

文章编号: 1000-0550(2010) 02-0314-10

早三叠世生物复苏期的特殊沉积^① ——“错时相”沉积

赵小明^{1,2} 牛志军² 童金南¹ 姚华舟²

(1. 中国地质大学 武汉 430074 2. 宜昌地质矿产研究所 湖北宜昌 443003)

摘要 经历了对二叠纪末大灭绝及相关地质灾变事件的多年热点研究后,近年来科学家们将注意力转移到灭绝后的事件效应上,即生态系和沉积体系状况。但紧随二叠纪末灭绝事件之后的早三叠世生态系以分异度极低的广适性分子和机会分子为主,这就突显沉积记录的重要,也使得下三叠统地层中的特殊沉积及相关构造——“错时相”沉积,如扁平砾石砾岩、蠕虫状灰岩、潮下皱纹构造、微生物岩、海底碳酸盐胶结岩扇、薄层灰岩和条带灰岩等,成为研究灭绝—残存—复苏领域的学科前沿。

作为地质历史环境一次大跃变后的直接产物,“错时相”沉积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,这种耦合关系表明沉积体系、生态系、生物灭绝与复苏、异常环境之间存在必然的联系。对于化石保存单调稀少的下三叠统地层,“错时相”沉积的研究,为探索二叠纪末生物灭绝与复苏提供了宝贵的材料和全新的视角。

关键词 早三叠世 “错时相”沉积 灭绝与复苏 生态系

第一作者简介 赵小明 男 1970年出生 博士研究生 高级工程师 区域地质和基础地质研究

E-mail zm20040021@163.com

中图分类号 P512.2 文献标识码 A

人们对生命演化及史前大灭绝有着长期的兴趣,因为人类希望从这些事件中寻找协调人与自然的关系、实现可持续发展的有益启示。显生宙以来,穿插了近 30 次大规模灭绝,其中公认的规模巨大、影响遍及全球的大灭绝有五次^[1],分别发生在奥陶纪末期、泥盆纪晚期、二叠纪末期、三叠纪末期和白垩纪末期。在五大灭绝事件中,以 6 500 万年前导致恐龙灭绝的 K/T 事件最为著名,然而规模最大,对生物演化历史影响最深刻的却是发生在 2 51 亿年前二叠纪末的 P/T₁ 事件^[2],这次事件导致海洋无脊椎动物科级灭绝率达 49%^[3~5],种级灭绝率高达 80%~90%^[6],灭绝之后的生物复苏延缓了 5~6 百万年,甚至是 10 百万年^[7~10]。

对于二叠纪末灭绝事件的发生原因,科学家们提出了各种假说,几乎是仁者见仁,智者见智,目前主要有四种:外星撞击事件、西伯利亚暗色岩和全球火山喷发事件、海洋缺氧事件及甲烷水合物释放事件。不过,仍没有哪一种假说能完全揭开二叠纪末的灭绝之密。近年来,经历了对二叠纪末大灭绝及相关地质灾变事件的多年热点研究后,科学家们将注意力转至大

灭绝后的事件效应上来,即三叠纪特别是早三叠世的生态系面貌和沉积体系状况。对其研究主要借助于两方面的材料,一是化石记录,二是沉积记录。但遭受二叠纪末灭绝事件打击的早三叠世生态系以分异度极低的广适性分子和机会分子为主^[11,12],化石保存稀少单调,这就使得沉积记录所包含的信息尤为重要,也使得下三叠统地层中广泛分布的特殊沉积及相关构造——“错时相”沉积成为关注的焦点和研究前沿。

本文根据国内外研究的最新进展,结合笔者对华南的研究成果,总结了“错时相”沉积的类型、宏观特征、时空分布,讨论“错时相”沉积对研究二叠纪末生物灭绝与早三叠世生物复苏的启示。

1 “错时相”沉积的涵义

古生代—中生代之交的一系列突发性灾变事件使得海洋生态系遭受重创,同时沉积体系也发生了剧变,如下三叠统地层中出现的礁间断^[13,14],层状硅质岩间断^[15],煤间断^[16]。在浅海环境中,相应的变化表现为大量特殊沉积及相关构造在下三叠统地层中广泛出现,如扁平砾石砾岩^[17~20]、蠕虫状灰

①国家自然科学基金重点项目(批准号:40830212)和中国地质调查局基础地质调查项目(编号:1212010610709,1212010814057)共同资助。

收稿日期:2009-03-02 收修修改稿日期:2009-04-30

岩^[17, 21~23]、潮下皱纹构造^[24]、微生物岩^[19, 25~35]、海底碳酸盐胶结扇^[19, 36]和条带状灰岩^[19, 20]等。这些特殊沉积及相关构造在寒武纪或更早的前寒武纪海洋环境中广泛存在, 但奥陶纪之后退缩到少量缺乏后生动物的高压力环境中, 如潟湖、深海等。因此, 这些沉积构造在寒武纪之后的正常浅海环境中出现被认为“在时间和空间上发生了错位”, 故称为“非正常”沉积^[18]或“错时相”沉积^[37]。

“错时相”沉积中的许多类型很早就引起了地质学家们的注意, 但前人仅从动力学机制去探讨其成因, 直到近二十年, 地质学家们才真正开始意识到“错时相”沉积的起源与古生代—中生代地质转折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。随着全球下三叠统地层中的特殊沉积及相关构造被重新识别与研究, 其地质意义已引起国内外地质学家们越来越多的关注, “错时相”沉积的研究也逐渐成为探索二叠纪末生物灭绝与复苏的新视角。

2 “错时相”沉积的类型与特征

目前, 全球下三叠地层中已发现的“错时相”沉积包括扁平砾石砾岩、微生物岩、蠕虫状灰岩、潮下皱纹构造、海底碳酸盐胶结岩扇及条带灰岩、薄层泥晶灰岩等。华南作为全球研究二叠纪末大灭绝及早三叠世生物复苏最理想的地区, “错时相”沉积分布于下三叠统从底到顶的众多层位中, 而且囊括了全球已报道的大多数“错时相”沉积类型, 其中, 最为发育且最具特色的是蠕虫状灰岩, 仅皱纹构造和海底碳酸盐胶结岩扇在华南至今未有报道。

