

### 碳酸盐工厂的精细刻画:定量化重建视角

王夏, 孟令赞, 柳晶晶, 甯濛, 葛毓柱, 曾雨涵, 李飞, 颜佳新

引用本文:

王夏, 孟令赞, 柳晶晶, 甯濛, 葛毓柱, 曾雨涵, 李飞, 颜佳新. 碳酸盐工厂的精细刻画: 定量化重建视角[J]. 沉积学报, 2024, 42(2): 351-370.

WANG Xia, MENG LingZan, LIU JingJing, et al. Detailed Characterization of Carbonate Factories from the Perspective of Quantitative Reconstruction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(2): 351-370.

### 相似文章推荐(请使用火狐或IE浏览器查看文章)

#### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

西昆仑穆呼锰矿晚石炭世含锰碳酸盐岩地质地球化学特征及其沉积环境

Geology, Geochemical Characteristics, and Sedimentary Environment of Mn-bearing Carbonate from the Late Carboniferous Muhu Manganese De-posit in West Kunlun

沉积学报. 2019, 37(3): 477-490 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.157

微生物碳酸盐岩沉积学研究进展——基于第33届国际沉积学会议的综述

Research P rogress in Sedimentology of Microbial Carbonate Rocks: A re-view based on the 33rd International Sedimentological Cong ress

沉积学报. 2018, 36(4): 639-650 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.134

#### 湖相碳酸盐岩元素测试方法研究

Study on the Testing Method for Elemental Composition of Lacustrine Carbonates

沉积学报. 2018, 36(4): 842-852 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.042

滇黔北坳陷寒武系碳酸盐岩古海洋环境特征及地质意义

Characteristic of the Cambrian Carbonate Paleo-ocean Environment in the Dianqianbei Depression and Its Geological Significance 沉积学报. 2016, 34(5): 811-818 https://doi.org/10.14027/j.enki.cjxb.2016.05.001

腕足壳体与碳酸盐岩全岩中碳、氧、锶同位素差异

The Discrepancy in Carbon, Oxygen and Strontium Isotope between Brachiopod Fossil Shells and the whole Carbonate Rocks 沉积学报. 2015, 33(1): 60-66 https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.01.006

文章编号:1000-0550(2024)02-0351-20

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.047

## 碳酸盐工厂的精细刻画:定量化重建视角

王夏<sup>1,2,3,4,5</sup>,孟令赞<sup>1</sup>,柳晶晶<sup>1</sup>,甯濛<sup>1,2,3,4</sup>,葛毓柱<sup>1,2,3,4</sup>,曾雨涵<sup>1</sup>,李飞<sup>6</sup>,颜佳新<sup>7</sup> 1.成都理工大学沉积地质研究院,成都 610059

2.油气藏地质及开发工程全国重点实验室,成都理工大学,成都 610059

3.国家能源碳酸盐岩油气重点实验室成都理工大学研究分室,成都理工大学,成都 610059

4. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室,成都理工大学,成都 610059

5. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室,成都 610218

6.天然气地质四川省重点实验室,西南石油大学地球科学与技术学院,成都 610500

7.生物地质与环境地质国家重点实验室,中国地质大学(武汉)地球科学学院,武汉 430074

**摘 要【意义**】碳酸盐工厂为碳酸盐岩沉积体系提供了物质基础,与海洋演化、元素循环、表生地质过程等密切相关,是反映地 球系统演化的重要环节。因此,定量化表征碳酸盐工厂及其主控因素是深入理解碳酸盐岩所记录的地质信息的关键。【**进展**】总 结了半定量一定量表征碳酸盐工厂的研究方法进展,结合对沉积过程正演模拟方法的介绍,从定量重建的角度为精细刻画碳酸 盐工厂提供了思路。【**展望**】针对碳酸盐工厂的研究,应在传统碳酸盐岩沉积学的基础上加深对其主控因素的定量评估,特别是 直接影响生态的因素。但在套用基于碎屑岩沉积体系所建立的定量分析方法时,需要考虑碳酸盐岩与碎屑岩的差异,并进一步 完善适用于碳酸盐岩的模型和分析方法。此外,在应用地球化学指标反演碳酸盐工厂及其主控因素时,要加强对成岩作用改造 程度的定量评估,以降低成岩作用对地球化学信号的影响。而在开发和应用新的碳酸盐岩地球化学代用指标时,需明确其赋存 或分馏机理,从而更准确地解读其所反映的古气候和古环境信息。同时,在利用沉积过程正演模拟研究工厂的演化和生产机制 时,需评估从现代环境中获取的参数在深时地质记录中的适用性,并在建模过程中考虑早期成岩作用及海水化学演化的影响。 关键词 碳酸盐工厂;定量分析;碳酸盐颗粒;元素地球化学;同位素地球化学;地层正演模拟

**第一作者简介** 王夏,女,1986年出生,特聘副研究员,硕士生导师,碳酸盐岩沉积学,E-mail: xiawang@cdut.edu.cn **中图分类号** P588.24<sup>+</sup>5 **文献标志码** A

### 0 引言

由于碳酸盐岩的生源性,适宜光合作用生物生存的浅海区域具有较高的生物产率,是主要的碳酸盐生产场所,研究者称之为"碳酸盐工厂"<sup>[11]</sup>。近年来,碳酸盐工厂(碳酸盐生产工厂)研究的兴起加深了人们对于碳酸盐沉积物在三维空间内的形成、搬运,以及沉积过程的认识。此前针对碳酸盐工厂的讨论主要集中于碳酸盐工厂的模式及概念体系。其中,最具代表性的包括以沉积环境及其对应的沉积方式为研究对象的Schlager工厂模式<sup>[23]</sup>,和以生态环境对工厂的影响为切入点的Pomar工厂模式<sup>[46]</sup>,碳酸盐工厂概念体系也在Schlager和Pomar等前人的基

础之上基本建立,但如何进一步挖掘工厂研究的价 值以及指导沉积学创新方面还有待深入探讨(图1)。

不同类型的碳酸盐工厂对碳酸盐岩沉积体形态和规模的影响一直以来受到广泛关注<sup>[35,8-11]</sup>。随光照和营养条件的改变,不同的光合自养生物(photozoan)和异养生物(heterozoan)组合的钙化速率会产生变化,从而影响不同水深的碳酸盐颗粒生产速率<sup>[4,6,12]</sup>。与此同时,碳酸盐颗粒从台地内部向外输送的速度会随着台地边缘及台地斜坡的形态、水流速度、风向、受海水饱和度控制的成岩固结速率等条件的变化而变化<sup>[89,13]</sup>。近年来,有研究者将上述基本原理结合正演模拟技术,对新生代以及古老的碳酸盐岩台地演化过程进行了恢复,发现不同

收稿日期:2024-02-20;修回日期:2024-03-21;录用日期:2024-03-28;网络出版日期:2024-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(42102143,42272131,42293291);自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室开放基金(cdcgs2022003) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42102143, 42272131, 42293291; Open Foundation of Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, No. cdcgs2022003]



图 1 传统沉积学与碳酸盐工厂研究所关注领域的差异(据文献[7]修改) Fig.1 Different research focused between traditional sedimentology and carbonate factory (modified from reference [7])

类型的碳酸盐工厂具有不同的碳酸盐沉积物的产 生速率、深度分布以及粒度(影响沉积物的抗侵蚀 性),从而对碳酸盐岩台地几何形态的差异产生了 关键性的影响<sup>[14]</sup>。

另一方面,碳酸盐工厂的转变往往与重大地质 历史事件耦合。例如:从前寒武到显生宙记录了多 次和重大地质历史事件有关的微生物主导的生物沉 积体系和后生动物主导的体系之间的转换过程[15]; P/T之交极热事件,缺氧事件,海洋酸化等极端环境 变化使得浅水碳酸盐工厂崩溃,向鲕粒,微生物岩, 以及自生泥晶为主的碳酸盐工厂发生转变[16-17]:中二 叠世生物灭绝事件及同期发生的环境剧变(如峨眉 山大火成岩省火山喷发)可能严重打击了热带浅水 碳酸盐工厂,使碳酸盐岩台地发生萎缩<sup>[18]</sup>;晚三叠世 卡尼期洪泛事件(CPE)使得特提斯域广泛发育的浅 水微生物碳酸盐工厂快速转换为骨屑—鲕粒碳酸盐 工厂,但在CPE之后又得到恢复<sup>109</sup>。由上可知,碳酸 盐沉淀过程对于环境变化是十分敏感的,这一特性 使得碳酸盐工厂的转变可以作为沉积环境发生重大 转变的表征之一。因此,对于深时记录中的碳酸盐 岩台地演化、碳酸盐工厂演化进行数值模拟,并探索 其和重大地质历史事件的耦合关系及机制,具有深 远的研究意义。

针对碳酸盐工厂的特征进行定性描述,根据生物、碳酸盐颗粒类型、岩相等划分工厂类型,并探讨随时间变化的工厂演化序列,可以帮助我们理解宏观尺度上碳酸盐工厂的转化过程及其与地质事件的耦合关系。但半定量、定量的碳酸盐工厂研究的缺

乏,以及对碳酸盐工厂空间上的分布及转换的认识 不足,使得我们对于碳酸盐工厂的时空演化及其主 控因素等仍缺乏深入理解。因此,针对碳酸盐工厂 的研究亟需从定性描述转向半定量一定量的精细刻 画,而近年来测试分析手段以及沉积过程数值模拟 方法的进步为此提供了良好的着力点。为此,首先 总结了碳酸盐工厂及其主控因素的沉积学及地球化 学定量表征方法,并介绍了利用碳酸盐岩沉积过程 正演模拟进行碳酸盐工厂研究的进展,以期从定量 化重建的视角,利用沉积学、地球化学,以及数值模 拟的方法,提供综合分析碳酸盐工厂的生产过程和 主控因素的研究思路。

### 1 经典的Schlager、Pomar碳酸盐工厂 分类方案及其研究进展

Schlager<sup>12-31</sup>与 Pomar et al.<sup>[4-6]</sup>分别提出了碳酸盐工 厂分类体系中最广为接受的两种分类方案,具有不 同的分类规则和概念结构(图2a,b),近年来关于工 厂分类的讨论也大多基于这两种经典方案(图 2b~e)。Schlager<sup>12-31</sup>的碳酸盐工厂分类是基于工厂所 在的沉积环境和产生碳酸盐沉积物的沉积作用类型 来划分的;而Pomar et al.<sup>[4-6]</sup>认为某些生物化学作用通 过不同的生物群或生物组合控制了工厂的发育,即 生态因素对碳酸盐工厂类型产生了巨大的影响。这 两种分类方法为碳酸盐工厂研究提供了不同的视 角,有助于我们更全面地理解碳酸盐岩沉积过程的 复杂性。



图 2 不同的碳酸盐工厂划分方案

(a)Pomar<sup>14</sup>的碳酸盐工厂划分方案,认为光照及营养是碳酸盐工厂的两大控制因素;(b)Schlager的碳酸盐工厂划分方案,Reijmer<sup>201</sup>的修订中增加了冷水珊瑚 工厂;(c)Reijmer<sup>211</sup>在Schlager方案的基础上修订的碳酸盐工厂划分方案及其主控因素、地域、典型生产者类型等;(d)简化的Michel et al.<sup>100</sup>碳酸盐工厂划分方 案;(e)Li et al.<sup>117</sup>修订的Schlager碳酸盐工厂划分方案,提出了鲕粒型工厂的分类位置



