文章编号:1009-3850(2014)04-0040-08

徐州地区新元古界贾园组臼齿构造沉积环境 分析及成因探讨

窦鲁星¹,冯 乐²,江煜波³

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学
 学院,江苏 徐州 221116; 3. 西南石油大学 地球科学与技术学院,四川 成都 610500)

摘要: 臼齿构造是一种发育于中、新元古代碳酸盐岩中的具有特殊结构和时限性的沉积构造,其成因有多种解释。 徐州地区新元古界贾园组风暴沉积及臼齿构造发育。本文通过野外和室内观察研究,对研究区贾园组臼齿构造形 态特征及沉积环境进行分析,并探讨其形成过程。贾园组臼齿构造集中发育于古纬度 20°N ~ 34°N 的潮下碳酸盐 岩缓坡地带,古海洋基底在地震波作用下产生裂隙系统,元古代特殊大气成分背景下的海水中的远源风暴流渗透进 入温暖的碳酸盐缓坡地带碳酸盐沉积区的裂隙系统,并在裂隙的愈合作用下与孔隙水产生化学反应产生方解石快 速结晶作用,并接受后期沉积作用改造。元古代大地构造背景、古海洋、古大气的物理化学条件是控制研究区臼齿 构造时空分布的主要因素。

关键词: 徐州地区; 新元古代; 贾园组; 臼齿构造; 成因
 中图分类号: P588.24⁺5
 文献标识码: A

引言

臼齿构造(molar tooth streture 简称 MTS) 是一 种仅发育于中、新元古代碳酸盐岩中的特殊沉积构 造,其宏观形态与大象后槽牙表面的牙槽类似,由 Bauerman^[1]首次发现并命名。臼齿构造的内部组 成为粒径5~15μm的均匀等粒状的洁净明亮方解 石颗粒。臼齿构造仅分布于中、新元古代大陆架、 大陆斜坡碳酸盐岩地层中,具有严格的时限性。其 成因目前有多种模式,如气泡膨胀迁移成因模 式^[2]、地震液化作用成因模式^[3-4]、微生物-地球化 学作用模式^[5]、风暴浪引起的流体流动模式^[6-7]等。 但众多成因模式均存在一定的疑点,暂不能给出更 科学、更全面的解释。作者在对徐州赵圩地区新元 古界贾园组风暴沉积相序观察过程中,发现整个贾 园组地层臼齿构造发育。通过对贾园组风暴相序 进行划分并结合前人工作,分析臼齿构造发育的沉 积环境 结合观察到的臼齿构造形态对其成因进行 初步分析。

前人对徐淮地区新元古界臼齿碳酸盐岩进行 了研究,分析了臼齿碳酸盐岩发育的沉积环境、时 限性及其对元古界地层划分对比方面的意义、成因 与地球生物演化关系等,认为臼齿碳酸盐岩具有油 气地质意义^[8-10]。对于研究区臼齿碳酸盐岩的研 究,可加深对于臼齿构造的认识,同时对于贾园组 沉积时期的古地理的恢复以及区域地层划分对比 具有重要意义。

1 地质概况

徐州地区位于华北克拉通东部陆块东南缘,地 层分区为华北地层区胶辽徐淮分区。研究区出露 地层主要为元古界和下古生界,属徐州-宿州弧形构 造中段部分^[11]。地层发生褶皱变形,逆冲断层发 育,并有少量基性侵入岩产出,构造线方向以 NNE 向为主。研究区新元古界地层岩性以碳酸盐岩为 主,地层自下而上依次为青白口系土门群、城山组、 贾园组、赵圩组、倪园组、九顶山组、张渠组、魏集 组、史家组以及望山组和金山寨组^[12]。贾园组位于 新元古界的下部,岩性以深灰色含粉砂泥质灰岩、 粉砂质泥晶灰岩及内碎屑灰岩为主,下部夹黄绿色 薄层钙质泥岩及粉砂岩,中部夹厚层鲕粒灰岩^[13]。 研究剖面位于徐州市铜山县吕梁镇赵圩村北部(图 1),贾园组露头较好,风暴沉积及臼齿构造发育。



