

文章编号:1001-8166(2003)05-0681-10

## 白垩纪至早第三纪的极端气候事件\*

刘志飞<sup>1</sup>,胡修棉<sup>2</sup>

(1. 同济大学海洋地质教育部重点实验室,上海 200092;

2. 意大利安科纳大学海洋科学系,意大利 安科纳 60131)

**摘 要:**地球科学界正在将预测未来气候变化的研究重点放到地球过去突然发生的气候变暖事件。白垩纪至早第三纪发生的极端气候事件被认为是最接近于现今的地球系统,对其研究有利于理解现今地球系统过程在碳循环快速搅动时的响应。这些气候事件主要包括:古新世—始新世最热事件(PETM, ~ 55 Ma BP)、早阿普第晚期和森诺曼—土仑界线的大洋缺氧事件(OAE1a, ~ 120 Ma; OAE2, ~ 93.5 Ma BP)。PETM 事件是中白垩世以来一次突然变暖事件,在 10 ka 年以内深海温度增加 ~ 5 °C,表层海水温度增加 4 ~ 8 °C,而 <sup>13</sup>C 至少发生 3.0% 的负偏移。目前普遍认为 PETM 事件是由于海洋气水化合物(CH<sub>4</sub>)的巨量释放造成的。大洋缺氧事件(OAEs)记录了海洋环境下有机质的大量埋藏,代表了碳循环和海洋生物系统的重大搅动事件。综合大洋钻探计划(IODP)将极端气候确定为优先研究领域,将采取特定的钻探策略,在世界大洋范围内获取最低限度蚀变的新生代至白垩纪沉积物,研究精度要求达到米兰柯维奇的天文调谐时间尺度,其最终目标是定量描述过去全球气候变化,并为未来气候变化预测提供依据。

**关 键 词:**极端气候;古新世—始新世最热事件(PETM);大洋缺氧事件(OAEs);白垩纪;早第三纪;大洋钻探计划(ODP);综合大洋钻探计划(IODP)

中图分类号:P71 文献标识码:A

日益增长的大气 CO<sub>2</sub> 含量正在加剧着现今的全球变暖过程,引起了科学界和人类社会的极大关注,因为这样极端温暖的气候对于人类来讲是一个巨大的挑战。而据预测,像始新世早期(约 50 Ma)同样温暖的气候很可能会出现在不远的 2150 年<sup>[1]</sup>。地球科学界正在将预测未来气候变化的研究重点放到地球过去突然发生的气候变暖事件,试图通过对过去气候变暖事件的研究来更好地理解气候变暖的原因、过程及其结果,从而为未来气候变化预测提供依据。其中,中白垩世(约 120 ~ 80 Ma BP)和早第三纪(约 60 ~ 45 Ma BP)是显生宙以来温室效应最接近对未来气候变化的预测值<sup>[2]</sup>。这段时期发生

的若干突然的、瞬时的气候变暖事件,导致了全球海洋环境发生显著变化,海洋生物大规模绝灭或更替,以及全球地球化学循环强烈搅动<sup>[3]</sup>(图 1)。这些气候事件的发生都可能与巨量温室气体的输入密切相关<sup>[6]</sup>。虽然通常将这些地质事件的研究归入到纯粹的学术研究范畴,但是最近对大洋钻探获得的成果表明,白垩纪至早第三纪沉积涉及到许多与社会发展有关的科学问题,如热带表层海水温度的稳定性、生物多样性与气候的关系、碳循环搅动的全球效应等。白垩纪至早第三纪发生的气候事件是研究与气候变化有关的生物快速绝灭和碳的巨量输入的最佳实例。

\* 收稿日期:2003-05-23;修回日期:2003-07-15.

\* 基金项目:国家自然科学基金项目“青藏高原可可西里地区早新生代古气候记录”(编号:40102010);国家重点基础研究发展规划项目“地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录”(编号:G2000078500);上海市青年科技启明星计划“渐新世最早期全球最大冰盖事件及其对未来气候预测应用的研究”资助.

作者简介:刘志飞(1969-),男,江苏南京人,副教授,主要从事新生代全球气候变化和中国新生代宏观环境演化的海陆对比研究.

E-mail: lzhidei@online.sh.cn

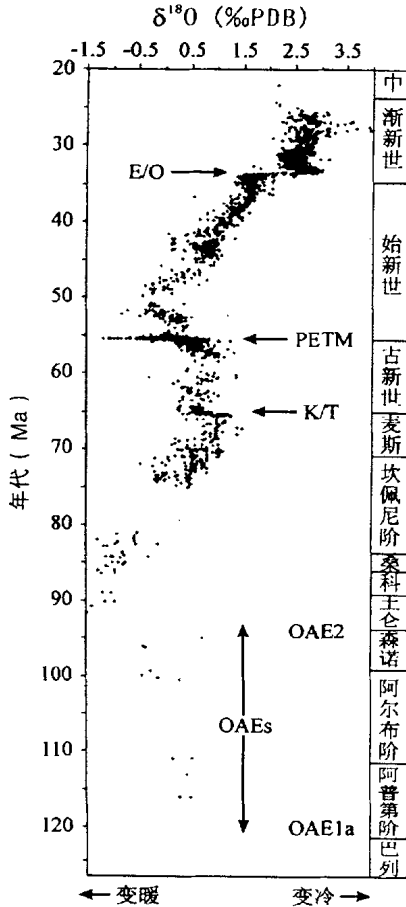


图 1 白垩纪至早第三纪深海底栖有孔虫氧同位素曲线<sup>[4, 5]</sup>

Fig. 1 Deep-sea benthic oxygen isotope curve for the Cretaceous and Paleogene<sup>[4, 5]</sup>

PETM, 古新世—始新世最热事件; OAEs, 中白垩世大洋缺氧事件; OAE1a, 早阿普第晚期大洋缺氧事件; OAE2, 森诺曼—土仑界线大洋缺氧事件; K/T, 白垩纪—第三纪界线; E/O, 始新世—渐新世界线

PETM, Paleocene-Eocene Thermal Maximum; OAEs, Mid-Cretaceous Oceanic Anoxic Events; OAE1a, Late, Early Aptian Selli Event; OAE2, Cenomanian-Turonian Boundary Bonarelli Event; K/T, Cretaceous-Tertiary Boundary; E/O, Eocene-Oligocene Boundary

