

生物礁对海平面变化的响应

——基于黔南晚石炭世大型珊瑚礁的海平面变化幅度估算

张永利, 谷悦, 巩恩普, 赖冠明

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 晚古生代冰期是地质历史时期一个重要事件, 由晚古生代冰期引起的海平面变化对该时期的生物礁系统产生深远影响. 主要讨论了晚古生代冰期背景下生物礁对海平面变化的响应. 生物礁随海平面变化表现为三种生长模式, 即“放弃”“跟随”和“追赶”. 以黔南地区格舍尔期大型珊瑚礁为例对黔南地区海平面变化幅度进行计算, 认为黔南地区格舍尔期海平面上升(60±5) m, 主要由冰川作用引起. 根据扁平村珊瑚礁对格舍尔期黔南地区海平面变化幅度计算的误差来源主要为基底沉降以及古水深估算不精确. 造礁珊瑚 *Fomitchevella* 的形态以及快速生长的特点揭示了黔南地区格舍尔期气候温暖、海平面上升且海侵快速的古环境条件. 扁平村珊瑚礁的发育反映了全球气候变化和相关的海平面波动与冰期有关.

关键词: 生物礁; 海平面变化; 黔南; 格舍尔期; 冰期

中图分类号: P 52 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)02-0252-10

Response of Reefs to Sea-Level Change: Estimation of Magnitude of Sea-Level Change Based on the Late Carboniferous Large Coral Reef in Southern Guizhou

ZHANG Yong-li, GU Yue, GONG En-pu, LAI Guan-ming

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GU Yue, E-mail: 2000987@stu.neu.edu.cn)

Abstract: The Late Paleozoic ice age is a vital event in the geological history. The sea level change caused by the Late Paleozoic ice age has a far-reaching impact on the reef system. The response of reefs to sea-level change in the context of the Late Paleozoic ice age is discussed. Reefs exhibit three primary modes of response: “abandonment”, “synchronization”, “persistence”. We calculated the rise of sea level in Gzhelian by the large Bianping coral reef in southern Guizhou. The sea level of Gzhelian in southern Guizhou rose by about (60±5)m, which is mainly caused by glaciation. The sources of error in this estimation chiefly revolve around basement subsidence and inaccurate estimation of paleo-water depth. The morphology and rapid growth characteristics of *Fomitchevella* reveal the paleoenvironmental conditions of warm climate, rising sea level and rapid transgression in the Gzhelian period in southern Guizhou. The development of the Bianping coral reef reflects the global climate change and sea level fluctuations are related to the ice age.

Key words: reefs; sea level change; southern Guizhou; Gzhelian; ice age

晚古生代冰期是显生宙持续时间最长的冰期^[1-7]. 它由多次短期的冰期和间冰期组成, 是一个具有动态过程的冰期^[5,7-9]. 晚古生代全球显著的海平面升降变化通常与冈瓦纳大陆冰盖体积

的变化一致^[1]. 对全球晚石炭世的海平面变化进行研究可以为理解冰期背景下海平面变化特点以及研究冰川的发育阶段和作用范围提供重要的视角. 目前主要通过地球化学、冰川体积估算

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42272008, 41972002).

作者简介: 张永利(1980-), 男, 河北保定人, 东北大学副教授; 巩恩普(1958-), 男, 辽宁盖州人, 东北大学教授, 博士生导师.

但华南地区发育了一系列旋回地层^[26-27],可以认为华南地区受晚古生代冰期作用影响.

2 根据生物礁计算海平面变化幅度的方法

2.1 生物礁对海平面变化响应

根据海平面变化的速度和方向以及生物礁与海平面的关系,生物礁的生长主要表现为“放弃”、“跟上”和“追赶”三种模式.海平面上升速度过快,大于生物礁生长速度时,礁石被淹没,生物礁的生长模式为“放弃”,生物礁从底至顶的岩相以及生物组合反映了水深逐渐变深的趋势.海平面上升速度与生物礁向上生长速度大约相等时,生物礁持续向上生长,海平面停止上升之后,生物礁也随之停止造礁,生物礁从底至顶的岩相以及生物组合反映了相同的水深,属于“跟随”的生长模式.随着海平面上升速度的减缓,珊瑚礁的生长速度可能会赶上海平面,生物礁从底至顶的岩相以及生物组合反映了水深逐渐变浅的趋势,这种生长模式为“追赶”.海平面下降,生物礁可能会出现相对裸露的礁坪,同样属于“追赶”的生长模式.

2.2 根据生物礁计算海平面变化幅度

根据生物礁计算海平面变化幅度的步骤如下:

1) 古环境分析与解释.首先根据生物礁的生物类型、生物组合、岩性等分析生物礁在发育过程中的生长环境、造礁过程、温度、水动力条件等,对生物礁发育的古环境进行分析与解释,确定生物礁的生长模式以及海平面变化条件.

2) 代入公式.根据吴亚生等提出的计算公式^[28],确定相关数据并代入公式.海平面上升时,海平面变化的计算公式为: $H=h_1-h_2+D$.其中: D 为生物礁的原始地层厚度; h_1 是生物礁礁顶所反映的水深; h_2 是生物礁礁底所反映的水深.海平面下降时,吴亚生等^[28]提出了两个计算公式 $H=T_m/T_a+D$ 和 $H=(T_c-T_r)+D$. T_m 是现在的礁顶面到混合水白云岩化带之底面的距离, T_a 是礁顶面到大气水溶蚀带底部的距离, T_c 是礁核顶面到穿越整个礁组合的化石或岩性标志层的厚度, T_r 是礁前带的潮坪沉积到这一标志的厚度, D 是礁体死亡之前顶部的水深^[28].

3 根据黔南晚石炭世珊瑚礁计算海平面变化

3.1 扁平村珊瑚礁发育相对海平面变化研究

扁平村大型珊瑚礁是一个组合礁,产于马平组的 *Triticites* 带. *Fomitchevella* 珊瑚礁的下部发育三个点礁,造礁生物分别为群体块状四射珊瑚 *Ivanovia*, 叶状藻 *Eugonophyllum* 和蓝藻.

