

刘世杰, 管琪, 潘明. 桂东北吉维特阶与艾菲尔阶界线碳酸盐岩地球化学特征及古环境意义[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 436-447.
DOI: 10.11932/karst2023y019

桂东北吉维特阶与艾菲尔阶界线碳酸盐岩 地球化学特征及古环境意义

刘世杰^{1,2}, 管琪^{1,2}, 潘明³

(1. 河北地质大学, 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031;
2. 河北地质大学地球科学学院, 河北省战略性关键矿产研究协同创新中心, 河北 石家庄 050031;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘 要: 依托阳朔县龙岩口艾菲尔阶与吉维特阶界线剖面, 采集碳酸盐岩样品 10 个, 通过显微特征、元素组分含量及相关元素的比值特征、碳氧同位素数据等, 对该界线附近的古海洋沉积环境进行了分析和探讨。研究表明: ①样品 YS3 层位产牙形刺分子 *Polygnathus intermedius*, 可归属于艾菲尔晚期 *ensensis* 带, 为该层位碳同位素偏移事件、Eiffelian 与 Givertian 界线以及 Kačák 事件提供了准确的时限约束; ②参考 Wilson 的标准微相沉积模式, 结合岩性特征, 识别出 SMF23、SMF16、SMF4 和 SMF15 共四种微相类型; ③通过对碳酸盐岩主、微量元素及其比值分析, 得出以下结论: YS1 至 YS2 对应阶段为沉积水体快速变深, 且具有一定物源供给的沉积环境, 反映了海侵初期, 海洋环境由局限—半局限台地相向斜坡相快速转变的地质过程; YS3 至 YS4 阶段低含量的陆源组分反映了水体较深、海平面相对较高的远岸沉积环境, 该阶段海洋环境以缺氧为典型特征; YS5 至 YS10 阶段陆源组分含量逐渐增加, 出现代表低能环境的放射状鲕粒灰岩, 沉积区海平面呈现出明显下降的趋势, 剖面中多个向上变厚的进积型层序是良好的沉积学响应; ④依据氧同位素, 重建了古海水温度演化曲线, 研究表明该时期海水平均温度为 21 °C, 为温暖的亚热带气候, 与其位于赤道附近的古地理位置相吻合; ⑤样品 YS3 层位碳同位素表现出的负偏移现象与摩洛哥全球界线层型剖面和北美加拿大地区同层位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值曲线特征相吻合, 共同反映了全球尺度海侵背景下的缺氧沉积环境。

关键词: 桂东北; Kačák 事件; 碳酸盐岩; 古环境; 泥盆纪

中图分类号: P588.245 **文献标识码:** A

文章编号: 1001—4810 (2023) 03—0436—12

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引 言

桂林地区泥盆系隶属于华南板块, 随着古特提斯洋的开启, 华南板块南、西和北缘为被动陆缘裂谷性质的大地构造背景^[1-2], 在活动方式上表现为由志

留纪末期的挤压转化为泥盆纪的拉张—裂解。中泥盆世吉维特期开始, 裂谷作用增强, 桂中和桂西地区浅水台地被深水台间盆地切割, 形成棋盘状分布的古地理格局, 桂东北地区则形成了北东向狭长延伸的浅水碳酸盐岩台地和深水台沟相间排列的古地理

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221637, DD20190022)

第一作者简介: 刘世杰(1997—), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 1768993136@qq.com。

通信作者: 管琪(1978—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为成因矿物学与岩石学。E-mail: qiguan926@163.com。

收稿日期: 2022—06—17

格局,这种格局控制了区内沉积相的分异作用及其展布规律。随着研究的深入,华南地区已识别并建立了中晚泥盆世代表不同沉积相类型的层型剖面,如滨岸碎屑岩—碳酸盐岩相的象州大乐和横县六景剖面、深水台间盆地(台沟)相的南丹罗富剖面 and 局限台地相的桂林市唐家湾剖面^[3-4]。依托这些典型剖面,华南泥盆系在生物地层、年代地层和岩石地层研究方面取得了重大进展。

泥盆纪(419.2~358.9Ma)是晚古生代的开端,此时地球经历了剧烈的环境和气候变化,具体表现为全球性海平面升降、海洋缺氧/贫氧以及生物灭绝/更替^[5]。早中泥盆世,地球整体上处于温室气候,海洋动物种类具有多样性,从中泥盆世晚期至晚泥盆世,发生了 Kačák-otomari 和 Frasnian-Famennian 生物灭绝事件,给全球海洋生物的演化造成了巨大影响,其成因同全球性气候变化,海平面的升降以及海洋氧化还原条件的异常变化有着密切的关系^[6]。Kačák 事件(亦称为 otomari 事件),在欧洲代表了一次黑色页岩沉积事件,最早由 House 发现并命名^[7],发生在 Eiffelian 与 Givertian 界线(以下简称 E-G 界线)附近,反映了全球海平面的上升和海洋缺氧,具有全球性质^[4,8],在摩洛哥、加拿大、捷克和我国华南六景等地均有报道^[9]。

泥盆纪是地质演化过程中生物和环境演化发生剧烈变化的时期,包括全球性的生物大灭绝事件和碳同位素漂移事件^[10]。广西泥盆系的古生物学及沉积相研究已达到了较高的水平,主要的化石带和沉积相划分都已相当清楚^[11-12],广泛发育的海相碳酸盐岩为在该区系统地开展元素地球化学和稳定同位素地球化学研究奠定了可靠的基础。地质时期古海洋环境的变化,如海水的氧化还原状态、海水盐度、海平面变化、古水深和生产力等信息必然记录在同时期沉积的碳酸盐岩中,岩石的地球化学特征为反演这些信息提供了有效方法、可靠的数据支撑和定量依据^[13-14]。

碳、氧稳定同位素分析是解读碳酸盐岩沉积史、重建古环境及古气候和反演海洋条件变化的主要手段之一^[15],加拿大地区 Kačák-otomari 事件层位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -1.4‰ ~ $+0.2\text{‰}$ 之间波动^[16],我国六景地区 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 0.1‰ ~ 1.6‰ 之间^[4];全球界线层型剖面点即摩洛哥地区的值在 -7‰ ~ -1‰ ^[17]。目前,桂东北地区仍缺乏 E-G 界线附近化学地层和事件地层的研究报道,与加拿大和捷克等地的 Kačák 事件层位相比,

研究区在沉积相和岩石组合方面存在明显差异,其碳同位素波动区间及演化趋势具体如何,还需进一步研究。本文以桂林阳朔地区龙岩口民塘组碳酸盐岩剖面为研究对象,通过微相和地球化学分析,重建关键事件层位的古海洋环境和古气候,可为深化桂东北地区民塘组以及 E-G 界线的认识提供新的依据。

1 区域地质概况

研究区出露地层以泥盆系和下石炭统为主(图1)。自早古生代以来,研究区构造事件频发,经历了加里东旋回、华力西旋回、印支旋回、燕山旋回、喜马拉雅旋回5个构造旋回,期间发生了广西运动、柳江运动、东吴运动、苏皖运动、桂西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动。其中加里东运动关闭了早古生代华南海盆,奠定了区内褶皱基底,伴随海平面的上升^[18],研究区早泥盆世沉积了一套海陆交互的信都组碎屑岩沉积组合,中泥盆世晚期海水从钦防一带继续向北侵入,研究区开始了海相碳酸盐岩的沉积历史,晚泥盆世至早石炭世形成了台—盆(沟)相间的古地理格局,奠定了复杂的沉积相变体系格架,印支运动终结了研究区海相沉积的历史,转入陆内演化新阶段,从而形成了区内复杂的构造面貌。