图1 研究区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the study area

贾园组地层曾被划归震旦系^[12],随着徐淮地区 新元古代地层发育时代研究的深入,根据沉积岩测 试其时限在1.0~0.70Ga之间^[14-6],而岩浆岩测试 得出年龄为0.95~0.90 Ga^[17-8]。据此推断贾园组 沉积时间为新元古代早期,为位于华北板块东南缘 的克拉通碳酸盐岩台地及台地边缘缓坡沉积^[19]。

2 臼齿构造的岩性、宏观形态特征与 沉积环境

2.1 臼齿构造的岩性

根据野外观察,臼齿构造主要赋存于较纯的中 厚层-厚层泥晶灰岩、含泥及含粉砂的泥晶灰岩中。 野外露头颜色为浅灰色,与周围岩石有明显的差 异,显微镜下观察(图2),由明亮干净的方解石组 成,粒度均匀且成分均一无杂质,有机质含量少,与 基质界限明显,反映了快速结晶作用。从化学元素 组成来看,基质沉积物中Si和Al含量高,代表粘土 含量高的臼齿构造中以Ca的急剧增加和Mg、Al和 Si的突然缺乏为特征,而臼齿构造中没有任何粘土 矿物,Sr、Mn和Fe含量大大减少,Ba和Zn的含量 很少^[5]。

2.2 臼齿构造的宏观形态特征

原地发育的臼齿构造的宏观形态(图3)具有多 样性特点 其形态复杂性与围岩均一程度有关。在 垂直于层面的剖面上观察,围岩岩性稳定、基质均 一时多呈条带状产出,产状稳定,包括:(1)顺直条 带状,主要发育于块体均一、纹层不发育的厚层纯 灰黑色泥晶灰岩中,长度15~20cm,最宽处约2mm。 在剖面上呈现长条状,弯曲不明显,两头自然尖灭; (2) 蠕虫状 发育干含泥较多的泥晶灰岩中 分布密 集,可见雁行状排列,长度1~3cm,宽度1~2mm。 当围岩岩性不均一且风暴沉积构造在附近发育时 呈多样性,包括:(1)褶皱肠状,主要发育干中厚层 灰色含泥、含粉砂泥晶灰岩中,岩性受风暴冲刷面 影响变化较快。臼齿构造呈肠状弯曲,长度在8~ 12cm 之间,宽度不等,产状复杂;(2) 悬针状,主要 发育于冲刷面附近,接近冲刷面处,较粗,宽约8~ 10mm 向下伏致密灰岩中延伸 最后尖灭 形成悬针 状: (3) 环带状,发育于含泥泥晶灰岩中,形态不规 则,没有明显的方向性,呈现环带状。外延可过渡 成长条状 位于冲沟附近时可破坏为碎屑状。

在层面上观察,臼齿构造形态发育,主要为不 规则条带状,可反映其在三维空间内呈面状、板状 或透镜体在宿主岩石中交割。在层面上也可见有 臼齿构造条带交叉呈"X"形的现象。Long^[20]利用 CT 摄像技术通过揭示岩石三维空间内密度差异对 臼齿构造进行研究证明,在臼齿构造形成之前存在 相互连通的裂隙系统,并发现臼齿构造内部的密度 差异,说明其结晶并非均一而是在裂缝系统的多个 中心开始的过程。

2.3 臼齿构造的沉积环境

贾园组风暴沉积发育,具有冲刷-充填构造、丘 状交错层理、碎屑流沉积、粒序层理等风暴沉积标 志。可根据风暴序列的划分及臼齿构造在序列中 的位置来确定臼齿构造发育的沉积环境。另外发 育风暴平息后于序列顶部沉积的平行层理、缓波状 层理、块状泥晶灰岩层及由滑塌作用形成的卷曲层 理。前人将贾园组风暴沉积自下而上分为7种沉积 序列类型^[21],并根据臼齿构造在序列中的发育状况 反映不同水体环境,确定臼齿构造产出位置。

