

文章编号: 1671-1505(2025)01-0141-12 DOI: 10.7605/gdldb.2024.05.061

地球轨道参数振幅与深水环境白云石化强度波动*

张奎华¹ 张鹏飞² 苗卓伟^{2,3,4,5} 张倩^{2,3}

- 1 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东东营 257015
- 2 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015
- 3 中国石化胜利油田分公司博士后工作站, 山东东营 257015
- 4 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 山东东营 257015
- 5 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206

摘要 显生宙的白云石化强度波动与地质历史时期重大地质事件存在高度关联性, 且白云石化强度波动机制在镁、碳长期循环和气候长期变化等方面的研究中日益重要。本研究以渤海湾盆地中始新统沙三下亚段为例, 针对高分辨率的 X 射线全岩衍射分析数据开展时间序列分析以及耦合关系分析, 揭示出渤海湾盆地沙河街组深水白云石旋回中记录的斜率振幅调制周期。结合土耳其 Van 湖第四系白云石旋回和二叠纪与三叠纪之交白云石化事件, 初步探讨了显生宙地层中不同时间尺度的深水白云石化强度波动趋势与天文旋回的耦合关系。基于沙三下亚段盐度演化特征分析, 推测地球轨道参数的振幅调制作用可能通过气候、环境波动影响微生物生态压力以及流体温度与 pH 值波动强度, 从而进一步调控显生宙轨道尺度的深水白云石化强度。本研究为“白云石问题”的探索提供了一个新颖的视角。

关键词 白云石 天文旋回 振幅调制 微生物 沙河街组 渤海湾盆地

第一作者简介 张奎华, 男, 1972 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事油气地质学研究。E-mail: zhangkuihua.slyt@sinopec.com。

通讯作者简介 苗卓伟, 男, 1991 年生, 博士, 主要从事沉积学研究。E-mail: mzwem@qq.com。

中图分类号: P512.6 文献标志码: A

Amplitudes of Earth's orbital parameters and fluctuations
of deep-water dolomitizationZHANG Kuihua¹ ZHANG Pengfei² MIAO Zhuowei^{2,3,4,5} ZHANG Qian^{2,3}

- 1 Oil and Gas Exploration Management Center, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Shandong Dongying 257015, China
- 2 Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Shandong Dongying 257015, China
- 3 Postdoctoral Workstation, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Shandong Dongying 257015, China
- 4 Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production, Sinopec, Shandong Dongying 257015, China
- 5 State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Beijing 102206, China

Abstract Due to the evident correlation between fluctuations in dolomitization intensity in Phanero-

* 中国石化胜利油田博士后基金 (编号: YKB2201), 中国石化胜利油田分公司课题 (编号: YGK2204), 中国石化重点实验室项目 (编号: KLP23003) 联合资助。[Co-funded by the Post-doctoral Fund of Shengli Oilfield (No. YKB2201), Project of Shengli Oilfield Branch Company (No. YGK2204), and Project of Key Laboratory of Sinopec (No. KLP23003)]

收稿日期: 2023-07-14 改回日期: 2024-02-22

zoic geological strata and significant geological events throughout Earth's history, it is increasingly important to understand the mechanisms underlying these fluctuations in relation to long-term magnesium and carbon cycles in terrestrial and marine environments, atmospheric processes, and climate change over extended periods. In this study, time series analysis and coupling analysis are analyzed based on high-resolution X-ray diffraction data to reveal the slope amplitude modulation cycle recorded by the deep-water dolomite cycle of the Shahejie Formation in the Bohai Bay Basin. Combining the Quaternary dolomite cycle in Van Lake, Turkey, with the dolomitization events during the Permian-Triassic period, we discussed the coupling relationship between the fluctuations in deep-water dolomitization intensity over the Phanerozoic eon and the amplitude of various Earth orbital parameters across different time scales. Building on the analysis of the salinity evolution characteristics of the Sha 3 submember, it is proposed that the amplitude-modulation effect of Earth's orbital parameters may influence microbial ecological stress and the fluctuations in temperature and pH of fluids through changes in climate and environmental factors. This, in turn, plays a significant role in regulating orbital deep-water dolomitization intensity during the Phanerozoic eon. This study provides a novel perspective for the exploration of the "dolomite problem".

Key words dolomite, astronomical cycle, amplitude modulation, microbes, Shahejie Formation, Bohai Bay Basin

About the first author ZHANG Kuihua, born in 1972, Ph. D., professor-level senior engineer, is engaged in research on petroleum geology. E-mail: zhangkuihua.slyt@sinopec.com.

About the corresponding author MIAO Zhuowei, born in 1991, Ph. D., is engaged in research on sedimentology. E-mail: mzwem@qq.com.

1 概述

白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 是沉积岩的重要矿物组分之一, 对石油和天然气储集层的形成具有重要意义 (Warren, 2000; Alsharhan and Kendall, 2003; Wang *et al.*, 2021)。在地质历史时期的古老碳酸盐岩台地沉积物中白云石非常普遍 (Sun, 1994; Burns *et al.*, 2000), 但在地质年代较新的沉积物中则较为罕见 (McKenzie and Vasconcelos, 2009)。众多实验表明, 在地表环境温度、压力和过饱和浓度条件下, 人工沉淀白云石实验具有很大的挑战性 (Land and Mackenzie, 1998; Arvidson and Mackenzie, 1999; Gregg *et al.*, 2015; Kaczmarek *et al.*, 2017)。自白云石被命名以来的近 2 个世纪中, 混合水模型、sabkha 模型、微生物诱导模型、黏土诱导模型、温度与 pH 循环诱导模型等白云石化理论 (Liebermann, 1967; Deelman, 1999; Warren, 2000; Liu *et al.*, 2019; Hobbs and Xu, 2020) 不断涌现, 但至今仍未得出一个明确的结论, 因此白云石的成因仍是一个谜, 被学界称之为“白云石难题”。

已有研究表明, 显生宙以来的白云石化强度波

动似乎与地质历史时期的重大地质事件密切相关 (Sun, 1994; Burns *et al.*, 2000), “白云石难题”将会影响到对于大陆、海洋和大气的长期镁、碳循环和地球长期气候波动的理解 (Burns *et al.*, 2000; Arvidson *et al.*, 2011; Shalev *et al.*, 2019; Miao *et al.*, 2020, 2023)。目前, 有关显生宙白云石化强度波动特征与成因的观点主要包括以下几个方面: (1) 显生宙白云岩的丰度统计表明, 白云岩丰度在早寒武世、晚奥陶世—早志留世、晚泥盆世、晚二叠世—早三叠世、白垩纪大洋缺氧期、晚白垩世、古新世—始新世、中新世和上新世达到峰值 (Lumsden, 1985; Li *et al.*, 2021); (2) 冰期频繁的冰川型海平面波动, 造成白云石形成初期其与成岩流体的接触时间大幅度地减少, 导致冰期白云石化强度整体显著低于非冰期 (Sibley, 1991; Sun, 1994); (3) 半干旱和炎热的季风气候有利于白云石化发生, 而全球气候变冷和湿度增加则抑制了早成岩阶段广泛的白云石化作用发生 (Balog *et al.*, 1999); (4) 海平面、气候和环境变化的准周期性波动, 加上相应的生物地球化学变化, 可能导致类似于生物灭绝周期 (24.5 ± 1.5 Myr) 的准周期性白

