

# 全球古新世 - 始新世极热气候事件(PETM)及其驱动机制

杨 雪, 李冰阳, 陈筱筱, 傅义阳, 黄俊影

长江大学地球科学学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年1月6日; 录用日期: 2026年1月30日; 发布日期: 2026年2月10日

## 摘 要

古新世 - 始新世极热事件(PETM, 约56 Ma)是新生代最典型的极端气候突变事件, 涉及到全球平均气温骤升4°C~5°C、大气碳同位素负漂( $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 达-2‰~-3‰)和海洋 - 陆地生态系统重构等变化。该事件导致全球气候表现出显著的“高纬增温放大”效应, 并引发海洋酸化、陆相风化作用增强以及生物群落的重大重组。这些剧烈的环境变化也共同塑造了特定沉积矿产和油气烃源岩的形成条件。然而, 现有研究仍面临沉积地层区域性局限、古气候代用指标多解性、年代学方法误差以及地球系统模拟复杂等方法论挑战。目前, 关于该事件驱动机制的假说还存在许多争议: (1) 主流的海底甲烷水合物分解假说虽碳同位素证据吻合, 但其古甲烷储库规模难以定量约束; (2) 地外天体撞击假说因发现铱异常和微玻璃陨石而被提出, 却因缺乏全球撞击坑证据而备受质疑; (3) 其他如构造抬升致有机碳氧化、天文轨道驱动等假说, 则从不同时间尺度提供了碳循环扰动的可能路径。深入解析PETM事件中碳循环 - 气候 - 生物系统的耦合机制, 不仅能为理解地质历史时期极端气候演变提供关键实证, 也能为评估现代温室气体排放的潜在环境效应提供至关重要的地质类比参考。

## 关键词

古新世 - 始新世极热事件, 环境效应, 能源

# Global Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) and Its Driving Mechanisms

Xue Yang, Bingyang Li, Xiaoxiao Chen, Yiyang Fu, Junying Huang

School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan Hubei

Received: January 6, 2026, 2025; accepted: January 30, 2026; published: February 10, 2026

## Abstract

The Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM, approximately 56 Ma) represents the most typical

文章引用: 杨雪, 李冰阳, 陈筱筱, 傅义阳, 黄俊影. 全球古新世-始新世极热气候事件(PETM)及其驱动机制[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(2): 149-158. DOI: 10.12677/ag.2026.162015

abrupt climate change event of the Cenozoic era, characterized by a global mean temperature increase of 4°C~5°C, a negative excursion in atmospheric carbon isotope values ( $\Delta\delta^{13}\text{C}$  reaching -2‰ to -3‰), and the restructuring of marine-terrestrial ecosystems. This event resulted in a significant “high-latitude amplification of warming” globally, triggering ocean acidification, enhanced continental weathering, and major reorganization of biological communities. These pronounced environmental changes collectively shaped the conditions for the formation of specific sedimentary mineral deposits and hydrocarbon source rocks. However, existing research still faces methodological challenges, including regional limitations of sedimentary strata, multi-proxy interpretation ambiguities in paleoclimate indicators, chronological dating uncertainties, and complexities in Earth system modeling. Current hypotheses regarding the triggering mechanisms of this event remain highly debated: (1) The mainstream hypothesis of submarine methane hydrate dissociation, while consistent with carbon isotope evidence, faces difficulties in quantitatively constraining the size of the paleo-methane reservoir; (2) The extra-terrestrial impact hypothesis, proposed based on observed iridium anomalies and microtektites, is heavily questioned due to the lack of global evidence for an impact crater; (3) Other hypotheses, such as tectonic uplift leading to organic carbon oxidation and astronomical orbital forcing, offer potential pathways for carbon cycle perturbations over different timescales. A deeper analysis of the coupling mechanisms between the carbon cycle, climate, and biosphere during the PETM event can not only provide critical empirical evidence for understanding extreme climate evolution in geological history but also serve as a crucial geological analog for assessing the potential environmental effects of modern greenhouse gas emissions.

