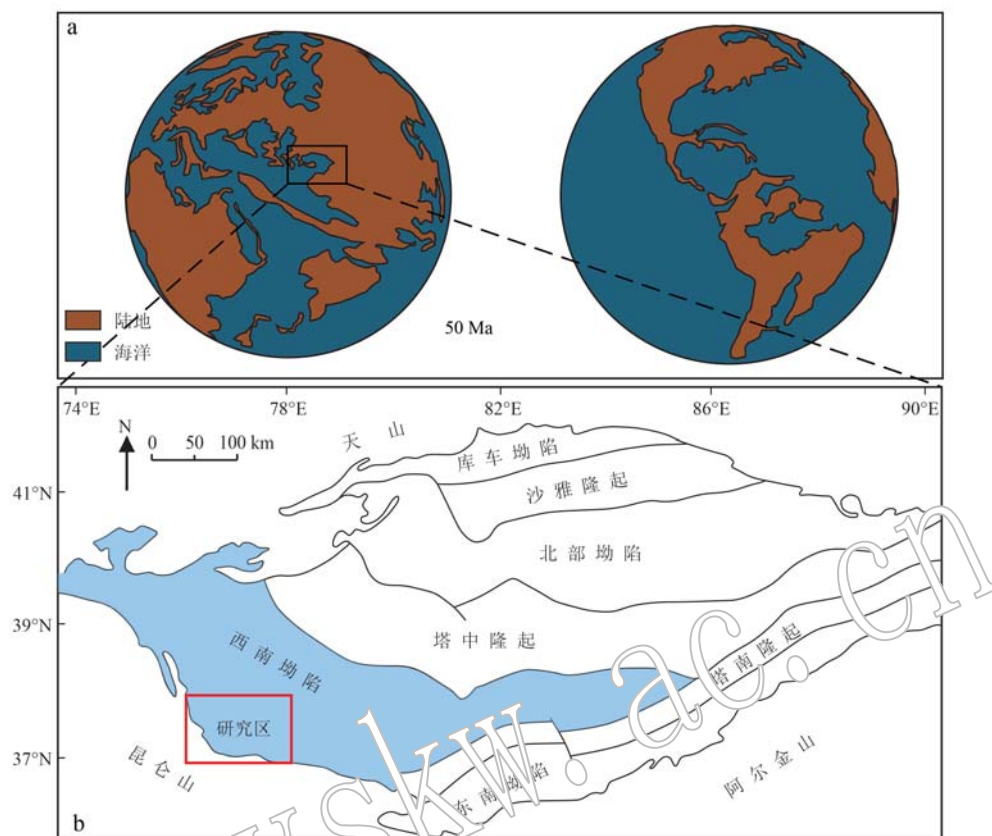


图1 始新世(50 Ma)全球古地理图(a, 据 <https://dinosaurpictures.org>)和研究区位置示意图(b)
Fig. 1 Global paleogeographic map of Eocene (50 Ma) (a, according to <https://dinosaurpictures.org>) and location diagram of the research area (b)

积记录(Zachos *et al.*, 2003; Bosboom *et al.*, 2014b; 王元青等, 2019)。本次研究钻孔位于昆仑山前冲断带(邵龙义等, 2007), 古地理位置位于海湾边缘, 对气候变化带来的海湾内海水波动更为敏感, 因此, 记录了多次海水波动导致的海陆相沉积序列的变化, 由老到新依次发育阿尔塔什(海湾相)-齐姆根组(潮坪相)-卡拉塔尔(局限海湾)-乌拉根(潮坪相)地层。本次研究层位选取卡拉塔尔组海湾相地层, 为碳酸盐岩台地相灰岩或含介壳灰岩, 与下伏的盖吉塔格组为整合接触关系。据该组发育的生物带化石和火山灰年龄, 将其划归为中始新世卢特泰阶(王元青等, 2019; 席党鹏等, 2020)(图2)。

2 研究方法

2.1 天文年代学分析

天文旋回可以通过厘定地球轨道驱动力对沉积旋回的控制作用, 实现对沉积时限及沉积速率的约

束。GR 曲线可以反馈岩心内放射性元素(K、U、Th等)的变化, 而这些元素的波动受到轨道周期约束, 因此 GR 曲线可能会记录到米兰科维奇周期信号。本文选取 KS103 井卡拉塔尔组 6 302.375~6 411 m 之间的 GR 曲线进行旋回地层学分析, 局部加权进行散点图平滑(LOWESS)以消除长期趋势(图 3a)。为了确定周期分量的功率, 使用 2p 多锥法(MTM)进行功率谱和红色噪声分析, 以识别显著频率, 使用高斯滤波器获得目标天文周期数据序列。研究软件为 Matlab 环境下的 Acycle V2.3。

2.2 碎屑锆石 U-Pb 定年

选取 2 件潮坪相含陆源碎屑泥岩样品, 经过机械破碎和重液浮选处理, 在显微镜下, 选取晶体完整的锆石颗粒并固定粘台制靶。样品抛光后进行阴极发光(CL)拍照以确定锆石颗粒的内部结构, 显示锆石震荡环带结构清晰, 粒度在 50~300 μm 之间, 长宽比为 1:1~5:1。大多数锆石颗粒磨圆较差, 表明其经历了较远距离的搬运。测试在中国石油勘探开

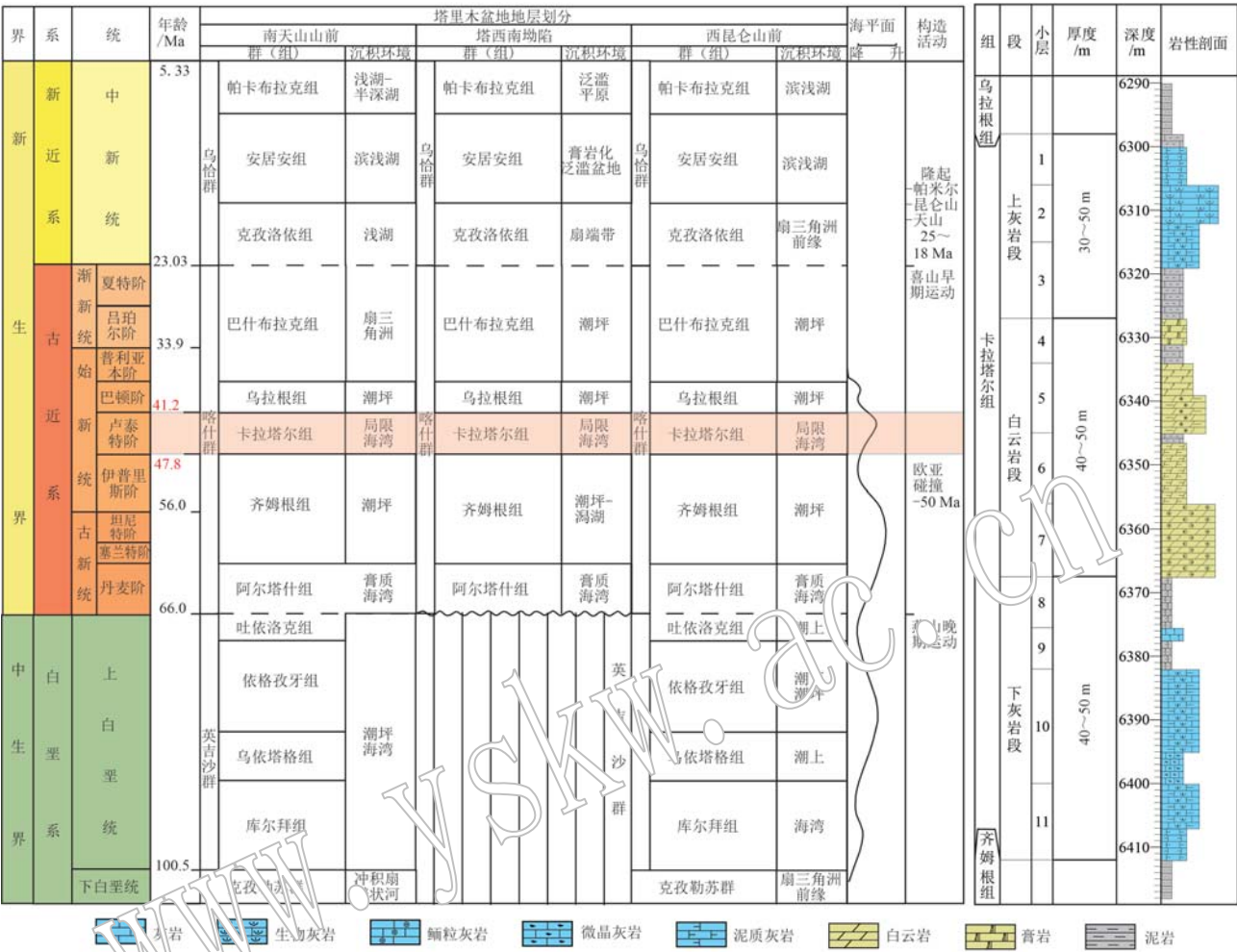


图 2 塔西南山前带新生界地层特征
Fig. 2 Comprehensive histogram of the sedimentary structure of the foreland belt of the southwest Tarim Basin