潮下皱纹构造 (Subtidal wrinkle structures): 通常产出于陆架背景下具沙纹层理的碎屑岩层面, 形态似干涉波痕, 波峰呈扁平或尖棱状, 通常伴有小型水平遗迹, 如 *Planolites*、*Asteriacites*、*Gyrochorte* 等 (图 1a)。

潮下皱纹构造被证明是以微生物席为媒介形成的生物—沉积构造^[38], 在晚元古至早古生代早期潮下碎屑岩地层中极为普遍, 但在随后的地质记录中仅出现在深海、缺氧及非海相环境, 潮下皱纹构造在早三叠世再现被看作是垂向生物扰动减少的结果^[24]。

海底碳酸盐胶结岩扇 (Carbonate seafloor fans): 放射状晶体形成的半球状集合体, 半径 1~5 cm, 可相互粘结达 15 cm, 排列方向杂乱 (图 1b), 镜下鉴定

表明其为同沉积海底胶结文石扇, 后被方解石交代^[39, 40]。

海底碳酸盐胶结岩扇在与现代海洋化学状况完全不同的太古代和元古代碳酸盐陆架环境非常发育, 但在随后的地质记录中极其罕见, 它们在早三叠世的复苏表明当时的海洋回到了与元古代或太古代相似的极端环境, 如缺氧、高碱度、碳酸钙过饱和等^[36]。

扁平砾石砾岩 (Flat-pebble conglomerates): 国内又称“板条状砾岩”或“竹叶状灰岩”, 由板片状或扁平状的泥晶灰岩砾屑和灰泥基质组成。砾石有一定磨圆, 砾石内部缺乏化石, 基质含少量生物屑和内碎屑 (图 1c)。

扁平砾石砾岩作为寒武纪—前寒武纪陆架环境中普遍发育的沉积类型, 被认为形成于缺乏生物扰动的潮下低能环境, 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^[17, 20], 而后以微晶灰岩砾屑的形式重新沉积成岩。Sepkoski 最先对寒武纪、早奥陶世地层中扁平砾石砾岩给予了重视, 并总结出三条主要识别标志^[37, 41]: 一是碳酸盐层与泥岩互层; 二是不受扰动的碳酸盐层快速而强烈的海底胶结; 三是扁平状或板条状碳酸盐内碎屑岩遭受强烈的风暴侵蚀和改造。扁平砾石砾岩是特定地质历史阶段沉积岩成层特点所留下的特殊记录, 其在早三叠世的“错时性”再现被认为是对早三叠世海洋中同沉积海底胶结作用广泛分布和生物扰动水平低下的自然响应。

微生物岩 (Microbialite): 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。下三叠中的微生物岩具有多种类型, 如叠层石、核形石、凝块石^[17, 28, 29, 35, 42~45]、微生物灰泥丘^[31, 32, 46]及具钙质微生物构造的微生物层 (图 1e) 和微生物礁^[25, 32~34, 44, 45, 47]。

微生物岩通常是在条件恶劣、不适宜常见的大生物生活的环境中, 由微生物机会主义地繁盛形成的^[28, 29, 32, 46~48], 其与通常意义的生物礁 (珊瑚礁、钙质海绵礁) 在形成机制和环境意义上有本质上的不同。微生物岩在二叠纪—三叠纪之交再现于正常浅海背景, 并一直延续至早三叠世末, 正是对始于二叠纪末的条件恶劣的环境状况和后生动物稀少的生态系面貌的自然响应。