## Keywords

## Paleocene-Eocene Thermal Maximum, Environmental Effects, Energy Resources

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

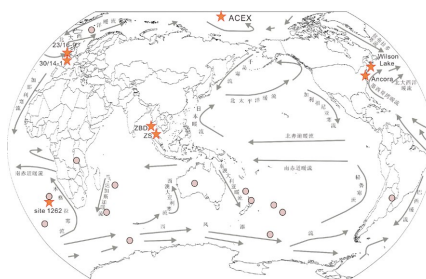
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### Open Access

## 1. PETM 定义

当前, 全球气候变暖已是毋庸置疑的科学事实。在漫长的地质演化历史进程中, 类似的升温事件曾多次发生, 如古生代的吉维特大暖期(GTM)、二叠-三叠纪极热期(P-T 极热期)等。其中, 发生于新生代的古新世-始新世极热事件(Paleocene-Eocene Thermal Maximum, PETM, 56 Ma)是距今最近的极端气候热事件(图 1)。该事件被定义为新生代早期长期升温背景下, 全球平均气温在短时间内骤升约 5℃、并伴随巨量轻碳快速注入海-气系统的异常增温过程[1]。事件发生期间, 全球生态系统遭受显著扰动, 具体表现为海水缺氧程度加剧、水循环速率加快以及海洋底栖生物群落发生大规模灭绝等[2]。



**Figure 1.** Global distribution of PETM study sites (modified from Tierney *et al.*, 2020). red five-pointed stars represent PETM sites. The pink circle denotes the NAIP sampling location. The grey line denotes the distribution of ocean currents [3]

图1. 全球 PETM 研究位点分布图(据 Tierney 等 2020 年研究修订), 红色五角星代表古新世-始新世极热事件点位, 粉色圆代表 NAIP 点位, 灰色线代表洋流分布[3]

## 2. PETM 的全球性影响

### 2.1. PETM 对环境的影响

#### 2.1.1. 气候系统剧变

PETM 极热事件期间, 巨量的  $\text{CO}_2$  气体释放增强温室效应, 导致全球地表平均温度在数千年内骤升约  $5^\circ\text{C}$ , 并呈现出显著的“高纬增温放大”效应, 即高纬度增温幅度远大于低纬度。在此过程中, 甲烷( $\text{CH}_4$ )的潜在大量释放可能作为一种强烈的正反馈机制, 进一步加剧了全球升温, 呈现出中高纬度地区降水增加、低纬地区因蒸发增强趋于干旱的现象, 形成“低纬干旱-高纬湿润”的降水空间分异[4]。例如, 北美 Bighorn 盆地在 PETM 事件开始前处于极端干旱环境, 该状态一直持续至恢复期才转变为相对潮湿型气候[1] [5]。这一区域气候响应与全球碳同位素负漂(CIE)在时间上相耦合, 揭示了温室气体浓度急剧升高与水文循环重组之间的非线性关联特征。

#### 2.1.2. 古海洋环境变化

PETM 发生阶段, 受巨量轻碳同位素释放等关键因素驱动, 全球古海洋环境发生多维度连锁变化, 主要体现为海洋含氧量下降、海洋严重酸化和海平面出现争议性波动。这些环境变化进一步导致海洋生物栖息地受影响、海相沉积格局发生显著调整, 整体重塑了当时的海洋生态与沉积系统[5]。其中, 碳酸盐缓坡生态系统崩溃, 碳酸盐岩沉积被陆源碎屑丰富的砾岩或钙质泥灰岩打断; 浅海台地环境中碳酸盐岩被砾岩或砂质、钙质泥灰岩替代; 深海环境中钙质泥灰岩则被黏土岩取代。该阶段内, 深海普遍出现缺氧或低氧, 浅海大陆架及斜坡环境存在季节性缺氧[5]。浮游有孔虫硼同位素组成( $\delta^{11}\text{B}$ )和 B/Ca 比值降低, 同时海平面发生变化。关于海平面变化, 研究界目前存在两种相异的认识: 一种认为在事件开始前 20~200 kyr 发生海退[5]; 另一种则认为事件前曾发生短暂海退随后海侵[4]。