Lowenstam et al.<sup>[22]</sup>提出的碳酸盐三种不同的沉 积模式为Schlager<sup>[23]</sup>建立碳酸盐工厂的分类方案提 供了基础。Schlager<sup>[3]</sup>认为海洋碳酸盐生产过程首先 分为生物和非生物两种类型,在与生物相关的碳酸 盐生产过程中又包括生物诱导和生物控制两种不同 的生产机制,而所有碳酸盐岩的大规模沉积都来源 于上述生产机制有规律的组合,并呈现出三种主要 的碳酸盐生产系统(工厂):以光合自养生物为特征 的热带生产工厂、以异养生物为特征的温凉水生产 工厂和以微生物和非生物沉淀为主导的灰泥丘生产 工厂<sup>[23]</sup>(图2b)。上述分类方案中的工厂类型均建立 于底栖生态系统,因此,Schlager<sup>[23]</sup>又追加了浮游生产 工厂。近年来,Reijmer<sup>[20-21]</sup>对Schlager的分类体系进 行了梳理和补充拓展,增加了冷水珊瑚碳酸盐工厂 (图2b,c),其中每个生产工厂都有着不同的属性,例 如特定的环境参数,沉积物的产生和运移特点和沉 积体的形态和坡度等。但是,Schlager及Reijmer 修订的碳酸盐工厂分类体系也存在一些问题,例如 地质历史时期常见的、以鲕粒为主的沉积,既不属于 光合自养型生物主导的工厂,也不属于非生物成因 的化学沉淀主导的工厂类型。考虑到鲕粒的形成与 有机矿化过程和化学沉淀过程均存在关联<sup>[24-25]</sup>,Li et *al*.<sup>[17]</sup>认为应针对这种特异性工厂类型单独分类为鲕 粒工厂(图 2e),而 Michel *et al*.<sup>[10]</sup>认为应和其他几类 共同构成生物化学工厂。

此外,Michel et al.<sup>100</sup>通过数值模拟对现代碳酸盐 岩台地的全球分布规律进行了探索,他们发现不同 类型的碳酸盐岩台地的分布并不是随机的,而是受 台地中碳酸盐工厂的生产条件,也就是适宜碳酸盐 颗粒沉淀的生态环境因素所控制和影响的。该研究 根据现代海洋沉积定义了海洋生物化学T型工厂、光 合自养生物T型工厂、光合自养生物C型工厂,以及 异养生物C型工厂四种类型(图2d)及其对应的环境 特征,其中的T型、C型工厂均参照了Schlager<sup>123</sup>提出 的相关概念。此外,该研究也提到了自生灰泥工厂 (M-Factory)、流体活动有关的工厂、冷水珊瑚工厂等 概念。

Pomar et al.<sup>[46]</sup>则将工厂理论作为一个动态分析 碳酸盐生产过程的工具,主要用于阐明生物过程和 物理过程如何控制碳酸盐沉积体系<sup>[26]</sup>。Pomar et al.<sup>[6]</sup> 基于生产过程和产物的关系,将海水中的Ca<sup>2+</sup>和大气 中的pCO<sub>2</sub>的变化与海洋中进行碳酸盐沉淀的生物群 落的演化和生态需求相结合,其基本原理在于CO<sub>2</sub>是 碳酸盐沉淀和有机物生存的基础,而光合作用则是 主要的有机物生产过程,同时也为钙化作用提供了 必要的化学环境。Pomar<sup>[4]</sup>将水体按照光照条件划分 为透光带、寡光带和无光带,并对应不同的生物组合 (图2a)。

因此,相对于Schlager<sup>[23]</sup>(及Reijmer<sup>[21]</sup>修订)分类 方案中提出的五种工厂类型及其中包含的与沉积环 境之间的对应关系(如"热带浅水"等),Pomar et al.<sup>[6]</sup> 提出的碳酸盐工厂模型和分类方案并没有强调特定 环境与工厂类型之间的对应关系,而是突出了工厂 中生态环境条件变化对碳酸盐生产过程及钙化机制 的控制作用,即同一地理环境中,环境因素的改变可 以影响工厂类型。综上所述,Pomar et al.<sup>[6]</sup>的模型及 方案为定量化描述工厂的演化及环境因素之间的关 系提供了更直接的立足点。

### 2 碳酸盐工厂发育过程及其主控因素 的定量表征

### **2.1** 传统沉积相及微相分析与碳酸盐工厂研究的 异同

沉积相模式是对于现代及古代各类沉积体系的

特征及其控制因素的概括总结<sup>[27]</sup>。针对碳酸盐岩的 沉积相模式研究自 Irwin<sup>[28]</sup>开始,在20世纪70至90年 代达到顶峰。国内外运用最广泛的模式之一是 Wilson<sup>[29]</sup>建立的碳酸盐岩镶边台地模式。在这一模 式中,Wilson<sup>[29]</sup>在 Flügel<sup>[30]</sup>总结的三叠纪常见的碳酸 盐岩微相类型的基础上,提出了热带碳酸盐岩镶边 台地中的9个标准相带模式(Standard Facies Model, SFM)及对应的标准微相类型(Standard Microfacies, SMF)。之后,Flügel<sup>[31-33]</sup>在大量前人研究的基础之上, 建立了一套碳酸盐岩微相分析的综合方法,总结了 现代和古代的典型碳酸盐岩沉积相模式,并划分出 沉积相带及对应的标准微相类型,得到了广泛的应 用(如金振奎等<sup>[34]</sup>)。

以Flügel<sup>[31-33]</sup>为代表的微相分析方法是从碳酸盐 岩的微观结构入手,定量/半定量地分析其中的颗粒 (生物/非生物)组合、颗粒粒径、基质类型、结构构造 及成岩特征等,通过与标准微相的对比,解读沉积及 成岩信息,恢复岩石形成时的沉积相带和古环境。 而通过识别不同成因的碳酸盐组分,并确定其含量 和比例,可以识别出沉积序列中不同的碳酸盐生产 模式及其所在环境[35-36],这与微相分析相似而又有所 不同,因此碳酸盐工厂的研究更加强调不同组分的 成因来反演碳酸盐生产的过程[23,21],更需要对古环境 演化过程进行定量化解读<sup>66</sup>。虽然微相分析可对岩 石组构进行细致和综合的分析,但通过微相分析手 段得出的沉积环境信息通常只是定性的描述,无法 定量化表征碳酸盐生产过程的控制因素。与此同 时,化石保存的不完备性,或后期成岩改造对沉积及 早期成岩作用信息的破坏,都可能导致微相分析对 碳酸盐工厂的古环境条件的误读。

因此,在碳酸盐工厂的研究中,需要在传统的沉 积相及碳酸盐岩微相分析的基础上,通过定量/半定 量统计生物和非生物颗粒组合,结合有环境指示意 义的矿物特征、沉积结构、地球化学指标,来更好地 厘定碳酸盐岩形成时的古环境条件,如水深、光照强 度、温度、营养水平、水体氧化还原状态等<sup>[12,21,33,37,41]</sup>。 此外,定量分析沉积物的粒度、垂向变化等特征,也 可以更准确地得出岩石的沉积物来源和沉积过程中 的水动力条件,包括搬运距离、沉积速率、沉积物运 移方式等<sup>[15,42,46]</sup>。而通过颗粒、基质、胶结物的类型和 发育期次等特征,可以恢复成岩序列及成岩环 境<sup>[47,50]</sup>;同时,结合对地球化学信号有效性的评估<sup>[51,52]</sup> 识别成岩作用对岩石结构组分及其记录的古环境信息的改造程度,可将真正反映碳酸盐生产及其主控因素的信息识别出来。

### 2.2 碳酸盐颗粒定量统计分析

碳酸盐岩微相分析方法中把碳酸盐颗粒的统计 作为定量化描述岩石物质组成的重要方法,定量的 颗粒统计及分析不仅可以描述岩石的成分变化,也 可以定量化地反映沉积环境特征<sup>[31-33]</sup>。在碳酸盐工 厂的研究中,定量的颗粒统计也常被用来指示碳酸 盐工厂类型的转化<sup>[19,53]</sup>。颗粒形态包括粒度、磨圆、 分选等是确定古沉积环境的重要依据<sup>[43,54,55]</sup>,可以反 映水动力强度等指标,但现阶段对于碳酸盐颗粒形 态的定量化描述及其指示意义仍需要进一步的理论 研究及应用。

早在20世纪50年代, Ginsburg<sup>561</sup>就统计了佛罗 里达南部具有良好海水循环的带状生物礁以及半局 限的佛罗里达湾极浅水区域中的碳酸盐颗粒,分析 后发现后者比前者含有更多的小于0.125 mm的细粒 沉积物,而在大于0.125 mm 粒径的沉积物中,前者含 有丰富的藻类和珊瑚的碎片,后者则基本以软体动 物和有孔虫为主,同时,在生物礁中随着深度和水循 环的变化,动植物组合都发生了显著的变化,从而可 以区分出三种具有不同颗粒组合和粒度特征的亚环 境,证明了碳酸盐颗粒的粒度和成分与沉积环境有 极大的关系。Braithwaite<sup>[57]</sup>在生物碎屑砂样品中筛分 出1000个颗粒,让它们分别在250 cm的海水柱中以 终端速度进行自由无阻碍下落,并进行了单独测量、 称重和计时,发现颗粒在下落过程中经历了四种状 态:直线下落、旋转和螺旋下落,以及不稳定的翻滚, 并发现随着颗粒尺寸的增加,所经历的四种下落状 态的比例同时取决于颗粒的形状和有效密度。付坤 荣等581通过统计4种颗粒滩的颗粒灰岩并绘制其粒 度曲线,发现不同颗粒在平均粒径、分选性、滚动--跳跃---悬浮次总体的含量方面均有明显区别,其中 台缘滩的水动力与前滨带接近,台内滩的水动力表 现为中等能量的波浪扰动,指示其发育于受障壁的 台地内部。郭芪恒<sup>591</sup>通过对北京西山下苇甸张夏组 鲕粒的粒径统计,发现鲕粒粒度特征与鲕粒滩在空 间上具有良好的耦合关系,因此鲕粒粒度特征可用 于精细刻画鲕粒滩沉积水介质的能量变化。柳晶晶 等阿在研究川西北地区马鞍塘组的特异化碳酸盐工 厂转换机制时,提到鲕粒、似球粒、包粒、生物碎屑具 有不同的形成方式,并通过对不同颗粒进行粒径和 形状(形状系数、圆度、凸度和扁平度)的定量统计, 分析了形状和粒度的变化规律及其所反映的颗粒的 搬运方式、水动力条件等。结果表明,似球粒粒径集 中在65~272 µm,且颗粒的分选最好,扁平度接近2, 以形状规则、磨圆较好的扁长形椭圆为主,其搬运方 式主要为跳跃搬运,反映了中一高能水动力环境;鲕 粒磨圆较似球粒更好,粒径介于285~351 µm,圆度为 0.8~0.9, 扁平度小于似球粒, 搬运形式一般为滚动或 跳跃搬运,反映了大于似球粒的水动力条件;生物碎 屑颗粒极不规则,粒径最大可达7mm,磨圆较差,且 部分颗粒间由灰泥充填,可能代表一种水动力较小 的环境。但在使用基于碎屑岩沉积体系所建立的颗 粒形状及粒度与水动力相关关系的模型时,也需要 注意生源性(biogenic)的碳酸盐颗粒与碎屑颗粒的差 异,且急需建立基于碳酸盐颗粒的模型,de Kruijf et al.<sup>[61]</sup>的研究中也强调了生源性的碳酸盐颗粒比碎屑 颗粒具有更复杂和广泛的形态、密度和磨蚀产物;因 此,该研究建立了一个数据库,记录已发表的各种常 见碳酸盐组分的颗粒沉降速度和密度,由于碳酸盐 颗粒存在广泛的形态和密度变化,需要进行额外的 系统性的针对成分的研究,以实现对碳酸盐颗粒水 动力学的充分预测。