云石化强度变化 (Negi *et al.*, 1996); (5) 水-沉积物界面氧化还原性质的突变, 使微生物生态压力增加而导致白云石沉淀速率加大, 造成与亚轨道气候变化相关的高水位沉积物中白云石的出现频率增加 (McCormack *et al.*, 2018); (6) 白云石的形成主要受限于环境中较高的 Mg/Ca 值、温度和盐度, 在温室气候条件下潮间带中白云石发育更为普遍 (Manche and Kaczmarek, 2019, 2021); (7) 海洋底栖生物的多样性降低 (大灭绝事件) 和海洋氧化还原性质的变化 (海洋缺氧事件) 首先传导至微生物作用, 再通过微生物作用影响白云石的丰度变化 (Li *et al.*, 2018, 2021); (8) 全球气候变暖与海洋酸化导致白云石前体矿物发生非平衡循环生长和置换, 并通过该机制诱导白云石化强度出现周期性波动 (Rivers *et al.*, 2021; Miao *et al.*, 2023)。

对于“白云石难题”, 首先需要了解能够控制白云石沉淀速率的因素 (Arvidson and Mackenzie, 1999)。气候被认为是白云石形成时最重要的控制因素之一 (Balog *et al.*, 1999), 且轨道和亚轨道尺度的气候变率似乎是最终的外部驱动因素 (McCormack *et al.*, 2018)。在 20 世纪 80 年代, 已有研究报道了白云岩地层的米兰科维奇型间距 (Compton, 1988), 但由于碳酸盐岩台地的暴露和剥蚀造成许多地层缺失 (Balog *et al.*, 1999), 以及碳酸盐岩台地白云石的丰度数据尚不完整 (Holland and Zimmerman, 2000), 使得以往的研究主要集中在长周期旋回地层背景下白云石丰度的潜在地质意义方面 (Petrash *et al.*, 2017)。目前, 有关地球轨道驱动的高分辨率深水白云石化旋回研究仍处于瓶颈期, 这严重阻碍了对显生宙白云石化强度波动特征及其成因机制的理解。文中以渤海湾盆地 FY1 井始新统半深湖—深湖相样品 X 射线衍射全岩分析数据为研究载体, 结合二叠纪与三叠纪之交的白云石化事件和土耳其 Van 湖第四系白云石旋回已发表的相关数据, 发现地球轨道参数中的振幅周期与显生宙深水白云石化强度之间存在耦合现象。笔者推测在振幅高值期的极端气候条件下, 剧烈的流体温度变化和 pH 值周期性波动及增大的微生物生态压力可能是导致深水白云石化强度增加的重要控制因素。该认识为进一步理解“白云石难题”、显生宙白云石化强度波动机制和地球元素长期循环提供了新颖的视角。

2 地质背景与方法

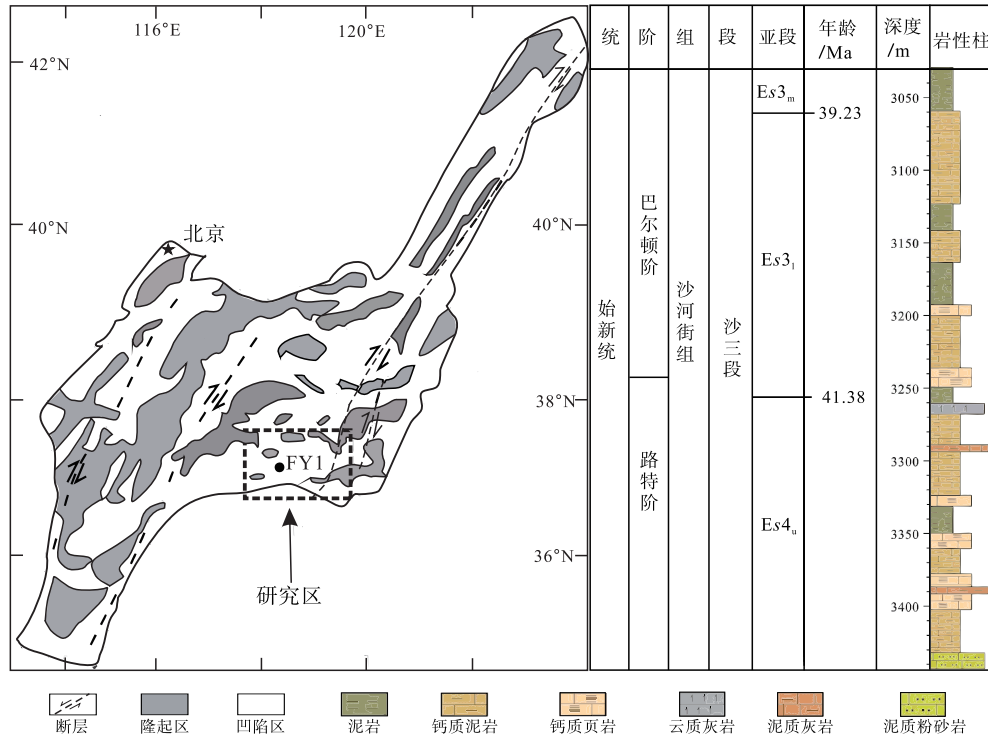
渤海湾盆地位于华北克拉通东部, 介于北纬 35° ~ 65° 之间 (图 1), 是一个呈北东走向的中新生代大陆断陷盆地 (Hao *et al.*, 2010)。该盆地在中生代为弧后盆地, 新生代演化为克拉通内断陷盆地, 其中古近纪该盆地处于同沉积裂谷期, 沿北西和北东向发育一系列地堑和半地堑 (图 1), 至渐新世末进入裂陷后阶段 (Hao *et al.*, 2010)。

研究区位于渤海湾盆地东南部的东营凹陷 (图 1)。东营凹陷面积 5700 km^2 , 主要充填古近纪、新近纪和第四纪沉积物, 盆地中心厚度局部达 5000 m , 由孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和平原组组成, 是中国最大的石油与天然气产区之一。中始新统沙河街组为本研究的目的层位, 广泛发育泥岩、钙质泥岩、钙质页岩、云质灰岩、泥质灰岩和泥质粉砂岩等, 是具有较大勘探潜力的烃源岩 (Liang *et al.*, 2017)。沙三下亚段 (Es_3_1) 沉积时期, 研究区曾多次与海连通, 或遭受海侵影响 (Wei *et al.*, 2018), 发育幕式含盐和缺氧的半深湖—深湖沉积 (许汇源等, 2020)。东营凹陷始新统沙河街组具有较好的 Milankovitch 旋回记录 (Shi *et al.*, 2019), 同沉积期或早成岩期微晶—粉晶白云石十分发育 (Yang *et al.*, 2016; Miao *et al.*, 2023)。

东营凹陷 FY1 井累积岩心长度约为 400 m , 以半深水至深水沉积为主 (Liang *et al.*, 2017), 针对 FY1 井沙三下亚段 (Es_3_1) $3050.55 \sim 3231.63 \text{ m}$ 段岩心, 笔者以 $0.675 \sim 1.125 \text{ m}$ 为主要间隔进行采样, 通过 X 射线全岩衍射分析, 获得半定量的白云石和方解石组成, 并采用白云石/(方解石+白云石) 值作为白云石化强度的替代指标。FY1 井大部分岩心的全岩衍射分析由胜利油田勘探开发研究院地层古生物实验室完成, 测试仪器型号为日本理学 D/Max-2500V/PC, 操作流程参考中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5163-2018。文中所有与时间序列分析相关的数据处理工作均在 Acycle 软件中运行, 操作流程参照已发表的标准程序 (Li *et al.*, 2019)。

3 结果

X 射线全岩衍射分析结果表明, FY1 井沙三下



Es3_m、Es3_l 和 Es3_u 分别为沙河街组沙三中亚段、沙三中亚段和沙三上亚段

图 1 东营凹陷 FY1 井位置及其沙河街组三段岩性柱 (修改自 Wang *et al.*, 2020)

