

# 二叠纪 - 三叠纪野火间断事件对生物灭绝的响应

——以浙江煤山剖面为例\*

沈文杰<sup>1,2</sup>, 钟莉莉<sup>1</sup>, 林杨挺<sup>3</sup>, 孙永革<sup>4</sup>, 张 华<sup>5</sup>, 杨志军<sup>1</sup>, 周永章<sup>1</sup>

- (1. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275;
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
4. 浙江大学地球科学系, 浙江 杭州 310027;
5. 南京地质古生物所, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 二叠纪末期地球气候环境发生重大变化, 导致陆地和海洋生态系统崩溃, 发生了地质历史上最大规模的生物灭绝事件。大火(亦称野火)作为陆地生态系统的关键影响因子, 以及气候环境变化的重要指标, 在第四纪以前的历史研究中很少有报道。剖析了煤山二叠纪 - 三叠纪界线 521 ka 黑碳和燃烧源多环芳烃的沉积记录, 恢复了生物灭绝前后的大火历史。研究显示, 生物灭绝前的 163 ka 内大火频繁, 在生物灭绝时则发生了最大规模的大火事件; 生物灭绝线以上早三叠世地层中未发现燃烧的记录, 出现了大火事件间断(时间持续约 358 ka)。对比全球多个剖面, 这种大火间断事件可能不是局部现象, 而是全球性气候环境变化的响应。陆地植被为大火燃烧的原料, 伴随着陆地植被的大规模消失和大气氧含量的快速下降, 大火燃烧事件也将消失。因此, 煤山剖面二叠纪 - 三叠纪界线的大火间断能用来指示生物的大规模灭绝事件。

**关键词:** 二叠纪 - 三叠纪; 大火间断; 生物灭绝; 煤山剖面

中图分类号: P539 文献标志码: A 文章编号: 0529 - 6579 (2014) 06 - 0019 - 08

## Permian-Triassic Wildfire Gap Responses to the Mass Extinction-An Example Study in the Meishan Section, Zhejiang Province

SHEN Wenjie<sup>1,2</sup>, ZHONG Lili<sup>1</sup>, LIN Yangting<sup>3</sup>, SUN Yongge<sup>4</sup>, ZHANG Hua<sup>5</sup>,  
YANG Zhijun<sup>1</sup>, ZHOU Yongzhang<sup>1</sup>

- (1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes, Guangzhou 510275;
3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;
4. Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027;
5. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

**Abstract:** Great changes occurred in the earth's surrounding environments during the Permian-Triassic (P-Tr) transition and resulted in the collapse of land and marine ecosystems. Thus, the most severe mass extinction in the earth's history appeared across the P-Tr boundary. Wildfire, as a key ecosystem driver and climate change indicator, is seldom reported in the documents of the pre-Quaternary researches. In this study, a 521 ka record of wildfire during the P-Tr mass extinction was recurred through the black car-

\* 收稿日期: 2014 - 08 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40803014); 高校基本科研业务费资助项目(32110 - 3161324); 海洋公益性科研资助项目(201105003)

作者简介: 沈文杰(1978年生), 男; 研究方向: 地球化学; E-mail: Shenwjie@mail.sysu.edu.cn

bon (BC) and combustion-derived polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) records in the GSSP section of Meishan. There were frequent wildfires in the 163 ka of history just before the P-Tr mass extinction and the most intensive one occurred in the mass extinction event beds. No combustion records were found in the beds above mass extinction line and a wildfire gap (lasting 358 ka) was recognized in the Early Triassic. Wildfire gap may be not a local phenomenon, but a response of global climatic and environmental changes. Wildfire would vanish accompanied by the destruction of land vegetation and abrupt drop of atmospheric oxygen. Therefore, Meishan P-Tr wildfire gap can be used as an indicator of the mass extinction.

**Key words:** Permian-Triassic; wildfire gap; mass extinction; meishan section

二叠纪 - 三叠纪界线 (P-Tr), 亦即古、中生代之交, 发生了地质历史上规模最大的生物灭绝事件, 地球上 95% 以上的海洋生物种, 约 75% 的陆生脊椎动物和大部分的陆生植物在这次事件中快速灭亡<sup>[1-2]</sup>。关于生物灭绝的原因, 众说纷纭, 有火山喷发<sup>[3-4]</sup>、陨石撞击<sup>[5]</sup>、海洋缺氧<sup>[6-7]</sup>、酸雨<sup>[8-9]</sup>、陆地贫氧<sup>[10-11]</sup>、海平面升降<sup>[12]</sup>、泛大陆的聚合等。<sup>[13]</sup>