#### 2.1.3. 陆相沉积环境变化

同时, 该事件期间全球陆地水循环显著增强, 河流系统发生显著响应。从区域地质观测来看, 多个盆地的沉积特征均清晰印证了上述水循环增强与河流系统调整的过程, 具体表现为: 西班牙 Tremp-Graus 盆地的河流量增加至少 1.35 倍, 最高可达 14 倍, 引发大规模洪水事件, 导致河漫滩泥质沉积被冲积砾岩取代, 河流频繁迁移并显著拓宽[5]; 美国北 Bighorn 盆地形成厚层古土壤层与薄层泛滥平原沉积, 或发育厚层河道砂岩, 与上下地层中常见的薄层古土壤和厚层泛滥平原沉积形成鲜明的对比, 表现出明显的沉积响应[1]。

### 2.2. PETM 对生物的影响

#### 2.2.1. 海洋生物迁移与更替

PETM 时期的快速升温打破了生物生存环境的原有平衡, 导致许多生物因难以适应新气候条件而面临灭绝。与此同时, 温度梯度减小和水循环加快等因素共同驱动高低纬度地区生物迁徙与分布格局显著改变。例如, 珊瑚从低纬度向中纬度迁移, 并最终在低中纬度区域消失[5]; 底栖有孔虫经历了新生代以来最严重的灭绝事件, 其多样性减少 30%~50%, 成为 PETM 的标志性生物地层事件[5] [6]; 浮游有孔虫演化加速, 出现个体增大、多样性增加等特征[4]-[6]; 钙质超微化石生物有 18 属发生更替或灭绝[7]。

#### 2.2.2. 陆地生物绝灭与爆发

在此事件发生期间, 陆地植物与哺乳动物未出现大规模灭绝现象, 而是借助进化、扩散及局部灭绝等途径, 实现了对快速变化环境的适应(表 1)。与海洋生物所表现出的快速响应不同的是, 陆地生物的这一适应过程, 与大气  $\text{CO}_2$  浓度升高引发的植物生理效应(如  $\text{C}_3$  植物光合效率提升 16%)及水文循环变化

(如极端降水事件频率增加 20%)存在紧密关联。此外,在未出现大规模灭绝且成功适应环境的背景下,陆地生物群落进一步发生结构性变化。动物群落表现出明显新旧更替现象,鳄龙属和近猴科等类群逐渐灭绝,而奇蹄类、偶蹄类、啮齿类及灵长类等新类群则呈现爆发式出现[5][8]。植被群落则发生显著的迁移和多样性变化,全球增温推动低纬适温植物向高纬扩张[8]。

**Table 1.** Characteristics of major hyperthermals and their environmental and ecological effects [6]  
**表 1.** 主要热事件的特征及其引起的环境和生态效应[6]

事件	PETM	LMWE	Dan-C2	L.C29n	LDE	D/STE	ETM-2	H2
年代(Ma)	约 56	约 66.34	约 65.86	约 65.35	约 62.1	约 61.4	约 54	约 53.9
持续时间(ka)	约 140~220	约 100~200	约 100	约 38	约 100~191	约 160	约 100	约 100
CIE	约 4‰	约 0.5‰	约 1.0~1.5‰	约 0.4~0.5‰	约 0.6~1.0‰	约 1‰	约 1.4‰	约 0.8‰
增温	约 5℃~8℃	约 2.5℃~5℃	约 4℃	—	约 2℃~3℃	约 2℃	约 3℃~4℃	约 2℃
海水酸化	是	是	是	是	是	是	是	是
陆地生物效应	奇偶蹄及灵长类动物出现,陆生脊椎动物大范围迁徙	第五次生物大灭绝	—	—	两大陆生哺乳动物迁移	—	—	—
海洋生物效应	30%~50%底栖有孔虫灭绝	第五次生物大灭绝	钙质超微化石和浮游有孔虫增加	钙质超微化石和浮游有孔虫增加	—	—	底栖有孔虫多样性降低	底栖有孔虫多样性降低
火山活动	北大西洋火山	德干火山	德干火山	—	北大西洋火山	北大西洋火山	北大西洋火山	北大西洋火山

