

文章编号: 1000-0550(2012)04-0679-10

贵州沫阳剖面二叠纪末浅水沉积特征及其古环境意义^①

李 飞 吴 夏

(中国地质科学院岩溶地质研究所 广西桂林 541004)

摘 要 处于大贵州滩南缘的罗甸沫阳剖面在晚二叠世时发育典型的浅水相沉积组构,包括长兴期生物礁、生物灭绝事件界面附近的不连续面以及可能的古岩溶堆积物。其中长兴组为典型的钙质海绵礁,造礁生物主要包括古石孔藻、*Tubiphytes* 和纤维海绵,同时大量的栉壳状胶结物填充礁体孔隙并具有世代性。在沫阳剖面的不连续面,可识别标志包括缝合线和侵蚀面两种,分布于上二叠统顶部泥粒岩—颗粒岩(藻类、海绵、钙藻以及 *Tubiphytes* 为主)与鲕粒灰岩之间。在部分露头上还可见一类特殊的角砾岩:角砾类型既包括生屑团块和泥晶团块,还包括硅质岩碎块,数量众多,大小不一且磨圆很差。大量含巨鲕的鲕粒灰岩直接上覆于角砾岩,以及角砾岩顶部的裂隙之中。除此之外,包括垮塌角砾岩和洞穴堆积物等特征的发现,都指示了沫阳剖面在当时岩溶发育。这类沉积物产生的原因可能是由于晚二叠世时,沫阳地区持续发育的生物礁形成了突出的古地貌单元,随着相对海平面的下降晚二叠世沉积物发生暴露。在大气淡水—渗流成岩作用影响下,暴露地表的突出地形上岩溶作用发育;非突出地形受风化剥蚀及随后海侵过程的双重影响,与上覆地层之间显示侵蚀面或缝合线接触的特征。从野外露头情况来看,沫阳剖面并没有像其他浅水台地一样在生物灭绝事件之后发育微生物岩,而是直接出露一套含核形石和巨鲕的鲕粒灰岩。以鲕粒灰岩为主的“灾难沉积物”紧邻长兴组生物碎屑灰岩的情况在华南比较少见,这对于进一步了解生物灭绝事件起因以及当时特殊的海洋环境状况具有重要意义。

关键词 华南 长兴期 侵蚀面 古岩溶 鲕粒岩

第一作者简介 李飞 男 1986年出生 助理研究员 碳酸盐沉积学 E-mail: feinan.li@gmail.com

中图分类号 P588.24⁺5 P534.51 **文献标识码** A

二叠纪—三叠纪之交的生物灭绝事件是显生宙地质记录中最为严重的一次,给当时的生态系统和海洋环境带来了严重灾难,导致后生动物大量灭绝^[1,2]。之后,早三叠世复苏生物以类型单调、个体小型化^[3,4]为特征,且复苏进程缓慢^[5-7]。同时,在下三叠统地层记录中也存在大量特殊的沉积物和沉积构造,指示了生物灭绝事件之后异常的海洋环境:包括微生物岩^[8-11]、扁平砾石砾岩^[12]、碳酸盐胶结扇和结壳^[13,14]、皱纹构造^[15,16]和巨鲕^[17,18]等,称之为错时相沉积^[1,15,19]。

但是,人们对于灭绝事件发生时浅水环境下异常沉积组构的研究尚不深入,而这些沉积记录很可能蕴藏着引发二叠纪—三叠纪之交生物灭绝事件的线索。比如灭绝事件沉积界面(End-Permian Extinction Horizon)附近浅水沉积记录中广泛存在的侵蚀面^[20-22]。对于其成因目前争议较大:一种观点认为侵蚀面的形成是由于海水酸化造成了浅水碳酸盐发生溶解^[20,22,23];另一种观点则认为侵蚀面的形成可能与

大气暴露(subaerial exposure)有关^[24-27]。最近包括海平面下降标志物^[26-29]、大气渗流结构^[30]、钻井和岩芯资料中古岩溶特征^[31]等都倾向于支持第二种观点。可是目前还缺乏能够反映侵蚀面形成的直接证据,例如是否存在确定的古岩溶面或暴露特征?是否存在能够指示海洋酸化的岩石学和生物学证据?这些问题都值得我们深入思考。

本文对贵州省罗甸县沫阳剖面晚二叠世至早三叠世初的浅水沉积组构进行了研究,详细介绍了侵蚀面产生的背景,类型及分布,同时对可能的古岩溶堆积物从结构特征、识别标志和环境意义等方面也进行了专门讨论。这些沉积类型的发现在沫阳剖面尚属首次,为灭绝事件沉积界面附近侵蚀面的成因研究提供了一个很好的实例。同时,本文还探讨了大贵州滩南缘灭绝事件发生前后的浅水沉积相模式,为华南二叠纪末侵蚀面的暴露成因提供了重要证据,这对重建当时的古海洋环境条件具有重要意义。

^①国家自然科学基金项目(批准号:40902074)、中国地质科学院开放课题(编号:2002371110006)和岩溶所所控项目(编号:2011006)联合资助。
收稿日期:2011-09-06;收修稿日期:2011-11-29

1 区域地质背景

沅阳剖面位于贵州省罗甸县沅阳镇北 1 km(图 1) 连接新、老沅阳公路的西侧以及通向山顶的小道旁边。该剖面地层出露连续,包括中、上二叠统(由南向北依次划分为栖霞组、茅口组、吴家坪组和长兴组)以及下三叠统罗楼组(图 2A)。

