

浙江长兴潘家庄剖面二叠纪与三叠纪之交的 生态系演变*

黄亚飞^{1,2,3,4} 陈 灿⁵ 易智星⁶ 何卫红⁷

- 1 中国地质调查局武汉地质调查中心 (中南地质科技创新中心), 湖北武汉 430205
2 中国地质调查局南方复杂构造区页岩油气成藏理论与工程技术创新中心, 湖北武汉 430205
3 中国地质调查局南方复杂构造区页岩气研究中心, 湖北武汉 430205
4 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430205
5 湖北省地质局第二地质大队, 湖北恩施 445000
6 山东大学文化遗产研究院, 山东青岛 266237
7 中国地质大学 (武汉) 地球科学学院, 生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘 要 在二叠纪与三叠纪之交的生物大灭绝事件中, 不同水深环境中的生态系演变过程亦存在差异。浅水碳酸盐台地环境水体深度小, 聚集了绝大部分的底栖生物, 对于环境的变化更为敏感, 是了解灾难环境下海洋生态系演化的重要窗口。文中以下扬子浙江长兴地区新发现的潘家庄剖面浅水碳酸盐台地相为研究对象, 综合开展沉积学、古生物学与同位素地球化学研究, 探讨二叠纪与三叠纪之交浅水环境生态系的演变。结果显示, 潘家庄剖面上二叠统长兴组生物碎屑灰岩的顶部发生大规模生物灭绝, 伴随着沉积微相从富含孔虫、藻类的生物碎屑灰岩到凝块石微生物岩的转变, 反映出在后生物大规模灭绝后蓝细菌呈爆发式增长; 同时, 无机碳同位素发生了 1 次显著的负偏。依据上述结果认为, 浙江长兴潘家庄剖面二叠纪与三叠纪之交由生物碎屑灰岩突变为微生物岩相的生态系演变, 可能代表了二叠纪末生物大灭绝事件中的单幕式生物灭绝过程。

关键词 生物大灭绝 浅水相 微生物岩 生态系演变 二叠纪 三叠纪 浙江

第一作者简介 黄亚飞, 男, 1994 年生, 博士, 工程师, 主要从事沉积学与地层学、古海洋环境及页岩气基础地质研究。E-mail: hyafei@mail.cgs.cn。

通讯作者简介 何卫红, 女, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事二叠纪与三叠纪之交古生物、地层与生物大灭绝研究。E-mail: whzhang@cug.edu.cn。

中图分类号: P534 文献标志码: A

Ecological evolution across the Permian-Triassic boundary at Panjiazhuang section in Changxing County, Zhejiang Province

HUANG Yafei^{1,2,3,4} CHEN Can⁵ YI Zhixing⁶ HE Weihong⁷

- 1 Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, China

* 中国地质调查局南方复杂构造区页岩油气成藏理论与工程技术创新中心开放基金 (编号: SOG-202411)、战略性矿产资源调查评价项目 (编号: 2024ZRYJDC017)、国家自然科学基金项目 (编号: 42230205)、中国地质调查局地质调查项目 (编号: DD20240047) 联合资助。[Co-funded by the Open Fund of Technology Innovation Center for Shale Oil and Gas Accumulation Theory and Engineering in Southern Complex Structural Area, China Geological Survey (No. SOG-202411), Strategic Mineral Resources Survey and Evaluation Project (No. 2024ZRYJDC017), National Natural Science Foundation of China (No. 42230205), and Foundation of the Geological Survey of China (No. DD20240047)]

收稿日期: 2025-03-31 改回日期: 2025-08-01

2 Technology Innovation Center for Shale Oil and Gas Accumulation Theory and Engineering in Southern Complex Structural Area, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3 Shale Gas Research Center for Southern Complex Structural Area, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

4 Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, China

5 Second Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Hubei Enshi 445000, China

6 Institute of Culture Heritage, Shandong University, Shandong Qingdao 266237, China

7 State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract Ecological evolution varied significantly across different water depth during the Permian–Triassic mass extinction. Shallow-water carbonate platform environments, characterized by low ambient water depth, hosted the majority of benthic organisms and consequently exhibited heightened sensitivity to environmental changes. As such, they provide critical insights into marine ecosystem evolution under disaster scenarios. Although middle to deep-water settings have been extensively studied, research on shallow-marine environments remains limited. This paper focuses on the newly identified Panjiazhuang section, a shallow-water carbonate platform succession in the Changxing area of Zhejiang Province, and integrates sedimentological, paleontological, and isotopic geochemical analyses to reconstruct ecosystem evolution across the Permian–Triassic transition. In the Panjiazhuang section, a major extinction event is recorded at the top of the bioclastic limestone within the upper Permian Changxing Formation. This interval coincides with a distinct shift in microfacies—from foraminifera- and algae-rich bioclastic limestone to microbialite—indicating a rapid proliferation of cyanobacteria following the collapse of metazoan communities. Additionally, the inorganic carbon isotope exhibited a notable negative excursion during this time. The findings indicate that the ecosystem transition from bioclastic limestone to microbialite facies at the Paleozoic–Mesozoic boundary in the Panjiazhuang section represents a single-episode extinction process during the Permian–Triassic mass extinction event.

Key words mass extinction, shallow water, microbialites, ecological evolution, Permian, Triassic, Zhejiang Province

About the first author HUANG Yafei, born in 1994, Ph.D., an engineer, is engaged in researches on sedimentology and stratigraphy, ancient marine environment, and shale gas basic geology. E-mail: hyafei@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author HE Weihong, born in 1971, Ph.D., a professor, is engaged in researches on paleontology, stratigraphy, and biological mass extinction during the Permian–Triassic transition. E-mail: whzhang@cug.edu.cn.

0 引言

二叠纪末发生了显生宙以来最大规模的全球性生物灭绝 (Shen *et al.*, 2011), 加之伴生的一系列地质事件 (Dal Corso *et al.*, 2022), 导致陆地 (Benton and Newell, 2014; Hochuli *et al.*, 2017) 和海洋 (Payne and Clapham, 2012; Yin *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2013) 生态系统发生骤变。前人针对这一突变事件本身及其产生原因做过大量的

研究, 涉及的内容既包括中等水深和深水相剖面 (Yin *et al.*, 2001; Jiang *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023; He *et al.*, 2024, 2025; Yang *et al.*, 2024), 也涵盖浅水台地相剖面 (杨浩等, 2006; 刘浩等, 2010; Wu *et al.*, 2014; 吴亚生等, 2018; Tian *et al.*, 2015, 2019; Li *et al.*, 2021, 2022)。虽然深水或较深水相剖面具有保存较为完整的地层序列, 是研究生物灭绝事件的良好载体, 但浅海地区是海洋底

栖生物的主要栖息地，尤其是浅海上部环境中无论是生物种类还是丰度都是最高的，此外浅海环境水体深度小，轻微的环境变化就会影响到生态系，因此浅水台地相上的地层沉积序列也是研究二叠纪末重大地质突变期内生物和环境演化的良好素材。

浙江长兴潘家庄剖面在二叠纪与三叠纪之交处于浅水台地环境，其中上二叠统岩性以厚层至块状生物碎屑灰岩为主，上覆微生物岩。虽然在二叠纪末大灭绝事件发生之后的环特提斯浅水海洋环境中，晚二叠世富含底栖生物化石的生物碎屑灰岩迅速被早三叠世微生物岩所取代（Kershaw *et al.*, 1999; Lehrmann, 1999; Ezaki *et al.*, 2003; Lehrmann *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2005; Baud *et al.*, 2007; 刘建波等, 2007; Zheng *et al.*, 2016; Fang *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019），但在下扬子长兴地区，这一沉积序列演化尚属首次发现。文中通过对浙江长兴潘家庄剖面二叠系—三叠系界线附近地层的微相类型、沉积环境、生物群面貌以及碳同位素演变进行系统研究，在高精度古生物学和沉积学资料基础上分析二叠纪与三叠纪之交重大突变期内生物与环境的演变过程，以期对古生代与中生代之交的生态系演变过程有更全面的认识，同时为该时期不同水深剖面生物与环境的演化提供新的证据。

