

华南早三叠世错时相沉积及其对复苏期生态系的启示

赵小明^{①②}, 童金南^{①*}, 姚华舟^②, 张克信^①, Zhongqiang Chen^③

① 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074;

② 中国地质调查局宜昌地质矿产研究所, 宜昌 443003;

③ School of Earth and Geographical Sciences, the University of Western Australia, Crawley, WA6009, Australia

* 联系人, E-mail: jntong@cug.edu.cn

收稿日期: 2008-06-16; 接受日期: 2008-08-28

国家自然科学基金创新研究群体基金(批准号: 40621002)、教育部创新团队发展计划(编号: IRT0546)、中国地质调查局基础地质调查项目(编号: 1212010610709)和“111”项目(编号: B08030)资助

摘要 二叠纪末的大灭绝不仅重创了古生代海洋生态系,也使得海洋沉积体系发生剧变,导致灭绝之后早三叠世生物复苏期异常的生态系状况和海洋环境. 丰富的特殊沉积物及相关沉积构造的广泛出现是早三叠世沉积的显著特征,如扁平砾石砾岩、蠕虫状灰岩、潮下皱纹构造、微生物岩、海底碳酸盐胶结岩崩、薄层灰岩和条带灰岩等. 这些特征性的沉积物在奥陶纪之前的海洋环境中曾广泛分布,但在奥陶纪后生动物大发展之后,它们一般仅见于某些极端和异常的环境中. 当它们在早三叠世正常浅海环境再次广泛出现时,被认为在时间上或环境上发生了错位,故被称为错时相(anachronistic facies). 研究这些特殊沉积构造,对于探索古生代-中生代地质突变期异常的生态系状况和特殊的海洋环境具有重要作用. 错时相在中国南方各地的早三叠世地层中广泛存在,分布于下三叠统众多层位中,而且囊括了全球已报道的大多数错时相沉积物,为研究华南早三叠世的海洋环境状况及其与生物复苏的关系提供了契机. “蠕虫状灰岩”是华南下三叠统中最典型、最发育的错时相沉积物,但对其研究相对较少. 以湖北三峡地区的蠕虫状灰岩为例,对其类型划分、时空分布进行了重点论述. 华南下三叠统中蠕虫状灰岩及其他错时相沉积构造的研究表明:错时相紧接生物大灭绝后出现,并随中生代海洋生态系的重建而退出正常浅海环境,这种耦合关系正是沉积体系和生态系对古生代-中生代地质突变及其导致的“特异”环境的自然响应. 因此,错时相的盛衰变化可以作为独立于化石记录分析之外的生态变化指针.

关键词

早三叠世
错时相
生物复苏
生态系
三峡地区
华南

二叠世末的大灭绝是后生动物演化史上最具灾难性的灭绝事件. 海洋生物科级减少率近 49%^[1,2], 种级消失率达 80%~90%^[2,3]. 二叠纪末大灭绝后的生物复苏也是显生宙最长的一次,一直延迟至中三叠世^[4,5]. 贫乏单调的广适性分子^[6]和机会分子^[7~9]主导

着沉寂荒凉的生态系,这种生态危机占据了整个早三叠世.

在生态系遭受二叠纪末大灭绝事件重创的同时,沉积体系也发生了剧变,导致全球早三叠世出现“礁缺失”^[10~12]、“层状硅质岩缺失”^[13]、“煤缺失”^[14]等独特

现象. 在浅海环境中, 相应的变化表现为大量特殊沉积构造在早三叠世地层中出现, 如扁平砾石砾岩^[15~17]、蠕虫状灰岩^[15,18~20]、潮下皱纹构造^[21]、微生物岩^[17,22~31]、海底碳酸盐胶结岩扇^[17,32]和泥质条带泥晶灰岩^[16,33]等. 这些沉积特征在寒武纪及更早的前寒武纪海洋环境中广泛存在, 却从奥陶纪后生动物大发展之后的浅海环境中消失, 退缩到少量缺乏后生动物的高压力环境中, 如泻湖等. 因此, 有人认为这些沉积构造在奥陶纪之后的正常浅海环境中出现为非正常沉积^[34], 故被称为错时相(anachronistic facies)沉积^[35].

本文通过对早三叠世华南特殊沉积构造——错时相的综合研究, 探索生物复苏期这类“非正常”沉积与海洋环境状况之间的因果关系.

1 地质背景

华南板块包括扬子地台和华南褶皱带. 北以秦

岭-大别造山带为界与华北板块接壤^[36~38], 西北以松潘-甘孜褶皱系与巴颜喀拉三叠纪复理石盆地相接^[39], 西南部沿哀牢山-宋玛断裂分别与暹罗-西布板块、印度支那板块相邻^[37](图 1).

早三叠世, 华南位于低纬度的东特提斯地区^[42], 大部分为浅海环境, 形成了泥晶灰岩、泥灰岩与泥岩的沉积建造, 同时在一些浅海台地上形成了以碳酸盐为主的沉积. 广泛出露连续的二叠纪、三叠纪海相沉积, 使得华南具有研究海相二叠系-三叠系界线、早三叠世地质及古生代-中生代地质突变事件的独特优势条件.

错时相特殊沉积构造在华南许多地区都有发现, 分布于下三叠统底部至顶部, 乃至中三叠统底部的不同层位中, 而且囊括了全球已报道的大多数特殊沉积和沉积构造类型, 为研究华南早三叠世的沉积环境及其与生态系演变之间的关系提供了契机.