发研究院实验中心完成,所用仪器为 CAMECA IMS 1280-HR。

2.3 镜下薄片鉴定

选取卡拉塔尔组 28 块岩心样品及 82 块岩屑样品制薄片,取样点均匀覆盖整个卡拉塔尔组,采用茜素红进行半染色,以进行对应岩相观察,识别由于水动力变化形成的特征沉积构造,并观察不同类型鲕粒类型发育情况,利用光学显微镜 (DMLP, Leica, Wetzlar, 德国) 进行鉴定。

2.4 C-O 及 Sr 同位素测试

为获取不同类型鲕粒所处环境及后期胶结物所记录的流体信息,选取不同类型样品 25 件次,在核工业地质研究所进行 C-O 及 Sr 同位素分析测试,检测仪器为稳定同位素比值质谱仪 MAT253plus。由于取心段处于产油段,为避免沥青影响,所有样品均进行了 72 小时静置洗油处理,研磨钵粉碎后过 60

目筛,选用离子交换树脂进行处理。

2.5 包裹体、荧光及激光拉曼分析

选取胶结溶蚀现象较为丰富的 2 块白云石化鲕进行包裹体观察及分析。选取溶蚀发育的颗粒间部位精细观察可能记录到的包裹体信息,结合荧光、测温及激光拉曼分析以限定流体的时间、性质和期次信息,实验在中原油田勘探开发研究院实验中心进行,显微镜型号莱卡 THM600,荧光测试镜头型号奥林巴斯 BX53M,激光拉曼仪器型号法国 HORIBA 公司生产 LabRAM HR Evolution。

2.6 无监督机器学习

机器学习方法可以综合全部测井曲线数据,深度挖掘测井数据与不同类型碳酸盐岩颗粒之间的映射关系,学习出数据中的模式和规律,从而对未知数据进行预测或分类,以达到更优的预测效果。本文使用了一种基于物理的深度学习模型 CGP-NN,包含

一个 1DCPP 模型、多层 GRU 神经网络和一种新的自适应物理约束方法,关键步骤如下:第 1 步,收集数据,提取不同类型鲕粒数据深度学习,在 1DCPP 模型中,使用 1D 卷积侧重于提取高维参数的特征,用作机器学习的标签;第 2 步,采用循环神经网络的机器学习方法训练模型,利用有标签数据对无标签数据通过测井曲线进行分类预测;第 3 步,根据预测的标签数据和测井曲线数据,利用随机森林回归方法预测碳酸盐岩颗粒含量 (Zhang *et al.*, 2024)。

3 卡拉塔组对极热事件的响应

3.1 卡拉塔组沉积时间

短时极热事件造成两级冰盖消融,海平面上升,海水涌入塔里木盆地,对海相沉积持续时间的研究

可以为极热事件的持续时长提供佐证。

3.1.1 深度域频谱分析

对去趋势后的 KS103 井 GR 数据进行滑动窗口分析,显示沉积速率在 6 332.875 m 和 6 368.5 m 记录到了峰值信号的变化,分别对应上灰岩段-白云岩段分界和白云岩段-下灰岩段分界,指示沉积速率发生了相应波动。由于区域属于海湾沉积环境,长期频繁的风暴作用控制下发育了碳酸盐岩和碎屑岩组成的混积岩,数据信号中夹杂了大量噪声,在 6 302.375~6 332.875、6 332.875~6 368.5 和 6 368.5~6 411 m 分别记录到了高于 90% 置信度的信号:10.20、3.15 和 2.40 m,6.36 和 1.96 m,4.57 和 1.41 m。这与 La2010d 天文调制方案给出的始新统理论天文周期 (405、125、95、39.6 和 22.5 ka) 中的长偏心率 (405 ka) 和短偏心率 (125 和 95 ka) 比值相接近,认为 KS103 井记录了米兰科维奇周期信号 (图 3)。

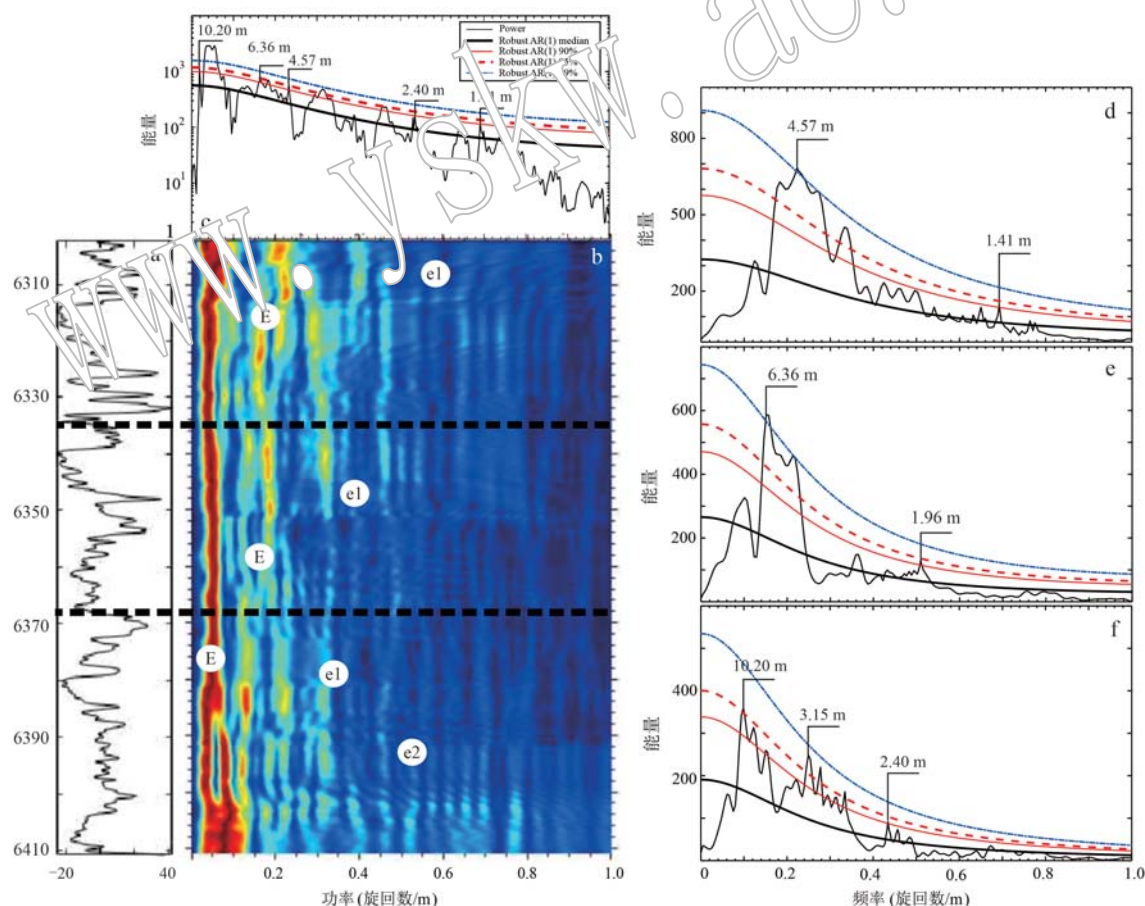


图 3 塔西南 KS103 井 GR 曲线功率谱分析结果

Fig. 3 Power spectrum analysis of GR curve of Well KS103 in southwest Tarim Basin

a—GR curve (6 302.375~6 411 m); b—全段 GR 曲线滑动频谱分析图; c—全段 GR 曲线频谱分析图; d—6 302.375~6 332.875 m 功率谱分析图; e—6 332.875~6 368.5 m GR 曲线功率分析图; f—6 368.5~6 411 m 功率谱分析图

a—GR curve (6 302.375~6 411 m); b—sliding spectrum analysis chart of the entire GR curve; c—analysis chart of the entire GR curve; d—power spectrum analysis diagram of 6 302.375~6 332.875 m; e—GR curve power analysis diagram of 6 332.875~6 368.5 m; f—power spectrum analysis diagram of 6 368.5~6 411 m