需要注意的是,在使用碳酸盐颗粒定量统计分析 碳酸盐工厂所处环境的水体能量时,也需要结合早期 成岩作用特征等对统计数据进行详细解读。例如阿 布扎比沿海地区(波斯湾南部)发育的现代碳酸盐工 厂,气候炎热干旱,降雨稀少,且陆源输入微弱<sup>[62-63]</sup>,整 体碳酸盐沉积代表现代边缘海碳酸盐缓坡,自陆向海 可见萨布哈、潮坪、潟湖、颗粒滩及较深海沉积[4]。古 地理分布对于萨布哈、潮坪、潟湖的水动力情况和沉 积特征具有一定的控制作用。但除了松散碳酸盐颗 粒沉积,阿布扎比沿海及其他波斯湾南部地区海底大 范围出现现代硬底[64-65]。很多现代硬底(尤其向陆局 限地区)具有较平整的上表面,并且生物钻孔和结壳 少见,不同于传统认识中的古代硬底特征(表面不规 则,生物钻孔和结壳明显)。研究表明,这些现代硬底 的形态和内部早期海相碳酸盐胶结物组构(包括矿物 和形态)呈现明显的空间变化,可能受控于海水性质、 沉积环境和早期海相成岩作用中氧化还原界面波 动<sup>[62]</sup>。因此,虽然Zhong et al.<sup>[66]</sup>通过颗粒观察和统计 认为随着水动力减弱,沉积物粒度变细(泥质含量增

加),但早期胶结作用有利于碳酸盐颗粒保存,并可 能产生与水动力分布不符的沉积粒度特征<sup>[62]</sup>,早期海 相成岩作中,微生物活动和泥晶化过程会在一定程 度上控制碳酸盐颗粒的形态和粒径<sup>[62-63]</sup>,而受水体自 身的碳酸钙饱和度所控制的早期海水胶结作用,可 能将不同粒径的沉积物黏结在一起<sup>[67]</sup>,产生与水动力 环境相悖的颗粒分布特征。

### 2.3 元素地球化学方法

在碳酸盐工厂的建造过程中,水体深度、氧化还 原条件、营养水平、温度和盐度等,以及气候、陆源碎 屑输入通量等指标都可能对工厂发育产生较大影 响。传统研究主要通过岩石学、矿物学、具指向性的 化石和沉积物等指标对碳酸盐发育过程中的环境变 化进行识别。例如利用水柱中沉淀的草莓状黄铁矿 的粒径变化特征指示海水缺氧和常氧条件的变 化[68-70];利用全球范围低纬度地区鲕粒的广泛发育指 示极端热室气候条件<sup>[17]</sup>;煤层的广泛出现对湿润气候 的指示,大规模异养生物群落的发育对富营养条件 的指示「「」等。尽管这些指标极大地促进了我们对碳 酸盐工厂发育环境的认识,但是这些认识无法提供 可靠的定量分析数据,造成对工厂发育过程缺乏有 效的量化评价方案。气候、环境和海平面变化等是 调控碳酸盐工厂发育类型和规模的主要控制因素, 通过连续对碳酸盐岩中相关元素指标的提取,有望 定量重建工厂的建造过程。例如,碳酸盐组分中Ce 异常,Zn/Fe摩尔比值,I/(Mg+Ca)等指标可用于连续 追踪水体含氧量的变化;通过对滨海环境中混入的 少量细碎屑组分进行分析,可获得气候、温度、营养 水平等方面的线索。

Li et al.<sup>172</sup>以寒武纪早期上扬子北部地区为例(图 3),研究围绕汉南一米仓山古陆发育的连陆台地,台 地中形成了以鲕粒、钙质微生物,以及钙质微生物与 古杯联合建造的多类型浅水碳酸盐工厂,由于该工 厂类型代表着一种寒武纪早期独特的宏体生物、微 生物和非骨屑碳酸盐复合建造工厂类型,了解其形 成过程中动态变化的氧化还原条件、陆源输入情况、 营养水平,以及气候条件等显得非常关键。该研究 发现通过弱酸淋滤与碳酸盐组分共生的少量细碎屑 组分后获得的化学蚀变指数、斜长石蚀变指数可重 建浅水碳酸盐工厂发育的气候条件,两个指标均指 示了工厂发育于相对干旱的气候背景条件;在排除 碳酸盐组分稀释效应的基础上,P/Al和Ni富集因子 显示鲕粒工厂的发育与营养水平的变化无直接关 联,但微生物碳酸盐工厂更趋向于高营养条件且形 成环境氧含量相对贫乏,而古杯主导的工厂类型营 养水平相对较低。基于一系列元素地球化学指标, 该研究推测浅水碳酸盐工厂的崩溃与当时气候转暖 湿造成的陆源碎屑输入通量的显著增强、营养水平 增加,最终将整个浅水碳酸盐工厂掩盖有关,并且由 于持续长时间的恶劣环境导致工厂无法恢复而最终 消亡。由此可见,元素地球化学指标可以对工厂发 育过程的定量评价提供重要参考。

### 2.4 同位素地球化学研究方法

碳酸盐岩的同位素地球化学是研究碳酸盐工厂 演化及其相应海洋环境的重要手段。目前应用最广 泛的包括碳酸盐岩的碳、氧、锶同位素<sup>[73-75]</sup>。近年来, 非传统金属稳定同位素(钙、镁同位素)也被开发用 以示踪碳酸盐工厂的早期成岩过程,进而为解读其 反映的古气候、环境信息提供更有效的评估<sup>[76-79]</sup>。针 对碳酸盐工厂研究的传统同位素地球化学研究方 法,近期已有文章进行系统总结<sup>[36]</sup>,不再赘述。主要 对近年来的一些新兴技术进行介绍,包括利用碳酸 盐团簇同位素(Δ<sub>47</sub>,Δ<sub>48</sub>)重建古温度和利用 Sr 同位素 (δ<sup>8886</sup>Sr)新开发的碳酸盐岩饱和度指标。

温度是影响碳酸盐工厂发育的重要因素,因此 古温度重建是碳酸盐工厂研究的重要方向之一。碳 酸盐岩的氧同位素是最常用的"地质温度计",但受 限于有效载体的保存、成岩改造等因素的影响,除了 基于弱成岩改造的生物壳体,如牙形刺磷灰石和腕 足类方解石壳等得出的结果,利用全岩δ<sup>18</sup>O重建古温 度一直饱受争议[80-82]。近年来,碳酸盐团簇同位素 (Δ<sub>47</sub>)地球化学的快速发展<sup>[83-84]</sup>,为古海洋温度重建提 供了更有效的指标,并为传统的氧同位素定温方法 等提供了可相互印证的对象,为探索碳酸盐工厂--生命——气候环境协同演化提供了新的机遇。 Goldberg et al.<sup>[85]</sup>通过对比团簇同位素和氧同位素恢 复的泥晶灰岩样品中不同组分的温度,发现早古生 代碳酸盐全岩 $\delta^{is}O$ 数据受到成岩改造的影响较小,且 与腕足壳和牙形刺氧同位素结果有较好的一致性, 并以此为基础选取数据恢复了全球寒武纪一奥陶纪 的高分辨率温度记录,然后将其置于生物演化和全 球构造运动的背景下进行对比研究,指出地球气候 与构造和火山活动关系紧密,并控制早期生物演化。 随着分析测试精度的提高,碳酸盐团簇同位素的测





Fig.3 Quantitative reconstruction of climatic, environmental, and nutrient factors for the development of a tropical shallow-water carbonate factory in the Early Cambrian based on element geochemical indicators (modified from reference [72])

定从Δ<sub>47</sub>发展到Δ<sub>48</sub>,开展双团簇同位素(Δ<sub>47</sub>+Δ<sub>48</sub>)测温 可以避免动力学分馏造成的偏差,实现古温度的有 效重建<sup>[86-87]</sup>,为碳酸盐团簇同位素研究开拓了新的方 向。此外,Swart *et al.*<sup>[88]</sup>利用实验室合成方解石成功 建立了首个团簇同位素Δ<sub>48</sub>的温度标定公式,展现出 双团簇同位素测温的巨大应用潜力。需要注意的 是,碳酸盐岩团簇同位素可能在埋藏成岩过程中由 于溶解和重结晶作用丢失原始古海洋温度信号,从 而反映成岩流体温度<sup>[89]</sup>。

碳酸盐饱和度控制碳酸盐的沉淀和分布<sup>[10,90]</sup>。 Wang et al.<sup>[91]</sup>利用稳定 Sr 同位素(δ<sup>8886</sup>Sr)开发了一 种全新的碳酸盐岩饱和度指标,其基本原理是 Sr 同 位素的分馏主要受碳酸钙沉积速率控制(动力学分 馏),即海水碳酸钙饱和度的变化,为探索海洋碳酸 盐工厂和碳酸盐矿物饱和状态的演化提供了新的视 角。该研究对 30亿年以来碳酸盐岩记录的稳定锶同 位素进行了恢复,发现前寒武纪海相碳酸盐岩的 δ<sup>8886</sup>Sr值相较于显生宙显著偏高,根据Sr同位素分馏 原理和同位素质量平衡计算,发现前寒武纪海洋的 碳酸钙饱和度远高于显生宙海洋,提出前寒武纪海 洋存在一个"被忽略的"碳酸盐工厂,如孔隙水中生 成的自生碳酸盐,可能代表了整个前寒武纪一个主 要却被忽视的碳酸盐汇。

利用碳酸盐岩的地球化学组成重建碳酸盐工厂 及其海洋环境演化的基础是,碳酸盐岩能够忠实地 记录原始海水的地球化学信号<sup>[73]</sup>。由于受到复杂的 沉积—成岩过程的影响,碳酸盐岩的地球化学信号 能否真实地反映海水信息一直备受争议<sup>[92]</sup>。近年来, 越来越多的学者开始重视对碳酸盐岩所记录的地球 化学信号有效性的评估<sup>[51-52]</sup>。碳酸盐岩所记录的地球 化学信号有效性的评估<sup>[51-52]</sup>。碳酸盐岩所记录的地球 作用<sup>[76,79,92]</sup>。碳酸盐岩早成岩阶段的成岩体系可视为 海水和沉积物两个端元的混合,不同深度的成岩流 体性质受海水和沉积物孔隙水不同程度混合的影

响,前人将两个端元分别描述为流体缓冲体系和沉 积物缓冲体系[76.79]。流体缓冲体系形成的碳酸盐沉 积物继承了海水较高的δ<sup>44</sup>Ca值特征;而形成于沉积 物缓冲体系中的碳酸盐沉积物,由于继承原始碳酸盐 矿物的Ca同位素值,具有较低的δ<sup>44</sup>Ca值<sup>[76-77,79]</sup>。在相 对封闭的沉积--成岩体系中,碳酸盐岩的Mg同位素 组成( $\delta^{26}Mg$ )主要受到孔隙水的 $\delta^{26}Mg$ 值分馏的影响。 因此,根据Ca-Mg同位素体系分析可以约束沉积—成 岩系统的开放性,这对评估其地化指标的受改造程度 至关重要。Lau et al.<sup>[52]</sup>进一步利用水一岩反应模型对 碳酸盐岩的古氧化还原指标 I/Ca, Ce/Ce\*, 碳酸盐晶 格结合态Cr、U、S同位素进行数值模拟,定量评估成 岩改造对这些指标的影响。结果表明,由相对未演化 的海水构成的成岩流体缓冲体系("海水缓冲")能够 有效地保留所有的地球化学信息。相反,由在不同氧 化还原条件下高度演化的孔隙水构成的成岩流体缓 冲体系("孔隙水缓冲")可能改变原始的地球化学信 号。为了更好地解读成岩作用对碳酸盐岩地球化学 指标的影响,未来还需要更多的理论实验约束、野外 观测和多地化参数综合数据集。

此外,受洋底板块俯冲作用的影响,现存大部分 海相碳酸盐岩为古代陆表海沉积产物。古代和现代 陆表海碳酸盐沉积研究表明,海水性质及相应碳酸 盐地球化学记录与同时期广海性质有时会表现出很 大的差异性<sup>1931</sup>。例如Pederson *et al.*<sup>1931</sup>对阿布扎比沿 海地区海水性质进行了研究,发现随着沉积环境局 限性增加,海水性质受到气候、沉积和早成岩环境中 有机质分解的影响,从而与广海海水性质产生明显 的差异性,这对研究古代边缘海碳酸盐岩地球化学 性质具有重要意义。