近年来, P-Tr 界线大火 (这里指的是天然大火, 或称之为野火, Wildfire) 事件被提出来, 并引起越来越多的关注<sup>[1, 14-16]</sup>。大火是发生在陆地生态系统的一种自然现象, 是环境变化 (地表植被、空气氧含量、干湿季节等) 的响应因子, 古环境再造的一个重要途径<sup>[17-19]</sup>。大火事件的识别主要通过埋藏在地层中的燃烧产物—黑碳 (BC) 和燃烧源多环芳烃 (PAHs) 来进行<sup>[17, 20-22]</sup>。目前, 已经在世界各地众多 P-Tr 界线地层中发现有大火燃烧的证据, 如在我国的浙江<sup>[1, 14-16, 23]</sup>、云南<sup>[24]</sup>、贵州<sup>[1, 25]</sup>、广西<sup>[1]</sup>、湖北<sup>[26]</sup>、新疆<sup>[1, 27]</sup>、西澳大利亚<sup>[28-29]</sup>、加拿大<sup>[30]</sup>等地, 大火极有可能是一个全球性的事件<sup>[14, 26]</sup>。

然而, P-Tr 大火事件与生物灭绝的关系并不清楚。强烈的大火可以直接烧死植被和生活在林区或草地上的动物, 但一般不会导致生物的大规模消失或灭绝, 必定有其它更重要的因素导致生物的灭绝<sup>[19, 31]</sup>。这是不是说明大火事件的研究不重要或没有意义? 显然不是这样。大火事件至少可以反映当时大气氧含量依然位于燃烧的窗口 ( $> 17\%$ ), 有较多的可燃物质, 适宜大火燃烧事件的发生<sup>[18, 32]</sup>。而这种大火燃烧之后, 陆地风化侵蚀速度加快, 会引起明显的水土流失以及海洋输入物中营养元素的大量增加, 可以引起海洋的富营养化,

而导致海洋的缺氧事件产生<sup>[19, 33-34]</sup>。尽管大火事件不是导致生物灭绝的重要原因, 但通过高分辨率长周期大火事件的变化, 有可能反映或指示生物灭绝事件的发生<sup>[23]</sup>。本文通过对穿越浙江煤山 P-Tr 界线地层中大火燃烧记录的研究, 试图来明确大火事件与生物灭绝之间的这种联系。

## 1 样品及实验

### 1.1 煤山剖面样品采集

位于太湖西岸的浙江省长兴县煤山剖面 (图 1), 于 2001 年被国际地质科学联合会提名为全球海相二叠系 - 三叠系层型剖面和点 (即国际标准剖面 GSSP, 又称“金钉子”)<sup>[35]</sup>。该剖面沉积连续, 研究程度高, 是进行与生物灭绝相关研究的绝佳剖面。生物灭绝线位于 25 层粘土岩底部的薄层黄铁矿层的中部, 25 层和 26 层为生物灭绝事件层<sup>[35-37]</sup>, 大部分生物的消费发生在这里<sup>[1, 36]</sup>。P-Tr 界线位于 27 层灰岩中部的 *Hindodus. parvus* (微小欣德牙形石) 的首现面<sup>[35]</sup>。

实验样品取自煤山剖面 23 层到 32 层 (岩性及采样点位置参考图 2), 每层取 1~2 个样品, 在 25 层和 26 层进行加密取样。这段地层的顶底 (33 层和 22 层) 以及 28 层和 25 层为火山灰层, 其中的锆石能够进行精确的放射性同位素定年<sup>[1, 38]</sup>。根据 Burgess et al. 最新的年龄数据<sup>[38]</sup>, 这段地层所记录的时间为 521 ka, 22 层至 25 层所记录的时间为 163 ka, 25 层至 28 层为 61 ka, 28 层至 33 层为 297 ka。生物灭绝线的年龄为  $(251.941 \pm 0.037)$  Ma (25 层锆石 U-Pb 年龄, 为生物灭绝主幕), 生物灭绝速度快, 持续时间短 (约 61 ka, 即 25 层至 28 层间隔时间), P-Tr 界线年龄为  $(251.902 \pm 0.024)$  Ma。