3.1.2 时间域频谱分析

长偏心率周期(405 ka)受制于木星对地球的引力,由于木星的体积相对大,质量相对重,因此可作为天文轨道周期参数中最稳定的周期(Liu *et al.*, 2024)。将各段代表的长偏心率周期进行模型曲线对比,完成 GR 数据序列从深度域向时间域的转换。

结果显示,上灰岩段和中白云岩段在约 405 和 125 ka 处,下灰岩段在约 405、125 和 95 ka 见显著信号,置信度高于 90%,与始新世长偏心率(405 ka)和短偏心率(125 和 95 ka)周期相一致,认为记录了可信服的米兰科维奇周期信号,据此建立了相对精确的天文年代学标尺(图 4)。

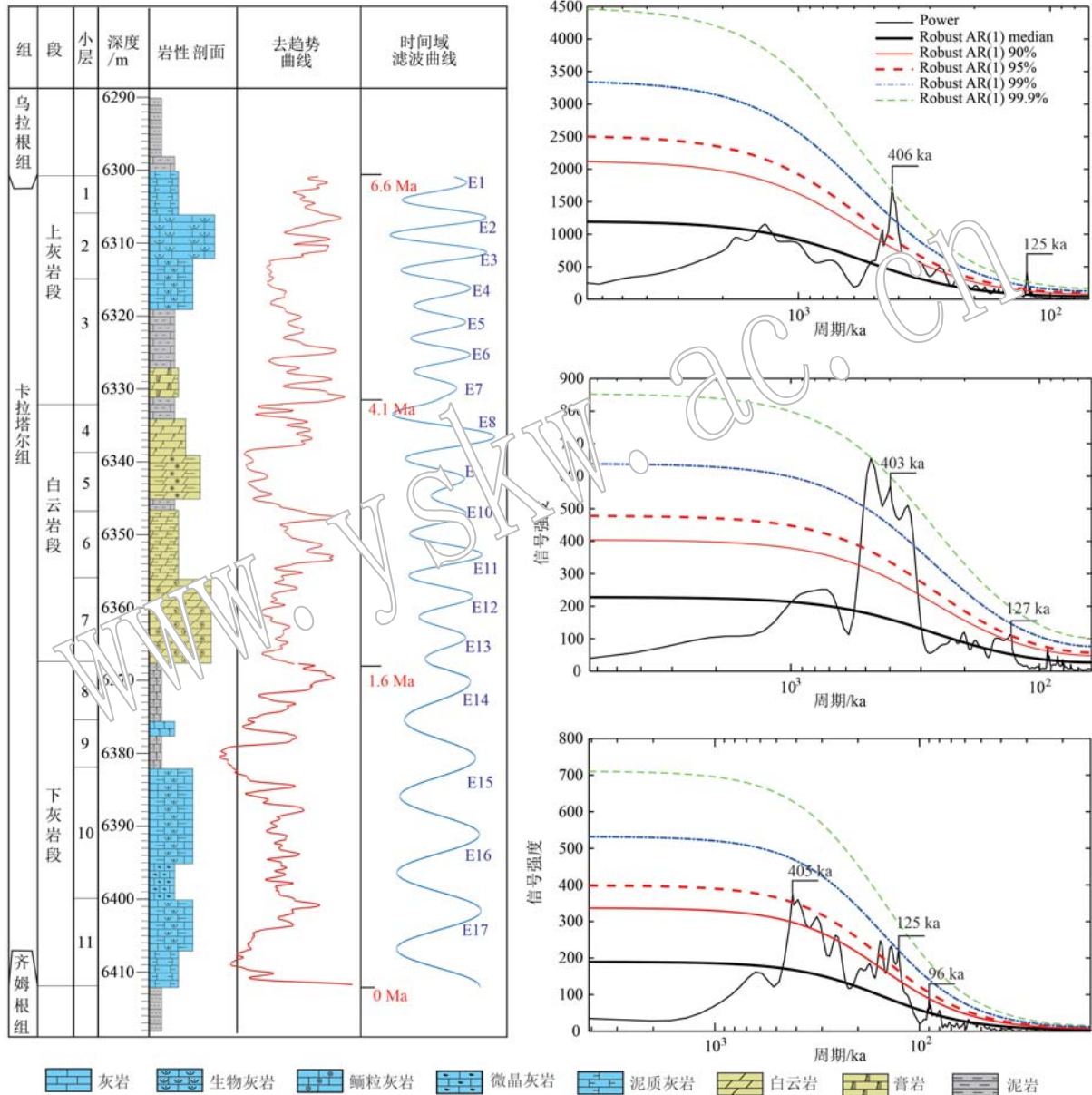


图 4 塔西南 KS103 井 GR 曲线时间域图谱分析

Fig. 4 Analysis of GR curve time domain graph of Well KS103 in southwest Tarim Basin

3.1.3 锆石年代学结果

卡拉塔尔组沉积期记录到约 17 个 405 ka 周期,沉积持续时间 6.6 Ma,与 2023 年国际地层学委员会给出的卢特泰阶沉积时间(47.8~41.2 Ma)相近。

周志毅(2001)据该组中出现的带化石组合和沉凝灰岩年龄,将其划归为中始新世 Lutetian 期。本次记录到的最年轻的锆石年龄小于 45 Ma,与前人研究结果相似(图 5)。

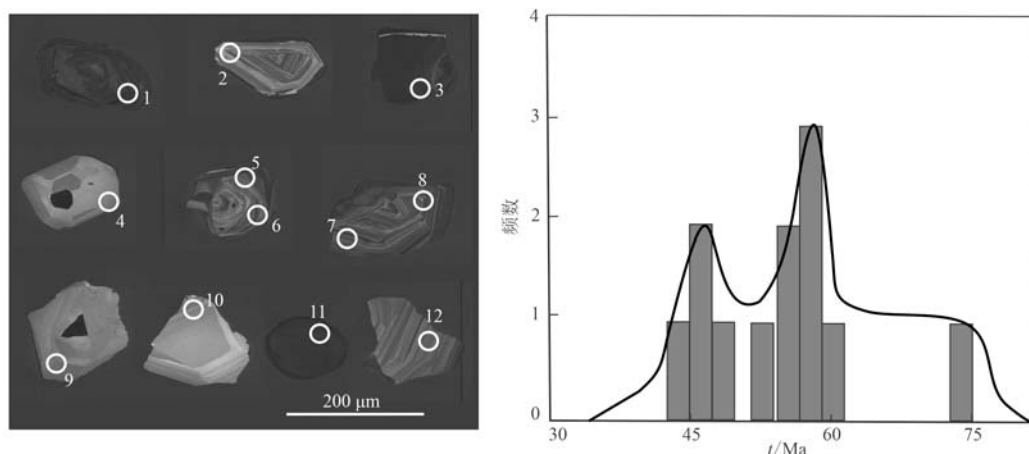


图5 塔西南卡拉塔组 KS103 井泥岩锆石 U-Pb 年龄

Fig. 5 Zircon U-Pb age of mudstone in Well KS103 of the Karatal Formation in southwest Taim

3.2 卡拉塔组风暴沉积序列特征

极热事件会引起全球大洋表层海水升温, CO_2 浓度升高从而使得风暴作用频发。现今的风暴作用主要发育在除赤道无风带以外的中低纬度区域($5^\circ \sim 30^\circ$)。在浅海陆棚区, 由风暴作用引起的风暴潮以强大的动力将搅起的海底沉积物携带至不同环境, 形成一系列特殊的沉积构造, 可作为识别风暴作用的标志 (Derry *et al.*, 2004; Bottjer, 2002)。

塔西南山前区 KS103 井卡拉塔组共识别出风暴序列中 Sa ~ Se 5 个组成部分, 各组成部分特征如下 (图 6)。

Sa: 粒序层理段, 由粒序状或厚层含砂质碎屑和生物碎屑灰岩组成, 底部发育不规则冲刷面和渠模构造, 与下部地层呈突变接触关系。

Sb: 平行层理段, 由生物碎屑灰岩、砂质生物屑微晶组成, 见大量被裹挟改造的泥粒。水体的能量更加不均衡, 可见水体能量失稳导致的泄水构造。

Sc: 丘状交错层理段, 包含各向异性和各向同性的丘状和洼状地层, 可见有大量液化撕裂屑及同沉积变形结构。

Sd: 波状层理, 含生物屑微晶灰岩和含砂质生物屑微晶灰岩为主。这一时期风暴强度逐渐降低, 浅部流体速度迅速减缓, 与深度流体趋于一致, 间歇出现薄层、透镜体以及水平层理。