礁相地层剖面自上而下综述:

7. 亮晶生物碎屑灰岩、泥晶球粒生物碎屑灰岩. >20 m (未见顶)

6. 泥晶生物碎屑灰岩,泥晶球粒生物碎屑灰岩,含螭、腕足,较多的 *Tubiphytes*, 少量海百合茎、藻屑. 12 m

5. 灰色-浅灰色大型笙丛状 *Fomitchevella* 骨架岩,骨架间隙充填亮晶胶结物和生物碎屑. 含较丰富的藻屑、个体大小不一的腕足壳,及少量的螭、海百合和 *Tubiphytes*, 栉壳结构常见. 70 m

4. *Fomitchevella* 骨架岩和亮晶生物碎屑灰岩, *Fomitchevella* 零散分布,腕足个体大,局部成层,含少量螭、海百合茎. 11 m

3. 泥晶球粒生物碎屑灰岩、亮晶生物碎屑灰岩,含少量螭、腕足、海百合等. 5 m

2. 蓝藻灰泥丘、*Ivanovia* 覆盖礁和叶状藻点礁构成下部点礁层,含腕足、藻屑和 *Tubiphytes*, 少量螭、海百合茎. 2~4 m

1. 灰色亮晶生物碎屑灰岩. 含大量螭、海百合茎,少量腕足、藻屑和 *Tubiphytes*.

>8 m (未见底)

三个点礁的基底为灰色亮晶生物碎屑灰岩. 碎屑颗粒几乎完全由螭壳组成,螭壳保存完好,含绿藻,指示了受保护的较浅的潮下带环境. 群体块状四射珊瑚 *Ivanovia*, 叶状藻 *Eugonophyllum* 和蓝藻点礁建造在螭滩之上.

群体块状四射珊瑚 *Ivanovia* 点礁主要由 *Ivanovia* 骨架岩组成,沉积物粒度较粗,含泥量低. *Ivanovia* 之间被生物碎屑和亮晶方解石胶结物充填(图 3a),含松藻、粗枝藻等绿藻. 附礁生物为螭、腕足、海百合等,海百合具有较粗的茎秆. 说明 *Ivanovia* 点礁发育在浅水动荡的环境中. 叶状藻点礁主要由深灰色叶状藻障积岩组成,藻片密集叠置,大多保持直立生长状态,少数具有倒伏现象,说明水体动荡小. 叶状藻之间主要被灰

泥填充,藻叶宽大而且较薄(图3b),代表了浪基面以下相对较深的水环境.叶状藻点礁中含有大量腕足,腕足个体较小,腕足壳保存完整,壳面的纹饰结构清晰,说明它们为原地保存,主要分子有 *Crurithyris* 和 *Composita* 等. *Composita* 是具有古水深指示意义的腕足动物,在浅水中个体小、深水中个体大^[29]. *Crurithyris* 是中国南方代表深水相的腕足动物^[30]. *Crurithyris* 和小个体的 *Composita* 同时出现,代表了较深的水环境.蓝藻点礁沉积物灰泥含量较高,生物含量较少.蠕和腕足个体较小,但壳体保存较好,为原地生物,同样生长在相对较深的水环境中.

三个点礁的发育过程可以认为:随着海平面上升,群体珊瑚 *Ivanovia* 在地形凸起的迎风浪面定殖下来,发育成礁.附礁生物,如腕足、蠕、海百合开始迅速繁荣.部分 *Ivanovia* 叠置生长,加强了对水流的障积作用,从而形成了较低能环境,为叶状藻礁的定殖提供了良好场所.随着海平面

的继续上升,在水体较深的地带形成了蓝藻礁.

三个点礁造礁完成之后, *Fomitchevella* 珊瑚礁开始建造. *Fomitchevella* 珊瑚礁基底由生物碎屑灰岩组成,含有孔虫、腕足和海百合等,颗粒含量较高,指示了高能浅水的沉积环境.珊瑚礁下部以 *Fomitchevella* 骨架岩为主, *Fomitchevella* 局部密集排列,总体上分布相对分散,珊瑚丛规模小. *Fomitchevella* 平均直径1~3 cm,长度20~50 cm.腕足含量十分丰富,个体大且保存完好(图3c).除腕足外,蠕、有孔虫、海百合茎也出现在珊瑚礁下部,表示水浅而清,弱动荡水环境.珊瑚礁中上部为一套浅灰色珊瑚骨架岩.与珊瑚礁下部相比, *Fomitchevella* 含量明显提高, *Fomitchevella* 尺寸明显增大,平均直径5 cm左右,最大可达10 cm,平均长度为50 cm,栉壳结构常见(图3d). *Fomitchevella* 的外部形态表现为笙丛状,个体之间平行直立,密集丛生.珊瑚格架之间有腕足、蠕、有孔虫、海百合、苔藓虫和 *Tubiphytes* 等.