Fig. 1 Location of Well FY1 in Dongying sag and its lithological column of the Member 3 of Shahejie Formation (after Wang *et al.*, 2020)

亚段的白云石化强度介于 0~0.99 之间, 在井深 3160 m 附近可见明显峰值(图 2)。文中采用 Ma 等 (2023) 提出的 FY1 井时间模型对上述白云石化强度深度序列开展天文调谐和高斯平滑处理, 共获得 2 个周期为 1100~1200 kyr 的白云石化强度旋回(图 3)。

采用多窗谱分析方法针对调谐后的白云石化强度时间序列开展能谱分析, 结果显示该时间序列中显著存在置信程度高于 95% 的 ~1200 kyr、~400 kyr、~100 kyr、~40 kyr 和 ~20 kyr 周期(图 4-A), 且后 4 个周期分别对应于天文周期中的地球自转长偏心率、短偏心率、斜率和岁差周期, 表

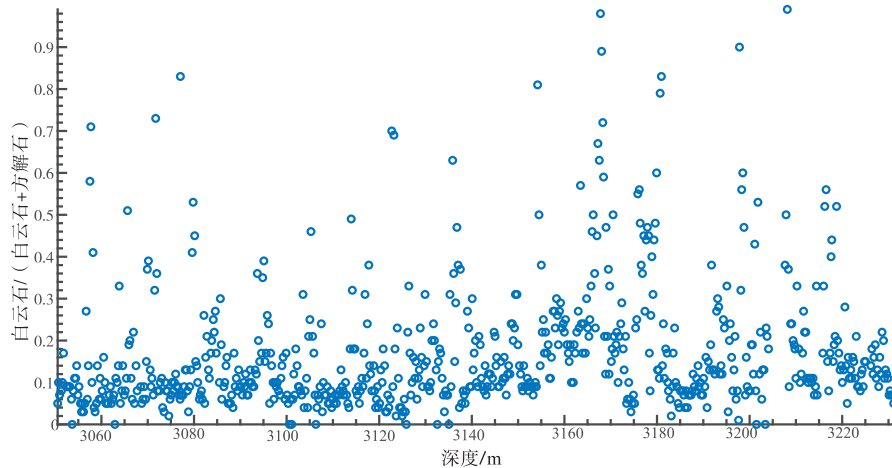


图 2 东营凹陷 FY1 井沙三下亚段白云石化强度深度序列

Fig. 2 Depth sequence of dolomitization intensity in Es3_l of Well FY1 in Dongying sag

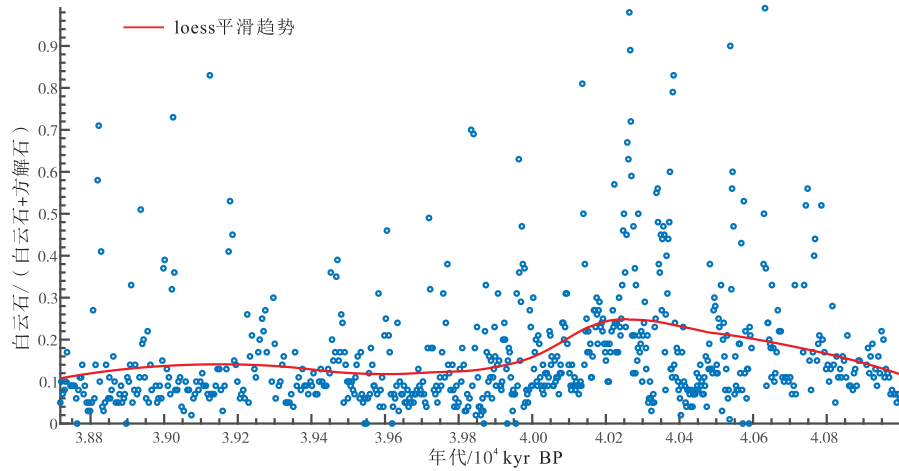


图 3 东营凹陷 FY1 井沙三下亚段白云石化强度时间序列与演化趋势

Fig. 3 Time sequence and evolutionary trend of dolomitization intensity in Es₃₁ of Well FY1 in Dongying sag

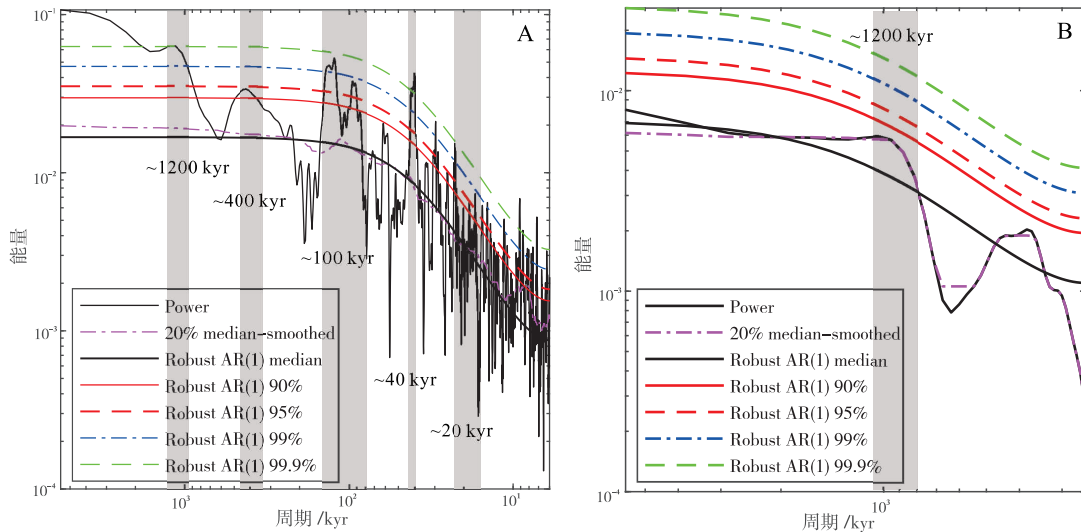


图 4 东营凹陷 FY1 井沙三下亚段白云石化强度时间序列与斜率滤波曲线包络线的能谱分析图

Fig. 4 Energy spectrum analyses of time sequence of dolomitization intensity and envelope of its obliquity filter in Es₃₁ of Well FY1 in Dongying sag

明研究区中始新统白云石旋回中记录了良好的米兰科维奇旋回。

4 讨论

4.1 渤海湾盆地中始新世深水白云石化强度与地球轨道参数

根据米兰科维奇理论，天文强迫所诱导的大气顶部日照的周期性变化是地球气候长期变化的主要驱动力 (Berger, 1988; Hinnov, 2000; Laskar *et al.*, 2004)。由于地球上的气候系统在反馈外部的

天文强迫过程中具有线性和非线性特征 (Nobes *et al.*, 1991; Rial *et al.*, 2004)，且传统的米兰科维奇周期，如偏心率 (~ 100 kyr 和 ~ 400 kyr)、斜率 (~ 40 kyr) 和岁差 (~ 20 kyr) 以及振幅调制周期 (~ 1200 kyr 和 ~ 2400 kyr)，对日照具有强烈影响，均可以在调节气候变化方面发挥关键作用 (Hays *et al.*, 1976)，因此推测研究区白云石形成于受气候变化控制的同沉积一早成岩阶段的某种白云石化作用，如微生物诱导模型或温度与 pH 循环诱导模型 (Vasconcelos *et al.*, 1995; Hobbs and Xu, 2020)。