Se: 泥岩段, 由深灰色泥灰岩或具水平层理的泥岩组成。

这一沉积序列代表了风暴作用从突然发生到逐渐停歇的过程, 其中粒序层理代表了沉积物表层水

流速度开始增大的过程; 水体能量持续增大, 发育平行和交错层理。可见有大量液化撕裂屑及同沉积变形结构; 直至泥岩段环境趋于安静, 风暴停歇。

3.3 卡拉塔组鲕粒类型及其分布特征

3.3.1 鲕粒类型

鲕粒是具核心、被圈层包裹的球形颗粒。温室条件下, 过饱和的海水、微生物的大量繁殖和强水动力条件共同导致了卡拉塔组沉积期鲕粒的大范围发育。本次对鲕粒的划分方案沿用 Simone (1980) 对鲕粒的分类及解释, 将卡拉塔组识别到的鲕粒划分为 10 种类型, 即原生沉积成因的放射鲕、同心鲕、表鲕、复鲕、椭圆形鲕和偏心鲕以及后生改造成因的泥晶鲕、变形鲕、负鲕和白云化鲕 (图 7)。

3.3.2 鲕粒时空展布特征

鲕粒的原生组分、结构特征及组合规律可作为对古气候条件的地质记录。通过对 KS103 井连续取样进行薄片分析, 明确鲕粒在纵向上的展布规律, 结合岩心中记录到的风暴活动及依据测井曲线得到的时间框架, 对时间、事件及碳酸盐岩颗粒类型之间的关系进行梳理, 以明确卡拉塔组沉积期内的环境波动规律。

结果显示, 鲕粒的展布主要受到相带和水动力的控制, 原生沉积的放射鲕发育在相对低能的适宜有机质参与的相带中, 镜下观察到放射鲕与底栖生物 (高螺塔腹足) 的组合模式暗示了处于浅水蒸发环境, 相对完整的生物外壳指示环境较为安静 (图 7a)。同心鲕分布于相对高能近海平面的相带和水体环境中, 鲕粒的核心据当时的相带和动

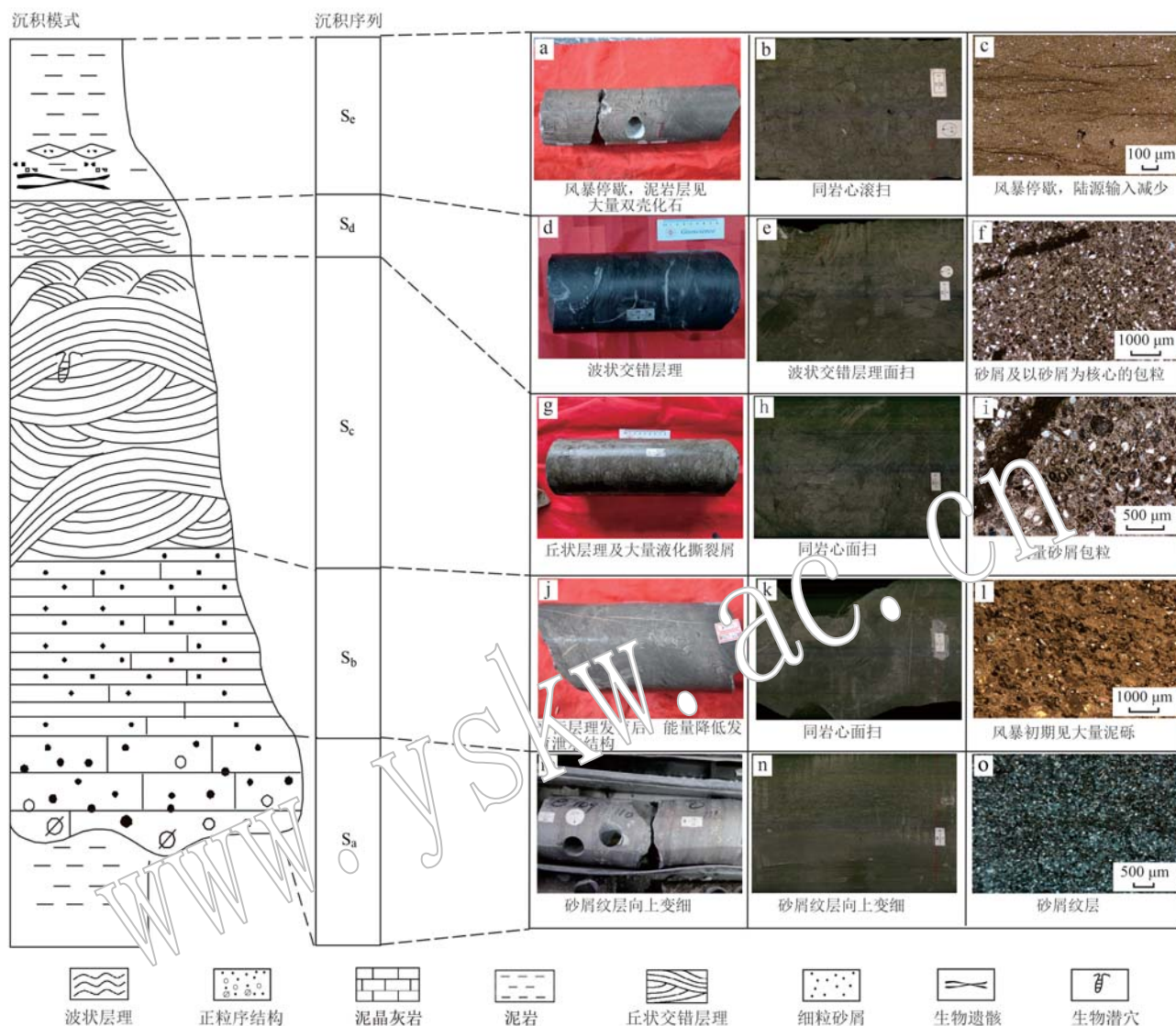


图6 塔西南山前带卡拉塔组风暴沉积序列

Fig. 6 Storm sedimentary sequence of the Karatal Formation in the foreland of the southwest Tarim Basin

能条件有所变化,在风暴频发时区域,多数以风暴携带的陆源砂为核心(图7b);在向海一侧适于广盐度生物繁盛的区域,则以生屑为核心(图7d);在缺少砂屑及生屑的区域,在强水动力条件下发育空心鲕。风暴作用使固结或半固结的原生沉积物被打碎,以之为不规则的核心,被牵引流裹挟形成椭圆形鲕(图7b);持续的强水动力条件使得原有的处于停滞的鲕粒再次搬运悬浮,形成复鲕和偏心鲕。同时,风暴作用抑制了碳酸盐工厂的生产率,可观察的风暴序列发育层位,时间域滤波得到的沉积速率相对偏低(图8)。

3.4 鲕粒流体特征

选取对白云岩化鲕和泥晶鲕对其成因进行相应

分析。结果显示,鲕粒内部被溶蚀后被白云石胶结物再次充填,其中胶结物中围绕粒内孔边缘捕获的原生盐水包裹体均一温度为82℃,显示胶结物出现的时间在准同生沉积阶段,包裹体成分以CO₂和NO₂为主,为同生期大气淡水作用的产物(图9),与油气充注时液烃伴生的盐水包裹体携带的流体来源及期次信息差异明显(刘宣威等,2022;颜开等,2024)。

碳酸盐岩中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值受控于成岩流体性质,携带了古流体信息。海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值受到壳源、幔源和同期海水3个来源制约,分别来自陆地、洋中脊和古海洋,受古海洋变化影响,显生宙以来全球海水锶同位素数据趋同。综上,碳酸盐岩胶结物中

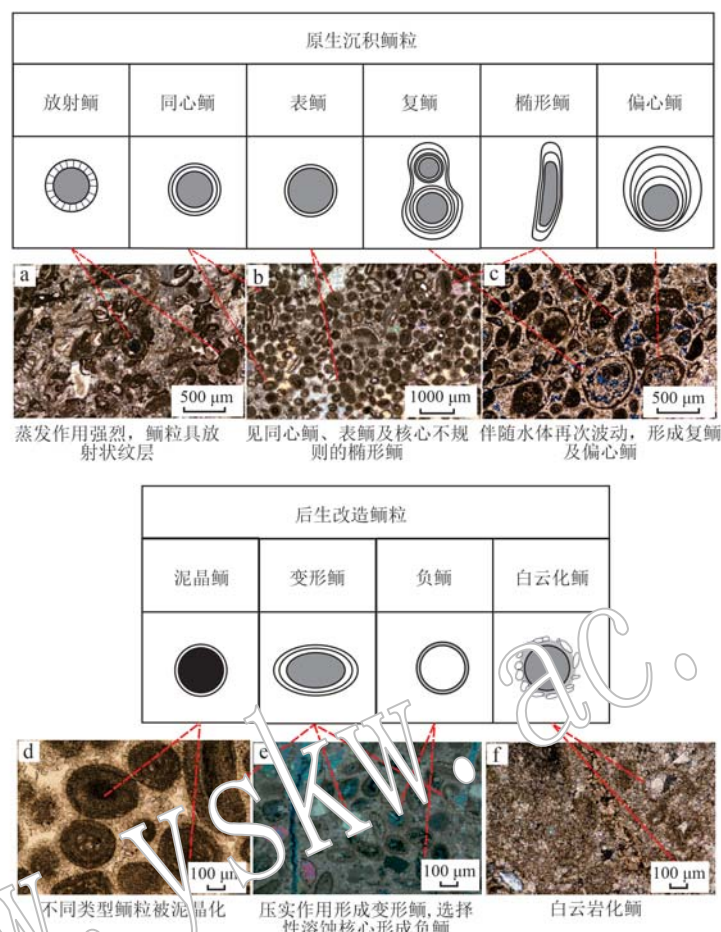


图7 卡拉塔组鲕粒典型特征

Fig. 7 Classification scheme and typical characteristics of ooids in the Karatal Formation