序列 I: 位于贾园组底部,主要是泥岩夹薄层 含粉砂灰岩,位于风暴浪基面之下,形成于远源风 暴浊流末梢,未见臼齿构造发育。

序列 II: 自下而上发育冲刷充填构造、透镜状 滞积层、平行层理、丘状交错层理、厚层块状泥晶灰



图 2 徐州地区贾园组臼齿构造镜下特征 ,单偏光(a. 10×4; b. 10×20)

Fig. 2 Microscopic examination of the molar-tooth structures in the Jiayuan Formation , Xuzhou region. Plane-polarized light , 10×4 (a); 10×20 (b)



图 3 不同形态特征臼齿构造 a. 蠕虫状; b. 肠状; c. 环带状; d. 悬针状 Fig. 3 Macroscopic features of the molar-tooth structures in the Jiayuan Formation, Xuzhou region

岩 形成于正常浪基面附近的缓坡上部地带。下部 冲刷面附近发育上粗下细的悬针状臼齿构造,在丘 状交错层理层发育少量长条肠状臼齿构造,贯穿整 个丘状交错层理层;厚层块状均一层中发育顺直条 带状臼齿构造,垂直或近于垂直岩层面。丘状交错 层理中也有少量的条带状臼齿构造发育。

序列Ⅲ:冲刷-充填构造之上是宽缓的丘状交错 层理层,向上是厚层的块状层。形成环境属于风暴 浪基面附近的缓坡较深处。臼齿构造主要集中在 块状层中,呈细长条状。

序列IV:冲刷-充填构造-透镜状的滞积层-丘状 交错层理-水平层理-块状层。冲刷面平缓,形成环 境主要是在正常浪基面之下缓坡中部位置。在滞 积层中发育有碎屑状臼齿构造,反映了先期臼齿构 造被风暴流冲刷破坏。在冲刷面附近,发育向下悬 针状臼齿构造。在块状层中发育贯穿层面的条带 状臼齿构造,或可见蠕虫状臼齿构造。

序列 V:发育完整的风暴序列。从底部冲刷面 之上,发育有碎屑流形成的滞积层与平行层理段, 其上发育风暴衰减期的丘状交错层理段,以及风暴 停止期的微波状层理段和晴好天气沉积的水平层 理和块状均一层段。位于缓坡上部的环境,臼齿构 造发育减少,中间发现有叠层石灰岩,在叠层石灰 岩中未发现臼齿构造,其上的同一序列中发育有平 行层面发育的蠕虫状、肠状臼齿构造,宿主岩石为 含泥较多的泥晶灰岩。

序列 VI: 发育厚层的滞积层或充填于底面构造 中的滞留沉积物,其上为平行层理。滞积层中有叠 层石灰岩碎屑,属于典型的原地型风暴沉积,位于 正常浪基面附近到正常浪基面之上的缓坡上部环 境,在其中未发现臼齿构造。

序列 VII: 位于贾园组上部,发育厚层的滞积层, 其上为丘状交错层理及晴好天气沉积的块状均一 层,在丘状交错层理段发育有袋模、渠模等底面构 造。位于正常浪基面附近的缓坡上部环境,臼齿构 造呈蠕虫状。

依据各种风暴沉积序列古地理分布,归纳出贾 园组的风暴沉积模式,并总结出臼齿构造发育的古 地理位置(图4)。





Fig. 4 Model for the storm deposits and development of the molar-tooth structures in the Jiayuan Formation , Xuzhou region

沉积序列研究表明,在缓坡下部附近,主要发 育长条带状以及贯穿丘状交错层理层的长条肠状 臼齿构造;缓坡中部发育形态多样,呈滞积层中破 坏后的碎屑状及环带状,在块状层中出现蠕虫状; 在缓坡上部,主要发育在滞积层中的异地碎屑状臼 齿构造,以及在块状层中的顺直条带状和丘状交错 层理中的长条肠状臼齿构造,发育密集程度逐渐减 小;在位于潮坪上部的序列VI与位于风暴浪基面之 下的序列I中,臼齿构造不发育,在靠近潮上的环 境中臼齿构造会显著减少。根据前人研究,苏皖北 部震旦纪平均古纬度 20°N ~ 34°N^[22],这可以反映 贾园组风暴沉积与臼齿构造发育的古地理位置,即 贾园组臼齿构造构造集中发育于古纬度 20°N ~ 34°N 的碳酸盐岩缓坡地带。