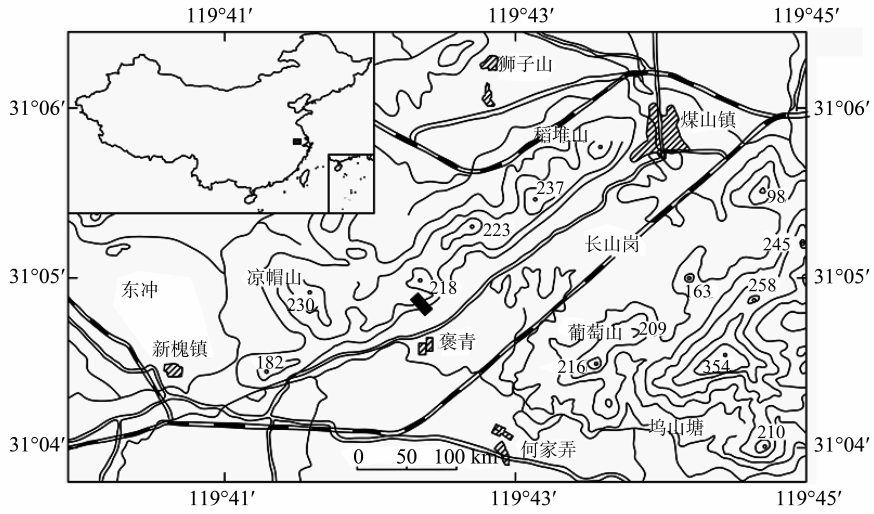


图 1 浙江省长兴县煤山剖面地理位置简图，其中黑方块为国际标准 D 剖面

Fig. 1 Location map of Meishan section, Changxing county, Zhejiang province, the black square indicating the Meishan D section (GSSP)

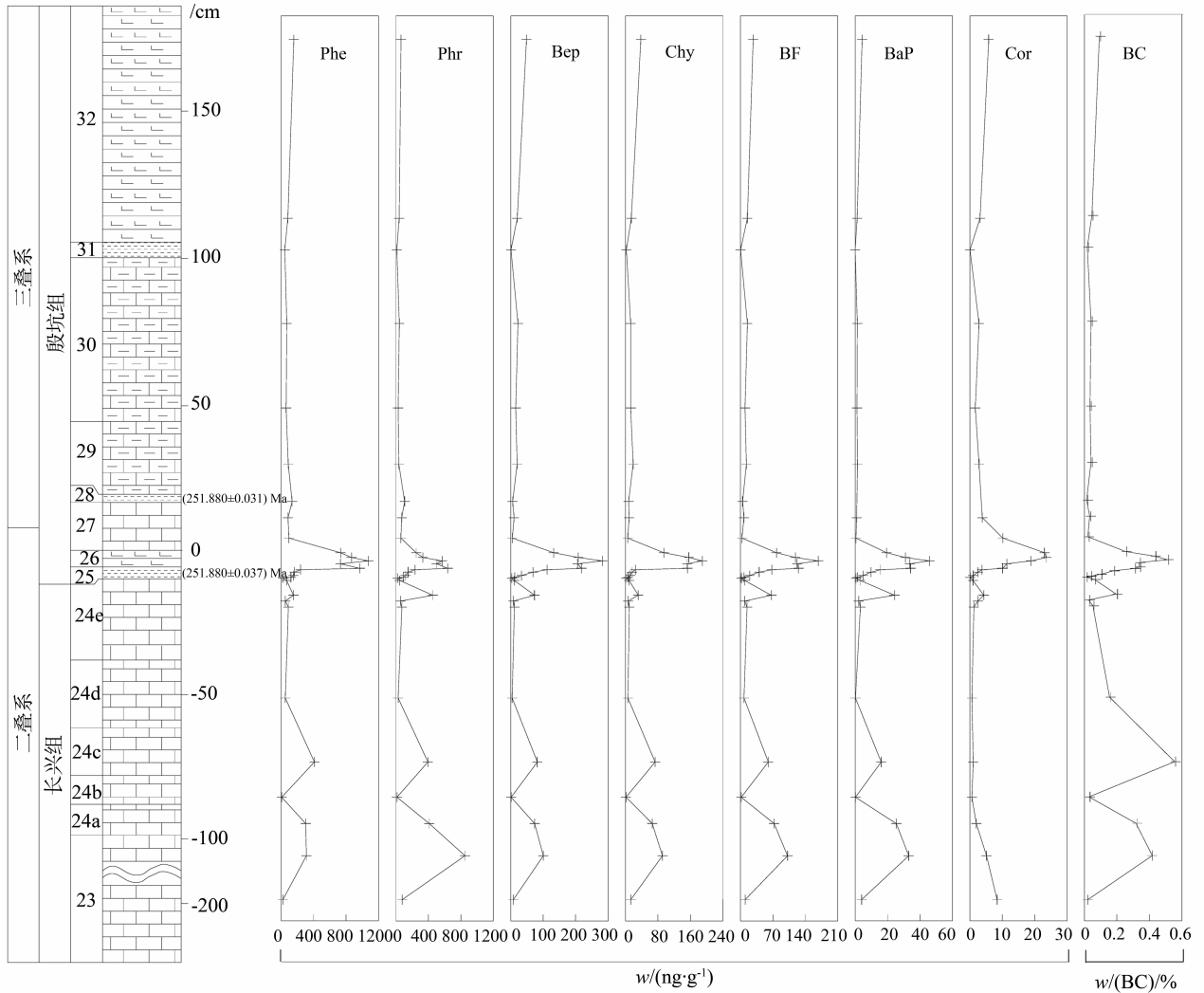


图 2 黑碳和燃烧源多环芳烃在煤山 P-Tr 剖面地层分布

Fig. 2 Concentration profiles of BC and combustion-derived PHAs in the Meishan P-Tr section