保留了古海洋的流体信息,可作为指示古流体来源的判识依据。选取全岩样品进行 C-O 同位素分析,结果显示大部分样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值落在了始新世正常海水范围内,均受到后期强烈成岩作用改造,使得 $\delta^{13}\text{O}$ 值明显负偏(李文奇等, 2023);相较于白云岩化鲕,部分泥晶鲕出现了 $\delta^{13}\text{C}$ 值负偏的现象。碳酸盐岩的碳同位素主要是受到碳源的控制,C 同位素值负偏指示泥晶鲕发育的环境可能聚集了大量微体生物,基岩本身富集的有机碳混入影响了 $\delta^{13}\text{C}$ 值。Sr 同位素分析显示,围岩与泥晶鲕的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均落在始新世海水范围内,而白云岩化鲕粒由于受到大气淡水的淋滤, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值脱离了同期正常海水范围,出现一定程度的负偏,结果与包裹体观察到白云岩化鲕粒在同生期阶段捕获了盐水包裹体改造这一结果吻合(图 10)。

以 GR 值、灰质含量(VCAR)、泥质含量(VSH)和白云质含量(VLS)曲线作为机器学习输入,可以

得到对白云岩化鲕粒和泥晶鲕粒含量的预测结果(图 11),该结果与实际岩心及薄片观察到的鲕粒含量结果相吻合(相关性均大于 0.80),认为本次预测结果准确。泥晶鲕含量与 GR 值、灰质含量、泥质含量呈正相关,与白云质含量呈负相关,测井相对应相对深水区,认为泥晶鲕在成岩蚀变前可能大部分发育在低能量的相对深水安静区域。

4 讨论

4.1 不同鲕粒形成环境和成因反映了极热事件的环境特征

沉积相是沉积岩及其所处沉积环境的综合,可将碳酸盐岩颗粒和其所处的环境结合进行环境解释。始新统卡拉塔组处于萨布哈环境下的大型半局限海环境,岩相上表现为厚层蒸发岩上覆于厚层白云岩(图2),这一岩相组合类似于意大利墨西哥地

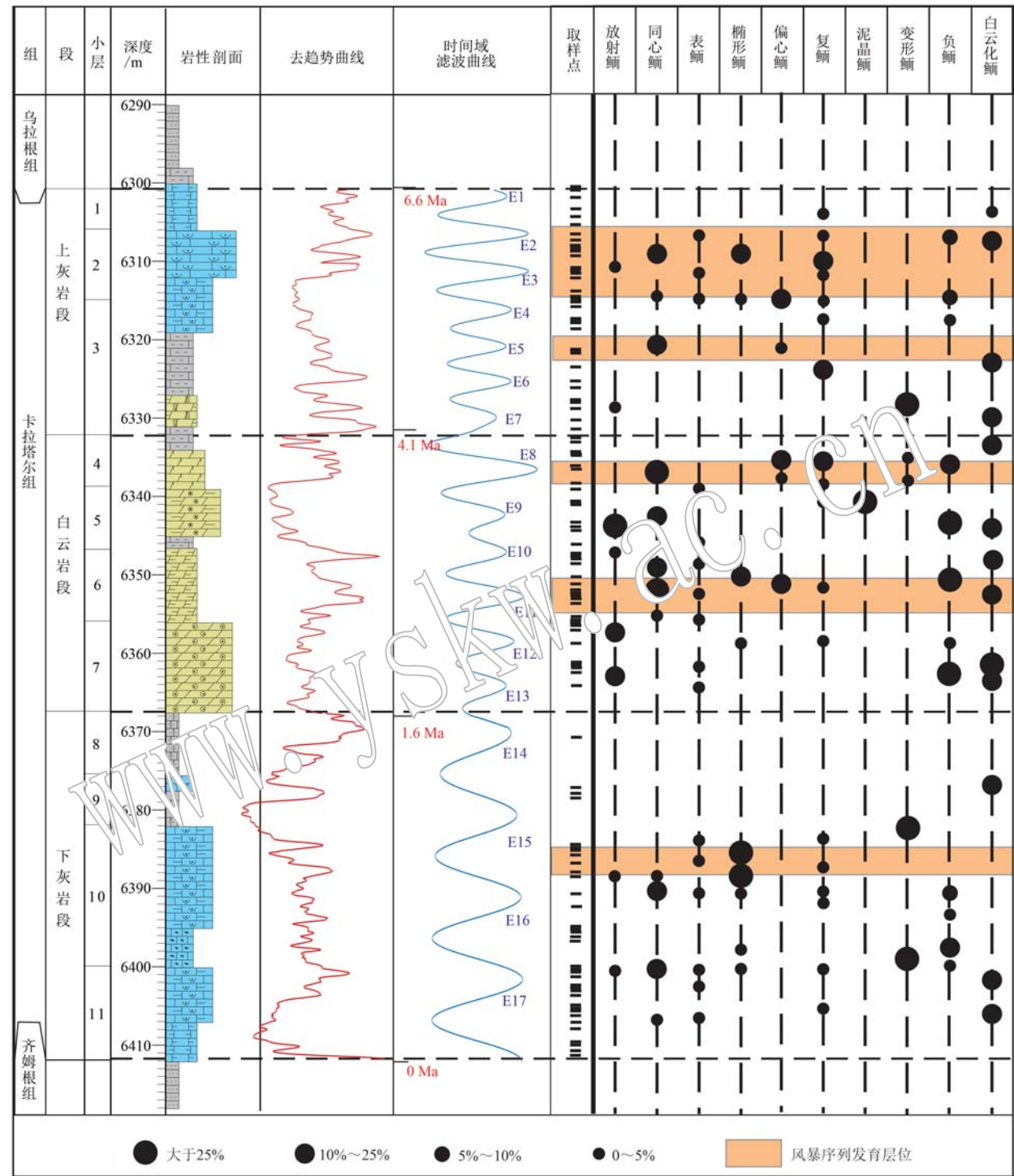


图 8 KS103 井卡拉塔组鲕粒分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of oolites in the Kalatal Formation of Well KS103

区的白云岩-膏岩共生体系(Visscher *et al.* , 2000; Bowlin *et al.* , 2012),即原生蒸发岩直接连续沉积在厚层白云岩之上,反映了水体盐度和蒸发量的逐渐增加,闭塞的海湾环境(地中海)为海水的大量咸化蒸发提供了基础。卡拉塔组发育的膏岩以蒸发岩

盐为主(石膏、硬石膏、石盐、天然碱、光卤石等),而非蒸发碱土碳酸盐(文石、低镁方解石和高镁方解石),因此更倾向于沿用“水下浓缩沉淀”模式(Visscher *et al.* , 2000; Bowlin *et al.* , 2012)。同时观察到鲕粒圈层类型中,放射型鲕粒的比例较低,不支持