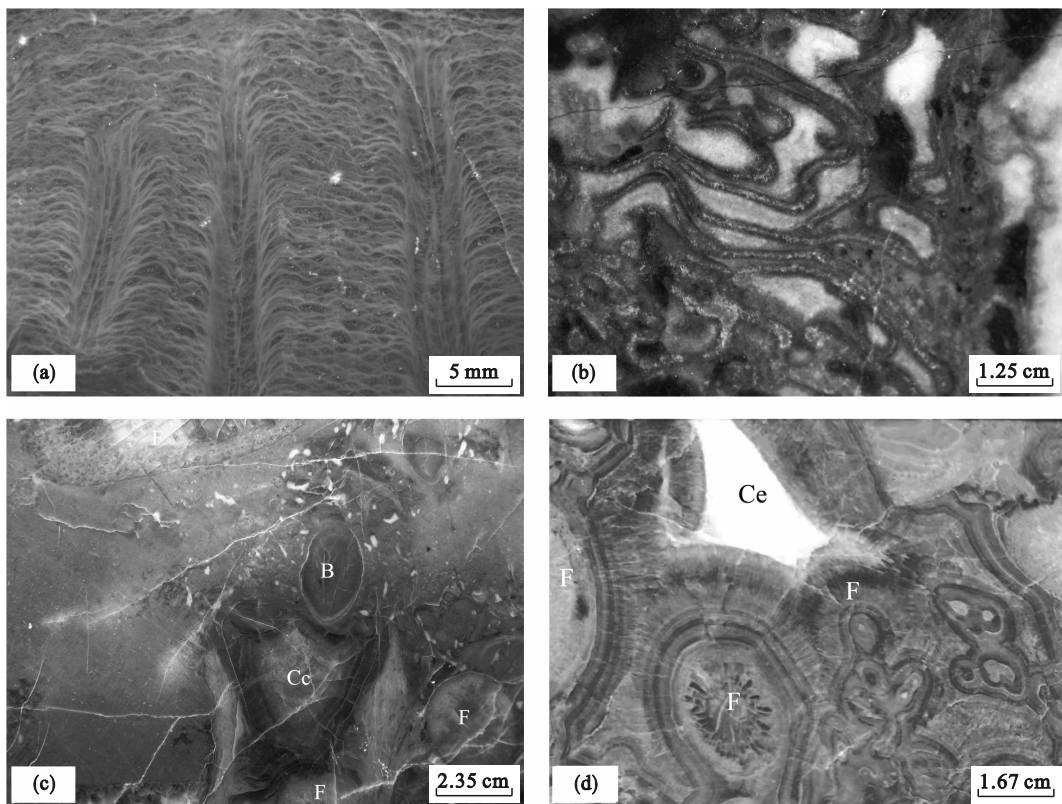


图3 扁平村生物礁主要化石光面照片

Fig. 3 Polished slab of main fossils of Bianping reef

- (a) — *Ivanovia* 点礁; (b) — 叶状藻点礁, 叶状藻之间主要被灰泥填充, 藻叶宽大而且较薄;
 (c) — 大型珊瑚礁下部的 *Fomitchevella* (F), 珊瑚之间被灰泥 (Cc) 填充, 腕足 (B) 保存良好;
 (d) — 大型珊瑚礁中上部 *Fomitchevella* (F), 栉壳结构 (Ce).

Fomitchevella 在向上生长的同时, 会通过侧部或萼部出芽的方式增加个体数量, 形成下部相连的笙丛状群体. 出芽的生长方式使整个群体增

大了纵向的投影面, 即增大了光线的照射范围. 因而不难发现, *Fomitchevella* 对光照有依赖性. *Fomitchevella* 珊瑚礁下部的珊瑚骨骼都较为细

弱,枝杈分布间距较大(图 4a). 枝杈分散、开放,枝杈间隙大,有利于获取更高的光捕获率,提高光合作用的效率,这是在光照不十分充足的条件下形成的. *Fomitchevella* 珊瑚礁中上部的珊瑚骨骼相对较粗壮,枝杈间距较小,珊瑚体之间近似

平行(图 4b). 严密聚集的形态有利于珊瑚枝杈之间的自我遮蔽,从而降低光照面积,这种形态是在水深较浅、接近水面的条件下形成的. 珊瑚礁从底至顶代表了珊瑚礁在发育过程中相对海平面逐渐变浅的过程.

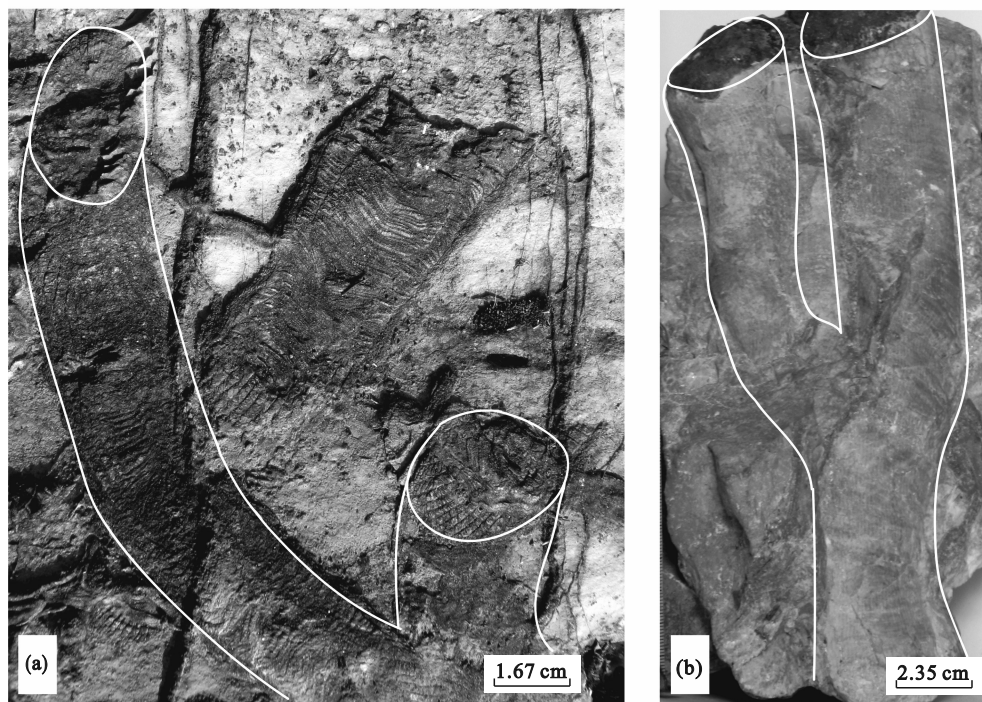


图 4 *Fomitchevella* 群体形态

Fig. 4 Morphology of *Fomitchevella*

(a) — 珊瑚礁下部的枝杈分散、开放,枝杈间隙大; (b) — 珊瑚礁中上部的枝杈间距较小.

珊瑚礁的盖层为亮晶生物碎屑灰岩,颗粒含量较高. 说明此时相对海平面降低,水体变浅而动荡,珊瑚礁停止发育,造礁体系瓦解,造礁过程结束. 珊瑚礁的相对海平面变化如图 5 所示.

3.2 *Fomitchevella* 大型珊瑚礁古水深分析

对扁平村珊瑚礁发育相对海平面变化分析可知,扁平村大型珊瑚礁经历了多次海平面上升和下降的过程,因此,选取 *Fomitchevella* 珊瑚礁计算海平面变化幅度,从而得到 *Fomitchevella* 珊瑚礁发育过程代表的海平面变化历史.