Notes: LMWE——马斯特里赫特期末期热事件; Dan-C2 和 L.C29n——丹麦期早期热事件; LDE 和 D/STE——丹麦期末期热事件; ETM-2 和 H2——始新世早期热事件。

2.3. PETM 对能源 - 资源的影响

烃源岩的形成本质是有机质在高效生产 - 保存 - 转化体系下的耦合结果。优质烃源岩的成烃机制,来自于高生产力供给,强还原 - 快速埋藏共同保障的有效保存和干酪根的热催化降解。PETM 事件期间,全球海洋广泛发育中层水体缺氧,促进了富有机质的烃源岩形成;同时,短期升温还可能加剧浅层烃源岩热演化,促进油气生成。强烈的增温导致海洋分层加剧,透光层初级生产力提升,下沉有机质在分解过程中大量耗氧,加剧中层水体缺氧,为有机质保存提供了稳定环境[9]。以北大西洋 Kilda 盆地为例,PETM 黑色页岩总有机碳含量(TOC)可达 3%~5%,为古近系油气藏提供了重要来源[10]。而在陆相沉积系统中,PETM 时期极端降雨和大陆风化增强,导致高沉积速率和频繁的重力流事件,改变了湖泊水介质条件(如从高盐还原转为低盐氧化),并影响了有机质的保存与稀释。例如,江汉盆地 PETM 期间湖泊水体富营养化、蓝藻勃发,虽然 TOC 受稀释作用影响,但仍具备较高的页岩油勘探潜力[11]。

PETM 事件还伴随着海底升温,这可能引发甲烷水合物失稳分解。该过程不仅减少了可燃冰的原始储量,还因破坏沉积物孔隙结构从而降低了其再生成潜力,使释放的甲烷进一步加剧温室效应。此外,高温干旱气候显著抑制了煤炭形成,低纬度地区降水减少导致湿地萎缩,全球煤炭沉积量在 PETM 层位中出现明显中断。例如,北美 Wyoming 州古新统煤层被陆相红层取代,泥炭堆积停滞,导致煤炭沉积量在 PETM 层位中出现明显中断[8]。

矿产的形成主要受沉积和风化作用控制。在 PETM 事件期间,全球气温上升 5℃~8℃,显著增强的



陆地风化速率与强降水频率,促进了硅酸盐岩的化学风化[6]。干旱气候加剧了封闭盆地的蒸发作用,形成大规模蒸发岩堆积[12]。如西班牙比利牛斯山脉发育厚达 100~200 米的蒸发岩层,成为欧洲重要的盐类矿产来源。高温和强降水还加速了铝、铁等金属元素的析出和迁移,在近海或湖泊环境中富集形成铝土矿和赤铁矿矿床。同时, PETM 时期沉积物中黏土矿物组成变化显著,高岭石含量普遍升高,反映了增强的陆源输入与风化作用,也为陶瓷、填料等工业矿物资源提供了物质基础[11]。

PETM 事件期间发生的海洋酸化、缺氧和营养盐循环等变化,影响了海洋沉积矿产的分布。中层水体缺氧促进磷元素从有机物中释放,通过上升流作用输送至表层,导致含磷沉积物的形成。例如摩洛哥 Ouled Abdoun 盆地 PETM 磷块岩层的磷含量高达 20%~30%,是该类资源的重要产区。海洋酸化通过抑制了钙质生物的钙化作用,促进了硅质生物(如硅藻)的繁盛,造成硅质岩在局部海区富集,如北大西洋部分 PETM 地层中硅质生物沉积物占比超过 40% [4]。在陆相湖盆中, PETM 时期碳酸盐矿物(如方解石、白云石)与有机碳的耦合沉积,反映了湖泊碳汇对气候变化的响应,也为碳酸盐岩储层和工业原料的形成提供了条件[11]。