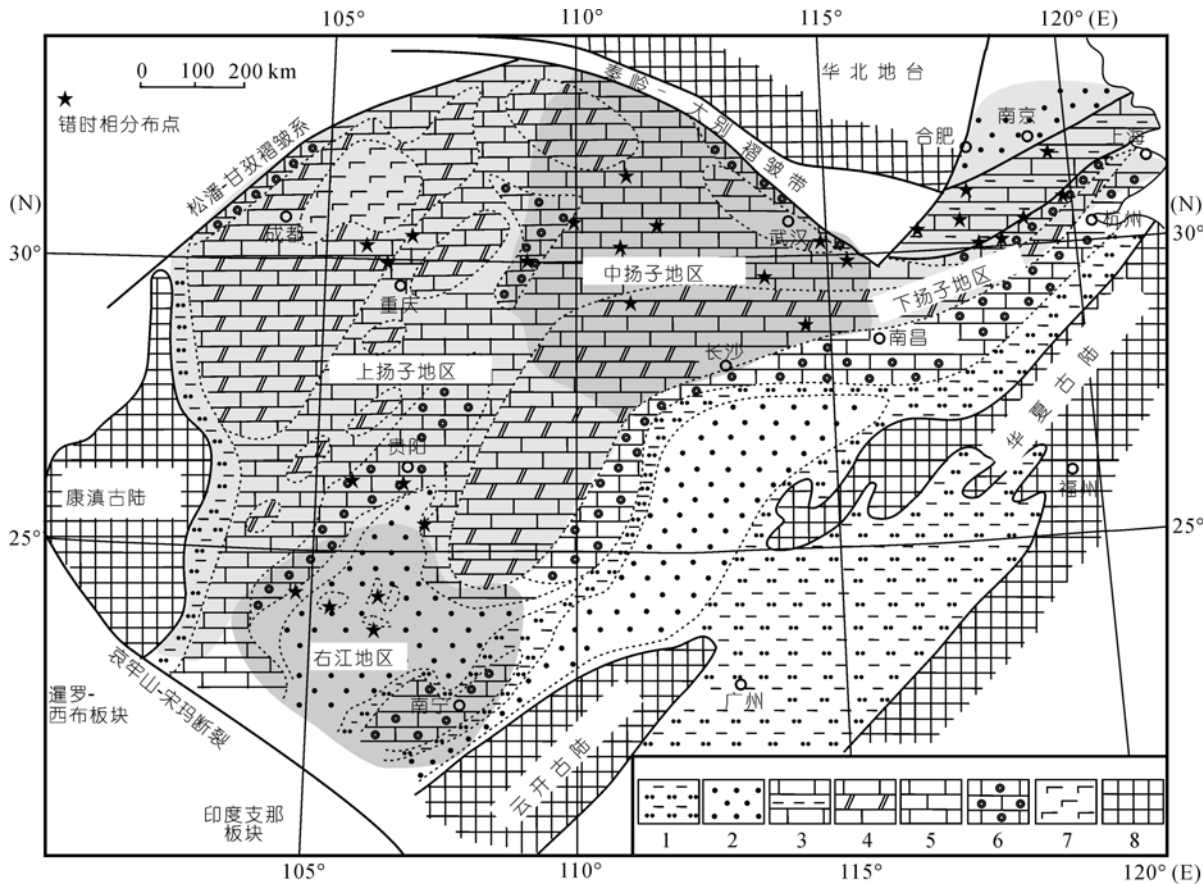


图 1 华南早三叠世岩相古地理(据文献^[40]和^[41]修改)及错时相分布

1. 滨岸-陆棚相泥岩、粉砂岩互层; 2. 深水盆地相浊积岩; 3. 斜坡相页岩、泥晶灰岩及颗粒灰岩; 4. 局限台地-蒸发相白云岩、泥晶灰岩; 5. 开阔台地相风暴岩、泥晶灰岩; 6. 台地边缘相白云岩、泥晶灰岩及鲕粒灰岩; 7. 峨眉山玄武岩; 8. 物源区(古陆)

2 华南早三叠世错时相的时空分布

考虑到构造背景和地层分区的不同, 本文分4个地区对华南早三叠世错时相的时空分布分别进行归纳, 即包括安徽南部、江苏南部、浙江西北部和江西东北部在内的下扬子地区; 包括湖北、江西西北部、湖南北部及重庆东部的中扬子地区; 包括重庆大部、四川、贵州及云南东部的上扬子地区; 以及包括广西大部、贵州南部的右江地区(图 1).

2.1 下扬子地区

下扬子地区的下三叠统为一套碳酸盐缓坡相沉积序列, 岩石地层自下而上分为殷坑组、和龙山组、南陵湖组. 二叠系-三叠系界线位于殷坑组近底部^[43], 印度阶-奥伦尼克阶的界线位于殷坑组的中部^[44,45](图 2).

扁平砾石砾岩产于殷坑组的中上部、和龙山组中

部及南陵湖组的下部、顶部^[15,41]; 蠕虫状灰岩产于和龙山组中部及南陵湖组^[15,19,20,46]; 微生物岩出现在紧邻二叠系、三叠系界线之上的层位及殷坑组上部^[15,41,47,48]; 薄层灰岩极为普遍, 出露于殷坑组中下部至南陵湖组上部的多个层位中^[15,41]; 条带灰岩仅分布在殷坑组顶部和和龙山组中^[15,41,49](图 2).

2.2 中扬子地区

早三叠世, 中扬子地区经历了一次海侵-海退旋回, 沉积了陆棚至台地相碳酸盐岩夹碎屑岩建造. 岩石地层单位包括大冶组和嘉陵江组. 二叠系-三叠系界线位于大冶组近底部, 印度阶-奥伦尼克阶的界线位于大冶组下部(图 2).