大洋钻探计划(ODP)的科学顾问机构——联合海洋研究所深部地球采样(JOIDES)极端气候项目计划工作组(PPG),将白垩纪至早第三纪的极端气候事件限定为 3 个关键时段,分别包括:古新世—始新世最热事件(PETM)、早阿普第晚期和森诺曼—土仑界线的大洋缺氧事件(OAEs)<sup>[6~8]</sup>。虽然白垩纪至早第三纪还发生其他重要的快速气候变化事件,如阿普第—阿尔布界线、阿尔布晚期、中麦斯特里希特、白垩纪—第三纪界线、始新世—渐新世界线,但是上述 3 个极端气候事件更接近现今的地球

系统,更有利于理解现今地球系统过程在碳循环快速搅动时的响应。最近实施的 ODP 航次(表 1)在大西洋和太平洋利用先进的双管/三管高级液压活塞取样器(APC),并结合双管加长岩芯桶取样器(XCB)、高分辨率物性测量和合成剖面技术,确保 100%的取芯率,获得了中白垩世至早第三纪极端气候变化的完整沉积记录。本文根据过去 30 多年的深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP)的研究成果,综述 PETM 和 OAEs 极端气候事件研究的主要成就,提出该领域面临的关键科学问题,及其综合大洋钻探计划(IODP)的研究展望。

### 1 古新世—始新世最热事件(PETM)

全球深海、高纬地区和陆地温度在古新世—始新世界线附近(约 55 Ma)极短的时间间隔内升高 4~8℃,同时伴随着陆地和海洋植物、动物和微生物群的重大更替<sup>[4, 14, 15]</sup>。这个全球极端气候事件被称为古新世—始新世最热事件(PETM)或晚古新世最热事件(LPTM)<sup>[4]</sup>。PETM 事件的一个重要特征是出现碳同位素(<sup>13</sup>C)至少 3.0‰的负偏移(图 2)。世界各大洋沉积物中的浮游和底栖有孔虫、北美陆地沉积物中化石牙齿的釉层和碳酸盐结核以及欧洲和新西兰的陆源有机碳都出现这一 <sup>13</sup>C 偏移事件<sup>[14, 17~19]</sup>。<sup>13</sup>C 发生负偏移的起始间隔小于 10 ka<sup>[20]</sup>,整个偏移时间大约经历 210 ka<sup>[21]</sup>。Norris 等<sup>[22]</sup>首次采用天文调谐方法确定 PETM 的年龄约为 54.98 Ma。这样快速、大规模、全球性的 <sup>13</sup>C 偏移在显生宙的地质记录中是独一无二的。

根据物质平衡观点,PETM 的 <sup>13</sup>C 明显负偏移很难解释,除非有大量富含 <sup>12</sup>C 的 CO<sub>2</sub> 快速输入到海洋—大气系统中<sup>[15, 23]</sup>,这种可能性却与深海沉积物中 PETM 事件显著的碳酸盐溶解相一致<sup>[15, 17]</sup>。因此,PETM 事件所对应的 <sup>13</sup>C 负偏移被认为是与海洋气水化合物(CH<sub>4</sub>)的巨量释放有关<sup>[23]</sup>。这个假设认为,PETM 事件发生时,大洋环流的某种变化引起中层和深层海水突然变暖,从而使得大陆边缘沉积物的地热梯度增加,气水化合物的热溶解增强。据估计,大约有 1.1 × 10<sup>12</sup> t 甲烷从气水化合物和地下储气带被释放到海洋或大气中,并很快被氧化为 CO<sub>2</sub>。模拟研究显示,质量为 1 × 10<sup>18</sup> ~ 2 × 10<sup>18</sup> g、<sup>13</sup>C 值为 -60‰的甲烷在 10 ka 内释放到现今的碳循环系统,将产生 PETM 事件记录的地球化学搅动效果<sup>[23]</sup>。

无论其来源如何,这样快速的大量碳的输入将对海洋碳化学体系产生深远影响。地球化学模型显

表 1 最近大洋钻探(ODP)的白垩纪至早第三纪极端气候航次

Table 1 Recent Ocean Drilling Program (ODP) Legs on topics of the Cretaceous and Paleogene extreme climates

航次	时间	名称	地点	极端气候主题	参考文献
208	2003	早新生代极端气候:Walvis 海脊横断面	南大西洋	PETM、K/T、E/O	[9]
207	2003	Demerara 海隆:白垩纪至早第三纪古海洋学赤道横断面	西大西洋	OAEs、PETM、K/T	[10]
199	2001	早第三纪赤道横断面	赤道太平洋	PETM、E/O	[11]
198	2001	白垩纪至早第三纪极端温暖气候:Shatsky 海隆深海横断面	太平洋中部	OAEs、PETM、K/T、E/O	[5, 12]
171B	1997	Blake 鼻状脊古海洋学横断面	北大西洋	OAEs、PETM、K/T	[13]

注:OAEs,大洋缺氧事件;PETM,古新世—始新世最热事件;K/T,白垩纪—第三纪界线;E/O,始新世—渐新世界线

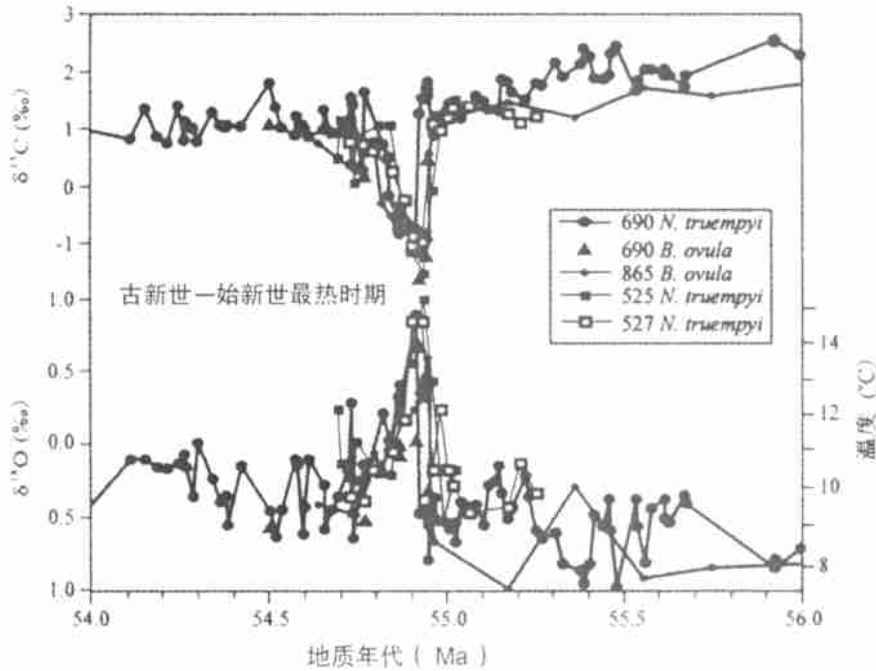


图 2 古新世—始新世最热事件(PETM)的底栖有孔虫同位素记录<sup>[16]</sup>

Fig. 2 Benthic foraminifer isotope records of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM)<sup>[16]</sup>

