

臼齿构造主要成因模式及时空分布意义

陈留勤

(中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 在综述臼齿碳酸盐岩成因研究历程和国内外最新研究成果的基础上, 总结评述了 6 种主要的臼齿构造成因模式, 其核心问题是在元古代正常潮下浅海环境中构建成岩作用早期臼齿构造裂缝形成及等粒微亮晶方解石快速沉淀充填的物理、化学及微生物条件。其中, 气泡扩张裂缝模式、微生物-地球化学模式和同沉积地震脱水模式等具有一定的代表性。臼齿构造多产于正常浅海潮下环境, 并且幕式特点产于前寒武纪地层记录中, 其时空发育特点似乎表明与叠层石发育的不相容性。臼齿碳酸盐岩在中新元古代集中发育的事实可能反映了有利的物理、化学和生物条件在地质历史上的唯一结合。理清臼齿构造成因问题是认识前寒武纪复杂的碳酸盐岩世界的重要线索。

关键词: 臼齿碳酸盐岩; 前寒武纪谜; 臼齿构造; 成因模式

中图分类号: P534. 1; P588. 24⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)03-0245-09

Origin Models of Molar Tooth Structures and Their Temporal Spatial Distribution Significances

CHEN Liu-qin

(School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract Molar tooth carbonate is a category of fine-grained cryptocrystalline mud carbonate in the Precambrian era with molar tooth structure, which are characterized by various morphologic features and different sizes filled with equigranular microspar calcite, and there is no analog in the Phanerozoic. On the basis of the research course analysis and the latest investigation on molar tooth structures, six dominating origin models are outlined. The core issue is how to construct a reasonable physical, chemical and microbial condition for early rapid precipitation and filling of molar tooth cracks in the subtidal shallow marine. Of these, three models of gas bubble and expansion crack origin, microbial-geochemical origin and synsedimentary seismic origin are the most representative ones. Molar tooth structures are episodically located in Precambrian subtidal shallow marine environment, and their temporal and spatial characteristics indicate incompatibility with stromatolites. The fact that molar tooth carbonates were concentrated in the period of Mid- and Neo-Proterozoic may reflect the only combination of favorable physical, chemical and biological conditions in the entire geological history. Understanding the genetic origin of molar tooth structures is a crucial due to the complicated Precambrian carbonate world.

Key words: Molar tooth carbonates; Precambrian conundrum; molar tooth structure; genetic model

0 引言

地质历史时期的沉积作用存在许多明显的特点, 尤其是约占地球全部历史 9/10 的前寒武纪地

球更是充满了众多引人入胜的科学命题^[1], 比如生命的早期演化、雪球地球、盖帽碳酸盐岩、叠层石衰减事件、臼齿构造碳酸盐岩等问题。对这些基础地质问题的研究, 不仅有助于更深刻地认识早期地球

收稿日期: 2008-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40472065); 中国石油化工股份有限公司项目(C0800-07-ZS-164)

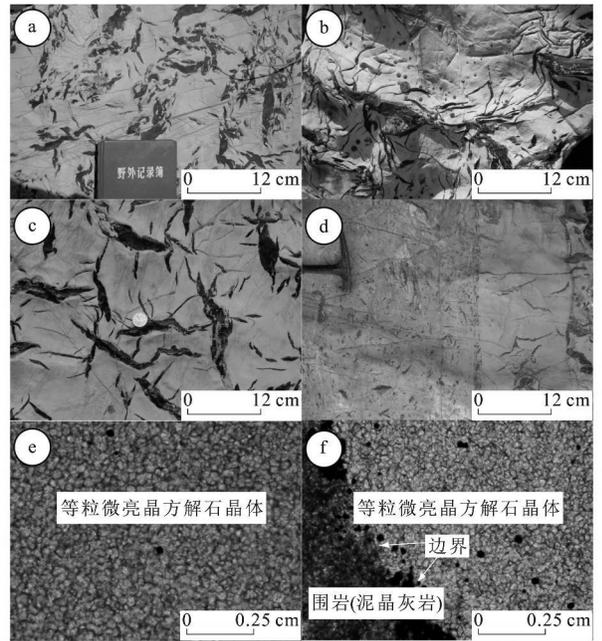
作者简介: 陈留勤(1983-), 男, 甘肃陇南人, 理学博士研究生, 从事沉积学与层序地层学研究。E-mail: liuqinchen@163.com

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系统,而且对于现在全世界极为关注的气候、资源等重大问题的理解也具有重大意义。其中,“臼齿碳酸盐岩(Molar Tooth Carbonates)”是指发育在中—早新元古代地层中的一种特殊沉积事件,也有人把它称为“微亮晶碳酸盐岩”。臼齿碳酸盐岩是指发育有臼齿构造并由等粒微亮晶方解石充填的具肠状和褶皱席状的碳酸盐岩^[2]。在地质文献中 Baumann^[3]首次使用“臼齿(Molar Tooth, MT)”一词描述加拿大—美国边境附近蒙大拿西部的中元古代 Belt 超群中具有类似大象臼齿纹饰构造的碳酸盐岩,这些特殊的构造主要包括分布于白云岩质泥岩中结晶良好的方解石亮晶岩席,它是一个描述性术语,不具成因意义,最重要的特征是充填物性质和早期快速成岩作用。目前,臼齿构造(有人也称之为“臼齿状构造”, Molar Tooth Structure)的形成机制和在新元古代消亡的时间及意义成为众多沉积学家关注的焦点,已经在世界上各主要大洲的 50 多个地区发现了臼齿构造发育的层位^[4-7]。尽管对臼齿构造的研究已经历了一个多世纪,但由于其形成时代古老和缺少可以使用“现实主义原理”的现代类似物,至今臼齿构造的成因机制及其地质意义仍然是一个尚未全面理解的前寒武纪谜^[8]。要解决臼齿构造的成因问题,首先要确定臼齿构造裂隙的形成机理和充填于其中的等粒微亮晶方解石的快速沉淀机制,进而要说明臼齿构造明显的时空分布限制的原因及其与叠层石在时空发育特点上似乎互不相容的动力机制,最终要为臼齿构造在中元古代正常潮下浅海的大量产出提供地质、地球化学模型。因此,在借鉴前人研究成果并结合自己认识的基础上,阐述和讨论了上述臼齿构造成因相关问题。