PETM 事件对全球能源与矿产资源的形成、分布和保存产生了深远影响。一方面,该事件通过引发全球海洋缺氧、生产力激增和沉积有机质高效保存,促进了优质海相烃源岩的发育,并为后续油气成藏提供了重要物质基础;另一方面,高温干旱气候显著抑制了煤炭的聚集,导致低纬度地区泥炭堆积中断,同时强烈的化学风化与蒸发作用促进了蒸发岩、铝土矿和磷块岩的形成[1] [4]-[6] [8]。在陆相系统中, PETM 时期的高沉积速率、水介质变化和早期成岩作用影响了有机质的富集模式与页岩油潜力,如渤海湾盆地孔店组在 PETM 前后显示更高的生烃潜力与 OSI 值[9] [11] [13]。此外,海底升温引发甲烷水合物分解,导致可燃冰储量减少,同时这一过程可能也加速已埋藏有机质的热演化[6]。PETM 期间独特的生物-环境-气候耦合机制,共同塑造了这一时期能源与矿产资源分布的整体格局。

### 3. PETM 事件的驱动机制

#### 3.1. 海底甲烷水合物分解释放

全球平均温度在约 6000 年内上升约 5℃,推测碳排放速率约为 6 亿吨碳/年,伴随该事件发生显著的碳同位素负漂,表明有大量轻碳注入到海气系统[14],但其具体来源有海底甲烷水合物分解、地外天体碰撞、泥炭燃烧、高纬地区冻土层有机质的热分解、火山去气、富有机质沉积地层的接触热变质等争议[1] [6]。温室气体快速释放是导致增温的主要原因,并提出海底天然气水合物分解可能是轻碳的重要来源。Dickens 等在 1995 年提出古新世末海洋甲烷水合物分解可解释 PETM 期间的碳同位素负漂,并指出底层水温上升可能导致水合物失稳,释放大量的  $\delta^{13}\text{C}$  极低(约-60‰)的甲烷,经氧化后引起全球碳库  $\delta^{13}\text{C}$  降低约-2‰至-3‰ [15]。然而,当前对甲烷水合物储库规模的估计仍存在较大不确定性,影响了对释放总量及碳同位素效应评估的准确性。另一方面,Maxim 等通过对西伯利亚 Bakchar 矿床 PETM 时期鲕状铁矿样品开展多指标分析,发现浅海沉积物中存在与甲烷释放相关的铁硫矿物,为 PETM 期间甲烷释放提供了直接证据[16]。

#### 3.2. 地外天体碰撞

巨量轻碳的排放导致全球气温在数千年内上升 4℃~5℃,并伴随显著 CIE,对海洋和陆地生态系统造成深远影响。此前研究多认为甲烷水合物分解被视为 CIE 的主要机制,但该机制面临的问题包括触发机制不明、古新世水合物储量可能有限,以及其氧化产物难以完全解释长期的极端增温和碳酸盐补偿深度(CCD)大幅抬升等现象[6]。在此背景下,地外撞击成因假说被提出。

Kent 等在 2003 年基于大西洋沿岸多个钻孔岩芯的分析,在古新世-始新世(P/E)界线附近发现铱异常和磁性颗粒富集等现象;同时,北大西洋深海钻探计划 549 钻孔中检测到  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值异常,据此推测可能发生了一次彗星撞击[6] [8] (直径约 9~10 km)。该撞击通过瞬时巨大的能量释放,直接触发浅海

或陆缘沉积物中的甲烷水合物分解和有机质热解,或通过震动破坏全球大陆坡稳定性,引发碳库的快速释放,从而触发 PETM 事件[6]。Schaller 等在 2003 年亦在大西洋边缘 P/E 界线地层中发现硅酸盐玻璃球粒,进一步支持地外撞击的存在[6]。