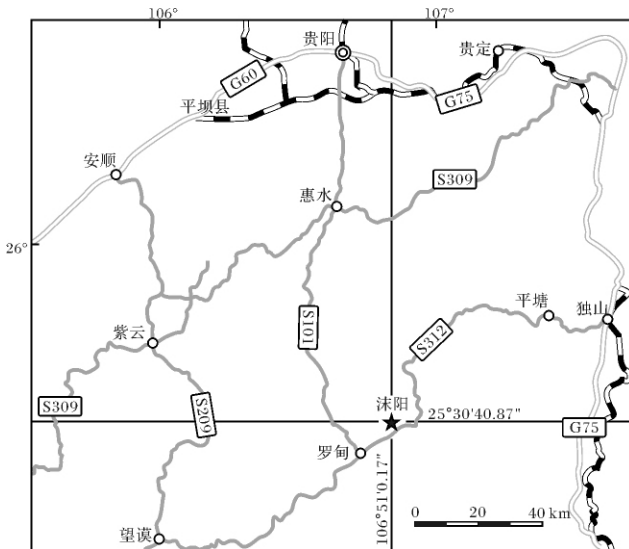


图 1 研究区区域位置图

Fig. 1 Location and regional map of the study area

前人在该剖面中、上二叠统部分已做过地层^[32]、沉积相和锶同位素^[33~35]等方面的研究。沅阳中二叠世时主体为广海陆棚相沉积,向上水体逐渐变浅,到顶部时演变成台地边缘高能生物礁相;晚二叠世早期水体逐渐加深,沉积类型转变为含海绵骨针的泥晶灰岩和薄层硅质岩。之后水体再次变浅,发育台地边缘生物碎屑颗粒滩相沉积。对于晚二叠世晚期的沉积类型,前人^[32,35]认为主要是以生物碎屑颗粒岩和鲕粒灰岩为主的台地边缘高能滩相沉积。而笔者在鲕粒灰岩下部发现下三叠统印度阶亭纳尔亚阶牙形石分子 *Neospathodus dieneri*,而鲕粒灰岩底部深灰色含核形石和巨鲕的鲕粒岩层与长兴组生物碎屑灰岩之间以缝合线或侵蚀面方式接触^[18]。侵蚀面之上紧邻的鲕粒岩层形成时间目前还未确定,推测其可能是与钙质微生物岩同期的沉积类型。故本文暂将二叠纪—三叠纪界限定于含牙形石 *Neospathodus dieneri* 的岩层之下(准确的二叠纪—三叠纪界限仍不清楚),识别出的灭绝事件沉积界面位于长兴组生物碎屑颗粒岩与含核形石和巨鲕的灰岩层之间。在鲕粒灰岩之上为罗楼组上段具平行纹层的泥页岩(图 2A)。

上二叠统长兴组顶部为本次研究的重点,参考金振奎等人^[32]的资料,笔者对该区域野外露头进行了重测。测得剖面厚度 37.1 m。详细分层描述如下:

下三叠统 罗楼组(T_1l) 鲕粒灰岩段,未到底。

7. 浅灰色厚层块状鲕粒灰岩。鲕粒形状规则,圆一椭圆形,粒径以 1~4 mm 为主,由深色和浅色两种纹层相间构成同心状结构。鲕粒核心一般由粒状方解石或球粒组成,类型包括正常鲕、再生鲕、复鲕和极少量变形鲕。鲕粒保存较好,亮晶胶结。共生的生物类型单一,仅见少量小腹足和双壳类碎片。在该层底部和下部存在牙形石 *Neospathodus dieneri*。

3.6 m

6. 深灰色厚层含核形石鲕粒灰岩(单层)。鲕粒粒径 1~3 mm 为主,圆一椭圆形。核形石数量较多但个体偏小,以 2mm 为主,形状不规则,纹层薄厚不均,多发生重叠。生物化石含量稀少,与上二叠统长兴组生物碎屑灰岩以缝合线或侵蚀面接触。

0.5 m

上二叠统 长兴组(P_3c)

5. 厚层—巨厚层海绵—藻礁灰岩。由串管海绵、纤维海绵、*Tubiphytes*、古石孔藻等共同构成格架,附礁生物主要包括有孔虫及筳、腕足、苔藓虫、介形虫和棘皮类等。见大量的栉壳状结构及礁角砾。顶部存在岩溶角砾及洞穴堆积物。

18 m

4. 深灰色中薄层灰岩为主(单层 30 cm),少量薄层硅质岩和硅质结核。生物碎屑含量丰富,类型主要包括钙藻、*Tubiphytes*、纤维海绵、有孔虫及筳、腕足碎片、介形虫碎片和棘皮类等,一些层位生物碎屑呈定向排列,破碎严重。距底 1.2 m 处发育总厚度为 50 cm 的薄层状生屑灰岩,单层厚度 6 cm 左右。

5.7 m

3. 灰黑色厚层灰岩,生物含量较少。

2.2 m

2. 厚层块状生物碎屑灰岩(单层)。含有大量的生物碎屑,其中以筳、有孔虫、*Tubiphytes*、藻屑和海绵最为常见。层面上可见较多的灰岩角砾(粒径范围大多在 20 cm × 20 cm),其中含有大量的单体珊瑚,少量腹足。

2.1 m

1. 厚层块状生物碎屑灰岩。以藻类的大量发育为特征,*Tubiphytes* 丰富,也可见古石孔藻包裹纤维海绵等构成支架。含少量硅质结核。

5 m

未到底。

沅阳剖面在晚二叠世位于中上扬子台地南缘高能带中,与区域内其他晚二叠世发育的小海绵礁(丘)、厚层生物碎屑灰岩共同作为大贵州滩发育的基底^[36,37]。前人^[32,33,35]对该剖面曾进行多次研究,受研究程度和出露条件的影响未注意到长兴期发育有生物礁。