1 臼齿碳酸盐岩的沉积特征

臼齿构造是一种大量出于中、新元古代潮下浅水泥质灰岩中的具等粒结构的微亮晶方解石集合体。臼齿碳酸盐岩由臼齿构造和细粒沉积物基质两部分组成,二者呈突变接触,边界由难溶有机质和细粒黄铁矿晶体组成。在天津蓟县剖面中元古代不发育叠层石的高于庄组第三段均一石灰岩层面上发育的臼齿构造呈现灰黑色或黑色,比灰色或灰白色的基质要暗,但显微镜下却比基质颜色浅(图 1)。臼齿构造和基质在组分和结构上有明显的区别。基质岩石一般为泥晶灰岩、粉砂质灰岩、泥



a~d 为臼齿构造的野外露头照片,臼齿构造显示为大级别至小级别带状以及发丝状;b 中与臼齿构造共生的球状物可能为宏观藻类化石;d 显示了臼齿构造与围岩(泥晶灰岩)之间所发育的富集黄铁矿晶体的边界;d 中有的臼齿构造受到水流外力作用改造而成为内碎屑充填在冲刷面之上,显示其早期成岩作用;e 为臼齿构造内部充填的等粒微亮晶方解石晶体;f 显示了充填等粒微亮晶方解石晶体的臼齿构造与围岩(泥晶灰岩)之间发育的富集黄铁矿晶体的边界

图 1 天津蓟县剖面高于庄组臼齿构造的宏观和微观特征

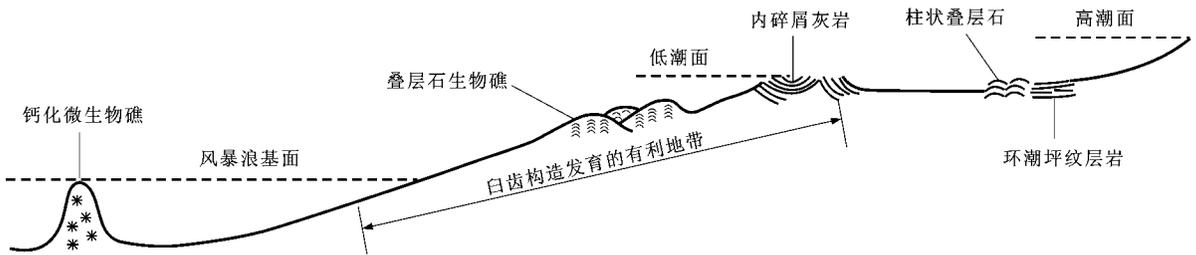
Fig. 1 Macroscopic and Microscopic Characteristics of Molar Tooth Structures from Gaoyuzhuang Formation at Jixian Section, Tianjin

灰岩等细粒沉积,常含黏土矿物和粉砂颗粒,臼齿构造内部则为较纯净的均匀等粒方解石微亮晶,粒度一般在 $5 \sim 15 \mu\text{m}$,不具有典型的胶结物特征,有时显示出注入沉积物充填^[9]或内部流体流动^[10-11]的证据;基质化学组分 Ca、Mg、Al、K、Cr 等峰值均突出,臼齿构造仅保存 Si 和 Ca 两组峰值。另外,在臼齿构造中发现了超微生物化石遗迹^[5-7]。复杂而不规则的 MT 构造大体上可以分为:①大级别带状;②小级别带状;③发丝状;④复杂席状、板片状;⑤斑点状。虽然在剖面露头和一般显微镜切片观察中表明臼齿构造是各自分开的,然而,Long^[12]利用 X 射线计算断层照相法(X-ray computed tomography, CT)对加拿大不列颠哥伦比亚省北部古元古代 George 组臼齿碳酸盐岩的研究首次证明了臼齿构造裂隙在形成之初是互相联接的,而且充填的亮晶方解石的结晶作用是在裂隙系统的许多局部

中心开始的。当臼齿构造仍留在原处, 周围沉积物差异压实使带状臼齿构造褶皱弯曲或断裂甚至破碎改造为臼齿构造内碎屑(图 1d), 这种常见的差异压实和侵蚀作用表明, 臼齿构造的形成接近于早期成岩过程中的沉积物—水界面^[2, 9, 13]。这种特殊的沉积构造有可能成为探索前寒武纪浅水潮下环境中沉积物流变学和化学特征的重要线索, 也构成了缺少化石的前寒武纪地层记录的潮下浅海相标志。

臼齿构造碳酸盐岩主要发育于正常浅海潮下环境。元古代时期广大较深浅海泥晶碳酸盐沉积物内广泛发育与臼齿构造有关的非营光合粘合作用蓝细菌生态系, 与潮坪环境营光合粘合作用的蓝绿藻类叠层石生态系明显不同^[7]。臼齿构造与叠层石几乎不出现在同一层位, 通常总是发育在比叠层石系列更深的水体和软泥环境中^[2](图 2)。天津