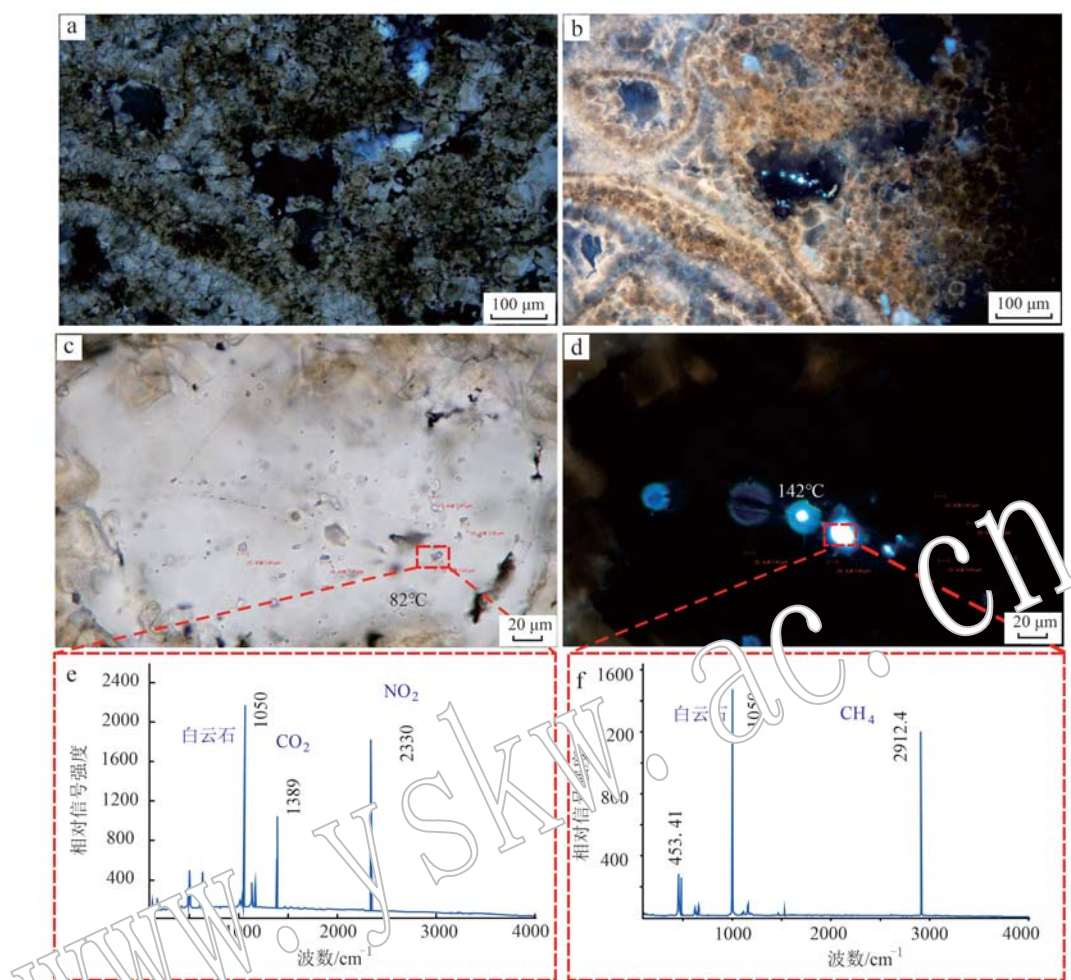


图9 KS103井卡拉塔组白云岩化鲕的镜下及包裹体特征

Fig. 9 Microscopic characteristics of dolomitization ooid and inclusion in the Karatal Formation of Well KS103

a—白云岩化鲕粒, KS103井, 6 341 m, 正交偏光; b—白云岩化鲕粒, KS103井, 6 341 m, 单偏光; c—鲕粒粒内孔内捕获的环边原生盐水包裹体; d—鲕粒粒内孔内捕获的与液烃伴生的次生油气包裹体; e—激光拉曼显示盐水包裹体; f—激光拉曼显示甲烷包裹体
a—dolomitization ooid, Well KS103, 6 341 m, orthogonal polarization; b—dolomitization ooid, Well KS103, 6 341 m, single polarization; c—primary saltwater inclusions captured in the inner pores of the ooid grains; d—secondary oil and gas inclusions associated with liquid hydrocarbons captured in the inner pores of the ooid grains; e—Laser Raman spectroscopy displays saltwater inclusions; f—Laser Raman spectroscopy displays methane inclusions

低能潟湖模式的解释, 如类似现在美国犹他州大盐湖的鲕粒沙坝模式。薄片下常见到灰岩中夹杂长英质及黏土质, 指示了频发的风暴带来的洪水事件, 镜下观察到的鲕粒以同心纹层结构占优势, 表鲕、复鲕和偏心鲕共同指示了风暴作用下动荡的水体环境。本次观察到的区域鲕粒颗粒粒径主体小于 2 mm, 巨鲕不发育, 风暴作用带来的长期强水动力条件可能在鲕粒圈层形成的过程中加剧了颗粒之间碰撞、磨蚀, 从而造成相应的质量损失。此外本次研究还观察到一种沉积-成岩复合类的泥晶鲕, 核心为粪球粒或生物碎屑(有孔虫), 核心保存良好, 外部暗色圈层

围绕核心连续包卷, 环境相对安静, 由于暗色纹层较为规则, 未见到与德国哈尔茨山地区下三叠统湖相鲕粒相似的典型脑纹状(cerebroid)和条带状(banded)结构(Visscher *et al.*, 2000; Allen *et al.*, 2009; Bowlin *et al.*, 2012), 但同一层位的扫描电镜下发现了颗石藻碎片, 暗示当时的盐度环境并未达到极值, 仍存在微生物及藻类生存的盐度空间, 相关性分析显示这一颗粒类型展布的范围与适宜微生物及藻类生存的环境强相关(Reid *et al.*, 2003)。后生改造型颗粒中, 见后生压实形成的变形鲕, 鲕粒核心被选择性溶蚀充填后形成负鲕, 白云岩交代

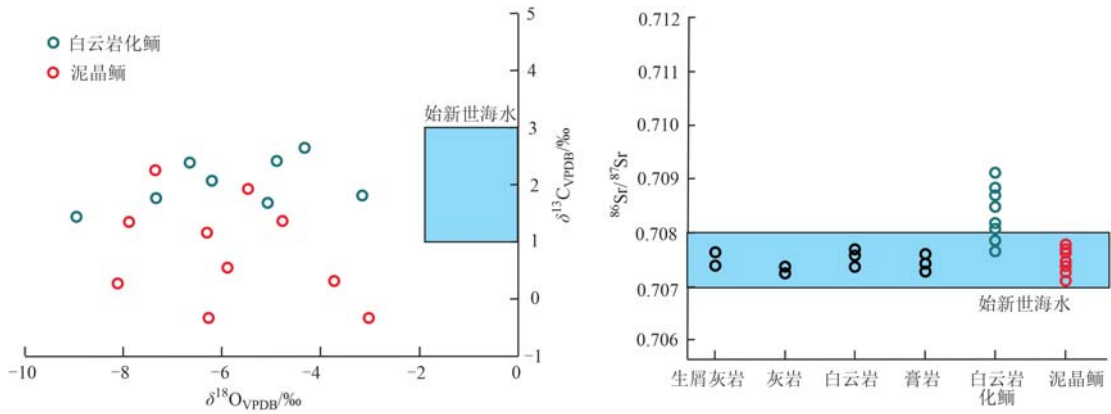


图 10 KS103 井卡拉塔尔组不同岩石类型 C-O 及 Sr 同位素特征

Fig. 10 C-O and Sr isotope characteristics of different rock types in the Karatal Formation of Well KS103