扁平砾石砾岩通常产于大冶组的中上部; 蠕虫状灰岩产于大冶组中部、上部和嘉陵江组中下部^[41]; 微生物岩仅在紧邻二叠系-三叠系界线之上的层位和

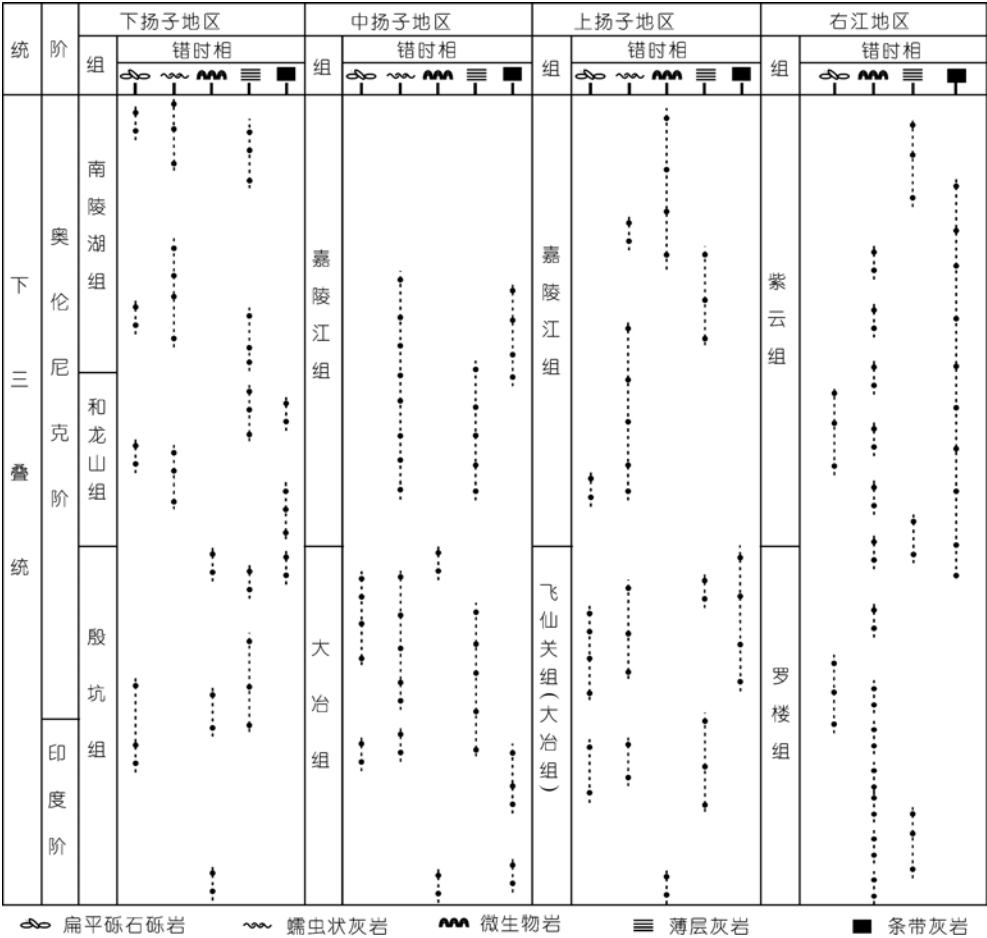


图 2 华南各地区早三叠世地层序列及错时相分布

大冶组顶部被发现^[31,41,50];薄层泥晶灰岩产于大冶组的中上部和嘉陵江组中部;条带状灰岩分布于大冶组下部和嘉陵江组中部(图 2).

2.3 上扬子地区

上扬子地区早三叠世经历了一次海侵过程^[51],接受台地至陆棚相的碳酸盐岩、泥质岩混合沉积.下三叠统岩石地层垂向上分为飞仙关组(大冶组)和嘉陵江组,二叠系-三叠系界线位于飞仙关组(或大冶组)近底部,印度阶-奥伦尼克阶的界线位于飞仙关组(或大冶组)下部(图 2).

扁平砾石砾岩通常产于飞仙关组的中上部和嘉陵江组下部^[16,52];蠕虫状灰岩广泛出露于飞仙关组中部至嘉陵江组中部的地层中^[19,52];微生物岩出现在紧邻P/T之上的层位和嘉陵江组中上部^[25~28,50,52,53];薄层泥晶灰岩出现在飞仙关组中部、上部和嘉陵江组中部^[52];条带状灰岩分布于飞仙关组上部^[52](图 2).

2.4 右江地区

包括贵州南部和广西大部.错时相常分布在右江(南盘江)盆地中孤立的台地及其周缘地区.早三叠世时,右江盆地位于大型浅海碳酸盐陆棚相的扬子地台南缘,盆地中分布着一些被鲕滩、台地边缘斜坡所环绕的孤立碳酸盐岩台地.台地边缘区的岩石地层自下而上分为罗楼组、紫云组,二叠系与三叠系地层整合接触,两者界线位于罗楼组近底部,印度阶-奥伦尼克阶的界线位于罗楼组中下部(图 2).

扁平砾石砾岩产于罗楼组的中部和紫云组中部^[40,41];微生物岩除在二叠系-三叠系界线处地层中出现外,在二叠系-三叠系界线附近直到紫云组许多层位中都有发现^[23,29,40,50];薄层泥晶灰岩出现在罗楼组下部、罗楼组与紫云组界线附近及紫云组上部^[40,41];条带状灰岩几乎分布于整个下三叠统中^[40,41,54](图 2).值得注意的是,微生物岩和条带状灰岩在该区域内最为丰富,且延续时间长.

3 华南下三叠统错时相概述

在华南下三叠统错时相特殊沉积物中,最为发育且最具特色的是蠕虫状灰岩,但皱纹构造和海底碳酸盐胶结岩扇在华南下三叠统中至今未有报道.

