



移动阅读

乔丹, 张彪, 银河, 等, 2024. 川西北上寺剖面下三叠统飞仙关组一段砾屑灰岩沉积特征及成因[J]. 沉积与特提斯地质, 44(2): 384–398. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.07001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.07001)

QIAO D, ZHANG B, YIN H, et al., 2024. Features and origin of calcirudites in the first member of Feixianguan Formation in Guangyuan area, northwestern Sichuan Province [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(2): 384–398. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.07001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.07001)

川西北上寺剖面下三叠统飞仙关组一段砾屑灰岩沉积特征及成因

乔丹^{1,2}, 张彪³, 银河^{1,2}, 段雄⁴, 时志强^{1,2*}

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059; 3. 中海油研究总院海外评价中心, 北京 100028; 4. 西华师范大学国土资源学院, 四川南充 637002)

摘要: 广元上寺剖面早三叠世砾屑灰岩对上扬子地区 P-T 事件后的古环境变化研究具有重要的理论意义。本文以下三叠统飞仙关组一段格里斯巴赫亚阶的砾屑灰岩为研究对象, 通过沉积学、岩石学方法, 结合不同砾屑灰岩碳、氧同位素变化特征来分析其可能的成因。结果表明, 这些砾屑灰岩可划分出 4 大类: 剖面下部的 I 型砾屑灰岩, 形状不规则, 大小混杂, 缺乏板条状砾屑, 推测为重力流成因; II 型砾屑灰岩(角砾状灰岩)砾屑直径大, 含大量分米级板条状砾屑, 推测为强度和频率急剧增加的风暴诱发的沉积; III 型砾屑灰岩(扁平砾屑灰岩)的砾屑平行于层面分布, 平面上呈扁平状, 垂向切片呈竹叶状, 具有倒“小”字、菊花状构造和局部呈叠瓦状排列等特征, 推测为机械—压溶复合成因; IV 型砾屑灰岩显示为蠕虫状灰岩, 代表着水动力条件相对较弱的环境, 推测为生物—机械复合成因。风暴对先期沉积的灰岩的撕裂是扁平砾屑形成的基础, 后期成岩过程中泥质填隙物与灰岩砾屑的差异压实是扁平砾屑灰岩形成的又一原因。蠕虫状灰岩可能为生物—风暴、成岩作用共同的结果, 与扁平砾屑灰岩在成因上有一定的联系。上寺剖面飞一段碳酸盐岩碳同位素曲线显示有缓慢上升的趋势, 角砾状灰岩(II 型砾屑灰岩)发育后期碳同位素发生正偏, 指示着沉积环境的过渡转折, 可能和这一时期风暴作用对海洋的影响致使浮游微生物繁盛有关。

关键词: 早三叠世; 格里斯巴赫亚阶; 飞仙关组一段; 扁平砾屑灰岩; 蠕虫状灰岩

中图分类号: P581

文献标识码: A

Features and origin of calcirudites in the first member of Feixianguan Formation in Guangyuan area, northwestern Sichuan Province

QIAO Dan^{1,2}, ZHANG Biao³, YIN He^{1,2}, DUAN Xiong⁴, SHI Zhiqiang^{1,2*}

(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. Overseas Assessment Center, CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 4. College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

Abstract: The Early Triassic calcirudites in the Shangsi section, Guangyuan city, have great significance for the study of

收稿日期: 2022-02-09; 改回日期: 2022-04-15; 责任编辑: 郭秀梅; 科学编辑: 邓奇

作者简介: 乔丹(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为沉积学。E-mail: jilin8819636@163.com

通讯作者: 时志强(1972—), 男, 教授, 博士, 研究方向为事件沉积学与油气储层。E-mail: szqcudt@163.com

资助项目: 四川省科技计划项目(2021YJ0353); 国家自然科学基金(41272131)

paleoenvironmental changes after the latest Permian mass extinction (LPME) in the Upper Yangtze region. In this paper, we studied the possible cause of formation of the Griesbachian calcirudites from the first member of the Feixianguan Formation, using the methods of sedimentology, petrology, and C-O isotopic geochemistry. The results show that these calcirudites can be subdivided into four types: Type-I calcirudites appear in the lower part of the section, with irregular shapes, mixed sizes, and a lack of lath-shaped gravels, indicating a gravity flow origin; Type-II calcirudites contain an abundance of decimeter-sized flat pebbles with large gravel diameters, suggesting storm-induced deposition with increased intensity and frequency; Type-III calcirudites show flat gravels distributed in parallel with the bedding plane and "bamboo leaf-shaped" gravels in the vertical section, with the characteristics of a chrysanthemum-shaped structure and imbricate arrangement, suggesting a mechanical and pressure solution origin; Type-IV calcirudites are vermicular limestones, representing a relatively weak water flow condition, suggesting a microbial and mechanical combined origin. Stromatolites altered the earlier limestones, which are the foundation for the formation of flat gravels. Later, argillaceous fillings and differential compaction of calcareous gravels during the diagenetic period constitute another reason for the formation of flat gravels. Vermicular limestones could be a result of the combination of biology and storms with diagenesis, which have a potential connection in cause with flat calcirudites. The carbon isotope curve of carbonate rocks from the first member of the Feixianguan Formation shows a slowly ascending trend, and the carbon isotope curve exhibits a positive shift in brecciated limestone (Type-II calcirudite), indicating a transition of sedimentary environment, which could be the result of thriving planktonic microorganisms in oceans related to storms during this period.

Key words: Early Triassic; Griesbachian; the first member of Feixianguan Formation; flat-pebble conglomerate; vermicular limestone

0 引言

二叠纪与三叠纪之交发生了显生宙以来最为显著的大规模生物集群灭绝事件, 整个地球的生物圈和生态系统面临崩溃性的危机(Erwin, 2006; 罗根明等, 2014; 宋海军和童金南, 2016)。关于这次大灭绝事件, 前人也做了大量的相关研究, 其诱发机制主要有: 二叠纪末期海退、大规模火山喷发、大洋表层生产力的中断以及底层缺氧海水的上涌、深海沉积物中甲烷及二氧化碳的释放等(Hallam and Wignall, 1997; Joachimski et al., 2012; Cui et al., 2013; Wei et al., 2015; Zheng et al., 2021)。三叠纪早期出现了硅质岩缺失(Racki, 1999), 煤层缺失(Retallack et al., 1996), 后生动物礁缺失(Flügel and Kiessling, 2002); 广泛发育于早三叠世古海洋中的以微生物岩、扁平砾屑灰岩及蠕虫状灰岩为代表的“错时相”沉积(Sepkoski, 1991; 赵小明等, 2008, 2010; 时志强等, 2011), 而这种在全球范围内稳定分布的“错时相”沉积代表着早三叠世异常古海洋化学条件(Woods, 2013; Deng et al., 2015)。华南地区沉积了大量连续的二叠系—三叠系碳酸盐岩地层剖面, 扁平砾屑灰岩和蠕虫状灰岩大量发育, 为研究 P-T 事件和事件之后的早三叠世地质提供了独特的地理优势。学者们更多关注 P-T 灭绝事件诱发机制以及事件前后的沉积构造或沉积体, 并

进行描述及成因分析(Tong et al., 2007; Zhang et al., 2020), 鲜有人对不同砾屑灰岩是否有相关性或不同砾屑灰岩是否对环境有启示意义进行系统性研究。本文以广元上寺下三叠统剖面为研究对象, 通过剖面的岩石学特征及碳、氧同位素地球化学特征的研究, 对早三叠世早期砾屑灰岩的形态学特征进行了详细描述, 对砾屑灰岩的成因及对古气候特征进行了探讨。

1 地质背景

广元上寺二叠系—三叠系界线剖面位于上寺镇以北约 1 km, 川陕公路西侧(图 1)。该剖面是我国南方著名金钉子候选剖面之一(Lai et al., 1996), 剖面较为完整地出露自上二叠统大隆组一下三叠统飞仙关组地层, 沉积连续, 为本文研究提供了良好的素材(Rui et al., 1986)。泛大陆时期扬子板块位于赤道附近的古特提斯洋以东地区, 沉积以碳酸盐岩为主(冯增昭, 1997)。晚二叠世长兴期的海侵和构造活动造就了川西北地区浅水碳酸盐岩相和深水海槽相相间的沉积格局, 深水海槽分布在广元、旺苍、开江、梁平等地区, 以黑色泥岩、硅质岩和硅质灰岩沉积为特点(王一刚等, 2009)。大量的锆石年龄显示, 二叠与三叠纪之交(简称 PTB)的时间大致为 252.28 ± 0.08 Ma(Baresel et al., 2017), 为研究 P-T 界线事件确立了年龄依据, Shen et al.(2011)

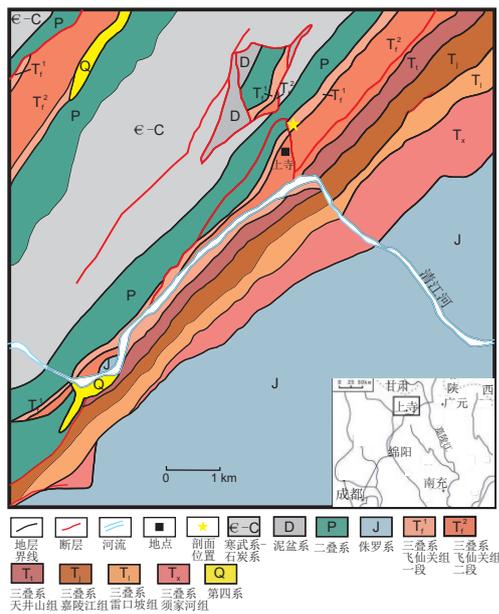


图1 广元上寺剖面地质简图

Fig.1 Geological sketch of the Shangsi section in Guangyuan, Sichuan Province

提出岩浆、火山、气候综合成因的生物灭绝触发机制。有关下三叠统飞仙关组沉积时期的沉积环境一直存在着较大的争议:四川石油地质志编写组(1989)认为川西北广旺地区位于潮间—潮下的斜坡带之上;金若谷等(1987)根据上寺剖面沉积学特征和古生物资料,认为飞仙关组早期沉积经历了三个演化阶段,第一阶段为海水极浅且盐度较高的潮间带,第二阶段水体稍加深,为潮间—潮下带沉积,第三阶段水体变浅为潮间—潮上带的灰泥坪沉积;王一刚等(2005, 2009)认为早三叠世飞仙关早期继承了晚二叠世长兴期碳酸盐岩斜坡的沉积格局,在飞仙关中后期过渡到浅水碳酸盐台地。广元上寺剖面下三叠统飞仙关组一段为早三叠世格里斯巴赫期沉积产物(Wignall and Twitchett, 1999),岩性以深灰色、灰色微晶灰岩、灰质页岩为主,中间和顶部层位夹数层砾屑灰岩(图2),生物不发育,仅含少量双壳、菊石和牙形石等生物(Wignall and Twitchett, 1999),岩层缺乏垂向生物扰动,表明飞仙关组一段主要为台地前缘斜坡沉积。多数学者认为纹层状泥、微晶灰岩是深水沉积的产物,砾屑灰岩是斜坡重力流的标志(赵永胜等, 1994; 冯仁蔚等, 2007; 王一刚等, 2009; 余宽宏等, 2015),而时志强等(2010)并不认为纹层状泥质沉积都代表着深水环境,这与P-T生物灭绝后低能静水的大洋环境