## 1.2 实验

利用 HCl 及 HF 除去粉末样品中的碳酸盐和硅酸盐, 然后通过  $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$  溶液进行氧化处理, 可得到黑碳固体粉末。定量分析利用元素分析仪-同位素质谱联用仪 (CE Flash EA 1112-Finnigan Delta plus XL) 进行。多环芳烃采用索氏抽提的方法, 利用二氯甲烷和甲醇 (体积比 97/3) 提取, 分析仪器为 GC (HP6890) -MS (Micromass VG Platform II)。TOC 和  $T_{max}$  等数据利用岩石热解 (Rock-Eval) 的方法获取。以上实验均在有机地球化学国家重点实验室完成, 实验流程、仪器参数和误差参考沈文杰等<sup>[15]</sup>, 以及 Shen et al.<sup>[14]</sup>。

## 2 结果

黑碳和多环芳烃分析结果分别见表 1、图 2 及图 3。

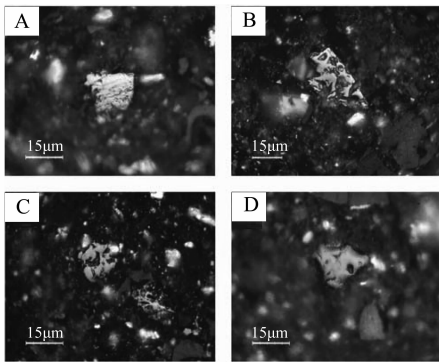


图 3 煤山剖面 P-Tr 界线地层中黑碳的反射光显微照片

Fig. 3 Reflection light micrograph of BC in the Meishan P-Tr section AB 为 MSC26c 样品; CD 为 MSC26d 样品

### 2.1 有机质成熟度

剖面上  $T_{max}$  (热降解峰峰顶温度) 除了两个样品达到了  $485\text{ }^{\circ}\text{C}$  (MSC30-1 和 MSC24d) 外, 其余均在  $367\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $445\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 有机质成熟度属于未成熟到成熟的范围, 与利用甲基菲指数计算出来的镜质体反射率基本一致 ( $R_o < 1.15\%$ )。总的来看, 煤山剖面有机质演化程度处于典型成熟阶段。因此, 煤山地区经历了一个相对温和变化的热历史, 生物标志化合物未受到热裂解作用的明显影响, 分子地球化学信息是可靠的<sup>[14]</sup>。

### 2.2 黑碳

BC 是陆地植被燃烧之后残留的固体含碳物质, 透光镜下 BC 颗粒细小, 多数在  $15\text{ }\mu\text{m}$  左右。呈不

规则块状、长条状, 黑色不透明, 在反光镜下呈亮白色 (图 3)。多数植物细胞结构被破坏, 极少数保留有细胞壁结构。BC 的反射率  $R_o$  在  $0.5\%$  到  $3.5\%$  (图 4), 与现代草原、灌木林及松林燃烧之后的黑碳反射率相似, 推测的燃烧温度在  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[39-41]</sup>。

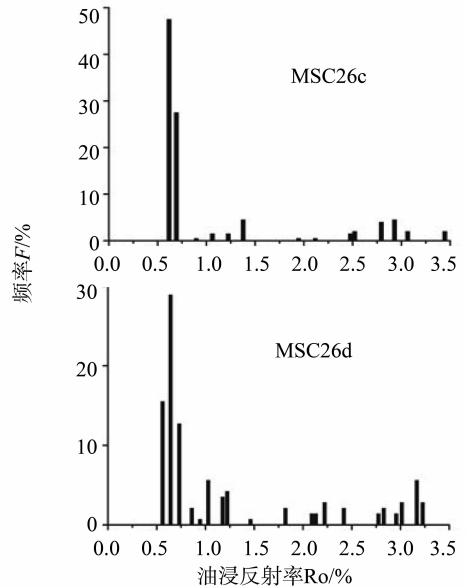


图 4 煤山剖面 26 层样品中黑碳反射率直方图  
Fig. 4 BC frequency distribution histogram in bed 26 in Meishan section

