

文章编号 2001-8166(2003)05-0691-06

# 始新世—渐新世界线的全球气候事件： 从“温室”到“冰室”

拓守廷, 刘志飞

(同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要** 新生代以来,全球气候在持续不断的变冷,从两极无冰的“温室地球”变为现今两极终年有冰的“冰室地球”,经历了多次冰盖扩张的变冷事件。始新世—渐新世界线(E/O)附近, $^{18}\text{O}$  值大幅度正偏,在短期内由 1.2‰ 迅速增加到 3.0‰,底层海水温度从 12 降低为 4.5。保存在大洋和大陆中的记录表明 E/O 界线附近,全球气温大幅降低,海陆生物均有不同程度的灭绝,指示了气候变冷、变干的趋势。始新世—渐新世转换期间,南极洲与澳大利亚之间的塔斯曼尼亚海道和南极洲与南美洲之间的德雷克海峡( Drake Strait)相继打开,形成环南极洋流,从而阻止赤道地区的热量向南极传送,导致南极大陆“热隔绝”,使南极大陆东部为冰川所覆盖。最近的研究显示, E/O 事件是与大气  $\text{CO}_2$  含量快速变化密切相关的瞬时气候变化,其变化速率类似于现今地球由于人类活动引起大气  $\text{CO}_2$  的变化,表明大气  $\text{CO}_2$  浓度的变化在这一事件中起了极为重要的作用。

**关键词** 始新世, 渐新世, 气候事件, 温室, 冰室

中图分类号 P732 P71 文献标识码 A

地球在过去 65 Ma 中,从两极无冰的“温室地球”变为现今两极终年有冰的“冰室地球”,经历了多次冰盖扩张的变冷事件<sup>[1]</sup>。南极东部冰盖的首次出现发生在始新世—渐新世(E/O)界线附近,约 34 Ma BP,这一事件被认为是地质历史上全球气候转型的重要阶段<sup>[2]</sup>。早在 20 世纪 70 年代, Kennett 等<sup>[3]</sup>就已经发现在始新世—渐新世之交,底层水温骤降了 3~4, 南极大陆开始出现大规模冰盖,关于 E/O 事件的驱动机制,地质学家经过深入的研究,认为可能是构造运动形成环南极洋流使南极热隔绝,从而形成大规模的冰川覆盖,最近的研究显示,在这一事件中,大气  $\text{CO}_2$  浓度变化所起的作用要大于构造运动所产生的效应。

## 1 深海稳定氧同位素记录

利用有孔虫壳体氧同位素组成来计算古海水温

度的方法已为人们所公认, $^{18}\text{O}$  正偏表示温度下降,负偏则表示温度升高,目前在深海研究中氧同位素组成是最为可靠的数据之一。Zachos 等<sup>[4]</sup>汇总了深海钻探计划(DSDP)、大洋钻探计划(ODP)40 多个站位的底栖有孔虫稳定氧同位素数据,绘制了 65 Ma 以来全球深海稳定氧同位素的变化曲线(图 1a)。从图中可以清楚地看到,钙质微体化石氧同位素  $^{18}\text{O}$  在过去 65 Ma 以来呈阶梯式变重趋势,反映全球渐进式变冷的过程。底栖有孔虫氧同位素综合剖面显示:新生代以来  $^{18}\text{O}$  值变化范围约为 5.4‰,其中大致 3.1‰ 反应了深海变冷,1.2‰ 代表南极冰盖的首次出现,剩余的 1.1‰ 则指示了北极冰盖的发育<sup>[4]</sup>。

氧同位素曲线记录了  $^{18}\text{O}$  的一系列峰值变化,反应了全球气候的冷暖变化以及冰盖的涨缩。新生

收稿日期 2003-06-23, 修回日期 2003-07-25.