### 3 地层沉积正演模拟及碳酸盐工厂 定量化研究

研究沉积体的三维演化过程,通常是基于露头或钻孔采集大量数据来进行多元地质统计建模(例如:Amour et al.<sup>[94]</sup>),但这种方法高度依赖于数据,所以只能在有限的程度上揭示影响沉积过程的地质规律。近年来基于地质过程的建模方法如地层正演模拟技术(Stratigraphic Forward Modelling,SFM)的进一步发展,为地质规律的验证和总结提供了更有效的思路<sup>[95]</sup>。

在碳酸盐岩沉积过程正演模拟中,需要调整各 类参数以获得最符合实际情况的模型(图4)。在碳 酸盐岩沉积过程正演模拟中使用的主要参数包括模 拟区域的面积、初始地形、研究区构造沉降、全球海 平面变化和沉积物供应等[96]。当物质来源稳定时,碎 屑岩体系中的沉积物性质及沉积结构几乎是均一 的,但由于碳酸盐岩沉积物的内源性("carbonate are born, not made"<sup>[1]</sup>),即沉积物是由不同水深的"生产 者"在原地产生,然后在波浪和重力的作用下被改造 和运移的1971,所以碳酸盐沉积通常具有极强的非均质 性。而碳酸盐工厂的概念为模拟碳酸盐沉积物的生 产和搬运过程提供了理论支持。因此,在碳酸盐岩 体系中运用基于沉积过程的地质建模方法时,除了 考虑构造基底沉降、海平面变化、古地形、陆源碎屑 输入、沉积物运移等因素,还需要关注由不同类型的 碳酸盐工厂所控制的碳酸盐产率变化与其他环境因 素的耦合关系(图4、表1)。例如,光照强度、温度、水 深、波浪能和沉积物可容纳空间等因素均可以通过 影响生物的生存状态从而间接影响工厂的发育[4.6]。



图 4 碳酸盐岩沉积过程正演模拟流程示意图 Fig.4 Flow diagram of forward modelling on carbonate sedimentary processes

	process modelling
过程模拟实例	sedimentary
酸盐岩沉积	carbonate
E1 碳酸]	for
表1	cases
	Study
	1
	Table

实例参数等	Al-Salmi et al. <sup>[98]</sup>	Li <i>et al.</i> <sup>[99]</sup>	van der Looven <i>et al.</i> <sup>[100]</sup>	Tella <i>et al.</i> <sup>[97]</sup>	Liu <i>et al.</i> <sup>[101]</sup>	Barrett <i>et al.</i> <sup>[102]</sup>	Burgess et al. <sup>[103]</sup>	段太忠等[95]	刘建良等[104]	黄渊等 <sup>[105]</sup>
初始地形	地震剂面;根据岩 相特征恢复古水 深,得到初始地形	根据岩相恢复古水 深,得到初始地形	地震剖面: 钻井资料	根据底栖生物恢复 古水深,得到初始 地形	地震剖面;根据沉 积相恢复古水深, 得到初始 地形	週井资料, 地礫剖面		地震剖面;连井资 料;根据岩相恢复 古水深,得到初始 地形	初始地形设置为碳 酸盐岩台地、斜坡和 盆地三个理想相带	地震剖面;根据 沉积相恢复古 水深,得到初始 地形
海平面升降	基于 Haq <sup>lios</sup> 和 Miller <i>et al.</i> <sup>1007</sup> 的 海平面变化曲线 修改	基于Haq et al. <sup>[108]</sup> 的海平面变化曲线 修改	基于Miller et al. <sup>1001</sup> 的 海平面变化曲线修改	基于Haq <sup>106]</sup> 和 Miller <i>et al.</i> <sup>[105,109]</sup> 的海平面变化曲线 修改	基于Haq et al. <sup>[110]</sup> 海平面变化曲线 修改	利用休恩半岛的生 物礁序列和波拿巴 湾的沉积物估算相 对海平面变化	使用修正的正弦 振荡函数来代替 海平面震荡	根据沉积旋回推测 海平面变化,结合 Haq et al. <sup>tros</sup> 的海 平面变化曲线修改	三级海平面变化曲 线叠加+四级、五级 海平面曲线	结合地震剖面 和岩相的解释; Fischer 图解
构造沉降	研究区域的沉降率 和海平面升降保持 平衡、沉降率被指 定为恒定速率 2 m Myr <sup>1</sup>	实過台地內部和边 缘剖面,计算出不 同时期沉降速率 (印度阶330 m Myr <sup>1</sup> ;奥伦尼克阶 142.5 m Myr <sup>1</sup> ;安 尼阶32.3 m Myr <sup>1</sup> ; 拉丁阶240 m Myr <sup>1</sup> )	基于马尔代夫地区的 回剥沉降曲线,估算 沉降率为 38.5 m Myr <sup>1</sup>	I	基于回剥厚度与 沉积时间估算 沉降速率	I	沉降拳的变化发 生在百万年的时 间尺度上,因此在 较短的模拟时长 内以恒定的沉降 速率进行建模 (100 m Myr <sup>i</sup> )	根据沉积厚度和古 水深估算构造沉降 速率	沉降率的变化发生 在百万年的时间尺 度上,所以构造沉降 设定为恒定速率 100 m Myr <sup>1</sup> .	基于文献总结 分析得出塔里 木盆地的构造 沉碎史,得出沉 降速率范围 (0.00 327~ 0.00 374 m Myr <sup>i</sup> )
碳酸盐 产率模型	按大小分组碳酸盐 颗粒:用T工厂的生 产曲线 <sup>[11]</sup> 测试各深 度最大产率;绘制 不同的碳酸盐颗粒 的产率一深度曲线	确定不同岩相类 型:根据测量的岩 相厚度除以沉积时 同估算最大产率; 绘制产率一深度 曲线	根据Pomar <sup>41</sup> 的方案划 分碳酸盐工厂类型; 计算透光生物群生存 的水深 <sup>1121</sup> ,估算各深 度最大产率 <sup>1113</sup> ,得出 产率一深度曲线	划分不同深度的生 物组合:依据不同 水深存在的生物群 估算生产速率来绘 制产率一深度曲线	将沉积体系简化为 碳酸盐生产深度区 间:基于不同水深 存在的碳酸盐工厂 估算各区间产率; 绘制碳酸盐产率 深度曲线	印度洋一大平洋礁 前相碳酸盐产率曲 线间41测定台地边缘 碳酸盐沉积速率; 假设台地内部只存 在细粒碳酸盐岩的 沉积	据Pomar <sup>id</sup> 方案划 分三种不同光带 的碳酸盐工厂;确 立每种工厂的产 率和深度 <sup>112</sup> ;绘制 产率一深度曲线	碳酸盐原位生产模 型: $P=0P_{a}^{*}(1-0)P_{a}^{*}$ (0:势能与劲能的 比例参数: $P_{a}^{*}势$ 能、与地层因素有 关: $P_{a}^{*}动能、与生物因素有关)$	碳酸盐生产与水深 负相关:刘分四类碳 酸盐岩:依据古今统 计结果设定生产速 率与水深的模糊逻 辑函数集	
最大产率	碳酸盐大颗粒: 290 m/Myr; 破酸盐中颗粒: 190 m/Myr; 碳酸盐泥; 15~120 m/Myr	产举介于 200~650 m/Myr	产率介于 100~1 000 m/Myr	透光带:15 m/Myr; 中光带:10 m/Myr; 寡光带:15 m/Myr; 远祥沉积:7 m/Myr	类型1:600 m/Myr; 类型2:300 m/Myr; 类型3:50 m/Myr; 类型4:20 m/Myr	台地边缘碳酸盐沉 积速率:14 000 m/ Myr: 台地内部碳酸盐沉 积速率:700 m/Myr	透光带: 透光带: 事光带: 150-3 000 m/Myr; 无光带: 52-66 m/Myr	I	类型1:1 000 m/My; 类型2:500 m/My 类型3:100 m/My; 类型4:50 m/My	Ι

第2期

王 夏等:碳酸盐工厂的精细刻画:定量化重建视角

359

360				沉	积 学 报			第42	2卷
续表	黄渊等 <sup>[105]</sup>	I	I	I	基于扩散模型和 水动力学方程	寒武纪	塔河地区	碳酸盐地层演化	iRDS-CarbSIMS
	刘建良等[104]	I	I	I	Ι	l	l	台地一斜坡相(分 析碳酸盐地层的 完整性)	Sedsim
	段太忠等1951	I	I	I	基于扩散模型和 水动力学方程	晚白垩纪	大巴哈马滩	孤立合地	CARBSIM
	Burgess et al. <sup>[103]</sup>	I	Ι	I	Ι	l	I	分析海平面升降 及碳酸盐产率对 浅水不同岩相厚 度的影响	Dougal
	Barrett et al. <sup>[102]</sup>	I	Ι	I	利用剪切力和地 形坡度模拟搬运 过程: f_ <sub>nul</sub> =r_ <sub>nu</sub> reat + r_ <sub>nuv</sub> + r_ <sub>supe</sub>	全新世	大堡礁	孤立台地	CARBONATE 3D
	Liu <i>et al.</i> <sup>[101]</sup>	基于钻井资料确定 陆源碎屑输入的位 置	利用氣同位素重建 古海洋温度: T=16.94.2(δ <sub>c</sub> δ <sub>w</sub> ) +0.13(δ <sub>c</sub> -δ <sub>w</sub> ) <sup>31151</sup>	利用碳氧同位素推 算古盐度: Z=2.048(8 <sup>13</sup> C+50) +0.498(8 <sup>18</sup> O+50)	I	晚埃迪卡拉世— 早寒武世	四川盆地中部德阳 一安岳海槽	斜坡	Sedsim
	Tella $et \ al.^{[97]}$	I	I	I	简化的扩散方 程: Q=K <sub>mv</sub> ×S (Q:沉积物通量; K <sub>mv</sub> :迹浪扩散系 数; S:坡度)	中新世	Menorca 岛碳酸 盐缓坡	缓坡	DionisosFlow
	van der Looven <i>et al.</i> <sup>[100]</sup>	l	I	I	简化的扩散方程: $Q=K_{mon}, S=K_{mon}, S=+K_{mon}, S=+K_{max} S=K_{max} S$ (Q:沉积物通量: $K_{max}$ ), $(Q:沉积物通量:K_{max}$ ; $v_{i}$ :重力扩散系数: $K_{max}$ : 读说能"散系数: $K_{max}$ :读说能"影、线度)	渐新世一中新世	马尔代夫群岛	孤立台地	DionisosFlow
	Li $et al.^{[99]}$	I	I	I	沉积物的搬运与 地形坡度和扩散 系数有关	早三叠世— 中三叠世	大贵州滩	孤立台地	DionisosFlow
	Al-Salmi et al. <sup>[98]</sup>	I	I	I	简化的扩散方程: $Q=K_{mix} \times E_{mix} \times S$ $(Q: 近积物通量:K_{mine}: 波浪扩散系数:E_{mine}: 波说能:S: 坡度)$	株罗纪一 早白垩纪	阿曼北部下白垩 统碳酸盐岩台地	镶边台地	DionisosFlow
	实例参数等	陆源碎屑	温度	誹蔑	沉积地 搬运	时代	研究区	沉积建造类型	软件

361

虽然受限于现有模型及模拟方法,沉积过程正演模 拟难以重建快速的环境变化所导致的碳酸盐生产及 溶解过程,但在长时间尺度的研究中,将碳酸盐工厂 及其演化过程纳入研究思路,可以深化对台地/盆地 演化驱动因素的认识<sup>[10],17]</sup>,进而深入揭示碳酸盐工 厂在沉积过程中的重要作用。因此,对碳酸盐岩沉 积过程进行正演模拟也是定量化厘定碳酸盐工厂及 其主控因素的过程(图5)。