针对白云石化强度时间序列中~1200 kyr周期的起源问题,笔者采用Taner-Hilbert滤波分析(带宽:0.0225~0.0265;中心频率:0.0245)获取该时间序列斜率周期滤波曲线的包络线作为其振幅曲线(图5),并利用多窗谱分析方法获取该斜率振幅曲线中的主要周期(图4-B),结果显示该时间序列中存在显著的~1200 kyr周期(图4-B)。再采用Taner-Hilbert滤波分析(带宽:0.00073~0.00093;中心频率:0.00083)获取~1200 kyr周期滤波曲线,并分析其与斜率振幅曲线之间的相位关系,结果发现强斜率振幅阶段与~1200 kyr滤波曲线高值期耦合良好(图5),这符合超长斜率周期对斜率的调制。因此,白云石化强度时间序列中的~1200 kyr周期属于斜率振幅调制周期。白云石化强度时间序列与La2010d天文解的斜率振幅曲线之间存在显著的耦合关系(图5),即高振幅对应于高白云石化强度,指示渤海湾盆地中始新世深水白云石化强度可能受控于斜率振幅调制周期对气候的调控效应。

4.2 对已发表研究实例的重新评估

二叠纪—三叠纪之交白云石化事件和土耳其Van湖第四系白云石旋回中均记录了轨道尺度的深水白云石化波动,且相关研究成果较为丰富,大量已发表的数据(Song *et al.*, 2012, 2014; Sun

et al., 2012; Litt *et al.*, 2014; Stockhecke *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016, 2018; Tomonaga *et al.*, 2017; McCormack *et al.*, 2018)为本研究提供了良好的基础。

4.2.1 土耳其Van湖第四系白云石旋回

Van湖位于安纳托利亚高原(土耳其)东部,靠近伊朗边境(北纬38.5°,东经43°)(Landmann *et al.*, 1996)。该湖处于一个构造洼陷内,水深约460 m,最大延伸130 km。当前的湖面海拔1646 m,面积约3570 km²,体积约为607 km³,是地球上第四大终端湖和最大的苏打湖。高碳酸盐浓度、活跃的区域火山活动以及水下热液喷发是造成该湖水体碱度高(pH值9.8,盐度21.4‰)的主要原因。Van湖位于一个复杂的构造运动带,其形成与南部的非洲/阿拉伯板块和北部的欧亚板块的碰撞有关。2010年国际大陆科学钻探项目在Van湖Ahlat Ridge复合钻孔累计取心220 m,时间跨越600 kyr。岩心共揭露出4种岩相,分别为带状和/或层状粉砂岩相、均质含黏土粉砂岩相、火山凝灰岩相和砂岩相(Çağatay *et al.*, 2014),其中前2种岩相是正常的湖泊沉积,而后2种岩相是事件沉积,整体上均形成于半深湖—深湖环境(Çağatay *et al.*, 2014)。

前人研究表明,在土耳其Van湖第四纪冰期

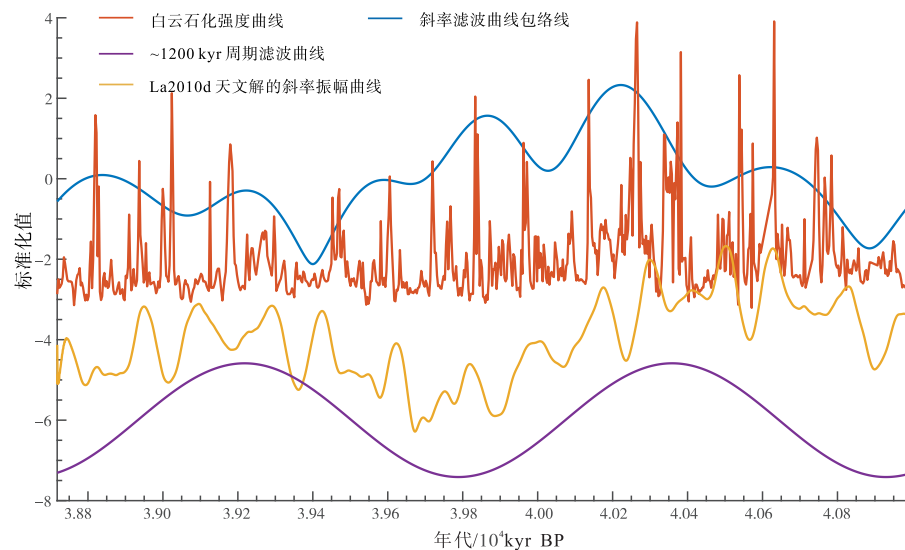


图5 东营凹陷FY1井白云石化强度、斜率滤波曲线包络线、~1200 kyr周期滤波曲线与同时期天文解中斜率振幅曲线之间的相位关系

Fig. 5 Phase relationship between dolomitization intensity, envelope of its obliquity filtering curve, ~1200 kyr periodic filtering curve of Well FY1 in Dongying sag, and obliquity amplitude in an astronomical solution at same period

沉积物中存在含量呈周期性波动的白云石，且白云石的含量高曾被认为与蒸发作用增强、Mg/Ca 值高、低水位或水体完全干涸有关 (Landmann *et al.*, 1996)。此外，150 kyr BP 以来 Van 湖第四系白云石化强度波动还被归因于亚轨道尺度气候变化 (Çağatay *et al.*, 2014)。在最近的研究中，McCormack 等 (2018) 对 Ahlat Ridge 复合钻孔岩心进行了系统性的重新采样，并依据全岩衍射分析获得 0~150 kyr BP 的高分辨率白云石化强度时间序列，认为在高水位沉积物界面氧化还原条件突变期 (高水位向低水位转变)，微生物生态压力增大，从而促进了白云石的发育。笔者汇总了相关控制因素的时间域数据，包括蒸发程度 (乔木花粉百分比)、古盐度 (孔隙水盐度)、湖平面相对变化、冰期与间冰期时间范围、白云石化强度和天文解中的岁差与岁差振幅 (图 6)，通过对比与耦合分析，对 Van 湖白云石旋回的控制因素进行了重新评估。研究发现，与冰期相比，间冰期 Van 湖的白云化强度要大得多，但蒸发程度和古盐度更低 (图 6)；除此之外，间冰期白云石化强度峰值 (>20%) 与高低水位转换期之间存在对应关系的数量为 4 个，占总峰值数量的 33.3%，显著低于冰期的 100.0% (图 6)。前人有关研究区白云石发育的控制因素观

点似乎都更适合冰期而非间冰期，而同时期天文解的岁差在间冰期表现出了相比冰期更强烈的振幅 (图 6)，这表明岁差振幅与白云石化强度之间具有耦合关系，并进一步指示 Van 湖第四系深水白云石化强度可能也受控于岁差振幅调制周期对气候的调控效应。

4.2.2 二叠纪—三叠纪之交白云石化事件

2018 年，Li 等对全球范围内 22 个二叠纪—三叠纪之交的剖面中的浅水陆架—斜坡—深海环境的白云石化强度开展了系统分析，结果表明该时期海洋化学跃变层 (斜坡—深海环境) 存在白云石化强度突增的现象，并称其为二叠纪—三叠纪之交白云石化事件 (Li *et al.*, 2018)。在该研究中，Li 等 (2018) 采用 $Mg/(Mg+Ca)$ 值作为白云石化作用强度的替代指标，通过与海洋缺氧事件和海洋硫酸盐还原速率的对比，认为该事件可能是在海洋缺氧条件下由化学跃变层加速的硫酸盐还原微生物过程引发的。