\* 基金项目:国家自然科学基金项目“青藏高原可可西里地区新生代古气候记录”(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:拓守廷(1979-),男,宁夏中卫人,硕士研究生,主要从事沉积与古环境研究。E-mail: zhuosht@hotmail.com

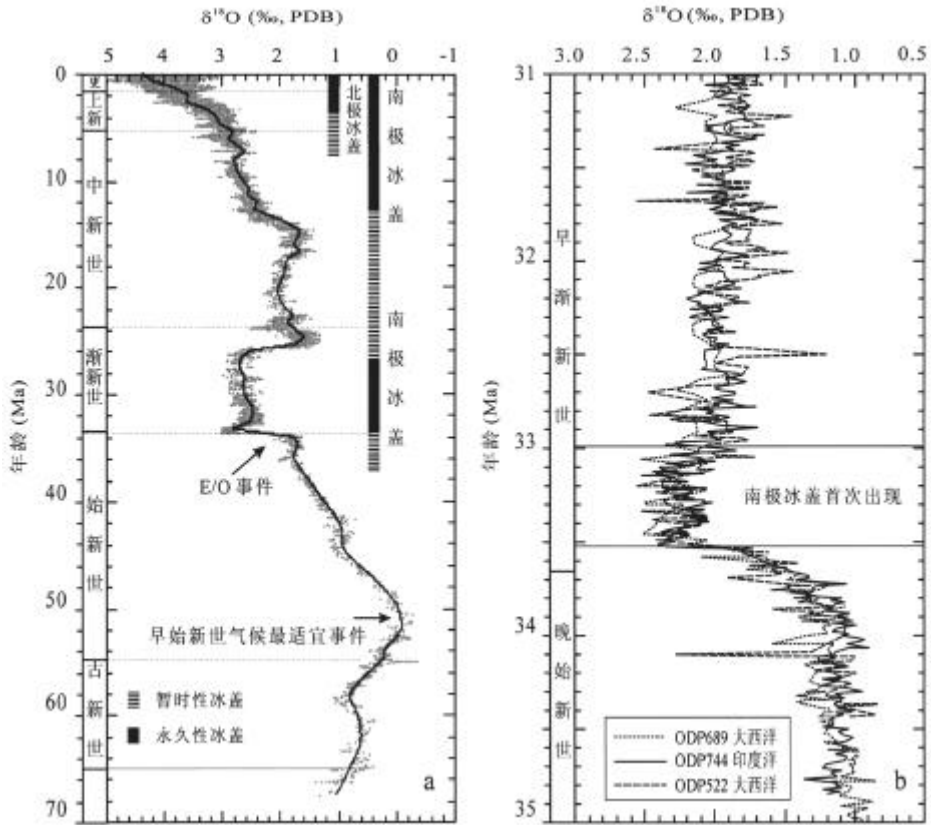


图1 65 Ma以来全球深海底栖有孔虫氧同位素曲线<sup>[4]</sup>

Fig.1 Deep-sea benthic oxygen isotope curve over the past 65 Ma<sup>[4]</sup>

a. 新生代底栖有孔虫氧同位素曲线; b. 晚始新世—早渐新世底栖有孔虫氧同位素曲线

a. Deep-sea benthic oxygen isotope curve for the Cenozoic;

b. Deep-sea benthic oxygen isotope curve for the late Eocene to the early Oligocene

代以来最重要的一次变暖事件发生在早新生代,从中中新世(59 Ma BP)到早始新世(52 Ma BP),在此期间 $^{18}\text{O}$ 值负偏1.2‰,至早始新世时达到最低值,这一事件被称之为早始新世气候最适宜事件(Early Eocene Climatic Optimum<sup>[4]</sup>,图1a)。从中始新世早期至早渐新世是一个长期渐进的变冷过程, $^{18}\text{O}$ 值正偏达3.0‰,特别是在E/O界线附近, $^{18}\text{O}$ 值大幅度正偏,在短期内由1.2‰迅速增加到3.0‰,底层海水温度从12降低为4.5(图1b)。早渐新世时 $^{18}\text{O}$ 值相对仍较高,表明南极大陆有永久冰盖存在,直到晚渐新世再次变暖时消融。到中中新世时,全球冰量依然较低,底层水温回暖,此后 $^{18}\text{O}$ 值

缓慢变重,全球气温再次趋于变冷,中中新世晚期,南极大陆为永久性冰川覆盖,至中中新世北极地区出现永久性冰盖。从氧同位素记录可以看出,在晚始新世以前,全球气候较为温暖湿润,地球处于“温室期”,渐新世后,全球气候变冷、变干,两极先后为冰川覆盖,地球进入“冰室期”,至今依然处于这种极端状态<sup>[4]</sup>。