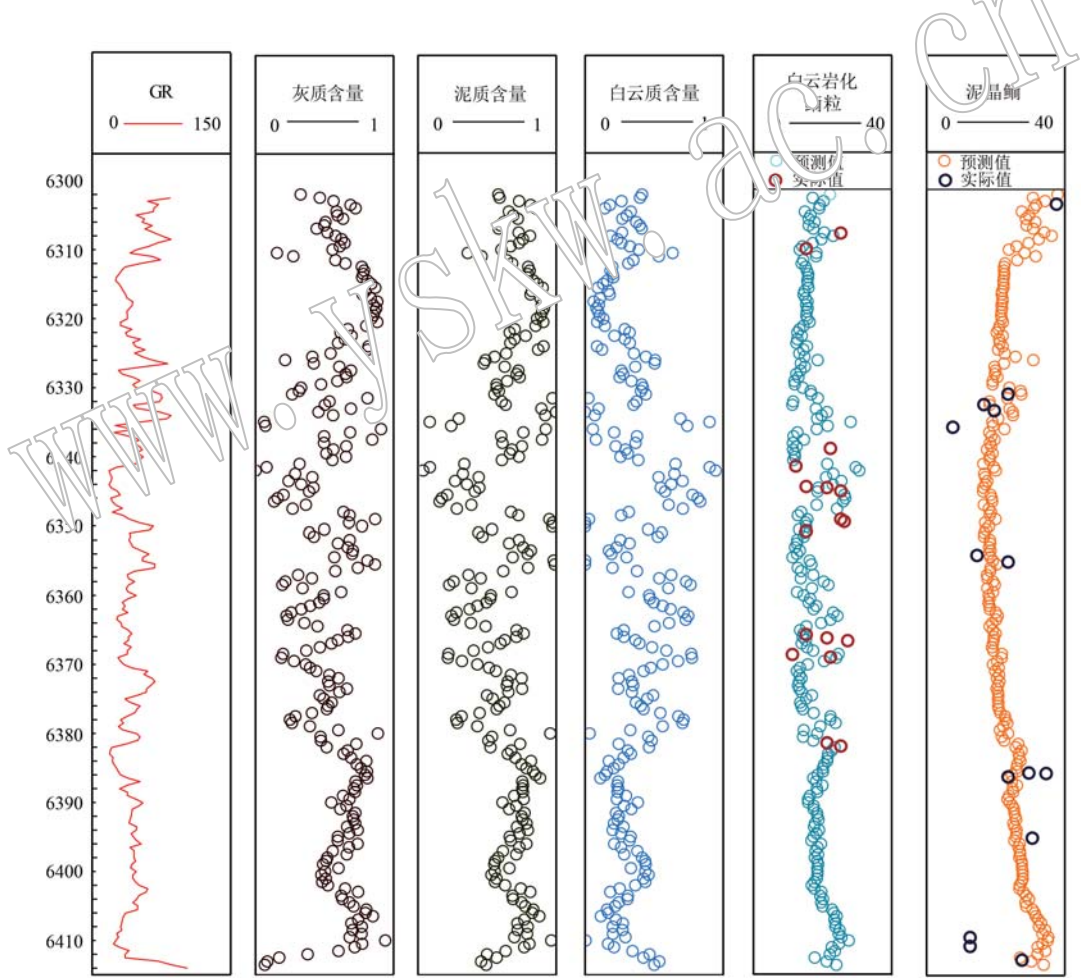


图 11 KS103 井卡拉塔尔组鲕粒含量机器学习预测结果

Fig. 11 Machine learning prediction results of ooid content in Karatal Formation of Well KS103

形成白云化鲕,圈层结构被破坏,还在溶蚀胶结物中捕获到了原生淡水包裹体,认为区域在白云岩化过程中受到淡水的淋滤。对萨布哈环境下的白云岩化

作用研究多认为以蒸发泵吸和渗透回流占优势,混合水白云岩化对盐度的要求过分苛刻,但区域盐度环境未达生物生存的极值,加之大气淡水的稀释,仍

下见到的造迹生物具有鲜明的机会种特征。

在风暴作用尾声,具有坚硬外壳的可干牡蛎和索氏牡蛎群落(*Sokolowia* 和 *Kokanostrea*)更易于适应不稳定的生态环境,首先在软泥质沉积层定居。这些双壳类生物死亡后留下的躯壳,为其余生物的繁衍提供了小范围的孤立避难所,而机会种则利用这一短暂的殖居窗口期快速繁衍并留下繁殖体,以躲避下一次风暴周期(Kreisa, 1981; 宋金民等, 2012; 张昊等, 2019)。本次观察到的造迹生物具有明显宽泛的觅食特征,迅速挤占了双壳类外壳保护下的小范围生存环境,同时由于难以忍受恶化的环境,采取了向下掘穴的生存策略,潜穴深度超过 4 cm (图 12)。此外,本次对生物碎屑的观察结果也显示,伴随风暴作用的频发,生物丰度逐渐降低,生态系统逐渐恶化。

4.3 温室效应下的沉积环境响应

塔西南柯克亚区域在中新世-始新世沉积期位于北半球低纬度区域,丰富的沉积构造、颗粒类型、生物扰动及所赋存岩相共同为研究沉积期在极热背景下的演化机制提供了窗口,锆石定年及天文旋回分析则为沉积演化过程提供了年代学约束。

卡拉塔尔组岩相自下而上发育灰岩-白云岩-膏岩-灰岩,下部灰岩段可见大量的正常海相生物类群,包括有孔虫、介形虫、双壳、腹足、绿藻及海绵等,生物遗迹歧异度高,生态空间利用率高,所观察到的风暴沉积记录较少,鲕粒以同心鲕及表鲕占优势,认为此时的生态环境趋于稳定。

卡拉塔尔组中段发育白云岩-膏岩组合,认为在中部发育了一次短时间的海退过程,这次短时间的海退过程早于青藏高原持续隆升造成的在法国巴黎盆地、西班牙埃布罗盆地、罗马尼亚特兰西瓦尼亚盆地等欧亚盆地同时记录到的大范围海退事件(41 Ma)(Bosboom *et al.*, 2011, 2014a,),白云岩-上覆连续沉积膏岩的组合证实了本段海退记录到了蒸发量急剧增大的过程,风暴作用频次增加,裹挟大量陆源砂质进入古海洋,生物类群及丰度急剧降低,观察到的鲕粒核心以砂屑和泥质为主,缺少生屑作为鲕粒核心,鲕粒圈层结构开始出现明显的放射状结构,海水呈现过饱和特征,极热事件在短时间造成区域生态环境崩溃。

短时极热事件后对生态系统的影响是持续性的,卡拉塔尔组上灰岩段,环境温度逐渐降低,但风暴作用的频次并未降低,强水动力条件下,鲕粒再次

被搬运改造,改造型的复鲕、椭圆形鲕和偏心鲕发育,鲕粒皮质的生长速率升高,表鲕的含量降低。相比于陆地湖泊,海洋的生态系统更加稳定,但生物遗迹的穴居策略也出现了相应变化,相较于下灰岩段,生物类群及丰度降低,深阶层潜穴系统缓慢出现并起伏上升。频发的风暴恶化了表层海洋生态系统(刘宣威等, 2025), *Asteriacites* (表层)、*Rhizocorallium* (浅阶层-中阶层)遗迹化石缺失,底栖类生物开始占据优势(图 12)。

5 结论

(1) 卡拉塔尔组记录到了 6.4 Ma 的沉积年龄,可与国际地层接轨,指示海平面的波动是全球性的,影响到了全球岩石地层的发育,暗示卡拉塔尔沉积期海湾的消失可能导致了整个中亚步入干旱化。

(2) 卡拉塔尔组可见有完整的风暴沉积序列,指示古地理位置处于热带低纬度地区。卡拉塔尔组发育 10 种类型的鲕粒,其展布主要受到相带和水体能量的共同控制,鲕粒的发育指示区域处于强风化、高 CO₂ 浓度、强蒸发和风暴频发环境体系。

(3) 温室效应下,海水蒸发量加剧,表层水体盐度升高,广海类生物栖息地丧失,持续的风暴潮加剧了表层水体的不稳定,幸存的生物采取掘居策略,广海类生物直至环境温度降低后才再次出现。

References

- Allen M A, Goh F, Burns B P, *et al.* 2009. Bacterial, archaeal and eukaryotic diversity of smooth and pustular microbial mat communities in the hypersaline lagoon of Shark Bay[J]. *Geobiology*, 7(1): 82~96.
- Bosboom R, Dupont-Nivet G, Grothe A, *et al.* 2014a. Linking Tarim Basin sea retreat (west China) and Asian aridification in the late Eocene[J]. *Basin Research*, 26(5): 621~640.
- Bosboom R E, Dupont-Nivet G, Houben A J P, *et al.* 2011. Late Eocene sea retreat from the Tarim Basin (west China) and concomitant Asian paleoenvironmental change[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(3~4): 385~398.
- Bosboom R, Dupont-Nivet G, Huang W T, *et al.* 2014b. Oligocene clockwise rotations along the eastern Pamir: Tectonic and paleogeographic implications[J]. *Tectonics*, 33(2): 53~66.
- Botjter D J. 2002. Exceptional Fossil Preservation: A Unique View on the