基于 Li 等 (2018) 的研究成果，笔者采用巢湖剖面伽马资料 (GR) 的偏心率滤波曲线及其包络线作为同时期地球轨道参数替代指标，进一步开展了深水白云石化强度与多种环境因素耦合关系的重新评估 (图 7)。研究表明巢湖剖面二叠纪—三叠

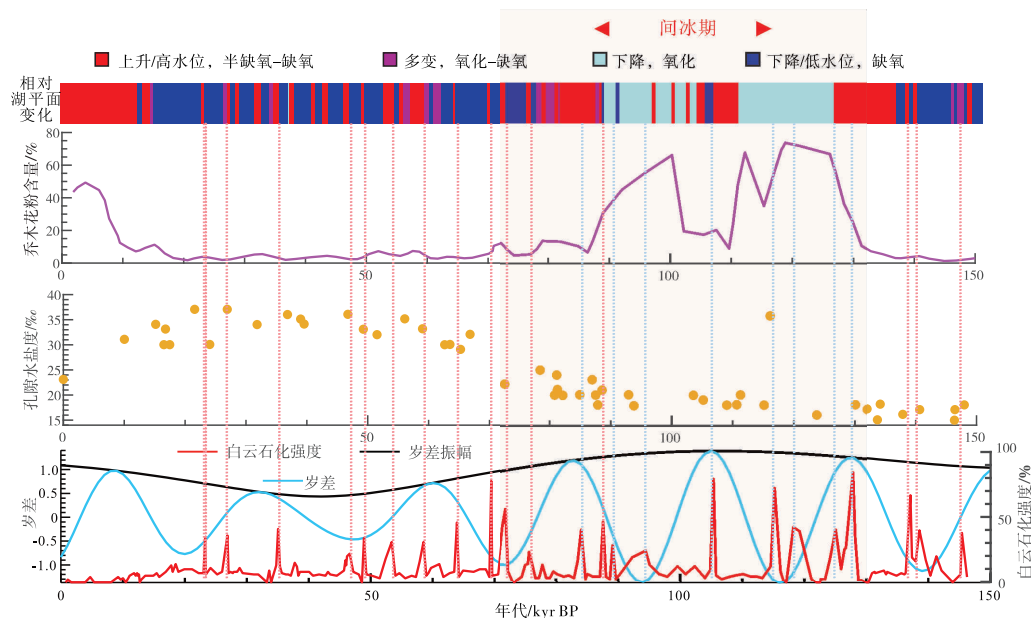


图 6 Van 湖第四系白云石旋回多因素分析图 (红色虚线代表与高低水位转换期耦合的白云石化强度峰值, 蓝色虚线代表未耦合峰值) (修改自 McCormack *et al.*, 2018)

Fig. 6 Multi-factor analysis diagram of the Holocene dolomite cycle in Lake Van (red dashed line represents peak dolomitization intensity coupled with sediment reventilation period, blue dashed line represents uncoupled peak) (modified from McCormack *et al.*, 2018)

纪之交发生的 5 次海洋缺氧事件中有 4 次对应于不同程度的白云石化作用增强 (Song *et al.*, 2012), 但缺氧事件 III 并没有与白云石化强度升高耦合 (图 7)。通过对比可以发现, 缺氧事件 I、II、IV、V 及其硫酸盐还原速率的增加与白云石化强度增大耦合良好, 且白云石化强度与缺氧程度或硫酸盐还原速率大致保持正相关 (图 7)。该现象符合前人观点, 即海水氧化还原条件是白云石化作用的主要控制因素 (Li *et al.*, 2018)。而缺氧事件 III 的缺氧程度虽然与最强的缺氧事件 I 相似, 但在相似的硫酸盐还原速率条件下, 缺氧事件 III 的白云石化作用强度又明显弱于缺氧程度明显更弱的事件 IV 和事件 V (图 7), 这说明缺氧条件并不一定是白云石化作用增强的主控因素, 特别是在缺氧事件 III。基于此, 笔者引入偏心率振幅变化参数进行分析, 发现该参数的变化趋势与海洋化学跃变层白云化强度变化趋势高度相似 (图 7), 指示缺氧事件 III 的白云石化强度很可能受偏心率振幅影响更大。以上分析说明, 仅从缺氧程度和厌氧微生物作用的角度来解释二叠纪—三叠纪之交的白云石化事件全过程是十分困难的。与其他控制因素相比, 偏心率振幅与同时期海

洋化学跃变层白云石化强度演化趋势之间的耦合关系更为良好, 表明偏心率振幅调制周期的气候效应可能与厌氧微生物作用共同调节了二叠纪—三叠纪之交跃层白云石化事件整体的演化趋势。

4.3 轨道参数振幅与深水白云石化作用的耦合机制

微晶白云石多形成于某些局限和高碱度的环境中, 如 sabkha 环境、高盐潟湖和盐湖 (Arvidson and Mackenzie, 1999), 而这些环境除了具备干旱与高盐度条件外, 均具有较强的环境波动。以 Cororong 潟湖为例, 该地区年均气温在 18~38 °C 之间, 湖底温度在 5~50 °C 之间, 水体 pH 值在 8~10 之间 (Warren, 2000)。基于前人对白云石发育的沉积环境波动特征的观察和实验验证, 笔者就环境波动促进白云石形成的机理进行总结: (1) 生物成因观点, 即沉积环境的物理和化学性质的波动可以依次对白云石的成核和稳定起作用; 在成核阶段, 盐度、温度和氧化还原条件的波动可以刺激生物应激反应, 产生更多的胞外聚合物 (EPS), 为富镁碳酸盐矿物成核提供更多成核点位 (Diloreto

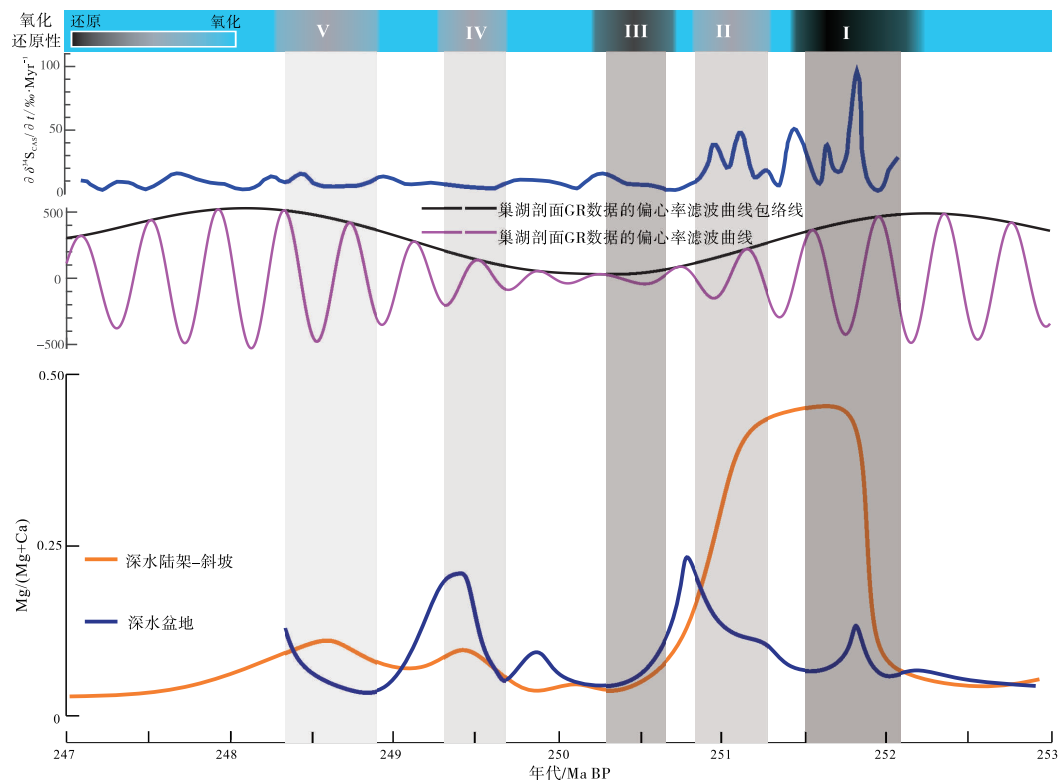


图 7 二叠纪—三叠纪之交白云石化事件多因素分析图 (修改自 Li *et al.*, 2018)