有联系,同时认为砾屑灰岩为风暴浪基面之上的特殊事件沉积。

2 砾屑灰岩沉积特征

广元上寺剖面飞一段自下而上分为六个亚段,其中砾屑灰岩主要产出于二、五和六亚段(图2),本次研究根据砾屑灰岩在剖面中出现的位置、砾屑大小、形态以及成因机制的不同进一步划分为I、II、III和IV型砾屑灰岩(表1),二亚段中砾屑灰岩为重力流成因(I型)(赵永胜等, 1994),五亚段的角砾状灰岩(II型),六亚段下部见扁平砾屑灰岩(III型)、上部夹蠕虫状灰岩(IV型)(图2)。其产出层位、岩石学特征和碳、氧同位素数值存在明显的差异,为不同沉积环境背景下的产物。

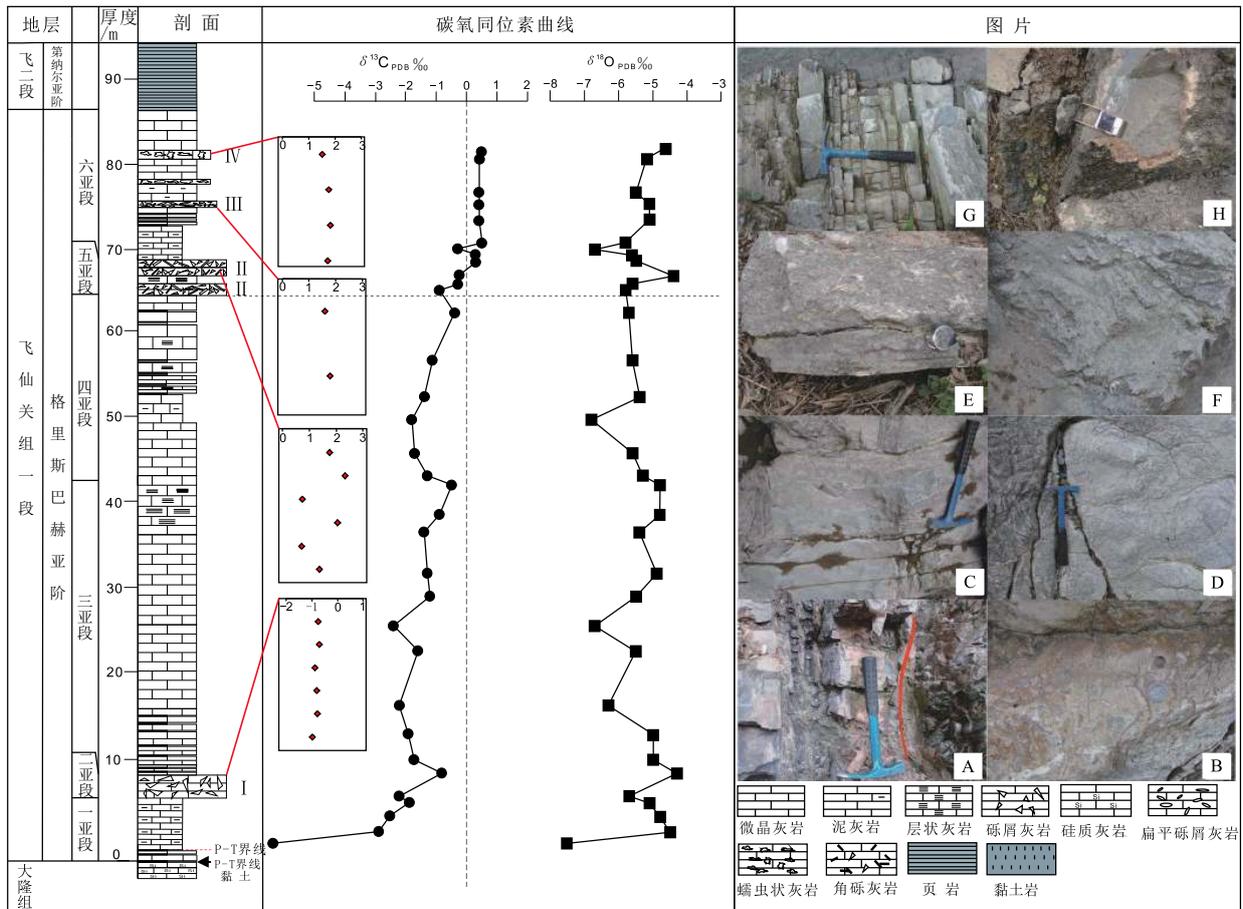
2.1 重力流砾屑灰岩(I型砾屑灰岩)

宏观上,I型砾屑灰岩层其下伏地层为中薄层微晶灰岩(金若谷等, 1987),上覆地层为中薄层泥晶灰岩夹薄层状页岩,层厚约2.68 m。该层颜色为浅灰—灰色,局部因褐铁矿化显黄褐色,砾屑颜色多为深灰色,颜色较深区分于基质(图3A, 3B)。在垂向上,砾屑含量和粒径出现明显的分异性,大致呈递变正粒序层理。下部的砾屑含量较高,约占40%~60%,粒径较大,其长轴大致为0.5~5 cm(图3A)。而上部的砾屑含量约10%,粒径为0.2~0.5 cm,漂浮在基质中(图3B)。砾屑含量高的砾屑灰岩也为杂基支撑,这些砾屑形态多为不规则状,具棱角,磨圆度较差,偶见板条状砾屑。

微观上,砾屑形状差异较大,以不规则球状为主(图4B, 4C),砾屑多顺层排列,生物不发育,含极少量的有孔虫、介形类、钙球等生物(图4B),垂向缺乏生物扰动作用。部分常发生重结晶,在镜下可见砾屑边缘有微弱的不规则溶蚀边缘(图4B, 4C),且含泥质填隙物。基质多为泥晶方解石,偶见生物碎屑(表1)。

2.2 角砾状灰岩(II型砾屑灰岩)

宏观上,II型砾屑灰岩上覆为薄层状钙质页岩,下伏为沙纹层理发育的中层状微晶灰岩,在剖面上共发现2层,累积厚度约2.5 m。其底部与下伏地层具有明显的侵蚀界面和冲刷槽铸模(图2C)。角砾状灰岩层整体颜色为浅灰色,砾屑颜色较基质浅,在野外易于识别。砾屑含量约65%,形态呈椭球状、棱角状以及板条状等,长轴多为10~30 cm,粒径变化较大(图3C, 3D)。砾屑多为颗粒支撑,偶见杂基



A. 上二叠统大隆组与飞仙关组的分界；B. 飞仙关组一段第二亚段沉积特征；C、D. 飞仙关组一段第五亚段沉积特征；E、F. 飞仙关组一段第六亚段沉积特征；G、H. 飞仙关组一段第六亚段蠕虫状灰岩层。碳、氧同位素曲线中，黑色为全岩碳、氧同位素数据，红色为砾屑灰岩基质中碳同位素数据

图2 广元上寺飞仙关组一段剖面特征

Fig. 2 Lithological and isotopic features of the first member of the Feixianguan Formation in Shangsi section

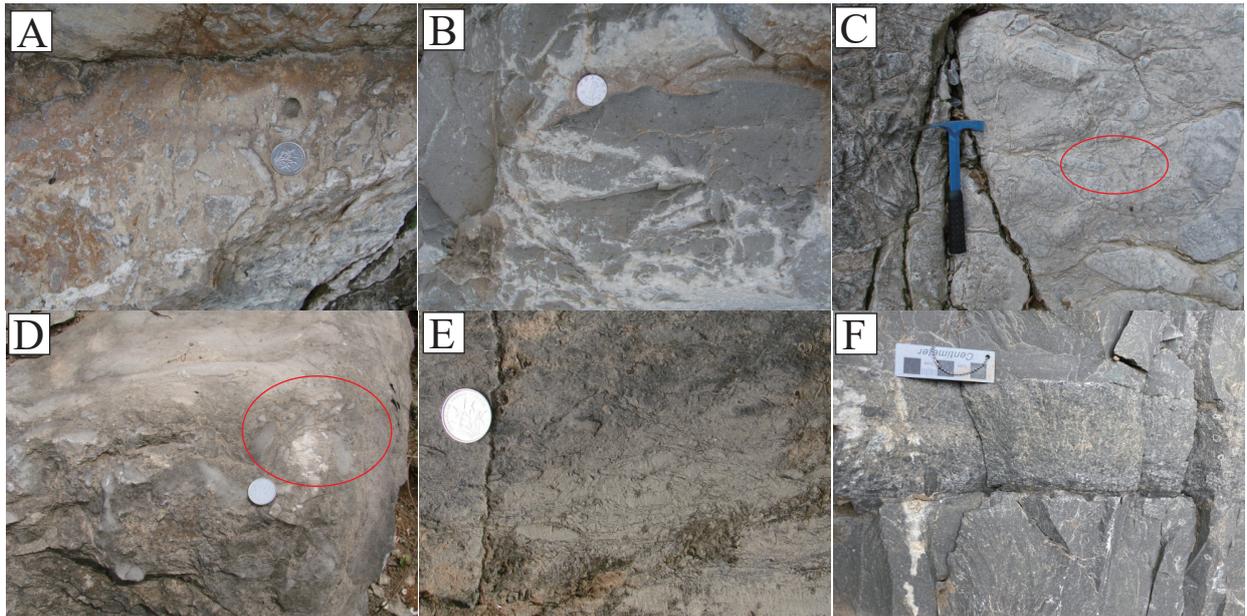
表1 上寺剖面飞仙关组一段砾屑灰岩分类表

Table 1 Classification of calcirudites in the Feixianguan Formation, Shangsi section