### 3.1 碳酸盐的产率

碳酸盐的产率是决定碳酸盐工厂生产过程及碳酸盐岩沉积体形成过程的关键要素<sup>[46,118]</sup>。基于海水中CaCO<sub>3</sub>沉淀的质量平衡关系,通过碱度降低技术捕捉水体中CaCO<sub>3</sub>的实时变化,可以计算出海洋生物碳酸盐的产率(production rate)<sup>[46]</sup>。由于碳酸盐岩的沉积过程复杂,深时记录中的真实碳酸盐产率很难被准确估算<sup>[119]</sup>。Enos<sup>[118]</sup>根据沉积环境总结了前人报道的不同地区的沉积速率(sedimentation rate)(Enos 所引用的数据为单位时间内沉积物的堆积厚度),包括 浅海到远洋/深海的碳酸盐沉积速率,但也指出这些

数据中除了单个珊瑚的生长速率和通过碱度测试得 出的碳酸盐固定量是严格意义上的产率之外,其他 的碳酸盐"产率"都近似于碳酸盐沉积物的积累速率 (accumulation rate)(这里指碳酸盐沉积物的输入率 及原地产率扣除通过沉积过路作用或侵蚀作用产生 的碳酸盐沉积物输出率之后的净结果),真实的碳酸 盐产率与碳酸盐沉积物的输入或输出率无关。在沉 积过程模拟中通常使用碳酸盐沉积物的积累速率替 代产率,研究者们按照实际情况给出了不同的数值 范围(表1)。Pomar<sup>14</sup>根据不同的光照依赖性, 区分出三种生产碳酸盐的生物群:透光带型、寡光带 型和无光带型,并提出了这三种生物群的碳酸盐产 率随水深变化的模型。Burgess et al.<sup>[103]</sup>认为碳酸盐 岩台地的沉积过程中,透光带范围内合理的沉积速 率是 250~5 000 m/Myr。Seard et al.<sup>[120]</sup>根据 Bosscher et al.<sup>[112]</sup>提出的生物礁生长方程,计算得出碳酸盐生 产率随水深变化的曲线。Liu et al.<sup>[101]</sup>基于Smith et al.<sup>[46]</sup>、Sadler<sup>[121]</sup>以及Bosence et al.<sup>[122]</sup>的工作,将600 m/ Myr作为全球透光带碳酸盐工厂产率的平均值。



图 5 表征碳酸盐工厂及其主控因素的半定量—定量指标(参数)与其在地层正演模拟中的应用 Fig.5 Application of semi-quantitative to quantitative proxies (parameters) for the reconstruction of carbonate factories and their controlling factors in stratigraphic forward modelling

Montaggioni<sup>[113]</sup>通过对末次冰期以来印度洋—太平洋 珊瑚礁系统发育过程的充分调查,认为在以骨架礁 为主的沉积体系中,碳酸盐的产率介于1000~ 30000 m/Myr,绝大多数产率介于6000~7000 m/Myr。 Sultana et al.<sup>114</sup>在探究碳酸盐工厂如何影响台地的形 态时,将Chlorozoan工厂(一种包含钙质绿藻、造礁珊 瑚和软体动物的,生活在浅水区域的生物群落)的碳 酸盐沉积速率设定在3740 m/Myr,用来表示在透光 带中不同生物组合的产率。

不同碳酸盐工厂的产率可以影响沉积物的类 型、岩石的结构类型、地层结构,以及沉积体的形态 等。基于Pomar<sup>44</sup>的产率模型, Burgess et al.<sup>[103]</sup>在建模 中设定了三个具有不同光照水平的碳酸盐工厂,占 据主导地位的工厂会影响碳酸盐沉积物的产率、类 型、进而影响岩石的结构类型,如透光带碳酸盐工厂 趋向于生产颗粒灰岩(grainstone)、中光带碳酸盐工 厂趋向于生产泥粒灰岩(packstone)和粒泥灰岩 (wackestone)、寡光带碳酸盐工厂趋向于生产灰泥灰 岩(mudstone)。Li et al.<sup>[99]</sup>通过敏感性分析发现,虽然 碳酸盐的产率一深度变化曲线对碳酸盐岩台地尺度 的几何形态变化产生的影响较小,但较为明显地影 响了不同沉积相的分布以及特定沉积相的厚度。 Tella et al.<sup>[97]</sup>利用敏感性分析的方法,证明不同光照 条件分带对应的生物类型的相对含量是影响缓坡形 态的关键因素,如寡光带异养生物占主导时可形成 同斜缓坡或低角度缓坡,而透光带光合自养生物占 主导时则可形成镶边缓陆棚。van der Looven et al.<sup>[100]</sup> 对马尔代夫碳酸盐岩台地在渐新世—中新世的演化 历程进行了正演模拟,揭示了多个碳酸盐工厂协作 和相互依赖的生产机制,证明渐新世台地的淹没主 要受控于碳酸盐工厂的破坏,而非相对海平面的变 化。Cantrell et al.<sup>[123]</sup>通过建立水深和温度的模糊集 来描述储层沉积过程的控制因素。Hawie et al.<sup>[124]</sup>在 模拟阿布扎比陆上油田中三个主要储层的结构非均 质性时,对复杂碳酸盐几何形状的变化进行了建模, 结果表明碳酸盐岩几何外形的变化主要受碳酸盐产 率的影响。

#### 3.2 水体光照强度

一束单射光通过介质时,透射光强度的减弱 与介质的厚度和浓度正相关(比尔一朗伯特定律, Beer-Lambert's law)<sup>[125]</sup>,因此,水体中的光照强度与 水体深度和水体的透光性有关。Bosscher *et al.*<sup>[112]</sup>根 据 Chalker et al.<sup>[126-127]</sup>关于造礁珊瑚的光合作用量和 骨骼生长速率的模型,结合比尔一朗伯特定律,提出 了生物礁的生长速率方程:

*G*(*z*)=*G*(*m*)×tanh[*I*<sub>0</sub>×exp(-*z/k*)/*I*<sub>k</sub>] 式中:*G*(*z*)是生物礁的生长速率,*G*(*m*)是生物礁的最 大生长率,*z*表示水深,*I*<sub>0</sub>表示表面光强度,*I*<sub>k</sub>表示饱和 光强度,*k*代表消光系数,这一模型认为光照是影响 全新世生物礁生长的最重要因素,而水深和水体浑 浊度可影响光照强度,所以它们也是控制生物礁生 长速率的关键因素。Pomar *et al.*<sup>[46]</sup>解释了不同深度 生物群的栖息范围,在清澈的水域中,真光带生物群 的最佳生存范围为20~30 m;寡光带生物群的最佳生 存范围为50~100 m,水深变化可影响该区域内能进 行光合作用的生物,从而控制碳酸盐岩的沉积过程。 因此,也可用生物群落组合识别相应的水深。

### 3.3 温度

许多正演地层模拟软件都将温度作为一个控制 浅水碳酸盐岩沉积体,如生物礁生长的因素<sup>[101,17,123]</sup>。 温度在浅水区域对生物群的影响较大,如热带浅水 碳酸盐工厂主要分布在纬度30°N~30°S或18°C冬 季等温线内,水体温暖<sup>[21]</sup>。Yao et al.<sup>[82]</sup>利用保存良好 的腕足类方解石壳体的δ<sup>18</sup>O恢复了石炭纪晚维宪期 到谢尔普霍夫期的古海水温度,发现后生动物生物 礁的丰度急剧降低与晚维宪期的气候变冷事件是耦 合的,且早于其他底栖生物多样性的减少,说明生物 礁这一类重要的浅水碳酸盐工厂对于温度具有较高 的敏感性。同时,在建模过程中也应当考虑温度对 海水碳酸钙饱和度的影响,及其对碳酸盐岩的沉积 成岩过程及分布的控制。

### 3.4 波浪能量

波浪能量可从两方面影响碳酸盐工厂。首先, 如果波浪不能驱散海水的浑浊物,增加到达海底的 光照量,那么珊瑚等依赖光合作用的造礁生物也会 进一步被限制生长<sup>[128]</sup>;此外,波浪能量也是影响沉积 物运移的重要因素,例如Dionisos作为应用扩散方程 模拟的正演模型,在模拟沉积物运移过程时,将盆地 坡度和波浪能量作为影响沉积物运移速率的参 数<sup>[124,129]</sup>。除波浪外,现阶段仍缺乏关于潮汐影响碳 酸盐沉积物搬运过程的模拟研究,值得在将来的研 究中进一步讨论。

### 3.5 沉积可容空间

容纳碳酸盐工厂发育的物理空间在正演模拟中

是通过基底沉降和绝对海平面的变化之间的耦合来 实现的[105]。沉积基底的初始形态、沉积基底的沉降、 海平面的振荡都是制约碳酸盐工厂发育过程的重要 因素,在碳酸盐工厂中,无论上述哪种情况造成的海 进和海退都意味着沉积物的"原产地"环境条件可能 发生改变,例如造礁生物的栖息地随相对海平面变 化扩大或缩小,使得造礁生物群落的生存受到影响, 进而影响了相关沉积体的组构、结构和形态,这在正 演地层模拟中可以得到充分体现[97,100,130]。对于模拟 中基底沉降的估算主要受地层年代的影响:地层年 代越新,估算沉降量的准确性越高<sup>[95]</sup>。Lanteaume et  $al.^{[131]}$ 在正演模拟中给出了方程 $\Delta S = (\Delta T + \Delta W) - \Delta E$ ( $\Delta$ 单位时间,S沉降量,T模拟的沉积物累计厚度, W古水深, E海平面的升降), 用来求导每个时间步长 内沉积物的沉降量从而绘制沉降图。前人对不同时 期,不同时间跨度的海平面变化的经典研究成果被 广泛地用于正演模拟研究中(如 Miller et al.<sup>[107]</sup>; Haq et al.[108]),但需要根据具体研究区域在全球海平 面变化的基础上进行微调,以适应区域性海平面变 化的差异。Seard et al.<sup>[120]</sup>为了探究不同的海平面变 化对珊瑚礁发育的影响因素,校正了不同振幅和时 间步长的海平面振荡曲线。Liu et al.<sup>[101]</sup>的研究区地 层年代跨越埃迪卡拉纪晚期至寒武纪早期,该时期 处于冰室向温室的过渡期,因此,该研究中使用的海 平面振荡曲线采用了由三级、四级和五级三种不同 海平面震荡曲线拟合而成。当然,除海平面变化外, 季风带来的洋流变化等对碳酸盐岩台地建造过程及 形态的影响也不可忽视[132]。

此外,沉积物的压实作用也是影响沉积物可容 空间的重要因素,但由于碳酸盐岩在沉积—早成岩 期的胶结速率较快<sup>13</sup>,所以在校准沉积可容空间时, 要考虑碳酸盐沉积物与碎屑沉积物在压实作用方面 的差异,及不同沉积相带的压实作用差异。

#### 3.6 沉积物的搬运

对于沉积物的搬运过程,正演模拟技术在碎屑 岩沉积体系中的应用发展较为成熟<sup>[133-135]</sup>。Pitman<sup>[136]</sup> 根据 Sloss<sup>[137]</sup>和 Harbaugh *et al.*<sup>[138]</sup>的模型开发了一个 适合碎屑岩沉积的几何模型<sup>[118]</sup>。而碳酸盐沉积物的 搬运过程发生在沉积物原位产生之后,因此也会考 虑使用和碎屑岩类似的搬运模式。Li *et al.*<sup>[99]</sup>利用正 向地层模拟探究碳酸盐岩台地几何外形的形成因 素,目标集中在沉积物的产生和运移过程,此研究针 对三叠纪印度阶至拉丁阶大贵州滩的演化展开,并 围绕MPD(最大生产深度),MPR(最大生产速率)和 不同的运移参数,利用观测数据和模拟数据的厚度 差异,台地边缘到坡脚的距离以及坡脚的最大倾斜 角度表征模型在不同参数限制下所发生的形变,同 时通过对不同参数的敏感性分析,认为搬运速率对 碳酸盐岩台地形状的影响是巨大的。