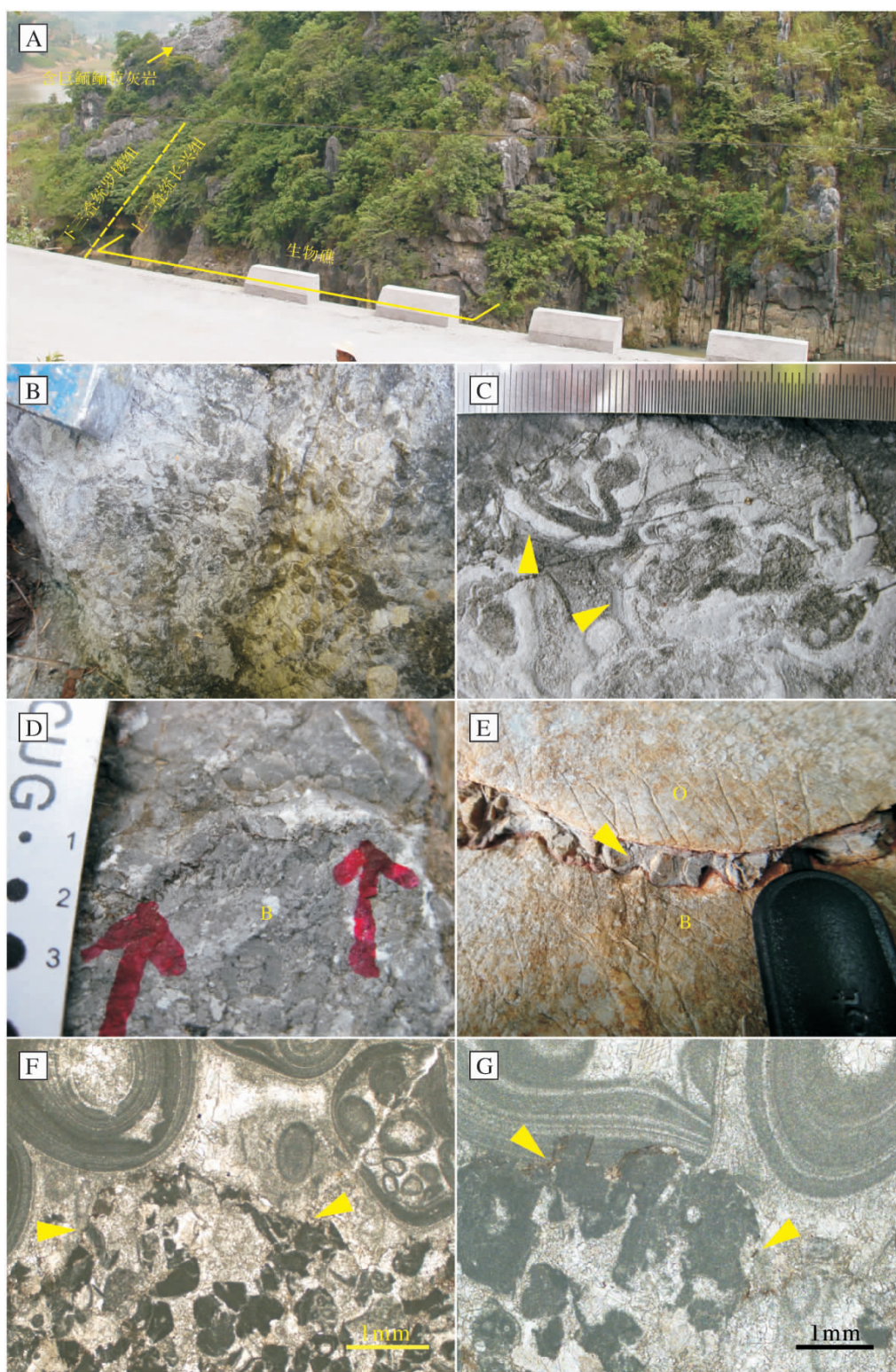


图 2 沫阳剖面 P—T 界限附近沉积类型

A. 上二叠统与下三叠统界限及相邻地层出露特征; B. 长兴组海绵—藻礁灰岩 左上角锤头宽度 3 cm; C. 为 B 的放大 显示古石孔藻包裹纤维海绵构成格架, 箭头所指为栉壳结构; D. 长兴组顶部生物碎屑灰岩 (B) 与浅色泥晶灰岩以缝合线接触; E. 长兴组顶部生物碎屑颗粒岩 (B) 与罗楼组鲕粒灰岩 (O) 之间为近 1 cm 厚的灰褐色泥质成分 (箭头所指) 比例尺宽 2 cm; F. 偏光显微镜下的侵蚀面, 显示上二叠统生物碎屑颗粒岩与鲕粒颗粒岩之间以不规则的侵蚀面接触; G. 偏光显微镜下的缝合线 (箭头所指) 显示了巨鲕与生物碎屑之间的接触关系。

Fig. 2 Photographs from the Permian-Triassic boundary interval at Moyang section

从野外露头来看,海绵作为沫阳生物礁的主要造礁生物,包括串管海绵和纤维海绵两类(图2B,C)。粘结生物主要为古石孔藻 *Tubiphytes* 和其他种类钙藻。附礁生物种类繁多,包括藻、有孔虫、腹足、双壳、腕足和棘皮类等。钙质海绵多呈枝状的单体或复体,直径以0.4~1.5 cm为主,自身的抗浪能力较弱,主要依靠藻类的辅助粘结作用参与造礁。*Tubiphytes* 呈不规则管状或囊状,可以包覆、粘结其他生物。古石孔藻外形呈不规则皮壳状,厚度从数毫米至几厘米不等,缠绕在造架生物(主要为纤维海绵)上形成白色、细丝状结壳,具有较强的吸附、粘结能力,这对于增强礁体的抗浪能力具有重要意义。除此之外,在古石孔藻的外围还发育有大量的栉壳状胶结物,填充礁体孔隙并具有世代性(图2C)。综合这些特征可以认为沫阳剖面在长兴时期存在海绵—藻粘结生物礁的发育。

生物大灭绝事件发生之后,在大贵州滩基底之上广泛发育钙质微生物岩,厚度7~15 m^[11]。一般在微生物岩的下部或底部可见作为二叠纪—三叠纪界限划分标志牙形石 *Hindeodus parvus*^[25,38]。早三叠世初期由于海平面上升造成大贵州滩边缘后退,其发展成一个具浅水潮下一潮间环境的低缓台地,在台地边缘发育有高能鲕粒滩相沉积,在台地内部,先是发育一套薄层的灰泥岩(上覆于钙质微生物岩),随后沉积类型转变为白云岩化的鲕粒灰岩^[37]。沫阳当时位于大贵州滩南缘,在早三叠世印度期时主要发育高能鲕粒滩相沉积^[17]。

2 浅水沉积类型

2.1 侵蚀面

本文所指的侵蚀面是指上二叠统顶部灭绝事件沉积界面附近的不连续面。从已有的情况来看,侵蚀面主要形成于浅水海相沉积环境之中,位于1)上二叠统长兴组生物碎屑泥粒岩—颗粒岩与微生物岩之间;或2)上二叠统顶部生物碎屑粒泥岩与鲕粒—生物碎屑颗粒岩之间。已报道的侵蚀面发育的位置主要集中在华南大贵州滩^[18,20,25,39,40]、重庆老龙洞^[26,27]、土耳其南部 Korkarkuyu 组底部^[8,41]。沫阳剖面侵蚀面的特殊之处在于:1)其位于上二叠统生物礁灰岩顶部与鲕粒灰岩之间,而且侵蚀面结构清晰、特征明显;2)侵蚀面之上的鲕粒保存有完好的内部结构,未发生白云岩化或溶蚀重结晶。与意大利 Bulla 剖面^[42]、土耳其^[8,41]、伊朗^[43]、越南 Nhi Tao 剖面^[44]报道的生物灭绝事件沉积界面之上的重结晶鲕

粒(有些仅保留有鲕模孔)相比,结构保存完好、具有更强的说服力。目前,在华南目前除沫阳剖面外暂未见保存有类似完整结构鲕粒的报道。

沫阳剖面二叠系顶部的不连续面包括缝合线和侵蚀面两种形式,主要分布于生物碎屑颗粒岩与鲕粒灰岩(图2D,E)之间,以不规则形态延伸,上下波动幅度在5 cm范围内。有些侵蚀面波状起伏,与较粗的缝合线相连通(图2G),也有一些较为平直(图2E)。紧邻侵蚀面之下的生物碎屑颗粒岩以 *Tubiphytes* 和其他类型钙藻为主,含有少量有孔虫及藻类、纤维海绵、棘皮类和苔藓虫等,属于长兴组生物礁的顶部。侵蚀面之上包括:1)深灰色含巨鲕鲕粒灰岩,含有相当数量的小核形石,生物碎屑含量极少(图2F,G);2)浅色泥晶灰岩,鲕粒较少,存在少量的小腹足类和双壳类碎片。野外露头可见部分侵蚀面内存在深褐色的矿物薄层,紧邻生物碎屑灰岩(图2E)。这种矿物薄层最厚处可达1 cm,向两侧逐渐减薄直至消失,与吴亚生等^[29]在重庆老龙洞侵蚀面表面发现的褐黄色陆源碎屑物质较为相似。

2.2 角砾岩

在沫阳剖面上二叠统长兴组上部的角砾岩非常特殊,其中角砾大小和类型差别非常大(图3和图4),其中一类角砾岩基质为浅灰色泥晶灰岩,生物化石含量极少,与不同类型角砾岩之间的接触面平整清晰。在角砾岩上部可见大量含巨鲕的鲕粒灰岩覆盖其上,或者填充在角砾岩顶部的裂隙之中(图3A),而这类鲕粒灰岩被认为形成于生物绝灭事件之后的“事件沉积物”^[45]。角砾类型包括:

1)灰岩角砾 长度10~30 cm,有一定的磨圆,排列无定向性。岩性为生物碎屑泥粒岩,以 *Tubiphytes* 和藻类为主,类似于侵蚀面之下的长兴组生物碎屑灰岩;

2)硅质岩角砾 长柱状(10 cm × 25 cm),深褐色,磨圆非常差,与岩层面斜交,野外观察中未见有生物碎屑;

3)泥晶灰岩角砾 深灰色不规则形状(大多在5 cm × 8 cm),磨圆较差,在其上也未见生物碎屑。

同时,这类角砾岩与其他类型角砾岩的不同之处在于:1)角砾类型既有生屑灰岩、泥晶灰岩,还包含硅质岩;2)数量众多,大小不一且磨圆很差;3)角砾岩基质中存在大量圆—次圆形被方解石充填的晶洞,以及长条状延伸的裂隙,充填其中的为粗大的方解石晶体。

另一类角砾岩分布于长兴组顶部正常沉积的生物碎屑灰岩层间的裂隙之中(图4B),大量灰岩角砾分选较差,从0.5~5 cm不等,密集堆积在褐红色钙质泥岩基质当中。硅质角砾含量约为5%,色黑,粒径在1~3 cm,磨圆中等。泥质灰岩角砾含量不超过5%,粒径在2~15 cm之间,磨圆稍好,长轴方向各异,不具有 consistency。少量透明的葡萄状的方解石晶粒分布于角砾岩与生物碎屑灰岩之间(图4D)。结合以上特征推测其为受岩溶作用影响的垮塌角砾岩(图4B,D)。

综合 James 和 Choquette^[46] 和 Jones^[47] 等人对古岩溶的定义,可以认为古岩溶是指低水位时期碳酸盐环境受大气成岩作用的影响,以原地角砾岩、破碎地层、坍塌构造、溶蚀加大裂缝、洞穴和较小的非选择性

溶蚀孔隙等特征,反映原生暴露形成的侵蚀地貌。目前在沱阳剖面周围露头上除上述的岩溶垮塌角砾岩外,还发现包括裂缝、溶蚀孔洞和洞穴堆积物在内的各类古岩溶标志物(图4)。

在长兴组上部,垂直于岩层面上存在着少量港湾状晶洞,现在已被粗晶方解石充填。在露头上(公路西侧)还可见上二叠统生物碎屑灰岩与下三叠统鲕粒灰岩之间存在着由粗粒亮晶方解石构成的白色沉淀层,厚度40~80 cm。底面与基岩不规则接触,部分接触面上存在垂直于长兴组灰岩的马牙状方解石胶结物,上表面与灰岩接触面不规则起伏(图4A)。有些白色沉淀层厚度变化显著,由厚10 cm的裂缝延伸加大形成2 m高、4 m宽的晶洞。从目前情况来看,沱阳剖面在二叠纪末时很可能局部地区(下伏地

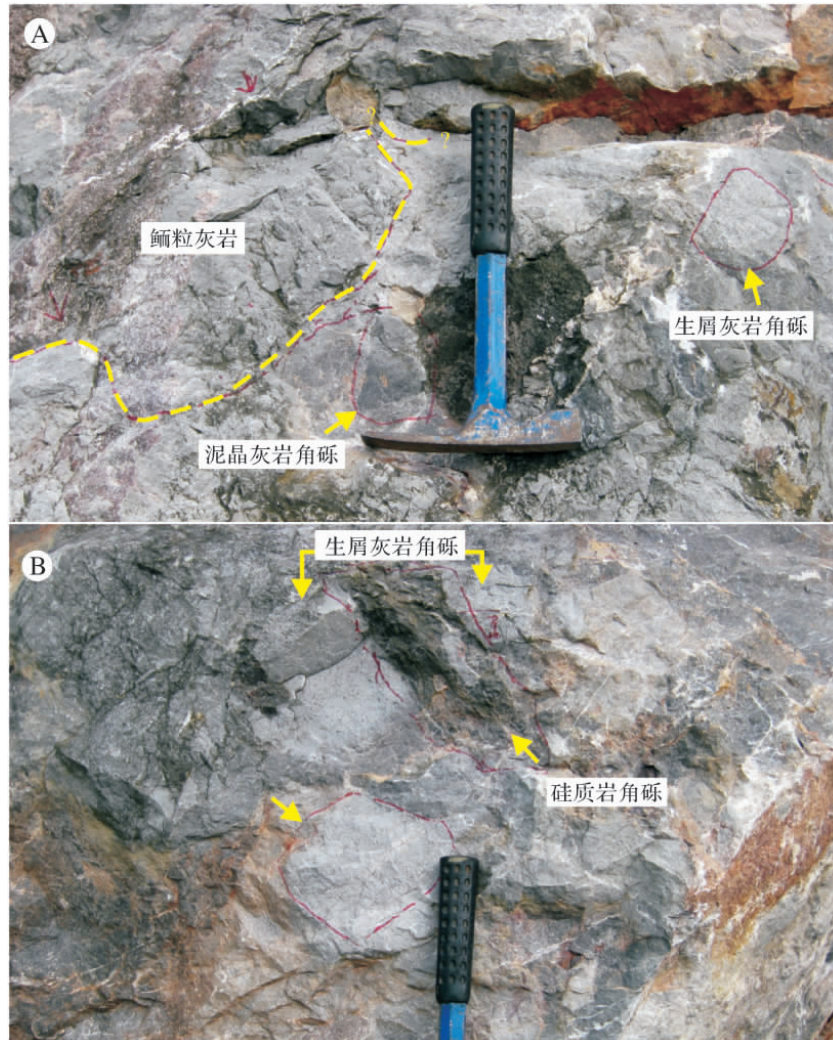


图3 沱阳剖面角砾岩类型及特征

A. 角砾岩基质为浅灰色泥晶灰岩,角砾类型包括生屑灰岩角砾和泥晶灰岩角砾。角砾大小不一,磨圆非常差。在角砾岩的顶部为含巨鲕的鲕粒灰岩,接触面波状起伏; B. 为A的下部,显示较多的生屑灰岩角砾和硅质岩角砾。详细描述见正文2.2节。

Fig. 3 Types and features of breccias in the top of the Changxing Formation at Moyang section