BC 含量在剖面曲线上的有多个峰值, 分别出现在 23 层、24c 层、24e 和 26 层 ( $w(\text{BC})$  分别为  $0.42\%$ 、 $0.55\%$ 、 $0.20\%$  和  $0.51\%$ )。高 BC 含量样品均出现在晚二叠世的沉积地层中, 早三叠世地层中 BC 含量很低, 无峰值出现。

### 2.3 燃烧源多环芳烃

本次研究选取了 7 个燃烧源 PAHs 指标, 包括菲 (Phe)、蒎 (Chy)、芘 (Pyr)、苯并荧蒹 (BF)、苯并芘 (BaP 和 BeP) 和晕苯 (Cor)。这些指标在剖面上表现出高度的一致性, 在 23 层、24c 层、24e 和 26 层出现峰值,  $\Sigma\text{PAHs}$  在 26 层中部出现最大值, 达到  $2\ 351 \times 10^{-9}$  (MSC26c), 为剖面最低值的 93 倍, 次高峰的 1.6 倍。在 PAHs 剖面图上, 一个明显的特征是 PAHs 峰值均出现在晚二叠世, 最高峰则紧邻生物灭绝线上部, 而早三叠世 PAHs 曲线平直, 无峰值出现, PAHs 含量总体很低。

表 1 浙江煤山 P-Tr 界线地层中 BC 和 PAHs 的含量分布<sup>1)</sup>

Table 1 BC and PAHs contents in Meishan P-Tr

PAHs  $\times 10^{-9}$ 

Samples	Depth /cm	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	Rc/%	BC/%	Phe	Chr	Pyr	BF	BeP	BaP	Cor	$\Sigma$ PAHs
MSC32-2	173.8	432	0.79	0.091 9	158	38	61	28	48	4	6	343
MSC32-1	112.8	440	0.78	0.046 6	84	15	38	15	20	1	3	177
MSC31	102.0	436	0.76	0.017 7	48	2	10	0	1	0	0	62
MSC30-2	76.8	433	0.81	0.041 2	71	13	40	15	22	1	3	165
MSC30-1	48.0	485	0.81	0.034 7	64	13	25	10	15	1	2	130
MSC29	28.8	427	0.75	0.040 9	90	19	33	13	20	1	3	179
MSC28	16.0	376	1.12	0.014 3	137	8	106	5	6	0	0	262
MSC27cd	10.5	383	1.01	0.033 0	86	9	71	8	10	1	4	189
MSC27ab	3.5	386	1.01	0.021 8	96	6	59	3	5	1	10	180
MSC26e	-1.5	428	0.79	0.253 0	735	95	249	78	132	19	23	1 331
MSC26d	-3.1	433	0.72	0.431 0	870	156	330	118	208	31	24	1 736
MSC26c	-4.3	434	0.75	0.510 4	1 078	189	568	168	283	46	19	2 351
MSC26b	-5.3	431	0.74	0.336 5	732	152	499	122	206	34	11	1 756
MSC26a	-6.8	431	0.77	0.338 1	972	153	636	125	218	34	10	2 149
MSC25g	-7.3	430	0.79	0.306 3	241	25	236	68	112	16	4	701
MSC25f	-8.1	427	0.80	0.178 8	167	17	149	41	69	10	2	454
MSC25de	-9.3	427	0.85	0.099 9	154	12	116	20	34	5	1	342
MSC25bc	-9.9	430	0.94	0.037 5	123	6	91	8	12	2	0	242
MSC25a	-10.2	425	1.09	0.010 8	22	2	19	2	4	1	0	48
MSC24f0	-11.0	429	0.90	0.062 1	69	9	45	9	11	3	1	147
MSC24ec	-16.0	439	0.71	0.196 1	155	31	454	67	73	24	4	809
MSC24eb	-18.0	445	0.81	0.026 6	54	7	56	9	8	2	2	138
MSC24ea	-20.0	441	0.84	0.052 1	92	9	72	14	11	3	1	203
MSC24d	-51.1	485	1.06	0.154 6	54	6	26	8	4	0	1	99
MSC24c	-73.0	432	0.80	0.553 2	413	92	392	60	82	16	1	1 056
MSC24b	-85.0	367	0.89	0.028 2	9	2	11	2	1	0	1	25
MSC24a	-94.0	438	0.84	0.317 1	306	66	410	73	74	25	2	956
MSC23-2	-105.0	438	0.84	0.417 2	313	91	850	102	100	33	5	1 494
MSC23-1	-120.0	442	0.71	0.021 6	23	13	77	10	8	4	8	144