Fig. 7 Multi-factor analysis diagram of dolomitization event during the Permian-Triassic (modified from Li *et al.*, 2018)

et al., 2021); 而在稳定阶段, 在有利的 Mg/Ca 值条件下, 更多 EPS 降解过程中所导致的碱度增加有可能促进形成持续的浅埋藏白云石沉淀反应 (Petrash *et al.*, 2017)。(2) 非生物成因观点, 即一系列的溶解和沉淀可以导致浸出亚稳相矿物 (如文石) 并有利于稳定相矿物 (白云石) 含量的增加 (即熟化) (Deelman, 1999); 这一过程可能发生在现代或古代蒸发潟湖/盐湖环境中, 这些环境的共同特点是具有强烈的日际温度变化和 pH 值波动 (Hobbs and Xu, 2020)。其中后一个观点已被用于解释中亚赛里木湖早全新世原生白云石层和卡塔尔新生代海岸白云石沉积的起源 (Cheng *et al.*, 2021; Rivers *et al.*, 2021)。虽然环境波动性促进白云石沉淀的详细机理目前尚未有定论, 但可以确定的是以上 2 种路径是振幅调制周期高值期白云石化强度增强的重要潜在原因。

在天文周期中, 斜率是指地球自转轴的倾斜程度, 其在控制经向日照梯度、调控中低纬度印度夏季季风强度、影响中至高纬度大气环流和向极地水汽输送等方面发挥主要作用 (Raymo and Nisancioglu, 2003; Peckmann and Goedert, 2005)。岁差是指地球自转轴像陀螺般周期性的晃动, 主要影响季节性特征 (Berger, 1988)。偏心率是指黄道偏离正圆的程度, 其可以调控岁差的幅度, 在影响地球接收太阳辐射的总量与太阳辐射季节性变化的强度方面

具有重要作用 (Wang, 2021)。在地球轨道参数振幅调制周期的高值期, 日照量、季节性差异、大气湿度或降雨量等常具有强烈的波动特征。

针对显生宙 3 个不同地质时期的白云石化作用及其相关数据集进行的时间序列分析与耦合关系分析表明, 天文周期中的多种振幅调制周期的气候效应很可能对显生宙轨道尺度的深水白云石化作用强度波动产生重要影响, 主要表现为高振幅期对应于较强的白云石化作用。以位于中始新世、中纬度的渤海湾盆地东营凹陷为例, 该地区广泛发育季节性纹层, 具有十分强烈的季节性特征 (Zhao *et al.*, 2019)。Sr/Ba 值被认为是研究区始新世湖水盐度较为有效的替代指标 (Wei *et al.*, 2018), 高盐度通常导致渤海湾盆地博南洼陷沙三下亚段湖水分层、湖底缺氧与初级生产力勃发, 相比之下低盐度的淡水湖则不易形成分层的水体 (朱光有等, 2004)。而藻类等初级生产力可以通过光合作用影响湖水中 CO₂ 浓度, 从而调控湖水 pH 值 (沈青, 2011)。因此, 湖水盐度的波动同样可以引起分层程度、初级生产力、氧化还原性质与 pH 值等多方面湖水性质的变化。通过对已发表的 FY1 井 Sr/Ba 值进行分析 (Miao *et al.*, 2023), 发现 FY1 井沙三下亚段 Sr/Ba 值在超长斜率高值期具有比低值期更强的波动性 (图 8), 表明在斜率高振幅期湖底水体具有更为强烈的盐度、氧化还原性质与 pH 值的波

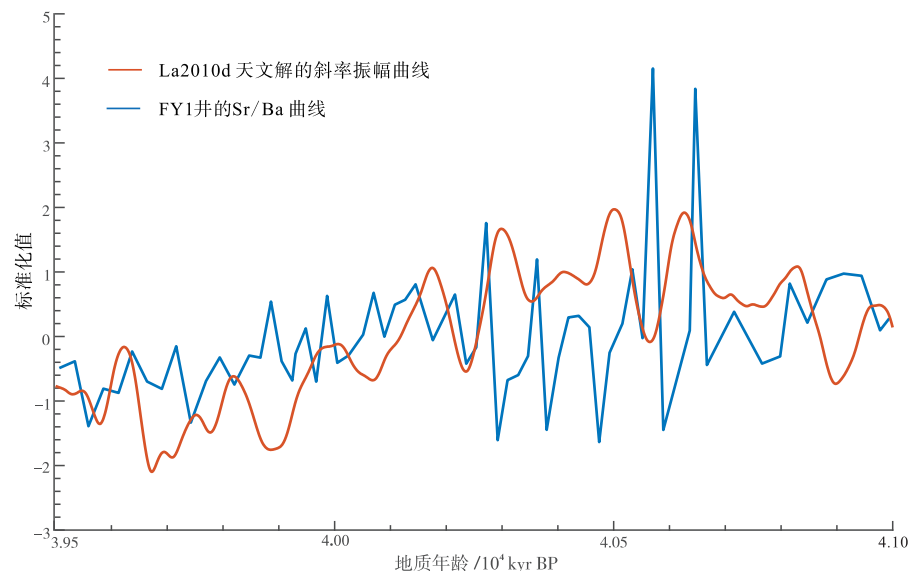


图 8 东营凹陷 FY1 井沙三下亚段干旱期 Sr/Ba 值与同时期天文解斜率振幅演化特征

Fig. 8 Sr/Ba value of Well FY1 in Dongying sag during the dry period of Es₃₁ and obliquity amplitude of astronomical solution at same period

动,而根据斜率对中纬度地区气候的影响方式,这种湖底水体性质的波动可以在季节尺度上得以体现。除此之外,岁差振幅也可以通过影响季节性差异强度与季风强度来调控研究区中始新世湖泊水体性质 (Shi *et al.*, 2019)。现代青海湖雨季的日温差与盐度波动显著强于旱季 (金章东等, 2013),所以季节性的水体性质波动同样可以体现在日际尺度上。综上,笔者推测,振幅调制周期可能通过多尺度的沉积或孔隙水物理化学性质波动促进显生宙深水白云石沉淀,具体机制可分为 2 类:(1) 强烈的氧化还原性质波动,加大了微生物生态压力促进 EPS 释放,进而加强了深水环境下白云石的成核与熟化;(2) 强烈的水体温度变化或 pH 值波动,通过一系列的沉淀与溶解滤除了文石 (亚稳定相),并促进深水环境下白云石 (稳定相) 的形成。简而言之,地球轨道参数振幅通过气候系统调控深水环境多尺度的波动,而深水环境波动通过影响微生物生态压力和流体温度与 pH 值促进白云石成核与熟化。

5 结论

1) 依据高分辨率的 X 射线全岩衍射分析数据开展时间序列分析以及耦合分析,认为渤海湾盆地中始新统沙三下亚段湖相深水白云石旋回记录了良好的米兰科维奇周期,白云石化强度与斜率振幅之间存在耦合关系。