## 2 始新世—渐新世全球构造和古海洋格局

古地理和古气候重建为我们再现了地质历史时期的海陆格局<sup>[5]</sup>。始新世时广阔的特提斯洋沿着

西印度洋—地中海—中美洲一线分布,在此期间,印度板块与亚洲板块碰撞,与此同时,太平洋洋中脊发生了重组。南美洲、澳大利亚和南极洲依然相连构成冈瓦纳大陆的残余体,北美洲与欧洲以白令陆桥相连(图 2a)。晚始新世以前,南北半球的大洋环流与现今相差很大,只有环赤道洋流使各大洋彼此连通,纬向环流极不发育,南极大陆与澳大利亚之间有浅海相连,表层海水可以交换,但不能形成底层洋流,南极大陆与南美大陆之间有陆桥相连,仅容表层海水通过。始新世—渐新世转换期间,特提斯洋减小,全球海平面下降,南极洲与澳大利亚之间的塔斯曼尼亚海道和南极洲与南美洲之间的德雷克海峡相继开启(图 2b),从而形成环南极洋流,由赤道流向南极的暖流遭遇环南极洋流的阻挡,热量无法传递到南极大陆,使南极大陆产生“热隔绝”,始新世—渐新世期间构造运动和海陆重组对新生代全球气候产生了深远的影响<sup>[6]</sup>。

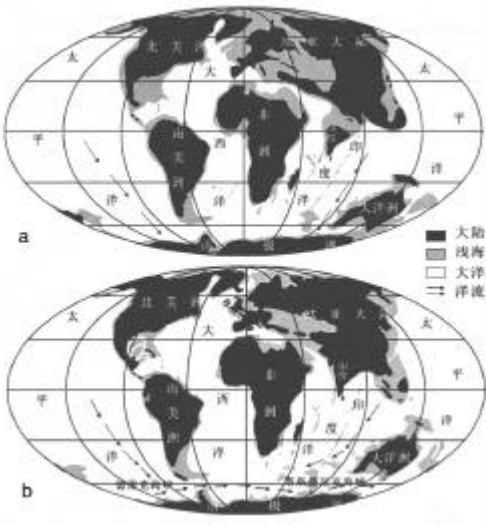


图 2 始新世、晚渐新世全球海陆分布格局<sup>[6, 7]</sup>

Fig 2 The paleogeographic setting for the early Eocene and late Oligocene<sup>[6, 7]</sup>

- a. 早始新世全球海陆分布; b. 晚渐新世全球海陆分布  
a. Paleogeographic setting for the early Eocene;  
b. Paleogeographic setting for the late Oligocene

### 3 E/O 事件的沉积记录

地球在长期历史演化过程中,全球气候在不断、有规律地发生变化,这些变化都有可能记录在海洋、湖泊、河流的沉积物中,其中海洋尤其是深海占地

球表面 65% 以上,沉积环境非常稳定,基本可以完整地保存过去发生的气候变化记录。这样,深海就为我们提供了一个研究过去全球变化的理想场所。

#### 3.1 E/O 事件在大洋中的记录

目前的研究发现,在 E/O 界线附近,发生了大规模的生物灭绝事件。其中,钙质超微生物、硅藻、底栖有孔虫都有大规模灭绝,软体动物种群减少了 10%,腹足类和双壳类动物的灭绝率则分别高达 97% 和 89%,海胆类的种群分异度下降了 50%。绝大多数浮游有孔虫在进入渐新世后个体变小、分异度下降,更适合低温环境生长<sup>[7-9]</sup>。

粘土矿物中的蒙脱石和高岭石的形成为大陆强烈化学风化的结果,其中蒙脱石形成于潮湿、排水差而后持续干旱的气候条件,高岭石形成于典型的高降水量、低温度土壤中,而伊利石形成于低温、风化作用弱的沙漠<sup>[10]</sup>。对南极海域钻探取得的粘土矿物进行分析,发现在上始新统地层中,粘土矿物以蒙脱石和伊利石为主,含少量绿泥石和高岭石,在下渐新统地层中蒙脱石含量急剧下降,伊利石有所增加,表明在始新世—渐新世之交,南极地区气候由较为温暖湿润转为寒冷干燥,南极大陆首次出现大范围冰盖<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 E/O 事件在大陆上的响应