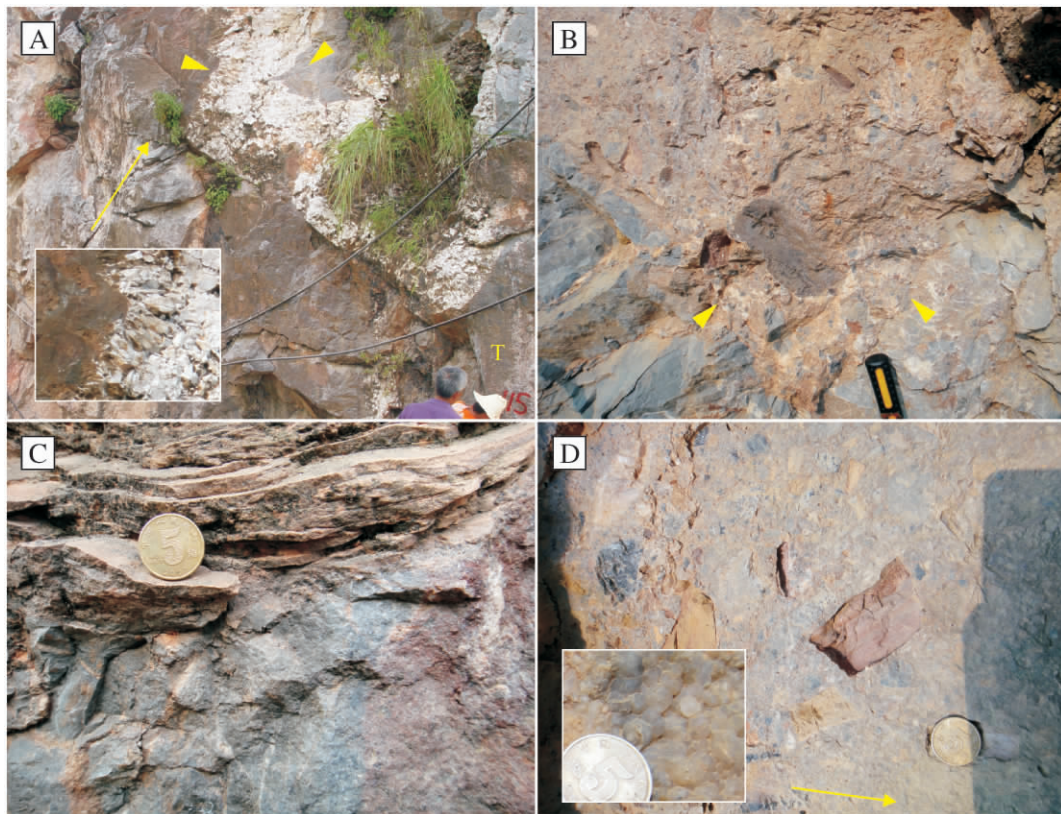


图4 沫阳剖面古岩溶发育特征

A. 部分露头上出现的长兴组顶部的白色方解石沉淀层,与下伏生物碎屑灰岩不规则接触。箭头所指为白色沉淀层与基岩(灰岩)呈不规则接触关系,其中左侧箭头指示了垂直于长兴组灰岩的马牙状方解石胶结物(左侧图框),右侧箭头指示了上层鲕粒灰岩发生溶解,具有不规则的边界。T为早三叠世印度期含巨鲕的鲕粒灰岩;B. 洞穴角砾岩堆积物垮塌至长兴组生物碎屑灰岩层内(箭头所指)。其中基质为红褐色钙质泥岩,角砾类型多样,分选较差,部分角砾具有一定磨圆;C. 薄板状暗红色沉积物上覆于长兴组生物碎屑颗粒岩;D. 为B的放大,显示洞穴角砾岩中角砾类型及形貌,包括黑色硅质角砾,浅灰色灰岩角砾,黄褐色泥岩或泥质灰岩角砾,以及透明的葡萄状的方解石晶粒(左侧图框)。

Fig. 4 Photographs of palaeokarst development at Moyang section

层为上二叠统生物礁灰岩)岩溶作用发育。古岩溶最为发育的露头分布在老沫阳镇上山小路的起点,两侧(东、西向)古岩溶特征迅速消失,取而代之的是侵蚀面和缝合线等特征,指示了不连续面的存在。鉴别古岩溶的标志物虽然不少,但是单独地使用某个指标而脱离其他沉积学和地球化学证据佐证的话,容易得出片面的结论。同时,并不是所有古岩溶特征都可以保存下来:有些特征在沫阳剖面并不发育;还有些古岩溶标志物可能受后期海侵作用的破坏而缺失。对沫阳剖面古岩溶发育特征的进一步研究还在进行之中。

3 讨论

3.1 沫阳剖面二叠纪—三叠纪之交浅水沉积模式

从沫阳剖面分隔鲕粒灰岩与生物礁灰岩的不连续面,到以岩溶垮塌角砾岩和洞穴堆积物为代表的古岩溶标志物等特征的发现,显示了二叠纪末浅水环境

下事件沉积物类型(鲕粒灰岩)、与下伏地层接触关系(侵蚀面)以及沉积相的转换(生物礁相→鲕粒滩相)比我们之前认为的更加多样,更为复杂。笔者通过野外露头调查和镜下微相分析,提出了一种新的二叠纪末浅水(极浅水)环境下沉积物形成模式,将众多特殊沉积组构在成因上进行关联(图5)。

沫阳剖面生物礁的建造一直持续到生物灭绝事件发生之前,这就在大贵州滩南缘形成了一个突出的古地貌单元(图5A)。生物礁受二叠纪末海平面下降事件的影响而发生大气暴露,生物礁体部分露出海面^[48],受到大气淡水—渗流成岩作用的强烈影响(以生物礁灰岩为主体),形成各种岩溶角砾岩、溶沟、溶槽、洞穴堆积物等。同时期其他不具备突出地貌条件的浅水碳酸盐环境受风化剥蚀及渗流成岩作用的影响,在地层记录中以各种暴露标志物和大气渗流结构^[30]为标志(图5B)。灭绝事件发生之后,海洋环境

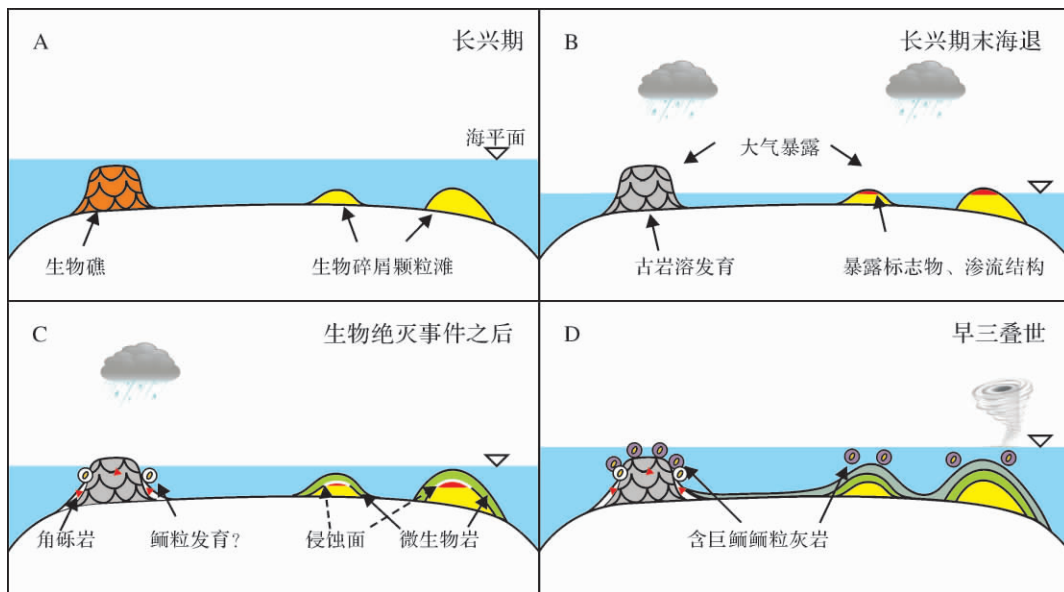


图5 沫阳剖面二叠纪—三叠纪之交浅水环境沉积模式

Fig. 5 Depositional model of shallow-water environments across the Permian-Triassic boundary in Moyang area