- Evolution of Marine life[M]. New York: Columbia University Press.
- Bowlin E M, Klaus J S, Foster J S, *et al.* 2012. Environmental controls on microbial community cycling in modern marine stromatolites[J]. *Sedimentary Geology*, 263: 45~55.
- Derry L A, Brasier M D, Corfield R M, *et al.* 1994. Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton: A paleoenvironmental record during the 'Cambrian explosion' [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 128(3~4): 671~681.
- Duguid S M A, Kyser T K, James N P, *et al.* 2010. Microbes and ooids [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 80(3): 236~251.
- Hu Xiumian, Li Juan, An Wei, *et al.* 2017. The redefinition of Cretaceous-Paleogene lithostratigraphic units and tectonostratigraphic division in southern Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 174~194(in Chinese with English abstract).
- Huber B T, MacLeod K G, Watkins D K, *et al.* 2018. The rise and fall of the Cretaceous hot greenhouse climate[J]. *Global and Planetary Change*, 167: 1~23.
- Jahnert R J and Collins L B. 2012. Characteristics, distribution and morphogenesis of subtidal microbial systems in Shark Bay, Australia[J]. *Marine Geology*, 303: 115~136.
- Kreisa R D. 1981. Storm-generated sedimentary structures in subtidal marine facies with examples from the Middle and Upper Ordovician of southwestern Virginia[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(3): 823~848.
- Li Wenqi, Liu Huichuan, Li Pingping, *et al.* 2023. Diverse fluids in dolomitization and petrogenesis of the dengying formation dolomite in the Sichuan basin, SW China[J]. *Earth Science*, 48(9): 3360~3377 (in Chinese with English abstract).
- Liu X W, Jiang F J, Zheng X W, *et al.* 2024. Sedimentary record of the bio-geological events in Tethys: Insight from the Permian Yangtze Block breakup in the Sichuan basin[J]. *Applied Sciences*, 14(24): 11863.
- Liu Xuanwei, Tian Yaming, Jiang Fujie, *et al.* 2025. Identification and significance of the Permian guadelup-lopingian series boundary in the northwestern margin of the Yangtze craton[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(2): 387~407(in Chinese with English abstract).
- Liu Xuanwei, Tian Yaming, Zhang Hui, *et al.* 2022. Reservoir characteristics and its controlling factor of the second Member of the Middle Permian Maokou Formation in northern Sichuan region [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 29(4): 463~468(in Chinese with English abstract).
- Liu Xuanwei, Wang Xuejun, Li Honglei, *et al.* 2021. Characteristics and formation environment analysis of Paleogene source rocks in Dongpu Depression[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 28(4): 452~455, 474(in Chinese with English abstract).
- Reid R P, James N P, MacIntyre I G, *et al.* 2003. Shark Bay stromatolites: Microfabrics and reinterpretation of origins[J]. *Facies*, 49(1): 299~324.
- Shao Longyi, Luo Wenlin, Gu Jiayu, *et al.* 2007. Sequence stratigraphy of Paleogene in Tarim Basin[J]. *Journal of Paleogeography*, 9(3): 283~292 (in Chinese with English abstract).
- Simone L. 1980. Ooids: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 16: 319~355.
- Song Jinmin, Yang Di, Li Pengwei, *et al.* 2012. Development characteristics and geological significance of carbonaceous tepepestites in China [J]. *Geoscience*, 26(3): 589~600(in Chinese with English abstract).
- Tan Q, Shi Z J, Fan M, *et al.* 2018. Origin of ooids in ooidal-muddy laminites: A case study of the lower Cambrian qingxudong formation in the Sichuan basin, South China [J]. *Geological Journal*, 53(5): 1716~1727.
- Tekin E, Varol B, and Ayyıldız T. 2010. Sedimentology and paleoenvironmental evolution of Messinian evaporites in the Iskenderun-Hatay basin complex, Southern Turkey[J]. *Sedimentary Geology*, 229(4): 282~298.
- Visscher P T, Reid R P and Bebout B M. 2000. Microscale observations of sulfate reduction: Correlation of microbial activity with lithified micritic laminae in modern marine stromatolites[J]. *Geology*, 28(10): 919~922.
- Walter M R, Golubic S and Preiss W V. 1973. Recent stromatolites from hydromagnesite and aragonite depositing lakes near the Coorong Lagoon, South Australia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 43(4): 1021~1030.
- Wang Yuanqing, Li Qian, Bai Bin, *et al.* 2019. Paleogene integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 49(1): 289~314(in Chinese with English abstract).
- Xi Dangpeng, Tang Zihua, Wang Xuejiao, *et al.* 2020. The Cretaceous-Paleogene marine stratigraphic framework that records significant geological events in the western Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(6): 165~198(in Chinese with English abstract).
- Yan Kai, Wang Chunlian, Chen Renyi, *et al.* 2024. The evolution of Eocene saline lake brine and sources of K and Li in the southwestern Jiangling depression: Evidence from fluid inclusion of halite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 43(4): 905~917(in Chinese with English abstract).

lish abstract).

- Zachos J C, Wara M W, Bohaty S, *et al.* 2003. A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene-Eocene thermal maximum[J]. *Science*, 302(5 650): 1 551~1 554.
- Zhang Hao, Li Fengjie, Shen Fan, *et al.* 2019. Storm deposits characteristics and its geological significance in the Devonian Yangmaba Formation from Shigouli section, Longmenshan area, Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(3): 441~450(in Chinese with English abstract).
- Zhang X, Lu Y H, Jin Y, *et al.* 2024. An adaptive physics-informed deep learning method for pore pressure prediction using seismic data[J]. *Petroleum Science*, 21(2): 885~902.
- Zhou Zhiyi. 2001. *Strata of Various Periods in Tarim Basin*[M]. Beijing: Science Press, 1~359(in Chinese).
- 刘宣威, 田亚铭, 姜禄杰, 等. 2025. 扬子西北缘二叠纪瓜德鲁普统一乐平统界线识别及意义[J]. *沉积学报*, 43(2): 387~407.
- 刘宣威, 田亚铭, 张 慧, 等. 2022. 川北地区中二叠统茅二段储层特征及控制因素分析[J]. *断块油气田*, 29(4): 463~468.
- 刘宣威, 王学军, 李红磊, 等. 2021. 东濮凹陷古近系烃源岩特征及其形成环境分析[J]. *断块油气田*, 28(4): 452~455, 474.
- 邵龙义, 罗文林, 顾家裕, 等. 2007. 塔里木盆地古近系层序地层研究[J]. *古地理学报*, 9(3): 283~292.
- 宋金民, 杨 迪, 李朋威, 等. 2012. 中国碳酸盐风暴岩发育特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 26(3): 589~600.
- 王元青, 李 茜, 白 滨, 等. 2019. 中国古近纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(1): 289~314.
- 席党鹏, 唐自华, 王雪娇, 等. 2020. 塔里木盆地西部白垩纪—古近纪海相地层框架及对重大地质事件的记录[J]. *地学前缘*, 27(6): 165~198.
- 颜 开, 王春连, 陈仁义, 等. 2024. 江陵凹陷西南部始新世盐湖卤水演化钾盐来源——来自石盐流体包裹体的证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 43(4): 905~917.
- 张 昊, 李凤杰, 沈 凡, 等. 2019. 四川盆地龙门山区甘溪石沟里泥盆系养马坝组风暴沉积特征及其地质意义[J]. *古地理学报*, 21(3): 441~450.
- 周志毅. 2001. *塔里木盆地各纪地层*[M]. 北京: 科学出版社, 1~359.

附中文参考文献

- 胡修棉, 李 娟, 安 慰, 等. 2017. 藏南白垩纪—古近纪岩石地层厘定与构造地层划分[J]. *地学前缘*, 24(1): 174~194.
- 李文奇, 刘汇川, 李平平, 等. 2023. 四川灯影—白垩石化流体多样性特征及白云岩差异性成因[J]. *地球科学*, 48(9): 360~377.
- 刘宣威, 田亚铭, 姜禄杰, 等. 2025. 扬子西北缘二叠纪瓜德鲁普统一乐平统界线识别及意义[J]. *沉积学报*, 43(2): 387~407.
- 刘宣威, 田亚铭, 张 慧, 等. 2022. 川北地区中二叠统茅二段储层特征及控制因素分析[J]. *断块油气田*, 29(4): 463~468.
- 刘宣威, 王学军, 李红磊, 等. 2021. 东濮凹陷古近系烃源岩特征及其形成环境分析[J]. *断块油气田*, 28(4): 452~455, 474.
- 邵龙义, 罗文林, 顾家裕, 等. 2007. 塔里木盆地古近系层序地层研究[J]. *古地理学报*, 9(3): 283~292.
- 宋金民, 杨 迪, 李朋威, 等. 2012. 中国碳酸盐风暴岩发育特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 26(3): 589~600.
- 王元青, 李 茜, 白 滨, 等. 2019. 中国古近纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(1): 289~314.
- 席党鹏, 唐自华, 王雪娇, 等. 2020. 塔里木盆地西部白垩纪—古近纪海相地层框架及对重大地质事件的记录[J]. *地学前缘*, 27(6): 165~198.
- 颜 开, 王春连, 陈仁义, 等. 2024. 江陵凹陷西南部始新世盐湖卤水演化钾盐来源——来自石盐流体包裹体的证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 43(4): 905~917.
- 张 昊, 李凤杰, 沈 凡, 等. 2019. 四川盆地龙门山区甘溪石沟里泥盆系养马坝组风暴沉积特征及其地质意义[J]. *古地理学报*, 21(3): 441~450.
- 周志毅. 2001. *塔里木盆地各纪地层*[M]. 北京: 科学出版社, 1~359.