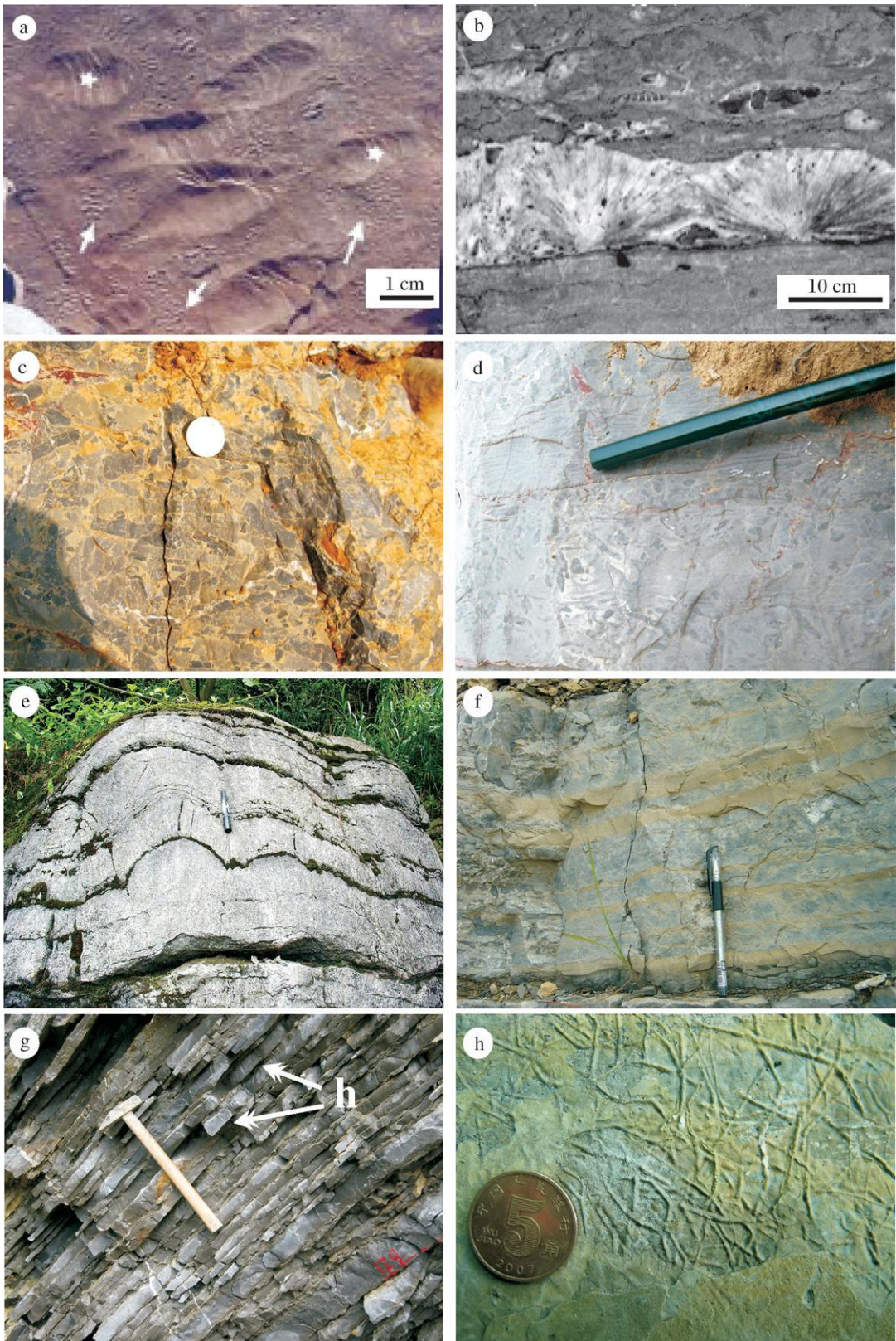


图 1 早三叠世“错时相”沉积宏观特征照片

Fig 1 Photos showing the macro-characters of Early Triassic "anachronistic facies"

a 皱纹构造 (据 Pruss 等, 2004^[24]), b 海底碳酸盐岩胶结扇 (据 Baud 等, 2007^[36]), c 扁平砾石砾岩 (贵州紫云), d 蠕虫状灰岩 (湖北五峰), e 微生物岩 (重庆华莹山), f 条带灰岩 (湖北长阳), g 薄层灰岩 (湖北兴山), h 薄层灰岩层面水平遗迹 (h 为 g 中灰岩底面现象放大, 湖北兴山), 图中硬币直径 1.5 cm, 铅笔直径 0.6 cm, 记号笔长 15 cm, 地质锤长 35 cm

蠕虫状灰岩 (Vermicular limestone): 因岩石内部具大量形似蠕虫的个体而得名^[22], 蠕体颜色较基质颜色稍深(图 1d)。蠕虫状灰岩在华南下三叠统地层中最为发育, 最近, P_{MISS}报道了美国西北部下三叠地层中特殊沉积——碎片灰岩 (chip facies)^[18], 其形态和特征与蠕虫状灰岩极其相似, 应为同类沉积。

关于蠕虫状灰岩或碎片灰岩的成因众说纷纭, 计有凝聚说、机械成因说、生物扰动说等, 其中占主导地位的解释认为: 蠕虫状灰岩或碎片灰岩可能是半成岩的泥晶灰岩被撕裂后再沉积的产物, 是一种岩化程度更低时期的泥晶灰岩产生的扁平砾石砾岩^[17, 18]。最近, 笔者以鄂西地区为例对华南蠕虫状灰岩的时空分布、形态特征、成因机制进行了综合研究, 将华南蠕虫状灰岩分为层状或似层状、不规则粒状、变形柱状、椭圆球状四种类型, 对不同的类型给出了不同的成因解释, 并强调经历了二叠纪末大绝灭之后的早三叠世特殊的海洋环境状况是导致蠕虫状灰岩形成的关键因素^[49]。

薄层泥晶灰岩和条带灰岩 (Thin-bedded limestone and Ribbon limestone): 薄层泥晶灰岩和条带灰岩是地质历史上极为平常的沉积类型, 早三叠世的薄层泥晶灰岩(图 1g)和条带灰岩(图 1f)与众不同之处

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(图 1h)和小型的或薄壳型的灾难生物化石^[50, 51]。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条件。

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精细互层。这一方面反映了当时海洋环境频繁波动的不稳定性; 另一方面反映了早三叠世海洋生态系对环境调节和缓冲能力的降低^[49]。

3 “错时相”沉积的空间分布

综合全球已报道的早三叠世“错时相”沉积, 其分布主要集中在两个区域: 其一是低纬度的特提斯地区, 如西特提斯域的阿曼、伊朗、土耳其、亚美尼亚、匈牙利、波兰、意大利, 东特提斯域的华南; 其二是古大洋边缘地区, 如日本、美国西北部、加拿大西南部、格陵兰(图 2)。

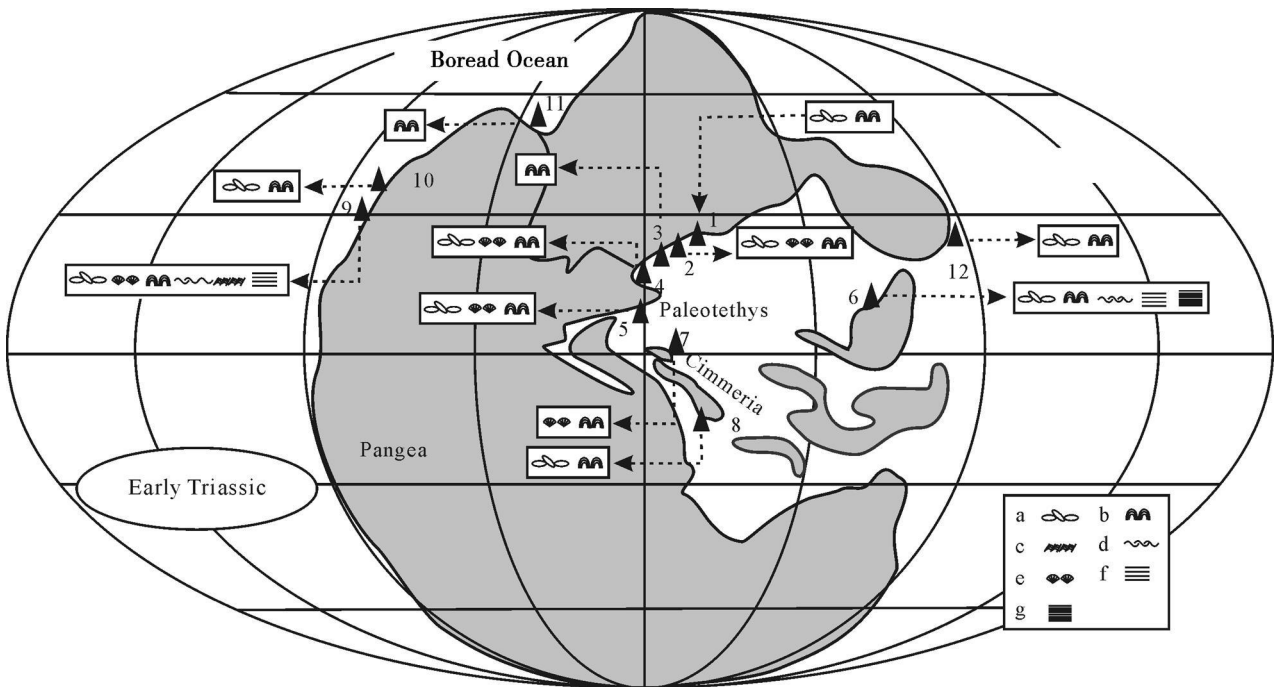


图 2 早三叠世“错时相”沉积分布图(底图据文献[52])