然而,地外撞击假说仍缺乏与 PETM 吻合的撞击坑实体、“铱异常”等关键地球化学指标,且撞击事件本身难以直接解释 PETM 所释放碳的规模、释放动力学及长期增温特征[6][17]。尽管撞击机制常被设定为辅助触发器,通过击穿碳库(如引发水合物分解或沉积有机碳热裂解)来放大温室气体释放,但其有效性仍高度存疑。

### 3.3. 构造抬升

新生代早期曾存在面积达  $10^5 \sim 10^6 \text{ km}^2$  的大陆边缘海,古海洋重建表明这些海道处于周期性缺氧环境,堆积了富含有机碳(含量为  $2 \sim 10 \text{ wt.}\%$ )的沉积物,成为大气-海洋系统中潜在的巨大碳库[6]。

针对 PETM 的成因,学界提出了“构造抬升驱动边缘海有机碳氧化释放  $\text{CO}_2$ ”假说。该假说认为构造抬升可能导致边缘海与开放海洋隔离并逐渐干涸,进而促使其中埋藏的有机质在微生物作用下氧化,释放大量  $\text{CO}_2$ 。假设边缘海有机碳氧化速率与现代土壤呼吸速率( $50 \sim 2000 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )相当,整个边缘海干涸与有机碳氧化过程可在  $10 \sim 30 \text{ ka}$  内完成,这一时长与 PETM 碳同位素负漂的初期时长较为一致[6]。John 等人将 PETM 与墨西拿盐度危机(Messinian Salinity Crisis, 简称 MSC)对比后发现,两者虽均涉及海道隔离与干涸过程,但 PETM 更可能受板块相互作用(如印欧碰撞与特提斯洋关闭)的影响。同时, PETM 时期大陆边缘海有机碳储量高于 MSC 时期, MSC 的碳释放规模不足以解释 PETM 期间的强烈增温。此外,该假说预测,浅海干涸与有机碳氧化会留下沉积证据,例如低海平面时期形成的古土壤(具根迹、干裂结构,高氧化,低有机碳)。晚古新世非洲-阿拉伯和欧亚大陆之间存在浅海道,伴随东北大西洋的裂谷、印度碰撞及特提斯洋关闭等构造事件,北海、西班牙和特提斯周缘地区出现数十米规模的海平面下降,为有机碳氧化和  $\text{CO}_2$  释放提供了条件[6]。

尽管该假说可部分解释 PETM 碳同位素负漂的起始时间与构造背景,但仍存在明显局限性。该假说一方面缺乏直接沉积证据,且构造抬升具有区域差异性,因此需更多钻孔数据验证假说的普适性。另一方面,该假说背景下有机碳氧化释放  $\text{CO}_2$  量是否足以驱动全球升温  $4^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ ,尚需碳循环模型进一步量化。因此,未来研究应聚焦于晚古新世边缘海序列的高精度定年与碳释放-气候响应耦合关系,以完善假说的定量验证体系,进一步修正或丰富 PETM 事件的成因解释。

### 3.4. 天文轨道参数

米兰科维奇循环揭示了地球轨道周期变化对气候的系统性影响,为研究古气候事件(包括极热事件)提供了重要的理论框架。在 PETM 事件研究中,天文驱动力被普遍认为是潜在触发因素之一。其核心作用路径可概括为:晚古新世地球轨道偏心率周期( $100 \text{ kyr}$ )进入高振幅阶段,高纬夏季太阳辐射增强引发极地冰盖消融-海平面上升-陆架沉积有机碳暴露氧化;同时,轨道强迫驱动的赤道-高纬温度梯度减小,削弱温盐环流,导致深海缺氧碳库(如海底沉积物有机碳)失稳释放,共同为 PETM 的碳同位素负漂提供“预触发”条件。

部分研究从沉积记录中识别 PETM 时期的天文信号。例如,北大西洋钻探计划 1262 站高分辨率地层显示, PETM 前夕存在  $\sim 405 \text{ kyr}$  长偏心率周期,且与碳库轻微扰动时序耦合,暗示轨道强迫,为 PETM 爆发奠定基础;但低纬度陆相地层(如中国江汉盆地)因沉积间断,尚未识别连续轨道旋回[3]。