中泥盆世晚期至早石炭世是桂林碳酸盐岩发育的关键时期。中泥盆世晚期,研究区沉积分异作用开始发生,在局限—半局限台地区沉积了唐家湾组白云岩、泥晶灰岩,在开阔台地相区则沉积了东岗岭组泥质灰岩、泥灰岩;晚泥盆世,由于引张作用持续增强,在地壳深陷处,形成了盆地或台沟,沉积了代表深水环境的榴江组硅质岩,在台地前缘斜坡相至边缘相区沉积了巴漆组泥晶灰岩、燧石条带灰岩,五指山组扁豆状灰岩以及融县组亮晶鲕粒灰岩,在相对浅水环境的台地上则沉积了厚达千米的桂林组、融县组、额头村组粒屑灰岩和白云岩等;早石炭世继承了晚泥盆世的古地理格局,在台地相区沉积了尧云岭组和英塘组泥晶灰岩和硅质岩,在盆地相区沉积了鹿寨组碳质页岩。

研究区艾菲尔末期海侵达到高潮,兴坪至阳朔一带相继发生了不均衡凹陷,在唐家湾组白云岩基础上沉积了一套纹层状泥晶灰岩和薄层燧石条带泥晶灰岩,同沉积褶皱构造十分发育。因此,唐家湾组在桂林至阳朔一带所代表的沉积相并不完全相同,

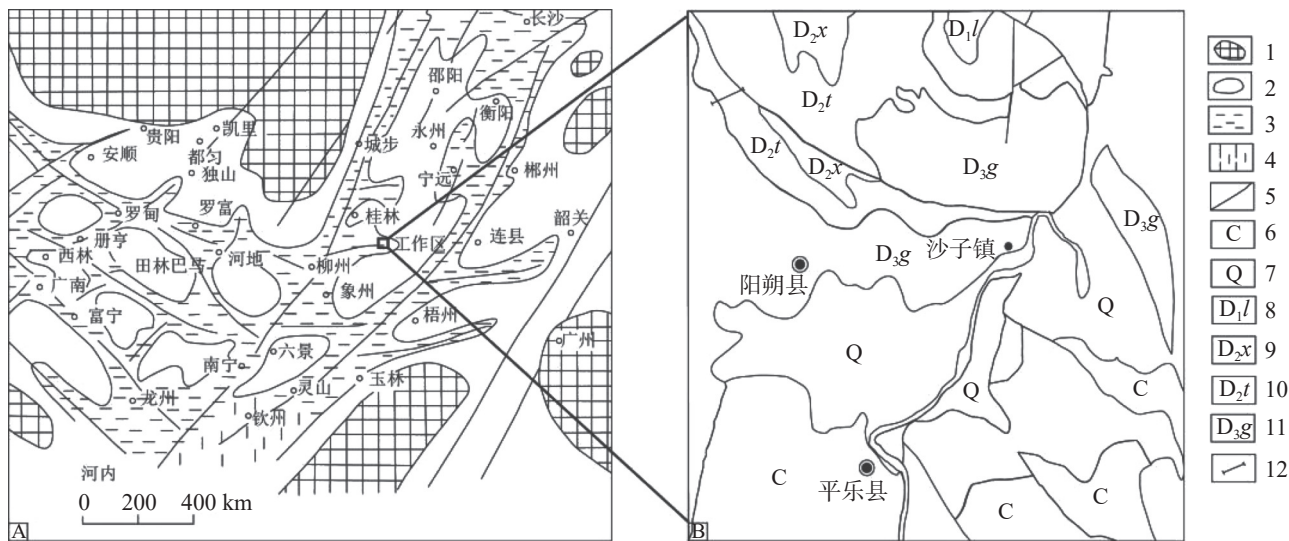


图 1 研究区晚泥盆世岩相古地理图和地质图

1-古陆 2-浅海沉积区 3-半深海沉积区 4-深海沉积区 5-断裂构造线 6-石炭系 7-第四系 8-莲花山组 9-信都组 10-唐家湾组 11-桂林组 12-剖面位置

Fig. 1 Lithofacies palaeogeographic map and geological map in the late Devonian of the study area

1-ancient land; 2-shallow-sea sedimentary area; 3-semi deep-sea sedimentary area; 4-deep-sea sediment area; 5-fracture; 6-Carboniferous strata; 7-Quaternary; 8-Lianhuashan Formation; 9-Xindu Formation; 10-Tangjiawan Formation; 11-Guilin Formation; 12-section location

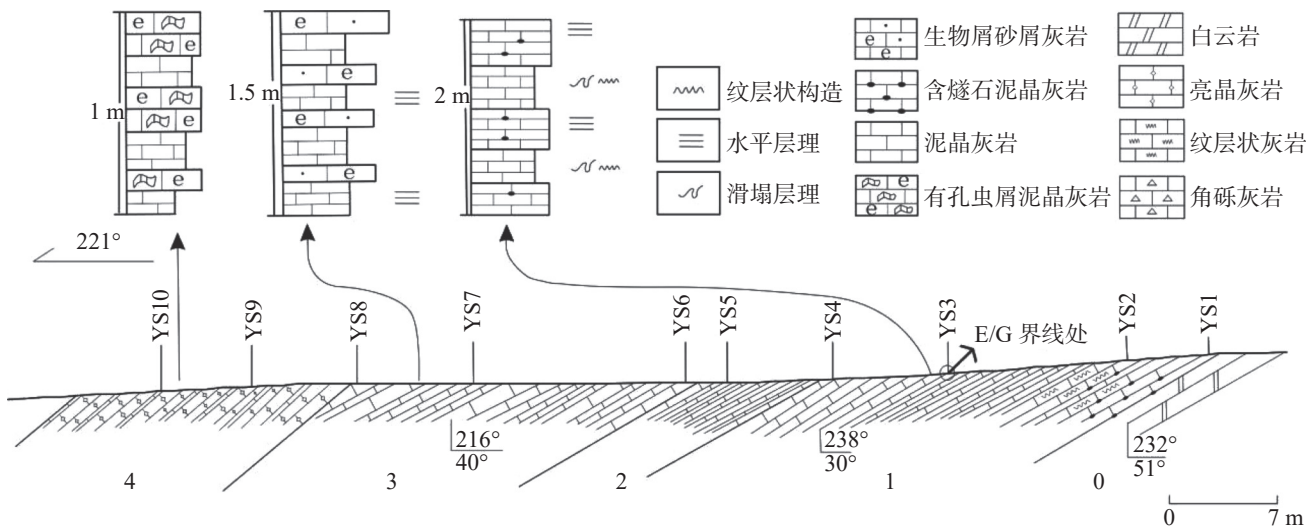


图 2 阳朔县龙岩口剖面及采样位置图

Fig. 2 Longyankou section and sampling location map of Yangshuo

唐家湾建组剖面为局限一半局限台地相,本研究剖面的唐家湾组下部白云岩所代表的沉积相与建组剖面相同,而上部具同沉积褶皱构造的颗粒灰岩则反映了斜坡相的沉积特征(图 2)。

2 剖面沉积特征

2.1 地层沉积特征

艾菲尔阶与吉维特阶界线实测剖面位于桂林市阳朔县龙岩口村(E110°39'11", N24°49'42"),剖面走

向 221°,采集样品 10 件,露头情况良好,同沉积褶皱十分发育,岩石地层划分标志清晰,研究区正在开展 1:5 万区域地质调查工作,西部已开展过 1:5 万兴坪幅和福利圩幅区调工作,具有一定研究基础。

0 层:灰色中层至中厚层状粉晶白云岩(图 3A),向上逐渐变厚至厚层,单层厚度约 60 cm,见 2 个向上变厚的沉积韵律,单个韵律厚度 2.8 m。岩石表层可见较好刀坎状溶痕。