Fig 2 Distribution of Early Triassic “anachronistic facies” sediment (base map after Ziegler et al., 1998)

- 1 意大利, 2 亚美尼亚, 3 匈牙利, 4 阿塞拜疆、亚美尼亚, 5. 土耳其, 6. 华南, 7 阿曼, 8 伊朗, 9. 美国, 10. 加拿大, 11 格陵兰, 12 日本,
a 扁平砾石砾岩, b 微生物岩, c 皱纹构造, d 蠕虫状灰岩(碎片灰岩), e 海底碳酸盐胶结岩扇, f 薄层泥晶灰岩, g 条带灰岩

3.1 特提斯地区

Baud等^[27]、Pruss等^[19]报道了土耳其南部早三叠世“错时相”沉积,包括扁平砾石砾岩、海底碳酸盐扇、叠层石及碳酸盐灰泥丘等,形成于风暴浪基面之上的浅海碳酸盐潮坪—台地环境。

匈牙利北部西喀尔巴阡山以南二叠纪—三叠纪界线处发育叠层石,早三叠世早期产微生物岩,形成于相对低能的风暴浪基面之下的深水斜坡环境^[30]。

Wignall等^[20]报道了意大利北部早三叠世碳酸盐岩与碎屑岩混合沉积中的叠层石和扁平砾石砾岩,Pruss报道了其中的皱纹构造^[24]。

Baud等报道了亚美尼亚南部的下三叠统地层中的扁平砾石砾岩、海底碳酸盐胶结岩扇、微生物岩,及阿塞拜疆下三叠统地层中的微生物岩^[53]。

伊朗下三叠统地层中产枝状叠层石、叠层石丘、似核形石及扁平砾石砾岩^[19]。

阿曼下三叠统地层中已发现的“错时相”沉积有叠层石、似核形石、钙质微生物岩及海底碳酸盐岩扇^[54]。

二叠纪、三叠纪时,华南为位于特提斯东部的小型陆块^[55],早三叠世的“错时相”沉积极为普遍。据已有资料,华南“错时相”沉积包括叠层石、微生物岩、扁平砾石砾岩、蠕虫状灰岩及薄层泥晶灰岩与条

带灰岩等^[17, 21, 22, 25, 31~33, 44~46, 56~58]。

3.2 古大洋边缘地区

美国西北部早三叠世 Moenkopi组,为一套潮下粉砂岩、砂岩与泥晶灰岩互层的浅海陆棚至盆地相沉积^[58],其内见大量“错时相”沉积,包括扁平砾石砾岩、潮下皱纹构造、潮下微生物岩、海底碳酸盐胶结岩扇、碎片灰岩及薄层灰岩^[18, 19, 24, 48]。

加拿大哥伦比亚省南部早三叠世产小型叠层石和扁平砾石砾岩^[60]。

日本西南部早三叠世 Kamura组中见叠层石、似核形石及叠片状砾石^[61],形成于海山之上的浅海环境。

格陵兰詹姆士岛早三叠世发现了叠层石生物礁^[62]。

4 “错时相”沉积的分布时限

“错时相”沉积作为二叠纪末大灭绝的直接“见证者”,在全球下三叠统众多层位中得以记录,但直到近二十年来,研究灭绝—残存—复苏的地质学家们才逐渐意识到“错时相”沉积与古生代—中生代地质突变期的特殊海洋环境和生态系状况相关,随着“错时相”沉积概念的提出^[37],越来越多的“错时相”沉积被识别和研究(图3)。

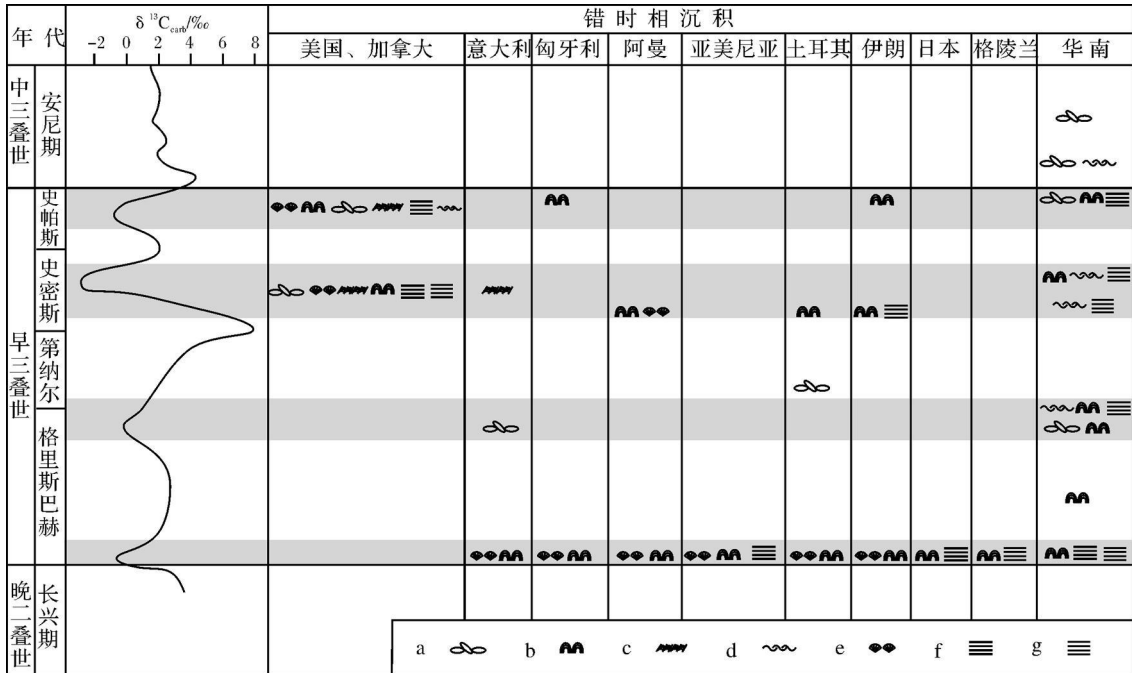


图3 早三叠世“错时相”沉积的分布时限(据文献[18~20, 24, 26, 27, 30, 60~62, 67])