急剧恶化,后生动物大量死亡,浅水沉积类型从以骨骼颗粒为主的沉积物向微生物岩和无机碳酸盐沉淀转移^[49]。生物碎屑颗粒滩的顶部各类风化剥蚀及大气渗流结构受海侵过程中受风暴、波浪作用及成岩过程的改造而形成侵蚀面,下伏于微生物岩^[40,50]。同时,沫阳仍处于大气暴露环境下,母岩受风化剥蚀作用的影响,继续发生破碎,甚至崩塌,形成大量的角砾,堆积在突出地形周围;受岩溶作用的影响,各类古岩溶地貌持续发育,形成岩溶垮塌角砾岩和各类洞穴堆积物。在突出地形的周缘处于高能、超饱和和碳酸盐水体环境中逐步开始发育鲕粒滩(图5C)。之后,随着初始海侵的加剧,海水逐渐淹没古岩溶突出高地,并对各类岩溶地貌进行改造。在这种浅水环境中鲕粒既可以保存为厚层状鲕粒灰岩,也可以被搬运、充填至受岩溶作用改造的裂隙、孔洞之中,造成现在这种鲕粒岩、灰岩角砾、硅质岩角砾等混杂在一起的沉积物(图3和图5D)。整个过程可以概括为:沫阳剖面浅水沉积特征是受古地形条件的限制,在大多数浅水碳酸盐环境发育侵蚀面的情况下,在更为突出的地形上遭受岩溶作用,而且侵蚀面的形成可能与大气暴露及之后海侵改造有关。

3.2 沫阳剖面古岩溶发育的环境意义

对二叠纪末灭绝事件沉积界面附近侵蚀面的研究是目前该层段沉积学研究中的一个热点^[20-22,30]。目前主要有两种观点:1) 侵蚀面的形成是海洋酸化作用(大量二氧化碳的迅速释放)造成的浅水碳酸

盐沉积物的溶解;2) 二叠纪末的海平面下降导致浅水剖面发生大气暴露,受风化剥蚀作用的影响而形成。两种观点有过激烈交锋,第二种观点得到包括渗流结构^[30]、暴露标志物^[24,26-28]以及本文中古喀斯特结构等指示海平面下降的实物证据的支持。最新的研究从古生物统计学^[51]、钙同位素^[23]方面支持海洋酸化理论,并对海洋酸化成因及过程进行了论证。但是,目前来看海洋酸化的岩石学证据并不充分。按照Payne等人^[20,22]侵蚀面的形成与海洋酸化作用有关的理论,侵蚀面的产生反映了海水中碳酸盐饱和度由晚二叠世的饱和状态→生物灭绝事件发生时迅速降为不饱和状态→灭绝事件之后迅速返回超饱和状态的过程。这种极短时间内饱和度的剧烈变化在岩石学和碳同位素曲线上似乎还未得到有力的支持。本文认为,指示二叠纪末海平面下降事件的岩石学标志物类型广泛,论据较为充分,这些都不是单一的海洋酸化理论能够合理解释的。至于在海平面下降的过程中(或之后)是否存在浅水碳酸盐的溶解(大量二氧化碳迅速释放对浅水碳酸盐饱和度的扰动),还需大量高分辨率地层学和同位素地球化学证据的支持。

沫阳剖面沉积相模式与Lehrmann等人^[11,37]经典的大贵州滩沉积模型之间存在一点差异。从已有的情况来看,沫阳剖面在生物大灭绝事件之后并没有像大贵州滩或南盘江其他孤立台地,以及扬子台地周缘一样发育有微生物岩,而是直接露出一套可能与微生物岩同时期的含巨鲕鲕粒灰岩。以鲕粒灰岩为主

的“灾难沉积物”紧邻长兴组顶部生物碎屑颗粒岩的情况在华南比较少见(尤其是保存有完好内部结构的鲕粒),显示了浅水环境下二叠纪末海相地层接触关系的多样性,扩展了二叠纪—三叠纪之交浅水沉积相类型,也为深入研究生物灭绝时期碳酸盐台地演化规律提供了一个良好的实例。

二叠纪—三叠纪之交古岩溶发育的实例鲜见报道,最近罗冰等^[31]介绍了在蜀南地区长兴组顶部碳酸盐地层中的古岩溶结构,发现有大量的溶沟、溶洞以及岩溶角砾岩。他们^[31]认为在此期间存在一次海退事件造成蜀南地区长时间暴露溶蚀,形成古岩溶不整合面。并且,泸州古隆起区突出的海底地貌为后期的暴露溶蚀提供了有力的地形条件。沫阳剖面则是在野外露头中较早发现古岩溶特征,这为研究当时该地区的海平面变化情况及海水化学条件提供了便利条件。除此之外,古岩溶不整合面可以作为油气长距离运移的优质通道,对扬子台地周缘岩溶发育特征的研究在油气勘探领域也具有重要意义。

4 结论

(1) 沫阳剖面在晚二叠世长兴期发育有海绵—藻粘结生物礁,藻类缠绕海绵等造架生物形成了坚固的抗浪格架,持续发育的生物礁体形成隆起的古地貌单元,构成随后岩溶作用发育的基础。

(2) 本文从野外露头上发现有多种古岩溶标志物,包括岩溶角砾岩、溶沟、溶槽、洞穴堆积物等,这些实例支持了“华南二叠纪末存在海平面下降事件”的观点;

(3) 受相对海平面下降的影响,浅水碳酸盐环境发生大气暴露。在不具备突出地形的区域受淡水—渗流作用及之后海侵改造作用的影响,在生物碎屑灰岩与微生物岩接触面显示侵蚀面或缝合线特征;在具有隆起地形的区域,受风化剥蚀作用及岩溶作用的强烈改造,在二叠系的顶部保存有岩溶角砾岩和洞穴堆积物等特征。

致谢 本文作者野外工作期间得到研究生伊文超、喻崎雯以及本科生莫鉴泉的协助,在此表示感谢。同时感谢审稿人的宝贵意见。

参考文献(References)

1 Sepkoski J J, Bambach R K, Droser M L. Secular Changes in Phanerozoic Event Bedding and the Biological Overprint [C] // Einsele G, Ricken W, Seilacher A. Cycles and Events in Stratigraphy, Berlin:

Springer-Verlag, 1991: 298-312

2 Stanley S M, Yang X. A double mass extinction at the end of the Paleozoic Era [J]. *Science*, 1994, 266(5189): 1340-1344

3 Twitchett R J. The Lilliput effect in the aftermath of the end-Permian extinction event [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252(1-2): 132-144

4 Wade B S, Twitchett R J. Extinction, dwarfing and the Lilliput effect [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 284(1-2): 1-3

5 Fraiser M L, Bottjer D J. Elevated atmospheric CO₂ and the delayed biotic recovery from the end-Permian mass extinction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252(1-2): 164-175

6 Hallam A. Why was there a delayed radiation after the end-Palaeozoic extinctions? [J]. *Historical Biology*, 1991, 5(2): 257-262.