然而,对沉积物搬运过程进行模拟时,需要注意 松散的碳酸盐沉积物可以快速胶结<sup>113</sup>,而这些沉积— 早成岩期的胶结作用对碳酸盐沉积物搬运过程产生 的影响是不可忽略的。因此,在对深时记录中的碳 酸盐沉积物搬运过程进行模拟时,需要考虑该时期 的海水地球化学条件对胶结作用的影响,直接套用 现代海水化学条件下的沉积物搬运模式可能造成模 拟结果的偏差。此外,由于碳酸盐岩沉积过程与碎 屑岩沉积过程在早期成岩阶段存在较大的差异性, 需要进一步探索和建立更适用于碳酸盐沉积物的搬 运过程模型。

### 4 结论及展望

随着分析测试技术、沉积过程数值模拟等研究 手段的不断发展,定量化精细刻画碳酸盐工厂构成 及其生产过程成为一个值得期待的新兴方向。通过 高分辨率地识别岩石学、地球化学特征,并结合沉积 过程数值模拟等方法,可以分析大规模碳酸盐发育 的气候条件、古地理格局、物质来源、氧化还原条件、 水动力条件和营养水平等。这些工作的开展将有利 于更深入地认识碳酸盐沉积过程,阐明其动力学来 源和具体生产机制,对于理解地球表层生物圈与环 境的相互关系也具有重要意义。但在未来的研究 中,仍需要重点关注和解决以下问题。

(1) 在进行碳酸盐颗粒的定量统计分析时,不仅 要针对颗粒组合的变化进行分析,也需要进一步挖 掘通过颗粒形态的统计分析所揭露的环境信息,同 时要进一步完善适用于碳酸盐颗粒的定量形态分析 方法和模型。此外,在定量统计时也需要考虑成岩 过程对于沉积物和沉积构造等特征的改造,以避免 在数据解读时产生偏差。

(2) 在利用地球化学指标定量评估碳酸盐工厂 发育的古海洋环境时,需要慎重考虑碳酸盐岩所记 录的地球化学信号的有效性,未来应进一步建立基 于Ca-Mg同位素,结合数值模拟方法的技术体系,以 定量评估成岩作用的改造程度。同时,在开发和应 用新的碳酸盐岩元素或同位素地球化学代用指标 时,需深入理解元素的赋存机理和同位素的分馏机 制,以便更准确地恢复古气候、环境的演变。在地球 化学分析技术方面,由于碳酸盐岩的非均质性极强, 应进一步加强原位元素及同位素测试方法的开发和 应用,进而达到精细刻画碳酸盐工厂发育的古海洋 环境的目的。

(3)利用碳酸盐岩沉积过程正演模拟研究深时 记录中的碳酸盐工厂演化,现阶段仍有许多问题需 要解决。首先,在针对深时碳酸盐岩沉积过程进行 的正演模拟中,参数的设置(例如产率、古水深等)多 基于现代实例,其适用性需要进一步验证;其次,在 基于碳酸盐工厂基本原理的地层沉积正演模拟中, 需要进一步关注海水化学条件及沉积一早期成岩作 用对碳酸盐生产及沉积过程的影响。

致谢 感谢评审专家及编辑部老师在论文修改 过程中提出的宝贵意见,感谢研究生李心怡在图件 修改过程中做出的贡献。

#### 参考文献(References)

- James N P. Facies models 7. Introduction to carbonate facies models[J]. Geoscience Canada, 1977, 4(3): 123-125.
- [2] Schlager W. Sedimentation rates and growth potential of tropical, cool-water and mud-mound carbonate systems[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2000, 178(1): 217-227.
- [3] Schlager W. Benthic carbonate factories of the Phanerozoic[J]. International Journal of Earth Sciences, 2003, 92(4): 445-464.
- Pomar L. Types of carbonate platforms: A genetic approach[J]. Basin Research, 2001, 13(3): 313-334.
- [5] Pomar L. Ecological control of sedimentary accommodation: Evolution from a carbonate ramp to rimmed shelf, Upper Miocene, Balearic Islands[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 175(1/2/3/4): 249-272.
- [6] Pomar L, Hallock P. Carbonate factories: A conundrum in sedimentary geology[J]. Earth-Science Reviews, 2008, 87(3/4): 134-169.
- [7] Pomar L, Haq B U. Decoding depositional sequences in carbonate systems: Concepts vs experience[J]. Global and Planetary Change, 2016, 146: 190-225.
- [8] Della Porta G, Kenter J A M, Bahamonde J R, et al. Microbial boundstone dominated carbonate slope (Upper Carboniferous, N Spain): Microfacies, lithofacies distribution and stratal geometry [J]. Facies, 2003, 49(1): 175-207.
- [9] Della Porta G, Kenter J A M, Bahamonde J R. Depositional facies and stratal geometry of an Upper Carboniferous prograding and

aggrading high-relief carbonate platform (Cantabrian Mountains, N Spain)[J]. Sedimentology, 2004, 51(2): 267-295.

- [10] Michel J, Laugié M, Pohl A, et al. Marine carbonate factories: A global model of carbonate platform distribution[J]. International Journal of Earth Sciences, 2019, 108(6): 1773-1792.
- [11] Michel J, Lanteaume C, Lettéron A, et al. Oligocene and Miocene global spatial trends of shallow-marine carbonate architecture[J]. The Journal of Geology, 2020, 128(6): 563-570.
- [12] Mutti M, Hallock P. Carbonate systems along nutrient and temperature gradients: Some sedimentological and geochemical constraints[J]. International Journal of Earth Sciences, 2003, 92(4): 465-475.
- [13] Grammer G M, Crescini C M, McNeill D F, et al. Quantifying rates of syndepositional marine cementation in deeper platform environments-new insight into a fundamental process[J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(1): 202-207.
- [14] Sultana D, Burgess P, Bosence D. How do carbonate factories influence carbonate platform morphology? Exploring productiontransport interactions with numerical forward modelling[J]. Sedimentology, 2022, 69(1): 372-393.
- [15] Chen Z Q, Tu C Y, Pei Y, et al. Biosedimentological features of major microbe-metazoan transitions (MMTs) from Precambrian to Cenozoic[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 189: 21-50.
- [16] Li M T, Song H J, Woods A D, et al. Facies and evolution of the carbonate factory during the Permian–Triassic crisis in south Tibet, China[J]. Sedimentology, 2019, 66(7): 3008-3028.
- Li F, Gong Q L, Burne R V, et al. Ooid factories operating under hothouse conditions in the earliest Triassic of South China[J].
   Global and Planetary Change, 2019, 172: 336-354.
- [18] Meng Q, Xue W Q, Chen F Y, et al. Stratigraphy of the Guadalupian (Permian) siliceous deposits from central Guizhou of South China: Regional correlations with implications for carbonate productivity during the Middle Permian biocrisis[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 228: 104011.
- [19] Jin X, Gianolla P, Shi Z Q, et al. Synchronized changes in shallow water carbonate production during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic) throughout tethys[J]. Global and Planetary Change, 2020, 184: 103035.
- [20] Reijmer J J G. Carbonate factories[M]//Harff J, Meschede M, Petersen S, et al. Encyclopedia of marine geosciences. Dordrecht: Springer, 2016: 80-84.
- [21] Reijmer J J G. Marine carbonate factories: Review and update[J]. Sedimentology, 2021, 68(5): 1729-1796.
- [22] Lowenstam H A, Weiner S. On biomineralization[M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [23] Schlager W. Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy[M]. Tulsa, Okla: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2005.
- [24] 李飞,易楚恒,李红,等. 微生物成因鲕粒研究进展[J]. 沉积学报,2022,40(2):319-334. [Li Fei, Yi Chuheng, Li Hong, et al.

Recent advances in ooid microbial origin: A review[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 319-334. ]

- [25] Diaz M R, Eberli G P. Decoding the mechanism of formation in marine ooids: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 536-556.
- [26] Brandano M, Mateu-Vicens G, Baceta J I. Understanding carbonate factories through palaeoecological and sedimentological signals – Tribute to Luis Pomar[J]. Sedimentology, 2022, 69(1): 5-23.
- [27] Walker R G. Turbidites and submarine fans[M]//Walker R G, James N P. Facies models: Response to sea level change. St. John's: Geological Association of Canada, 1992: 239-263.
- [28] Irwin M L. General theory of epeiric clear water sedimentation[J]. AAPG Bulletin, 1965, 49(4): 445-459.
- Wilson J L. Principles of carbonate sedimentation[M]//Wilson J
   L. Carbonate facies in geologic history. New York: Springer, 1975: 1-19.
- [30] Flügel E. Mikrofazielle untersuchungen in der alpinen trias: Methoden und probleme[J]. Mitt Ges Geol Bergbaustud, 1972, 21: 9-64.
- [31] Flügel E. Microfacies analysis of limestones[M]. Christenson K, trans. Berlin: Springer-Verlag, 1982: 1-26.
- [32] Flügel E. Microfacies of carbonate rocks : Analysis, interpretation and application[M]. Berlin: Springer, 2004: 1-976.
- [33] Flügel E. Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2010: 1-956.
- [34] 金振奎,石良,高白水,等. 碳酸盐岩沉积相及相模式[J]. 沉积 学报,2013,31(6):965-979. [Jin Zhenkui, Shi Liang, Gao Baishui, et al. Carbonate facies and facies models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 965-979. ]
- [35] 颜佳新,孟琦,王夏,等.碳酸盐工厂与浅水碳酸盐岩台地:研 究进展与展望[J]. 古地理学报,2019,21(2):232-253. [Yan Jiaxin, Meng Qi, Wang Xia, et al. Carbonate factory and carbonate platform: Progress and prospects[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(2): 232-253. ]
- [36] 古强,邢凤存,文娇,等. 碳酸盐工厂研究进展[J/OL]. 沉积学报, doi: 10.14027/j. issn. 1000-0550.2022.092. [Gu Qiang, Xing Fengcun, Wen Jiao, et al. Research progress on carbonate factory[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, doi: 10.14027/j. issn. 1000-0550.2022.092.]
- [37] Lowenstam H A. Minerals formed by organisms[J]. Science, 1981, 211(4487): 1126-1131.
- [38] 李红,李飞,龚峤林,等. 混积岩中重矿物形貌学特征及物源 意义:以川北寒武系第二统仙女洞组为例[J]. 沉积学报,2021, 39(3):525-539. [Li Hong, Li Fei, Gong Qiaolin, et al. Morphological characteristics and provenance significance of heavy minerals in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentation: A case study from the Xiannüdong Formation, Cambrian (Series 2), northern Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(3): 525-539. ]

- [39] Ma Z X, Hu S X, Wu H C, et al. High productivity promoted exceptional fossil preservation of the early Middle Triassic Luoping biota of Yunnan province, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 607: 111286.
- [40] 樊秋爽,夏国清,李高杰,等.古海洋氧化还原条件分析方法 与研究进展[J]. 沉积学报,2022,40(5):1151-1171. [Fan Qiushuang, Xia Guoqing, Li Gaojie, et al. Analytical methods and research progress of redox conditions in the paleo-ocean[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(5): 1151-1171. ]
- [41] 丁奕,张立军.古海洋氧化还原条件的遗迹化石定量表征特征:以华南二叠纪末生物大灭绝事件为例[J].古地理学报, 2023,25(2):405-418. [Ding Yi, Zhang Lijun. Quantitative characterization of ichnological parameters for indicating palaeoocean redox conditions: A case study of the end-Permian mass extinction in South China[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(2): 405-418.]
- [42] Steinhoff I, Strohmenger C. Zechstein 2 carbonate platform subfacies and grain-type distribution (Upper Permian, northwest Germany)[J]. Facies, 1996, 35(1): 105-132.
- [43] 朱筱敏,张义娜,杨俊生,等. 准噶尔盆地侏罗系辫状河三角 洲沉积特征[J]. 石油与天然气地质,2008,29(2):244-251.
  [Zhu Xiaomin, Zhang Yina, Yang Junsheng, et al. Sedimentary characteristics of the shallow Jurassic braided river delta, the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 244-251. ]
- [44] 蔡萌. 1.6万年以来泸沽湖沉积中碳酸盐和粒度变化及其环 境指示意义[D]. 昆明:云南师范大学,2019:1-61. [Cai Meng. Carbonate mineral and grainsize changes since 16 kyr BP in Lake Lugu and environmental indication[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019: 1-61. ]
- [45] 杨辉,朱代强,刘祥刚,等. 细粒沉积学研究动态及探讨[J]. 非 常规油气,2021,8(1):1-7. [Yang Hui, Zhu Daiqiang, Liu Xianggang, et al. The research and discussion of fine-grained sedimentology[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(1): 1-7. ]
- [46] Smith S V, Kinsey D W. Calcium carbonate production, coral reef growth, and sea level change[J]. Science, 1976, 194(4268): 937-939.
- [47] Marfil R, Caja M A, Tsige M, et al. Carbonate-cemented stylolites and fractures in the Upper Jurassic limestones of the eastern Iberian Range, Spain: A record of palaeofluids composition and thermal history[J]. Sedimentary Geology, 2005, 178(3/4): 237-257.
- [48] 杨威,魏国齐,金惠,等.川东北飞仙关组鲕滩储层成岩作用和孔隙演化[J].中国地质,2007,34(5):822-828. [Yang Wei, Wei Guoqi, Jin Hui, et al. Diagenesis and pore evolution of the oolitic shoal reservoir in the Feixianguan Formation in northeastern Sichuan[J]. Geology in China, 2007, 34(5): 822-828. ]
- [49] Gontharet S, Pierre C, Blanc-Valleron M M, et al. Nature and origin of diagenetic carbonate crusts and concretions from mud volcanoes and pockmarks of the Nile deep-sea fan (eastern Mediterranean Sea)[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in

Oceanography, 2007, 54(11/12/13): 1292-1311.