3.1 扁平砾石砾岩

扁平砾石砾岩由板片状的泥晶灰岩碎屑和灰泥基质组成.通常情况下,野外露头上砾石长短轴的比值大于 3:1^[15,40],砾屑含量大于 60%,灰泥胶结,分选较差.单个砾石呈棱角、次棱角状,总体呈叠瓦状、串珠状、放射状和不规则状分布(图 3(a)).砾岩层与上下地层界面截然.薄片,扁平砾石也表现出扁平状特征,砾石有一定磨圆,被粗粒的含少量生物屑和内碎屑的基质所包围,但砾石内部缺乏化石.值得注意的是,碎屑不显示任何定向而碎屑边缘常具有一定磨圆.

在潮下低能环境中,处于早期成岩阶段尚未固结的薄层灰泥,在风暴或重力流作用下被撕裂^[15,16],而后以微晶灰岩砾屑的形式重新沉积成岩,便形成了扁平砾石砾岩.扁平砾石砾岩在前寒武纪、寒武纪和早奥陶世地层中较为丰富,但在随后的正常浅海环境中却极少出现,是特定地质历史阶段沉积作用所留下的特殊记录,故Sepkoski等^[35]提出扁平砾石砾岩在奥陶纪之后的正常浅海环境中出现为错时相沉积.

Sepkoski^[55], Wignall和Twitchett^[16]通过对扁平砾石砾岩的成因研究提出:二叠纪末大灭绝后,早三叠世的海洋生态倒退至奥陶纪生物大辐射之前的状况,海洋中生物扰动水平低,但海底胶结作用广泛.这种海洋环境是当时大洋海水翻转诱发的全球性大洋缺氧事件的结果.深层碳酸盐过饱和的缺氧海水间歇性的上翻和厌氧细菌降解作用造成的碱度提高,大大促进了同沉积海底胶结作用的发生^[32].这种广泛的同沉积海底胶结和弱的生物扰动有利于原始沉积成层特点的保存,最终促成了扁平砾石砾岩的形成.

3.2 蠕虫状灰岩

蠕虫状灰岩是华南下三叠统中最为常见的特殊沉积构造,因岩石内部具大量形似蠕虫的个体而得名^[19].由深色的蠕体和浅色的基质组成,蠕体中方解石的结晶程度稍高于基质中方解石的结晶程度,但蠕体与基质的主要成分差别不大,仅基质中黏土质含量相对较高.