Fig. 3 Diagram showing stages in which anachronistic facies have been reported from the Early Triassic (with data from [18~20, 24, 26, 27, 30, 60~62, 67])

Triassic (with data from [18~20, 24, 26, 27, 30, 60~62, 67])

Wignall等^[20]认为,扁平砾石砾岩在早三叠世早期(Griesbachian)以后即迅速消失。然而,事实并非如此。大量实际资料表明扁平砾石砾岩在美国、意大利、土耳其及华南下三叠统不同层位中均有产出。如在华南下三叠统碳酸盐台地、斜坡至盆地等多种环境都有发现,只是在研究中更多的采用了“板条状”或“竹叶状”描述术语。例如,苏浙皖一带的殷坑组、和龙山组、扁担山组^[17, 55, 57],鄂东南一带的大冶组^[17],贵州紫云、罗甸板庚、贵阳乌当的罗楼组或大冶组^[58-66]等。

微生物岩在二叠系—三叠系界线处首次出现后,断断续续延至早三叠世末,总体上集中分布于四个层位^[53]:P/T界线、格里斯巴赫亚阶—第纳尔亚阶附近、奥伦尼克阶初及下三叠统顶。尤以P/T界线附近最为发育,这可能与界线附近的微生物岩研究较多,而对其它层位的微生物岩研究相对较少有关。

产于华南的蠕虫状灰岩和产于美国西北的碎片灰岩,其分布跨及整个奥伦尼克阶,华南部分地区甚至延续至中三叠世安尼期^[18, 19, 49]。

潮下皱纹构造和海底碳酸盐胶体岩扇分布于下三叠统的底部和中上部层位^[18, 24, 26, 27]。

薄层泥晶灰岩和条带灰岩是早三叠世最为常见、占整个沉积厚度比例最大的岩石类型,分布于下三叠统从底到顶的各个层位中。

给上所述:“错时相”沉积紧接二叠纪末灭绝事件后产生,在整个早三叠世频繁出现,扁平砾石砾岩、蠕虫状灰岩等类型甚至延续至中三叠世才告结束。值得注意的是“错时相”沉积在早三叠世表现出四个泛滥时期,即二叠纪—三叠纪界线附近、格里斯巴赫末期、史密斯早中期及早三叠世末,这四个集中分布时期与碳同位素的偏移存在良好的对应关系^[67, 68](图3)。

5 讨论

“错时相”概念的提出,融合了沉积学、古生态学、古生物学、海洋化学及地层学等多个学科,为我们探索生物灭绝与复苏提供了多角度的有益启示,显示了广阔的前景。

5.1 “错时相”沉积对灭绝原因的启示

“谁是二叠纪末大灭绝的罪魁祸首?”吸引了无数地质学家和地质爱好者,他们提出了各种成因假说,但至今仍没有哪种假说称得上完美无缺。

早三叠世,微生物岩和以微生物席为媒介的皱纹

构造再现于正常浅海环境^[14, 35, 69],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,使造礁生物遭受了灭顶之灾。

扁平砾石砾岩、蠕虫状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,快速的同沉积海底胶结作用对其形成起到关键性作用。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,及缺氧环境中厌氧细菌降解作用造成的海水碱度升高^[20, 36, 41]。

缺乏垂向扰动而水平遗迹丰富是将早三叠世薄层灰岩视为“错时相”沉积的主要原因,早三叠世薄层灰岩层面上的遗迹化石以类型单调、形态简单、潜管细小、顺层产出为特征,指示了一种生态竞争水平低下、底层海水贫氧的环境状况。直到早三叠世末,遗迹化石才逐渐向三维拓展,扰动深度也明显增加,这表明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转变,指示浅海底层海水的含氧量、生态竞争强度、生物对环境的应变能力等在逐渐增加^[7, 18, 49, 51, 71]。

“错时相”沉积在早三叠世的再现启示我们:二叠纪末,一系列来自地内或地外的突发性灾难事件,如全球性火山活动、海洋缺氧事件、海洋翻转事件、大气污染事件、全球地球化学循环重组等,相互交织,相互加强,形成了极端和异常环境,正是这种极端和异常环境导致了二叠纪末生物大灭绝。

5.2 “错时相”沉积对残存期生态系状况的启示

作为大灭绝之母的二叠纪末灭绝事件,不仅使大量生物分类单元从地球上消亡——全球超过90%的种级海洋无脊椎动物和约70%的科级陆生脊椎动物遭受灭顶之灾^[5],更重要的是摧毁了曾经无比繁荣的古生代生态系,出现了延续至今的现代生态系,地球生物演化由此产生重大转折^[4, 5, 70, 72]。二叠纪末灭绝事件留下了一个沉寂的星球,在随后数百万年,甚至是千万年的时间里,幸存者与前所未有的、恶劣的、陌生的环境斗争,面临着它们尚未准备就绪的演化过程带来的挑战,而与它们共同生活在地球上的大多数生物死亡了(包括植物、食草动物、食肉动物、不利的物种及有利的物种)。整个早三叠世生态系呈非正常的生态松弛面貌^[35],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体的钻进深度在早三叠世都表现为较低的水平^[7, 8, 51, 71]。