Fomitchevella 珊瑚礁的岩性为造礁珊瑚骨架岩,珊瑚体之间充填生物碎屑和亮晶胶结物,栉壳结构常见,属于浪基面以上的区域. 珊瑚礁剖面从底至顶都含有一定数量的海百合茎. 除 *Cyrtocrinids* 外,大多数海百合都生存在浅海条件下,但是海百合的分布表现出强烈的基底依赖性,对于古深度的依赖性不明显^[31],因此海百合不适用于对大型珊瑚礁的古水深进行详细厘定,仅能判断珊瑚礁整体处于正常浪基面以上的水深.

蠕类同样贯穿整个珊瑚礁剖面. Baranova 等^[32]对石炭纪莫斯科盆地的蠕类进行研究,认为蠕类出现的最大深度为 40 m. Stevens^[33]认为得梅因阶的蠕类古水深估计范围为 13 ~ 22 m,可能的最大深度为 30 ~ 40 m. Ross^[34]分析了弗吉尔阶的蠕类古水深分布,并指出平均古水深范围为 3 ~ 10 m. 由以上分析可知,石炭纪蠕类生长的水深范围一般为 3 ~ 40 m. 因此,将珊瑚礁的底相水深和顶相水深的范围都控制在 3 ~ 40 m.

珊瑚礁剖面的腕足含量多、种类丰富,是分析古水深的重要证据. 目前较为常见的分析古水深的方法是 Boucot^[35]提出的 BAs 方法,即根据底栖生物组合判断水深. 珊瑚礁剖面的底部生物含量丰富,分异度高,含造礁珊瑚 *Fomitchevella*、腕足、蠕、非蠕有孔虫、海百合,偶见 *Ivanovia* 的小型板状体,可以自由移动的腹足类少见. 优势种珊瑚的优势度不是很明显. 腕足主要为 *Linproductus* 和 *Eochoristites* 等. 长身贝类占优势,石燕贝类次之. 它们的生态特征都为低层次滤食者,生态类型可分为以宽平的腹壳平卧海底和以肉茎固着

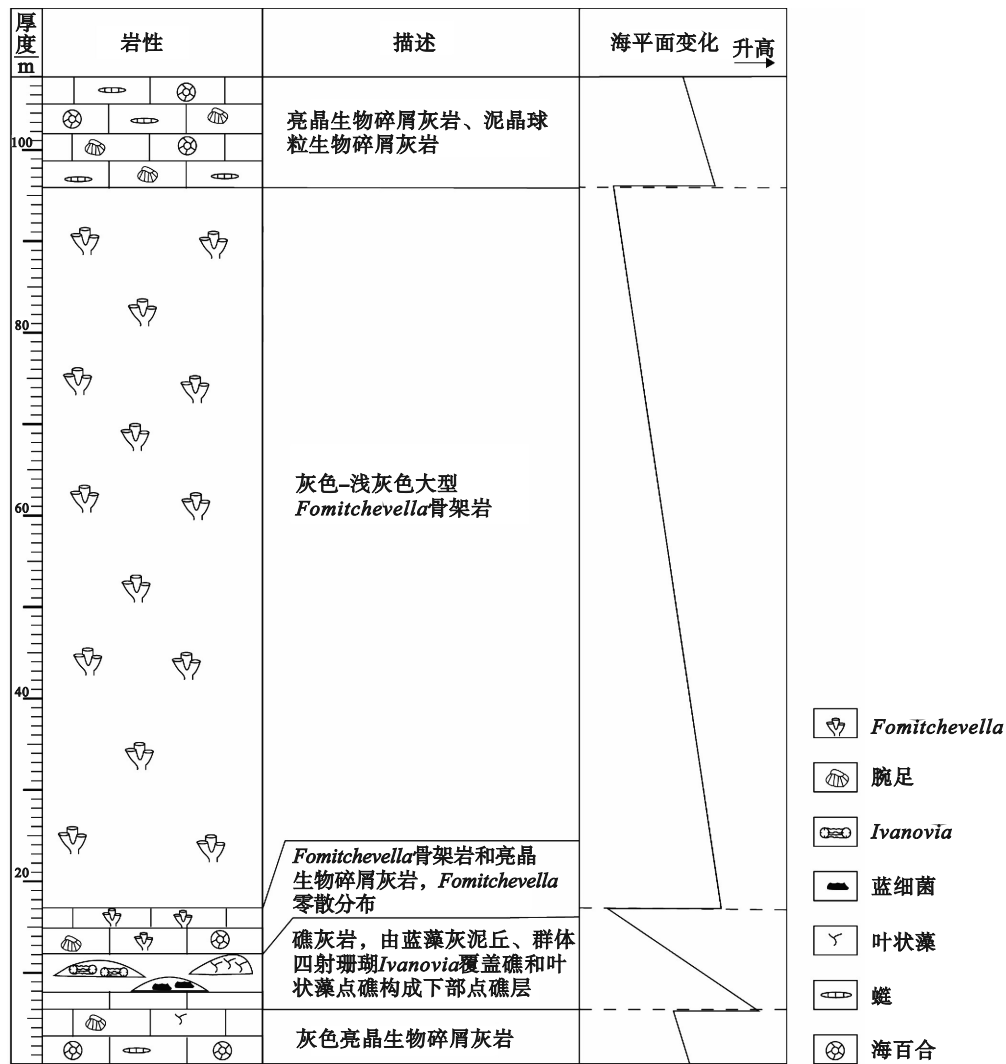


图 5 扁平村礁相地层岩性和相对海平面变化示意图

Fig. 5 Schematic lithologic section and the relative sea-level change of the Bianping reef

海底两种类型,化石保存较完整.自由躺卧的长身贝类需要低能的水动力条件,因此,该组合的生态位当属于 BA2 下部或 BA3 上部,水深 10~40 m,最大不超过 60 m^[36].

珊瑚礁底部造礁珊瑚 *Fomitchevella* 分布稀疏,*Fomitchevella* 珊瑚体对水流起到障积作用,使水流速度减慢,珊瑚体之间填充灰泥.根据吴亚生等划分的生物礁结构相,珊瑚礁下部的结构相为障积相,水深范围划分为 20~30 m^[28].因此,将珊瑚礁的底相水深确定为(25±5) m.