1 层:灰色—灰黑色薄层含燧石泥晶灰岩与纹层状生物屑藻砂屑灰岩组成的沉积韵律(图 2),两者厚

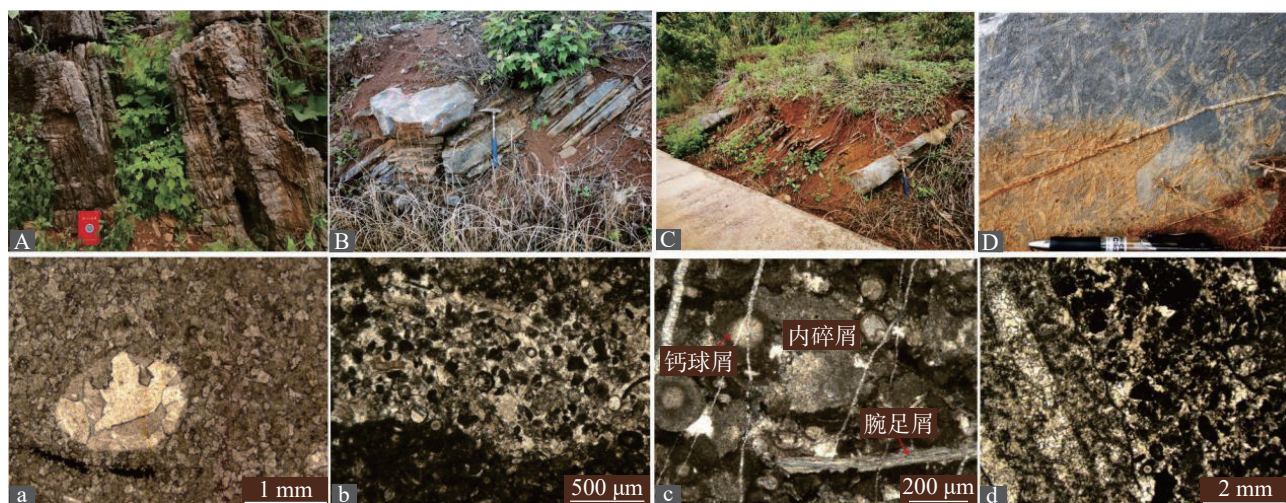


图 3 龙岩口剖面碳酸盐岩宏观及薄片显微特征

A-细晶白云岩 a-细晶白云岩显微照片 B-纹层状生物屑藻砂屑灰岩 b-生物屑藻砂屑灰岩显微照片 C-向上变厚的沉积特征
c-泥晶生物屑砂屑灰岩显微照片 D-层孔虫生物屑灰岩 d-泥晶藻砂屑鲕粒灰岩显微照片

Fig. 3 Macroscopic and microscopic characteristics of carbonate rocks in Longyankou section

A-fine crystalline dolomite; a-micrograph of fine crystalline dolomite; B-layered bioclastic and algal limestone; b-micrograph of bioclast and algae limestone;
C-sedimentary characteristics of upward thickening; c-micrograph of micrite bioclastic limestone; D-stromatoporoid and
bioclastic limestone; d-micrograph of micritic oolitic limestone

度比 2 : 1。燧石含量较少,零星出露于层面接触部位,纹层状生物屑藻砂屑灰岩层的同沉积滑塌层理十分发育,反映了斜坡相沉积特征,顶部为中层状泥亮晶砂屑灰岩。在样品 YS3 处产牙形分子 *Polygnathus intermedius*,该牙形分子最早由 Wittekindt 发现并对其进行命名^[19],其主要产出于艾菲尔晚期,在研究区可归属于 Eiffelian 顶部 *ensensis* 带。

2 层:灰黑色—黑色薄层泥晶灰岩,以薄层为主要特征,见较好纹层状构造反映了沉积速率较低的相对深水沉积环境。

3 层:灰色—灰黑色薄层泥晶灰岩(发育水平层理)与中薄层泥晶生物屑砂屑灰岩组成的沉积韵律,两者厚度比 5 : 1,形成向上变厚的进积型沉积层序。

4 层:灰色中层状泥晶藻砂屑鲕粒灰岩与薄层泥晶灰岩组成的沉积韵律,两者厚度比 2 : 1,总体显向上变厚的进积型沉积层序(图 2),中层状泥晶灰藻砂屑鲕粒灰岩层面可见比较丰富的双孔层孔虫化石(图 3D),镜下可见放射状藻鲕粒(图 3d)。

剖面中碳酸盐岩的层厚与颗粒粗细在垂向上有着较为规律的变化,总体上呈现出一个由浅到深再变浅的过程,即白云岩沉积阶段海水相对较浅,为局限—半局限台地沉积环境,随后岩性由细晶白云岩转变为具有滑塌特征的纹层状泥晶灰岩,沉积水体

表现出一个较为明显的由浅到深的快速转变过程,最后在 3、4 层表现出多个向上变厚的进积型层序,出现代表低能环境的放射状鲕粒灰岩,沉积相由斜坡相转变为台地相,反映了沉积区海水逐渐变浅的趋势。

2.2 典型样品岩石学特征

细晶白云岩:样品基本上由晶粒白云石组成,约占样品总量 97%。均匀分布。结晶粒度 $<0.25\sim0.06$ mm, 细晶级。样品中还包含有石英、铁质和泥质等。

纹层状不等晶生物屑藻砂屑灰岩:不等晶生物屑藻砂屑结构,层状构造。样品基本上由藻内碎屑、生物屑和填隙物共同组成。藻内碎屑约占样品总量 35%,粒度基本上属砂屑级内碎屑,为蓝绿藻及其分泌物粘结方解石质灰泥在塑—半塑性条件下沉积盆内破碎、沉积而成。生物屑约占样品总量 30%,属砂屑级生物屑,门类以钙球屑为主,棘皮屑、双壳屑、介形虫屑、有孔虫屑等次之。填隙物约占样品总量 33%。分布于藻内碎屑、生物屑之间,对藻内碎屑、生物屑起胶结作用(相当于基底式胶结)。

泥晶生物屑砂屑灰岩:泥晶生物屑砂屑结构,层状构造。样品基本上由内碎屑、生物屑和填隙物共同组成。内碎屑约占样品总量 67%,粒度属砂屑级内碎屑,次棱角状、次圆状、圆状,磨蚀度较低而分

选好。生物屑约占样品总量 25%, 粒度属砾砂级生物屑, 门类以钙球屑为主。填隙物约占样品总量 6%, 结晶粒度为泥晶级, 对内碎屑、生物屑起胶结作用(相当于接触式胶结)。

泥晶藻砂屑鲕粒灰岩: 生物碎屑结构, 层状构造。样品基本上由生物屑、内碎屑、藻鲕粒和填隙物共同组成。生物屑约占样品总量 50%, 粒度基本上属砾砂级生物屑, 门类以珊瑚屑和钙球屑主见, 粒度两级分化, 以砾级和细砂级为主。内碎屑约占样品总量 25%, 粒度基本上属砂屑级内碎屑, 次棱角状、次圆状、圆状, 磨蚀度较低而分选较好。藻鲕粒约占样品总量 <6%, 为放射鲕, 呈次圆状、圆状, 圆度极好, 鲕核为内碎屑构成。填隙物约占样品总量 23%, 成分为方解石, 结晶粒度粉—泥晶为主, 对生物屑、内碎屑、藻鲕粒起胶结作用(相当于孔隙式胶结)。

2.3 碳酸盐岩微相划分

碳酸盐岩中的颗粒类型及其特征是划分微相类型、分析沉积环境的重要依据^[20]。本文根据碳酸盐岩薄片颗粒的相对含量、类型、主要生物化石特征等并参考 Wilson 的标准微相及其相模式^[21]将龙岩口剖面出露的碳酸盐岩识别出 4 种微相类型。

微相 1(MF1)无化石灰泥岩或泥晶白云岩: 该微相以富含细晶白云石为特征, 具层状构造, 内部几乎没有颗粒或生屑, 该微相可与标准微相 SMF23 相对比, 主要沉积于局限—半局限台地沉积环境。

微相 2(MF2)似球粒藻粘结灰岩: 该微相以富含藻内碎屑为特征, 具有藻内碎屑、生物屑和填隙物各自偏集呈层纹—条纹—条带状特点, 生物屑以钙球屑主见, 棘皮屑、双壳屑、介形虫屑、有孔虫屑等次见, 该微相可与标准微相 SMF16 相对比, 主要沉积于开阔台地环境。