至今,蠕虫状灰岩仅在华南下三叠统中被报道,因此本文将在下节中以长江三峡地区的下三叠统蠕虫状灰岩为例,进行重点剖析,以获得更多的了解和

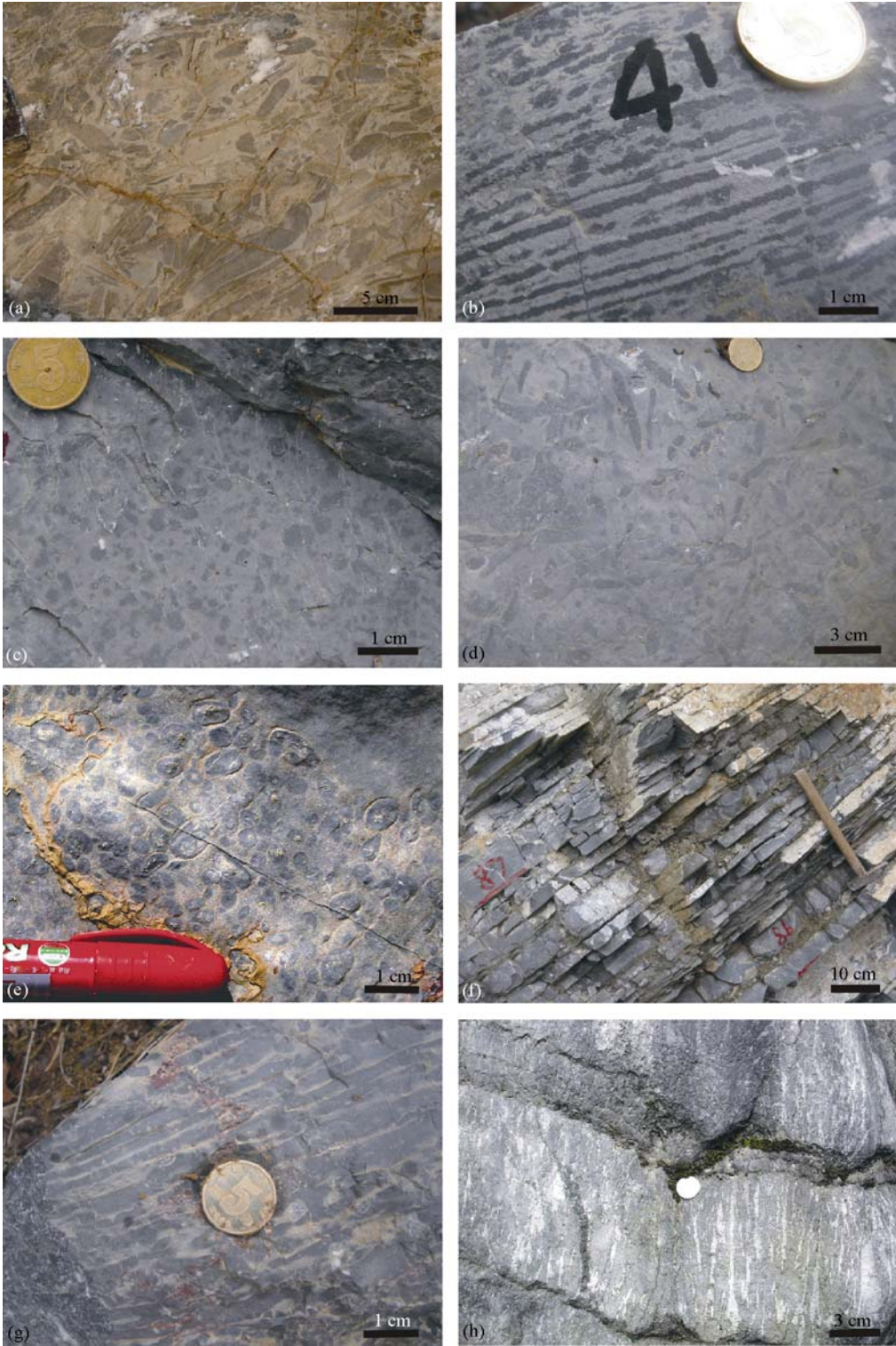


图 3 华南早三叠世错时相野外照片

(a) 扁平砾石砾岩, 安徽广德和龙山组; (b) 层状蠕虫状灰岩, 湖北五峰大冶组; (c) 粒状蠕虫状灰岩, 湖北兴山大冶组; (d) 柱状蠕虫状灰岩, 湖北五峰嘉陵江组; (e) 椭球状蠕虫状灰岩, 湖北五峰嘉陵江组; (f) 薄层泥晶灰岩, 湖北兴山大冶组; (g) 条带灰岩, 湖北长阳大冶组; (h) 微生物岩, 四川华莹山飞仙关组

启示.

3.3 微生物岩

华南下三叠统中的微生物岩具有多种类型, 如叠层石、核形石、凝块石^[15,23,25~31,40,41,50,53]、微生物灰泥丘及具钙质微生物构造的微生物层和微生物礁^[23,47,48].

产于浅水碳酸盐台地相二叠系-三叠系界线处的微生物岩, 野外风化露头呈点状、树枝状或层状(图 3(h)). 近年来, 对二叠系-三叠系界线处的微生物岩有了较多的研究^[25~31,50], 但下三叠统其他层位中的层状微生物岩(包括叠层石)研究较少^[15,47,48].

微生物岩被认为是一些以蓝细菌为主导的底栖微生物群落, 在缺乏后生动物的捕食和扰动条件下的生物-沉积建造. 二叠纪末的后生动物大灭绝被认为是形成二叠纪-三叠纪之交这种环境状况的原因, 也正是这种环境导致了微生物岩再现于正常浅海相^[11,22,56]. 微生物岩一直延续至早三叠世晚期, 这或多或少与二叠纪末大灭绝后的迟滞复苏有关.

3.4 薄层灰岩和条带灰岩

薄层灰岩在华南早三叠世地层中相当发育, 这种薄层灰岩与通常意义的薄层灰岩不同之处在于: 泥晶灰岩内部缺乏垂向生物扰动且很少存在生物化石, 而层面上具有不同程度的水平扰动和小型的或薄壳型的灾难生物化石^[57,58](图 3(f)).

本文中的条带灰岩是指泥晶灰岩与钙质泥岩或钙质粉砂岩(<5 cm)互层的岩相类型. 其特殊性在于泥晶灰岩中缺乏生物扰动、几乎不含生物化石和碳酸盐岩与硅质碎屑岩频繁互层(图 3(g)).

薄层泥晶灰岩及条带灰岩的形成环境背景和成岩保存条件与前文提到的扁平砾石的成因有相似性. 不过, 有两点值得注意: (1) 垂直扰动缺乏而水平遗迹丰富表明底栖移动生活方式较底栖固着或底内生活方式更能适应早三叠世的海洋底层环境, 指示当时浅海底层可能处于贫氧的生态条件. (2) 条带灰岩中碳酸盐岩与碎屑岩密集互层可能源于当时海洋环境的强烈不稳定性, 这种不稳定反映了当时生态系统对环境调配缓冲功能的丧失, 包括陆源区植被匮乏导致风化作用对气候周期性变化的敏感性, 海洋生态系统功能失调导致沉积作用的无缓冲被动性等.

4 湖北三峡地区的蠕虫状灰岩

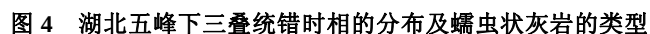
三峡地区早三叠世地层出露广泛, 岩石地层分为大冶组和嘉陵江组, 两者各自又分为 4 段, 蠕虫状灰岩主要分布于大冶组三段、四段和嘉陵江组二段中(图 4).

根据蠕体的形态, 可将蠕虫状灰岩分为 4 种类型(图 4): 一类是层状或似层状蠕虫状灰岩(图 4(a)), 蠕体平行层面呈连续层状或断续似层状产出, 单个蠕体层厚 2~6 mm, 蠕体与基质的比例为 1:1~1:4(图 3(b)), 蠕体层横向上变化不明显或渐变, 少量构成小型斜层理的细层; 二类是不规则粒状蠕虫状灰岩(图 4(b)), 蠕体呈不规则的芝麻点状、豆粒状或小云朵状等, 大小各异(粒径 1~10 mm), 排列杂乱(图 3(c)), 蠕体与基质呈渐变接触; 三类是变形柱状蠕虫状灰岩(图 4(c)), 蠕体呈较规则的短柱状、管状, 垂直或斜交层面(图 3(d)), 与基质界线较为清楚, 三类中的蠕体有时穿切其他类型蠕体; 四类是椭球状蠕虫状灰岩(图 4(d)), 蠕体呈规则的椭球-球状, 大小 2 mm×2 mm~10 mm×15 mm, 长轴多平行层面(图 3(e)), 总体呈透镜状或条带状产出.