蓟县剖面中元古代高于庄组第三段的臼齿构造主要发育于中至深缓坡泥晶灰岩地层中, 从臼齿构造经纹理化构造再到叠层石构成了一个向上变浅的沉积序列(图 3)。臼齿构造和叠层石作为前寒武纪两种特殊的沉积构造类型, 二者在时空发育方式上表现出明显的不相容性。这样一来, 前寒武纪至少存在 2 个海洋演化生物群, 即由元古代叠层石所代表的“第一个海洋演化生物群(The first marine evolutionary biota)”^[14] 和与臼齿构造关系密切的“地下超微生物花园”^[7], 同时也表明了地球上无处不在的微生物世界对三大沉积体系(碳酸盐岩、碎屑岩和蒸发岩)存在重大的沉积动力学影响, 并与物理作用(侵蚀、变形、沉积等)和化学作用(蒸发、溶解等)一起在沉积岩中形成了比较特殊的微生物沉积构造^[15]。



引自文献 [2]

图 2 前寒武纪臼齿构造分布的古地理环境

Fig. 2 Range of Paleoenvironment in Which Molar Tooth Structures Occur in the Precambrian

2 臼齿构造主要成因模式

对于这种主要发育于前寒武纪潮下浅海细粒碳酸盐岩地层中的特殊沉积构造, 国内外沉积学家已经从不同角度提出了多种成因解释, 每种成因模式可能都对前寒武纪沉积层序的沉积物流变学、碳酸盐岩和有机地球化学、相分析、构造古地理重建具有重要意义。因此, 约束臼齿构造成因将会对前寒武纪沉积环境产生深刻地认识。首先, 臼齿构造裂缝的形成和微亮晶充填是两个相对独立发生的过程, 前者要求特殊的沉积学和流变学条件, 后者则要求特殊的地层孔隙水和地球化学条件。当这两方面的条件在同一个时空单元内同时得到满足时, 在细粒碳酸盐岩地层中才有可能形成并保存为今天可以观察到的臼齿构造。解释臼齿构造的关键在于如何理解充填于其中的微亮晶方解石, 臼齿构造通常组成单层的 50% 和一个组的 5% ~ 25%^[2]。如此大量的臼齿构造碳酸钙是如何在沉积

物中快速沉淀的呢? 不论是哪一种成因模式, 都不可避免地要回答以下至少 6 个问题:

(1) 臼齿构造一般都具有截然可辨的边界和明确的产状及大小, 边界富含有机质和微小的黄铁矿晶体。

(2) 由外动力地质作用先形成裂隙(缝), 然后在地层孔隙溶液中方解石晶体快速沉淀充填并固化。

(3) 臼齿构造中连续充填着细粒均匀等粒的方解石微亮晶集合体。

(4) 臼齿构造是早期成岩作用的产物, 后期可以受到压实和破坏而成为内碎屑富集在冲刷面之上。

(5) 除个别例外, 臼齿构造在全球范围内分布具有严格的时空限制。

(6) 在形成之初, 部分臼齿构造裂缝系统可能像 Bishop 等^[9] 元古代的例子一样是相互沟通的。

2.1 蒸发岩取代模式

Eby^[16] 认为, 臼齿构造是方解石化结核状及充填孔隙的蒸发岩, 可能是 CaSO_4 ; 所有起初由蒸发

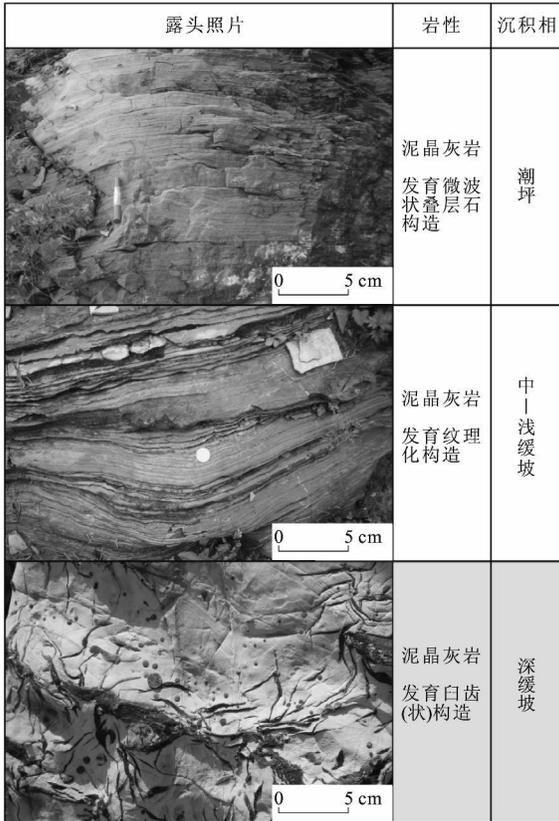


图 3 天津蓟县剖面中元古代高于庄组第三段臼齿构造碳酸盐岩的发育层位

Fig. 3 Horizon of Molar Tooth Carbonate in the Third Member of Gaoyuzhuang Formation of Mesoproterozoic at Jixian Section, Tianjin

岩矿物组成的垂直带状、水平带状、斑点状和豆荚状臼齿构造后来都被均一方解石微亮晶所取代。这一假说没有得到后来研究者的支持,因为没有哪种蒸发岩表现为褶皱脉状形态,在发育有臼齿构造的沉积岩序列中找不到硬石膏结核、板条或底部生长石膏,蒸发岩取代也不能解释脱水作用和液化作用。Bishop 等^[10]称其为“站不住脚的”(Untenable)论点,因为臼齿构造缺乏残余蒸发岩矿物,其结晶形态与蒸发岩矿物不协调,而且臼齿构造形成于潮下浅水环境已成为共识,所以与暴露界面和蒸发岩无关。

2.2 微生物-地球化学成因模式

孟祥化等^[5,7]在前人研究和 IGCP447 项目所得研究成果的基础上,认为臼齿构造是一种不同于造叠层石的非营光合粘结作用的蓝细菌、菌类微生物(“地下超微生物花园”)生命活动的结果,微亮晶可能是由于微生物光合自养排气(如 CO₂、H₂S、烷烃等)等使碳酸盐软泥膨胀形成裂隙,微生物作用