微相 3(MF3, 图 3c)生屑—内碎屑泥粒灰岩: 该微相以较少量的生屑颗粒和大量的内碎屑颗粒为特征, 岩石为颗粒支撑, 颗粒间充填有少量的泥晶基质, 该微相可与标准微相 SMF4 相对比, 主要沉积于斜坡相低能环境。

微相 4(MF4, 图 3d)鲕粒颗粒灰岩, 含放射鲕: 该微相含有放射鲕颗粒为特征, 以包壳圈层放射状排列为特征的放射鲕通常形成于低能的局限—半局限台地环境, 该微相可与标准微相 SMF15 相对比。

3 测试结果及检验

3.1 样品测试与结果

本次研究按照岩性组合特征划分为 6 层, 共采集碳酸盐岩样品 10 个, 对每个样品分别进行了主微量元素分析和碳氧同位素分析。

主量和微量元素测试工作在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 测试方法要点: 主量元素由荷兰 PANalytical 生产的 Axios 仪器利用熔片 X 射线荧光光谱法(XRF)测定, 并采用等离子光谱和化学法测定进行相互检测。微量元素和稀土元素采用美国 Perkin Elmer 公司生产的 Elan9000 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。主量元素分析精度和准确度优于 5%, 微量、稀土元素分析精度和准确度优于 10%。

碳氧同位素测试工作在国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成。检测器为 MAT253 质谱仪。分析程序: 首先将样品加入反应瓶, 密闭, 充气针送氦气, 并抽出瓶中空气(8 min)。自动进样器中边加酸边进行样品分析, 样品加酸与分析之间间隔 1 h, 从而保证反应进行完全。反应生成的 CO₂ 由氦气带入 MAT253 检测器, 高能电子束轰击离子化, 经过加速电场, 不同质荷比(m/z44、m/z45、m/z46)气态离子进入磁场分离成不同的离子束, 进入接收器并转换为电信号, 测定碳氧同位素比值。碳氧同位素分析精度为 0.20‰。测试结果详见表 1。

3.2 地球化学数据的有效性检验

海相碳酸盐岩受到成岩作用以及后期改造作用的影响, 所蕴含的原始海水信息有可能会受到不同程度的失真。因此, 为了确保样品的碳氧同位素组成能够较为真实地反映古海洋信息, 必须对测试数据的有效性进行检验。依据前人的研究成果^[22], 当 $\delta^{18}\text{O} < -5\text{‰}$ 时, 表明样品已经遭受了成岩蚀变作用的影响, 但其碳氧同位素组成仍可以反映原始海水信息; 当 $\delta^{18}\text{O} < -10\text{‰}$ 时, 样品所代表的原始海水信息已经失真。还有一部分学者认为, 通过分析碳、氧同位素数据是否具有线性关系也可以判别其有效性, 如果两者之间存在线性关系则表明碳酸盐岩遭受了成岩蚀变, 这样的数据将不能够真实的反映古海洋信息。本文采集的 10 个样品, 数据在 $-5\text{‰} \sim -9\text{‰}$ 之间(表 1), 且平均值为 -6.9‰ , 且两者之间不具有线性关系(图 4), 表明数据是有效的。

表 1 阳朔县龙岩口剖面碳酸盐岩元素及同位素数据

Table 1 Element and isotope data of carbonate rocks in Longyankou section of Yangshuo

样号	YS1	YS2	YS3	YS4	YS5	YS6	YS7	YS8	YS9	YS10
SiO ₂	1.194	6.041	0.701	0.439	0.483	0.361	0.545	0.662	0.570	0.740
TiO ₂	0.013	0.081	0.010	0.009	0.007	0.008	0.007	0.010	0.011	0.006
Al ₂ O ₃	0.241	1.584	0.101	0.054	0.057	0.091	0.074	0.157	0.129	0.076
TFe ₂ O ₃	0.115	0.632	0.047	0.026	0.069	0.047	0.063	0.088	0.068	0.038
MnO	0.008	0.008	0.004	0.005	0.005	0.007	0.005	0.005	0.003	0.004
MgO	3.862	4.863	0.663	0.562	0.771	0.540	0.712	0.676	0.864	0.665
CaO	50.306	44.675	54.313	54.775	54.543	54.908	54.446	54.402	54.267	54.541
Na ₂ O	0	0.024	0.015	0.017	0.013	0.010	0.017	0.010	0.001	0.010
K ₂ O	0.082	0.620	0.036	0.012	0.021	0.020	0.023	0.046	0.038	0.020
P ₂ O ₅	0.017	0.047	0.018	0.017	0.015	0.011	0.012	0.016	0.010	0.010
LOI	43.717	40.567	43.480	43.618	43.577	43.678	43.545	43.601	43.599	43.526
V	5.06	26.10	5.06	3.94	2.18	2.03	1.80	6.33	3.68	2.09
Ni	6.41	12.40	6.70	6.33	6.60	6.22	5.93	7.23	6.32	6.03
Sr	161	186	238	204	270	197	258	275	252	210
La	1.02	3.75	0.59	0.40	0.92	0.62	0.74	1.09	0.63	0.62
Cr	1.62	7.84	0.91	0.75	1.00	0.73	1.22	1.55	1.04	0.86
Ce	1.92	7.82	1.24	0.72	1.77	1.12	1.46	2.18	1.32	1.08
δ ¹³ C	-3.23	-2.83	-7.05	-2.72	-1.38	-2.88	-1.33	-1.09	-1.44	-1.86
δ ¹⁸ O	-6.86	-5.82	-7.18	-7.34	-6.69	-7.75	-7.23	-8.47	-5.62	-6.41
MgO/CaO	0.077	0.109	0.012	0.010	0.014	0.010	0.013	0.012	0.016	0.012
Ce/La	1.88	2.09	2.10	1.80	1.92	1.81	1.97	2.00	2.10	1.74
V/Cr	3.12	3.33	5.56	5.25	2.18	2.78	1.48	4.08	3.54	2.43
古温度/ <i>t</i> /℃	21	16	22	23	20	25	22	28	15	19

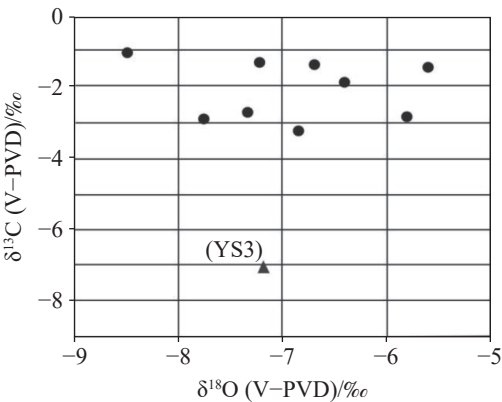


图 4 阳朔县龙岩口剖面碳氧同位素散点分布图

Fig. 4 Carbon and oxygen isotopes scatter diagram of the Longyankou section, Yangshuo

4 地球化学特征

4.1 元素地球化学特征

4.1.1 主量元素特征

剖面中大部分岩石样品中代表陆源元素的 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 含量很低(图 5), 总体反映了远离物

源区的较深水沉积环境。值得注意的是 YS1、YS2, 尤其是 YS2 中的 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 含量明显高于后期沉积的岩石, 主要是因为艾菲尔晚期可能出现了短暂的海退事件, 沉积物中混入了来自陆源的铁质和泥质, 进入吉维特期, 伴随海侵的不断扩大, 陆地面积的持续减小, 沉积区距离物源区不断变远, 能够获得的陆源物质变少。因此, 碳酸盐岩样品中 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 含量在纵向上总体表现出 YS1-YS2 高位降低, YS3-YS6 稳定保持在较低水平, YS7-YS10 小幅逐渐回升的特征。除 YS1 和 YS2 外, 其余样品 CaO 含量较高而且保持稳定在 54.27%~54.91% 之间, 平均值为 54.52%, 十分接近纯灰岩 56% 的化学理论值。MgO 含量在 0.54%~0.862% 之间, 平均值为 0.68%, Σ(CaO+MgO+LOI) 在 98.46%~99.13% 之间, 平均值为 98.78%, 多项指标反映了 Kačák 事件之后比较稳定的沉积环境。