序号	岩石名称	砾屑特征	砾屑粒径区间	支撑结构	磨圆度	沉积构造
I	重力流砾屑灰岩	不规则状，见少量板条状	巨砾—细砾	杂基支撑	棱角状—次圆状	粒序构造，块状构造，砾屑“漂浮状”
II	角砾状灰岩	椭球状，大量板条状	中砾—细砾	颗粒支撑，少量杂基支撑	次圆状—圆状	菊花状构造（倒“小”字），沙纹层理
III	扁平砾屑灰岩	竹叶状	中砾	颗粒支撑	次圆状—圆状	叠瓦状构造，递变层理，侵蚀构造
IV	蠕虫状灰岩	不规则蠕虫状，鲕粒和生屑丰富	细砾	颗粒支撑	次圆状—圆状	砾屑边缘见溶蚀锯齿状边缘

支撑。板条状砾屑呈现出指示风暴作用的菊花状构造(倒“小”字构造)(图3C),砾屑边缘见凹凸结构,大致可拼合(图3D)。微观上,砾屑和基质成

分均是泥微晶灰岩,局部有重结晶现象,含有少量铁质,生物碎屑较少(表1)。角砾状灰岩在川西北地区早三叠世地层中广泛分布,在青川大沟里剖面,



A. I型砾屑灰岩,重力流砾屑灰岩; B. I型砾屑灰岩,重力流砾屑灰岩; C. II型砾屑灰岩-角砾状灰岩(红色圈内为倒“小”字构造); D. II型砾屑灰岩-角砾状灰岩(红色圈内的砾屑边缘可拼接); E. III型砾屑灰岩-扁平砾屑灰岩; F. IV型砾屑灰岩-蠕虫状灰岩

图3 上寺剖面飞仙关组一段砾屑灰岩特征

Fig. 3 Characters of calcirudites in the first member of Feixianguan Formation, Shangsi section

砾屑粒径可达米级(时志强等, 2010)。区域上, 角砾状灰岩多发育与风暴有关的沉积构造, 常被解释为一类风暴岩(曾德勇等, 2011)(表1)。

2.3 扁平砾屑灰岩(III型砾屑灰岩)

宏观上, III型砾屑灰岩上覆为飞仙关组一段泥质微晶灰岩, 下伏为页岩, 层厚约0.35~0.4 m。砾屑颜色与基质均为深灰色。砾屑含量较高, 为颗粒支撑, 约占全岩的90%(图3E)。砾屑长轴约1~5 cm, 呈扁平状, 纵切面多为竹叶状, 具有一定的磨圆, 平行于层面分布。发育有小型的似丘状交错层理、菊花状构造以及叠瓦状构造等原生沉积构造(图2E, 2F)。该层与其下伏地层呈不规则突变接触, 侵蚀凹凸面可达10 cm(图2E), 且下伏地层发育反映水动力较强风暴回流的侵蚀沟铸模等构造。前人在该层报道过一些具有风暴岩特征的沉积构造, 如粒序层理、侵蚀冲刷面以及丘状交错层理等(张华等, 2011)。

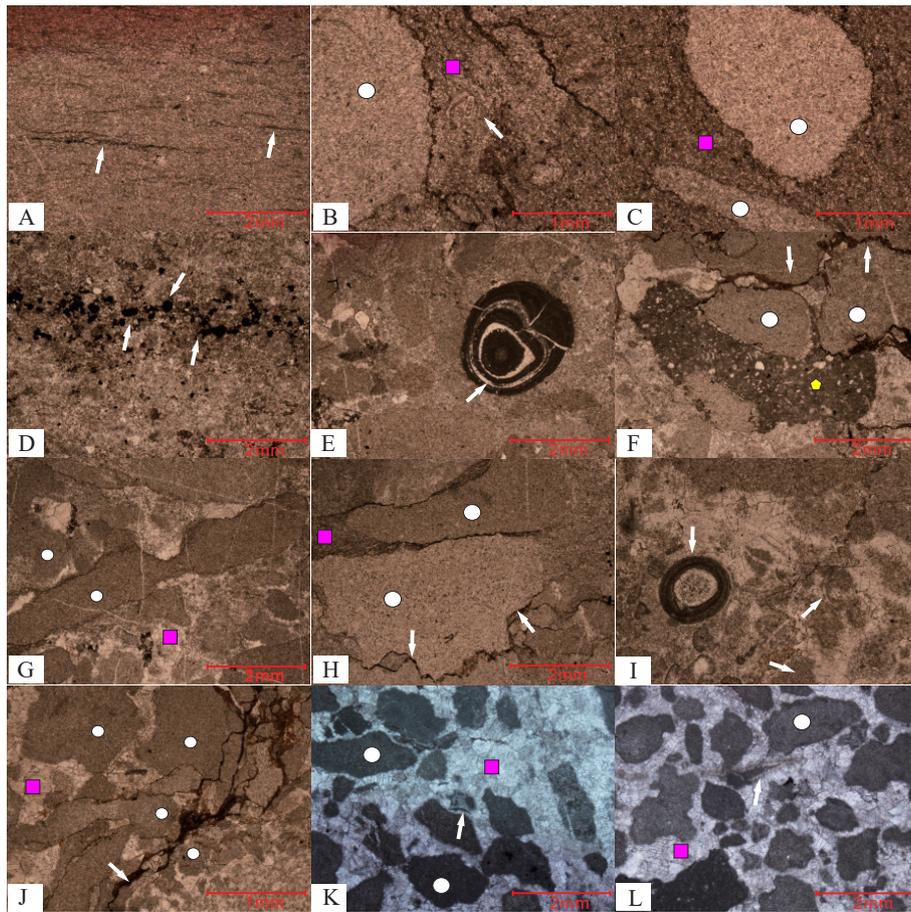
微观上, 砾屑与基质均为微晶灰岩(图4G, 4H), 向上具有递变层理, 部分砾屑呈线状接触(图4H), 有明显的溶蚀和变形边缘, 显示受到压实作用影响。砾屑的接触类型丰富: 如缝合线式、锯齿式、渐变式以及接触边界模糊式, 颗粒间充填铁质

和泥质, 少数砾屑发生重结晶(图4F)(表1)。

2.4 蠕虫状灰岩(IV型砾屑灰岩)

宏观上, IV型砾屑灰岩发育在飞一段近顶部, 其砾屑呈不规则状并且蠕体较小而有别于扁平砾屑灰岩(图2H, 图3F, 图4I-L)。共发育两层蠕虫状灰岩(图2G), 夹于泥灰岩、灰质泥岩之中, 累计厚度约20 m。蠕虫状灰岩的颜色为灰色, 由蠕体和基质两部分组成, 蠕体(砾屑)含量约50%, 基质支撑, 杂乱分布在基质中(图2H, 图3F)。风化面上蠕虫体呈深灰色, 并呈线条状(连续和断续)、粒状、短柱状、絮状和椭球状等特征, 蠕体大小一般长轴为0.5~10 cm, 短轴为0.2~5 mm; 基质填充在“蠕虫体”周围, 颜色较浅, 与蠕虫体界线明显(图3F)。

微观上, 可见极少的鲕粒(图4)、生物碎屑(介形类和双壳类; 图4)。生物碎屑较小且破碎程度较大, 无法识别出具体的种属。蠕体主要由较纯的细粉晶方解石组成, 方解石含量大于90%, 重结晶作用较弱; 基质也主要由方解石组成, 见有重结晶作用, 泥质含量较蠕体多。蠕体与基质呈多种接触关系, 有渐变式、缝合线、锯齿式等。蠕体边缘凹凸不平, 具有溶蚀锯齿状边缘, 并具有较弱的变



A. 下伏于 I 型砾屑灰岩之下的微晶灰岩，黏土、黄铁矿局部集中分布呈条纹状（红色箭头所指）；B. I 型砾屑灰岩砾石呈椭圆状（橙色圆圈所显示位置），沿砾屑边缘发育缝合线，基质中含浮游有孔虫化石（红色箭头所指）；C. I 型砾屑灰岩砾石呈椭圆状、长条状（橙色圆圈所显示位置），与基质（黄色正方形所显示位置）接触边界明显；D. 下伏与 II 型砾屑灰岩之下的微晶灰岩，含少量泥质，较多的黄铁矿（红色箭头所指）；E. III 型砾屑灰岩砾屑边缘模糊，含似核形石颗粒（红色箭头所指）；F、G. III 型砾屑灰岩中砾屑边缘受压溶作用影响而不规则，部分明显的压实变形而呈缝合线接触（红色箭头所指），基质中见陆源细粉砂（蓝色五边形所显示位置）；H. III 型砾屑灰岩含较多杂基填隙物，砾石多呈条状，边缘压溶现象明显（红色箭头所指）；I. 蠕虫状灰岩（IV 型砾屑灰岩）含生屑及鲕粒（红色箭头所指）；J. 蠕虫状灰岩不规则蠕体杂乱分布（橙色圆圈所显示位置），压溶缝合线发育（红色箭头所指）；K、L. 蠕虫状灰岩蠕体形态各异，亮晶胶结，可见生物碎屑（橙色圆圈所显示位置）。图中基质为黄色正方形所示位置

图 4 上寺剖面飞仙关组一段微晶灰岩和砾屑灰岩微观特征

Fig. 4 Microphotos of micrite and calcirudite in the first member of Feixianguan Formation, Shangsi section

形特点，通常与缝合线发育有关(图 4J)。蠕体分散在填隙物中，蠕体间少有直接接触，不具有水流冲刷、拖曳的证据，也没有异地垮塌、滑动的标志，应为同生沉积和沉积分异的结果(表 1)。