1 古地理背景与剖面地层序列

1.1 古地理背景

晚二叠世长兴期，潘家庄剖面位于华南板块下扬子台地北缘，紧邻煤山金钉子剖面（Yin *et al.*, 2001）。根据前人的古地理重建（Golonka, 2002）以及有关华南放射虫动物群古生态的研究（He *et al.*, 2005, 2008, 2011），华南板块在二叠纪与三叠纪之交处于一个特殊的古地理位置上，北部邻近古特提斯洋，南部、东部面向泛大洋（Kershaw *et al.*, 2007）。晚二叠世，中国南方的岩相古地理分异十分明显，大致沿着长江中下游这一狭长地区发育深水硅泥质沉积，向南为浅水碳酸盐台地。二叠纪与三叠纪之交总体继承了晚二叠世的古地理特征，后期随着三叠纪海侵规模的扩大和沉积变迁，古地理格局有所变化。文中利用在冯增昭等（1997）研究成果基础上修改而成的古地理图

（图 1-a）来说明研究区所处的古地理位置。

1.2 研究剖面地层序列

潘家庄剖面位于浙江省湖州市长兴县境内（图 1-b），距煤山剖面较近（约 15 km）。该剖面二叠纪与三叠纪之交（P/T）地层发育较为完整，自下而上依次出露上二叠统长兴组和下三叠统殷坑组 2 套地层（图 1-c, 1-d），其中长兴组顶部为生物碎屑灰岩，含大量有孔虫、钙藻等后生动物化石，而殷坑组下部为微生物岩，与下伏生物碎屑灰岩之间未见明显地层暴露剥蚀及缺失标志。殷坑组微生物岩具明显的斑块状构造，生物化石较少，主要包括少量的微生物化石以及小型的腹足类、介形虫、蠕虫等化石。微生物岩之上发育泥晶灰岩，含多层核形石和介壳夹层。

1.3 地层界线确定

目前国际上二叠纪/三叠纪界线（P/T）的划分依据主要还是牙形石，以 *Hindeodus parvus* 的首现作为三叠纪的开始（殷鸿福等, 1988; Yin *et al.*, 2001; 张克信等, 2009）。二叠纪与三叠纪之交的界线层型剖面位于浙江煤山，根据牙形石化石带的研究，P/T 界线位于该剖面 27c 层的底部（Yin *et al.*, 2001），而生物灭绝界线位于第 24e 层顶（Wu, 2005; Shen and Bowring, 2014）。

笔者对潘家庄剖面采集的岩石样品进行了醋酸浸泡处理和牙形石化石挑样，仅在剖面第 4 层发现较多牙形石，主要的属种为 *H. praeparvus*, *H. parvus*, *Isarcica staeschei*, *I. isarcica*, *I. lobata* 等分子（图 2）。尽管有 *H. parvus* 分子的产出，但出现层位较高，故并非其首现位置，因此无法根据牙形石带确定潘家庄剖面二叠系/三叠系界线的具体层位。此外，在剖面第 1 层中发现大量晚二叠世典型分子 *palaeofusulina*，表明该套地层的沉积时间应该为晚二叠世长兴期，并且从第 2 层开始不再有该分子的产出。根据剖面碳同位素测试结果（图 3），碳同位素在靠近微生物岩底部发生了显著的负偏，向上约 30 cm 处则负偏回正。二叠纪与三叠纪之交的碳同位素负偏具有全球一致性（Holser *et al.*, 1989; Cao *et al.*, 2010; Korte and Kozur, 2010; Luo *et al.*, 2011; Schobben *et al.*, 2017），因此可以利用碳同位素曲线上负偏的起始位置、负偏极大值、负偏回正位置等特征点进行地层对比。通过与煤山剖

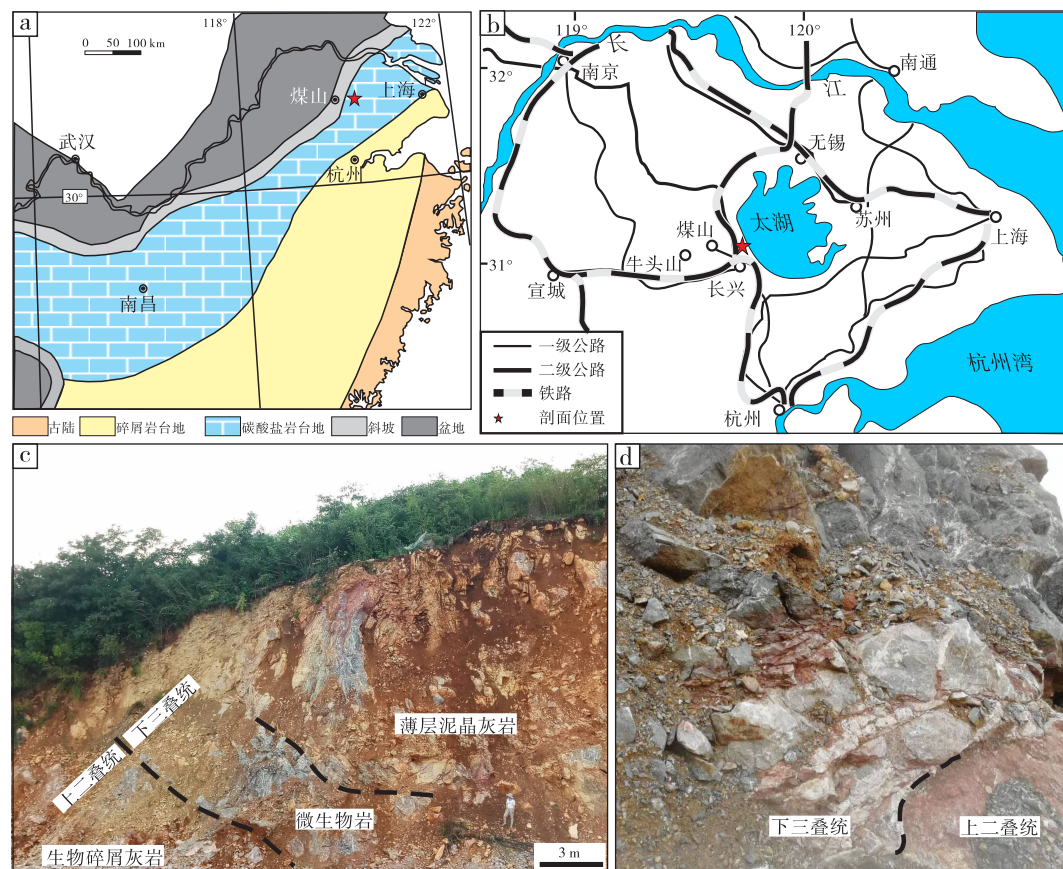


图 1 二叠纪—三叠纪之交下扬子地区古地理图与潘家剖面交通位置及野外露头

Fig. 1 Palaeogeographic map of the Lower Yangtze region during the Permian-Triassic transition, location of Panjiazhuang section and field outcrops

面碳同位素曲线对比, 潘家庄剖面二叠系/三叠系的界线位于微生物岩底部向上约 1 m 处(图 3)。

2 研究方法

2.1 沉积微相分析

在潘家庄剖面 P/T 界线附近共采集 65 个岩石样品, 其中生物灭绝界线上、下各 2 m 层位内以 10 cm 等间距采样, 其他层位样品间隔距离以 30~50 cm 为主。室内共垂直磨制薄片 80 个。在单偏光显微镜下, 重点区分岩石中的生物类型、岩石组分、颗粒粒度以及其他结构, 并结合岩石野外宏观和镜下微观特征标志, 参照标准微相类型及 Flügel 提出的标准碳酸盐台地相带(威尔逊模式)(Flügel, 2010), 对潘家庄剖面的碳酸盐岩进行微相和沉积相分析。