在三峡地区, 一类、二类蠕虫状灰岩最为常见, 三类次之, 四类较少. 一类主要分布在大冶组三段, 少量分布在嘉陵江组二段, 与泥灰岩、泥晶灰岩、鲕粒灰岩及钙质泥岩等共生. 二类在大冶组二段和嘉陵江组二段中均有分布, 与泥晶灰岩、条带灰岩共生. 三类、四类分布在嘉陵江组二段中上部, 与泥晶灰岩、条带灰岩共生.

不同类型蠕虫状灰岩存在特定的组合关系: 一类常单独出现或与二类相伴出现; 二类单独出现或与一类、三类相伴出现; 三类多与二类、四类相伴出现; 四类只与三类相伴出现. 总体看来, 从下而上, 一类减少至消失, 二类变化不明显, 三、四类迅速增加并成为下三叠统上部层位中蠕虫状灰岩的主导类型.

蠕虫状灰岩的成因极其复杂, 不同类型明显有着不同的成因条件. 层状蠕虫状灰岩为化学成因, 源于相对低能条件下的成岩分异. 似层状蠕虫状灰岩由层状蠕虫状灰岩经差异压实作用和压溶作用改造而成, 具化学和机械成因. 粒状蠕虫状灰岩可能是由化学凝聚或微生物凝聚作用形成. 椭球状蠕虫状灰



岩为介于层状蠕虫灰岩与扁平砾石之间的过渡类型, 是层状蠕虫状灰岩经较强烈的波浪、水流作用或底冲刷改造的结果, 具机械与化学成因. 这三类的根本成因基本一致, 是在经历了二叠纪末大灭绝的古生代-中生代突变时期, 广泛的海底胶结和弱的生物扰动环境下形成的特殊产物, 是原始沉积成层特点在特定条件下得以保存的体现. 柱状蠕虫状灰岩中蠕虫体为生物潜管和扰动斑点, 具生物成因, 该类蠕虫状灰岩的出现标志着底栖生物群落及其活动能力的加强和底层环境的显著改善.

5 讨论

扁平砾石砾岩、蠕虫状灰岩、微生物岩等特殊沉积构造及薄层灰岩、条带状灰岩等特殊沉积相, 在华南下三叠统中分布广泛, 其中扁平砾石砾岩、蠕虫状灰岩、微生物岩引起了众多的关注, 对其成因机制也探讨已久, 不过前人的研究主要集中于其形成的动力机制, 而忽视了其与古生代生态系向中生代生态系转变这种特殊地质背景间的紧密联系. 直到最近, 随着不同类型的特殊沉积及相关构造在全球早三叠世中发现与进一步研究, 才逐渐意识到这些特殊沉积的起源与古生代-中生代地质突变期的特殊海洋环境状况及二叠纪末大灭绝事件后特殊的生态系状况相关.

5.1 错时相与生物大灭绝

二叠纪末的大灭绝事件使古生代生态系遭受重创, 早三叠世生态系被少量幸存物种和一些灾难分子所占据, 生态竞争骤然下降而呈非正常的生态松弛面貌^[22]. 低分异度的生物群落在中三叠世之前一直未能恢复到灭绝前的分异水平, 相应地, 遗迹化石分异度和底栖内生动物的钻进深度在早三叠世都表现为较低的水平^[58-61]. 缺乏较深的垂向生物扰动有利于细微的原始沉积构造的保存. 另外, 后生动物的大量灭绝, 导致微生物成为早三叠世生态系的主宰并呈泛滥之势, 而微生物的新陈代谢有助于同沉积海底胶结作用和石化作用.

所以, 早三叠世后生生物的减少和垂向扰动能力的降低可能是扁平砾石砾岩、微生物岩、薄层灰岩和条带灰岩形成的原因.

5.2 错时相与海洋环境

错时相特殊沉积广泛分布于华南及全球其他众多地方的下三叠统中, 对我们了解二叠纪末大灭绝后的海洋环境有重要的启示.

(1) 扁平砾石砾岩、蠕虫状灰岩、薄层灰岩及条带灰岩之间的共同之处在于原始沉积的成层特点保存完好, 除了底栖后生动物减少和垂向扰动降低外, 同沉积海底胶结作用是错时相及相关沉积构造形成的关键. 广泛的海底胶结作用, 可能源于因当时海洋翻转造成的大洋深部碳酸盐过饱和的贫氧海水上翻, 同时厌氧细菌降解作用造成海水碱度升高, 也大大促进了同沉积海底胶结作用的发生.

(2) 二叠纪末的大灭绝摧毁了古生代的后生动物礁和众多的造礁生物及附生生物, 如四射珊瑚、筴、一些棘皮类、苔藓虫、腕足类等永远消逝了^[62,63]. 在中生代早期数百万年里, 后生动物礁都没有出现, 但微生物礁(丘)却再现于正常浅海环境中^[11,22,56]. 造礁生物的灭绝和礁生态系的崩溃显然与栖居地的丧失无关, 而是突发性的古海洋环境灾变事件, 如全球性火山活动、缺氧、海洋翻转等, 使造礁后生生物遭受了灭顶之灾.

(3) 缺乏垂向扰动和生物碎屑而水平遗迹丰富是薄层灰岩的主要特征, 而遗迹化石可作为特定环境条件下生物活动的直接指针, 故早三叠世造迹生物生态习性从表生移动生活方式向底栖固着或内生生活方式的转变表明, 尽管浅海底层可能处于贫氧状况, 但底层海水的含氧量在逐渐增加. 与此同时, 海洋初级生产力一直保持着一定的水平.