- [50] 苏旺,江青春,陈志勇,等. 冷水碳酸盐岩研究现状与展望[J]. 海相油气地质,2017,22(1):1-13. [Su Wang, Jiang Qingchun, Chen Zhiyong, et al. Cool-water carbonates: A review of the current status and prospects[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(1): 1-13. ]
- [51] Swart P K. The geochemistry of carbonate diagenesis: The past, present and future[J]. Sedimentology, 2015, 62(5): 1233-1304.
- [52] Lau K V, Hardisty D S. Modeling the impacts of diagenesis on carbonate paleoredox proxies[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2022, 337: 123-139.
- [53] Morabito C, Papazzoni C A, Lehrmann D J, et al. Carbonate factory response through the MECO (Middle Eocene Climate Optimum) event: Insight from the Apulia carbonate platform, Gargano Promontory, Italy[J]. Sedimentary Geology, 2024, 461: 106575.
- [54] Bádenas B, Aurell M. Facies models of a shallow-water carbonate ramp based on distribution of non-skeletal grains (Kimmeridgian, Spain)[J]. Facies, 2010, 56(1): 89-110.
- [55] 马志鑫,李波,颜佳新,等.四川广元中二叠统栖霞组似球粒 灰岩微相特征及沉积学意义[J]. 沉积学报,2011,29(3):449-457. [Ma Zhixin, Li Bo, Yan Jiaxin, et al. Microfacies of peloidal limestone of Middle Permian Chihsia Formation at Guangyuan, Sichuan province and its sedimentary significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 449-457. ]
- [56] Ginsburg R N. Environmental relationships of grain size and constituent particles in some South Florida carbonate sediments[J]. AAPG Bulletin, 1956, 40(10): 2384-2427.
- [57] Braithwaite C J R. Settling behaviour related to sieve analysis of skeletal sands[J]. Sedimentology, 1973, 20(2): 251-262.
- [58] 付坤荣,黄理力,祝怡,等. 塔中地区晚奥陶世碳酸盐台缘与 台内沉积差异:定性和定量的碳酸盐岩微相综合分析[J]. 沉积 学报,2018,36(1):101-109. [Fu Kunrong, Huang Lili, Zhu Yi, et al. The depositional diversity between platform margin and platform interior on the Late Ordovician carbonate rimmedplatform of Tazhong area: A case study of qualitative and quantitative integrated microfacies analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(1): 101-109. ]
- [59] 郭芪恒.北京西山寒武系张夏组鲕粒滩沉积模式及成岩演化
   [D].北京:中国石油大学(北京),2020:1-61. [Guo Qiheng.
   Study on sedimentary environment and diagenetic evolution of the Zhangxia Formation, Cambrian, Western hill of Beijing[D].
   Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2020: 1-61. ]
- [60] 柳晶晶,王夏,孟令赞,等.川西北晚三叠世卡尼期浅水碳酸盐生产工厂构成及其转换过程定量化研究[J]. 沉积学报, 2024,42(2):445-465. [Liu Jingjing, Wang Xia, Meng Lingzan, et al. Quantitative study on the composition and evolution of the Late Triassic Carnian shallow-water carbonate factories in northwestern Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(2): 445-465.]

- [61] de Kruijf M, Slootman A, de Boer R A, et al. On the settling of marine carbonate grains: Review and challenges[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 217: 103532.
- [62] Ge Y Z, Lokier S W, Hoffmann R, et al. Composite micrite envelopes in the lagoon of Abu Dhabi and their application for the recognition of ancient firm- to hardgrounds[J]. Marine Geology, 2020, 423: 105141.
- [63] Ge Y Z, Pederson C L, Lokier S W, et al. Late Holocene to recent aragonite - cemented transgressive lag deposits in the Abu Dhabi lagoon and intertidal sabkha[J]. Sedimentology, 2020, 67 (5): 2426-2454.
- [64] Shinn E A. Submarine lithification of Holocene carbonate sediments in the persian gulf[J]. Sedimentology, 1969, 12(1/2): 109-144.
- [65] Paul A, Lokier S W. Holocene marine hardground formation in the Arabian Gulf: Shoreline stabilisation, sea level and early diagenesis in the coastal sabkha of Abu Dhabi[J]. Sedimentary Geology, 2017, 352: 1-13.
- [66] Zhong Y S, Lokier S W, Pederson C L, et al. Carbonate sediment dynamics in the Abu Dhabi lagoon - implications for lowangle inner-to-middle ramp models[J]. Marine Geology, 2023, 465: 107172.
- [67] Ge Y. Extensive early marine seafloor cementation in a modern epeiric sea induced by seawater properties and a shallow redox boundary below the seafloor[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2022, 23(8): e2022GC010444.
- [68] 常晓琳,黄元耕,陈中强,等. 沉积地层中草莓状黄铁矿分析 方法及其在古海洋学上的应用[J]. 沉积学报,2020,38(1): 150-165. [Chang Xiaolin, Huang Yuangeng, Chen Zhongqiang, et al. The microscopic analysis of pyrite framboids and application in paleo-oceanography[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 150-165.]
- [69] Bond D P G, Wignall P B. Pyrite framboid study of marine Permian – Triassic boundary sections: A complex anoxic event and its relationship to contemporaneous mass extinction[J]. Geological Society of America Bulletin, 2010, 122(7/8): 1265-1279.
- [70] Wilkin R T, Barnes H L, Brantley S L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(20): 3897-3912.
- [71] Halfar J, Godinez-Orta L, Mutti M, et al. Nutrient and temperature controls on modern carbonate production: An example from the gulf of California, Mexico[J]. Geology, 2004, 32(3): 213-216.
- [72] Li H, Li F, Li X, et al. Development and collapse of the Early Cambrian shallow-water carbonate factories in the Hannan-Micangshan area, South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, 583: 110665.
- [73] Swart P K. Global synchronous changes in the carbon isotopic composition of carbonate sediments unrelated to changes in the

global carbon cycle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(37): 13741-13745.

- Brigaud B, Vincent B, Carpentier C, et al. Growth and demise of the Jurassic carbonate platform in the intracratonic Paris Basin (France): Interplay of climate change, eustasy and tectonics[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 53: 3-29.
- [75] Franceschi M, Corso J D, Cobianchi M, et al. Tethyan carbonate platform transformations during the Early Jurassic (Sinemurian– Pliensbachian, southern Alps): Comparison with the Late Triassic Carnian pluvial episode[J]. GSA Bulletin, 2019, 131(7/8): 1255-1275.
- [76] Ahm A S C, Bjerrum C J, Blättler C L, et al. Quantifying early marine diagenesis in shallow-water carbonate sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 236: 140-159.
- [77] Blättler C L, Miller N R, Higgins J A. Mg and Ca isotope signatures of authigenic dolomite in siliceous deep-sea sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 419: 32-42.
- [78] Fantle M S, Higgins J. The effects of diagenesis and dolomitization on Ca and Mg isotopes in marine platform carbonates: Implications for the geochemical cycles of Ca and Mg[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 142: 458-481.
- [79] Higgins J A, Blättler C L, Lundstrom E A, et al. Mineralogy, early marine diagenesis, and the chemistry of shallow-water carbonate sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 220: 512-534.
- [80] Sun Y D, Joachimski M M, Wignall P B, et al. Lethally hot temperatures during the Early Triassic greenhouse[J]. Science, 2012, 338(6105): 366-370.
- [81] Chen B, Joachimski M M, Wang X D, et al. Ice volume and paleoclimate history of the Late Paleozoic Ice Age from conodont apatite oxygen isotopes from Naqing (Guizhou, China)
  [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 448: 151-161.
- [82] Yao L, Jiang G Q, Mii H S, et al. Global cooling initiated the Middle-Late Mississippian biodiversity crisis[J]. Global and Planetary Change, 2022, 215: 103852.
- [83] Bernasconi S M, Schmid T W, Grauel A L, et al. Clumpedisotope geochemistry of carbonates: A new tool for the reconstruction of temperature and oxygen isotope composition of seawater[J]. Applied Geochemistry, 2011, 26: S279-S280.
- [84] Eiler J M. "Clumped-isotope" geochemistry: The study of naturally-occurring, multiply-substituted isotopologues[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 262(3/4): 309-327.
- [85] Goldberg S L, Present T M, Finnegan S, et al. A high-resolution record of Early Paleozoic climate[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118 (6): e2013083118.
- [86] Bajnai D, Guo W F, Spötl C, et al. Dual clumped isotope thermometry resolves kinetic biases in carbonate formation tempera-

tures[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 4005.

- [87] Fiebig J, Bajnai D, Löffler N, et al. Combined high-precision  $\Delta_{48}$ and  $\Delta_{47}$  analysis of carbonates[J]. Chemical Geology, 2019, 522: 186-191.
- [88] Swart P K, Lu C J, Moore E W, et al. A calibration equation between Δ<sub>48</sub> values of carbonate and temperature[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2021, 35(17): e9147.
- [89] Fernandez A, Korte C, Ullmann C V, et al. Reconstructing the magnitude of Early Toarcian (Jurassic) warming using the reordered clumped isotope compositions of belemnites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 293: 308-327.
- [90] Riding R, Liang L Y. Geobiology of microbial carbonates: Metazoan and seawater saturation state influences on secular trends during the Phanerozoic[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 219(1/2): 101-115.
- [91] Wang J Y, Tarhan L G, Jacobson A D, et al. The evolution of the marine carbonate factory[J]. Nature, 2023, 615(7951): 265-269.
- [92] Fantle M S, Barnes B D, Lau K V. The role of diagenesis in shaping the geochemistry of the marine carbonate record[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2020, 48(1): 549-583.
- [93] Pederson C L, Ge Y Z, Lokier S W, et al. Seawater chemistry of a modern subtropical 'epeiric' sea: Spatial variability and effects of organic decomposition[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 314: 159-177.
- [94] Amour F, Mutti M, Christ N, et al. Outcrop analog for an oolitic carbonate ramp reservoir: A scale-dependent geologic modeling approach based on stratigraphic hierarchy[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(5): 845-871.
- [95] 段太忠,王光付,廉培庆,等.油气藏定量地质建模方法与应用[M].北京:石油工业出版社,2019:156-202. [Duan Tai-zhong, Wang Guangfu, Lian Peiqing, et al. Quantitative geological modeling of oil and gas reservoirs and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019: 156-202. ]
- [96] Hosford Scheirer A, Liu K Y, Liu J L, et al. Integrating forward stratigraphic modeling with basin and petroleum system modeling[M]//Rotzien J R, Yeilding C A, Sears R A, et al. Deepwater sedimentary systems: Science, discovery and applications. Amsterdam: Elsevier, 2022: 625-672.
- [97] Tella T O, Winterleitner G, Morsilli M, et al. Testing sea-level and carbonate production effects on stratal architecture of a distally steepened carbonate ramp (Upper Miocene, Menorca): A 3D forward modelling approach[J]. Sedimentary Geology, 2022, 441: 106267.
- [98] Al-Salmi M, John C M, Hawie N. Quantitative controls on the regional geometries and heterogeneities of the rayda to Shu'aiba formations (northern Oman) using forward stratigraphic modelling[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 99: 45-60.
- [99] Li X W, Falivene O, Minzoni M, et al. Interactions between sediment production and transport in the geometry of carbonate plat-

forms: Insights from forward modeling of the Great Bank of Guizhou (Early to Middle Triassic), South China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 118: 104416.