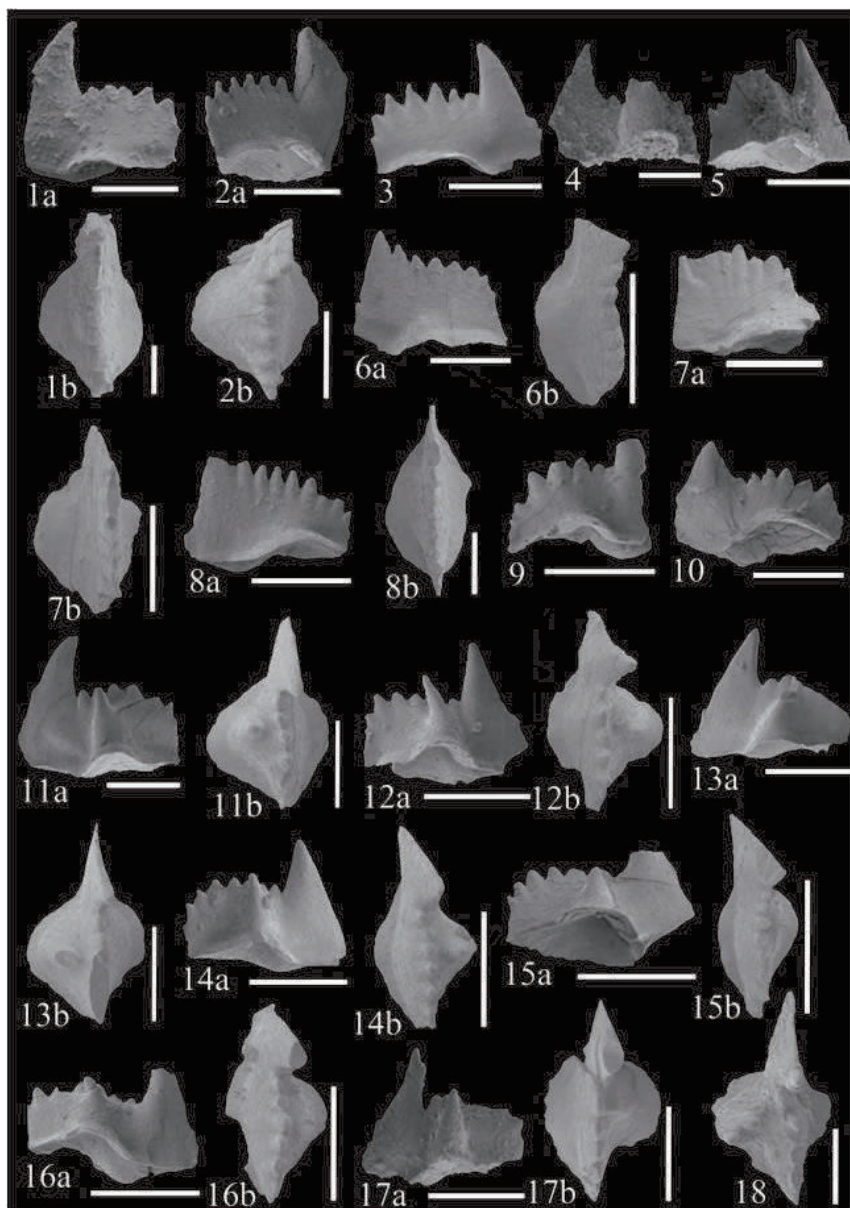
2.2 生物碎屑含量统计分析

对薄片组分分布较均匀的区域进行生屑化石

的定量统计。在单偏光显微镜下, 以横、竖均 2 mm 等间距移动薄片, 记录每次薄片移动后视域中央的组成成分。若移动后视域中心为碳酸盐颗粒, 则鉴定该颗粒所属化石类型, 包括有孔虫、钙藻、海百合碎片、介形虫、双壳类、腹足类、蓝细菌、蠕虫虫管等, 同时记录下该点数增加 1; 如果移动后视域中心为基质, 则鉴定其类型为泥晶或亮晶, 同样记录该点数增加 1。在 80 个薄片全部统计完成后, 计算各组分在对应薄片所属层位地层中的百分含量, 即组分 A % = (组分 A 的点数/总点数) * 100%。最后, 根据计算所得数据绘制生物化石组分分布图。

2.3 同位素地球化学研究

本研究在潘家庄剖面 P/T 界线上、下共采集 30 件碳、氧同位素样品, 样品采集时避开方解石脉和风化较强的岩石表面。将样品在玛瑙研钵中研磨成 200 目左右的粉末, 烘干去除水分, 随后交由



1, 2—*Hindeodus parvus*, 比例尺为 200 μm ; 3, 4, 5—*Hindeodus praeparvus*, 3 和 4 比例尺为 200 μm , 5 比例尺为 300 μm ; 6, 7, 8—*Hindeodus typicalis*, 6 和 8 比例尺为 200 μm , 7 比例尺为 300 μm ; 9, 10—*Hindeodus altus*, 9 比例尺为 400 μm , 10 比例尺为 200 μm ; 11 至 17—*Isarcica staeschei*, 11 比例尺为 200 μm , 13, 14, 16, 17 比例尺为 300 μm , 12 和 15 比例尺为 400 μm ; 18—*Isarcica isarcica*, 比例尺为 300 μm

图 2 浙江长兴潘家庄剖面牙形石化石图版

Fig. 2 Conodont plates of Panjiazhuang section in Changxing County, Zhejiang Province

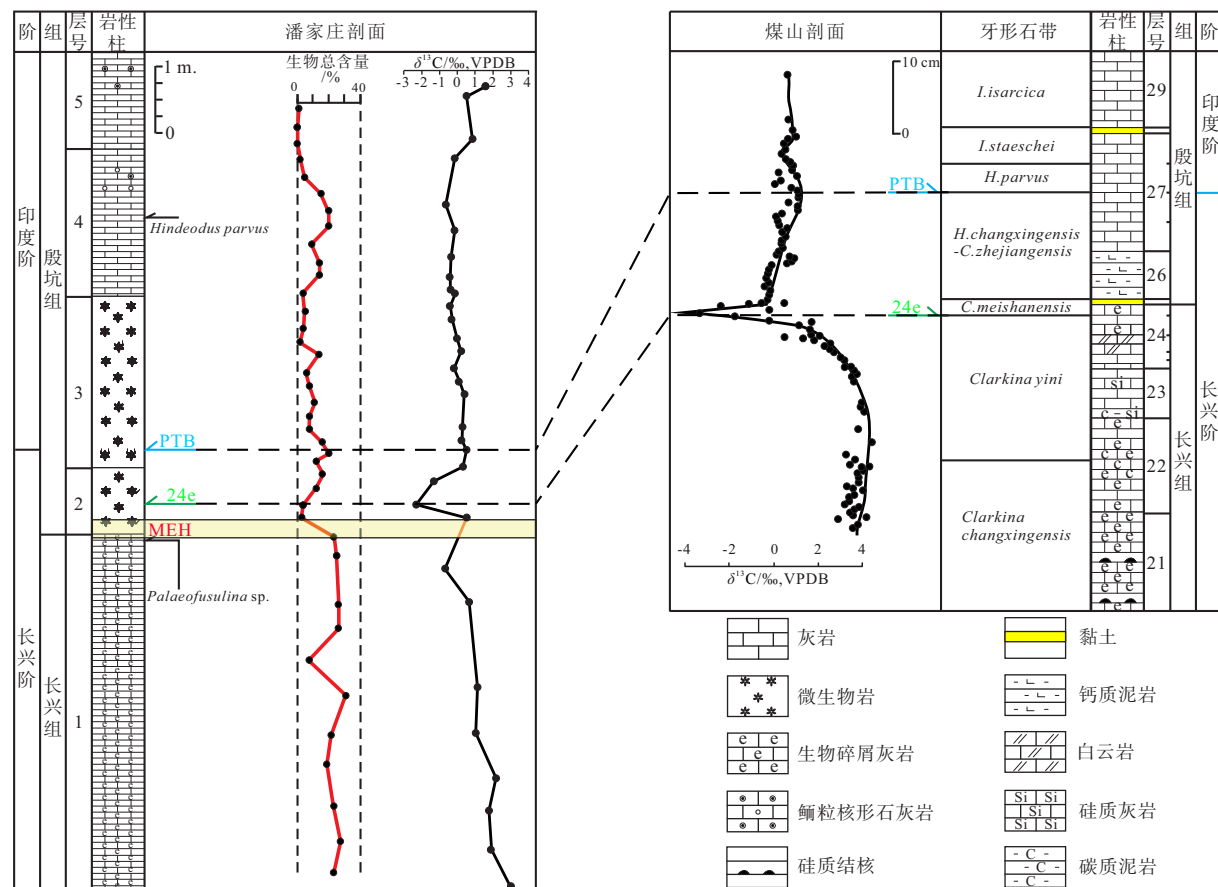
中国地质大学（武汉）地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 MAT-251 质谱仪进行测试并换算成 $\delta^{13}\text{C}$ （PDB 标准）。测试结果误差小于 0.1‰。