1) 表中 MSC24d 至 MSC30-1 数据参考 Shen et al<sup>[14-15]</sup>。  $T_{\max}$ : 热降解峰峰顶温度; Rc: 利用甲基菲指数计算的镜质体反射率; BC: 黑碳; Phe: 菲; Chr: 蒽; Pyr: 芘; BF: 苯并荧蒽; BaP: 苯并[a]芘; BeP: 苯并[e]芘; Cor: 晕苯

## 3 讨论

### 3.1 P-Tr 大火事件

煤山剖面燃烧源 PAHs 和 BC 曲线高度一致, 在 23 层、24c 层、24e 和 26 层出现的峰值指示了大火事件, 这种大火或火灾事件在晚二叠世的 163 ka 内较为普遍, 而生物灭绝线上的 358 ka 时间内则没有这样的大火事件。大火燃烧必须有充足的可燃物和氧气, 据 Belcher et al<sup>[32]</sup> 的模拟实验研究, 17% 的大气氧含量是天然大火发生的最低阈值。由此表明, 晚二叠世一直到生物灭绝线, 陆地植被依然存在和繁盛, 周期性的大火可能反映了干湿气候的变化<sup>[17]</sup>, 大气氧含量也一直维持在 17% 以上<sup>[32,42]</sup>。在生物灭绝线, 伴随着海陆生物的大

规模消亡, 陆地发生了最强烈的大火事件。在经历 P-Tr 界线生物大灭绝之后, 早三叠世生物大萧条, 大气氧含量低, 陆地上再没有发生较强的大火事件。

### 3.2 P-Tr 大火间断

煤山 P-Tr 剖面地层中 BC 及燃烧源 PAHs 在生物灭绝线上极低的含量, 反映了大火事件在早三叠世消失了, 这种现象称之为 P-Tr 大火间断<sup>[43]</sup>, 本研究揭露的 P-Tr 大火间断时间超过了 350 ka (25 层至 32 层的时间间隔<sup>[38]</sup>)。

在煤山剖面, Xie et al<sup>[23]</sup> 亦在 29 层到 36 层中发现了较高的 BC 含量, 但他们是通过镜下鉴定的方法, 并且未给出照片和具体的数据。Nabbefeld et al<sup>[16]</sup> 亦发现 28 层有较高的燃烧源 PAHs (未给出

具体的数据, 未进行燃烧残余固体颗粒, 即 BC 的研究), 并且认为这与火山作用密切相关。上述燃烧记录的差异可能与采样位置或研究方法不同所致, 但他们的研究亦显示, 更高的早三叠世层位没有大火燃烧产物的记录, 这也表明 P-Tr 之交生物灭绝线上大火发生了长期的间断。

除了煤山剖面外, 其它 P-Tr 界线剖面地层也有发生大火燃烧间断的现象, 如 Thomas et al<sup>[28]</sup> 对澳大利亚西部帕斯盆地的一个海相剖面进行了研究, 发现二叠系地层中木炭碎屑物占总有机碳的 50% 至 70%, 而三叠系地层木炭所占的比例陡降到几乎为零, 出现明显的大火间断。Shao et al<sup>[24]</sup> 在云南东部 3 个煤系地层的研究表明, 在晚二叠世地层出现多个煤层, 其中的惰质组占显微组分的比例从 5.62% 到 59.04%, 并且向 P-Tr 界线有增加的趋势, 显示了晚二叠世频繁的大火, 而早三叠世地层没有煤层的出现, 成煤间断亦伴随着大火的间断。加拿大 Sverdrup 盆地布坎南湖 P-Tr 剖面亦出现类似大火间断的现象<sup>[30]</sup>。

### 3.3 大火间断与生物灭绝

尽管大火是陆地草地和森林生态系统的关键驱动力, 但一般不认为大火对生物灭绝有重大的贡献<sup>[19]</sup>。如 1997-1998 年发生在印度尼西亚的大火向大气释放了 8~25.7 亿 t 的 CO<sub>2</sub>, 林区 32% 的面积被烧毁, 植被覆盖的消失导致水土流失加快, 而造成沿海地区的富营养化是近岸珊瑚礁灭绝的重要原因<sup>[34,44]</sup>。这种灾难性大火事件仅仅间接地造成敏感物种的死亡, 对整体生态系统不构成重大影响, 仍属于火驱动下正常演替的森林生态系统<sup>[19]</sup>。