尽管陆地上的沉积较深海而言很不稳定,而且易遭受风化剥蚀,但依然为我们提供了大量 E/O 事件的证据。目前这一事件在陆上研究最为深入的是北美大陆,大量的气候指标显示,在始新世—渐新世转换期间,陆地生态环境发生了巨大的改变,北美大陆的植被由亚热带雨林演化为阔叶落叶林,洪泛平原沉积转变为风成沉积<sup>[9]</sup>。Wolfe<sup>[12]</sup>利用植物叶子的完整率估算古温度后认为:北美大陆在在中始新世晚期气温下降了大约 10,在晚始新世有一个短暂的回暖,紧接着在渐新世初又再次强烈变冷,气温下降了约 13。古土壤研究显示,晚始新世北美大巴德兰兹(Big Badlands)地区有广袤的森林,年降水量约为 1 000 mm,至早渐新世该地区植被主要为木本的草原,年降水量约为 500~900 mm<sup>[13]</sup>。此外,对两栖类动物、爬行动物以及哺乳类动物的研究均表明,在晚始新世至早渐新世气候发生了明显的变化,由温暖湿润转变为寒冷干燥的气候<sup>[9, 14]</sup>。

研究者们发现,欧洲大陆在中始新世分布着大量的热带雨林,至晚始新世末期则主要为亚热带常绿植物,早渐新世时过渡为落叶林和常绿林混合。同样,哺乳动物的研究结果也指示了始新世—渐新

世气候逐渐变冷、变干的趋势<sup>[15, 16]</sup>。在亚洲大陆、大洋州等其它地区, E/O 界线附近的地质记录与欧美类似, 动植物种类均有明显变化, 同样显示了气候变冷、变干的趋势<sup>[17]</sup>。

#### 4 E/O 事件的驱动机制

为什么全球气候会在短暂的时间内经历如此巨大的变迁, 其内在的驱动机制又是什么? 自 20 世纪 70 年代以来, 地质学家们相继提出了一些假说来解释这一事件, 但这些观点各有长短, 尚不能为人们所广泛接受。

在晚始新世早期的沉积记录中, 至少有两次地外行星对地球的强烈撞击产生了两个较大的冲击抛出物散布区, 分别位于北美的切萨皮克 (Chesapeake)、西伯利亚的波尔盖 (Popigay), 两个陨击坑直径达 85 km 和 100 km<sup>[18, 19]</sup>。因而认为是陨星撞击造成了生物的大量灭绝, 并导致全球气候加速变冷<sup>[20]</sup>。其他学者的研究显示, 陨击事件发生在晚始新世早期, 而大量生物灭绝发生在 E/O 界线附近, 因此建议突发的陨击事件不是造成全球气候发生如此大的变化的根本原因, 但可能在一定程度上使全球气候加速变冷<sup>[21, 22]</sup>。

Shackleton 和 Kennett 最早提出, 在始新世末期, 随着澳大利亚与南极大陆之间的塔斯曼尼亚海道的开启, 环南极洋流的雏形形成, 从而阻止赤道地区的热量向南极传送, 导致南极大陆“热隔绝”, 使得南极大陆东部为冰川所覆盖<sup>[1]</sup>。此后, 从深海钻探中获得的大量大洋环流的证据使得这一理论更具说服力, 氧同位素证据表明, 在早始新世时, 环南极洋流尚不存在, 大洋热传递畅通, 使得南极和赤道间温差比渐新世时小很多。当塔斯曼尼亚海道打开后, 环南极洋流开始形成, 围绕南极大陆顺时针旋转, 阻止南极底层水与赤道地区水体进行交换, 南极大陆在短时期内急剧变冷, 形成大规模冰盖<sup>[21]</sup>。有学者认为, 这一观点并不能很好解释 E/O 界线附近的变冷事件, 事实上在中始新世末期就已经开始降温, 而当时并没有大的构造运动和海道的重组<sup>[9]</sup>。

另一种颇为引人注目的观点认为, 由于大气 CO<sub>2</sub> 浓度的降低使得全球气候变冷, 在极地形成小规模冰帽, 而冰雪反射率较低, 将太阳热能反射, 从而加剧气温的下降, 最终形成大规模的冰盖<sup>[23]</sup>。现在人们普遍认为, 全球气候变化是一个复杂的过程, 其中可能有多种因素的共同作用, Zachos 等<sup>[24]</sup>认为是由于环南极洋流的形成导致南极冰盖的出