5.3 错时相与生物复苏

二叠纪-三叠纪过渡时期, 华南的许多地方, 如扬子地区和右江地区, 单纯的古地理环境和水深并未发生明显变化, 但错时相与古生代生态系突然崩溃同步出现, 并在各种碳酸盐岩相区的早三叠世沉积记录中广泛分布, 直至早三叠世末才逐渐衰退, 其中三叠世早期的消失恰好是中生代生态系在安尼晚期重建基本完成之时. 沉积体系改变与中生代生物辐射如此同步进一步证明错时相、特殊环境、生态系转变之间存在必然联系. 环境异常事件导致了生

物的灭绝和沉积体系的转变, 恶化环境在早三叠世持续出现导致了丰富的特殊沉积和二叠纪末大灭绝后生物复苏的迟滞^[64,65]. 特殊沉积的消失可作为生态环境逐步得到改善和生物复苏期结束的标志.

致谢 感谢审稿人提出的建设性意见.

参考文献

- 1 Erwin D H. The Great Paleozoic Crisis: Life and Death in the Permian. New York: Columbia University Press, 1993
- 2 Erwin D H. The Permo-Triassic extinction. *Nature*, 1994, 367: 231—236^[DOI]
- 3 Stanley S M, Yang X. A double mass extinction at the end of the Paleozoic Era. *Science*, 1994, 266: 1340—1344^[DOI]
- 4 Hallam A. Why was there a delayed radiation after the end-Paleozoic extinctions? *Hist Biol*, 1991, 5: 257—262
- 5 童金南. 华南古生代末大绝灭后的生态系复苏. *地球科学——中国地质大学学报*, 1997, 22: 373—376
- 6 Hallam A, Wignall P B. Mass Extinctions and Their Aftermath. New York: Oxford University Press, 1997
- 7 Schubert J K, Bottjer D J. Aftermath of the Permian-Triassic mass extinction event: paleoecology of Lower Triassic carbonates in the western USA. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1995, 116: 1—39^[DOI]
- 8 Rodland D L, Bottjer D J. Biotic recovery from the end-Permian mass extinction: behavior of the inarticulate brachiopod *Lingula* as a disaster taxon. *Palaaios*, 2001, 16: 95—101
- 9 Fraiser M L, Bottjer D J. The non-actualistic Early Triassic gastropod fauna: a case study of the Lower Triassic Sinbad Limestone Member. *Palaaios*, 2004, 19: 259—275^[DOI]
- 10 Fagerstrom J A. The Evolution of Reef Communities. New York: John Wiley & Sons, 1987
- 11 Stanley G D. The history of early Mesozoic reef communities: a three-step process. *Palaaios*, 1988, 3: 170—183
- 12 Tong J N, Lin Q X, Shi G R. Evolution of the Permian and Triassic reef ecosystems in South China. *Proc R Soc Victoria*, 1998, 110: 385—399
- 13 Racki G. Silica-secreting biota and mass extinctions: survival patterns and processes. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1999, 154: 107—132^[DOI]
- 14 Retallack G J, Veevers J J, Morante R. Global coal gap between Permian-Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants. *GSA Bull*, 1996, 108: 195—207
- 15 冯增昭, 王英华, 李尚武. 下扬子地区中下三叠统青龙群岩相古地理研究. 昆明: 云南科技出版社, 1988
- 16 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. *Sedimentology*, 1999, 46: 303—316^[DOI]
- 17 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. *Earth-Sci Rev*, 2006, 78: 193—206^[DOI]
- 18 黄思静. 蠕虫状灰岩及其成因. *成都地质学院学报*, 1984, 3: 60—68
- 19 姜月华, 岳文浙, 业治铮, 等. 蠕虫状灰岩特征和成因新探. *矿物岩石*, 1992, 12: 1—7
- 20 钱守荣. 蠕虫状灰岩成因新解. *淮南工业学院学报(自然科学版)*, 1995, 15(3): 15—19
- 21 Pruss S, Fraiser M, Bottjer D J. Proliferation of Early Triassic wrinkle structures: implications for environmental stress following the end-Permian mass extinction. *Geology*, 2004, 32: 461—464^[DOI]
- 22 Schubert J K, Bottjer D J. Early Triassic stromatolites as post-mass extinction disaster forms. *Geology*, 1992, 20: 883—886^[DOI]
- 23 Lehrmann D J. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang Basin, South China. *Geology*, 1999, 27: 359—362^[DOI]
- 24 Hips K, Haas J. Calcimicrobial stromatolites at the Permian-Triassic boundary in a western Tethyan section, Bukk Mountains, Hungary. *Sed Geol*, 2006, 185: 239—253^[DOI]
- 25 Ezaki Y, Liu J, Adachi N. Microbialites and their responsible microbes following the end-Permian extinction in Sichuan, South China. *Gond Res*, 2001, 4: 614^[DOI]
- 26 Ezaki Y, Liu J, Adachi N. Earliest Triassic microbialite micro- to megastructures in the Huaying area of Sichuan Province, South China: implications for the nature of oceanic conditions after the end-Permian extinction. *Palaaios*, 2003, 18: 388—402^[DOI]
- 27 Kershaw S, Guo L, Swift A, et al. ?Microbialites in the Permian-Triassic boundary interval in Central China: structure, age and distri-