当前天文驱动假说验证面临方法论挑战:沉积记录不连续、代用指标多解、天文年代学“沉积速率稳定”假设偏差、化石定年精度有限( $\pm 0.5 \text{ Ma}$ )及元素迁移干扰,制约对 PETM 天文驱动机制的认知。近

年来，基于铀系定年(<sup>230</sup>Th/<sup>238</sup>U)的沉积速率校正技术，可降低对“匀速沉积”假设的依赖，进而为 PETM 高分辨率轨道标定提供新方法[14]。

3.5. 火山去气

通过对 PETM 潜在触发机制在多维度证据(碳库规模、释放速率、同位素指纹、地质证据完备度)上的系统对比分析可知(表 2)，“NAIP 火山作用 + 热成因甲烷”机制在地质证据完备度方面最为充分，能够提供巨量碳库规模和持续的脉冲式释放动力。基于此，当前学界已形成主流共识，认为 PETM 事件的主要驱动机制为“NAIP 火山触发 + 反馈放大”模型。这一模型的核心在于，北大西洋大火成岩省(NAIP)大规模的岩浆活动是事件的直接驱动力，并得到了多重地质证据的有力支撑[18]-[24]。

Table 2. Comprehensive assessment for the completeness of geological evidence regarding the PETM trigger mechanism hypothesis [13] [18]-[39]

表 2. 有关 PETM 触发机制假说地质证据完备程度综合评估表[13] [18]-[39]

触发机制	碳库规模 (Gt C)	碳释放 速率	同位素指纹匹配度	优势	劣势	地质证据 完备度
NAIP 火山 作用 + 热成因甲烷	>10,000	持续多次 脉冲	中低 ( $\delta^{13}\text{C} > -17\text{‰}$ , 为较重碳源, 与 观测值存在偏差)	碳库规模巨大, 地质 证据最充分且直接, 能提供持续碳释放 驱动力	单一来源的碳同位素指纹 偏重, 需与轻碳源混合 以解释观测值	高
有机碳氧化	~5000	缓慢释放, 依赖反馈放大	良(-20‰~-25‰, 与观测值基本符合)	碳库规模适中, 同位素匹配较好	缺乏独立的强触发证据, 过程缓慢, 更可能作为 火山触发后的关键反馈 与放大环节	中
甲烷水合物 触发	2000~3000	~3~4 kyr	优(-60‰, 与 观测值高度一致)	碳同位素指纹 匹配极佳	碳库规模有限, 难以解释 总碳释放量; 缺少大规模 水合物崩解的独立地质记录	中低
轨道触发	依赖其他 碳库	100 kyr 周期调制	不确定	可能通过轨道周期调控 气候系统敏感性, 为碳 释放提供有利的背景条件	无法作为独立的碳源和 直接触发机制, 必须与 其他碳释放机制耦合	低

观测值：PETM 期间全球碳库中  $\delta^{13}\text{C}$  的实际测量值；本文通过分析地质证据与 PETM 在时间上的吻合度及其成因上的关联强度来划分地质证据完备度等级，划分依据：高——时间吻合紧密 + 多剖面多指标直接证据；中——时间大致吻合 + 间接证据为主；低——时间对应弱或缺乏可靠直接证据[1]-[6] [13] [18]-[39]。

北大西洋大火成岩省(NAIP)发育两期异常活跃的岩浆活动，分别对应 62~58 Ma 与 57~53 Ma，并在约 56~55 Ma 达到活动峰值。该时间与 PETM 事件的启动时间高度吻合，为火山去气驱动 PETM 提供了时间维度的关键支撑[18] [20] [22]-[24]。NAIP 岩浆活动规模巨大，喷发岩浆面积至少  $1.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，岩浆总体积(含喷出岩与侵入岩)更是达到  $6.6 \times 10^6 \text{ km}^3$ ，如此巨量的岩浆蕴含极高的挥发性组分( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等)储量，为 PETM 所需的巨量碳输入奠定了物质基础，直接或间接驱动了 PETM 事件的发生[2] [18] [20] [22]-[24]。