正是这种后生物减少和垂向扰动能力降低的生态系状况,导致扁平砾石砾岩、微生物岩、薄层灰岩和条带灰岩等“错时相”沉积在早三叠世的灾后泛滥。

5.3 “错时相”沉积对生物复苏时限的启示

“错时相”沉积与经历了二叠纪末大灭绝后古生代生态系突然崩溃^[72]、早三叠世生物群落低分异度^[73]、碳同位素大规模波动^[67,68]等异常现象同时出现,并在正常浅海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期重建基本完成之时。沉积体系改变与灭绝—残存—复苏如此同步进一步证明“错时相”沉积、环境异常、生物灭绝与复苏、生态系转变之间存在必然联系。在此,笔者就生物灭绝与复苏的过程与“错时相”沉积的盛衰变化间的制约关系,提出如下推论:二叠纪末,一系列来自地内或地外的突发性灾难事件相互交织,产生了一种极端和异常环境,环境的异常导致了二叠纪末生物灭绝,古生代生态系崩溃和“错时相”沉积的出现;恶化环境在整个早三叠世的频繁波动和持续出现导致“错时相”沉积的时空广布和生物复苏的迟滞;随着环境不断改善和生物逐渐复苏,新生代生态系在早三叠末基本完成重建,“错时相”沉积也退出地质记录。也就是说“错时相”沉积在中三叠世早期的消失可看作生物由复苏期向辐射期转变的标志。

参考文献 (References)

- 1 Raup D M, Sepkoski J J Mass extinction in the marine fossil record [J]. *Science*, 1982, 215(4539): 1501-1503
- 2 Bowring S A, Ewin D H, Jin Y G, *et al* U/Pb zircon geochronology and tempo of the end-Permian Mass Extinction [J]. *Science*, 1998, 280: 1039-1045
- 3 Raup D M. Size of the Permian-Triassic bottleneck and its evolutionary implications [J]. *Science*, 1979, 206: 217-218
- 4 Ewin D H. The Great Paleozoic Crisis: Life and Death in the Permian [M]. New York, Columbia University Press, 1993: 327
- 5 Ewin D H. The Permian-Triassic extinction [J]. *Nature*, 1994, 367: 231-236
- 6 Stanley S M, Yang X. A double mass extinction at the end of the Paleozoic Era [J]. *Science*, 1994, 266: 1340-1344
- 7 Twitchett R J, Wignall P B. Trace fossils and the aftermath of the Permian-Triassic mass extinction: evidence from northern Italy [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 124: 137-151
- 8 Twitchett R J. Palaeoenvironments and faunal recovery after the end-Permian mass extinction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 154: 27-37

- 9 Ewin D E. The end and the beginning: Recoveries from mass extinctions [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1998, 13: 344-349
- 10 Martin M W, Bowring D J, Enos S A. Timing of Lower Triassic carbonates bank buildup and biotic recovery following the end Permian extinction across the Nanpanjiang Basin, South China [J]. *Abstracts with Programs GSA*, 2001, 33: 201
- 11 Schubert J K, Bottjer D J. Aftemath of the Permian-Triassic mass extinction event: Paleocology of Lower Triassic carbonates in the western USA [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1995, 116: 1-39
- 12 Rodland D L, Bottjer D J. Biotic recovery from the end-Permian mass extinction: behavior of the inarticulate brachiopod *Lingula* as a disaster taxon [J]. *Palaios*, 2001, 16 (1): 95-101
- 13 Fagerstrom J A. The Evolution of Reef Communities [M]. New York: John Wiley & Sons, 1987: 1-600
- 14 Stanley G D Jr. The history of early Mesozoic reef communities: a three step process [J]. *Palaios*, 1988, 3: 170-183
- 15 Racki G. Silica secreting biota and mass extinctions: survival patterns and processes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 154(1-2): 107-132
- 16 Retallack G J, Vevers J J, Morante R. Global coal gap between Permian-Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108(2): 195-207
- 17 冯增昭, 王英华, 李尚武, 等. 下扬子地区中、下三叠统青龙群岩相古地理研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1988: 1-197 [Feng Zengzhao, Wang Yinghua, Li Shangwu, *et al*. Study on Lithofacies Palaeogeography of Qinglong Group of Lower Middle Triassic in the Lower Yangtze River Region [M]. Kunming Yunnan Science and Technology Publishing House, 1988: 1-197]
- 18 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 [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 222: 33-52
- 19 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: 193-206
- 20 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
- 21 黄思静. 蠕虫状灰岩及其成因 [J]. 成都地质学院学报, 1984, 3: 60-68 [Huang Sijing. Vermicular limestone and its origin [J]. *Journal of Chengde University*, 1984, 3: 60-68]
- 22 姜月华, 岳文浙, 业治铮, 等. 蠕虫状灰岩特征和成因新探 [J]. 矿物岩石, 1992, 12(1): 1-7 [Jiang Yuehua, Yue Wenzhe, Ye Zizheng, *et al*. The new approach on the characteristics and origin for vermicular limestone [J]. *Mineral Petrology*, 1992, 12(1): 1-7]
- 23 钱守荣. 蠕虫状灰岩成因新解 [J]. 淮南矿业学院学报, 1995, 15(3): 15-19 [Qian Shourong. A new research on the origin of the vermicular limestone [J]. *Journal of Huainan Mining Institute*, 1995, 15