示,这种快速气候事件发生时,pH 值下降,碳酸盐补偿深度(CCD)变浅,并导致深海沉积物中 CaCO<sub>3</sub> 大量溶解。海洋 pH 和碱度之间的平衡大致在 150 ka 内通过硅质岩石风化、无机和有机碳沉积来恢复。为了容纳过量的碳,CCD 在恢复之前应该比碳偏移之前更深。最近的研究显示,CCD 变浅的幅度比模型预测还要大得多,如沃尔维斯(Walvis)海脊的强烈溶解事件发生在 1 600~3 400 m 的古深度<sup>[15]</sup>,而在加勒比海发生在小于 2 000 m 的古深度<sup>[24]</sup>。

PETM 事件记录的碳循环搅动之重要性,还在于强烈地建议人类减少对海洋和大气释放 CO<sub>2</sub>。目前,人类化石燃料碳每年有 5 × 10<sup>14</sup> mol 释放到大气碳循环系统中,这加剧了目前原本已是间冰期的温暖气候,对全球大气、生物和地球化学系统产生深远影响<sup>[6]</sup>。PETM 事件是地质记录中唯一已知的接近现代化石燃料快速和大量释放的类似事件,因而对其研究将为未来气候变化预测提供重要

的依据。

## 2 大洋缺氧事件(OAEs)

全面认识碳循环发生重大搅动的原因和结果是当今地球科学研究面临的一个主要科学目标。由大量有机质埋藏所定义的中白垩世大洋缺氧事件(OAEs)代表了海洋系统的重大海洋和气候事件<sup>[25]</sup>,是认识碳循环搅动过程的典型实例。虽然在中生代更早的时期和古生代也发生类似的缺氧事件,但由于难以获得深海沉积物,而不能开展大范围的研究,新生代没有发生类似的全球性的缺氧事件。

中白垩世 OAEs 事件记录了碳循环系统的快速变化,并伴随着海洋生物的重大变化(图 3)。其中以早阿普第晚期的 Selli 事件(OAE1a,约 120 Ma)和森诺曼—土仑界线的 Bonarelli 事件(OAE2,约 93.5 Ma)为代表,在所有大洋盆地的沉积物中均有着非

常显著的记录<sup>[28]</sup>。

### 2.1 OAE1a 事件

最近的高分辨率记录显示,OAE1a (Selli 事件) 具有明显的全球生物地球化学变化的复杂层序,在钙质超微浮游生物快速繁衍之后,紧接着是 <sup>13</sup>C 负偏移和微锥类 (nannoconids) 生物灭绝<sup>[29]</sup>。这一

<sup>13</sup>C 负偏移已获得特提斯阿尔卑斯<sup>[30]</sup>、英格兰南部<sup>[31]</sup>、墨西哥<sup>[32]</sup> 和太平洋 Resolution 海底平顶山<sup>[33]</sup> 沉积记录的确认,而且海洋碳酸盐和有机质以及陆地高等植物都记录了该 <sup>13</sup>C 负偏移,这表明该地质事件影响了全球的海洋—气候系统。同位素曲线清楚地表明, <sup>13</sup>C 负偏移之后紧接着出现 <sup>13</sup>C 快