现, 而 CO<sub>2</sub> 浓度的降低则加剧了这种变化, 使南极冰盖迅速扩大, 形成大范围的南极东部冰盖。Deconto 等<sup>[2]</sup>综合了古地理、温室气体、地球轨道参数以及大洋热传导模式等因素, 利用计算机技术模拟了 E/O 界线附近南极地区的变化, 发现 E/O 事件是与大气 CO<sub>2</sub> 含量快速变化密切相关的瞬时气候变化, 其变化速率类似于现今地球由于人类活动引起大气 CO<sub>2</sub> 的变化, 并认为 CO<sub>2</sub> 浓度的变化在这一事件中起了主要作用。

#### 5 E/O 事件未来研究展望

为了更好地理解 E/O 事件的驱动机制, Ivany 等<sup>[25]</sup>认为未来需要从以下几个方面开展进一步的研究:

- (1) 对比海洋和陆地的记录, 寻求气候变化是如何影响海岸带、内陆生态系统的, 这两者的变化是否同步?
- (2) 研究不同地区气候变化的时间尺度及其相互关系, 确定不同地理条件的变化程度。
- (3) 探寻纬向变化的多样性及其对气候变化的响应。
- (4) 关注先前研究的空白区, 获得更多的环境演化的证据。
- (5) 解决全球冰量与氧同位素温度间的难题。
- (6) 利用生物地理学来进一步研究大洋环流与热梯度变化。

#### 6 结 论

地球在过去的 65 Ma 中, 从两极无冰的“温室地球”变为现今两极终年有冰的“冰室地球”, 经历了多次冰盖扩张的变冷事件。底栖有孔虫氧同位素<sup>18</sup>O 在过去 65 Ma 以来呈阶梯式变暖趋势, 反映全球渐进式变冷的过程, E/O 界线附近, <sup>18</sup>O 值大幅度正偏, 在短期内由 1.2‰ 迅速增加到 3.0‰, 底层海水温度从 12 降低为 4.5, 始新世最早期南极大陆首次出现大范围冰盖。E/O 界线附近, 全球气温大幅降低, 海陆生物均有不同程度的灭绝, 目前已经在海洋和大陆中发现了很多生物演化的记录, 均指示了气候变冷、变干的趋势。始新世—渐新世转换期间, 南极洲与澳大利亚之间的塔斯曼尼亚海道和南极洲与南美洲之间的德雷克海峡相继打开, 形成环南极洋流, 造成南极大陆“热隔绝”, 这可能是形成南极冰盖的主要原因。最近的研究显示, E/O 事件是与大气 CO<sub>2</sub> 含量快速变化密切有关的瞬时

气候变化,其变化速率类似于现今地球由于人类活动引起大气CO<sub>2</sub>的变化,大气CO<sub>2</sub>浓度的变化在这一事件中起了更为重要的作用,深入研究E/O全球气候事件发生规律是开展未来全球气候变化预测最有效的途径之一。