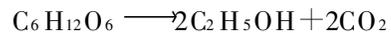
使 CaCO₃ 软泥的水介质发生从酸性到碱性的转变而引起微亮晶沉淀形成臼齿构造。支持该论点的证据有:

- (1)臼齿构造与叠层石从不出现在同一层位。
- (2)臼齿构造形成于构造背景稳定、温暖气候条件下的浅水斜坡环境,适宜光合自养生物群落繁盛。
- (3)臼齿构造碳酸盐岩发育和消失的时限与地球上生物演化阶段相一致,也与古海洋化学性质的变化密切相关。
- (4)在臼齿构造中发现了鞘状蓝青菌^[17]和超微生物化石以及丰富的生物标志物。
- (5)在臼齿构造发育的地层中,通常都含有少量草莓状黄铁矿,它与有机物在还原条件下的分解作用有关。
- (6)臼齿构造中含有的少量锡元素可能与有机质和微生物的参与有关。

(7)C、O 同位素分析结果也支持臼齿构造碳酸盐岩的有机质成因。这种模式面临的难题是如何科学有效地在世界范围内从臼齿构造中寻找更多可信的生命活动痕迹,如果形成臼齿构造的微生物群落具有时间演化涵义,则可利用臼齿构造在缺乏后生动物化石的前寒武纪地层中进行地层划分对比工作,从而似乎充满了新的希望。

2.3 气泡扩张裂缝模式

Furniss 等^[17]和 Pollock 等^[18]在实验室通过把石膏、黏土、水、糖和酵母加入到一个玻璃缸(90 cm 长,30 cm 高)中混合数天到数周,使酵母代谢糖产生 CO₂ 气体:



首先在泥浆中产生形似 Belt 超群中斑点状臼齿构造的气泡,气泡牵引水向上运动,泥浆变硬;石膏封闭泥浆表面导致气体无法排出,最终形成垂直和水平的扩张裂缝,把 Na₂CO₃ 和 CaCl₂ 溶液混合可在先前已经形成的裂缝中沉淀出微亮晶方解石。Furniss 等^[17]认为,有机质分解产生由 CO₂、CH₄ 和 H₂S 等组成的气体混合物充填于块状碳酸盐地层中,当沉积物表面被微生物席封闭时易于形成气泡裂缝,CO₂ 和 H₂S 来自还原硫酸盐细菌对石膏的分解,其中 CO₂ 进一步生成沉淀成为臼齿构造,而 H₂S 则形成黄铁矿。更为特殊的是,Long^[12]在研究加拿大古元古代 George 组富含有机质但不含黄铁矿的灰岩中发现,臼齿构造形成于溶解氧的浓

度低于 $0.5 \text{ mL O}_2 (\text{L H}_2\text{O})^{-1}$ 的硝酸还原作用区, 在没有周期负载干扰的条件下, 在 *Dysaerobic* 细菌的胞外聚合物 (EPS) 内发生碳酸盐结晶作用, 当宿主沉积物孔隙压力由于周期负载而增大时, 含有 EPS 的孔隙流体被注入新形成的裂隙, 从而发生白齿碳酸盐岩的快速沉淀。按照 James 等^[2] 的假设, 元古代时期广大正常浅海底被微生物席所覆盖, 微生物席柔软并抗水流改造, 最重要的是它对沉积物—水界面之下的尚未固结成岩的沉积物起到了保护作用, 由有机质分解产生的气体可能在泥质沉积物内产生类似白齿构造裂隙。一旦过饱和和海水渗入裂隙, 方解石便会快速沉淀。该试验在很短的时间内就产生了带状和斑点状白齿构造的类似物, 似乎成功地再现了白齿构造裂隙的形成过程及充填于其中的等粒微亮晶方解石的沉淀作用, Frank 等^[8] 也同意这种解释。但是, 同位素数据却并不支持在白齿构造形成过程中有 H_2S 和 CH_4 生成, 所以气体的组分仍然没有定论。另外, Pratt^[9] 指出该模式不能解释白齿构造及围岩中的液化沉积物充填及软沉积物和脆性变形现象。

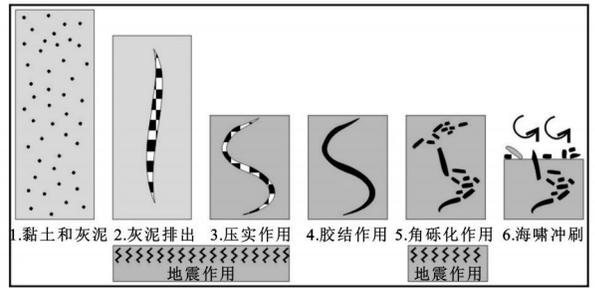
2.4 同沉积地震活动模式

根据 Pratt^[9, 19] 的地震脱水作用模式, 会发生以下作用过程:

(1) 同沉积期的地震作用使海底黏土或灰泥等已胶结的沉积物发生脱水、收缩、产生裂缝。

(2) 从基质中分离出来的均匀等粒灰泥颗粒充填于裂缝中, 在压力和剪力作用下使灰泥充填的裂隙变形为肠状褶皱。

(3) 这些被充填的裂隙在水平和垂直方向上发生重叠甚至断裂形成白齿构造 (图 4)。乔秀夫等^[20-21] 也认为白齿构造碳酸盐岩是地震成因的液化脉, 称之为震积岩, 并据此建立了碳酸盐岩振动液化序列。这种地震解释认为裂隙是由周期负载产生的, 因此白齿构造可能是风暴作用的产物^[10-13], 这样也就容易解释它们主要发育于风暴浪基面之上的缓坡环境以及它们经常与丘状交错层理共生的现象^[2, 10, 22]。但是 Furniss 等^[17] 明确指出, 发育白齿构造的岩层内并没有发现地震成因的变形构造, 如张性或压性断层、膝折褶皱及不协调的软沉积物变形褶皱。与此相似, 在蓟县剖面高于庄组发育白齿构造的层位也没有找到这些地震成因的特征构造。孟祥化等^[6] 同意 Smith^[23] 的观点: “它们 (白齿构造发生的构造变形) 是由于泥晶纹层