4.1.2 微量元素特征

Ni 值正异常通常被认为与陨石撞击事件或大区域的热液、火山活动等地质灾变事件有关^[4], 其次 Ni

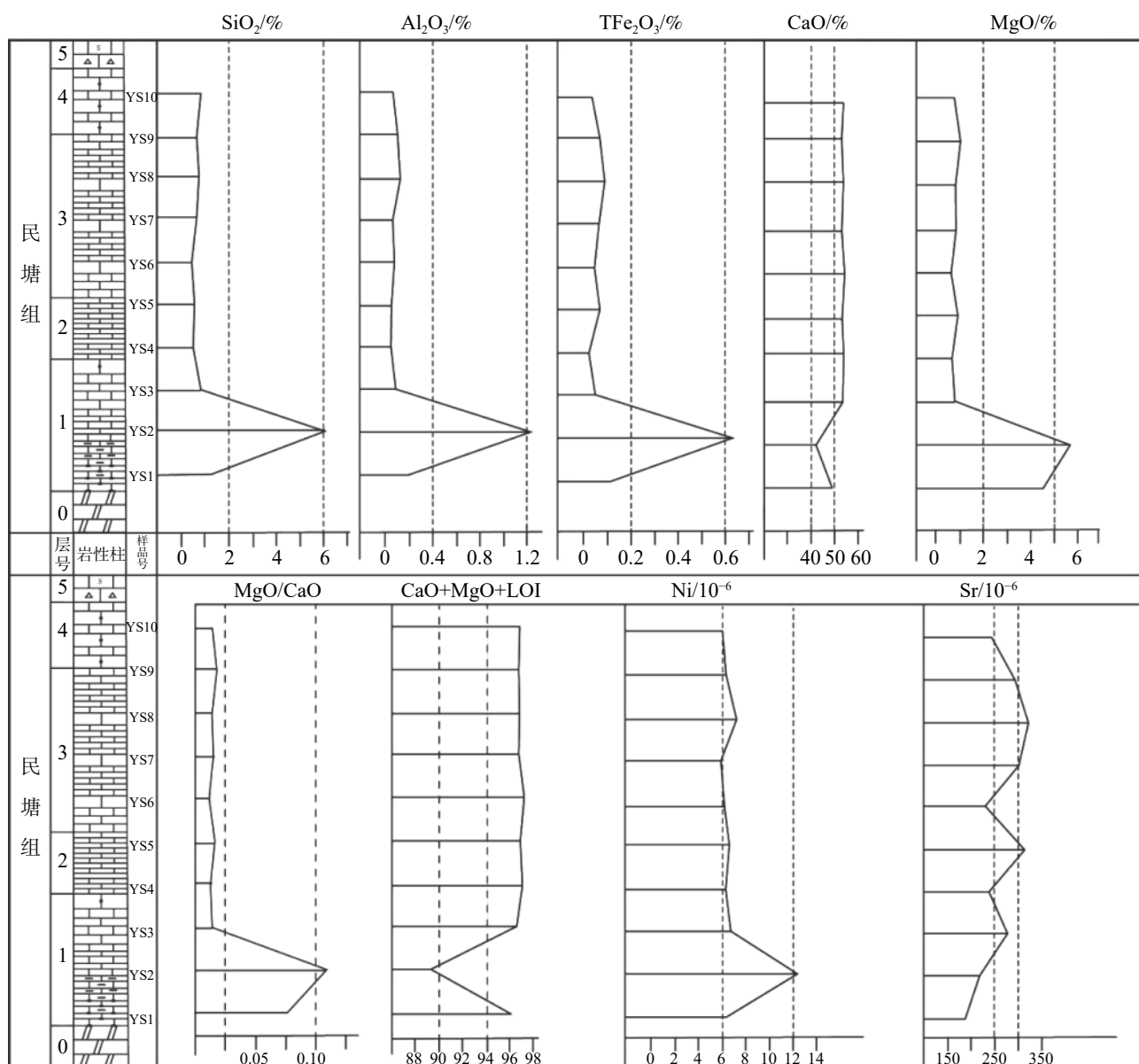


图5 龙岩口剖面碳酸盐岩主要元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分布特征

Fig. 5 Variation curves of major(%) and trace elements($\times 10^{-6}$) in carbonate rocks of Longyankou section

容易受到黏土矿物的吸附作用,如果沉积区距物源区较近,外源输入的黏土物质增多也会导致Ni含量的增加。本文样品中Ni含量介于 $5.93 \times 10^{-6} \sim 12.4 \times 10^{-6}$ 之间,数值波动范围大,在样品YS2处有一次明显的正异常且达到峰值 12.4×10^{-6} 。Sr具有较强的迁移能力,通常情况下,靠近物源区的沉积物中Sr值较低,伴随沉积水体的加深,Sr元素含量逐渐增加,因此Sr元素在纵向上的增加可作为水体加深标志^[23],文中Sr元素平均含量为225.1,YS1和YS2处最低,YS3至YS8总体呈现出波动中上升的趋势。

4.2 碳、氧同位素特征

剖面中,大部分样品碳同位素介于 $-1.09\text{‰} \sim$

-2.83‰ 之间,保持平稳趋势;但值得注意的是,在YS3处(-7.05‰)与YS6处(-2.88‰)表现出两次明显的负偏移,其中YS6处偏移幅度为 -1.5‰ ,YS3处偏移幅度高达 -4.22‰ ;氧同位素值从YS1处开始就表现出在波动中下降的趋势,在YS8处达到最低值 -8.47‰ ,而在YS9处发生显著正偏移,偏移幅度为 -2.85‰ 。

5 讨论

5.1 古海水温度

$\delta^{18}\text{O}$ 值不仅受古海水盐度的影响,也会受到古

海水温度的制约。据前人研究表明, $\delta^{18}\text{O}$ 值可作为恢复古海水温度的可靠指标, 本文采用前人提出并校正的古水温(t)计算公式^[24]:

$$t(^{\circ}\text{C}) = 15.976 - 4.2 \times (\delta^{18}\text{O} - \Delta\delta^{18}\text{O} + 0.22) + 0.13 \times (\delta^{18}\text{O} - \Delta\delta^{18}\text{O} + 0.22)^2 \quad (1)$$

式中: $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 为所有有效样品 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与第四系海相碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值(-1.2‰)的差值^[25]。由此获得古海水温度数据见表 1, 海水平均温度为 21°C , 反映了温暖的亚热带气候, 与其位于赤道附近的古地理气候相吻合。但在 YS2 和 YS8 处 (15°C 和 16°C) 存在两次较为明显的低温时期。

5.2 古气候

前人多以 MgO/CaO 比值作为古气候变化的识别标志^[26](表 1)。灰岩中较低的 MgO/CaO 值, 表明了潮湿的气候条件; 较高的 MgO/CaO 值, 代表了干燥的气候条件^[27]。纵向上, 本文碳酸盐岩样品 MgO/CaO 的值阶段变化较为明显, 在 YS1 和 YS2 处 MgO/CaO 的平均值为 0.092, 在 YS3 至 YS10 的 MgO/CaO 的平均值为 0.012, 反映出沉积期间气候从干燥到潮湿的快速转变过程, 是沉积区水体快速变深的气候响应。

5.3 氧化还原环境

稀土元素中 La 值受古氧化还原环境条件的影响较小, 大量实际应用表明, Ce/La 值对于古氧化还原条件非常敏感, 可很好地指示古氧相^[28]。当该值小于 1.8 时, 指示富氧条件, 当该值处于 1.8~2.0 时, 指示贫氧条件, 当该值大于 2, 代表厌氧环境。本文数据 YS1-YS10 平均值为 1.94, 反映了整体为贫氧-

厌氧的沉积环境, 尤其 YS2 和 YS3 两处比值均大于 2, 指示了厌氧的强还原环境(图 6A)。此外, V/Cr 值也经常作为判断氧化还原环境的特征指标^[29], 当 $2 < \text{V}/\text{Cr} < 4.25$ 代表贫氧环境, $\text{V}/\text{Cr} > 4.25$ 代表厌氧环境。YS1-YS10 平均值为 3.38, YS3 和 YS4 两处比值分别为 5.56 和 5.25(图 6B), 与 Ce/La 值具有十分相似的指示特征。