3 研究结果

3.1 生物化石定量统计

对于潘家庄剖面 80 个岩石薄片，通过单偏光

显微镜对各门类生物化石（有孔虫、藻类、棘皮类、腕足类、腹足类、介形类、双壳类、蠕虫虫管和蓝细菌）在地层中的含量变化进行观察统计（图 4）。总的来看，在长兴组生物碎屑灰岩中，生物化石含量丰富，分异度不高，主要包括大量的有孔虫、藻类和棘皮类碎片；在殷坑组下部的微生物岩中，生物含量急剧减少，仅含有少量小型腹足类、介形类、双壳类、蠕虫虫管和蓝细菌化石。在



煤山剖面碳同位素数据据 Shen 等 (2011), 牙形石带据 Yuan 等 (2014); PTB 代表剖面上二叠纪与三叠纪界线;

24e 代表剖面上与煤山剖面第 24e 层相当的层位; MEH 和黄色框代表剖面上的灭绝层位

图 3 浙江长兴潘家庄剖面与煤山剖面二叠纪—三叠纪之交地层碳同位素对比

Fig. 3 Carbon isotope comparison of the Permian-Triassic transition at Panjiazhuang and Meishan sections in Changxing County, Zhejiang Province

潘家庄剖面上, 有孔虫平均含量为 3.76%, 基本只分布于生物碎屑灰岩中; 藻类平均含量为 6.65%, 棘皮类平均含量为 2.85%, 两者都分布于生物碎屑灰岩中; 腹足类平均含量为 0.46%, 介形类平均含量为 1.06%, 两者都分布于微生物岩和泥晶灰岩中; 双壳类平均含量为 0.83%, 分布于泥晶灰岩中; 蠕虫管平均含量为 0.48%, 分布于微生物岩和泥晶灰岩中; 蓝细菌平均含量为 1.87%, 分布于微生物岩中。从上二叠统长兴组到下三叠统殷坑组, 生物化石平均含量从 27.54% 下降至 9.07%, 尤其是在有蓝细菌快速繁殖的情况下, 降幅达到 67.06%。

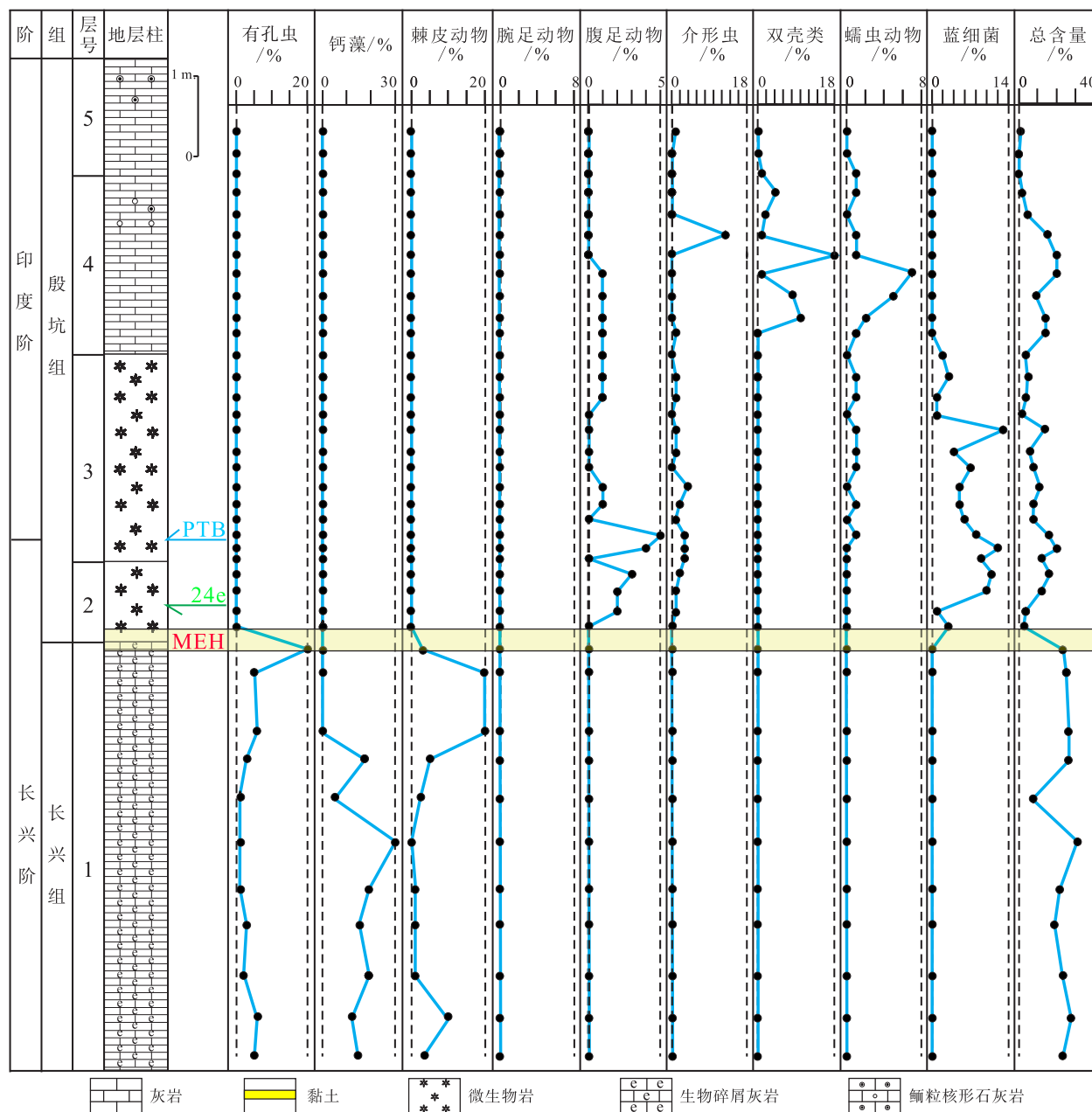
3.2 微相分析

依据岩石薄片鉴定结果, 结合 Flügel (2010)

建立的标准镶边碳酸盐台地微相特征, 笔者在潘家庄剖面共识别出 4 种微相类型。

3.2.1 富含孔虫、藻类的生物碎屑灰岩

这类岩石微相产于上二叠统长兴组顶部, 位于剖面第 1 层。其在野外露头上呈灰色至深灰色, 实测厚度大于 10 m。在镜下, 以富含藻类(图 5-a)和有孔虫(图 5-b)化石为特征, 含有少量棘皮动物碎片、介形虫等。生物化石总含量为 50% 左右, 化石颗粒大小不一, 分选性较差, 以亮晶胶结为主。有孔虫个体保存较为完整, 显示弱的泥晶化现象, 基本为原地堆积埋藏, 而藻类、棘皮动物等化石则多以碎片形式保存, 可能是由水体更浅的高能区域搬运而来的。在剖面的不同层位, 有孔虫和藻类化石含量有所差别, 分别以占生物主导地位的情况交替出现。



PTB 代表剖面上的二叠系与三叠系界线；24e 代表剖面上与煤山剖面第 24e 层相当的层位；MEH 和黄色框代表剖面上的灭绝层位

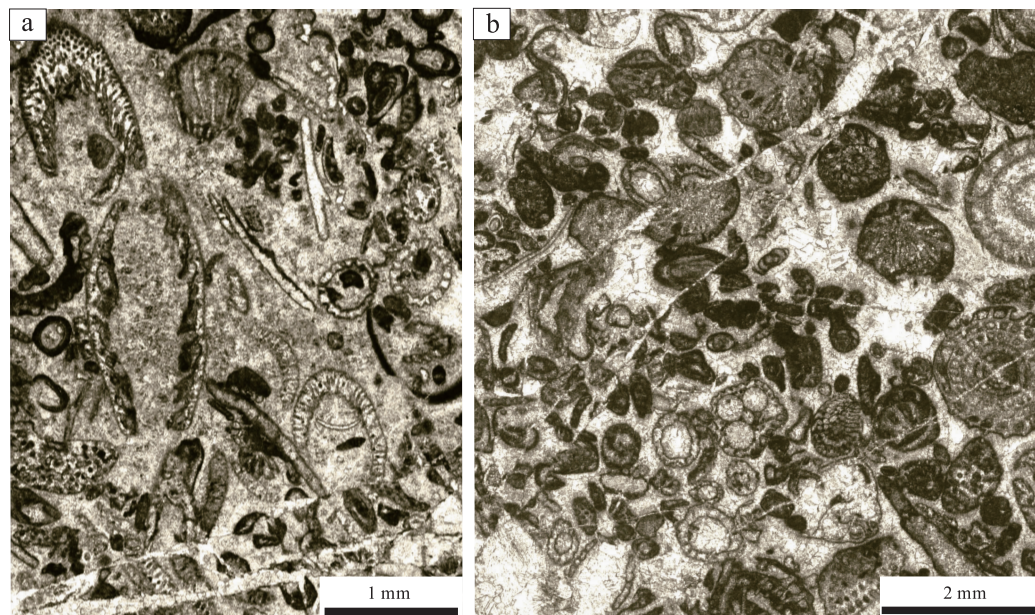
图 4 浙江潘家庄剖面二叠纪—三叠纪之交化石分布图

Fig. 4 Fossil distribution during the Permian-Triassic transition at Panjiazhuang section in Changxing County, Zhejiang Province