天然大火的出现表明大气氧含量还维持在一定的水平之上, 陆地仍能提供大量的可燃物质, 陆地生态系统未发生转折性的突变, 大火的周期性波动可能反映了干湿气候的交替<sup>[17]</sup>。在正常背景下的大火的长期间断则说明这种平衡被打破了, 陆地生态系统可能发生了灾难性事件。P-Tr 界线大火间断与生物大灭绝相一致<sup>[1,14,23]</sup>, 正是这种关系的体现。全球性的生物灭绝, 短期内可燃物质的大量堆积诱发了陆地上大规模的野火燃烧, 使生物固碳快速向大气释放, 引起大气二氧化碳含量升高 (P-Tr 界线大火释放以及叠加火山喷发的大量温室气体等), 导致大气氧含量的降低。生物灭绝及延迟的复苏还会使可燃物质在长时间尺度上的可持续供给中断。上述因素共同作用限制了灭绝期后大火燃烧事件的产生和发展, 从而引起大火间断。反过来, 长时间的大火间断提供了一种识别生物灭绝的机

制<sup>[23]</sup>, 可以通过对地层中的大火燃烧产物的记录来恢复生物灭绝的发生和发展, 甚至生物的复苏过程。

## 4 结 论

通过对浙江煤山 P-Tr 界线剖面地层中的 BC 和燃烧源 PAHs 记录的研究, 得到如下结论:

1) BC 和 PAHs 含量在煤山剖面有一致的分布特征, 出现 4 个峰值, 分别在 23 层、24c 层、24ec 层和 26 层, 最大峰值对应生物灭绝事件层, 即 26 层;

2) 煤山 BC 和 PAHs 记录恢复了 P-Tr 界线的大火燃烧历史: 晚二叠世出现频繁的大火事件, 最强烈的大火与生物灭绝发生的时间一致, 早三叠世则出现大火间断事件;

3) P-Tr 大火间断与生物大规模消亡在时间上有很好的对应关系, 提供了一种识别生物灭绝的机制, 大火燃烧历史记录可以用来恢复地质历史上的生物灭绝事件。

### 参考文献:

- [1] SHEN S Z, CROWLEY J L, WANG Y, et al. Calibrating the end-Permian mass extinction [J]. *Science*, 2011, 334(6061): 1367-1372.
- [2] ERWIN D H. Extinction: How life on Earth nearly ended 250 million years ago [M]. New York: Princeton University Press, 2006: 320.
- [3] WIGNALL P B. Large igneous provinces and mass extinctions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 53(1/2): 1-33.
- [4] KAMO S L, CZAMANSKE G K, AMELIN Y, et al. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 214(1/2): 75-91.
- [5] BECKER L, POREDA R J, HUNT A G, et al. Impact event at the Permian-Triassic boundary: Evidence from extraterrestrial noble gases in fullerenes [J]. *Science*, 2001, 291(5508): 1530-1533.
- [6] GRICE K, CAO C Q, LOVE G D, et al. Photic zone euxinia during the Permian-Triassic superanoxic event [J]. *Science*, 2005, 307(5710): 706-709.
- [7] SHEN W, LIN Y, XU L, et al. Pyrite framboids in the Permian-Triassic boundary section at Meishan, China: Evidence for dysoxic deposition. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2007, 253(3/4): 323-331.
- [8] PAYNE J L, CLAPHAM M E. End-Permian mass extinc-