3 上寺剖面飞仙关组一段碳、氧同位素特征

3.1 样品与研究方法

研究样品为连续取样自上寺剖面飞仙关组一段灰岩，为降低成岩后期蚀变作用对碳、氧同位素

的影响，在取样过程中尽量避免含方解石脉、表面风化以及含有溶蚀孔洞的岩石。实验样品共 34 块，在室内挑选出新鲜的样品，在无污染的条件下，用玛瑙钵研制成 200 目粉末，烘干后真空条件下用 100% 纯磷酸进行处理。在前期准备工作就绪的情况下，通过 GasBench II 色谱柱，MAT253 真空阀和 Src Heater 烘烤离子相对比标准样品和待测样品进行试验，最后得出碳酸盐岩样品的碳、氧同位素值，所有的数值均是相对 VPDB 标准。

为加强砾屑灰岩层碳同位素变化的沉积环境

解释,本次研究补充了砾屑灰岩基质的碳、氧同位素的测试。挑选出表面新鲜的砾屑灰岩,用超纯水清洗岩石表面,并放入烧杯中加入超纯水,放入超声仪中震荡5分钟,洗净后放入烘干箱中烘干,再用牙钻(0.8 mm)对样品的基质取得粉末样,共18个样品(I型砾屑灰岩6个;II型砾屑灰岩6个;III型砾屑灰岩2个;IV型砾屑灰岩4个),通过上述方法进行测试。

3.2 测试结果

从综合柱状剖面可以看出,上寺剖面飞仙关组一段碳、氧同位素具有明显的变化规律:存在一个明显的正漂移(图2)。在飞仙关组一段下部(1~4亚段) $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-5\text{‰}\sim-1\text{‰}$ 之间小浮动波动,并整体正偏。在飞仙关组上部(5~6亚段) $\delta^{13}\text{C}$ 值从 -1‰ 迅速正偏至 1‰ ,抬升幅度较小,正偏变化的关键点在第五亚段II型砾屑灰岩层至III型砾屑灰岩层过渡段(表2)。而 $\delta^{18}\text{O}$ 的值在 $-7\text{‰}\sim-4\text{‰}$ 之间出现3次小幅度波动。I型砾屑灰岩基质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-0.98\text{‰}\sim-0.71\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 的值在 $-6.7\text{‰}\sim-5.5\text{‰}$;II型砾屑灰岩基质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $0.7\text{‰}\sim2.34\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 的值在 $-7.12\text{‰}\sim-5.26\text{‰}$;III型砾屑灰岩基质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $1.61\text{‰}\sim1.79\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 的值在 -5.5‰ 左右;IV型砾屑灰岩基质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $1.51\text{‰}\sim1.83\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 的值在 $-5.53\text{‰}\sim-6.8\text{‰}$ (表3)。

3.3 碳同位素对海水代表性的评估

飞仙关组一段的碳酸盐岩样品形成至今已有近2.5亿年,在这段地质历史期间,研究区经历了漫长的地质演化。因此,本次研究的样品可能会受到不同程度后期蚀变作用的影响。所获得的碳、氧同位素不一定能够代表当时沉积时古海洋环境。在使用这些同位素数据进行沉积环境分析之前,需对这些数据是否经历了强烈的后期蚀变作用进行判定。目前学者们普遍接受Mn/Sr判别法、氧同位素组成特征判别法和 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 相关性判别法等方法。Mn/Sr比值和 $\delta^{18}\text{O}$ 对后期蚀变作用较敏感,受大气降水的影响,碳酸盐矿物中Sr的含量会减少,Mn的值会增加。当Mn/Sr的值增大时,表明海相碳酸盐岩的蚀变程度较大(Kaumfan et al., 1995)。而氧同位素则对蚀变作用非常灵敏,当成岩后期受大气降水、热液等流体与碳酸盐岩进行水-岩作用时,氧同位素会发生分馏,碳酸盐岩的氧同位素会明显地降低(Kaumfan et al., 1995)。当 $\delta^{18}\text{O}$ 小

表2 上寺剖面飞仙关组1段全岩碳、氧同位素数据
Table 2 Carbon and oxygen isotope data of bulk rock in the Feixianguan Formation, Shangsi section

飞仙关组1段全岩碳、氧同位素			
层位	岩性	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
1层	灰质泥岩	-6.4	-7.5
1层	泥晶灰岩	-2.9	-4.5
1层	纹层状微晶灰岩	-2.5	-4.8
2层	微晶灰岩	-1.9	-5.1
2层	微晶灰岩	-2.2	-5.7
3层	砾屑灰岩	-0.8	-4.3
4层	微晶灰岩	-1.7	-5
4层	透镜状微晶灰岩	-1.9	-5
4层	薄层状微晶灰岩	-2.2	-6.3
5层	厚层微晶灰岩	-1.6	-5.5
5层	厚层微晶灰岩	-2.4	-6.7
6层	厚层灰岩	-1.2	-5.5
6层	厚层微晶灰岩	-1.3	-4.9
7层	厚层灰岩	-1.4	-5.4
7层	微晶灰岩	-0.9	-4.8
8层	中薄层微晶灰岩	-0.5	-4.8
8层	中薄层泥晶灰岩	-1.3	-5.3
8层	中薄层状微晶灰岩	-1.7	-5.6
8层	中薄层状泥晶灰岩	-1.8	-6.8
9层	泥晶灰岩	-1.4	-5.4
9层	中薄层泥晶灰岩	-1.1	-5.6
9层	中薄层泥晶灰岩	-0.4	-5.7
10层	角砾状砾屑灰岩	-0.89	-5.8
10层	角砾状砾屑灰岩	-0.3	-5.6
11层	扁平砾屑灰岩	-0.26	-4.4
11层	扁平砾屑灰岩	0.3	-5.5
11层	扁平砾屑灰岩	0.29	-5.6
11层	微晶灰岩	-0.29	-6.7
11层	纹层状颗粒灰岩	0.5	-5.8
12层	扁平砾屑灰岩	0.4	-5.1
12层	扁平砾屑灰岩	0.4	-5.1
12层	微晶灰岩	0.4	-5.5
13层	扁平砾屑灰岩	0.4	-5.2
13层	砾屑灰岩	0.4	-4.7

于 5‰ 时样品可能受到成岩后期的蚀变作用的影响,当 $\delta^{18}\text{O}$ 小于 10‰ 时,碳酸盐岩样品则受到强烈的蚀变作用,故不能代表原始海洋环境。一般情况下,在碳酸盐岩沉积晚期,若经历了强烈的后期蚀变作用, $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 则出现明显的相关性,故不能代表原始的古海洋环境;反之,样品可代表原始古海洋的沉积环境。飞仙关组一段的33个碳酸盐岩样

表3 上寺剖面飞仙关组 I 段砾屑灰岩基质全岩碳、氧同位素数据

Table 3 Carbon and oxygen isotope data of micrites of calcirudites in the Feixianguan Formation, Shangsi section

飞仙关组 I 段砾屑灰岩基质碳、氧同位素			
层位	岩性	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
3层	I 型砾屑灰岩	-0.98	-6.7
3层	I 型砾屑灰岩	-0.79	-6.06
3层	I 型砾屑灰岩	-0.81	-5.59
3层	I 型砾屑灰岩	-0.88	-5.5
3层	I 型砾屑灰岩	-0.71	-5.86
3层	I 型砾屑灰岩	-0.75	-5.69
10层	II 型砾屑灰岩	1.37	-7.12
10层	II 型砾屑灰岩	0.7	-5.51
10层	II 型砾屑灰岩	2.05	-6.02
10层	II 型砾屑灰岩	0.73	-5.43
10层	II 型砾屑灰岩	2.34	-5.26
10层	II 型砾屑灰岩	1.76	-6.1
12层	III 型砾屑灰岩	1.79	-5.4
13层	III 型砾屑灰岩	1.61	-5.5
13层	IV 型砾屑灰岩	1.72	-5.59
13层	IV 型砾屑灰岩	1.83	-6.8
13层	IV 型砾屑灰岩	1.77	-5.53
13层	IV 型砾屑灰岩	1.51	-5.86

品, $\delta^{18}\text{O}$ 的值最低 -7‰ 左右, 最高 -4‰ 左右, 多数处于 -5‰ 左右, 表明这些样品受后期蚀变作用的程度不大。另外, $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 没有呈现出明显的相关性(图 5), 相关系数仅为 0.1677。飞仙关组一段的这些样品受后期蚀变作用的影响不大, 基本保留了原始的同位素组成信息。

4 讨论

4.1 碳、氧同位素的沉积环境解释

地壳中储存的碳约有百分之八十存在于碳酸盐岩中, 而自然界最为重要的无机碳库便是海相碳酸盐岩(Kaufman and Knoll, 1995; Kump and Arthur, 1999)。海相碳酸盐岩对海水中的碳同位素信息保存较好, 不同地方同时代碳酸盐岩的碳同位素组成具有良好的可对比性, 碳同位素曲线具有较好的地层学意义(黄思静等, 2016)。

上寺剖面碳酸盐岩全岩碳、氧同位素测试结果表明碳同位素出现了一定幅度的偏移, 与剖面上不同砾屑灰岩基质的碳同位素的整体趋势大体相同, 均为向上趋正(图 2)。一般情况下现代海洋中