- (3): 15-19]
- 24 Pruss S B, Fraiser M, Bottjer D J. Proliferation of Early Triassic wrinkle structures: Implications for environmental stress following the end-Permian mass extinction [J]. *Geology*, 2004, 32(5): 461-464
 - 25 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 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2006, 31(2): 165-170 [Yang Haohai, Zhang Suxin, Jiang Haishui, *et al*. Age and general characteristics of the calcimicrobialite near the Permian-Triassic boundary in Chongyang, Hubei Province [J]. *Earth Science Journal of China University of Geoscience*, 2006, 31(2): 165-170]
 - 26 Baud A, Cirilli S, Marcoux J. Biotic response to mass extinction: the latest Triassic microbialites [J]. *Facies*, 1997, 36: 238-242
 - 27 Baud A, Richez S, Marcoux J. Calcimicrobial cap rocks from the basal Triassic units of the Taurus (SW Turkey), an anachronistic facies before the biotic recovery [J]. *Comptes Rendus Palevol*, 2005, 4(67): 569-582
 - 28 Ezaki Y, Liu J, Adachi N. Microbialites and their responsible microbes following the end Permian extinction in Sichuan, South China [J]. *Gondwana Research*, 2001, 4: 614-614
 - 29 Ezaki Y, Liu J, Adachi N. Earliest Triassic microbialite micro-tomogastrucures in the Huaying Area of Sichuan Province, South China: Implications for the nature of oceanic conditions after the end Permian extinction [J]. *Palaïos*, 2003, 18(4): 388-402
 - 30 Hips K, Haas J. Calcimicrobial stromatolites at the Permian-Triassic boundary in a western Tethyan section, Bkk Mountains, Hungary [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185: 239-253
 - 31 Kershaw S, Guo L, Swift A, *et al*. Microbialites in the Permian-Triassic boundary interval in central China: structure, age and distribution [J]. *Facies*, 2002, 47: 83-90
 - 32 Lehmann D J. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang Basin, South China [J]. *Geology*, 1999, 27(4): 359-362
 - 33 Lehmann D J, Payne J L, Felix S V. 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]. *Palaïos*, 2003, 18: 138-152
 - 34 Payne J L, Lehmann D J, Wei J. The pattern and timing of biotic recovery from the end Permian extinction on the Great Bank of Guizhou, Guizhou Province, China [J]. *Palaïos*, 2006, 21: 63-85
 - 35 Schubert J K, Bottjer D J. Early Triassic stromatolites as post-mass extinction disaster fossils [J]. *Geology*, 1992, 20(10): 883-886
 - 36 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
 - 37 Sepkoski J J, Bambach R K, Droser M L. Secular changes in Phanerozoic event bedding and the biological overprint [C] // Eisele G, Ricken W, Seilacher A, eds. *Cycles and Events in Stratigraphy*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991: 298-312
 - 38 Hagadon J W, Bottjer D J. Wrinkle structures: Microbially mediated sedimentary structures common in subtidal siliciclastic settings at the Proterozoic-Phanerozoic transition [J]. *Geology*, 1997, 25(11): 1047-1050
 - 39 Sandberg P. Aragonite cements and their occurrence in ancient limestones [C] // Schneidemann N, Harris P M, eds. *Carbonate Cements*. SEPM Special Publication. Society for Sedimentary Geology, 1985, 67: 33-57
 - 40 Sumner D Y, Grotzinger J P. Late Archean aragonite precipitation, petrography, facies associations, and environmental significance [C] // Grotzinger J P, James N P, eds. *Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian World*. SEPM Special Publication. Society for Sedimentary Geology, 2000, 67: 123-144
 - 41 Sepkoski J J. Flat-pebble conglomerates, storm deposits, and the Cambrian bottom fauna [C] // Eisele G, Seilacher A, eds. *Cyclic and Event Stratification*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1982: 371-385
 - 42 冯增昭, 鲍志东, 李尚武, 等. 中国南方早、中三叠世岩相古地理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 1-162 [Feng Zengzhao, Bao Zhilong, Li Shangwu, *et al*. Lithofacies Paleogeography of Middle and Lower Triassic of South China [M]. Beijing: Petroleum Technology Publishing House, 1994: 1-162]
 - 43 吴应林, 朱洪发, 朱忠发, 等. 中国南方三叠纪岩相古地理与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-143 [Wu Yinglin, Zhu Hongfa, Zhu Zhongfa, *et al*. Triassic Lithofacies Paleogeography and Mineralization in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-143]
 - 44 钱迈平, 范洪源. 无锡高山三叠系下统青龙组叠层石生物丘及其环境 [J]. *江苏地质*, 1994, 18: 19-24 [Qian Maiping, Fan Hongyuan. The stromatolite bioherms in the Lower Qinlong Formation in Songshan, Wuxi and their environment [J]. *Jiangsu Geology*, 1994, 18: 19-24]
 - 45 钱迈平. 中下扬子区海相三叠纪叠层石及其环境演变 [J]. *古生物学报*, 1995, 34(6): 731-741 [Qian Maiping. Explanation on evolution of stromatolites and their country rocks of marine Triassic system on Lower and Middle reaches of Yangtze River [J]. *Acta Paleontologica Sinica*, 1995, 34(6): 731-741]
 - 46 Kershaw S, Zhang T, Lan G A. Microbialite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China and its paleoenvironmental significance [J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 146: 1-18
 - 47 王永标, 童金南, 王家生, 等. 华南二叠纪末大灭绝后的钙质微生物岩及古环境意义 [J]. *科学通报*, 2005, 50(6): 552-558 [Wang Yongbiao, Tong Jinnan, Wang Jiasheng, *et al*. Calcimicrobialite after end-Permian mass extinction in South China and its paleoenvironmental significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(6): 552-558]
 - 48 Pruss S B, Bottjer D J. The reorganization of reef communities following the end-Permian mass extinction [J]. *Comptes Rendus Palevol*, 2005, 4(6-7): 553-568
 - 49 Zhao Xiaoming, Tong Jinnan, Yao Huazhou, *et al*. Anachronistic Fa-