5.4 古水深与离岸距离

YS1 和 YS2 具有高的 MgO/CaO 值以及代表陆源性质的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 含量, 指示了具有一定物源供给的近岸沉积环境, 反映了海侵初期, 海洋环境由浅至深的快速转变过程。YS3 和 YS4 两处的 V/Cr 和 Ce/La 值明显高于其他层位, 而 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 含量明显降低, 这种典型的厌氧环境、纹层状泥晶灰岩以及低含量的陆源组分反映了沉积水体较深、海平面相对较高的远岸沉积环境。YS5 至 YS10 各项指标具有较小范围的波动性, 其中陆源组分含量逐渐增加, 岩石中代表较高水体动能的亮晶灰岩出现, 说明沉积区海平面呈现出在波动中下降的趋势, 多个向上变厚的进积型层序以及亮-泥晶藻鲕粒灰岩是良好的沉积学响应。

5.5 E-G 界线附近 Kačák 事件的对比分析

显生宙中在关键界面或边界附近的 $\delta^{13}\text{C}$ 漂移事件与古海洋中的生物灾变事件、氧化还原条件和海平面变化等因素有直接关系^[30]。Kačák 事件(亦称 Otomari 事件)发生于艾菲尔阶牙形刺 *ensensis* 带内, 位于摩洛哥 Jebdel Mech Irdane 剖面 E/G 界线附近, 代表了一次海平面大规模快速上升, 缺氧环境条件

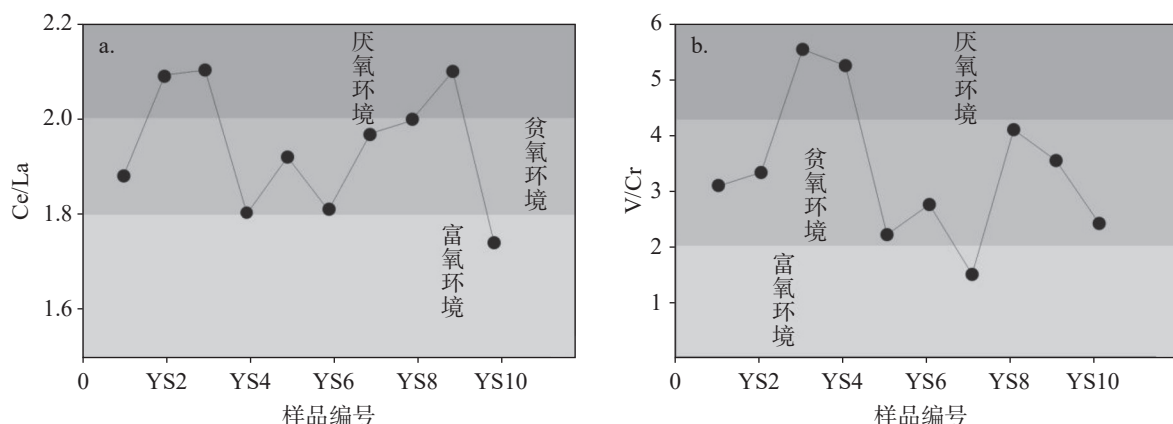


图 6 龙岩口剖面碳酸盐岩氧化还原环境判别

Fig. 6 Discrimination of redox environment of carbonate rocks in Longyankou section

下的沉积事件。前人研究表明,加拿大地区横跨中泥盆统的剖面中,出现两次 $\delta^{13}\text{C}$ 的负漂移,分别由 0.8‰到-0.3‰和-0.3‰到-0.8‰;摩洛哥地区 E/G 界线处,碳酸盐岩样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 同样存在负偏移现象^[17]。因此, E/G 界线处 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 的负漂移普遍被认为是 Kačák 事件的响应^[31]。本剖面样品 YS3 层位产牙形分子 *Polygnathus intermedius*, 归属于艾菲尔晚期 *ensensis* 带,代表了该层位的时限约束(图 7),样品 YS3 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出明显负偏移,然后迅速正偏移的特征,负偏移幅度达-4.22‰,正偏移幅度为-5.67‰,与上述摩洛哥的全球 E/G 界线层型剖面 and 加拿大地区同层位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值曲线特征相吻合(图 7)。共同反映了全球尺度海侵背景下的缺氧沉积环境,纹层状层理、滑塌褶曲以及显著的地球化学特征是其良好的沉积学响应。

6 结 论

通过对阳朔龙岩口中泥盆统民塘组剖面的岩石学和地球化学分析,得出以下几点新认识:

(1) 参考 Wilson 划分的 24 个标准微相及其相模式,可以识别出无化石泥晶灰岩或白云岩、似球粒藻粘结灰岩、生屑—内碎屑泥粒灰岩和含放射鲕颗粒灰岩 4 种微相类型,进而划分出局限台地相、斜坡相、开阔台地相 3 个沉积亚相;

(2) 综合岩石学、元素地球化学和碳氧同位素分析结果,YS1-YS2 阶段为沉积环境快速变深,且具有一定物源供给的沉积环境,由唐家湾组白云岩到具滑塌褶曲特征的薄层泥晶灰岩,反映了海侵初期,海洋环境由局限-半局限台地向斜坡相快速转变的地质