3 臼齿构造成因探讨

臼齿构造的成因模式有多种。气泡膨胀迁移 模式^[2]认为有机质分解产生的气体混合物在表面 被微生物席封闭的地层中易于形成气泡裂缝,气体 中的 CO,进一步生成、沉淀成为臼齿构造; 地震活动 模式^{[3][4]}认为地震作用使海底沉积物产生裂缝,并 使得灰泥颗粒充填裂缝 臼齿构造或为地震过程产 生的震动液化脉; 微生物-地球化学作用模式^[5] 认为 臼齿构造是微生物自养作用形成的地球化学产物; 风暴浪流体流动模式^[6]认为风暴浪引起沉积基底 孔隙压力变化 驱动流体在裂缝发育形成的交织网 络中流动 引起海水与孔隙水混合作用使方解石开 始结晶 产生了臼齿构造; Long^[20] 认为宿主岩石内 有机质富集,臼齿构造处于沉积物内部的缺氧环 境。在不被循环载荷扰动时,臼齿构造在微生物胞 外多聚物质基质(EPS)内形成;旷红伟等^[23]提出元 古代时期浅海海底灰泥中有机质不断分解产生的 气体在灰泥中形成裂隙,在有机质的催化作用下, 裂隙内隙间水形成臼齿构造的新模式。

对于臼齿构造的成因,需考虑到其重要的特 性。臼齿构造微观上为粒度均匀且成分均一的方 解石颗粒、缺少碎屑物质充填,与周围基质界限清 晰而没有过渡,在快速结晶作用下形成。经受后期 压实作用产生塑性变形,宏观上形态多种多样。从 本次观察来看,臼齿构造在宿主岩层内部呈不规则 面状、板状或透镜体状,若发育较多时可产生交织 (如图5)。在层面上,臼齿构造可见一定方向上 "X"形交叉;在垂直于层面方向观察,可见蠕虫状臼 齿构造在一定方向上呈雁列状排列。这表明臼齿 构造受到一定的应力作用控制。鉴于多种成因模 式建立过程中的研究,表明臼齿构造与宿主岩石在 结构特征、微量元素含量、稳定同位素含量等多方 面的差别,表明宿主岩石与臼齿构造的形成微环境 间的差异致使微亮晶方解石与基质不同。另外,臼 齿构造及宿主岩石中观测到的生物标志化合物、菌 藻类、超微生物化石^{[5][24]}反映了碳酸盐海底被微生 物覆盖的情况,其时限性被认为是因为臼齿构造形 成于叠层石衰减事件之后的兰藻菌钙化作用幕期间^[25]这反映了中、新元古代特殊的物理、化学和生物条件在地质历史上的唯一结合^[26]对于臼齿构造的控制作用。



图 5 具指示意义的臼齿构造发育形态及沉积构造



臼齿构造的形成包括储存臼齿构造微亮晶的 裂隙形成和臼齿构造微亮晶自身的形成和快速充 填过程两个方面,这两方面既相对独立发生也存在 密切联系^[27]。观察贾园组臼齿构造宏观产状,其在 岩层空间中呈不规则面状、板状或透镜体状,在层 面上反映沉积时期碳酸盐缓坡上的灰泥沉积物受 到张剪应力产生了裂隙;在垂直层面上观察可见蠕 虫状臼齿构造在一定方向上呈雁列状排列,为层面 受到剪切作用力产生(图5)。在动力来源方面,作 者首先考虑的是地震作用,臼齿构造的形成本就有 地震液化理论的解释。乔秀夫等^[3]采用地震沙土 液化机理解释臼齿构造的成因。但从粒度组分的 分析却证明臼齿构造 碳酸盐岩的粒度分布都不在 液化区^[5] 但多种现有模式尚不能排除地震作用。 前文所述风暴沉积中的冲刷--充填构造、丘状交错层 理以及贾园组中发育的液化卷曲层理等被认为与 当时古地震作用密切相关,液化卷曲层理可作为古 地震活动的重要证据。前人曾对徐宿地区新元古 代地震事件^[28]、臼齿构造成因与超大陆 Rodinia 裂 解的关系进行探讨,1.0~0.8Ga 时期是 Rodinia 大 陆裂解高峰时期^[29],臼齿构造形成的原动力可能与 超级大陆 Rodinia 的裂解导致的地壳运动有关^[30]。 地震通过纵波传播对碳酸盐缓坡体产生破坏作用。 研究发现地震波作用在斜坡坡面上将出现量值和 方向不断调整变化的反复拉剪作用,是坡体(面)震 裂变形甚至破坏的重要原因^[31],最终裂隙在横波、 纵波应力作用下形成并可能在一定范围内存在互 相联通。