3.2.2 凝块石微生物岩

该微相类型产于潘家庄剖面下三叠统殷坑组底部，位于剖面第 2 层和第 3 层，野外露头总厚度约 3.5 m。下部岩石较为破碎，厚层状，因普遍被紫红色铁质泥所浸染而呈紫红色（图 1-c，1-d），具有比较模糊的花斑状构造；上部岩石呈厚层至块状，主要为深灰色、局部呈黑色（图 1-c，1-d），缝合线发育，光面表面可见明显的花斑状构造

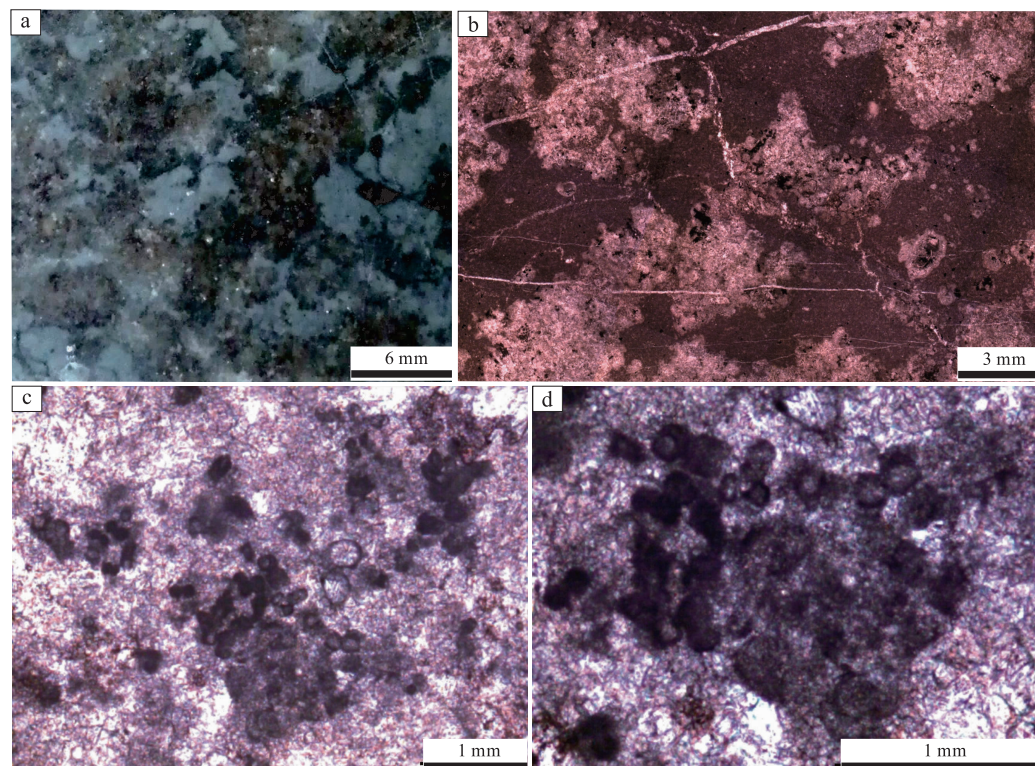
（图 6-a）。在镜下，可以明显观察到泥晶基质与亮晶方解石颗粒（图 6-b），其中泥晶基质呈暗色基质团块，亮晶方解石呈亮色斑块。生物以低丰度和低分异度为特征：在亮晶方解石中，部分层位可以看到明显的钙化蓝细菌化石（图 6-c，6-d），常呈球状或短条状产出，直径一般在 30~40 μm 之间，多以集群方式出现；在泥晶基质中，含有少量后动物化石，包括介形虫、小型腹足类、蠕虫虫



a—为钙藻化石；b—为有孔虫化石。生物碎屑灰岩为颗粒支撑，亮晶胶结，指示浅海沉积环境，单偏光

图 5 浙江潘家庄剖面上二叠统长兴组生物碎屑灰岩微相

Fig. 5 Sedimentary microfacies of bioclastic limestone of the Lower Permian Changxing Formation at Panjiazhuang section in Changxing County, Zhejiang Province



a—凝块石，见亮色泥晶基质与暗色方解石斑块，光面照片；b—凝块石，见暗色泥晶基质与亮色方解石斑块，单偏光；

c, d—亮晶方解石斑块中的球状蓝细菌化石，单偏光

图 6 浙江长兴潘家庄剖面下三叠统殷坑组凝块石微生物岩光面和微相特征

Fig. 6 Polished and thin section photomicrographs showing thrombolite of the Lower Triassic Yinkeng Formation at Panjiazhuang section in Changxing County, Zhejiang Province

管等。

3.2.3 含介壳泥晶灰岩

该微相类型产于剖面第 4 层和第 5 层，沉积于微生物岩之上。野外露头呈深灰色、中一厚层状。镜下主要由较为均一的微晶基质组成，含量约为 90%；颗粒含量很少，基本不含生物碎屑，仅在部分层位可以看到薄壳的介壳化石（图 7-a），但壳体保存不完整，较为破碎，长轴方向没有明显的定向性，表明其主要为异地搬运堆积。泥晶灰岩的出现，说明该时期出水体深度加大以及有大量陆源泥质碎屑输入。

3.2.4 核形石灰岩

该微相类型以夹层方式多次出于剖面第 4 层和第 5 层中。野外露头呈灰色至深灰色。镜下以亮晶胶结为特征（图 7-b），颗粒支撑，泥晶基质含量较少，核形石含量较高，达到 60%。核形石形态呈圆形、椭圆形，直径在 2~4 mm 之间，内部纹层结构基本消失，但在部分颗粒的外围还可以观察到残余的圈层结构。

3.3 碳同位素测试结果

测试结果表明，潘家庄剖面长兴组顶部灰岩的碳同位素（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ）分布范围在 $-1.31\text{‰} \sim 3.03\text{‰}$ 之间（图 3），平均值约为 1.59‰ ，总体上为正值，仅最顶部 1 个样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值为 -1.31‰ 。碳同位素在长兴组生物碎屑灰岩中主要可分为相对稳定和缓慢降低 2 个阶段：在长兴组与殷坑组界线之下

0.9~6.4 m 的灰岩段中具有相对平稳、较高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值，分布范围在 $0.68\text{‰} \sim 3.03\text{‰}$ 之间，平均值为 1.88‰ ；在界线之下 0.9 m 处， $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 开始出现缓慢降低，降幅为 2.93‰ 。

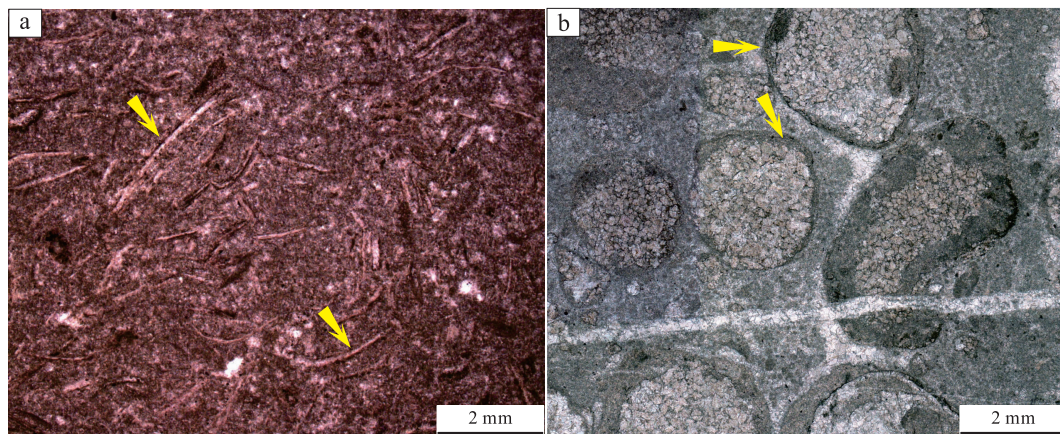
与长兴组相比，殷坑组底部灰岩的碳同位素值显著降低，其值在 $-2.30\text{‰} \sim 0.51\text{‰}$ 之间，平均值为 -0.20‰ 。在距殷坑组底部 32 cm 处碳同位素发生了显著负偏， $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值由 0.51‰ 骤降到 -2.30‰ ；随后碳同位素值开始缓慢回升。在距离殷坑组底部 90 cm 处负偏结束，此后一直在处于比较低值的水平上小幅度波动。