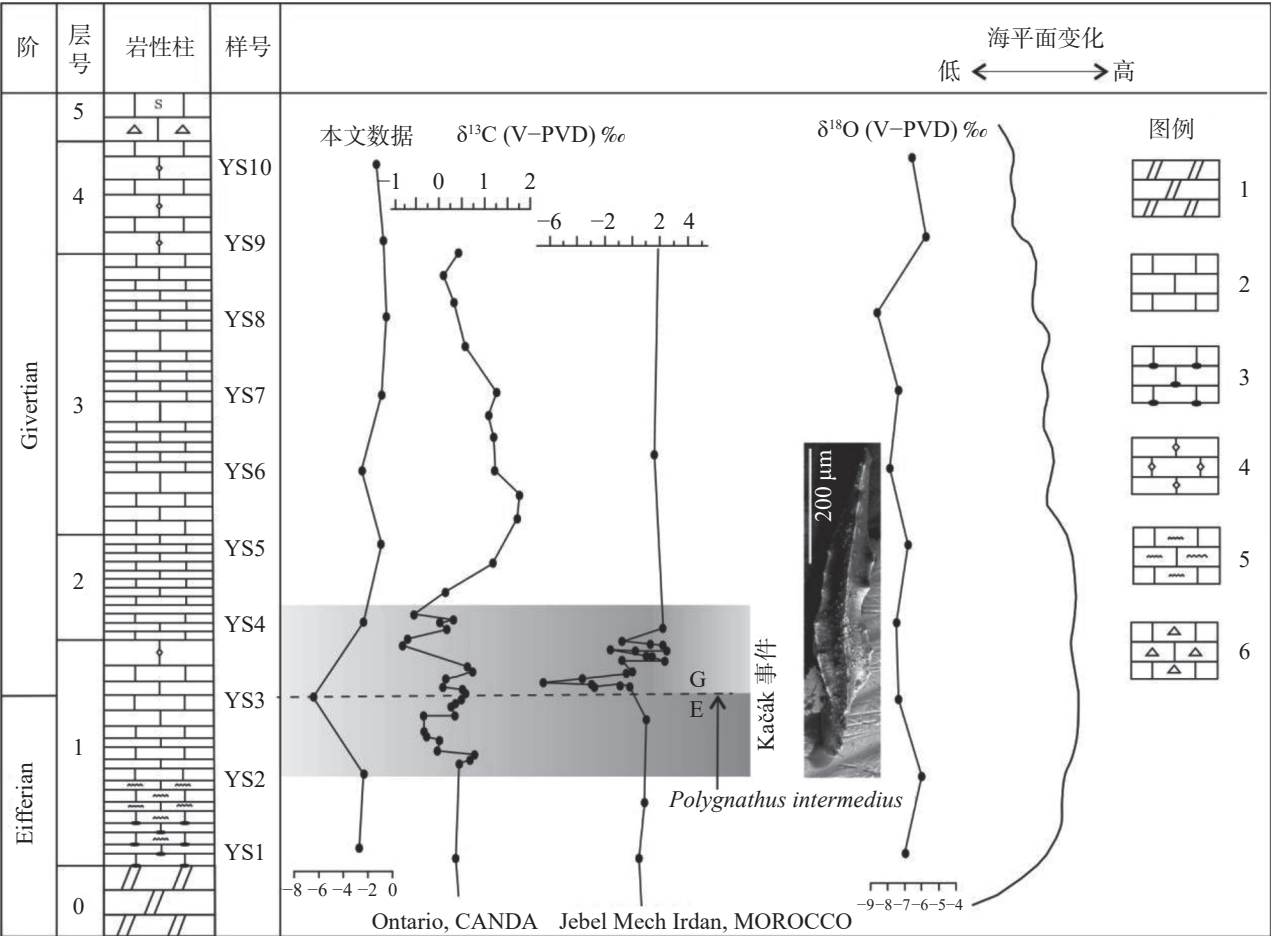


图 7 碳同位素演化曲线(包括本文数据曲线,加拿大 Ontario 地区的数据曲线,摩洛哥地区曲线)及海平面变化曲线
1-白云岩 2-灰岩 3-含燧石灰岩 4-亮晶灰岩 5-纹层状灰岩 6-角砾灰岩
Fig. 7 The evolution curve of carbon isotopes (including the data of this paper, carbon isotope curves in Ontario, Canada and carbon isotope curve in Morocco), sea level change curve
1-dolomite; 2-limestone; 3-chert limestone; 4-sparry limestone; 5-layered limestone; 6-breccia limestone

过程;YS3 和 YS4 阶段低含量的陆源组分反映了水体较深、海平面相对较高的远岸沉积环境,该阶段海洋环境以缺氧为典型特征,具有全球一致性;YS5 至 YS10 各项指标波动性较小,其中陆源组分含量逐渐增加,岩石中代表低能环境的放射状鲕粒灰岩的出现,说明沉积区海平面呈现出明显下降的趋势,剖面中多个向上变厚的进积型层序是良好的沉积学响应;

(3) 样品 YS3 层位产牙形刺分子 *Polygnathus intermedius*, 可归属于艾菲尔晚期 *ensensis* 带,为该层位碳同位素表现出的负偏移现象提供了较为精准的时限约束。与摩洛哥 E-G 界线全球层型剖面 and 加拿大地区同层位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值曲线特征相吻合,共同反映了全球尺度海侵背景下的缺氧沉积环境,是 Kačák 事件的沉积学响应。

参考文献

- [1] 曾允孚, 陈洪德, 张锦泉, 刘文均. 华南泥盆纪沉积盆地类型和主要特征[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 104-113.
ZENG Yunfu, CHEN Hongde, ZHANG Jinquan, LIU Wenjun. Types and main characteristics of Devonian sedimentary basin in South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(3): 104-113.
- [2] 陈洪德, 曾允孚. 右江盆地的性质及演化讨论[J]. 岩相古地理, 1990(1): 28-37.
CHEN Hongde, ZENG Yunfu. Nature and evolution of the Youjiang Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 1990(1): 28-37.
- [3] 郭文, 张朝锋, 王晓鹏. 天峨-南丹地区泥盆系罗富组页岩气成藏条件及有利区预测[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(1): 22-26, 123.
GUO Wen, ZHANG Chaofeng, WANG Xiaopeng. Geological conditions for shale gas accumulation and favorable area prediction of Luofu Formation of Devonian in Tian'e-Nandan area[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2018, 32(1): 22-26, 123.
- [4] 刘疆, 白志强. 广西横县六景泥盆系艾菲尔阶—吉维特阶之交化学地层研究[J]. 地质论评, 2008(5): 683-693, 724.
LIU Jiang, BAI Zhiqiang. Chemostratigraphy of Eifelian-Givetian stage boundary at Liujiang section, Guangxi, South China[J]. Geological Review, 2008(5): 683-693, 724.
- [5] Thomas J Suttner, Erika Kido, Carlo Corradini, Stanislava Vodráková, Monica Pondrelli, Luca Simonetto. Conodont diversity across the late Eifelian Kačák Episode of the southern Alpine realm (central Carnic Alps, Austria/Italy)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 479: 34-47.
- [6] Joachimski M M, Breisig S, Buggisch W, Talent J A, Mawson R, Gereke M, Morrow J R, Day J, Weddige K. Devonian climate and reef evolution: Insights from oxygen isotopes in apatite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 284: 599-609.
- [7] House M R. Correlation of mid-Paleozoic ammonoid evolutionary events with global sedimentary perturbations[J]. Nature, 1985, 313: 17-22.
- [8] Michal M. Lingulate brachiopods across the Kačák Event and Eifelian–Givetian boundary in the Barrandian area, Czech Republic[J]. Bulletin of Geosciences, 2019, 94(2): 169-186.
- [9] Walliser O H, Bultynck P, Weddige K. Definition of the Eifelian–Givetian stage boundary[J]. Episodes, 1995, 18(3): 107-115.
- [10] Becker R T, Gradstein F M, Hammer O. The Devonian Period[M]//The Geological Time Scale. 2012, 559-601.
- [11] 王成源, 陈波, 邝国敦. 广西南宁大沙田下泥盆统那高岭组的牙形刺[J]. 微体古生物学报, 2016, 33(4): 420-435.
WANG Chengyuan, CHEN Bo, KUANG Guodun. Lower Devonian conodonts from the Nagaoling Formation of the Dashatian section near Nanning, Guangxi, South China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2016, 33(4): 420-435.
- [12] 王成源. 广西中部泥盆系二塘组的牙形刺[J]. 古生物学报, 1981(5): 400-405, 489.
WANG Chengyuan. Conodonts from Devonian Ertang Formation in central Guangxi[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1981(5): 400-405, 489.
- [13] 黄晶, 储雪蕾, 常华进, 冯连君. 三峡地区埃迪卡拉系陡山沱组帽碳酸盐岩的微量元素和稀土元素研究[J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3498-3506.
HUANG Jing, CHU Xuelei, CHANG Huajin, FENG Lianjun. Trace element and rare earth element of cap carbonate in Ediacaran Doushantuo Formation in Yangtze Gorges[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(22): 3498-3506.
- [14] 储雪蕾, 张同钢, 张启锐, 冯连君, 张福松. 蓟县元古界碳酸盐岩的碳同位素变化[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003(10): 951-959.
- [15] Hladíková J, Hladil J, Kříbek B. Carbon and oxygen isotope record across Pridoli to Givetian stage boundaries in the Barrandian basin (Czech Republic)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1997, 132(1): 225-241.
- [16] Gröcke Darren R, van Hengstum Peter J. Stable isotope record of the Eifelian–Givetian boundary Kačák–otomari Event (Middle Devonian) from Hungry Hollow, Ontario, Canada[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2008, 45(3): 353-366.
- [17] Brooks B Ellwood, Stephen L Benoist, Ahmed El Hassani, Christopher Wheeler, Rex E Crick. Impact ejecta layer from the Mid-Devonian: Possible connection to global mass extinctions[J]. Science, 2003, 300: 1734-1737.
- [18] 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(4): 555-563.
MEI Mingxiang, LI Zhongyuan. Sequence-stratigraphic succession and sedimentary-basin evolution from late Paleozoic to triassic in the Yunnan-Guizhou-Guangxi region[J]. Geoscience, 2004(4): 555-563.