引自文献 [9]

图 4 元古代黏土质灰泥中白齿构造的地震作用形成模式

Fig. 4 Model for Formation of Molar Tooth Structure by Seismic Shaking of Proterozoic Aragillaceous Lime Mud

自身差异, 如含砂—含泥量不同的沉积物的含水性、可塑性、黏性等性质差异造成的”, 而与震积岩没有直接联系。

2.5 地表干燥脱水裂缝

Knoll^[24] 首先假定白齿构造形成于地表附近的干燥作用, Winston^[25] 则将其解释为层间干燥裂缝。然而, 白齿构造在纵向和横向上的褶皱变形和破碎外形、白齿构造充填的是等粒微亮晶方解石而不是沉积物以及缺少向上开口的 V 字型干裂等特征的暴露构造等事实, 都不支持白齿构造的地表脱水作用成因。因此, 这种成因模式与前述蒸发岩取代模式在近来研究中已逐渐被抛弃了。

2.6 风暴和波浪引起的流体流动模式

Bishop 等^[10-11] 在南非新太古代 Transvaal 超群 Monteville 组中发现了迄今为止世界上最古老的白齿构造。微亮晶方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 表明大多数 CO_3^{2-} 来自海水, 从质量平衡考虑要求孔隙水中比较高的 Ca^{2+} 含量和充分的流体流动。而微亮晶方解石中的交错纹层和白齿构造受风暴影响的证据表明, 过路风暴和波浪引起的孔隙压力变化驱动流体流动, 白齿构造裂隙发育的交织网络允许海水渗透到未压实的沉积物表面 1 m 以下。当海水和孔隙水混合时微亮晶碳酸盐开始成核, 最终核心快速生长, 产生了变硬的胶结微亮晶碳酸盐岩。这一模式要求沉积物的性质有利于气体扩张作用下产生的带状和点斑状裂隙网络的稳固发育, 然而裂隙仍然有可能是脱水收缩或地震引起的。Monteville 组的白齿构造形成于风暴浪基面之上, 宿主岩石是夹砂岩层的页岩, 这个实例表明产生白齿构造必需的条件在前寒武纪大多数时间都是存在的, 而且也暗示了产生白齿构造裂隙和快速沉淀微亮晶方解

石机制的长期存在。这一结论可能刚好印证了中新元古代微生物席大面积覆盖海底的生态环境长期存在^[2]，而且可能向前延续到新太古代。Long^[12]对白齿构造灰岩的 CT 照相证明，白齿构造裂缝系统最初形成时相互沟通的结论也支持这种成因。

目前看来，白齿构造成因模式可能与白云岩成因模式一样复杂，不存在统一的成因机制，只能针对典型沉积记录进行详细研究后得出某类白齿构造的成因模式，以上综述的几种模式中微生物地球化学成因和波浪引起的流体流动模式具有较大的优势。从新太古代到新元古代末期，随着海洋化学条件发生变化，白齿构造的成因模式可能也具有某种变化趋势。正如 Pollock 等^[18]所言，不论白齿碳酸盐岩的形成机制是什么，宿主地层的流变学特征和裂缝的形成过程在影响最终沉积构造的形态方面起着非常重要的作用。也需要像 Furniss 等^[17]那样具有创新精神的地质学家进行实验设计和研究，把实验结果与野外露头观察对比之后给出一种合理的解释，或者像 Long^[12]一样大胆地把其他领域的实验技术(CT 成像技术)应用于这些奇形怪状的沉积构造的研究而得到常规方法不能实现的结果，这可能才是最好地解决途径。

3 白齿构造发育的时限性及消失原因

一般认为白齿构造的主要发育时限为 1 900 ~ 550 Ma，在更老或更新的地层中零星产出^[2, 9, 26]。然而白齿构造主要的分布时限表明，这种构造并不是许多学者所认为的那样连续分布在中元古代至新元古代地层中，而是与蓝藻菌钙化作用幕有关，呈幕式发育的特点分布在新太古代至新元古代地层中^[27-28]。前寒武纪白齿构造的产出时代可大致推测并划分为 6 个阶段，而且白齿构造的产出多数总是在叠层石衰减之后，继而形成白齿构造作用幕^[29](表 1)。

解释白齿构造在显生宙地层记录中鲜有发现的有机因素是寒武纪早期生物扰动作用的出现和钙质后生动物的多样化。首先，钙化骨骼出现在晚元古代，约在 550 Ma 以前，具骨骼的无脊椎动物和钙化微生物在晚元古代末期特别是寒武纪时期变得多种多样，数量逐渐增加。结果，钙质碳酸盐骨骼代替了碳酸盐泥沉淀，以致减少并最终取代了具白齿微亮晶充填特征的碳酸盐沉淀。其次，生物扰

表 1 前寒武纪白齿构造碳酸岩作用幕与叠层石衰减事件之间的关系

Tab. 1 Relationship between Molar-tooth Carbonates Episodes and Stromatolite Declines in Precambrian

白齿构造作用幕	地质年代/ Ma	产出地点及与叠层石衰减事件的对应关系
VI	675	中国东部胶辽徐淮地区发育白齿构造且贫乏叠层石 ^[30] ，与 675 Ma 左右的叠层石衰减事件存在联系 ^[29]
V	1 000	加拿大 Little Dal 群发育白齿构造 ^[31] ，与该时间段全球大规模叠层石衰减事件相对应
IV	1 250	加拿大东北部巴芬岛 Bylot 超群 Victor Bay 组中发育白齿构造 ^[17] 。1 250 Ma 左右发生叠层石衰减事件
III	1 450	天津蓟县高于庄组第三段非叠层石碳酸岩序列，发育大量白齿状构造 ^[32]
II	2 000	极地地区西部 Goulburn 超群中 Kimenrot 群发育白齿构造且贫乏叠层石，该白齿构造发育幕是发生在 2 000 Ma 左右叠层石衰减事件的沉积响应 ^[32]
I	2 600	南非新太古代超群中的白齿构造 ^[10-11]