4 讨论

4.1 浅水碳酸盐台地沉积相演化

依据沉积微相并参照 Flügel 提出的标准碳酸盐台地相带（威尔逊模式），潘家庄剖面沉积相演化在二叠纪与三叠纪之交共经历了 4 个阶段，分别是台内开阔海阶段、台内局限—开阔海阶段、台地边缘鲕粒滩阶段及台内局限环境阶段。

1) 台内开阔海环境。在潘家庄剖面，上二叠统长兴组发育生物碎屑灰岩，灰岩中含有大量的有孔虫和藻类化石碎片。有孔虫和藻类的大规模共生，反映出当时的沉积环境透光度较好，水体较为清澈和温暖（范嘉松和吴亚生，2002）。有孔虫个体均较大，数量颇为丰富，表明当时的水体较浅，环境条件比较适宜有孔虫的生长；而钙藻的生存依



a—含介壳夹层灰岩微相，黄色箭头指示介壳，壳体多破碎且排列杂乱；b—核形石灰岩微相，核形石内部纹层结构基本不可见，只在部分颗粒的外围还有残余的圈层结构（黄色箭头所示）。单偏光

图 7 浙江长兴潘家庄剖面下三叠统殷坑组含介壳泥晶灰岩和核形石灰岩微相

Fig. 7 Sedimentary microfacies of shell-bearing micritic limestone and oncolite limestone of the Lower Triassic Yinkeng Formation at Panjiazhuang section in Changxing County, Zhejiang Province

赖于水体的透光度,如此大规模的钙藻存在,表明当时的海底处于透光带内部。此外,薄片中基本都为亮晶方解石胶结,不含泥晶基质,这表明当时的水体较为动荡,水动力较强。

2) 台内局限—开阔海环境。在长兴组生物碎屑灰岩之上,潘家庄剖面沉积了一套厚层至块状的微生物岩。在微生物岩中,生物化石总体含量较为稀少,仅含有少量的介形类、双壳类、小型的腹足类和蠕虫管,此外在部分层位还含有大量的钙化蓝细菌化石。微生物岩的类型比较单一,为凝块石,受到水深条件的影响较大。在一般情况下,叠层石形成时水深最浅,多为潮间带上部;凝块石形成的水深位置大致处于潮间带下部;而树枝石相对适应更大的水深环境,一般都在潮间带下部—潮下带上部。因此,不同类型的微生物岩反映了不同的水深环境,这也反映了在二叠纪与三叠纪之交浅水碳酸盐台地为台内局限—开阔海环境。

3) 台地边缘鲕粒滩环境。这是微生物岩沉积之后剖面所处的沉积环境,以发育鲕粒或核形石沉积为特征。镜下表现为亮晶胶结,颗粒支撑,鲕粒或核形石的磨圆度较好,但分选性较差,是典型的台地边缘鲕粒滩环境中的产物。值得注意的是,在潘家庄剖面微生物岩上部的泥晶灰岩中含有数层核形石和介壳层,介壳层壳体多破碎,呈杂乱状排列,推测可能是受风暴作用影响而堆积的产物,同时也有搬运堆积的产物。

4) 台内局限环境。这一沉积相带发育在微生物岩的上部,岩性以泥晶灰岩、泥岩和泥质灰岩为主。镜下可以看到泥晶基质含量增大,这可能与该沉积相带位于台内的局限环境、水动能较低、水循环较差、受波浪和潮汐作用影响较弱从而有利于泥质沉积有关。此外,也与早三叠世浅海环境中大量的陆源物质输入有很大的关系 (Huang *et al.*, 2022)。

4.2 碳同位素演化趋势

在二叠纪末生物大灭绝前后,碳同位素负偏在海洋和陆地沉积物中广泛存在,它们均代表了全球碳循环的主要扰动 (Payne *et al.*, 2004; Schobben *et al.*, 2017), 具有全球一致性。因此,抛开区域性因素的影响,二叠纪与三叠纪过渡时期碳同位素负偏开始、持续和终止的时间在全球范围内可以认为是等时的,故可以利用碳同位素变化曲线,特别

是不同曲线上所对应的最小值、最大值进行地层对比 (Korte and Kozur, 2010)。例如,煤山剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值从长兴组上部 *Clarkina yini* 牙形石带开始逐渐降低 (图 3), 并在 *Clarkina meishanensis* 带出现了快速降低并达到最低值 (位于剖面第 25 层), 之后在 *Hindeodus parvus* 带底部 (位于剖面第 27 层中部), 这一负偏回正 (曹长群等, 2002; Xie *et al.*, 2007)。

在潘家庄剖面,根据碳同位素曲线的演化趋势,二叠纪与三叠纪之交碳同位素在微生物岩底部开始发生强烈负偏,并达到极大值,在微生物岩底部向上约 30 cm 处负偏回正 (图 3)。因此,潘家庄剖面微生物岩的沉积阶段大致相当于煤山剖面第 24e 层下部至第 29 层中部。此外,在潘家庄剖面上,生物大规模灭绝发生在长兴组生物碎屑灰岩的顶部 (图 7), 略早于碳同位素负偏,这表明至少在潘家庄剖面,碳同位素在二叠纪与三叠纪之交的负偏与生物灭绝事件存在一定的关联。

4.3 生态系演变

二叠纪与三叠纪之交的生物演化是一个受控于不同古地理背景的复杂过程 (Song *et al.*, 2009; Zhang and Gu, 2015; Tian *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022)。在半深水—深水相区,生物灭绝事件表现为两幕式进程 (Song *et al.*, 2009, 2013) 或 1 次突发性大规模灭绝 (Shen *et al.*, 2019)。在浅水相区,灭绝模式存在显著差异,其中上扬子浅水台地记录了 2 个阶段的灭绝事件 (Li *et al.*, 2021), 而中扬子崇阳地区及南盘江盆地的孤立碳酸盐岩台地则表现为单幕式灭绝过程 (Tian *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022)。

晚二叠世晚期潘家庄地区处于开阔浅海碳酸盐沉积环境,生物群十分繁盛,岩石中生物化石总含量最高达到 28% 以上,其中有孔虫、藻类、棘皮类平均含量分别为 7.81%、13.80% 和 5.92%。这种以藻类和孔虫等后生生物占主导的生物群面貌是华南以及全球范围内晚古生代一种常见的生态系 (李晓池和丁梅华, 1987; Erwin, 2006), 广泛分布于温暖、开阔的浅海环境。随着二叠纪末灾难性事件的到来,这一生态系遭受重创,绝大多数后生生物发生灭绝,表现为单幕式的进程,与中扬子以及南盘江地区的浅水环境中生物灭绝模式一致

(Tian *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022)。而在上扬子台地, 不管是台地相凉风垭剖面还是微生物岩相老龙洞剖面, 生物在二叠纪与三叠纪之交均表现为 2 个阶段的灭绝 (Li *et al.*, 2021), 表明生态系在随环境演化的同时会受到不同古地理位置的影响。生物灭绝后蓝细菌开始繁盛, 生态系转变为蓝细菌为主要生产者, 伴随少量的小型腹足类、双壳类、介形类和蠕虫, 这与绝大多数的微生物岩相剖面一致。

随着生物群面貌的演化, 沉积微相也发生了由生物碎屑灰岩突变为凝块石微生物岩的转变, 以及后期海侵过程中含介壳泥晶灰岩和核形石灰岩的发育。同时, 无机碳同位素也发生了明显的异常负偏, 见证了在巨大生物灭绝事件中生态系的演变。从本研究可以看到, 二叠纪末的灾难性地质事件造成了浅海环境中后生生物发生突然的大规模灭绝, 整个底栖生态系统发生崩溃; 而随着后生生物的大量死亡, 蓝细菌呈爆发式增长, 出现错时相微生物岩沉积。微生物岩沉积后期, 随着早三叠世海侵过程的推进, 水深快速加大, 大量泥晶灰岩出现, 微生物岩也终止了其生长发育。