- [19] Klapper G. Sequence within the conodont genus *polygnathus* in the New York lower middle Devonian[J]. *Geologica et Palaeontologica*, 1971, 5(1): 59-79.
- [20] 李飞, 张宁, 夏文臣. 鄂西峡口地区中二叠统栖霞组碳酸盐岩微相及相序[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(1): 23-28.
LI Fei, ZHANG Ning, XIA Wenchen. Carbonate microfacies analysis on Chihhsia Formation (Middle Permian) at Xiakou area, western Hubei Province[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2010, 29(1): 23-28.
- [21] 马永生, 李启明, 关德师. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系马五1-4碳酸盐岩微相特征与储层不均质性研究[J]. *沉积学报*, 1996(1): 22-32.
MA Yongsheng, LI Qiming, GUAN Deshi. Carbonate microfacies characteristics and reservoir heterogeneity of the Ordovician weathering crust(O_{1ms1-4}) of the Zhongbu Gasfield, Ordos Basin, Northwest China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996(1): 22-32.
- [22] 潘明, 郝彦珍, 孙成杰, 吕勇, 山克强. 云南保山普里道利统沉积特征及其对冈瓦纳北缘古海洋环境的指示[J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1382-1396.
PAN Ming, HAO Yanzhen, SUN Chengjie, LV Yong, SHAN Keqiang. Sedimentary characteristics of the Pridolian series in Baoshan, Yunnan Province and their implications for paleomarine environment[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1382-1396.
- [23] 胡明毅. 塔北柯坪奥陶系碳酸盐岩地球化学特征及环境意义[J]. *石油与天然气地质*, 1994(2): 158-163.
HU Mingyi. Geochemical characteristics and environmental significance of Ordovician carbonate rocks in Keping area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology*, 1994(2): 158-163.
- [24] Craig H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters[J]. *Science*, 1961, 133(3467): 1833-1834.
- [25] Longyi S, Jianwei D, Pengfei Z. Paleogeographic significances of carbon and oxygen isotopes in late permian rocks of Southwest China[J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 575-581.
- [26] 潘明, 郝彦珍, 吕勇, 山克强, 苏光祥. 滇东北镇雄西部栖霞—茅口组碳酸盐岩地球化学特征及环境意义[J]. *地质力学学报*, 2017, 23(3): 348-357.
- PAN Ming, HAO Yanzhen, LV Yong, SHAN Keqiang, SU Guangyang. Geochemical characteristics and environmental significance of carbonate rocks in Qixia-Maokou Formation in western Zhenxiong, northeastern Yunnan[J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(3): 348-357.
- [27] 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 邵宏舜, 阎存凤, 王寿庆, 何祖荣. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 1997(1): 66-71.
WANG Suiji, HUANG Xingzhen, TUO Jincai, SHAO Hongshun, YAN Cunfeng, WANG Shouqing, HE Zurong. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997(1): 66-71.
- [28] 王大锐, 白志强. 广西中-上泥盆统界线附近的化学地层学特征[J]. *地层学杂志*, 2002, 26(1): 50-54.
WANG Darui, BAI Zhiqiang. Chemostratigraphic characteristics of the Middle-Upper Devonian boundary in Guangxi, South China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2002, 26(1): 50-54.
- [29] 王纯豪, 韩超, 韩梅, 钟文健. 川西坳陷中段雷口坡组碳酸盐岩地球化学特征及地质意义[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2020, 39(1): 28-36.
WANG Chunhao, HAN Chao, HAN Mei, ZHONG Wenjian. Geochemical characteristics and geological significance of Leikoupo Formation carbonate rocks in the central western Sichuan Depression[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 39(1): 28-36.
- [30] 李忠雄, 管士平. 扬子地台西缘宁蒗泸沽湖地区志留系沉积旋回及锶、碳、氧同位素特征[J]. *古地理学报*, 2001(4): 69-76.
LI Zhongxiong, GUAN Shiping. Sedimentary cycle and strontium, carbon, oxygen isotopes of the Silurian at Lugu Lake region in Ninglang county of western margin of Yangtze platform[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001(4): 69-76.
- [31] Königshof P, Da Silva A C, Suttner T J, Kido E, Waters J A, Carmichael S K, Jansen U, Pas D, Spassov S. Shallow-water facies setting around the Kačák Event: A multidisciplinary approach[J]. *Geological Society Special Publications*, 2016, 423(1): 171-199.

Geochemical characteristics and paleoenvironmental implications of carbonate rocks at the Givertian and Eifelian boundary in northeast Guangxi

LIU Shijie^{1,2}, GUAN Qi^{1,2}, PAN Ming³

(1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;

2. Hebei Province Collaborative Innovation Center for Strategic Critical Mineral Research, College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 3. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The Devonian period, marking the initial phase of the Late Paleozoic era, has garnered considerable attention in recent decades. This heightened interest stems from its intricate climatic fluctuations, recurrent global shifts in sea levels, and a series of consequential biological catastrophes. Of particular captivation is the upper

Devonian-lower Carboniferous in northeastern Guangxi, characterized by a multifaceted paleogeographic configuration known as platform-trench-basin facies. Notably, the stratigraphic progression from basin facies to open platform facies displays a notable continuity, culminating in the formation of a substantial kilometer-thick carbonate rock layer. This unique geological foundation underpins the development of a renowned karst geomorphic landscape, which is globally significant.

Furthermore, this distinctive karst landscape has facilitated the establishment of the international Devonian-Carboniferous boundary auxiliary layer profile, adding another layer of importance to the study of the Devonian system in this region. While prior investigations have primarily concentrated on sedimentary facies, paleontology, pivotal organisms, and event layers like the 'F-F' biological catastrophe event and the D/C boundary layer during the Late Devonian, certain critical events, notably the Kačák-Otomari event in the late middle Devonian, have received comparatively less attention. Moreover, a comprehensive global-scale comparative analysis has been lacking.

Given these gaps, the present study investigates a critical juncture, the boundary between the Eifelian and Givertian systems, situated in Longyankou village, Yangshuo county. A meticulous examination was carried out, involving the collection of ten carbonate rock samples from this specific section. Through a comprehensive analysis encompassing microscopic features, elemental compositions, ratios, as well as carbon and oxygen isotope data, the study aimed to elucidate and discuss the ancient oceanic sedimentary environments in proximity to this location. Our findings can be summarized as follows:

(1) The presence of *Polygnathus intermedius*, a conodont fossil, is observed within the YS3 sample layer, attributed to the late Eifelian period. This fossil aids in establishing a precise temporal boundary for both the carbon isotope migration event and the Kačák event within this stratum. (2) By employing Wilson's established microfacies sedimentary model in conjunction with lithological traits, four distinct microfacies types, SMF23, SMF16, SMF4, and SMF15, have been successfully distinguished. (3) Through meticulous geochemical analysis, we draw several significant conclusions regarding the sedimentary environment during various stages: The sedimentary environment during the YS1 to YS2 transition demonstrates rapid deepening of sedimentary water and a consistent material source supply. This mirrors the geological process of swift transformation from limited platform facies to slope facies during the initial transgression phase; the low terrigenous component content during YS3 and YS4 stages indicates a distant shoreline sedimentary environment with deep waters and relatively elevated sea levels. Notably, this stage is characterized by widespread hypoxia, displaying global uniformity; Geochemical indicators for YS5 to YS10 stages exhibit minor fluctuations. Notably, the terrigenous component content gradually increases, while the appearance of radial oolitic limestone signifies a low-energy environment. Simultaneously, the sedimentary area witnesses a significant sea level decline, characterized by thicker upward progradational sequences that provide excellent sedimentary responses. (4) Reconstructing the paleoseawater temperature evolution curve based on oxygen isotope data reveals an average seawater temperature of 21 °C during the studied period. This temperature profile reflects a warm subtropical climate, aligning with the paleogeographic proximity to the equator. (5) The observed negative migration of carbon isotopes corresponds with the E/G boundary stratotype profile in Morocco and the carbon isotope curve characteristics observed in Canada within the same horizon as sample YS3. In summary, these findings emphasize the prevalence of a deep-water and anoxic sedimentary environment amidst a global-scale transgressive backdrop.

Key words northeast Guangxi, Kačák event, carbonate rocks, paleoenvironment, Devonian

(编辑 张玲)