珊瑚礁上部造礁珊瑚 *Fomitchevella* 的优势度高.附礁生物以腕足含量最高,其次是蠕和少量非蠕有孔虫、*Tubiphytes*、海百合、苔藓虫小型块体,偶见腹足和藻类.腕足通过在底部游移滤食获取营养物质,主要为 *Gigantoproductus*, *Choristites*, *Martinia*, *Brachythyris*, *Weiningia*, *Composita*, *Enteletes*, *Schellwienella* 等.长身贝和石燕贝占主导地位,小孔贝和扭月贝少量发育.

*Composita*以弱小的肉茎固着于基底;*Brachythyris*, *Martinia*, *Enteletes* 和 *Choristites* 以复杂分支的肉茎固着于基底之上. *Gigantoproductus* 壳体巨大,以自身厚重的腹壳躺卧海底,属于自由躺卧型的重坠亚型.扭月贝类的 *Schellwingella* 同样以宽大的壳体平躺海底.腕足化石保存较完整,且大个体、外壳厚分子占比多,壳饰多为放射状.最主要的生态类型为以肉茎固着型,且肉茎复杂分化的贝类数量较多.反映了一种近岸低能的浅水环境,水深 0~20 m^[36].

珊瑚礁上部造礁珊瑚 *Fomitchevella* 构成岩石的骨架,骨架之间的空隙由亮晶胶结物和生物碎屑充填,根据吴亚生划分的珊瑚礁结构相,珊瑚礁上部的结构相为骨架相,水深 2~18 m^[28].此外,现代造礁珊瑚在水深 15 m 左右生长最为丰富.因此,将珊瑚礁的顶相水深确定为 15 m.

3.3 根据黔南晚石炭世珊瑚礁计算海平面变化由扁平村珊瑚礁剖面海平面变化以及古水

深分析可知, *Fomitchevella* 珊瑚礁从底至顶反映了相对海平面变浅的趋势, *Fomitchevella* 珊瑚礁的底相水深为 (25 ± 5) m, 而 *Fomitchevella* 珊瑚礁的厚度为 70 m, 大于珊瑚礁开始发育时的水深, 即珊瑚礁的底相水深, 说明 *Fomitchevella* 珊瑚礁是在海平面上升的条件下发育的, 但珊瑚礁的发育速度大于海平面的上升速度, 所以造成珊瑚礁序列的相对海平面变化是变浅的. *Fomitchevella* 的形态以笋状为主, 可以认为珊瑚礁建造时追赶海平面上升而发育, 直立向上生长. *Fomitchevella* 珊瑚礁的生长模式为“追赶”.

扁平村大型珊瑚礁剖面主要由碳酸盐岩组成, 含有丰富的生物碎屑, 生物碎屑可以抵抗机械压实作用, 并且没有表明过度压实的证据, 因此压实作用可以忽略不计, 认为现代的地层厚度约等于原始地层厚度. 根据海平面上升时的计算公式 $H = h_1 - h_2 + D$ ^[28] 计算得出 (图 6), 黔南地区格舍尔阶海平面上升幅度为 (60 ± 5) m.

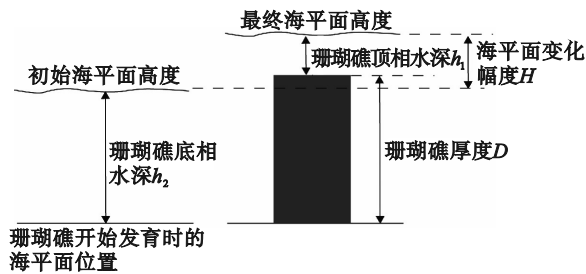


图 6 基于 *Fomitchevella* 珊瑚礁计算海平面变化幅度示意图

Fig. 6 Schematic for calculation of sea-level change amplitude based on *Fomitchevella* coral reef

根据 *Fomitchevella* 珊瑚礁计算海平面变化幅度的误差主要来源于基底沉降以及古水深估计不精确. 沉积物的重力作用会导致基底沉降, 吴亚生等^[28]认为在沉积物厚度很小或较小 (例如小于 500 m) 时, 沉积物重力引起的基底沉降幅度很小, 基底沉降可忽略不计. 根据 *Fomitchevella* 珊瑚礁计算海平面变化幅度的最大误差来源于对古水深的估计不精确, 因为仅根据生物的类型和组合来确定古水深得到的只是一个大概的数值, 目前还没有方法能够精确测量古水深, 因此根据生物的类型以及组合厘定出的底相水深和顶相水深存在 0 ~ 10 m 左右的误差.

4 讨 论

4.1 全球海平面变化与冰期关系探讨

海平面升降是多种因素共同作用的结果, 影

响石炭纪全球海平面升降的因素主要包括两个方面: 1) 冰川活动. 晚古生代全球海平面波动受冰川体积影响, 气候变冷时期, 大量的水以固态形式被禁锢在大陆、高山和海洋冰川中, 导致全球海平面下降; 而在气候回暖的温暖时期, 冰川消融, 大量液态水注入海洋, 致使海平面升高^[3-5, 8-9]; 2) 构造运动. 如果一个地区处于构造活动之下, 其海平面会随着构造运动的进行而呈现出明显的阶段性特征: 在强烈构造运动期间, 该地区的海平面升降快于其他地方, 而在构造稳定期间, 该地区的水体则表现为缓慢增加或减少^[37]. 因此, 在研究海平面变化及其原因时应充分考虑构造作用对海平面变化的控制作用.

本文求得黔南地区格舍尔期的海平面上升幅度为 (60 ± 5) m, Crowley 等^[11]根据冈瓦纳冰川体积计算的石炭纪海平面波动为 (60 ± 15) m, 与根据生物礁计算出的黔南地区的海平面变化幅度数值相近. Maynard 等^[13]认为由冰川作用引起的海平面变化是晚石炭世旋回周期的主要控制因素. Wang 等^[38]对比分析了中国华南不同地区石炭系一下二叠统沉积序列、生物化石和岩性变化, 认为中国华南地区发生的多次显著海退事件与北美、欧洲、澳大利亚等地区具有良好的对应关系, 可能是冰川作用的结果. 刘本培等^[26]在黔南晚石炭世 *Triticities* 带内识别出的副层序和旋回海平面变化可以与北美中大陆同期的四级层序和相应的海侵—海退旋回对比. 此外, 晚石炭世华南地区碳酸盐岩台地广泛发育, 且缺少岩浆作用、构造作用及变质作用的相关记录, 华南板块属于稳定的被动大陆边缘构造环境^[39]. 因此认为黔南地区格舍尔期的海平面变化主要由冰川作用引起.