- [100] van der Looven T, Winterleitner G, Betzler C, et al. A biotic perspective on the Oligo-Miocene evolution of the Maldives carbonate platform from forward stratigraphic modelling (Indian Ocean) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 145: 105907.
- [101] Liu J L, Liu K Y, Salles T, et al. Factors controlling carbonate slope failures: Insight from stratigraphic forward modelling[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 232: 104108.
- [102] Barrett S J, Webster J M. Holocene evolution of the Great Barrier Reef: Insights from 3D numerical modelling[J]. Sedimentary Geology, 2012, 265-266: 56-71.
- [103] Burgess P M, Pollitt D A. The origins of shallow-water carbonate lithofacies thickness distributions: One-dimensional forward modelling of relative sea-level and production rate control[J]. Sedimentology, 2012, 59(1): 57-80.
- [104] 刘建良,刘可禹. 碳酸盐岩地层完整性分析及其影响因素定量评价:来自地层正演模拟的启示[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2021,51(1):150-158. [Liu Jianliang, Liu Keyu. Estimating stratal completeness of carbonate deposition via process-based stratigraphic forward modeling[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2021, 51(1): 150-158. ]
- [105] 黄渊,段太忠,樊太亮,等. 塔河地区寒武纪碳酸盐岩台地沉积演化史与成因机制:来自地层沉积正演模拟的启示[J]. 石油学报,2022,43(5):617-636. [Huang Yuan, Duan Taizhong, Fan Tailiang, et al. Depositional evolution history and formation mechanism of Cambrian carbonate platforms in Tahe area: Insights from stratigraphic forward modelling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(5): 617-636. ]
- [106] Haq B U. Cretaceous eustasy revisited[J]. Global and Planetary Change, 2014, 113: 44-58.
- [107] Miller K G, Kominz M A, Browning J V, et al. The Phanerozoic record of global sea-level change[J]. Science, 2005, 310(5752): 1293-1298.
- [108] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [109] Miller K G, Browning J V, Schmelz W J, et al. Cenozoic sealevel and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records[J]. Science Advances, 2020, 6(20): eaaz1346.
- [110] Haq B U, Schutter S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. Science, 2008, 322(5898): 64-68.
- [111] Schlager W, Marsal D, van der Geest P A G, et al. Sedimentation rates, observation span, and the problem of spurious correlation[J]. Mathematical Geology, 1998, 30(5): 547-556.
- [112] Bosscher H, Schlager W. Computer simulation of reef growth[J]. Sedimentology, 1992, 39(3): 503-512.

- [113] Montaggioni L F. History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: Development patterns and controlling factors[J]. Earth-Science Reviews, 2005, 71(1/2): 1-75.
- [114] Vecsei A. Fore-reef carbonate production: Development of a regional census-based method and first estimates[J]. Palaeo-geography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 175(1/2/3/4): 185-200.
- [115] Craig H. The measurement of oxygen isotope paleotemperatures[J]. Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures: Consiglio Nazionale delle Richerche, 1965: 161-182.
- [116] Warrlich G M D, Waltham D A, Bosence D W J. Quantifying the sequence stratigraphy and drowning mechanisms of atolls using a new 3-D forward stratigraphic modelling program (CARBONATE 3D)[J]. Basin Research, 2002, 14(3): 379-400.
- [117] Liu J L, Liu K Y, Li C W, et al. Tectono-sedimentary evolution of the Late Ediacaran to Early Cambrian trough in central Sichuan Basin, China: New insights from 3D stratigraphic forward modelling[J]. Precambrian Research, 2020, 350: 105826.
- [118] Enos P. Sedimentary parameters for computer modeling[J]. Bulletin (Kansas Geological Survey), 1991(233): 63-99.
- [119] Bosscher H, Schlager W. Accumulation rates of carbonate platforms[J]. The Journal of Geology, 1993, 101(3): 345-355.
- Seard C, Borgomano J, Granjeon D, et al. Impact of environmental parameters on coral reef development and drowning: Forward modelling of the last deglacial reefs from Tahiti (French Polynesia; IODP expedition #310)[J]. Sedimentology, 2013, 60(6): 1357-1388.
- [121] Sadler P M. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections[J]. The Journal of Geology, 1981, 89 (5): 569-584.
- [122] Bosence D, Waltham D. Computer modeling the internal architecture of carbonate platforms[J]. Geology, 1990, 18(1): 26-30.
- [123] Cantrell D L, Griffiths C M, Hughes G W. New tools and approaches in carbonate reservoir quality prediction: A case history from the Shu'aiba Formation, Saudi Arabia[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2015, 406(1): 401-425.
- [124] Hawie N, Barrois A, Marfisi E, et al. Forward stratigraphic modelling, deterministic approach to improve carbonate heterogeneity prediction; Lower Cretaceous, Abu Dhabi[C]//Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference. Abu Dhabi, UAE: SPE, 2015: D041S077R005.
- [125] Houghton J T. The physics of atmospheres[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- [126] Chalker B E. Simulating light-saturation curves for photosynthesis and calcification by reef-building corals[J]. Marine Biology, 1981, 63(2): 135-141.
- [127] Chalker B E, Barnes D J, Dunlap W C, et al. Light and reefbuilding corals[J]. Interdisciplinary Science Reviews, 1988, 13 (3): 222-237.

- McLaughlin C J, Smith C A, Buddemeier R W, et al. Rivers, runoff, and reefs[J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1/ 2): 191-199.
- [129] Granjeon D, Joseph P. Concepts and applications of A 3-D multiple lithology, diffusive model in stratigraphic modeling[M]// Harbaugh J W, Watney W L, Rankey E C, et al. Numerical experiments in stratigraphy: Recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1999: 197-210.
- [130] Tella T O, Winterleitner G, Mutti M. Investigating the role of differential biotic production on carbonate geometries through stratigraphic forward modelling and sensitivity analysis: The Llucmajor example[J]. Petroleum Geoscience, 2022, 28(2): petgeo2021-053.
- [131] Lanteaume C, Fournier F, Pellerin M, et al. Testing geologic assumptions and scenarios in carbonate exploration: Insights from integrated stratigraphic, diagenetic, and seismic forward modeling[J]. The Leading Edge, 2018, 37(9): 672-680.
- [132] Betzler C, Eberli G P, Lüdmann T, et al. Refinement of Miocene sea level and monsoon events from the sedimentary ar-

chive of the Maldives (Indian Ocean)[J]. Progress in Earth and Planetary Science, 2018, 5(1): 5.

- [133] Merriam D F, Davis J C. Geologic modeling and simulation: Sedimentary systems[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2001.
- Burgess P M. A brief review of developments in stratigraphic forward modelling, 2000-2009[M]//Roberts D G, Bally A W.
   Regional geology and tectonics: Principles of geologic analysis. Amsterdam: Elsevier, 2012: 378-404.
- [135] Huang X, Griffiths C M, Liu J. Recent development in stratigraphic forward modelling and its application in petroleum exploration[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2015, 62(8): 903-919.
- [136] Pitman W C. Relationship between eustacy and stratigraphic sequences of passive margins[J]. GSA Bulletin, 1978, 89(9): 1389-1403.
- [137] Sloss L L. Stratigraphic models in exploration[J]. AAPG Bulletin, 1962, 46(7): 1050-1057.
- [138] Harbaugh J W, Bonham-Carter G. Computer simulation in geology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1970.

### **Detailed Characterization of Carbonate Factories from the Perspective of Quantitative Reconstruction**

# WANG Xia<sup>1,2,3,4,5</sup>, MENG LingZan<sup>1</sup>, LIU JingJing<sup>1</sup>, NING Meng<sup>1,2,3,4</sup>, GE YuZhu<sup>1,2,3,4</sup>, ZENG YuHan<sup>1</sup>, LI Fei<sup>6</sup>, YAN JiaXin<sup>7</sup>

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. Branch of State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

4. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

5. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610218, China

6. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

7. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

**Abstract:** [Significance] Carbonate factories provide the foundation for forming carbonate depositional systems. They are closely related to marine evolution, elemental cycling, and earth surface processes and are an essential part reflecting the evolution of the Earth system. The transition of carbonate factories often coincides with biological and environmental changes. Over geological time, the change of carbonate factories frequently occurs along with biological or environmental crises such as mass extinction or the initiation of new life forms such as life explosion or biological recovery after crisis. Therefore, quantifying the characterization of carbonate factories and their controlling factors is for a deeper understanding of the geological information recorded in carbonate rocks. [Progress] However, most studies on carbonate factories, particularly those from the geological records, are qualitative based on the lithological and microfacies analysis. This study summarizes the research progress in the semi-quantitative to quantitative characterizative characterization of carbonate factories and the comparison of the lithological and microfacies analysis.

terization of carbonate factories, combining the introduction of the methods for forward modelling of sedimentary processes to provide a perspective for the detailed characterization of carbonate factories from a quantitative reconstruction perspective. In addition to providing information on rock components that indicate the ingredients of carbonate factories, statistical analysis of carbonate grains can offer insights into the sedimentary environment by examining parameters such as size, roundness, and sorting. These shape characteristics can serve as quantitative indicators of water energy and grain transportation processes. Elemental geochemical proxies enable the assessment of environmental parameters such as redox conditions, nutrient levels, and climatic conditions. Isotopic geochemical proxies play a crucial role in reconstructing the evolution of environmental factors such as temperature and seawater carbonate saturation. By a combination of multiproxies and sedimentary process modelling, a comprehensive analysis can identify the production process, controlling factors, and evolution of carbonate factories. [Prospects] Based on traditional carbonate sedimentology, studying carbonate factories should deepen our understanding of their controlling factors, particularly the quantitative assessment of factors directly impacting ecosystems. When applying quantitative analysis methods such as sediment transport patterns or hydrodynamic analysis that are established in siliciclastic sedimentary systems, the differences caused by the biogenic nature of certain carbonate sediments compared to siliciclastic sediments need to be considered. Furthermore, models and analysis methods applicable to carbonate grains should be further refined. In addition, when quantitatively evaluating the development of carbonate factories in ancient marine using quantitative carbonate grains statistics or geochemical indicators, there should be a strengthened focus on developing quantitative assessment methods for the level of diagenetic alteration. Further efforts should be directed toward developing and applying in-situ elemental and isotopic testing methods to reduce the impact of diagenesis on geochemical signals. While developing and applying new geochemical proxies for carbonate rocks, the mechanisms of occurrence or fractionation need to be clearly understood to interpret the reflected paleoclimate and paleoenvironmental information accurately. Simultaneously, when studying deep-time evolution and production mechanisms of carbonate factories through sedimentary process forward modelling, it is necessary to consider the applicability of parameters obtained from modern environments in deep-time records and account for the impact of syndepositionalearly diagenesis and chemical evolution of seawater geochemical evolution in the modelling process.

**Key words**: carbonate factory; quantitative analysis; carbonate grains; element geochemistry; isotope geochemistry; stratigraphic forward modelling