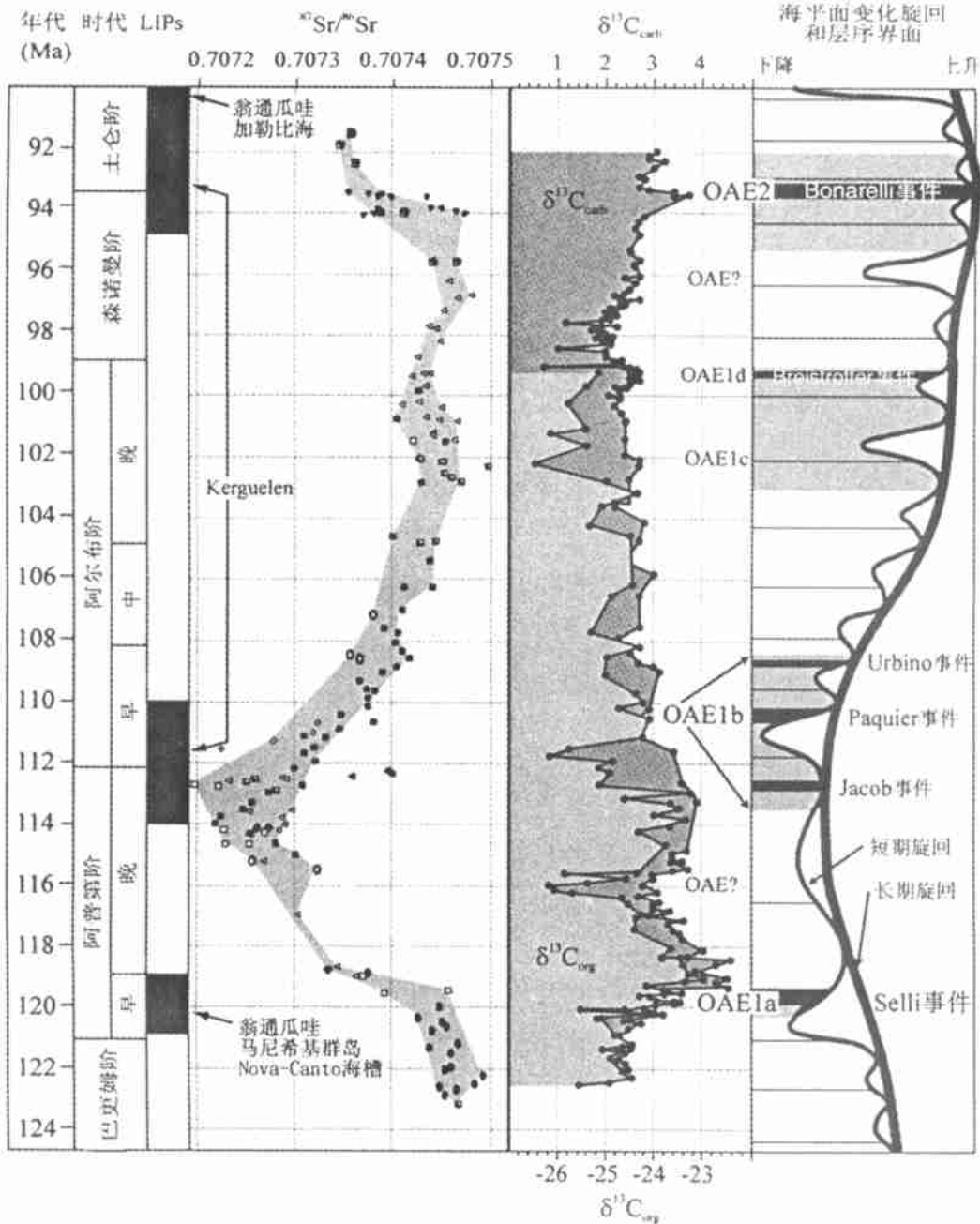


图 3 中白垩世黑色页岩、大洋缺氧事件(OAEs)与碳同位素、全球海平面、海水 Sr 同位素和巨大火成活动区(LIPs)记录

Fig. 3 The mid-Cretaceous record of major black shales and Ocean Anoxic Events (OAEs) in the context of the carbon isotopic record, changing global sea level and sea water Sr chemistry, and emplacement history of Large Igneous Provinces (LIPs)

中白垩世的有机质生产和保存与海底火山作用和热液活动密切相关,LIPs 活动加剧了热液的形成,这与 3 个主要的 OAEs 可能有关<sup>[3, 26, 27]</sup>

Organic matter production and preservation during the mid-Cretaceous appears to be closely related to submarine volcanism and hydrothermal activity. Increased hydrothermal output during LIP emplacement may thus be linked to the three major OAEs<sup>[3, 26, 27]</sup>

速正偏移<sup>[33]</sup>(图 4)。Selli 事件的黑色页岩层出现在 <sup>13</sup>C 值从相对低值向相对高值快速增长的位置。造成 <sup>13</sup>C 负偏移的可能解释包括: 富含营养盐和富<sup>12</sup>C 的中层水上涌速率的增加<sup>[30]</sup>; 由于 CO<sub>2</sub> 驱动的 global 变暖造成水循环加速和风化速率的增强<sup>[30]</sup>; 海底火山作用相伴的地幔源 CO<sub>2</sub> 大量输入<sup>[28, 34]</sup>; 大陆边缘沉积物中大量的气水化合物

的大规模释放<sup>[35]</sup>。

OAE1a 附近的一系列事件可能与翁通爪哇太平洋“超级地幔柱”事件有密切联系。在那里,强烈的海底火山作用可能驱动了全球变暖和海洋生产力提高<sup>[29, 30, 34]</sup>,该认识得到海水<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比率增长的支持<sup>[17, 36]</sup>(图 4)。

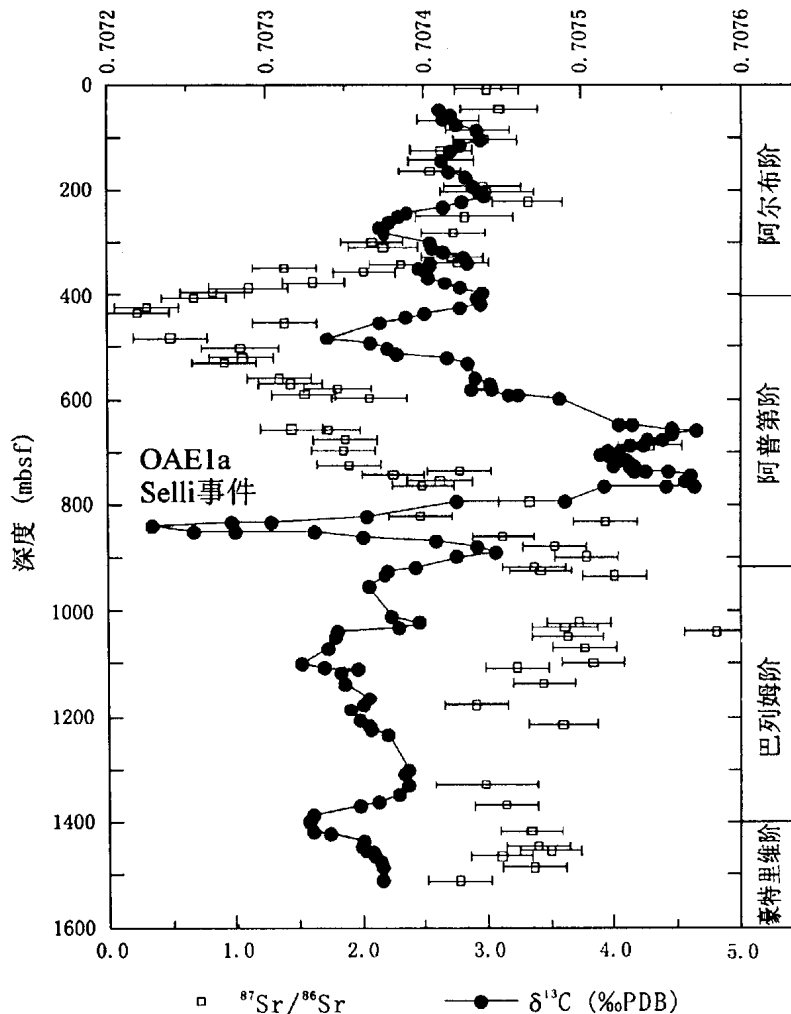


图 4 太平洋 Resolution 海底平顶山白垩纪台地碳酸盐的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>13</sup>C 同位素地层学  
 Fig. 4 Strontium (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr) and carbon isotope (<sup>13</sup>C) stratigraphy of Cretaceous platform carbonates from Resolution Guyot, Pacific