海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 是接近于零值的(Hoefs, 2009)。本次研究的结果表明, 飞仙关组一段下部 I 型砾屑灰岩全岩碳同位素与基质碳同位素均为负值; II 型砾屑灰岩全岩碳同位素为负值, 而基质碳同位素为正值, 该类砾屑灰岩的砾屑可能为异地搬运而来, 其砾屑的成岩环境与基质亦有差别; 而 III 型和 IV 型砾屑灰岩全岩与基质碳同位素较为相似, 在剖面上为正偏。碳同位素发生正偏变化的关键点, 大致出现于 II 型砾屑灰岩层(即 SBB 层)(图 2)。前人对早三叠世剖面碳、氧同位素系统研究结果表明, 不同地区同一层位的碳、氧同位素具有相似的演化趋势(李玉成等, 1999; 左景勋等, 2004; 黄思静等, 2016)。在飞一段, 不同类型砾屑灰岩对应的碳、氧同位素出现明显的差异性(图 2), 暗示了四种砾屑灰岩在沉积过程中沉积环境以及(微)生物发育程度可能不同。左景勋等(2004, 2013)认为早三叠世印度阶碳同位素的单调上升是海相浮游自养生物复苏的结果, 上寺剖面碳同位素数据表明了 II 型扁平砾屑灰岩(SBB)沉积时, 可能已有少部分的微生物开始出现缓慢复苏的迹象。Yin et al.(2014)认为在 PTB 时期上寺距离陆地更近, 有利于海洋浮游类生物获取营养物质, 浮游类生物从而快速地繁盛起来。II 型砾屑灰岩(角砾状灰岩)的碳同位素值差异较大, 可能是由取样过程中基质和砾石成分比例不同造成的, 总体趋势介于 I 和 III 型之间, 为环境过渡期紊乱古环境的沉积物。从 II、III 型砾屑灰岩中含大量扁平砾屑, 且出现大量与风暴作用有关的沉积构造, 推测这种紊乱的古环境与风暴搅动古海洋沉积物有关; 而 IV 型砾屑灰岩的蠕体相对 III 型砾屑灰岩的砾屑来说较小, 且不规则, 碳同位素曲线显示出缓慢上升的趋势(图 2), 可能预示着海相浮游自养生物有复苏的趋势。目前普遍认为早三叠世早期的古海洋是静水的, 海洋水柱分层明显, 紊乱、频繁的风暴流使得分层海水混合, 海洋碳库受到更为明显的影响, 风暴把底层松散沉积物以及溶解氧带至海水中混合, 增加古海水营养盐、促进微生物繁育, 同时风暴流的回流将海洋表层有机质搬运至海底沉积(时志强等, 2010; 宋海军等, 2012)。氧同位素受大气、淡水淋滤和成岩作用中热力学变化的影响较大, 在受到同等成岩作用影响的情况下, I 型与其他三类砾屑灰岩相比呈现出较高的氧同位素值, 笔者认为这与其他砾屑灰岩在沉积时存在与外界不同介质(极有可能是大气)的同

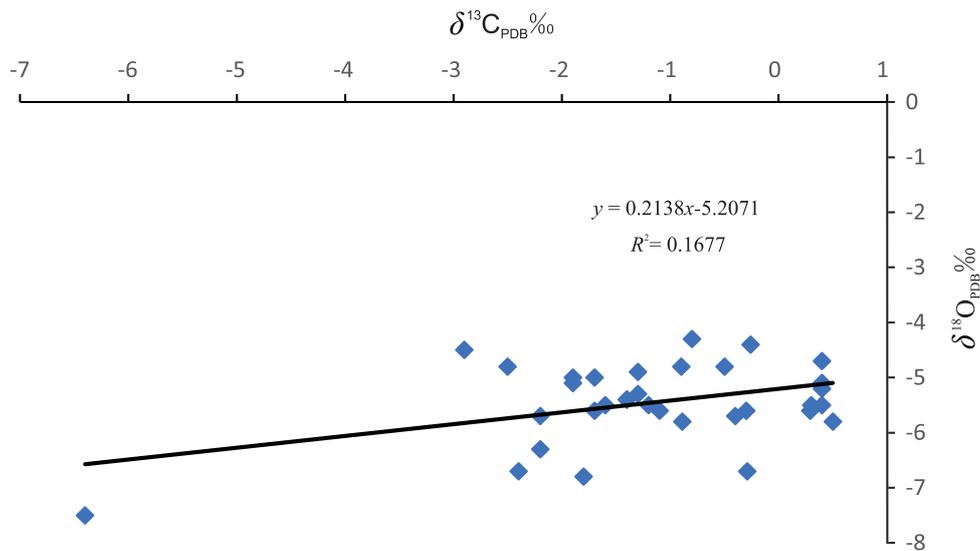


图5 飞仙关组一段 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 相关性

Fig. 5 Correlation of $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ in the first member of Feixianguan Formation

位素交换及其环境有了一定的改善有关。

4.2 砾屑灰岩成因分析

(1) 重力流砾屑灰岩

该类型砾屑灰岩的砾屑粒径较大,磨圆度和分选均较差,表明其搬运距离不远,主要为原地或近源的重力流沉积。这些砾屑在一定坡度古地形的沉积背景下,其部分来自斜坡带的微晶灰岩,由于斜坡沉积物的堆积变形引发的重力流沉积,最终形成了该类型的砾屑灰岩(赵永胜等, 1994; 魏国齐等, 2004; 王一刚等, 2009)。

(2) 角砾状灰岩

该类型砾屑灰岩的成因仍具有争议, Wignall and Twitchett (1999) 将该层角砾状灰岩定义为上寺角砾岩(Shangsi Breccia Bed), 认为其可能与海啸作用有关; 也常被解释为极强风暴作用于海底而诱发的重力流沉积(时志强等, 2010; 张华等, 2011); 张廷山等(2012)认为该套角砾状灰岩沉积时, 研究区地震多发, 与地震有关的海啸诱发角砾状灰岩沉积。本次研究亦见可拼接的砾屑, 可能与地震有关。根据砾屑灰岩的沉积特征, 结合碳酸盐岩碳同位素的变化(图2), 这些砾屑灰岩可能是由于气候的突变(即风暴强度和频率的急剧增加)叠加了地震等地质事件的发生, 诱发了上寺角砾层沉积。

(3) 扁平砾屑灰岩

扁平砾屑灰岩作为异常碳酸盐岩在早三叠世特殊古大洋环境中沉积引起了众多学者的关注(Wignall and Twitchett, 1999; Pruss et al., 2005; 赵小

明等, 2008, 2010; 时志强等, 2011; 张华等, 2011; 余宽宏等, 2015)。扁平砾屑灰岩作为“错时相”沉积的代表, Wignall and Twitchett (1999) 首先注意到其不同时空沉积背景的相似性, 并认为由 Sepkoski 等(1991)对寒武纪、奥陶纪扁平砾屑灰岩沉积提出的沉积条件同样也适用于早三叠世扁平砾屑灰岩沉积, 即薄层的灰岩和泥质灰岩互层, 无垂向生物扰动、快速沉积和风暴等外界条件的强烈侵蚀和改造。

上寺剖面飞一段上部扁平砾屑灰岩中的砾屑多平行于层面分布, 呈板条状和竹叶状(时志强等, 2010), 层面上呈扁平状, 垂向切片呈竹叶状。陈吉涛等(2009)发现寒武系竹叶状砾屑灰岩在早期成岩过程中富含碳酸盐层与含黏土层具有差异的胶结现象, 并且在风暴、地震等外界条件的触发下, 埋藏期的差异压实是假竹叶状砾屑灰岩的主要成因。这个认识对早三叠世扁平砾屑灰岩在微观薄片显示出变形的砾石边缘和较高含量的泥质充填物等特点具有重要的启示。角砾状灰岩中(即SBB层, II型砾屑灰岩)的分米级板条状砾屑和扁平砾屑灰岩(III型砾屑灰岩)中的竹叶状砾屑与下伏薄板状微晶灰岩成分基本一致, 表明砾屑可能为下伏层被强风暴撕裂、搅拌后堆积而成的。

早三叠世早期, 缺氧的大洋环境为底栖硫酸盐还原菌的繁殖创造了条件, 同时也是岩层缺乏垂向生物扰动的主要原因(Grotzinger and Knoll, 1995; Marenco et al., 2003), 而在表层浅水海域早期

生物缓慢复苏(左景勋等, 2004)对海水垂向化学性质的变化具有重要的影响(Kump and Arthur, 1999; Luo et al., 2010), 其表现过程为: 浮游生物的死亡为硫酸盐还原菌的活动提供了充足的物质, 硫酸盐还原菌在生命活动中增加海水中 H_2S , ΣCO_2 含量和碱度, 一定程度上造成深部大洋海水的碱度急剧升高, 并且在海洋垂向上存在一个明显的碱度分界面, 简称“碱跃面”(Kump et al., 1991; 2005; Wignall and Twitchett, 1999)。底层的高碱度海水为弱胶结灰岩的沉积创造了前提条件。在风暴的诱导下, 薄层灰岩发生撕裂, 搅拌, 产生薄层棱角状砾石, 此过程中以搅拌、溶蚀的搬运作用为主, 对棱角状砾屑进行了初期的改造。风暴作用带动了深部高碱度海水的上涌, 在碱跃面附近, 由于风暴搅拌过程中带动上涌的高碱度海水中 CO_2 的释放, 使得砾屑灰岩的胶结方式为方解石胶结(Kump et al., 1991)。风暴在扁平砾屑灰岩形成过程中起着至关重要的控制作用, 在后期成岩过程, 由于不同的塑性特征产生强烈的差异压实, 砾屑边缘呈现压溶边, 这对砾石形态进一步塑造, 所以扁平砾屑灰岩是水动力—成岩作用复合成因的, 即在风暴撕裂、搅拌、搬运过程中海水化学性质变化、后期成岩过程中泥质填隙物与灰岩砾屑的差异压实也是扁平砾屑灰岩形成的主要原因(图6)。

扁平砾屑灰岩在寒武纪及其之前时期的海洋系统中广泛发育, 在奥陶纪后生生物辐射后的地质历史时期中很少出现, 而在早三叠世地层的再次沉积代表着海洋生态系统的倒退(Sepkoski et al.,

1991; Wignall and Twitchett, 1999)。缺乏后生底栖生物扰动并且快速胶结的薄层微晶灰岩是形成扁平砾屑灰岩的基础, 其代表着缺氧的大洋环境和高碱度的海水性质(Wignall and Twitchett, 1999; Woods et al., 1999)。风暴作为外界诱发条件在早三叠世古特提斯域范围长期存在(Barron, 1989; Marsaglia and Klein, 1983; Woods, 2005)。另外, 全球古温度的升高和海水温度梯度的变化使得风暴气候在早三叠世古海洋上长期存在(Woods, 2005), 这些现象在广元上寺剖面都得到了很好的印证。早三叠世早期碳同位素的单调上升可能与海相浮游自养生物繁盛有关(左景勋等, 2004, 2013), 浅海浮游生物的早期复苏对海水垂向化学性质的变化具有重要的影响(Kump et al., 1991), 在上寺剖面, 与风暴作用有关的砾屑灰岩大量出现时, 碳同位素正偏, 可能预示浮游微生物繁盛可能和这一时期风暴作用对海洋的影响增加有关。