- tion in the oceans: An ancient analog for the twenty-first century? [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2012, 40(1): 89 - 111.
- [9] HINOJOSA J L, BROWN S T, CHEN J, et al. Evidence for end-Permian ocean acidification from calcium isotopes in biogenic apatite[J]. *Geology*, 2012, 40(8): 743 - 746.
- [10] WARD P D, BOTHA J, BUICK R, et al. Abrupt and gradual extinction among late Permian land vertebrates in the Karoo Basin, South Africa[J]. *Science*, 2005, 307(5710): 709 - 714.
- [11] HUEY R B, WARD P D. Hypoxia, global warming, and terrestrial Late Permian extinctions[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 398 - 401.
- [12] WU Y, FAN J. Quantitative evaluation of the sea-level drop at the end-Permian: Based on reefs[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(1): 95 - 102.
- [13] 殷鸿福, 宋海军, 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 43(10): 1539 - 1552.
- [14] SHEN W, SUN Y, LIN Y, et al. Evidence for wildfire in the Meishan section and implications for Permian-Triassic events [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(7): 1992 - 2006.
- [15] 沈文杰, 林杨挺, 孙永革, 等, 浙江省长兴县煤山剖面二叠 - 三叠系过渡地层中的黑碳记录及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(10): 2407 - 2414.
- [16] NABBEFELD B, GRICE K, SUMMONS R E, et al. Significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Permian/Triassic boundary sections [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(9): 1374 - 1382.
- [17] JIANG C, ALEXANDER R, KAGI R I, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in ancient sediments and their relationships to palaeoclimate [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(5/6/7): 1721 - 1735.
- [18] SCOTT A C, GLASSPOOL I J. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration [C]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(29): 10861 - 10865.
- [19] BENTON M J, NEWELL A J. Impacts of global warming on Permo-Triassic terrestrial ecosystems [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1308 - 1337.
- [20] MASIELLO C A. New directions in black carbon organic geochemistry[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/2/3/4): 201 - 213.
- [21] MASIELLO C A, DRUFFEL E R M. Black carbon in deep-sea sediments[J]. *Science*, 1998, 280(5371): 1911 - 1913.
- [22] SIMONEIT B R T. Biomass burning-a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(3): 129 - 162.
- [23] XIE S, PANCOST R D, HUANG J, et al. Changes in the global carbon cycle occurred as two episodes during the Permian-Triassic crisis [J]. *Geology*, 2007, 35(12): 1083 - 1086.
- [24] SHAO L Y, WANG H, YU X H, et al. Paleo-fires and atmospheric oxygen levels in the latest Permian: Evidence from maceral compositions of coals in eastern Yunnan, southern China [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2012, 86(4): 949 - 962.
- [25] 王尚彦, 殷鸿福, 滇东黔西陆相二叠纪 - 三叠纪界线地层研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001: 36.
- [26] LUO G M, WANG Y B A, GRICE K, et al. Microbial-algal community changes during the latest Permian ecological crisis: Evidence from lipid biomarkers at Cili, South China [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 105: 36 - 51.
- [27] CAO C, WANG W, LIU L, et al. Two episodes of  $^{13}\text{C}$ -depletion in organic carbon in the latest Permian: Evidence from the terrestrial sequences in northern Xinjiang, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270(3/4): 251 - 257.
- [28] THOMAS B M, WILLINK R J, GRICE K, et al. Unique marine Permian-Triassic boundary section from Western Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2004, 51(3): 423 - 430.
- [29] GRICE K, NABBEFELD B, MASLEN E. Source and significance of selected polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments (Hovea-3 well, Perth Basin, Western Australia) spanning the Permian-Triassic boundary [J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38(11): 1795 - 1803.
- [30] GRASBY S E, SANEI H, BEAUCHAMP B. Catastrophic dispersion of coal fly ash into oceans during the latest Permian extinction [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 104 - 107.
- [31] 沈文杰, 张华, 孙永革, 等, 二叠纪 - 三叠纪界线大火燃烧的地层记录: 研究进展回顾及评述 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(6): 613 - 623.
- [32] BELCHER C M, MCELWAIN J C. Limits for combustion in low  $\text{O}_2$  redefine paleoatmospheric predictions for the mesozoic [J]. *Science*, 2008, 321(5893): 1197 - 1200.
- [33] VEGA J A, FERNÁNDEZ C, FONTURBEL T. Throughfall, runoff and soil erosion after prescribed burning in gorse shrubland in Galicia (NW Spain) [J]. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(1):

- 37 – 51.
- [34] ABRAM N J, GAGAN M K, MCCULLOCH M T, et al. Coral reef death during the 1997 Indian Ocean dipole linked to Indonesian wildfires[J]. *Science*, 2003, 301(5635): 952 – 955.
- [35] YIN H F, ZHANG K X, TONG J N, et al. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary[J]. *Episodes*, 2001, 24(2): 102 – 114.
- [36] JIN Y G, WANG Y, WANG W, et al. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China[J]. *Science*, 2000, 289(5478): 432 – 436.
- [37]. 沈文杰, 林杨挺, 王道德, 等, 天然富勒烯及其在 P-T 界线地层的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(9): 903 – 910.
- [38] BURGESS S D, BOWRING S, SHEN S Z. High-precision timeline for Earth's most severe extinction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3316 – 3321.
- [39] JONES T P, SCOTT A C, COPE M. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain[J]. *Bulletin-Societe Geologique de France*, 1991, 162(2): 193 – 200.
- [40] JONES T P, LIM B. Extraterrestrial impacts and wildfires[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 164(1/2/3/4): 57 – 66.
- [41] SCOTT A C, JONES T P. The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 106(1/2/3/4): 91 – 112.
- [42] BERNER R A. Phanerozoic atmospheric oxygen: New results using the GEOCARBSUL model[J]. *American Journal of Science*, 2009, 309(7): 603 – 606.
- [43] ABU HAMAD A M B, JASPER A, UHL D. The record of Triassic charcoal and other evidence for palaeo-wildfires: Signal for atmospheric oxygen levels, taphonomic biases or lack of fuel? [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 96 – 97: 60 – 71.
- [44] PAGE S E, SIEGERT F, RIELEY J O, et al. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997[J]. *Nature*, 2002, 420(6911): 61 – 65.