Selli 事件代表了纹层状富含有机质 (~ 14 % TOC) 的黑色页岩, 对应于全球的大洋缺氧事件 OAE1a

The "Selli" horizon displays a laminated organic-rich (~ 14 % TOC) black shale, demonstrating the truly global nature of Ocean Anoxic Event 1a refere<sup>[33]</sup>

### 2.2 OAE2 事件

森诺曼—土仑界线时期富含有机质的海洋沉积物广泛发现于世界各大洋和陆地剖面<sup>[25]</sup>, OAE2 表现为广泛分布的纹层沉积和其他多种地球化学标志<sup>[37, 38]</sup>, 其碳循环响应与水柱的含氧变化有关, 但确切的原因和缺氧的程度目前还不清晰, 并存在争论。

年龄为 93.5 Ma 的 OAE2 事件发生时, 海水的

<sup>13</sup>C 对应于大于 2 ‰ 正偏(图 3), 但同样也有助于生产力提高和碳埋藏<sup>[39]</sup>。水体静滞缺氧和高生产率被认为是有机质埋藏增加的主要原因, 可是, 目前还不清楚这种高生产力到底是由于水体环流引起的<sup>[40]</sup>、还是由海底火山作用驱动的<sup>[41]</sup>。至今为止, 欧洲海相地层保存的 OAE2 事件还没有发现明显的 <sup>13</sup>C 负偏移<sup>[39]</sup>, 但其他剖面发现在森诺曼—土仑界

线的主要正偏移之后出现微弱的负偏移<sup>[42]</sup>。太平洋、印度洋和加勒比海记录了 93 ~ 88 Ma 的海底火山活动,海水的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比率相应地降低<sup>[17, 36]</sup>(图 3)。

### 3 极端气候的生物响应

白垩纪至早第三纪的极端温暖气候是海洋和陆地生物群落发生重大更替的时期,许多现代的动物和植物属种就是在这时经过调整和建立的。这些事件基本都与气候和海洋的重大变化有着密切的联系,其中,中白垩世 OAEs 事件和早第三纪 PETM 事件就是最好的实例。早阿普第的 OAE1a 事件是钙质超微浮游生物、放射虫、浮游有孔虫和底栖有孔虫发生重大更替的时期<sup>[43, 44]</sup>,而 OAE2 事件的影响更为深远,上述许多属种以及菊石、双壳和被子植物都发生大规模灭绝<sup>[43 ~ 45]</sup>。

目前对于中白垩世 OAEs 事件生物更替的解释认为是大洋缺氧和超营养作用造成的。如 OAE1a 事件发生时,海洋生产力的增加<sup>[46]</sup>可能引起大范围的低氧带(OMZs)<sup>[47]</sup>,同时会出现快速的超营养作用,从而导致大量海洋属种灭绝及其之后的快速繁衍<sup>[48]</sup>。另一种观点认为与上层水体的热梯度变化有关,热梯度可能随海平面变化和不同水体模式发生变化,从而对生产力特征和浮游生物演化产生重要影响<sup>[40]</sup>。可是,这些假设要经过生物、生物地理和同位素等资料验证。此外,海洋和陆地生态系统之间的对比对于确定生物灭绝的原因特别重要,尤其是用以判断“缺氧症”是主要还是次要因素。

PETM 事件伴随着一系列生物事件,包括:50% ~ 55% 深海底栖有孔虫灭绝、哺乳动物迁移至北美和欧洲<sup>[3]</sup>。化石记录在此时突然出现新的灵长类哺乳动物,目前还不清楚这些新的哺乳动物来自何方,但是这些哺乳动物的繁衍可能与高纬海道张开和温度升高有关,这两个因素同时又可能对底栖有孔虫灭绝起重要作用<sup>[49]</sup>。值得注意的是,PETM 的变暖事件发生时,没有出现伴随的浮游有孔虫和超微浮游生物大规模更替现象<sup>[50]</sup>,这些属种大致在<sup>13</sup>C 偏移之后 100 ka 才发生重大灭绝和新种繁衍<sup>[51]</sup>。海洋浮游生物的更替实际上与怀俄明地区哺乳动物的大规模灭绝是同时的,陆地上的植物多样性也在此时增加<sup>[52]</sup>。北美比格霍恩(Bighorn)盆地的植物组合同时也在 PETM 事件之后温度下降约 5 °C。生物变化滞后的原因表明,PETM 事件可能是具有重大生物响应的大型气候事件的一部分,如始新世温暖时期的终结。因此,

不仅要分析 PETM 事件本身,还要研究晚古新世至早始新世的更长范围的记录。幸运的是,最近 2 个 ODP 航次(207 和 208)已经获得了完全没有扰动的晚古新世至早始新世沉积的 APC 岩芯,使航次后建立一个完整、确切的 PETM 事件的年代学成为可能<sup>[9, 10]</sup>。

## 4 关键科学问题及 IODP 钻探计划展望

### 4.1 极端气候事件研究的关键科学问题<sup>[6, 7]</sup>

#### 4.1.1 PETM 事件关键科学问题

(1) 碳输入的原因是什么? CH<sub>4</sub> 是否是来源于海底? 其大量释放是领先、还是滞后于化学和海洋—大气温度的变化?

(2) 热盐环流发生快速倒转的原因是什么? 是否领先于碳的大量输入?

(3) 碳输入到何处? 首先输入到大气还是海洋?

(4) 碳输入的速率及其随时间是如何变化的?

(5) PETM 事件发生前、发生过程中,以及发生后气候是如何随纬度发生变化的?

(6) 碳输入和温度增加如何影响生物系统?

(7) PETM 事件发生时,热带表层海水温度(SST)是增加的吗? 如果是,增幅怎样?

#### 4.1.2 OAEs 事件和碳循环的关键科学问题

(1) 什么因素突然触发了碳循环系统的搅乱? 是海底火山作用,还是高营养成分? 这两者存在联系吗?

(2) 缺氧的根本原因是什么? 是生产力的增加、洋流循环的降低还是某种氧化剂的输入?

(3) 缺氧是如何在垂向上变化的?

(4) 所有 OAEs 事件都与温室气候变暖有关吗?