7 Meyer K M, Yu M, Jost A B, et al. $\delta^{13}\text{C}$ evidence that high primary productivity delayed recovery from end-Permian mass extinction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(3-4): 378-384

8 Baud A, Cirilli S, Marcoux J. Biotic response to mass extinction: the lowermost Triassic microbialites [J]. *Facies*, 1997, 36: 238-242

9 Kershaw S, Zhang T, Lan G. A microbialite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China, and its palaeoenvironmental significance [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 146(1-4): 1-18

10 Kershaw S, Li Y, Crasquin-Soleau S, et al. Earliest Triassic microbialites in the South China block and other areas: controls on their growth and distribution [J]. *Facies*, 2007, 53(3): 409-425

11 Lehrmann D J. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang basin, south China [J]. *Geology*, 1999, 27(4): 359-362

12 Wignall P B, Twitchett R J. Unusual intraclastic limestones in Lower Triassic carbonates and their bearing on the aftermath of the end-Permian mass extinction [J]. *Sedimentology*, 1999, 46(2): 303-316

13 Woods A D, Bottjer D J, Mutti M, et al. 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*, 1999, 27(7): 645-648

14 Woods A D, Bottjer D J, Corsetti F A. Calcium carbonate seafloor precipitates from the outer shelf to slope facies of the Lower Triassic (Smithian-Spathian) Union Wash Formation, California, USA: Sedimentology and palaeobiologic significance [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252(1-2): 281-290

15 Pruss S B, Bottjer D J, Corsetti F A, et al. A global marine sedimentary response to the end-Permian mass extinction: Examples from southern Turkey and the western United States [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 78(3-4): 193-206

16 Mata S A, Bottjer D J. The paleoenvironmental distribution of Phanerozoic wrinkle structures [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 96(3): 181-195

17 李飞,王夏,薛武强,等. 一种新的错时相沉积物——巨鲕及其环境意义 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(3): 585-595 [Li Fei, Wang Xia, Xue Wuqiang, et al. Origin and environmental significance of

- giant ooids in the Early Triassic: a new kind of anachronistic facies [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3): 585-595]
- 18 Li F, Yan J, Algeo T, *et al.* Paleocceanographic conditions following the end-Permian mass extinction recorded by giant ooids (Moyang, South China) [J]. *Global and Planetary Change*, in press. doi: 10.1016/j. gloplacha. 2011. 09. 009.
 - 19 Baud A, Richoz S, Pruss S. The lower Triassic anachronistic carbonate facies in space and time [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(1-3): 81-89
 - 20 Payne J L, Lehrmann D J, Follett D, *et al.* Erosional truncation of uppermost Permian shallow-marine carbonates and implications for Permian-Triassic boundary events [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(7-8): 771-784
 - 21 Wignall P B, Kershaw S, Collin P, *et al.* Erosional truncation of uppermost Permian shallow-marine carbonates and implications for Permian-Triassic boundary events: Comment [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(5-6): 954-956
 - 22 Payne J L, Lehrmann D J, Follett D, *et al.* Erosional truncation of uppermost Permian shallow-marine carbonates and implications for Permian-Triassic boundary events: Reply [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(5-6): 957-959
 - 23 Payne J L, Turchyn A V, Paytan A, *et al.* Calcium isotope constraints on the end-Permian mass extinction [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(19): 8543-8548
 - 24 Wu Y, Jiang H, Fan J. Evidence for sea-level falls in the Permian-Triassic transition in the Ziyun area, South China [J]. *Geological Journal*, 2010, 45(2-3): 170-185
 - 25 刘建波, 江崎洋一, 杨守仁, 等. 贵州罗甸二叠纪末生物大灭绝事件后沉积的微生物岩的时代和沉积学特征 [J]. *古地理学报*, 2007, 9(5): 473-486 [Liu Jianbo, Ezaki Yoichi, Yang Shouren, *et al.* Age and sedimentology of microbialites after the end-Permian mass extinction in Luodian, Guizhou Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(5): 473-486]
 - 26 吴亚生, 姜红霞, 廖太平. 重庆老龙洞二叠系-三叠系界线地层的海平面下降事件 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2405-2412 [Wu Yasheng, Jiang Hongxia, Liao Taiping. Sea-level drops in the Permian-Triassic boundary section at Laolongdong, Chongqing, Sichuan province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2405-2412]
 - 27 姜红霞, 吴亚生, 袁生虎. 重庆二叠-三叠系界线地层的干裂缝和侵蚀面及其意义 [J]. *高校地质学报*, 2007(1): 53-59 [Jiang Hongxia, Wu Yasheng, Yuan Shenghu. Dessiccation cracks and erosional surface in the Permian-Triassic Boundary section in Chongqing [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1): 53-59]
 - 28 杜永灯, 张磊, 王伟洁, 等. 浙江湖州黄芝山剖面长兴组顶部古剥蚀面的识别及其地质意义 [J]. *地质论评*. 2009(4): 503-508 [Du Yongdeng, Zhang Lei, Wang Weijie, *et al.* Paleo-weathering crust at the top of the Changxing Formation in Huangzhishan section, Huzhou, Zhejiang, and its geological significance [J]. *Geological Review*, 2009, 55(4): 503-508]
 - 29 吴亚生, Wan Yang, 姜红霞, 等. 江西修水二叠纪-三叠纪界线地层海平面下降的岩石学证据 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 3039-3046 [Wu Yasheng, Yang Wan, Jiang Hongxia, *et al.* Petrologic evidence for sea-level drop in latest Permian in Jiangxi province, China and its meanings for the mass extinction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(12): 3039-3046]
 - 30 Collin P, Kershaw S, Crasquin-Soleau S, *et al.* Facies changes and diagenetic processes across the Permian-Triassic boundary event horizon, Great Bank of Guizhou, South China: a controversy of erosion and dissolution [J]. *Sedimentology*, 2009, 56(3): 677-693
 - 31 罗冰, 谭秀成, 李凌, 等. 蜀南地区长兴组顶部岩溶不整合的发现及其油气地质意义 [J]. *石油学报*, 2010(3): 408-414 [Luo Bing, Tan Xiucheng, Li Ling, *et al.* Discovery and geologic significance of paleokarst unconformity between Changxing Formation and Feixianguan Formation in Shunan area of Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 31(3): 408-414]
 - 32 金振奎. 贵州罗甸沫阳地区二叠系岩石学及沉积环境研究 [C] // 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎, 等. 中国南方二叠纪岩相古地理. 山东东营: 石油大学出版社, 1996: 171-181 [Jin Zhenkui, Petrology and Sedimentary Environments of Permian, Moyang, Luodian County, Guizhou Province [C] // Feng Zengzhao, Yang Yuqing, Jin Zhenkui, eds. *Lithofacies Paleogeography of Permian of South China*, Shandong Dongying: Petroleum University Press. 1996: 171-181]
 - 33 卢武长, 崔秉奎, 杨绍全, 等. 二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化及其意义 [J]. *矿物岩石*, 1992, 12(4): 80-87 [Lu Wuchang, Cui binquan, Yang Shaoquan, *et al.* Strontium isotopic evolution of the Permian marine carbonates and implications [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 12(4): 80-87]
 - 34 黄思静. 上扬子二叠系-三叠系初海相碳酸盐岩的碳同位素组成与生物绝灭事件 [J]. *地球化学*, 1994, 23(1): 60-68 [Huang Sijing. Carbon isotopes of Permian and Permian-Triassic boundary in Upper Yangtze platform [J]. *Geochimica*, 1994, 23(1): 60-68]
 - 35 田景春, 曾允孚. 中国南方二叠纪古海洋锶同位素演化 [J]. *沉积学报*, 1995, 13(4): 125-130 [Tian Jingchun, Zeng Yunfu. The revolution of the isotopic composition of strontium in the Permian paleo-ocean in South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(4): 125-130]
 - 36 Lehrmann D A, Payne J O, Felix S H, *et al.* Permian-Triassic boundary sections from shallow-marine carbonate platforms of the Nanpanjiang Basin, South China: Implications for oceanic conditions associated with the end-Permian extinction and its aftermath [J]. *Palaeos*, 2003, 18(2): 138-152
 - 37 Lehrmann D J, Enos P, Payne J L, *et al.* Permian and Triassic depositional history of the Yangtze platform and Great Bank of Guizhou in the Nanpanjiang basin of Guizhou and Guangxi, south China [J]. *Albertiana*, 2005(33): 149-168
 - 38 Chen J, Beatty T W, Henderson C M, *et al.* Conodont biostratigraphy across the Permian-Triassic boundary at the Dawen section, Great Bank of Guizhou, Guizhou Province, South China: Implications for the Late Permian extinction and correlation with Meishan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36(6): 442-458
 - 39 Yang H, Chen Z Q, Wang Y, *et al.* Composition and structure of microbialite ecosystems following the end-Permian mass extinction in