动作用的增强可能是白齿构造衰退的另一个主要原因，生物扰动将破坏可能先于这个时间沉积的大量覆盖海底的微亮晶碳酸盐沉淀。这种后生动物影响假设由来已久，但是从 750 Ma 叠层石和白齿构造基本同时大量衰减以及只有在 550 Ma 之后后生动物扰动作用才能在地质记录中辨认的事实，似乎成了这一假设最大的挑战。所以，Shields^[26]提出海洋化学变化引起浅海潮下陆架 CaCO₃ 成岩作用的降低来解释叠层石和白齿构造在 750 Ma 附近的大规模衰退事件。但是，叠层石在显生宙和今天的局限环境仍有发现，而且在晚泥盆世、晚二叠世生物绝灭事件后出现了叠层石形态种的增加，而白齿构造在显生宙似乎就彻底消亡了。如果二者的形成机制与不同微生物群落有联系的话，与白齿构造相关的非营光合黏结作用的蓝细菌生态系在新元古代末期就灭绝了，而造叠层石的营光合作用的蓝绿藻则从元古宙正常浅海环境向岸线后退至今天的一些局限环境，如巴哈马鲨鱼湾和澳大利亚的 Lee Stocking 岛^[33]。

所以，白齿构造在新元古代末期的消亡可能反映了以下因素的耦合效应：

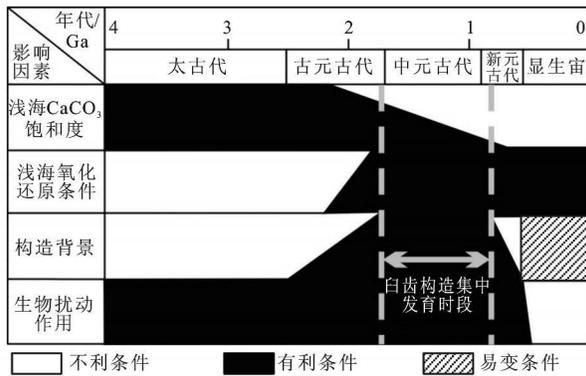
(1) 晚新元古代的裂谷作用和由快速沉降及陆源输入量的增加所导致的浅水碳酸盐环境的减少^[34]。

(2) 显生宙一开始与无机碳在陆表海碳酸盐岩

中的长期存储有关的 CaCO_3 饱和度水平^[35]。

(3) 全球 Sturtian 和 Marinoan 雪球事件 (Snowball) 的发生和海洋环境突变^[9]。

总之, 白齿构造的发育历史反映了与全球海洋系统的普遍联系。整个地质历史时期, 浅海碳酸钙不饱和度、氧化还原条件、海底构造背景和生物扰动等因素对白齿构造的发育发挥着不同的作用, 而只有到了中—新元古代以上这些条件似乎才达成了历史上唯一的“协议”, 从而满足了白齿构造发育的物理、化学和生物条件 (图 5)。



引自文献 [8]

图 5 白齿构造发育代表了地史中各种有利因素的唯一结合

Fig. 5 Molar Tooth Development is Consistent with Combination of Different Favorable Factors Through Geological Time

白齿构造与叠层石几乎不出现在同一层位, 通常总是发育在比叠层石系列更深的水体和软泥环境中^[2] (图 2、3)。后生动物直到新元古代末期才出现, 在此之前叠层石及白齿构造在丰度上都发生过重要波动, 所以用后生动物竞争机制来解释前寒武纪的微生物碳酸盐岩问题是不全面的^[28, 32, 36]。研究前寒武纪碳酸盐岩应把重点从后生动物竞争作用转移到环境变化因素上来, 环境变化才可能是前寒武纪微生物碳酸盐岩兴衰最为主要的因素。

Pratt^[19, 37] 认为, 新元古代以后微生物群逐渐多样化, 有机体的束缚作用使得白齿构造从此消失。许多学者都持有类似的观点, 认为随着后生动物的多样化, 生物扰动作用的增强是白齿构造消失的直接原因, 因而把白齿构造在显生宙地层记录中的缺乏解释为对后生动物出现及成功演化的响应。Shields^[29] 认为, 白齿构造特有的快速石化作用在现今潮下带环境中未曾发现。白齿构造形成于成岩早期, 其形成条件必须有利于方解石迅速沉淀。

地质历史时期古海洋海水化学周期性变化, 形成方解石海和文石海交替现象^[38]。在过饱和的海水中有利于充填白齿状裂缝的微亮晶方解石的形成, 所以在“方解石海”时期似乎更有利于形成白齿构造, 较高丰度的白齿构造都产于方解石海时期, 海水化学条件与白齿构造发育似乎有一定的联系。孟祥化等^[6] 认为, 白齿构造碳酸盐岩最终消失与全球雪球事件有关。显生宙潮下相沉积中不易保存有机质, 可能才是白齿构造碳酸盐岩在显生宙不发育的关键^[31]。因为高含氧量不利于有机质保存, 从而不会发育有机质裂解形成的气泡与膨胀迁移作用, 该作用正是形成白齿构造的关键作用。

4 讨论与展望

白齿构造的成因问题不仅涉及沉积学、地球化学、物理流变学, 而且还涉及前寒武纪尤其是中新元古代地球早期海洋化学和微生物演化等问题, 不同地区、不同时代的白齿构造可能具有不同的成因模式, 因为产出地层年代古老而没有可以对比的现代类似物, 所以白齿构造的成因问题是一个涉及学科广泛和长期存在争议的科学问题。现代实验分析技术, 如室内扫描电镜、投射电镜和地球化学分析、现代物理化学实验模拟、CT 照相及在白齿构造中再发现可靠的微生物化石证据, 将为解开这个前寒武纪百年之谜提供重要的线索。