- cies in the Lower Triassic of South China and their implications to the ecosystems during the recovery time [J]. *Science in China* 2008, 51 (11): 1646-1657
- 50 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 [J]. *湖北地质*, 1992, 6(1): 1-10 [Yang Daozheng, Li Jinhua, Gui Jianbin. Trace fossils of Early Triassic epoch from Guangji Hubei and their paleoenvironmental significance [J]. *Hubei Geology*, 1992, 6(1): 1-10]
- 51 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 [J]. *古地理学报*, 2007, 9(5): 519-532 [Luo Mao, Shi Guo, Gong Yiming. Early Triassic trace fossils in Huaxi Region of Guiyang and their implication for recovery after the end-Permian mass extinction [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(5): 519-532]
- 52 Ziegler A M, Gibbs M T, Hulver M L. A mini-atlas of oceanic water masses in the Permian period [J]. *Proceedings of Royal Society of Victoria* 1998, 110: 323-344
- 53 Baud A, Richez S, Pruss S. The lower Triassic anachronistic carbonate facies in space and time [J]. *Global and Planetary Change* 2007, 55: 81-89
- 54 Baud A, Audouren N V, Richez S. Sea-floor carbonate cement and calcimicrobial mound in the Lower Triassic red limestone of the Alwa Formation, Baid Exotic Eastern Oman Mountains 24th IASMEeting of Sedimentology [J]. *International Association of Sedimentologists Muscat Oman*, 2005: 31
- 55 杨遵仪, 吴顺宝. 长期沉积相格局与成因 [C] // 杨遵仪, 吴顺宝, 殷鸿福, 等. 华南二叠系—三叠系过渡期地质事件. 北京: 地质出版社, 1991: 15-20 [Yang Zunyu and Wu Shunbao. Changxingian-Griesbachian transgression and regression [C] // Yang Zunyu, Wu Shunbao. *Yin Hongfu, et al. Permian-Triassic events of South China*. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 15-20]
- 56 张国栋, 朱静昌, 仇福康, 等. 下扬子地区早三叠世碳酸盐风暴流与碎屑流沉积特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7(2): 99-109 [Zhang Guodong, Zhu Jingchang, Chou Fukang, et al. Sedimentary characteristics of Early Triassic carbonate storm and clastic flows in the Lower Yangtze area [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology* 1987, 7(2): 99-109]
- 57 王文彬. 下扬子地区早三叠世风暴沉积及其特征 [J]. *地层学杂志*, 1990, 14: 124-130 [Wang Wenbing. Characteristics of Early Triassic tempestites in the Lower Yangtze region [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1990, 14: 124-130]
- 58 Lehmann D J, Wang Y, Wei J Y, 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 [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 173 (3-4): 103-123
- 59 Stone P A, Stevens C H, Orchard M J. Stratigraphy of the Lower and Middle (?) Triassic Union Wash Formation, east-central California, U. S. A [J]. *Geological Survey Bulletin*, 1991, 1928: 26
- 60 Sano H, Orchard M J, Onoue T. Lower Triassic peritidal carbonates of the Cache Creek Complex in Jesmond, southern British Columbia [C] // Luer V, Hollis C, Campbell H, et al. eds. *InterRad 11 and Triassic Stratigraphy Symposium. GCP 467, the Subcommission of Triassic Stratigraphy*, Wellington, 2006: 119
- 61 Sano H and Nakashima K. Lowermost Triassic (Griesbachian) microbial limestone-cementstone facies, south-west Japan [J]. *Facies* 1997, 36: 1-24
- 62 Wignall P B, Twitchett R J. Permian Triassic sedimentology of Jameson Land, East Greenland: incised submarine channels in an anoxic basin [J]. *Journal of the Geological Society of London*, 2002, 159: 691-703
- 63 戴新春. 贵阳乌当下三叠统大冶组砾屑灰岩特征 [J]. *贵州地质*, 1998, 15: 119-125 [Dai Xindun. Characteristics of the Calcimudites of the Early Triassic Daye Formation at Wudang of Guiyang, Guizhou [J]. *Guizhou Geology* 1998, 15: 119-125]
- 64 王一刚. 黔南桂西早三叠世大陆斜坡碳酸盐重力流沉积 [J]. *沉积学报*, 1986, 4: 91-100 [Wang Yigang. Sedimentary characteristics of carbonate gravity flows on the continental slope of the Early Triassic in Southern Guizhou and Western Guangxi [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1986, 4: 91-100]
- 65 Lehmann D J, Wei Jiayong, Enos P. Controls on facies architecture of a large Triassic carbonate platform: The Great Bank of Guizhou, Nanpanjiang Basin, South China [J]. *Journal of Sedimentary Research* 1998, 68: 311-326
- 66 Wang Shenghai, Fan Jiasong, Rigby J K. The Permian reefs in Ziyun County, southern Guizhou, China [J]. *Brigham Young University, Geology Studies* 1994, 40: 155-183
- 67 Payne J L, Lehmann D J, Wei J, et al. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction [J]. *Science* 2004, 305: 506-509
- 68 Knoll A H, Bambach R K, Payne J L, et al. Paleophysiology and end-Permian mass extinction [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2007, 256: 295-313
- 69 Webb G E. Was Phanerozoic reef history controlled by the distribution of non-enzymatically secreted reef carbonates (microbial carbonate and biologically induced cement) [J]? *Sedimentology*, 1996, 43: 941-947
- 70 McGhee Jr G R, Sheehan P M, Bottjer D J, et al. Ecological ranking of Phanerozoic biodiversity crises: ecological and taxonomic severities are decoupled [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211: 289-297
- 71 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 [J]. *Palaios* 2004, 19: 551-564
- 72 Tong J, Zhang S, Zuo J, et al. Events during Early Triassic recovery from the end-Permian extinction [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55: 66-80
- 73 Hallan A, Wignall P B. *Mass Extinctions and Their Aftermath* [M]. New York: Oxford University Press, 1997: 320

The Distinctive Sediments in the Early Triassic Recovery Time “Anachronistic Facies”

ZHAO Xiao-ming^{1,2} NU Zhì-jun² TONG Jin-nan¹ YAO Hua-zhou²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074; 2. Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang, Hubei 443003)

Abstract After long term hotspot study about the end-Permian mass extinction and relative catastrophic events, scientists recently focused on the aftermaths of mass extinction, such as ecosystems and sedimentary systems. The Early Triassic ecosystems immediately following the end-Permian mass extinction were dominated by cosmopolitan members and opportunists, therefore, the importance of sediment records are obviously emerged, and "anachronistic facies" are becoming research foreland, such as flat-pebble conglomerates, vermicular limestone, subtidal wrinkle structures, microbialite, carbonate seafloor fans, thin-bedded limestone and zebra limestone-mudstone.

As the aftermaths of geologic transition, the appearance of "anachronistic facies" sediment immediately following the mass extinction and the elimination from normal shallow marine setting in the early Middle Triassic with the final establishment of the Mesozoic ecosystems in the Late Anisian. The dramatic synchronization between the changes of sedimentary systems and the radiation of the Mesozoic biotas further demonstrates that there were the inevitable interrelations among the sedimentary systems, ecosystems, mass extinction and recovery and specific environment. The study of the "anachronistic facies" sediment in an absence of fossils record Lower Triassic strata provide valuable materials and new angle of view to seek the end-Permian mass extinction and recovery.

Key words Early Triassic; "anachronistic facies" sediment; mass extinction and recovery; ecosystem