- bution. *Facies*, 2002, 47: 83—90[DOI]
- 28 Kershaw S, Zhang T, Lan G. A ?microbialite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China, and its palaeoenvironmental significance. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1999, 146: 1—18[DOI]
 - 29 Lehrmann D J, Payne J L, Felix S V, 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. *Palaios*, 2003, 18: 138—152[DOI]
 - 30 Payne J L, Lehrmann 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. *Palaios*, 2006, 21: 63—85[DOI]
 - 31 杨浩, 张素新, 江海水, 等. 湖北崇阳二叠纪-三叠纪之交钙质微生物岩的时代及基本特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 2006, 17: 121—131
 - 32 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. *Geology*, 1999, 27: 645—648[DOI]
 - 33 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. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2003, 193: 405—423[DOI]
 - 34 Pruss S B, Corsetti F A, Bottjer D J. The unusual sedimentary rock record of the Early Triassic: a case study from the southwestern United States. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 222: 33—52[DOI]
 - 35 Sepkoski J J, Bambach R K, Droser M L. Secular changes in Phanerozoic event bedding and the biological imprint. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A, eds. *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 298—312
 - 36 Sun S, Li J L, Chen H H, et al. Mesozoic and Cenozoic sedimentary history of South China. *AAPG Bull*, 1989, 73: 1247—1269
 - 37 Metcalfe I. Pre-Cretaceous evolution of SE Asian terranes. In: Hall R, Blundell D, eds. *Tectonic Evolution of Southeast Asia*. London: Geol Soc Spec Publ, 1996. 191—122
 - 38 Lehrmann D J, Donghong P, Enos P, et al. Impact of differential tectonic subsidence on isolated carbonate-platform evolution: Triassic of the Nanpanjiang Basin, South China. *AAPG Bull*, 2007, 91: 287—320[DOI]
 - 39 Ingersoll R V, Dickinson W R, Graham S A. Remnant-ocean submarine fans: largest sedimentary systems on Earth. In: Chan M A, Archer A A, eds. *Extreme Depositional Environments: Mega End Members in Geologic Time*. Geol Soc Am Spec Pap, 2002. 191—208
 - 40 吴应林, 朱洪发, 朱忠发, 等. 华南三叠纪地层分区及划分对比. 中国南方三叠纪岩相古地理与成矿作用. 北京: 地质出版社, 1994
 - 41 冯增昭, 鲍志东, 李尚武. 中国南方早中三叠世岩相古地理. 东营: 石油大学出版社, 1997
 - 42 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. *地球科学——中国地质大学学报*, 1999, 24: 1—12
 - 43 Yin H F, Zhang K X, Tong J N, et al. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*, 2001, 24: 102—114
 - 44 Tong J N, Zakharov Y D, Orchard M J, et al. A candidate of the Induan-Olenekian boundary stratotype in the Tethyan region. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2003, 46(11): 1182—1200
 - 45 童金南, 赵来时, 左景勋, 等. 安徽巢湖地区下三叠统综合层序. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, 30: 40—46
 - 46 张杰, 童金南, 李慧, 等. 蠕虫状灰岩成因研究: 以苏皖地区为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 2007, 32(增刊): 101—107
 - 47 钱迈平. 中下扬子区海相三叠纪叠层石及其环境演变. *古生物学报*, 1995, 34: 731—741
 - 48 钱迈平, 范洪源. 无锡嵩山三叠系下统青龙组叠层石生物丘及其环境. *江苏地质*, 1994, 18: 19—24
 - 49 童金南, 殷鸿福. 浙江长兴煤山剖面 Griesbachian 期旋回地层研究. *地层学杂志*, 1999, 23: 130—135
 - 50 王永标, 童金南, 王家生, 等. 华南二叠纪末大绝灭后的钙质微生物岩及古环境意义. *科学通报*, 2005, 50(6): 552—558
 - 51 Wignall P B, Hallam A. Facies change and the end-Permian mass extinction in S.E. Sichuan, China. *Palaios*, 1996, 11: 587—596[DOI]
 - 52 四川省地质矿产局. 四川省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997
 - 53 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. *Facies*, 2007, 53: 409—425[DOI]
 - 54 Lehrmann D J, Wan Y, Wei J, et al. Lower Triassic peritidal cyclic limestone: an example of anachronistic carbonate facies from the Great Bank of Guizhou, Nanpanjiang Basin, Guizhou Province, South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2001, 173: 103—123[DOI]

- 55 Sepkoski J J Jr. Flat-pebble conglomerates, storm deposits, and the Cambrian bottom fauna. In: Einsele G, Seilacher A, eds. *Cyclic and Event Stratification*. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 371—385
- 56 Webb G E. Was Phanerozoic reef history controlled by the distribution of non-enzymatically secreted reef carbonates (microbial carbonate and biologically induced cement)? *Sedimentology*, 1996, 43: 941—947[DOI]
- 57 杨道政, 李金华, 桂建斌. 湖北广济早三叠世遗迹化石及其古环境意义. *湖北地质*, 1992, 6(1): 1—10
- 58 罗茂, 时国, 龚一鸣. 贵阳花溪早三叠世遗迹化石及其对二叠纪末生物大灭绝事件后生物复苏的启示. *古地理学报*, 2007, 9: 519—532
- 59 Twitchett R J. Palaeoenvironments and faunal recovery after the end-Permian mass extinction. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1999, 154: 27—37[DOI]
- 60 Twitchett R J, Wignall P B. Trace fossils and the aftermath of the Permo-Triassic mass extinction: evidence from northern Italy. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1996, 124: 137—151[DOI]
- 61 Pruss S B, Bottjer D J. Early Triassic trace fossils of the Western United States and their implications for prolonged environmental stress from the end-Permian mass extinction. *Palaaios*, 2004, 19: 551—564[DOI]
- 62 Riding R, Liang L. Geobiology of microbial carbonates: metazoan and seawater saturation state influences on secular trends during the Phanerozoic. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 101—115[DOI]
- 63 Knoll A H, Bambach R K, Canfield D E, et al. Comparative earth history and Late Permian mass extinction. *Science*, 1996, 273: 452—457[DOI]
- 64 Payne J L, Lehrmann D J, Wei J, et al. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction. *Science*, 2004, 305: 506—509[DOI]
- 65 Tong J, Zhang S, Zuo J, et al. Events during Early Triassic recovery from the end-Permian extinction. *Glob Planet Change*, 2007, 55: 66—80[DOI]