目前, 对白齿构造成因的相关问题已经取得了一些共识:

(1) 大量产出于中新元古代正常潮下浅海碳酸盐岩为主的地层中, 在中元古代以前和显生宙地层记录中局部零星产出。

(2) 白齿构造为早期成岩作用的产物, 与围岩边界清晰, 形态可以呈现从条带状到斑点状, 其中充填为等粒微亮晶方解石, 白齿构造可在后期成岩作用过程中被压弯褶皱变形, 甚至破碎为内碎屑。

(3) 白齿构造特殊的时空分布限制性可能代表了促使浅海碳酸盐沉淀的地球化学条件、适合碳酸盐泥堆积的浅水条件和生物扰动作用的缺乏等一系列环境因素以及有利因素在地质历史中的唯一结合, 白齿构造在显生宙的缺乏可能暗示了这些特殊条件的变化和潮下浅海后生动物骨骼化作用和扰动作用。

(4) 从已提出的成因模式上看, 对白齿构造的宏观特征和微观特征的研究已经积累了相当丰富

的资料,目前至少已提出了 6 种成因模式,其中以微生物生命活动、同沉积地震活动、波浪和风暴引起的流体流动等模式似乎最具优势。而从新太古代到新元古代末期随着海洋化学条件的变化,白齿构造的成因模式是否具有相应的时间演化特点还需要进一步深入研究。

(5)白齿构造仅出现在前寒武地层中,是一种具有明显时限特征的特殊沉积构造类型,可能与叠层石、皱饰构造、微生物席砂质碎片、变余波痕等都应该归入 Petti john 等^[39]经典原生沉积构造分类中而成为第五类原生沉积构造——微生物形成的沉积构造(MISS)^[40-41]。

(6)白齿构造并不是连续分布于中新元古代地层记录中,而是表现为与蓝藻菌钙化作用幕有关,呈幕式分布于新太古代至新元古代,根据其在地层记录中相对较高的产出丰度可以分为 6 个幕,大致分别为 2 600、2 000、1 450、1 250、1 000、675 Ma。

白齿构造碳酸盐岩是一种具有全球性意义的沉积碳酸盐岩类,在地史中分布时限长(2 600 ~ 650 Ma),发育高峰期持续约 800 Ma,在中新元古代特别是早新元古代潮下浅水环境的大量发育,构成了地球历史中从无机碳酸盐文石和火山灰沉积作用期走向显生宙生物成因碳酸盐岩沉积期的桥梁。地史时期碳酸盐沉积物似乎经历了从太古代—古元古代大量海底沉淀,到中—新元古代白齿构造泥质碳酸盐沉积,再到显生宙生物成因碳酸盐岩的三大演化阶段。在这个大的演化过程框架内,如何把碳酸盐沉积作用与大气圈和古海洋环境的长期变化结合起来研究,可能是未来碳酸盐沉积学家最感兴趣的科学命题之一。

野外工作和成文中,得到了中国地质大学(北京)梅冥相教授的指导帮助,博士研究生刘智荣、段凯波以及硕士研究生霍荣、苏玲和王燕等参加了野外工作,谨致谢忱。

参考文献:

[1] 孙 枢. 中国沉积学的今后发展:若干思考与建议[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 3-10.
 [2] James N P, Narbonne G M, Sherman A G. Molar-tooth Carbonates: Shallow Subtidal Facies of the Mid- to Late Proterozoic[J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68(5): 716-722.
 [3] Bauerman H. Report on the Geology of the Country near the Forty-ninth Parallel of North Latitude West of the Rocky

Mountains[R]. Ottawa: Geological and Natural History Survey of Canada, 1885.

[4] 葛 铭, 孟祥化, 旷红伟, 等. 微亮晶(白齿)碳酸盐岩: 21 世纪全球地学研究的新热点[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 81-89.
 [5] 孟祥化, 葛 铭. 中朝板块层序·事件·演化——天文周期的沉积响应和意义[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 [6] 孟祥化, 葛 铭, 旷红伟, 等. 微亮晶(白齿)碳酸盐成因及其在元古宙地球演化中的意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2133-2143.
 [7] 孟祥化, 葛 铭. 中朝板块新元古代微亮晶碳酸岩中超微生物化石群的发现及其地质学意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(增刊): 24-32.
 [8] Frank T D, Lyons T W. “Molar-tooth” Structures: a Geochemical Perspective on a Proterozoic Enigma[J]. Geology, 1998, 26(8): 683-686.
 [9] Pratt B R. Molar-tooth Structure in Proterozoic Carbonate Rocks: Origin from Synsedimentary Earthquakes, and Implications for the Nature and Evolution of Basins and Marine Sediment[J]. GSA Bulletin, 1998, 110(8): 1028-1045.
 [10] Bishop J W, Sumner D Y, Huerta N J. Molar Tooth Structures of the Neoproterozoic Monteville Formation, Transvaal Supergroup, South Africa II: a Wave-induced Fluid Flow Model [J]. Sedimentology, 2006, 53(5): 1069-1082.
 [11] Bishop J W, Sumner D Y. Molar Tooth Structures of the Neoproterozoic Monteville Formation, Transvaal Supergroup, South Africa I: Constraints on Microcrystalline CaCO₃ Precipitation[J]. Sedimentology, 2006, 53(5): 1049-1068.
 [12] Long D G F. Tomographic Study of Paleoproterozoic Carbonates as Key to Understanding the Formation of Molar-tooth Structure[J]. Gondwana Research, 2007, 12(4): 566-570.
 [13] Fairchild I J, Einsele G, Song T R. Possible Seismic Origin of Molar Tooth Structures in Neoproterozoic Carbonate Ramp Deposits, North China[J]. Sedimentology, 1997, 44(4): 611-636.
 [14] Awramik S M, Sprinkle J. Proterozoic Stromatolites: the First Marine Evolutionary Biota[J]. Historical Biology, 1999, 13(4): 241-253.
 [15] Noffke N, Gerdes G, Klenke T. Benthic Cyanobacteria and Their Influence on the Sedimentary Dynamics of Peritidal Depositional Systems (Siliclastic, Evaporitic Salty, and Evaporitic Carbonatic)[J]. Earth Science Reviews, 2003, 62(1/2): 163-176.
 [16] Eby D E. Carbonate Sedimentation Under Elevated Salinities and Implication for the Origin of “MT” Structure in the Middle Belt Interval(Late Proterozoic), Northwestern Montana [J]. Geological Society of America, 1975, 7: 1062-1063.
 [17] Furniss G, Rittle J F, Winston D. Gas Bubble and Expansion Crack Origin of “Molar-tooth” Calcite Structures in the Middle Proterozoic Belt Supergroup, Western Montana[J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68(1): 104-114.