5 结论

1) 浅水碳酸盐台地在二叠纪与三叠纪之交经历了 4 个沉积相演化阶段: 晚二叠世为台内开阔海环境, 形成富含藻类和孔虫的生物碎屑灰岩; 早三叠世最早期为台内局限—开阔海环境, 发育以蓝细菌为主的凝块石微生物岩; 最后依次演化为台地边缘鲕粒滩环境和台内局限环境, 分别发育核形石灰岩以及富含介壳的泥晶灰岩。

2) 二叠纪末的生物大灭绝事件发生在潘家庄剖面长兴组生物碎屑灰岩的顶部, 向上有孔虫、藻类等生物全部消失, 被蓝细菌、小型腹足、介形虫、双壳等生物所取代, 形成大灭绝事件之后残存的生态系。

3) 潘家庄剖面二叠纪与三叠纪之交碳同位素发生显著负偏, 最大负偏发生在微生物岩的下部, 之后开始回正。微生物岩沉积阶段大致相当于煤山剖面第 24e 层下部至第 29 层。

参考文献 (References)

- 曹长群, 王伟, 金玉环. 2002. 浙江煤山二叠—三叠界线附近碳同位素变化. 科学通报, 47(4): 302–306. [Cao C Q, Wang W, Jin Y G. 2002. Carbon isotope changes near the Permian–Triassic boundary at Meishan, Zhejiang Province. Science Bulletin, 47(4): 302–306]
- 范嘉松, 吴亚生. 2002. 广西、贵州和川东二叠纪生物礁的钙藻化石及其古生态环境. 微体古生物学报, 19(4): 337–347. [Fan J S, Wu Y S. 2002. On some Permian calcareous algae from Guangxi, Guizhou Provinces and east Sichuan, and their paleoecological environments. Acta Micropalaeontologica Sinica, 19(4): 337–347]
- 冯增昭, 鲍志东, 吴胜和, 李永铁, 王国力. 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理. 地质科学, 32(2): 212–220. [Feng Z Z, Bao Z D, Wu S H, Li Y T, Wang G L. 1997. Lithofacies palaeogeography of the early and middle Triassic of South China. Scientia Geologica Sinica, 32(2): 212–220]
- 李晓池, 丁梅华. 1987. 华南上二叠统长兴阶有孔虫与牙形石带 (组合) 的对比分析. 地质论评, 33(5): 395–401. [Li X C, Ding M H. 1987. Correlation and analysis of the upper Permian changxingian foraminifer and conodont zones (or assemblages) in South China. Geological Review, 33(5): 395–401]
- 刘浩, 王永标, 袁爱华, 杨浩, 宋海军, 张素新. 2010. 湖北崇阳地区二叠纪—三叠纪之交的介形虫化石及其对灭绝事件的响应. 中国科学: 地球科学, 40(5): 574–582. [Liu H, Wang Y B, Yuan A H, Yang H, Song H J, Zhang S X. 2010. Ostracod fauna across the Permian–Triassic boundary in Chongyang, Hubei Province, and its implication for the process of the mass extinction. Science China Earth Science, 40(5): 574–582]
- 刘建波, 江崎洋一, 杨守仁, 王海峰, 足立奈津子. 2007. 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. 古地理论, 9(5): 473–486. [Liu J B, Ezaki Y, Yang S R, Wang H F, Adachi N. 2007. Age and sedimentology of microbialites after the end-Permian mass extinction in Luodian, Guizhou Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 9(5): 473–486]
- 吴亚生, 姜红霞, 虞功亮, 刘丽静. 2018. 微生物岩的概念和重庆老龙洞剖面 P-T 界线地层微生物岩成因. 古地理论, 20(5): 737–775. [Wu Y S, Jiang H X, Yu G L, Liu L J. 2018. Conceptions of microbialites and origin of the Permian–Triassic boundary microbialites from Laolongdong, Chongqing, China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20(5): 737–775]
- 杨浩, 张素新, 江海水, 王永标. 2006. 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, 31(2): 165–170. [Yang H, Zhang S X, Jiang H S, Wang Y B. 2006. Age and general characteristics of calcimicrobialite near the Permian–Triassic boundary in Chongyang, Hubei Province. Earth Science, 31(2): 165–170]
- 殷鸿福, 张克信, 杨逢清. 1988. 海相二叠系、三叠系生物地层界线划分的新方案. 地球科学, 13(5): 511–519. [Yin H F, Zhang K X, Yang F Q. 1988. A new scheme of biostratigraphic delimitation be-

- tween marine Permian and Triassic. *Earth Science*, 13(5): 511–519]
- 张克信, 赖旭龙, 童金南, 江海水. 2009. 全球界线层型华南浙江长兴煤山剖面牙形石序列研究进展. *古生物学报*, 48(3): 474–486. [Zhang K X, Lai X L, Tong J N, Jiang H S. 2009. Progresses on study of conodont sequence for the GSSP section at Meishan, Changxing, Zhejiang Province, South China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(3): 474–486]
- Baud A, Richoz S, Pruss S. 2007. The Lower Triassic anachronistic carbonate facies in space and time. *Global and Planetary Change*, 55(1–3): 81–89.
- Benton M J, Newell A J. 2014. Impacts of global warming on Permo-Triassic terrestrial ecosystems. *Gondwana Research*, 25(4): 1308–1337.
- Cao C Q, Yang Y C, Shen S Z, Wang W, Zheng Q F, Summons R E. 2010. Pattern of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and implications for geological events during the Permian–Triassic transition in South China. *Geological Journal*, 45: 186–194.
- Dal Corso J, Song H J, Callegaro S, Chu D L, Sun Y D, Hilton J, Grasby S E, Joachimski M M, Wignall P B. 2022. Environmental crises at the Permian–Triassic mass extinction. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(3): 197–214.
- Erwin D H. 2006. *Extinction: How Life on Earth Nearly Ended 250 Million Years Ago*. Princeton: Princeton University Press.
- Ezaki Y, Liu J B, Adachi N. 2003. 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*, 18(4/5): 388–402.
- Fang Y H, Chen Z Q, Kershaw S, Yang H, Luo M. 2017. Permian–Triassic boundary microbialites at Zuodeng section, Guangxi Province, South China: geobiology and palaeoceanographic implications. *Global and Planetary Change*, 152: 115–128.
- Flügel E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Golonka J. 2002. Plate-tectonic maps of the Phanerozoic. In: Kiessling W, Flügel E, Golonka J (eds). *Phanerozoic Reef Patterns 72*. SEPM Special Publishing, 21–76.
- He W H, Feng Q L, Gu S Z, Jin Y X. 2005. Changxingian (upper Permian) radiolarian fauna from Meishan D section, Changxing, Zhejiang, China and its possible paleoecological significance. *Journal of Paleontology*, 79(2): 209–218.
- He W H, Zhang Y, Zheng Y E, Zhang K X, Gui B W, Feng Q L. 2008. Late Changhsingian (latest Permian) radiolarian fauna from Chaohu, Anhui and a correlation with its contemporary faunas of South China. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 32: 199–222.
- He W H, Zhang Y, Zhang Q, Zhang K X, Yuan A H, Feng Q L. 2011. A latest Permian radiolarian fauna from Hushan, South China, and its geological implications. *Alcheringa*, 35: 471–496.
- He W H, Weldon E A, Yang T L, Wang H, Xiao Y F, Zhang K X, Peng X F, Feng Q L. 2024. An end-Permian two-stage extinction pattern in the deep-water Dongpan section, and its relationship to the migration and vertical expansion of the oxygen minimum zone in the South China Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 649: 112307.
- He W H, Shi G R, Zhang K X, Suzuki N, Wang H, Yang F F, Xiao Y F, Yang T L, Huang Y F, Wu C, Jiang K. 2025. The deterioration and collapse of Late Permian marine ecosystems and the end-Permian mass extinction: a global view. *Earth-Science Reviews*, 261: 104971.
- Hochuli P A, Schneebeli-Hermann E, Mangerud G, Bucher H. 2017. Evidence for atmospheric pollution across the Permian–Triassic transition. *Geology*, 45(12): 1123–1126.
- Holser W T, Schönlaub H P, Attrep M, Boeckelmann K, Klein P, Magaritz M, Orth C J, Fenninger A, Jenny C, Kralik M, Mauritsch H, Pak E, Schramm J M, Stattegger K, Schmölter R. 1989. A unique geochemical record at the Permian/Triassic boundary. *Nature*, 337: 39–44.
- Huang Y F, Bond D P G, Wang Y B, Wang T, Yi Z X, Yuan A H, Jia J Y, Su Y Q. 2019. Early Triassic microbialites from the Changxing region of Zhejiang Province, South China. *Journal of Palaeogeography*, 8: 22.
- Huang Y F, He W H, Liao W, Wang Y B, Yi Z X, Yang H, Li G S. 2022. Two pulses of increasing terrestrial input to marine environment during the Permian–Triassic transition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 586: 110753.
- Jiang H S, Lai X L, Yan C B, Aldridge R J, Wignall P, Sun Y D. 2011. Revised conodont zonation and conodont evolution across the Permian–Triassic boundary at the Shangsi section, Guangyuan, Sichuan, South China. *Global and Planetary Change*, 77(3–4): 103–115.
- Kershaw S, Zhang T S, Lan G Z. 1999. A? microbialite carbonate crust at the Permian–Triassic boundary in South China, and its palaeoenvironmental significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 146: 1–18.
- Kershaw S, Li Y, Crasquin-Soleau S, Feng Q L, Mu X N, Collin P Y, Reynolds A, Guo L. 2007. Earliest Triassic microbialites in the South China block and other areas: controls on their growth and distribution. *Facies*, 53: 409–425.
- Korte C, Kozur H W. 2010. Carbon-isotope stratigraphy across the Permian–Triassic boundary: a review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 215–235.
- Lehrmann D J. 1999. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang Basin, South China. *Geology*, 27(4): 359–362.
- Lehrmann D J, Payne J L, Felix S V, Dilleit P M, Wang H M, Yu Y Y, Wei J Y. 2003. 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. *Palaaios*, 18(2): 138–152.
- Li G S, Liao W, Li S, Wang Y B, Lai Z P. 2021. Different triggers for the two pulses of mass extinction across the Permian and Triassic boundary. *Scientific Reports*, 11: 6686.
- Li G S, Wang Y B, Li S, Wang T, Liao W, Deng B Z, Lai Z P. 2022. Biotic response to rapid environmental changes during the Permian–Tri-