(4) 蠕虫状灰岩

该类砾屑灰岩因其砾屑形似蠕虫而得名, 具有典型的时限性, 并被作为一种“错时相”沉积而被关注(Sepkoski et al., 1991; 赵小明等, 2008; 童金南和殷鸿福, 2009; 程明等, 2014)。P/T之交及其以后很长一段时间全球海底缺氧/贫氧广泛发育, 当时的海洋条件再次短暂地回到文石海时期(张杰和童金南, 2010; 颜佳新和伍明, 2006)。蠕虫状灰岩的成因研究至今存在争议, 目前普遍接受有: 机械破碎成因(朱洪发等, 1992; 钱守荣, 1995, 1996)、生物扰动成因(朱洪发等, 1992; 黄思静, 1984; 赵小明等,

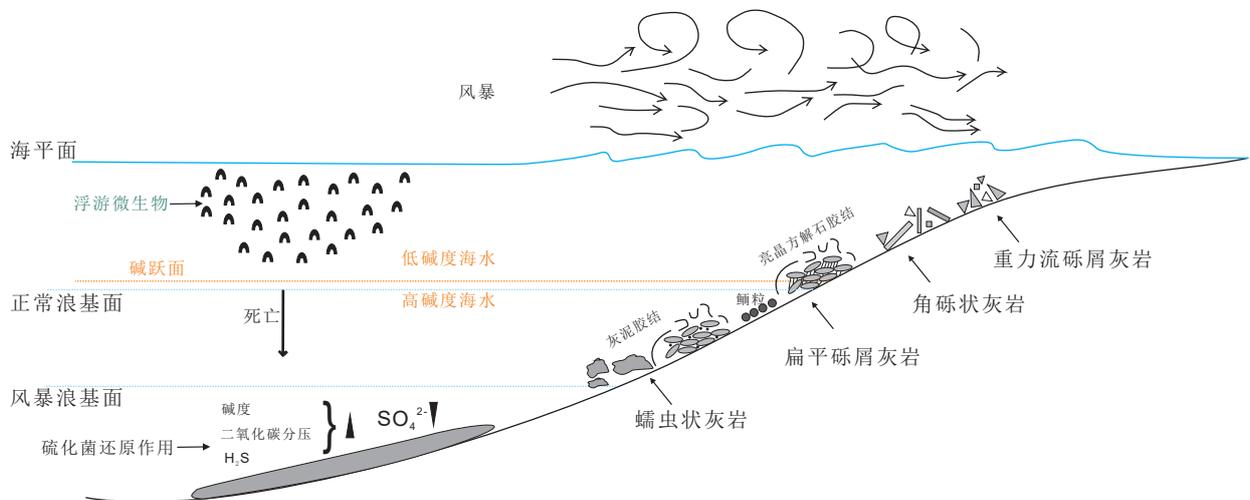


图6 川西北早三叠世砾屑灰岩成因模式图

Fig. 6 Genetic model of calcirudites of the Early Triassic in northwestern Sichuan Province

2008; 宋逢林等, 2010)、化学凝聚成因(黄思静, 1984; 赵小明等, 2008)、超盐性成因(Piotr and Alfred, 2010)和复合成因(姜月华等, 1992; 李朋等, 2014)等。

广元上寺剖面蠕虫状灰岩产于飞一段上部, 发育在扁平砾屑灰岩层之上, 推测其成因也与风暴有关。所见蠕体边缘凹凸不平, 部分有压实、压溶等现象, 在显微镜下呈现暗色, 显示有机质含量较多。蠕体均未见明显的磨蚀痕迹, 呈角砾状, 长条或不规则粒状等, 并且基质中含有微生物、小型广盐度生物碎屑及鲕粒等, 推测是在斜坡边缘沉积的微生物席受到风暴的影响而被打碎, 弱固结含微生物块体(蠕体)由此沉积, 由于水深较大, 受到的破坏强度较小, 鲕粒可能是由风暴引起的回流动荡水将其由台地边缘远源搬运过来的。推测上寺剖面蠕虫状灰岩的填隙物来源于三处: 一是陆源的细粒悬浮物(黏土矿物); 二是风暴使得海水对原地沉积物改造形成的灰泥杂基; 三是风暴引起海水上翻, 大量海底沉积物质上涌, 底层过饱和的碳酸盐与上层海水混合产生的沉淀物。硫酸盐的还原和缺氧环境使得底层水碱度升高, 有机质进行厌氧降解产生了碳酸氢钙, 使得海水的碱性也增强, 从而加快海底的成岩作用过程(张杰等, 2008; 谢树成等, 2016)。从上寺剖面飞一段扁平砾屑灰岩(Ⅲ型砾屑灰岩)和蠕虫状灰岩(Ⅳ型砾屑灰岩)产出位置来看, 沉积物所处水体深度不同, 微生物发育程度和风暴的影响作用亦不同, 相比扁平砾屑灰岩, 蠕虫状灰岩沉积时的水深更大、微生物更为发育, 但风暴影响较弱(Kershaw, 2017)。二者可产自同一地点的不同时期, 也可出于同一环境的不同地点, 这可以解释处于斜坡位置的青川大沟里剖面(位于上寺与江油鱼洞子之间)只有大套扁平砾屑灰岩而未有蠕虫状灰岩产出, 也可合理解释在上扬子地区广泛分布的印度阶蠕虫状灰岩内为何局部发育扁平砾屑。

5 结论

(1) 广元上寺剖面下三叠统格里斯巴赫亚阶(飞仙关组一段)自下而上出现Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型及Ⅳ型砾屑灰岩, 其中Ⅰ型为重力流成因砾屑灰岩, Ⅱ型为风暴诱发重力流角砾状灰岩, Ⅲ型为典型的风暴成因的扁平砾屑灰岩, Ⅳ型为复合成因的蠕虫状灰岩。从Ⅱ型砾屑灰岩开始, 风暴作用可能由强

逐渐减弱。

(2) 上寺剖面飞一段碳酸盐岩碳同位素曲线显示出缓慢上升的趋势, 海洋浮游自养微生物可能有复苏的趋势。碳同位素数据显示, 角砾状灰岩(Ⅱ型砾屑灰岩)发育后期碳同位素发生正偏, 指示着向海洋浮游类微生物繁盛且风暴频发、动荡的海洋环境转变。风暴成因的扁平砾屑灰岩(Ⅲ型砾屑灰岩)及Ⅳ型砾屑灰岩(蠕虫状灰岩)具有正的碳同位素值, 可能显示着浮游微生物繁盛可能和这一时期风暴作用对海洋的影响增加有关。

(3) 扁平砾屑灰岩与蠕虫状灰岩同时出现, 均与风暴有关。在风暴撕裂、搅拌、搬运下, 海水化学性质发生变化, 在后期成岩过程中泥质填隙物与灰岩砾屑的差异压实及差异重结晶等, 是扁平砾屑灰岩形成的条件之一。

References

- Baresel B, Bucher H, Brosse M, et al., 2017. Precise age for the Permian-Triassic boundary in South China from high-precision U-Pb geochronology and Bayesian age-depth modeling[J]. *Solid Earth*, 8 (2): 361-378.
- Barron E J, 1989. Severe storms during Earth history[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101 (5): 601-612.
- Chen J T, Han Z Z, Zhang X L, et al., 2009. Early diagenetic deformation structures of the Furongian ribbon rocks in Shandong Province of China—A new perspective of the genesis of limestone conglomerates[J]. *Science in China (Series D)*, (12): 1732-1743 (in Chinese with English abstract).
- Cheng M, 2014. Types, distributions and origins of Early Triassic anachronistic facies in Chongqing area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Cui Y, Kump L R, Ridgwell A, 2013. Initial assessment of the carbon emission rate and climatic consequences during the end-Permian mass extinction[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 389: 128-136.
- Deng B Z, Wang Y B, Woods A D, et al., 2015. Lower Triassic anachronistic facies capping the Qinghai-Tibet Plateau seamount: Implications for the extension of extraordinary oceanic conditions deep into the interior Tethys Ocean[J]. *Global and Planetary Change*, 132: 31-38.
- Du Y S, Yin H F, 1997. The late Caledonian-early Hercynian basin's framework and tectonic evolution of Qinling orogenic belt[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 22 (4): 401-405 (in Chinese with English abstract).
- Erwin D H, 2006. *Extinction: how life on earth nearly ended 250 million years ago*[M]. New York: Princeton University Press.