中国、东欧、俄罗斯和美国石炭世的海侵强度与冰川作用密切相关^[40-43] (图 7). 从整体上看, 滇黔桂盆地、顿涅茨盆地、俄罗斯台地以及北美中大陆地区石炭纪的海平面变化趋势较为相近. 泥盆纪与石炭纪之交, 冈瓦纳大陆开始进入冰期, 美洲、东欧、中国等中、低纬度地区在杜内期发生较为明显的全球冰川型海退. 此次海退幅度较小, 大约为 20 ~ 60 m^[9]. 第二次盛冰期出现在巴什基尔期—莫斯科期^[9], 滇黔桂盆地、顿涅茨盆地、俄罗斯台地以及北美中大陆地区出现了海平面极低值, 随后海平面逐渐升高. 到了卡西莫夫期和格舍尔期早期, 顿涅茨盆地、特提斯盆地、北美中大陆显示出较高幅度的海侵, 最高可达到 200 m 左右^[9], 而中国的滇黔桂盆地则显示出中

等幅度的海侵,可能与乌拉尔山脉和阿巴拉契亚山脉的构造向西迁移、增加了北美等地的海侵有关^[37].即使这些地区的海侵幅度不同,但海侵的

旋回层序具有很强的相关性,因此石炭纪中国、东欧和北美地区的海平面变化受晚古生代大冰期作用控制.

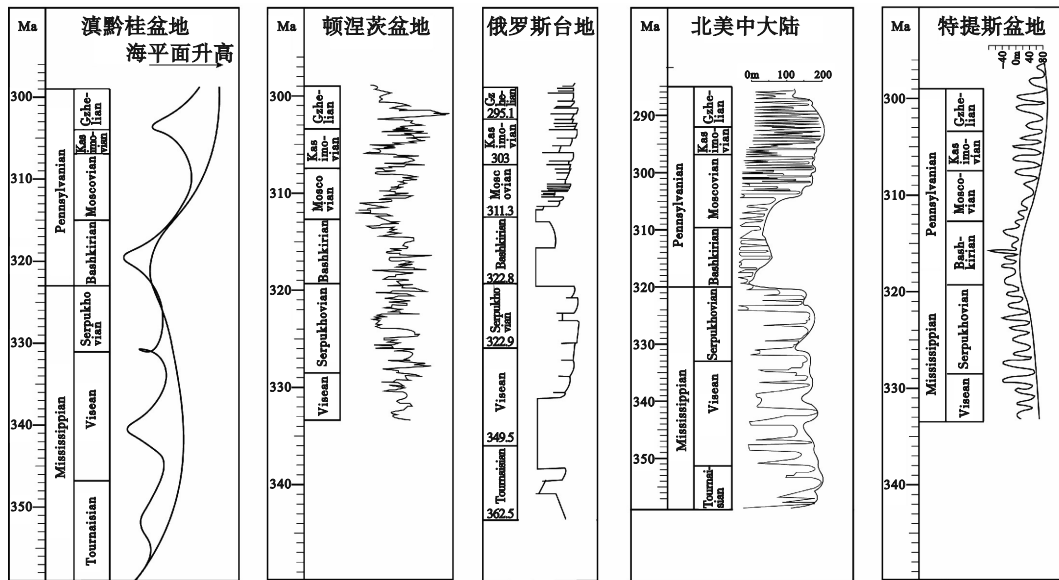


图 7 石炭纪中国、东欧、俄罗斯、美国海平面变化比较

Fig. 7 Carboniferous sea-level change comparison in China, Eastern Europe, Russia and the United States

4.2 扁平村珊瑚礁对古海平面变化的指示意义

中国华南地区石炭纪的珊瑚礁主要在维宪期发育^[38],维宪期气候温暖,海平面上升^[9].随后,谢尔普霍夫期到巴什基尔期,中国华南地区发生了无机碳同位素正漂移事件,代表此时华南地区发生冷却事件^[38].此后,中国华南地区珊瑚礁丰度快速减少,到了格舍尔期,珊瑚礁逐渐恢复发育. Yao等^[44]认为后生动物比其他生物的环境耐受性更差,冷却事件对珊瑚礁系统的影响比其他动物群更直接、更快. Ma等^[45]利用U-Th测试,认为珊瑚礁在末次间冰期开始发育,在间冰期结束时停止生长,一直处于停滞状态,直到海平面再次上升到适合珊瑚生长的位置,然后珊瑚礁开始垂直发育. 扁平村大型珊瑚礁的发育为黔南地区格舍尔期曾出现过一段气候温暖的时期提供了证据.

造礁珊瑚 *Fomitchevella* 以笠状为主垂直向上生长,珊瑚体之间近乎平行排列,这是海平面上升条件下,珊瑚为获取光照、快速向上生长造成的,同样说明此时黔南地区处于气候温暖、海平面上升的间冰期. *Fomitchevella* 珊瑚从底至顶的尺寸变化非常突然,说明黔南地区格舍尔期海平面变化具有快速海侵的特点. 在海平面快速上升的条件下,水体加深, *Fomitchevella* 珊瑚努力向上生长追赶海平面,导致 *Fomitchevella* 的生长速率加快.

黔南地区格舍尔期这一气候温暖事件可以与日本^[46]、北美^[47]、奥地利^[48]及俄罗斯^[49]等地区在晚石炭世晚期发生的变暖事件对比,反映了全球气候变化和相关的海平面波动与冰期有关.

5 结 论

1) 晚石炭世黔南地区发育世界罕见的大型珊瑚礁,根据 *Fomitchevella* 珊瑚礁对黔南地区进行古环境分析和海平面变化幅度计算,认为海平面升高(60±5) m,主要由冰川消融作用引起.

2) *Fomitchevella* 的形态以及快速生长的特点揭示了黔南地区格舍尔期礁体发育时期气候温暖、海平面上升且海侵快速的古环境条件,证实了黔南地区在格舍尔期出现了一段气温相对上升的时间.

3) 黔南地区格舍尔期这一气候温暖事件可以与日本、北美、奥地利及俄罗斯等地区在晚石炭世晚期发生的变暖事件对比,扁平村珊瑚礁的发育反映了全球气候变化和相关的海平面波动与冰期有关.