2) 对已发表的研究实例重新评估表明, Van 湖第四系深水白云石化强度与岁差振幅之间存在耦合关系,而二叠纪—三叠纪之交海相深水白云石化强度与偏心率振幅之间存在耦合关系。

3) 推测微生物生态压力加大和流体温度变化、pH 值波动可能是导致地球轨道参数振幅与显生宙轨道尺度深水白云石化强度耦合的潜在因素。

参考文献 (References)

- 金章东,张飞,李福春,陈留美,肖军,贺茂勇. 2013. 青海湖湖水性质、颗粒物沉积通量季节和年际变化: 来自沉积物捕获器的研究. 地球环境学报, 4(3): 1306-1313. [Jin Z D, Zhang F, Li F C, Chen L M, Xiao J, He M Y. 2013. Seasonal and interannual variations of the lake water parameters and particle flux in Lake Qinghai: a time-series sediment trap study. Journal of Earth Environment, 4(3): 1306-1313]
- 沈青. 2011. 地表水中藻类代谢对 pH 和含氧量影响分析. 环境科学与技术, 34(S2): 261-262. [Shen Q. 2011. Analyses on the influence of algae metabolism on pH and DO in surface water. Environmental Science & Technology, 34(S2): 261-262]
- 许汇源,侯读杰,Simon C. George,刘全有. 2020. 东营凹陷沙河街组泥页岩中正丙基胆甾烷与异海绵烷的研究: 硫循环对有机质富集的影响. 南京大学学报(自然科学), 56(3): 366-381. [Xu H Y, Hou D J, George S C, Liu Q Y. 2020. Study on n-propylcholestanol and isorenieratane in the Shahejie black shales: sulfur control on organic matter enrichment. Journal of Nanjing University(Natural Science), 56(3): 366-381]
- 朱光有,金强,张善文,张林晔,郭长春. 2004. 渤南洼陷盐湖—咸水湖沉积组合及其油气聚集. 矿物学报, 24(1): 25-30. [Zhu G Y, Jin Q, Zhang S W, Zhang L Y, Guo C C. 2004. Salt lake-saline lake sedimentary combination and petroleum accumulation in the Bonan sag. Acta Mineralogica Sinica, 24(1): 25-30]
- Alsharhan A S, St C Kendall C G. 2003. Holocene coastal carbonates and evaporites of the southern Arabian Gulf and their ancient analogues. Earth-Science Reviews, 61(3-4): 191-243.
- Arvidson R S, Mackenzie F T. 1999. The dolomite problem: control of precipitation kinetics by temperature and saturation state. American Journal of Science, 299(4): 257-288.
- Arvidson R S, Guidry M W, MacKenzie F T, Mucci A, Luther G W. 2011. Dolomite controls on Phanerozoic seawater chemistry. Aquatic Geochemistry, 17(4-5): 735-747.
- Balog A, Read J F, Haas J. 1999. Climate-controlled early dolomite, Late Triassic cyclic platform carbonates, Hungary. Journal of Sedimentary Research, 69: 267-282.
- Berger A. 1988. Milankovitch theory and climate. Reviews of Geophysics, 26(4): 624-657.
- Burns S J, McKenzie J A, Vasconcelos C. 2000. Dolomite formation and biogeochemical cycles in the Phanerozoic. Sedimentology, 47: 49-61.
- Çağatay M N, Öğretmen N, Damcı E, Stockhecke M, Sancarü, Eriş K K, Özeren S, Litt T, Anselmetti F S. 2014. Lake level and climate records of the last 90 ka from the Northern Basin of Lake Van, eastern Turkey. Quaternary Science Reviews, 104: 97-116.
- Cheng J R, Meng X Q, Zhang E L, Jiang Q F, Ni Z Y, Ji J F. 2021. An Early Holocene primary dolomite layer of abiotic origin in lake Sayram, central Asia. Geophysical Research Letters, 48: e2021G-e96309G.
- Compton J S. 1988. Sediment composition and precipitation of dolomite and pyrite in the Neogene Monterey and Sisquoc Formations, Santa Maria Basin area, California. In: Shukla V, Baker P A (eds). Sedimentology and Geochemistry of Dolostones. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 53-64.
- Deelman J C. 1999. Low-temperature nucleation of magnesite and dolomite. Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte, 7: 289-302.
- Diloreto Z A, Garg S, Bontognali T R R, Dittrich M. 2021. Modern dolomite formation caused by seasonal cycling of oxygenic phototrophs and anoxygenic phototrophs in a hypersaline sabkha. Scientific Reports, 11: 4170.