- South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 308(1-2): 111-128
- 40 Kershaw S, Crasquin S, Li Y, *et al.* Microbialites and global environmental change across the Permian-Triassic boundary: a synthesis [J]. *Geobiology*, 2011, in press. doi: 10.1111/j.1472-4669.2011.00302.x.
- 41 Kershaw S, Crasquin S, Forel M B, *et al.* Earliest Triassic microbialites in Çürük Dag, southern Turkey: composition, sequences and controls on formation [J]. *Sedimentology*, 2010, 58(3): 739-755
- 42 Farabegoli E, Perri M C, Posenato R. Environmental and biotic changes across the Permian-Triassic boundary in western Tethys: The Bulla parastratotype, Italy [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(1-3): 109-135
- 43 Heydari E, Hassanzadeh J, Wade W J, *et al.* Permian-Triassic boundary interval in the Abadeh section of Iran with implications for mass extinction: Part 1, *Sedimentology* [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 193(3-4): 405-423
- 44 Algeo T J, Ellwood B, Nguyen T K T, *et al.* The Permian-Triassic boundary at Nhi Tao, Vietnam: Evidence for recurrent influx of sulfidic watermasses to a shallow-marine carbonate platform [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252(1-2): 304-327
- 45 Groves J R, Altiner D, Boyce M D, *et al.* "Disaster oolites" in the Permian-Triassic boundary interval, Tauride Mountains (Turkey) [J]. In: Geological Society of America Annual Meeting - Abstracts with Programs. 2003, 35(2): 48
- 46 James N P, Choquette P W. *Paleokarst* [M]. New York: Springer-Verlag, 1988: 416
- 47 Jones B. Ancient Karst [C] // Middleton V, ed. *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003: 11-15
- 48 吴亚生, 范嘉松, 金玉环. 晚二叠世末的生物礁出露及其意义 [J]. *地质学报*, 2003(3): 289-296 [Wu Yasheng, Fan Jiasong, Jin Yugan. Emergence of the Late Permian Changhsingian reefs at the end of the Permian [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 289-296]
- 49 Payne J L, Lehmann D J, Wei J, *et al.* The pattern and timing of biotic recovery from the End-Permian extinction on the great bank of Guizhou, Guizhou Province, China [J]. *Palaios*, 2006, 21(1): 63-85
- 50 何磊, 王永标, 杨浩, 等. 华南二叠纪-三叠纪之交微生物岩的古地理背景及沉积微相特征 [J]. *古地理学报*, 2010, 12(2): 151-163 [He Lei, Wang Yongbiao, Yang Hao, *et al.* Palaeogeography and microfacies characteristics of microbialites across the Permian-Triassic boundary in South China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(2) 151-163]
- 51 Clapham M E, Payne J L. Acidification, anoxia, and extinction: A multiple logistic regression analysis of extinction selectivity during the Middle and Late Permian [J]. *Geology*, 2011, 39(11): 1059-1062

Characteristics and Palaeoenvironmental Significances of Shallow-Marine Sediments in the Latest Permian, Moyang Section, Guizhou

LI Fei WU Xia

(Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin Guangxi 541004)

Abstract: The Moyang section located in the southern margin of the Great Bank of Guizhou developed typical deposits of shallow-marine environments in the Late Permian, including Changhsingian reefs, disconformity surfaces near the mass extinction horizon and one probably kind of palaeokarst sediments. Calcareous algal-sponge boundstone characterized by *Archaeolithoporella*, *Tubiphytes* and winded sponges, and early marine cements constitute the frameworks in the upper of the Changxing Formation. Disconformity surfaces (with the contacts between the lower and upper facies stylolitized or eroded) make a distinction between the latest Permian oolitic limestone and the Changhsingian skeletal packstone-grainstone containing the dominated fusulinids, sphinctozoan sponges, *Tubiphytes* and other types of calcareous algae. In some outcrops, one special kind of breccias found in the upper part of the Changxing Formation, which overlain or incised by giant-oid-bearing oolite directly in the topmost, comprises numerous clasts of bioclastic limestone, lime mudstone and silicate, with diverse and angular shapes. In addition, the presence of collapse structures and white cement layers consisting of coarse sparry calcite indicate the possible karstification. Based upon these features, we suggest the fall in relative sea-level of Moyang caused the subaerial exposure of the top of the Changhsingian complex in the latest Permian. Under meteoric vadose diagenesis, karstic processes formed collapse breccia, fissures, solution vugs and speleothem carbonate in the ridgy topography (with persisting growth of the bio-reef). In contrast, erosional surfaces developing in non-ridgy topography probably formed by the process of weathering, and reworking in ensuing rise of sea-level. Not like other sections growing microbialites after the event horizon, the Moyang section developed oolitic limestones bearing oncoids and giant ooids at that moment. This phenomenon implies an unusual phenomenon developing oolite facies overlying top of the Changhsingian bioclastic grainstone directly, and hence, has the significance of helping us understand the origin of the mass extinction and temporal oceanic conditions.

Key words: South China; Changhsingian; erosional surface; palaeokarst; oolite