参考文献:

[1] Veevers J J, Powell L C M. Late Paleozoic glacial episodes in Gondwanaland reflected in transgressive - regressive depositional sequences in Euramerica[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 98 (4): 475-487.

- [2] Gastaldo R A, Dimichele W, Pfefferkorn H W. Out of the icehouse into the greenhouse: a late Paleozoic analog for modern global vegetational change [J]. *GSA Today*, 1996, 6 (10): 1-7.
- [3] Isbell J L, Miller M F, Wolfe K L, et al. Timing of late Paleozoic glaciation in Gondwana: was glaciation responsible for the development of northern hemisphere cyclothem? [J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 2003, 370: 5-24.
- [4] Isbell J L, Henry L C, Gulbranson E L, et al. Glacial paradoxes during the late Paleozoic ice age: evaluating the equilibrium line altitude as a control on glaciation [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(1): 1-19.
- [5] Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P, et al. Stratigraphic imprint of the Late Paleozoic Ice Age in eastern Australia: a record of alternating glacial and nonglacial climate regime [J]. *Journal of the Geological Society*, 2008, 165 (1): 129-140.
- [6] Falcon-Lang H J, Dimichele W A. What happened to the coal forest during Pennsylvanian glacial phases? [J]. *Palaios*, 2010, 25: 611-617.
- [7] Gulbranson E L, Montañez I P, Schmitz M D, et al. High-precision U-Pb calibration of carboniferous glaciation and climate history, Paganzo Group, NW Argentina [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122 (9/10): 1480-1498.
- [8] Montañez I P, Poulsen C J. The late Paleozoic Ice Age: an evolving paradigm [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, 41: 629-656.
- [9] 杨兵, 夏浩东, 杨欣杰, 等. 晚古生代冰期研究进展 [J]. 地质科技情报, 2016, 35(2): 140-151.
(Yang Bing, Xia Hao-dong, Yang Xin-jie, et al. Paleozoic ice age: review of recent progress [J]. *Geological Scientific Information*, 2016, 35(2): 140-151.)
- [10] David S A, Ethan L G, Thomas E, et al. Isotope stratigraphy and paleodepth changes of Pennsylvanian cyclical sedimentary deposits [J]. *Palaios*, 1988, 3(5): 487-506.
- [11] Crowley T J, Baum S K. Estimating Carboniferous sea-level fluctuations from Gondwanan ice extent [J]. *Geology*, 1991, 19(10): 975-977.
- [12] Soreghan G S, Giles K A. Amplitudes of Late Pennsylvanian glacioeustasy [J]. *Geology*, 1999, 27(3): 255-258.
- [13] Maynard J R, Leeder M R. On the periodicity and magnitude of Late Carboniferous glacio-eustatic sea-level changes [J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149(3): 303-311.
- [14] Burton R, Kendall C, Lerche I. Out of our depth: on the impossibility of fathoming eustasy from the stratigraphic record [J]. *Earth-Science Reviews*, 1987, 24(4): 237-277.
- [15] 巩恩普, 张永利, 关长庆, 等. 世界石炭纪生物礁发育基本特征 [J]. 古地理学报, 2010, 12(2): 127-139.
(Gong En-pu, Zhang Yong-li, Guan Chang-qing, et al. Main features of the Carboniferous organic reefs in the world [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(2): 127-139.)
- [16] 关长庆, 巩恩普, 姚玉增, 等. 黔南扁平村晚石炭世生物礁生物群落分析 [J]. 古地理学报, 2004, 6(3): 339-346.
(Guan Chang-qing, Gong En-pu, Yao Yu-zeng, et al. Biocoenose community analysis of Bianping reefs of the Late Carboniferous in southern Guizhou Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(3): 339-346.)
- [17] 巩恩普, 董旭明, 张永利, 等. 贵州南部石炭纪叶状藻礁古生态学特征 [J]. 地质论评, 2009, 55(5): 731-736.
(Gong En-pu, Dong Xu-ming, Zhang Yong-li, et al. Paleocological characteristics of the carboniferous phylloid algal buildups in Southern Guizhou [J]. *Geological Review*, 2009, 55(5): 731-736.)
- [18] 巩恩普, 张永利, 关长庆, 等. 黔南石炭纪生物礁造礁群落的基本特征 [J]. 地质学报, 2007, 81(9): 1183-1194.
(Gong En-pu, Zhang Yong-li, Guan Chang-qing, et al. Primary features of reef-building communities of Carboniferous reef in South Guizhou Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(9): 1183-1194.)
- [19] 曾允孚, 刘文均, 陈洪德. 华南右江复合盆地的沉积构造演化 [J]. 地质学报, 1995, 69(2): 113-124.
(Zeng Yun-fu, Liu Wen-jun, Chen Hong-de. Evolution of sedimentation and tectonics of the Youjiang composite basin, South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1995, 69(2): 113-124.)
- [20] 覃建雄, 陈洪德. 右江盆地层序充填序列与古特提斯海再造 [J]. 地球学报, 2000, 21(1): 62-70.
(Qin Jian-xiong, Chen Hong-de. Sequence filling succession and Paleo-Tethyan sea reconstruction of the Youjiang basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 21(1): 62-70.)
- [21] 关长庆, 巩恩普, 张永利, 等. 黔南晚石炭世礁相地层中造礁生物 *Tubiphytes* 研究 [J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 219-226.
(Guan Chang-qing, Gong En-pu, Zhang Yong-li, et al. *Tubiphytes* in reef strata of the Late Carboniferous in South Guizhou Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 219-226.)
- [22] 关长庆, 巩恩普, 张永利, 等. 黔南晚石炭世造礁珊瑚 *Ivanovia* cf. *Manchurica* 古生态特征及成礁机制探讨 [J]. 地质论评, 2006(2): 178-183, 293.
(Guan Chang-qing, Gong En-pu, Zhang Yong-li, et al. Palaeoecological characteristic of *Ivanovia* cf. *Manchurica* coral and the reef mechanism of the Late-Carboniferous in the South of Guizhou Province [J]. *Geological Review*, 2006(2): 178-183, 293.)
- [23] 王增吉. 中国的石炭系 [M]. 北京: 地质出版社, 1990: 419.
(Wang Zeng-ji. Carboniferous in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 419.)
- [24] Holz M, Souza P A, Iannuzzi R. Sequence stratigraphy and biostratigraphy of the Late Carboniferous to Early Permian glacial succession (Itararé subgroup) at the eastern-southeastern margin of the Paraná Basin, Brazil [J]. *Special Papers of Geological Society of America*, 2008, 441: 115-129.
- [25] Rygel M C, Fielding C R, Frank T D, et al. The magnitude of Late Paleozoic glacioeustatic fluctuations: a synthesis [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2008, 78: 500-511.
- [26] 刘本培, 李儒峰, 尤德宏. 黔南独山石炭系层序地层及麦粒蜓带冰川型全球海平面变化 [J]. 地球科学, 1994, 19(5): 553-564, 715.
(Liu Ben-pei, Li Ru-feng, You De-hong. The Carboniferous sequence stratigraphy in Dushan, Southern Guizhou and glacier-type global sea level change in maiming zone [J]. *Earth Science*, 1994, 19(5): 553-564, 715.)
- [27] 李儒峰, 刘本培, 赵澄林. 黔南 *Triticites* 带旋回层序碳同位素特征及冰川型海平面变化 [J]. 地质学报, 1996, 70(4): 342-350.
(Li Ru-feng, Liu Ben-pei, Zhao Cheng-lin. Tcharxteristics of cycle-sequence carbon isotope features and glacio-eustasy of the *Triticites* zone in southern Guizhou [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(4): 342-350.)
- [28] 吴亚生, 范嘉松. 根据生物礁定量计算茅口期全球海平面变化幅度 [J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31(3): 233-242.
(Wu Ya-sheng, Fan Jia-song. The range of global sea level change during Maokou period was calculated quantitatively based on reef [J]. *Science in China Series D*, 2001, 31(3):