- Feng R W, Wang X Z, Zhang F, et al. Characteristic of Sedimentary Petrography and Depositing Environment of the Feixianguan Fm. in Guangyuan-Wangcang Southwestern Sichuan Province[J]. Geological survey and research, 30 (2) : 98-109.
- Feng Z Z, Bao Z D, Wu S H, et al., 1997. Lithofacies palaeogeography of the Early and Middle Triassic of South China[J]. Scientia Geologica Sinica, 32 (2) : 212 - 220 (in Chinese with English abstract).
- Flügel E R, Kiessling W. 2002. A new look at ancient reefs[J]. SEPM Special Publication, 72, 3-10.
- Grotzinger J P, Knoll A H, 1995. Anomalous carbonate precipitates: is the Precambrian the key to the Permian?[J]. Palaios: 578 - 596.
- Hallam A, Wignall P B. Mass Extinctions and Their Aftermath[M]. Oxford University Press, New York, N Y, United States, 1997: 320.
- He B H, Chang L T, Wu P, et al., 2014. Study of Paleo-Mesozoic extinction and Early Triassic anachronistic facies in South China[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), (9) : 24 - 30 (in Chinese with English abstract).
- Huang S J, Li X N, Hu Z W, et al., 2016. Comparison of carbon and oxygen isotopic composition of Feixianguan carbonates, Early Triassic, between east and west sides of Kaijiang-Liangping trough, Sichuan Basin, and the significance for paleoceanography[J]. *Geochimica*, 45 (1) : 24 - 40 (in Chinese with English abstract).
- Huang S J, 1993. Microspherulitic and Clastic Mineral in the Clay Rock Near the Permian-Triassic Interface of Zhongliangshan Mountain, Chongqing[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 11 (3) : 105 - 113 (in Chinese with English abstract).
- Huang S J, 1984. Vermicular limestone and its origin [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 3: 60 - 68 (in Chinese with English abstract).
- Hoefs J, 2009. Stable Isotope Geochemistry (6th Edition) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 25.
- Jiang Y H, Yue W Z, Ye Y Z, et al., 1992. The new approach on the characteristics and origin for vermicular limestone[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1: 1 - 7 (in Chinese with English abstract).
- Joachimski M M, Lai Z, Shen S, et al., 2012. Climate warming in the latest Permian and the Permian-Triassic mass extinction[J]. *Geology*, 40 (3) : 195 - 198.
- Jin R G, Huang H Q, 1987. Sedimentary features and environmental evolution of the Permian-Triassic Boundary section in Shangsi, Guangyuan, Sichuan Province[G]. Proceedings of Stratigraphic Paleontology, (2) , 32-75.
- Kaufman A J, Knoll A H, 1995. Neoproterozoic variation in the C-isotope composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications[J]. *Precambrian Research*, 73: 27 - 49.
- Kershaw S, 2017. Palaeogeographic variation in the Permian-Triassic boundary microbialites: A discussion of microbial and ocean processes after the end-Permian mass extinction[J]. *Journal of Palaeogeography*, 6 (2) : 97 - 107.
- Kump L R, Arthur M A, 1999. Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter[J]. *Chemical Geology*, 161 (1-3) : 181 - 198.
- Kump L R, Pavlov A, Arthur M A, 2005. Massive release of hydrogen sulfide to the surface ocean and atmosphere during intervals of oceanic anoxia[J]. *Geology*, 33 (5) : 397 - 400.
- Kump L R, Kasting J F, Robinson J M, 1991. Atmospheric oxygen variation through geologic time: introduction[J]. *Global and Planetary Change*, 5: 1 - 3.
- Lai X L, Yang F Q, Hallam A, et al., 1996. The Shangsi section, candidate of the global stratotype section and point of the Permian-Triassic boundary. [M]//Yin H F (Ed.), The Paleozoic-Mesozoic Boundary Candidates of Global Stratotype Section and Point of the Permian-Triassic Boundary. Wuhan: China University of Geosciences Press, 113-124.
- Li P, Zhou X H, Li Z L, et al., 2014. Sedimentary characteristics and genetic analysis of vermicular limestone in Daye Formation of Early Triassic in Western Hubei[J]. *Resources Environment Engineering*, 28 (B04) : 31 - 34 (in Chinese with English abstract).
- Li Y C, 1999. Carbon isotope cyclostratigraphy of the Permo-Triassic transitional limestones in South China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 5 (3) : 77 - 285 (in Chinese with English abstract).
- Luo G M, Kump L R, Wang Y B, et al., 2010. Isotopic evidence for an anomalously low oceanic sulfate concentration following end-Permian mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 300 (1-2) : 101 - 111.
- Luo G M, Xie S C, Liu D, et al., 2014. Microbial influences on paleoenvironmental changes during the Permian-Triassic boundary crisis[J]. *Science China: Earth Sciences*, 44: 1193-1205.
- Marengo P J, Corsetti F A, Bottjer D J, et al., 2003. Killer oceans of the Early Triassic[G]// Geological Society of America 2003 Seattle Annual Meeting, Seattle, Washington, November 2-5.
- Marsaglia K M, Klein G D, 1983. The paleogeography of Paleozoic and Mesozoic storm depositional systems[J]. *The Journal of Geology*, 91 (2) : 117 - 142.
- Piotr J, Alfred U, 2010. A hypersaline ichnoassemblage from the Middle Triassic carbonate ramp of the Tatricum domain in the Tatra Mountains, Southern Poland[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 292 (1-2) : 71 - 81.
- Pruss S B, Corsetti F A, Bottjer D J, 2005. The unusual sedimentary rock record of the Early Triassic: a case study from the southwestern United States[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 222 (1-2) : 33 - 52.
- Qian S R, 1995. A new interpretation of the genesis of vermicular limestone[J]. Journal of Huainan Mining Institute, 15 (3) : 15 - 19 (in Chinese with English abstract).
- Qian S R, 1996. Syngenetic deformation structures in Vermicular limestone and their genesis[J]. *Anhui Geology*, 6 (1) : 38 - 41 (in Chinese with English abstract).

- Racki G, 1999. Silica-secreting biota and mass extinctions: survival patterns and processes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 154 (1-2): 107–132.
- Rui L, Wang Y G, Chen C Z, et al., 1986. Where is the Permian Triassic boundary of Shangsi section in Guangyuan, Sichuan Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 13 (2): 151–156 (in Chinese with English abstract).
- Retallack G J, Veevers J J, Morante R, 1996. Global coal gap between Permian–Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 108 (2): 195–207.
- Sepkoski J, 1991. Secular changes in Phanerozoic event bedding and the biological overprint[J]. *Cycles and events in stratigraphy*: 298–312.
- Shen S Z, Crowley J L, Wang Y, et al., 2011. Calibrating the end-Permian mass extinction[J]. *Science*, 334 (6061): 1367–1372.
- Shi Z Q, An H Y, Yi H S, et al., 2011. Classification and characters of the Early Triassic anomalous carbonate rocks in Upper Yangtze Area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 13 (1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Shi Z Q, Yi H S, Zeng D Y, et al., 2010. The Lowest Member of Lower Triassic Feixianguan Formation in Upper Yangtze Region: Sedimentary Records from Sluggish Water to Turbulent Ocean after the Mass Extinction[J]. *Geology review*, 56 (6): 669–780 (in Chinese with English abstract).
- Compilation group of petroleum geology of Sichuan oil and gas region, 1989. *Petroleum Geology of China* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 158-234.
- Song F L, Yang H, Wang Q X, 2010. Reef Facies Strata of Permian-Triassic Boundary in Kangjiaping Section, Cili Area, Hunan Province and Its Implications for Biological Mega-deracination[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 3: 51–56 (in Chinese with English abstract).
- Song H J, Tong J N, 2016. Mass extinction and survival during the Permian-Triassic crisis[J]. *Earth Science*, 41 (6): 901–918 (in Chinese with English abstract).
- Song H J, Tong J N, Xiong Y L, et al., 2012. The large increase of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ -depth gradient and the end-Permian mass extinction[J]. *Science China: Earth Sciences*, 42 (8): 1182–1191 (in Chinese with English abstract).
- Tong J N, Yin H F, 2009. Advance in the study of Early Triassic life and environment[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48 (3): 497–508 (in Chinese with English abstract).
- Tong J N, Zhang S X, Zuo J X, et al., 2007. Events during Early Triassic recovery from the end-Permian extinction[J]. *Global and Planetary Change*, 55: 66–80.
- Wang Y G, Wen Y C, Hong H T, et al., 2009. Carbonate slope facies sedimentary characteristics of the Late Permian to Early Triassic in northern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 11 (2): 143–156 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y G, Wen Y C, Hong H T, et al., 2006. Petroleum geological characteristics of deep water deposits in Upper Permian-Lower Triassic trough in Sichuan basin and adjacent areas[J]. *Oil Gas Geology*, 27 (5): 702–714 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y G, Zhang J, Liu X G, et al., 2005. Sedimentary facies of evaporative carbonate platform of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in northeastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, (3): 357–371 (in Chinese with English abstract).
- Wei H Y, Shen J, Shane D S, et al., 2015. Environmental controls on marine ecosystem recovery following mass extinctions, with an example from the Early Triassic[J]. *Earth-Science Reviews*, 149: 108–135.
- Wei G Q, Chen G S, Yang W, et al., 2004. Sedimentary System of Platform Trough of Feixianguan Formation of Lower Triassic in Northern Sichuan Basin and Its Evolution[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22 (20): 254–260 (in Chinese with English abstract).
- Wignall P B and Twitchett R J, 1999. Unusual intraclastic limestones in Lower Triassic carbonates and their bearing on the aftermath of the end-Permian mass extinction[J]. *Sedimentology*, 46 (2): 303–316.
- Woods A D, 2013. Microbial ooids and cortoids from the Lower Triassic (Spathian) Virgin Limestone, Nevada, USA: Evidence for an Early Triassic microbial bloom in shallow depositional environments[J]. *Global and Planetary Change*, 105: 91–101.
- Woods A D, 2005. Paleooceanographic and paleoclimatic context of Early Triassic time[J]. *Comptes Rendus Palevol*, 4 (6-7): 463–472.
- Woods A D, Bottjer D J, Mutti M, et al., 1999. Lower Triassic large sea-floor carbonate cements: their origin and a mechanism for the prolonged biotic recovery from the end-Permian mass extinction[J]. *Geology*, 27 (7): 645–648.
- Xie S C, Wang F P, Yan J X, et al., 2016. Geobiological processes during critical environmental transitions in earth history[J]. *Science and Technology Information*, (21): 176–177 (in Chinese with English abstract).
- Yu K H, Chang T, Qiu L W, et al., 2015. Research Development of Flat-pebble Conglomerate Characteristics and Their Origin in Early Paleozoic North China Platform[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (6): 1111–1125 (in Chinese with English abstract).
- Yan J X, Wu M, 2006. Synchronized Oscillations in Phanerozoic Chemical Composition of Seawater, Carbonate Sedimentation and Biotic Evolution: Progresses and Prospects[J]. *Geological Science and Technology Information*, 25 (3): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Yin H F, Jiang H S, Xia W C, et al., 2014. The end-Permian regression in South China and its implication on mass extinction[J]. *Earth-Science Reviews*, 137: 19–33.
- Zhang T S, Chen X H, Liu Z C, 2012. Seismites and Their Geological Significance in Early Triassic of Southeast Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30 (3): 477–489 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H J, Zhou Y F, Xie Q Q, et al., 2017. Study of the microbialite from Permian-Triassic boundary in Chaohu, Anhui Province[J].

- Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 40 (6) : 822 – 828 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Shi Z Q, Luo F Z, et al., 2011. The petrological evidences of sluggish to oscillating Tethys ocean after the P-T Event[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38 (2) : 175 – 184 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J, 2008. Early Triassic vermicular limestone and its genesis in the lower Yangtze Region[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) .
- Zhang J, Tong J N, 2010. Vermicular limestone of the Lower Triassic and its origin in Lower Yangtze Region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 12 (5) : 535 – 548 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X Y, Zheng Q F, Li Y, et al., 2020. Polybessurus-like fossils as key contributors to Permian-Triassic boundary microbialites in South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 522: 109790.
- Zhao X M, Tong J N, Yao H Z, Zhang K X, 2008. Early Triassic anachronistic facies in South China and their implications for the recovery ecosystem[J]. *Science in China (Series D) :Earth Sciences*, 38 (12) : 1564-1574.
- Zhao X M, Niu Z J, Tong J N, et al., 2010. The distinctive sediments in the Early Triassic recovery time:"Anachronistic Facies"[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28 (2) : 214 – 323 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y S, Wang D Y, Hu Z S, 1994. Early Triassic carbonate gravity flow deposition and environment in the western margin of Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12 (2) : 1 – 9 (in Chinese with English abstract).
- Zheng B S, Mou C L, Wang X P, et al., 2021. Paleoclimate and paleoceanographic evolution during the Permian-Triassic transition (western Hubei area, South China) and their geological implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 564: 110 – 166.
- Zhu H F, Wang S Y, Su N, 1992. The origins of the Triassic nodular and vermicular limestones in South Jiangsu-South Anhui Provinces[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 14 (4) : 454 – 460 (in Chinese with English abstract).
- Zuo J X, Tong J N, Zhao L S, et al., 2013. Geochemical environment restoration of the Lower Yangtze poaleocean in the Early Triassic, southeastern China[J]. *Earth Science*, 38 (3) : 441 – 453 (in Chinese with English abstract).
- Zuo J X, Tong J N, Qiu H O, et al., 2004. Carbon and Oxygen isotope stratigraphy of the Lower Triassic at Northern Pingdingshan section of Chaohu, Anhui Province, China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 28 (1) : 40 – 47 (in Chinese with English abstract).
- Zeng D Y, Shi Z Q, Zhang H, et al., 2011. Tempestite of Early Triassic Feixianguan Formation in Shangsi Section, Guanyuan: Are they extreme climatic event under megamonsoon system?[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29 (3) : 440 – 448 (in Chinese with English abstract).
- abstract).
- ## 附中文参考文献
- 陈吉涛, 韩作振, 张晓蕾, 等, 2009. 鲁西芙蓉统条带灰岩早期成岩变形构造——竹叶状砾屑灰岩形成机理探讨[J]. *中国科学 (D辑)*, (12) : 1732 – 1743.
- 程明, 2014. 重庆地区早三叠世错时相沉积类型及形成机理[D]. 成都: 成都理工大学.
- 杜远生, 殷鸿福, 1997. 秦岭造山带晚加里东-早海西期的盆地格局与构造演化[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 22 (4) : 401 – 405.
- 冯仁蔚, 王兴志, 张帆, 等, 2007. 川西北广旺地区飞仙关组沉积岩岩石学特征及沉积环境分析[J]. *地质调查与研究*, 30 (2) : 98-109.
- 冯增昭, 鲍志东, 吴胜和, 等, 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理[J]. *地质科学*, 32 (2) : 212 – 220.
- 何冰辉, 常蓝天, 吴鹏, 等, 2014. 古-中生代生物灭绝与华南早三叠世错时相沉积研究[J]. *长江大学学报 (自然科学版)*, (9) : 24 – 30.
- 黄思静, 李小宁, 胡作维, 等, 2016. 四川盆地东部开江-梁平海槽东西两侧三叠系飞仙关组碳酸盐岩碳氧同位素组成对比及古海洋学意义[J]. *地球化学*, 45 (1) : 24 – 40.
- 黄思静, 1993. 四川重庆中梁山 P/T 界线粘土层中非粘土组分的研究[J]. *沉积学报*, 11 (3) : 105 – 113.
- 黄思静, 1984. 蠕虫状灰岩及其成因[J]. *成都地质学院学报*, 3: 60 – 68.
- 姜月华, 岳文浙, 业治铮, 等, 1992. 蠕虫状灰岩特征和成因新探[J]. *矿物岩石*, 1: 1 – 7.
- 金若谷, 黄恒铨. 1987. 四川广元上寺二叠系—三叠系界线剖面沉积特征及环境演变[G]. *地层古生物论文集*, (2) , 32-75.
- 李朋, 周向辉, 李忠林, 等, 2014. 鄂西地区早三叠世大冶组蠕虫状灰岩沉积特征及其成因分析[J]. *资源环境与工程*, 28 (B04) : 31 – 34.
- 李玉成, 1999. 华南晚二叠世至早三叠世初灰岩碳同位素地层旋回[J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 5 (3) : 77 – 285.
- 罗根明, 谢树成, 刘邓, 等, 2014. 二叠纪-三叠纪之交重大地质突期微生物对环境的作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 44: 1193–1205.
- 钱守荣, 1995. 蠕虫状灰岩成因新解[J]. *淮南矿业学院学报*, 15 (3) : 15 – 19.
- 钱守荣, 1996. 蠕虫状灰岩中的同生变形构造及其成因[J]. *安徽地质*, 6 (1) : 38 – 41.
- 芮琳, 王义刚, 陈楚震, 等, 1986. 四川广元上寺剖面二叠系-三叠系界线位置在哪里[J]. *地层学杂志*, 13 (2) : 151 – 156.
- 时志强, 安红艳, 伊海生, 等, 2011. 上扬子地区早三叠世异常碳酸盐岩的分类与特征[J]. *古地理学报*, 13 (1) : 1 – 10.
- 时志强, 伊海生, 曾德勇, 等, 2010. 上扬子地区下三叠统飞仙关组一段: 大灭绝后从停滞海洋到动荡海洋的沉积学记录[J]. *地质论评*, 56 (6) : 669 – 780.

- 宋逢林, 杨浩, 王钦贤, 2010. 湖南慈利礁相二叠系-三叠系界线地层及其对大灭绝事件的启示[J]. *华南地质与矿产*, 3: 51-56.
- 宋海军, 童金南, 2016. 二叠纪-三叠纪之交生物大灭绝与残存[J]. *地球科学*, 41(6): 901-918.
- 宋海军, 童金南, 熊炎林, 等, 2012. $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 深度梯度的剧增与二叠纪末生物大灭绝[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(8): 1182-1191.
- 童金南, 殷鸿福, 2009. 早三叠世生物与环境研究进展[J]. *古生物学报*, 48(3): 497-508.
- 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等, 2009. 四川盆地北部晚二叠世-早三叠世碳酸盐岩斜坡相带沉积特征[J]. *古地理学报*, 11(2): 143-156.
- 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等, 2006. 四川盆地及邻区上二叠统-下三叠统海槽的深水沉积特征[J]. *石油与天然气地质*, 27(5): 702-714.
- 王一刚, 张静, 刘兴刚, 等, 2005. 四川盆地东北部下三叠统飞仙关组碳酸盐蒸发台地沉积相[J]. *古地理学报*, (3): 357-371.
- 魏国齐, 陈更生, 杨威, 等, 2004. 川北下三叠统飞仙关组“槽台”沉积体系及演化[J]. *沉积学报*, 22(20): 254-260.
- 谢树成, 王风平, 颜佳新, 等, 2016. 若干重大地质环境突变的地球生物学过程[J]. *科技资讯*, (21): 176-177.
- 余宽宏, 畅通, 邱隆伟, 等, 2015. 华北地台早古生代竹叶状灰岩岩石特征及成因研究进展[J]. *沉积学报*, 33(6): 1111-1125.
- 颜佳新, 伍明, 2006. 显生宙海水成分, 碳酸盐沉积和生物演化系统研究进展[J]. *地质科技情报*, 25(3): 1-7.
- 张廷山, 陈晓慧, 刘治成, 2012. 四川盆地东南部早三叠世地震事件沉积及其地质意义[J]. *沉积学报*, 30(3): 477-489.
- 张红剑, 周跃飞, 谢巧勤, 等, 2017. 安徽巢湖二叠系-三叠系界线微生物岩研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 40(6): 822-828.
- 张华, 时志强, 罗凤姿, 等, 2011. P-T事件后特提斯洋从停滞到动荡的岩石学证据[J]. *成都理工大学(自然科学版)*, 38(2): 175-184.
- 张杰, 2008. 下扬子地区早三叠世蠕虫状灰岩及其成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 张杰, 童金南, 2010. 下扬子地区下三叠统蠕虫状灰岩及其成因[J]. *古地理学报*, 12(5): 535-548.
- 赵小明, 童金南, 姚华舟, 张克信, 2008. 华南早三叠世错时相沉积及其对复苏期生态系的启示[J]. *中国科学(D辑)*. 38(12): 1564-1574.
- 赵小明, 牛志军, 童金南, 等, 2010. 早三叠世生物复苏期的特殊沉积: “错时相”沉积[J]. *沉积学报*, 28(2): 214-323.
- 赵永胜, 王多义, 胡志水, 1994. 四川盆地西缘早三叠世早期碳酸盐重力流沉积与环境[J]. *沉积学报*, 12(2): 1-9.
- 朱洪发, 王恕一, 苏南, 1992. 皖南三叠纪瘤状灰岩、蠕虫状灰岩的成因[J]. *石油实验地质*, 14(4): 454-460.
- 左景勋, 童金南, 赵来时, 等, 2013. 早三叠世下扬子古海洋地球化学环境的修复过程[J]. *地球科学*, 38(3): 441-453.
- 左景勋, 童金南, 邱海鹰, 等, 2004. 巢湖平顶山北坡剖面早三叠世碳、氧同位素地层学研究[J]. *地层学杂志*, 28(1): 40-47.
- 曾德勇, 时志强, 张华, 等, 2011. 广元上寺剖面下三叠统飞仙关组风暴岩: 巨型季风体制下的极端气候事件?[J]. *沉积学报*, 29(3): 440-448.

《沉积与特提斯地质》“滑坡泥石流灾害与城镇地质安全”专辑

征稿启事

西南地区是我国地貌类型最复杂、新构造运动最强烈、气候变化最敏感、内外动力地质耦合作用最强烈的地区,因而也是我国强震与崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害最为发育的地区。随着国家在西部地区部署的系列重大战略实施,山区城镇化进程急速加快,人口和经济聚集效应凸显,在近年来极端天气与强震频发等因素的共同作用下,山区城镇所面临的地质安全风险显著增高,防灾形势严峻,现有地质安全防范能力与“美丽中国”、“平安中国”对山区城镇安全的要求有一定差距。为提高山区城镇地质安全研究与防范能力,促进西南地区相关研究成果交流,《沉积与特提斯地质》拟邀请中国地质调查局成都地质调查中心铁永波教授级高级工程师、中国科学院成都山地所陈晓清研究员为特邀主编,拟于2024年在本刊组织“滑坡泥石流灾害与城镇地质安全”专辑。我们真诚邀请您及您的课题组向本专辑投稿,详见<https://www.cjyttdz.com.cn/news/xinxigonggao/257.htm>。