- Gregg J M, Bish D L, Kaczmarek S E, Machel H G. 2015. Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: a review. *Sedimentology*, 62(6): 1749–1769.
- Hao F, Zhou X H, Zhu Y M, Zou H Y, Yang Y Y. 2010. Charging of oil fields surrounding the Shaleitian uplift from multiple source rock intervals and generative kitchens, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 27(9): 1910–1926.
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. 1976. Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194(4270): 1121–1132.
- Hinnov L A. 2000. New perspectives on orbitally forced stratigraphy. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 419–475.
- Hobbs F W C, Xu H F. 2020. Magnesite formation through temperature and pH cycling as a proxy for lagoon and playa paleoenvironments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 269: 101–116.
- Holland H D, Zimmermann H. 2000. The dolomite problem Revisited. *International Geology Review*, 42: 481–490.
- Kaczmarek S E, Gregg J M, Bish D L, Machel H G, Fouke B W, Macneil A J, Lonnee J, Wood R. 2017. Dolomite, very high-magnesium calcite, and microbes: implications for the microbial model of dolomitization. *Special Publication-Society for Sedimentary Geology*, 109: 7–20.
- Land L S, Mackenzie F T. 1998. Failure to precipitate dolomite at 25°C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years. *Aquatic Geochemistry*, 4(3–4): 361–368.
- Landmann G, Reimer A, Kempe S. 1996. Climatically induced lake level changes at Lake Van, Turkey, during the Pleistocene/Holocene Transition. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(4): 797–808.
- Laskar J, Robutel P, Joutel F, Gastineau M, Correia A C M, Levrard B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1): 261–285.
- Li M S, Hinnov L, Kump L. 2019. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education. *Computers & Geosciences*, 127: 12–22.
- Li M S, Ogg J, Zhang Y, Huang C J, Hinnov L, Chen Z Q, Zou Z Y. 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.
- Li M T, Song H J, Algeo T J, Wignall P B, Dai X, Woods A D. 2018. A dolomitization event at the oceanic chemocline during the Permian–Triassic transition. *Geology*, 46: 1043–1046.
- Li M T, Wignall P B, Dai X, Hu M Y, Song H J. 2021. Phanerozoic variation in dolomite abundance linked to oceanic anoxia. *Geology*, 49: 698–702.
- Liang C, Cao Y C, Jiang Z X, Wu J, Song G Q, Wang Y S. 2017. Shale oil potential of lacustrine black shale in the Eocene Dongying Depression: implications for geochemistry and reservoir characteristics. *AAPG Bulletin*, 101(11): 1835–1858.
- Liebermann O. 1967. Synthesis of dolomite. *Nature*, 213: 241–245.
- Litt T, Pickarski N, Heumann G, Stockhecke M, Tzedakis P C. 2014. A 600,000 year long continental pollen record from Lake Van, eastern Anatolia (Turkey). *Quaternary Science Reviews*, 104: 30–41.
- Liu D, Xu Y Y, Papineau D, Yu N, Fan Q G, Qiu X, Wang H M. 2019. Experimental evidence for abiotic formation of low-temperature protodolomite facilitated by clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 247: 83–95.
- Lumsden D N. 1985. Secular variations in dolomite abundance in deep marine sediments. *Geology*, 13: 766–769.
- Ma Y Q, Fan M J, Li M S, Ogg J G, Zhang C, Feng J, Zhou C H, Liu X F, Lu Y C, Liu H M, Eldrett J S, Ma C. 2023. East Asian lake hydrology modulated by global sea-level variations in the Eocene warmhouse. *Earth and Planetary Science Letters*, 602: 117925.
- Manche C J, Kaczmarek S E. 2019. Evaluating reflux dolomitization using a novel high-resolution record of dolomite stoichiometry: a case study from the Cretaceous of central Texas, USA. *Geology*, 47(6): 586–590.
- Manche C J, Kaczmarek S E. 2021. A global study of dolomite stoichiometry and cation ordering through the Phanerozoic. *Journal of Sedimentary Research*, 91(5): 520–546.
- McCormack J, Bontognali T R R, Immenhauser A, Kwiecien O. 2018. Controls on cyclic formation of Quaternary early diagenetic dolomite. *Geophysical Research Letters*, 45(8): 3625–3634.
- McKenzie J A, Vasconcelos C. 2009. Dolomite Mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: historical developments and new perspectives. *Sedimentology*, 56(1): 205–219.
- Miao Z W, Gong E P, Zhang Y L, Guan C Q, Huang W T. 2020. Burial dolomitization, the genesis of dolomite in the Dapu Formation (Upper Carboniferous), Guixinan area, Youjiang Basin, Southwest China: petrologic and geochemical evidence. *Carbonates and Evaporites*, 35: 57.
- Miao Z W, Zhang K H, Zhang P F, Zhang Q, Liu H M, Liu N, Zhang S, Teng J B, Li B, Fang Z W, Yu J F, Yu J J. 2023. Multiple proxies demonstrate the mechanism of dolomitization variations during global warming periods. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(4): 100187.
- Negi J G, Tiwari R K, Rao K N N. 1996. Clean periodicity in secular variations of dolomite abundance in deep marine sediments. *Marine Geology*, 133(1): 113–121.
- Nobes D C, Nobes D C, Bloomer S F, Mienert J, Westall F, Ciesielski P F, Kristoffersen Y, Clement B M, Blangy J, Bourrouilh R, Crux J A, Fenner J M, Froelich P N, Hailwood E A, Hodell D A, Katz M E, Ling H Y, Mueller D W, Mwenifumbo C J, Nocchi M, Warnke D A. 1991. Milankovitch cycles and nonlinear response in the Quaternary record in the Atlantic sector of the southern oceans. *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 114: 551–576.
- Peckmann J, Goedert J L. 2005. Geobiology of ancient and modern methane-seeps. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 227(1): 1–5.
- Petrash D A, Bialik O M, Bontognali T R R, Vasconcelos C, Roberts J A, McKenzie J A, Konhauser K O. 2017. Microbially catalyzed dolomite formation: From near-surface to burial. *Earth-Science Reviews*, 171: 558–582.
- Raymo M E, Nisancioglu K. 2003. The 41 kyr world Milankovitch's other unsolved mystery. *Paleoceanography*, 18(1): 1011.
- Rial J A, Pielke R A, Beniston M, Claussen M, Canadell J, Cox P, Held H, de Noblet-Ducoudré N, Prinn R, Reynolds J F, Salas J D. 2004.

- Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the earth's climate system. *Climatic Change*, 65(1-2): 11-38.
- Rivers J M, Yousif R, Kaczmarek S E, Al-Shaikh I. 2021. Cenozoic coastal carbonate deposits of Qatar: evidence for dolomite preservation bias in highly-arid systems. *Sedimentology*, 68(2): 771-787.
- Shalev N, Bontognali T R R, Wheat C G, Vance D. 2019. New isotope constraints on the Mg oceanic budget point to cryptic modern dolomite formation. *Nature Communications*, 10(1): 5646.
- Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, Zhang R, Huang Z K. 2019. Cyclostratigraphy and astronomical tuning of the middle Eocene terrestrial successions in the Bohai Bay Basin, Eastern China. *Global and Planetary Change*, 174: 115-126.
- Sibley D F. 1991. Secular changes in the amount and texture of dolomite. *Geology*, 19: 151-154.
- Song H J, Wignall P B, Tong J N, Bond D P G, Song H Y, Lai X L, Zhang K X, Wang H M, Chen Y L. 2012. Geochemical evidence from biapatite for multiple oceanic anoxic events during Permian-Triassic transition and the link with end-Permian extinction and recovery. *Earth and Planetary Science Letters*, 353-354: 12-21.
- Song H Y, Tong J N, Algeo T J, Song H J, Qiu H O, Zhu Y Y, Tian L, Bates S, Lyons T W, Luo G M, Kump L R. 2014. Early Triassic seawater sulfate drawdown. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 128: 95-113.
- Stockhecke M, Sturm M, Brunner I, Schmincke H U, Sumita M, Kipfer R, Cukur D, Kwiecien O, Anselmetti F S, Ariztegui D. 2014. Sedimentary evolution and environmental history of Lake Van (Turkey) over the past 600 000 years. *Sedimentology*, 61(6): 1830-1861.
- Sun S Q. 1994. A reappraisal of dolomite abundance and occurrence in the Phanerozoic. *Journal of Sedimentary Research*, 64: 396-404.
- Sun Y D, Joachimski M M, Wignall P B, Yan C B, Chen Y L, Jiang H S, Wang L N, Lai X L. 2012. Lethally hot temperatures during the Early Triassic greenhouse. *Science*, 338: 366-370.
- Tomonaga Y, Brennwald M S, Livingstone D M, Kwiecien O, Randlett M È, Stockhecke M, Unwin K, Anselmetti F S, Beer J, Haug G H, Schubert C J, Sturm M, Kipfer R. 2017. Porewater salinity reveals past lake-level changes in Lake Van, the earth's largest soda lake. *Scientific Reports*, 7(1): 313.
- Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, Grujic D, Tiens A J. 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. *Nature*, 377(6546): 220-222.
- Wang M, Chen Y, Bain W M, Song G Q, Liu K Y, Zhou Z Z, Steele-MacInnis M. 2020. Direct evidence for fluid overpressure during hydrocarbon generation and expulsion from organic-rich shales. *Geology*, 48(4): 374-378.
- Wang P X. 2021. Low-latitude forcing: A new insight into paleo-climate changes. *The Innovation*, 2(3): 100145.
- Wang S, Wang G W, Huang L L, Song L T, Zhang Y L, Li D, Huang Y Y. 2021. Logging evaluation of lamina structure and reservoir quality in shale oil reservoir of Fengcheng Formation in Mahu Sag, China. *Marine and Petroleum Geology*, 133: 105299.
- Warren J. 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1): 1-81.
- Wei W, Algeo T J, Lu Y B, Lu Y C, Liu H M, Zhang S P, Peng L, Zhang J Y, Chen L. 2018. Identifying marine incursions into the Paleogene Bohai Bay Basin lake system in northeastern China. *International Journal of Coal Geology*, 200: 1-17.
- Yang Y Q, Qiu L W, Gregg J, Shi Z, Yu K H. 2016. Formation of fine crystalline dolomites in lacustrine carbonates of the Eocene Sikou Depression, Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Science*, 13(4): 642-656.
- Zhao K, Du X B, Lu Y C, Xiong S P, Wang Y. 2019. Are light-dark coupled laminae in lacustrine shale seasonally controlled? A case study using astronomical tuning from 42.2 to 45.4 Ma in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, eastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 528: 35-49.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)