- assic mass extinction. *Frontiers in Marine Science*, 9: 911492.
- Liu C, Jiang T N, Yang Y, Ma J. 2023. Temporal and spatial variations of high-resolution strontium, carbon, and oxygen isotopic chemostratigraphy at the end-Permian crisis boundary in South China. *Gondwana Research*, 113: 89–101.
- Luo G M, Wang Y B, Yang H, Algeo T J, Kump L R, Huang J H, Xie S C. 2011. Stepwise and large-magnitude negative shift in $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ preceded the main marine mass extinction of the Permian–Triassic crisis interval. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299: 70–82.
- Payne J L, Clapham M E. 2012. End-Permian mass extinction in the oceans: an ancient analog for the twenty-first century? *Annual Review of Earth & Planetary Sciences Letters*, 40: 89–111.
- Payne J L, Lehrmann D J, Wei J Y, Orchard M J, Schrag D P, Knoll A H. 2004. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction. *Science*, 305(5683): 506–509.
- Schobben M, Velde S, Gliwa J, Leda L, Korn D, Struck U, Ullmann C V, Hairapetian V, Ghaderi A, Korte C, Newton R J, Poulton S W, Wignall P B. 2017. Latest Permian carbonate carbon isotope variability traces heterogeneous organic carbon accumulation and authigenic carbonate formation. *Climate of the Past*, 13(11): 1635–1659.
- Shen S Z, Bowring S A. 2014. The end-Permian mass extinction: a still unexplained catastrophe. *National Science Review*, 1(4): 492–495.
- Shen S Z, Crowley J L, Wang Y, Bowring S A, Erwin D H, Sadler P M, Cao C Q, Rothman D H, Henderson C M, Ramezani J, Zhang H, Shen Y N, Wang X D, Wang W, Mu L, Li W Z, Tang Y G, Liu X L, Liu L J, Zeng Y, Jiang Y F, Jin Y G. 2011. Calibrating the end-Permian mass extinction. *Science*, 334(6061): 1367–1372.
- Shen S Z, Ramezani J, Chen J, Cao C Q, Erwin D H, Zhang H, Xiang L, Schoepfer S D, Henderson C M, Zheng Q F, Bowring S A, Wang Y, Li X H, Wang X D, Yuan D X, Zhang Y C, Mu L, Wang J, Wu Y S. 2019. A sudden end-Permian mass extinction in South China. *Geological Society of America Bulletin*, 131(1–2): 205–223.
- Song H J, Tong J N, Chen Z Q. 2009. Two episodes of foraminiferal extinction near the Permian–Triassic boundary at the Meishan section, South China. *Australian Journal of Earth Sciences*, 56: 765–773.
- Song H J, Wignall P B, Tong J N, Yin H F. 2013. Two pulses of extinction during the Permian–Triassic crisis. *Nature Geoscience*, 6(1): 52–56.
- Tian L, Tong J N, Bottjer D, Chu D L, Liang L, Song H Y, Song H J. 2015. Rapid carbonate depositional changes following the Permian–Triassic mass extinction: sedimentary evidence from South China. *Journal of Earth Science*, 26(2): 166–180.
- Tian L, Tong J N, Xiao Y F, Benton M J, Song H Y, Song H J, Liang L, Wu K, Chu D L, Algeo T J. 2019. Environmental instability prior to end-Permian mass extinction reflected in biotic and facies changes on shallow carbonate platforms of the Nanpanjiang Basin (South China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 519: 23–36.
- Wang H, He W H, Xiao Y F, Yang T L, Zhang K X, Wu H T, Huang Y F, Peng X F, Wu S B. 2023. Stages collapse of biotic communities and its relations to oxygen depletion along the north margin of Nanpanjiang Basin during the Permian–Triassic transition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 621: 111569.
- Wang T, Burne R V, Yuan A H, Wang Y B, Yi Z X. 2019. The evolution of microbialite forms during the Early Triassic transgression: a case study in Chongyang of Hubei Province, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 519: 209–220.
- Wang Y B, Tong J N, Wang J S, Zhou X G. 2005. Calcimicrobialite after end-Permian mass extinction in South China and its palaeoenvironmental significance. *Chinese Science Bulletin*, 50(7): 665–671.
- Wu Y S. 2005. *Conodonts, Reef Evolution and Mass Extinction Across Permian–Triassic Boundary*. Beijing: Geological Publishing House, 90.
- Wu Y S, Yu G L, Li R H, Song L R, Jiang H X, Riding R, Liu L J, Liu D Y, Zhao R. 2014. Cyanobacterial fossils from 252 Ma old microbialites and their environmental significance. *Scientific Reports*, 4: 3820.
- Xie S C, Pancost R D, Huang J H, Wignall P B, Yu J X, Tang X Y, Chen L, Huang X Y, Lai X L. 2007. Changes in the global carbon cycle occurred as two episodes during the Permian–Triassic crisis. *Geology*, 35: 1083–1086.
- Yang F, Li S, An K Y, Bond D P G, Ao R, Wu X B, Ma L L, Sun Y D. 2024. Re-evaluating water column reoxygenation during the end Permian mass extinction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25: e2024GC011779.
- Yin H F, Zhang K X, Tong J N, Yang Z Y, Wu S B. 2001. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian–Triassic boundary. *Episodes*, 24(2): 102–114.
- Yin H F, Xie S C, Luo G M, Algeo T J, Zhang K X. 2012. Two episodes of environmental change at the Permian–Triassic boundary of the GSSP section Meishan. *Earth-Science Reviews*, 115(3): 163–172.
- Yuan D X, Shen S Z, Henderson C M, Chen J, Zhang H, Zheng Q F, Feng H Z. 2014. Revised conodont-based integrated high-resolution timescale for the Changhsingian Stage and end-Permian extinction interval at the Meishan sections, South China. *Lithos*, 204: 220–245.
- Zhang M H, Gu S Z. 2015. Latest Permian deep-water foraminifers from Daxiakou, Hubei, South China. *Journal of Paleontology*, 89(3): 448–464.
- Zheng Q F, Cao C Q, Wang Y, Zhang H, Ding Y. 2016. Microbialite concretions in a dolostone crust at the Permian–Triassic boundary of the Xishan section in Jiangsu Province, South China. *Palaeoworld*, 25(2): 188–198.

(责任编辑 张西娟)