#### 参考文献(References):

- [1] Barrett P. Cooling a continent[J]. *Nature*, 2003, 421: 221-223.
- [2] Deconto R M, Pollard D. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Nature*, 2003, 421: 245-249.
- [3] Kennett J P, Shackleton N J. Oxygen isotopic evidence for the development of the psychrosphere 38 Ma ago[J]. *Science*, 1976, 260: 513-515.
- [4] 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.
- [5] Scotese C R. Paleomap project[EB/OL]. <http://www.scotese.com/climate.htm>, 2003-05-30.
- [6] Exon N. Drilling reveals climatic consequences of Tasmanian gateway opening[J]. *EOS*, 2002, 83(23): 253-259.
- [7] Diester-Haass L, Zahn R. paleoproductivity increase at the Eocene-Oligocene climatic transition: ODP/DSDP sites 763 and 592[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 172: 153-170.
- [8] Marino M, Flores J A. Middle Eocene to early Oligocene calcareous nannofossil stratigraphy at Leg 177 Site 1090[J]. *Marine Micropaleontology*, 2002, 45: 383-398.
- [9] Prothero D R. Does climatic change drive mammalian evolution? [J]. *GSA Today*, 1999, 9(9): 1-7.
- [10] Diester-Haass L, Robert C, Chamley H. The Eocene-Oligocene preglacial-glacial transition in the Atlantic Sector of the Southern ocean (ODP Site 690)[J]. *Marine Geology*, 1996, 131: 123-149.
- [11] Ehrmann W. Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 139: 213-223.
- [12] Wolfe J A. Climatic, floristic, and vegetational changes near the Eocene/Oligocene boundary in North America[A]. In: Prothero D R, Berggren W A, eds. *Eocene-Oligocene Climatic and Biotic Evolution*[C]. Princeton: Princeton University Press, 1992. 421-436.
- [13] Retallack G J. Paleosols and changes in climate and vegetation across the Eocene/Oligocene boundary[A]. In: Prothero D R, Berggren W A, eds. *Eocene-Oligocene Climatic and Biotic Evolution*[C]. Princeton: Princeton University Press, 1992. 382-398.
- [14] Ivany L C, Patterson W P, Lohmann K C. Cooler winters as a possible cause of mass extinctions at the Eocene/Oligocene boundary[J]. *Nature*, 2000, 407: 887-890.
- [15] Cavagnetto C, Anddon P. Preliminary palynological data on floristic and climatic changes during the Middle Eocene-Early Oligocene of the eastern Ebro Basin, northeast Spain[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1996, 92: 281-305.
- [16] Biondel C. The Eocene-Oligocene ungulates from western Europe and their environment[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 168: 125-139.
- [17] Buenhy N, Carlson S J, Spero H J, et al. Evidence for the Early Oligocene formation of a proto-Subtropical Convergence from oxygen isotope records of New Zealand Paleogene brachiopods[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 138: 43-68.
- [18] Kerr R A. Chesapeake Bay impact crater confirmed[J]. *Science*, 1995, 269: 1672.
- [19] Bottomley R, Grieve R, York D, et al. The age of Popigai impact event and its relation to events at the Eocene/Oligocene boundary[J]. *Nature*, 1997, 388: 365-368.
- [20] Hut P, Alvarez W, Elder W P, et al. Comet showers as a cause of mass extinctions[J]. *Nature*, 1987, 329: 118-126.
- [21] Vonhof H B, Smit J, Brinkhuis H, et al. Global cooling accelerated by early late Eocene impacts[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 687-690.
- [22] Prothero D R. The late Eocene-Oligocene extinctions[J]. *Annual Review of Earth Planetary Science*, 1994, 22: 145-165.
- [23] Pearson P N, Palmer M R. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years[J]. *Nature*, 2000, 406: 695-699.
- [24] Zachos J C, Quinn T M, Salamy K A. High-resolution (104 yr) deep-sea foraminiferal stable isotope records of the Eocene-Oligocene climatic transition[J]. *Paleoceanography*, 1996, 11(3): 251-266.
- [25] Ivany L C, Nesbitt E A, Prothero D R. The marine Eocene-Oligocene Transition: A synthesis[A]. In: Prothero D R, Ivany L C, Nesbitt E A, eds. *From Greenhouse to Icehouse: The Marine Eocene-Oligocene Transition*[C]. New York: Columbia University Press, 2003. 522-534.

## GLOBAL CLIMATE EVENT AT THE EOCENE-OLIGOCENE TRANSITION : FROM GREENHOUSE TO ICEHOUSE

TUO Shou-ting , LIU Zhifei

(Laboratory of marine Geology , Tongji University , Shanghai 200092 , China)

Abstract : During Cenozoic , Earth's climate has undergone a progressive cooling , from bipolar ice-free ( greenhouse ) to bipolar icesheets ( icehouse ) , experienced several icesheet growth and decay events . At the Eocene-Oligocene boundary ( E/O ) ,  $^{18}\text{O}$  increased rapidly from 1.2‰ to 3.0‰ in a short time , deep-sea temperature decreased from 12 °C to 4.5 °C . The marine and terrestrial records show that near the E/O , global temperature has a significant decreasing , the biotic extinctions happened both in ocean and land , indicating the cooling and drying trend on global climate . During the Eocene-Oligocene transition , the Tasmania Seaway ( between the Antarctic and the Australia ) and the Drake Passage ( between the Antarctic and South America ) opening and widening , it may caused the formation of the Antarctic Circumpolar Current and the subsequent thermal isolation of the Antarctic continent , which formed the East Antarctic Ice Sheet . The latest research finds that the E/O event is an instantaneous climate change , which has a close relationship with the atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration variation . Its change rate similar with the atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration diversification reduced by human kinds activity at present , implying that the atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration variation play a more important role than the opening of the passages in the E/O event .

Key words : Eocene ; Oligocene ; Climate event ; Greenhouse ; Icehouse .