从形成条件来看,臼齿构造应形成于有利于方 解石快速结晶沉淀的条件,该时期全球处于统一的 古海洋背景和地球化学环境^[29]。地球大气中 CO₂ 含量在元古代初期约为现今的100 多倍,在元古代 末下降为现今的1~10倍^[32] 即为一种高 CO₂的分 压条件。该时期古海洋的 pH 值为 9~11 的"苏打 海"^[33] 处于特殊的物理化学平衡状态下^[26]。研究 表明 高 CO,分压下不利于方解石沉淀 低 CO,分压 下则有利于方解石沉淀^[34]。因此在 CO₂分压下降 的环境中易干产生方解石沉淀。这或许能解释巨 厚层碳酸盐岩的形成但并不能充分解释臼齿构造 碳酸盐岩的特殊性。碳酸盐岩沉积地区为海水温 暖、盐度高的环境,是主要的固碳场所,短时期内与 广海的海水离子浓度会存在差异,海水条件的变化 对碳酸盐沉积物会产生影响,而风暴作用则是海水 中离子浓度变化的重要原因。从臼齿构造碳酸盐 岩的洁净程度来看,其形成过程中很少混入碎屑物 质,说明裂隙未必是开放的,但存在海水的渗透作 用。裂隙主要存在干浅海碳酸盐缓坡地带,其富有 机质的基底较为松软且固结缓慢[23],存在与风暴循 环流载荷伴生的富含孔隙水的灰泥沉积物。考虑 到较强的沉积水动力条件,其裂隙在风暴流或地震 波作用下可能存在裂开-愈合作用。在愈合过程中, 其内部孔隙水与风暴流携带来的远源海水在温暖 的浅水碳酸盐沉积区产生化学反应,可能在菌藻类 微生物胞外多聚物质(EPS)基质^[20]环境下早于基 质产生方解石沉淀。之后脉体因力学强度与基质 存在差异 在差异压实作用下变形产生形态的多样 性并接受后来风暴作用的改造(图6)。



图 6 贾园组臼齿构造形成过程

Fig. 6 The origin of the molar-tooth structures in the Jiayuan Formation

从研究区大地构造背景来看,研究区晚元古代 地震事件与岩浆侵入作用共生、风暴沉积事件与元 古代超大陆 Rodnia 裂解共生。徐宿地区板块拉张 伸展为岩浆提供了侵入空间。同位素测年数据显 示,徐宿地区的辉绿岩床是震旦纪早期和震旦纪晚 期两次侵入的产物^[35]。对徐淮地区上元古界地层 臼齿构造碳酸盐岩的研究表明,在该区地层中臼齿 构造消失是在 600 Ma 以前,即在 Varanger 冰期之前,臼齿构造突然消失,可能与 Varanger 冰期使古海洋的化学性质发生了重大的变化有关^[36]。这也说明古地震作用及海洋化学条件变化在臼齿构造发育过程中的控制作用。

4 结语

本文对徐州地区贾园组与风暴沉积共生的臼 齿构造进行了观察研究,结合前人工作,从臼齿构 造碳酸盐岩的沉积环境、古地理条件入手,结合元 古代古大气、古海洋物理化学条件,综合大地构造 背景对臼齿构造的成因进行了分析,得出以下认识:

(1) 贾园组臼齿构造集中发育于古纬度 20°N~ 34°N 的碳酸盐岩缓坡地带正常浪基面与风暴浪基 面间浅水潮下带沉积环境,沉积水动力较强,风暴 沉积发育并存在古地震作用。

(2)结合沉积环境对臼齿构造产状进行研究, 认为其空间产状反映了古海洋基底在古地震作用 下产生的裂隙系统。臼齿构造是早于基底固结形 成的,其产生可能与元古代特殊成分的海水中的风 暴流有关,即远源风暴浪携带的海水与碳酸盐缓坡 中裂隙的愈合共同作用下产生方解石快速结晶。

(3)在讨论臼齿构造成因时,微生物起到的具体的作用本文没有讨论。研究表明,臼齿构造成因与微生物有关,但具体的化学反应机理仍需要完善。

参考文献:

- BAUEMAN H. Report on the geology of the country near fortyninth parallel of north latitude west of Rock Mountains [J]. Ottawa: Geological and Natural History Survey of Canada ,1885.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] PRATT B R. Shrinkage feature (molar tooth structure) in Proterozoic limestrone: New model for their origin through synsedimentary earthquake-induced dewatering [J]. Geological Society of America Annual Meeting Abstracts ,1992 24(7):53.
- [5] 孟祥化 葛铭 旷红伟. 微亮晶(臼齿) 碳酸盐岩成因及其在元 古宙地球演化中的意义 [J]. 岩石学报,2006,22(8):2133 -2143.
- [6] BISHOP J W SUMNER D Y ,HUERTA N J. Molar tooth structures of the Neoarchean Monteville Formation ,Transvaal Supergroup , South Africa. II: A wave-induced fluid flow model [J].

Sedimentology 2006 53(5): 1069 - 1082.

- [7] BISHOP J W ,SUMNER D Y. Molar tooth structures of the Neoarchean Monteville Formation, Transvaal Supergroup, South Africa. I: Constraints on microcrystalline CaCO₃ precipitation [J]. Sedimentology 2006 53(5):1049-1068.
- [8] 刘为付,孟祥化,葛铭,等.徐州-淮南地区新元古代臼齿碳酸 盐岩成因探讨[J].地质论评2004 50(5):454-461
- [9] 郭峰,王德海,孟祥化,等.徐州地区新元古代微亮晶构造碳酸 盐岩沉积特征[J].矿物岩石地球化学通报 2007 26(1):369 - 377.
- [10] 何睿. 徐州地区新元古界微亮晶碳酸盐岩微相分析和成因意 义[D]. 北京: 中国地质大学(北京) 2013.
- [11] 王桂梁 姜波,曹代勇.徐州-宿州弧形双冲-叠瓦扇逆冲断层 系统[J].地质学报,1998,72(3):228-236.
- [12] 江苏省地质矿产局. 徐州南部区域地质调查报告(1:50000)(R). 1984.
- [13] 李壮福,郭英海. 徐州地区震旦系贾园组的风暴沉积[J]. 古 地理学报 2000 2(2):19-27.
- [14] 孙林华 桂和荣 陈松,等. 皖北新元古代贾园组混积岩物源 和构造背景的地球化学示踪[J]. 地球学报 2010 31(6):833 - 842.
- [15] 刘燕学 旷红伟,孟祥化,等.吉辽徐淮地区新元古代地层对 比格架[J].地层学杂志 2005 29(4):387-404.
- [16] 郑文武 杨杰东 洪天求. 辽南与苏皖北部新元古代地层 Sr 和 C 同位素对比及年龄界定[J]. 高校地质学报 2004,10(2): 165-178.
- [17] 柳永清,高林志,刘燕学,等.徐淮地区新元古代初期镁铁质 岩浆事件的锆石 U-Pb 定年[J].科学通报,2005,50(22):1 -7
- [18] 唐烽,尹崇玉,王自强,等.华北地台东缘新元古代地层对比 和宏体化石研究的进展和发展趋势[J].地质通报 2005 24 (7):589-596.
- [19] 乔秀夫,马丽芳 张惠民.中国末前寒武纪古地理格局[J].地 质学报,1988,62(4):290-298.
- [20] 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.
- [21] 冯乐, 窦鲁星, 师庆民, 等. 徐州赵圩地区新元古界风暴沉积

序列类型及其水深控制[J]. 沉积与特提斯地质,2013,33 (2):32-39.