(5) OAEs 事件发生之前、发生期间,以及发生之后,气候特征如何随纬度变化? 气候变化与 OAEs 事件之间的关系怎样?

(6) 碳输入和海洋变化如何影响生物系统?

(7) 海洋温度结构在不同 OAEs 事件期间如何变化?

(8) 气水化合物释放与 OAEs 事件之间存在着必然的关系吗? 两者之间的联系是什么?

#### 4.1.3 极端气候生物响应的关键科学问题

(1) 极端气候的生物更替事件是突然发生的,还是持续一段较长的时期?

(2) 怎样分类生物更替事件,以及特殊生态群

落怎样比其他属种更受影响?

(3) 生物更替事件是否发生在温暖时期和 OAEs 事件的启动时期,以及这些事件的终结能否导致生物更替事件?

(4) 海陆生物更替事件之间如何对比?

(5) 极端气候下生物响应的区域性是不同于现代的吗?

#### 4.2 IODP 钻探计划展望

PETM 和 OAEs 事件科学问题的解决需要有连续的地层记录,要求对关键层位获得完整的多孔取芯,并具有相应的白垩纪至早第三纪天文调谐的时间标尺。目前,极端气候生物地球化学变化研究的时间分辨率要求比传统地层时间分辨率研究进展得快,PETM 和 OAEs 事件的定年、变化幅度及其速度都必须达到新第三纪沉积记录的研究精度。幸运的是,DSDP 和 ODP 航次的调查已经显示,天文调谐方法同样可以运用到早第三纪和中白垩世的层序中。最近 ODP 站位的选择、采样方法和技术的革新已经使古海洋学家进入新一轮极端气候的识别、特征和模拟研究阶段。现在认识到的许多极端气候现象都与现代社会发展有关,这些研究将大大促进人类认识地球气候、碳循环和海洋生态系统的基本原理。而且,古海洋学家通过对最低限度蚀变的新生代至白垩纪沉积物的研究,可以将极端气候变化研究精度提高到米兰柯维奇的时间尺度。

IODP 的一个优先研究领域就是极端气候<sup>[26]</sup>,其目标是达到定量描述全球气候变化。今天的地球正处于两极发育冰川、在地质上异常的极端状态。我们已经比较了解地球系统如何维持现今的气候状态,但在气候如何达到现今状态的观点上还存在争论。海洋通道格局的改变、山脉和高原的隆升、以及化学风化引起的 CO<sub>2</sub> 浓度降低都被用于回答这个问题。为了获得过去极端气候时期地球上截然不同的气候特征,IODP 将在保存重要信息的地点实施钻探(比如赤道和亚极地地区),来认识过去海洋和大气环流特征。北冰洋在早第三纪和白垩纪时期可能没有冰盖,因此是一个研究极端气候的关键钻探地区。白垩纪和早始新世沉积速率高,且覆盖层较薄的地区特别适宜钻探,像一些海隆和海台发育的地层一样,这些地区沉积物成岩作用一般不强,主要的同位素和地球化学特征也没有发生明显变化。

ODP 非立管钻探船“JOIDES 决心号”已经成功获得过去 140 Ma 以来全球气候长期变化的一般特征。为了开展全球极端气候变化历史的细致研

究,并完善精细的区域演化历史,必须引进其它类型钻探平台。如要理解区域性构造隆升、造山作用和气候变化之间的关系,需要钻穿并获取来自大陆物源沉积物的深厚剖面。这样的深孔只有用立管钻探船才能得到很好的控制,依靠井位控制技术可以达到 4 km 的深度。不同重量的立管和再循环泥浆的联合使用,将有利于探孔的稳定和清洁,远远超过“JOIDES 决心号”已达到的程度。在探索北冰洋环境历史的研究中,需要有特定任务钻探平台,以便适合在冰封的水体中钻探。IODP 将根据不同水深和安全因素,选择非立管钻探船、立管钻探船或特定任务钻探平台,采取特定的钻探策略,在古水深范围广、原始碳酸盐沉积保存好、目的层具有高沉积速率以及可能保存完好的古气候信息或很强的磁化率的地点,获取高分辨率极端气候变化记录。

## 5 结 论

白垩纪至早第三纪发生的 3 个极端气候事件最接近现今的地球系统,对其研究有利于理解现今地球系统过程在碳循环快速搅动时的响应,它们分别是:古新世—始新世最热事件(PETM,约 55 Ma)、早阿普第晚期大洋缺氧事件(OAE1a,约 120 Ma)、森诺曼—土仑界线大洋缺氧事件(OAE2,约 93.5 Ma)。PETM 事件是中白垩世以来增温最快的一次突然变暖事件,在 10 ka 以内深海变暖约 5 °C,表层海水增加 4~8 °C,<sup>13</sup>C 至少发生 3.0% 的负偏移,直至 210 ka 后才恢复原始状态,目前普遍认为 PETM 事件是海洋气水化合物(CH<sub>4</sub>)的巨量释放造成的。大洋缺氧事件(OAEs)代表海洋环境下形成的大量有机质沉积,OAE1a 事件记录了全球海洋和陆地范围的 <sup>13</sup>C 显著负偏移,之后紧接着是快速的 <sup>13</sup>C 正偏移,推测可能与海底火山作用相伴的地幔源 CO<sub>2</sub> 输入或与气水化合物的大量释放有关;但是,OAE2 事件却仅仅表现为 <sup>13</sup>C 正偏移,虽然一些地区在正偏移之后出现微弱的负偏移,表明 OAE2 事件可能是不同于 OAE1a 事件的全球碳循环响应。

IODP 将极端气候事件确定为优先研究领域,将根据不同水深和安全因素,选择非立管钻探船、立管钻探船或特定任务钻探平台,采取特定的钻探策略,在古水深范围广、原始碳酸盐沉积保存好、目的层具有高沉积速率以及可能保存完好的古气候信息或很强的磁化率的地点,获取高分辨率极端气候变化记录,研究精度要求达到米兰柯维奇的天文调谐时间标尺,其目标最终是定量描述全球气候变化。