- 233-242.)
- [29] Pérez - Huerta A, Sheldon N D. Pennsylvanian sea level cycles, nutrient availability and brachiopod paleoecology[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 230(3/4):264-279.
- [30] Wu H, Zhang Y, Stubbs T L, et al. Changhsingian brachiopod communities along a marine depth gradient in South China and their ecological significance in the end-Permian mass extinction[J]. *Lethaia*, 2020, 53(4):515-532.
- [31] Hess H. Crinoids (Echinodermata) from the Lower Jurassic (Upper Pliensbachian) of Arzo, southern Switzerland [J]. *Schweizerische Paläontologische Abhandlungen*, 2006, 126: 9-82.
- [32] Baranova D V, Kabanov P B. Facies distribution of fusulinoid genera in the Myachkovian (Upper Carboniferous, Upper Moscovian) of southern Moscow region [J]. *Rivista Italiana Di Paleontologia E Stratigrafia Paleontol*, 2003, 109:225-239.
- [33] Stevens C H. Distribution and diversity of Pennsylvanian marine faunas relative to water depth and distance from shore[J]. *Lethaia*, 1971, 4(4):403-412.
- [34] Ross C A. Paleogeology of Fusulinaceans [M]. Prague: Academia, 1968.
- [35] Boucot A J. Evolution and extinction rate controls. Developments in palaeontology and stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 1975, 11(3):273-274.
- [36] 陈源仁. 生态地层学原理[M]. 北京:地质出版社, 1992. (Chen Yuan-ren. Principles of ecostratigraphy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.)
- [37] Izart A, Stephenson R, Vai G B, et al. Sequence stratigraphy and correlation of late Carboniferous and Permian in the CIS, Europe, Tethyan area, North Africa, Arabia, China, Gondwanaland and the USA [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 196(1/2):59-84.
- [38] Wang X D, Qie W K, Sheng Q Y, et al. Carboniferous and Lower Permian sedimentological cycles and biotic events of South China [J]. *Geological Society Publications*, 2013, 376: 33-46.
- [39] Shu L S, Yao J L, Wang B, et al. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216:1-30.
- [40] 梅冥相,李仲远. 滇黔桂地区晚古生代至三叠纪层序地层序列及沉积盆地演化[J]. 现代地质, 2004, 18(4):555-563. (Mei Ming-xiang, Li Zhong-yuan. Sequence-stratigraphic succession and sedimentary-basin evolution from Late Paleozoic to Triassic in the Yunnan-Guizhou-Guangxi region [J]. *Geoscience*, 2004, 18(4):555-563.)
- [41] Eros J M, Montanez I P, Osleger D A, et al. Reply to the comment on "Sequence stratigraphy and onlap history of the Donets Basin, Ukraine: insight into Carboniferous icehouse dynamics" [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 363/364:187-191.
- [42] Alekseev A S, Kononova L I, Nikishin A M. The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syncline (Russian Platform): stratigraphy and sea-level changes [J]. *Tectonophysics*, 1996, 268(1):149-168.
- [43] Haq B U, Schutter R. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. *Science*, 2008, 322:64-68.
- [44] Yao L, Jiang G, Mii H S, et al. Global cooling initiated the Middle-Late Mississippian biodiversity crisis [J]. *Global and Planetary Change*, 2022, 215:19-30.
- [45] Ma Y F, Yeman Qina, Yu K F, et al. Holocene coral reef development in Chenhang Island, Northern South China Sea, and its record of sea level changes [J]. *Marine Geology*, 2021, 440:106593.
- [46] Nakazawa T, Ueno K, Kawahata H, et al. Gzhelian-Asselian Palaeoaplysina - microencruster reef community in the Taishaku and Akiyoshi limestones, SW Japan: implications for Late Paleozoic reef evolution on mid-Panthalassan atolls [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2011, 310(3/4):378-392.
- [47] Grossman E L, Yancey T E, Jones T E, et al. Glaciation, aridification, and carbon sequestration in the Permo - Carboniferous: the isotopic record from low latitudes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 268:222-233.
- [48] Samankassou E. Drowning of algal mounds: records from the Upper Carboniferous Lower Pseudoschwagerina limestone [J]. *Carnic Alps*, 1999, 127:209-220.
- [49] Davydov V I, Biakov A S. Discovery of shallow - marine biofacies conodonts in a bioherm within the Carboniferous-Permian transition in the Omolon Massif, NE Russia near the north Paleo-pole: correlation with a warming spike in the southern hemisphere [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(2): 888-897.