- [22] 乔秀夫 邢裕盛 高林志 ,等. 皖北张渠组风暴沉积-向上变浅 的碳酸盐沉积序列[J]. 地质学报 ,1989 ,63(4):297 - 308
- [23] 旷红伟 柳永清,彭楠,等. 再论臼齿碳酸盐岩成因[J] 古地 理学报 2011 ,13(3) 253 - 261.
- [24] JAMES N P ,NARBONNE G M SHERMAN A G. MT carbonates: Shallow subtidal facies of the Mid to Late Proterozoic [J]. Journal of Sedimentary Research ,1998 68:716 - 722.
- [25] 梅冥相.前寒武纪"臼齿状构造谜"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.
- [26] 陈留勤. 臼齿构造主要成因模式及时空分布意义[J]. 地球科 学与环境学报 2009 31(3):245-252.
- [27] 彭楠 柳永清,旷红伟.沉积环境与臼齿构造(Molar-tooth)形态的关系——以大连新元古代臼齿构造为例[J].高校地质 学报 2012,18(1):180-188.
- [28] 潘国强,刘家润,孔庆友,等.徐宿地区震旦纪地质事件及其 成因讨论[J].高校地质学报 2000 *b*(4):566-575.
- [29] 柳永清,旷红伟,彭楠,等.中国元古代碳酸盐岩微亮晶构造 及形成的沉积环境约束[J].岩石学报,2010,26(7):2122 -2130.
- [30] 贾志海,宁霄峰,洪天求,郑文武.苏皖北部新元古界臼齿碳酸盐岩脉类型及其形成机理[J].古地理学报 2011,13(6): 627-634.
- [31] 冯文凯,许强,黄润秋. 斜坡震裂变形力学机制初探[J]. 岩石 力学与工程学报 2009 28(增刊1):3124-3130.
- [32] KASTING J F. Earth's early atmosphere [J]. Science ,1993 259: 920-926.
- [33] KEMPES, DEGENS E T. An early soda ocean [J]? Chemical Geology 1985 53(1-2):95-108.
- [34] MARSHALL D ,ANGLIN C D. CO₂-elathrate destabilization: A new model of formation for molar tooth structures [J]. Precambrian Research 2004, 129: 325 - 341.
- [35] 潘国强,孔庆友,吴俊奇,等.徐宿地区新元古代辉绿岩床的 地球化学特征[J].高校地质学报 2000 6(1):53-63.
- [36] 刘为付,孟祥化,葛铭,等.徐淮地区上元古界臼齿构造碳酸 盐岩事件[J].地质科技情报 2003 22(4):27-32.

Sedimentary environments and genesis of the molar-tooth structures in the Neoproterozoic Jiayuan Formation in the Xuzhou region , Jiangsu

DOU Lu-xing¹, FENG Le², JIANG Yu-bo³

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. School of Earth Sciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: The molar-tooth structures , a special kind of sedimentary structures with special textures and restricted time duration only developed in the Meso-to Neoproterozoic carbonate rocks are observed in the storm deposits from the Neoproterozoic Jiayuan Formation in the Xuzhou region , Jiangsu. The morphology , sedimentary environment and genesis of molar-tooth structures are treated in this study in terms of field observation and laboratory study. The molar-tooth structures in the Jiayuan Formation appear in the ramp zones of the subtidal carbonate rocks at the latitudes of 20°N to 34°N. The distal storm currents penetrated into the fissure systems produced by the earthquakes on the ancient marine basement , led to the chemical reactions with the pore-space water , and finally led to the rapid crystallization of calcite. The physical and chemical conditions of the Proterozoic oceans and atmospheres and tectonic settings are interpreted as the main factors controlling the spatio-temperal distribution of the molar-tooth structures.

Key words: Xuzhou region; Neoproterozoic; Jiayuan Formation; molar-tooth structure; genesis