## 参考文献(References) :

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D G, *et al.* Climate change 2001: The scientific basis [A]. In: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, 2001[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Kroon D, Norris R D, Wilson P. Exceptional global warmth and climatic transients recorded in oceanic sediments [J]. JOIDES Journal, 2002, 28 (1): 11-15.
- [3] Bralower T J, Kelly D C, Leckie R M. Biotic effects of abrupt Paleocene and Cretaceous climate events [J]. JOIDES Journal, 2002, 28 (1): 29-34.
- [4] Zachos J C, Lohmann K C, Walker J C G, *et al.* Abrupt climate change and transient climates during the Paleogene: A marine perspective [J]. Journal of Geology, 1993, 101: 191-213.
- [5] Bralower T J, Silva I P, Malone M J, *et al.* New evidence for abrupt climate change in the Cretaceous and Paleogene: An Ocean Drilling Program expedition to Shatsky rise, northwest Pacific [J]. GSA Today, 2002, 12 (11): 4-10.
- [6] Kroon D, Dickens G, Erbacher J, *et al.* Excerpts from the final report of the JOIDES Extreme Climates Program Planning Group [J]. JOIDES Journal, 2000, 26 (1): 17-28.
- [7] Dickens G, Erbacher J, Berbert T, *et al.* Report from Extreme Climates PPG, September 1998, Edinburgh. Miami: JOIDES Office, 1998. Available from: <http://joides.rsmas.miami.edu/panels/EC-PPG.html>. Accessed 2002-10-01.
- [8] Dickens G, Erbacher J, Berbert T, *et al.* Extreme Climates PPG (Second Report), March 1999, Burkheim. Miami: JOIDES Office, 1999. Available from: <http://joides.rsmas.miami.edu/panels/EC-PPG.html>. Accessed 2002-10-01.
- [9] Shipboard Scientific Party. Leg 208 Preliminary Report. ODP Prel Reports, 108. 2003. Available from: <http://www-odp.tamu.edu/publications/prelim/208-prel/208PREL.PDF>. Accessed 2003-05-30.
- [10] Shipboard Scientific Party. Leg 207 Preliminary Report. ODP Prel. Reports, 107. 2003. Available from: <http://www-odp.tamu.edu/publications/prelim/207-prel/207PREL.PDF>. Accessed 2003-05-02.
- [11] Lyle M, Wilson P A, Janecek T R, *et al.* Proceedings of ODP, Initial Reports, 199. 2002 [M/CD]. Available from: Ocean Drilling Program, Texas A & M University, College Station TX 77845-9547, USA.
- [12] Bralower T J, Premoli Silva I, Malone M J, *et al.* Proceedings of ODP, Initial Reports, 198. 2002 [M/CD]. Available from: Ocean Drilling Program, Texas A & M University, College Station TX 77845-9547, USA.
- [13] Norris R D, Kroon D, Klaus A, *et al.* Proceedings of ODP, Initial Reports, 171B. 1998 [M/CD]. Available from: Ocean Drilling Program, Texas A & M University, College Station, TX 77845-9547, U. S. A.
- [14] Kennett J P, Stott L D. Abrupt deep sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene [J]. Nature, 1991, 353: 319-322.
- [15] Thomas E, Shackleton N J. The Paleocene-Eocene benthic foraminiferal extinction and stable isotope anomalies [A]. In: Knox R O, *et al.* eds. Correlations of the Early Paleogene in Northwest Europe [C]. Geological Society of London, Special Publication, 1996, 101: 401-411.
- [16] Zachos J C, Pagani M, Sloan L, *et al.* Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. Science, 2001, 292: 686-693.
- [17] Bralower T J, Thomas D J, Zachos J C, *et al.* High-resolution records of the late Paleocene thermal maximum and circum-Caribbean volcanism: Is there a causal link? [J]. Geology, 1997, 25: 963-966.
- [18] Schmitz B, Asaro F, Molina E, *et al.* High-resolution iridium,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ , foraminifera and nannofossil profiles across the latest Paleocene benthic extinction event at Zumaya, Spain [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1997, 133: 49-68.
- [19] Thomas D J, Zachos J C, Bralower T J, *et al.* Warming the fuel for the fire: Evidence for the thermal dissociation of methane hydrate during the Paleocene-Eocene thermal maximum [J]. Geology, 2002, 30: 1067-1070.
- [20] Bains S, Corfield R M, Norris R D. Mechanisms of climate warming at the end of the Paleocene [J]. Science, 1999, 285: 724-727.
- [21] Röhl U, Bralower T J, Norris R N, *et al.* A new chronology for the late Paleocene thermal maximum and its environmental implications [J]. Geology, 2000, 28: 927-930.
- [22] Norris R D, Röhl U. Carbon cycling and chronology of climate warming during the Paleocene/Eocene transition [J]. Nature, 1999, 401: 775-778.
- [23] Dickens G R, Castillo M M, Walker J C G. A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effects of massive dissociation of methane hydrate [J]. Geology, 1997, 25: 259-262.
- [24] Thomas D J, Bralower T J, Zachos J C. New evidence for subtropical warming during the late Paleocene thermal maximum: Stable isotopes from Deep Sea Drilling Project Site 527, Walvis Ridge [J]. Paleoceanography, 1999, 14: 561-570.
- [25] de Graciansky P C, Deroo G, *et al.* A stagnation event of ocean-wide extent in the Upper Cretaceous [J]. Nature, 1984, 308: 346-349.
- [26] Detrick R, Batiza R, Hayes J, *et al.* eds. Earth, Oceans and Life: Integrated Ocean Drilling Program Initial Science Plan [R]. Washington DC: Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Planning Sub-Committee (IPSC), 2001. 1-110.
- [27] Leckie R M, Bralower T J, Cashman R. Oceanic anoxic events and plankton evolution: Biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous [J]. Paleoceanography, 2002, 17: 10. 1029/2001PA000623.
- [28] Bralower T J, Arthur M A, Leckie R M, *et al.* Timing and paleoceanography of oceanic dysoxia/anoxia in the late Barremian to early Aptian [J]. Palaios, 1994, 9: 335-369.