- [18] Pollock M D, Kah L C, Bartley J K. Morphology of Molar-tooth Structures in Precambrian Carbonates: Influence of Substrate Rheology and Implications for Genesis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(2): 310-323.
- [19] Pratt B R. Syneresis Cracks: Subaqueous Shrinkage in Argillaceous Sediments Caused by Earthquake-induced Dewatering [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 117(1/2): 1-10.
- [20] 乔秀夫, 高林志. 华北中新元古代及早古生代地震灾害事件及与 Rodinia 的关系[J]. *科学通报*, 1999, 44(16): 1753-1758.
- [21] 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 等. 碳酸盐岩振动液化地震序列[J]. *地质学报*, 1994, 68(1): 16-34.
- [22] Sheman A G, Narbonne G M, James N P. Anatomy of a Cyclically Packaged Mesoproterozoic Carbonate Ramp in Northern Canada[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 139(3/4): 171-203.
- [23] Smith A G. The Origin and Deformation of Some "Molar-tooth" Structures in the Precambrian Belt-purcell Supergroup[J]. *Journal of Geology*, 1968, 76(4): 426-443.
- [24] Knoll A H. Microbiotas of the Late Precambrian Hunnberg Formation, Nordaustlandet, Svalbard[J]. *Journal of Paleontology*, 1984, 58(1): 131-162.
- [25] Winston D. Evidence for Intracratonic, Fluvial and Lacustrine Settings of Middle to Late Proterozoic Basins of Western USA [C]. //Gower C F, Rivers T, Ryan B. Mid-proterozoic Laurentia-baltica. St John's; Geological Association of Canada, 1990: 535-564.
- [26] Shields G A. "Molar-tooth Microspar": a Chemical Explanation for Its Disappearance ~ 750 Ma[J]. *Terra Nova*, 2002, 14(2): 108-113.
- [27] 曹瑞骥, 袁训来. 叠层石[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.
- [28] 陈留勤. 地史中叠层石衰减机制综述[J]. *新疆地质*, 2007, 25(4): 365-367.
- [29] 梅冥相. 前寒武纪“白齿状构造谜”的一些认识: 来自天津蓟县剖面高于庄组的信息[J]. *古地理学报*, 2007, 9(6): 597-610.
- [30] 乔秀夫, 高林志, 彭阳. 古庐带新元古界: 灾变·层序·生物[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [31] Hofmann H J, Aitken J D. Precambrian Biota from the Little Dal Group, Mackenzie Mountains, Northwestern Canada[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1979, 16: 150-166.
- [32] 梅冥相. 燕山地区中元古代高于庄组非叠层石碳酸盐岩序列的沉积特征及其重要意义[J]. *现代地质*, 2007, 21(1): 45-56.
- [33] Riding R. Microbial Carbonate Abundance Compared with Fluctuations in Metazoan Diversity over Geological Time[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185(3/4): 229-238.
- [34] Grotzinger J P. Facies and Evolution of Precambrian Carbonate Depositional Systems: Emergence of the Modern Platform Archetype [C]. //Crevello P D, Wilson J L, Sarg J F, et al. Controls on Carbonate Platform and Basin Development. Darlington; Society for Sedimentary Geology, 1989: 79-106.
- [35] Grotzinger J P, James N P. Precambrian Carbonates: Evolution of Understanding [C]. //Grotzinger J P, James N P. Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian World. Darlington; Society for Sedimentary Geology, 2000: 3-22.
- [36] Riding R. Stromatolite Decline: a Brief Reassessment[J]. *Facies*, 1997, 36: 227-230.
- [37] Pratt B R. Oceanography, Bathymetry and Syndepositional Tectonics of a Precambrian Intracratonic Basin: Integrating Sediments, Storms, Earthquakes and Tsunamis in the Belt Supergroup (Helena Formation, Ca. 1.45 Ga), Western North America[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 141/142: 371-394.
- [38] Hardie L A. Secular Variations in Precambrian Seawater Chemistry and the Timing of Precambrian Aragonite Seas and Calcite Seas[J]. *Geology*, 2003, 31(9): 785-788.
- [39] Pettijohn F J, Potter P E. Atlas and Glossary of Primary Sedimentary Structures[M]. Berlin; Springer-Verlag, 1964.
- [40] Noffke N, Gerdes G, Klenke T, et al. Microbially Induced Sedimentary Structures: a New Category Within the Classification of Primary Sedimentary Structures[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(5): 649-656.
- [41] 梅冥相, 高金汉, 孟庆芬. 从席底构造到第五类原生沉积构造: 沉积学中具有重要意义的概念[J]. *现代地质*, 2006, 20(3): 413-422.