- [29] Erba E. Nannofossils and superplumes: The early Aptian "nannoconid crisis" [J]. *Paleoceanography*, 1994, 9: 483-501.
- [30] Menegatti A P, Weissert H, Brown R S, *et al.* High resolution  $^{13}\text{C}$ -stratigraphy through the early Aptian "Livello Selli" of the Alpine Tethys [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13: 530-545.
- [31] Gröcke D R, Hesselbo S P, Jenkyns H C. Carbon-isotope composition of lower Cretaceous fossil wood: Ocean-atmosphere chemistry and relation to sea-level change [J]. *Geology*, 1999, 27: 155-158.
- [32] Bralower T J, CoBabe E, Clement B, *et al.* The record of global change in mid-Cretaceous (Barremian-Albian) sections from the Sierra Madre, northeastern Mexico [J]. *Journal of Foraminiferal Research*, 1999, 29: 418-437.
- [33] Jenkyns H C, Wilson P A. Stratigraphy, paleoceanography, and evolution of Cretaceous Pacific guyots: Relics from a greenhouse Earth [J]. *American Journal of Science*, 1999, 290: 341-392.
- [34] Larson R L, Erba E. Onset of the mid-Cretaceous greenhouse in the Barremian-Aptian: Igneous events and the biological, sedimentary and geochemical responses [J]. *Paleoceanography*, 1999, 14: 663-678.
- [35] Jaren A H, Arens N C, Sarmiento G, *et al.* Terrestrial record of methane hydrate dissociation in the early Cretaceous [J]. *Geology*, 2001, 29: 159-162.
- [36] Ingram R L, Coccioni R, Montanari A, *et al.* Strontium isotopic composition of mid-Cretaceous seawater [J]. *Science*, 1994, 264: 546-550.
- [37] Dickens G R, Owen R M. Rare earth element deposition in pelagic sediment at the Cenomanian-Turonian boundary, Exmouth Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22: 203-206.
- [38] Sinninghe Damst  $\acute{e}$  S, Köster J. A euxinic southern North Atlantic ocean during the Cenomanian/Turonian oceanic anoxic event [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 158: 165-173.
- [39] Jenkyns H C, Gale A S, Corfield R M. Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the English Chalk and Italian Scaglia and its palaeoclimatic significance [J]. *Geological Magazine*, 1994, 131: 1-34.
- [40] Leckie R M. An oceanographic model for the early evolutionary history of planktonic foraminifera [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, 73: 107-138.
- [41] Sinton C W, Duncan R A. Potential links between ocean plateau volcanism and global ocean anoxia at the Cenomanian-Turonian boundary [J]. *Economic Geology*, 1997, 92: 836-842.
- [42] Hasegawa T. Cenomanian-Turonian carbon isotope events recorded in terrestrial organic matter from northern Japan [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 130: 251-273.
- [43] Erbacher J, Thurow J. Influence of oceanic anoxic events on the evolution of mid-Cretaceous radiolaria in the North Atlantic and western Tethys [J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 30: 139-158.
- [44] Kaiho K. Global climatic forcing of deep-sea benthic foraminiferal test size during the past 120 Ma [J]. *Geology*, 1998, 26: 491-494.
- [45] Kaiho K, Hasegawa T. End-Cenomanian benthic foraminiferal extinctions and oceanic dysoxic events in the northwestern Pacific Ocean [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 111: 29-43.
- [46] Weissert H, Lini A, Föllmi K B, *et al.* Correlation of Early Cretaceous carbon isotope stratigraphy and platform drowning events: A possible link? [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 137: 189-203.
- [47] Erbacher J, Thurow J, Littke R. Evolution patterns of radiolaria and organic matter variations: A new approach to identify sea level changes in mid-Cretaceous pelagic environments [J]. *Geology*, 1996, 24: 499-502.
- [48] Norris R D, Wilson P A. Low-latitude sea-surface temperatures for the mid-Cretaceous and the evolution of planktic foraminifera [J]. *Geology*, 1998, 26: 823-826.
- [49] Meng J, McKenna M C. Faunal turnovers of Paleogene mammals from the Mongolian Plateau [J]. *Nature*, 1998, 394: 364-369.
- [50] Kelly D C, Bralower T J, Zachos J C, *et al.* Rapid diversification of planktonic foraminifera in the tropical Pacific (ODP Site 865) during the late Paleocene thermal maximum [J]. *Geology*, 1996, 24: 423-426.
- [51] Pardo A, *et al.* Planktic foraminiferal turnover across the Paleocene-Eocene transition at DSDP 401, Bay of Biscay, North Atlantic [J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 29: 129-158.
- [52] Maas M, *et al.* Mammalian genetic diversity and turnover in the Late Paleocene and early Eocene of the Bighorn and Crazy mountains basins, Wyoming and Montana (USA) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1995, 115: 181-207.

## EXTREME CLIMATES EVENTS IN THE CRETACEOUS AND PALEOGENE

LIU Zhi-fei<sup>1</sup>, HU Xiu-mian<sup>2</sup>

(1. *Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

2. *Department of Marine Sciences, University of Ancona, Ancona 60131, Italy*)

**Abstract :** Predictions for modern global warming resulting from increased CO<sub>2</sub> levels have caused a heightened interest in the mechanics of ancient warm climates and especially of geologically abrupt warming events. Certain key intervals of the Cretaceous and Paleogene marked by rapid climate change are significant to current Earth science objectives because focused research has the potential to considerably improve our understanding of the general dynamics of the Earth during rapid perturbation of carbon cycle. These intervals mainly include: the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM, ~ 55 Ma) and Oceanic Anoxic Events (OAEs) in the late early Aptian (OAE1a, Selli Level, ~ 120 Ma) and at the Cenomanian-Turonian Boundary (OAE2, Bonarelli Level, ~ 93.5 Ma). Known as one of the most extreme and abrupt warming episodes since the mid-Cretaceous, the PETM is characterized by a rapid ~ 5 °C increase in deep ocean, about 4 to 8 °C increase in surface ocean, and a prominent negative carbon isotope excursion of at least 3.0 ‰ in less than 10 ka. One plausible explanation for the observed PETM <sup>13</sup>C excursion involves massive release of CH<sub>4</sub> from gas hydrates in the ocean. The OAEs represent major perturbations of the ocean system defined by massive deposition of organic matter in marine environments. Integrated Ocean Drilling Program (IODP) includes the extreme climates as one of major scientific objectives. World-wide oceans with the minimal diagenesis in Cretaceous and Cenozoic sediments will be drilled by special drilling strategies to yield critical information of our understanding of these climatic extremes under a Milankovitch astronomically-calibrated time scale. The end is fundamental to a quantitative description of global change.

**Key words :** Extreme climates; Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM); Oceanic Anoxic Events (OAEs); Cretaceous; Paleogene; Ocean Drilling Program (ODP); Integrated Ocean Drilling Program (IODP).