Gutjahr 等人(2017)基于硼同位素地球化学分析，并结合地球系统模型中匹配的碳同位素记录模拟[2]，发现 NAIP 岩浆活动直接火山去气释放出大量  $\text{CO}_2$ ，是 PETM 事件的直接诱因之一。而 NAIP 大规模喷发阶段，大量岩浆侵入到上方富含有机碳的沉积岩层时，通过间接火山去气释放约  $1.1 \times 10^{18} \text{ g}$  的甲烷温室气体，可以间接驱动 PETM 事件发生并解释同期碳同位素出现明显负漂的现象[2] [18] [20] [22]-[24]。从碳循环反馈视角进一步分析，陈祚伶(2022)指出，NAIP 通过火山去气向大气圈排放的巨量  $\text{CO}_2$ ，造成全球气温快速上升。这种升温显著增强碳循环系统的不稳定性，甚至突破了临界状态，引发还原性碳储库的大量释放，进一步促使 PETM 事件发生(图 2) [1] [2]。

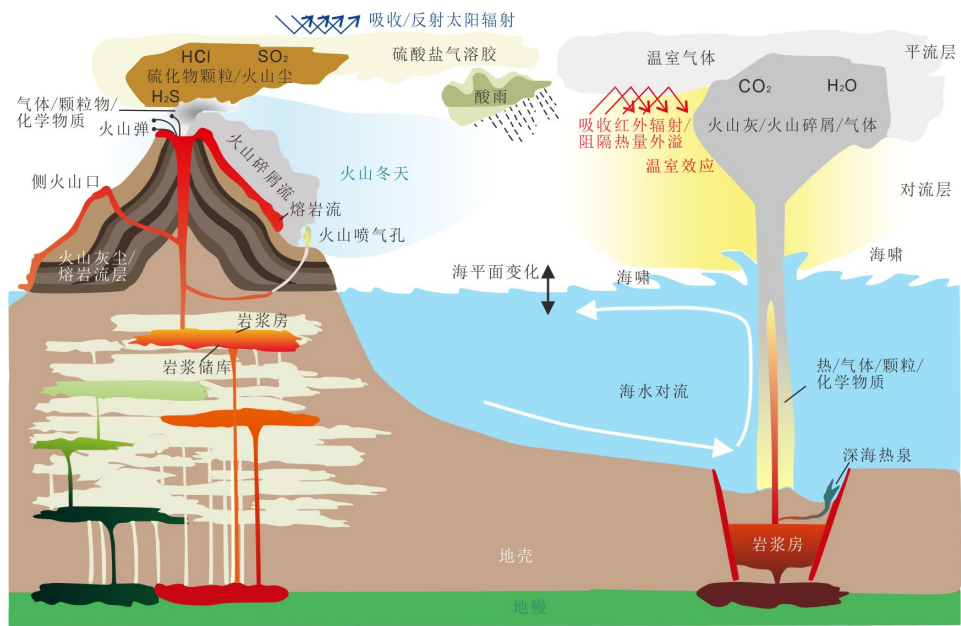


Figure 2. Associative model diagram of volcanic activity and environmental change [40]  
图 2. 火山活动 - 环境变化的关联模型图[40]

4. 结论与展望

本文系统梳理了古新世 - 始新世极热事件(PETM)的研究进展,从多学科视角总结了该事件对全球气候系统、生物演化、矿产能源形成等方面的影响(图 3)。目前, PETM 事件的驱动机制存在多种假说,海底甲烷水合物分解释放假说虽然碳同位素证据吻合但储库规模难以定量;因铱异常提出的地外天体撞击假说缺乏全球撞击坑证据;构造抬升、天文轨道驱动假说可提供碳循环扰动路径,但实证支撑有限;火山去气假说因岩浆活动与 PETM 时空吻合、碳通量匹配,成为当前核心候选,但初始驱动力反馈机制仍存争议。

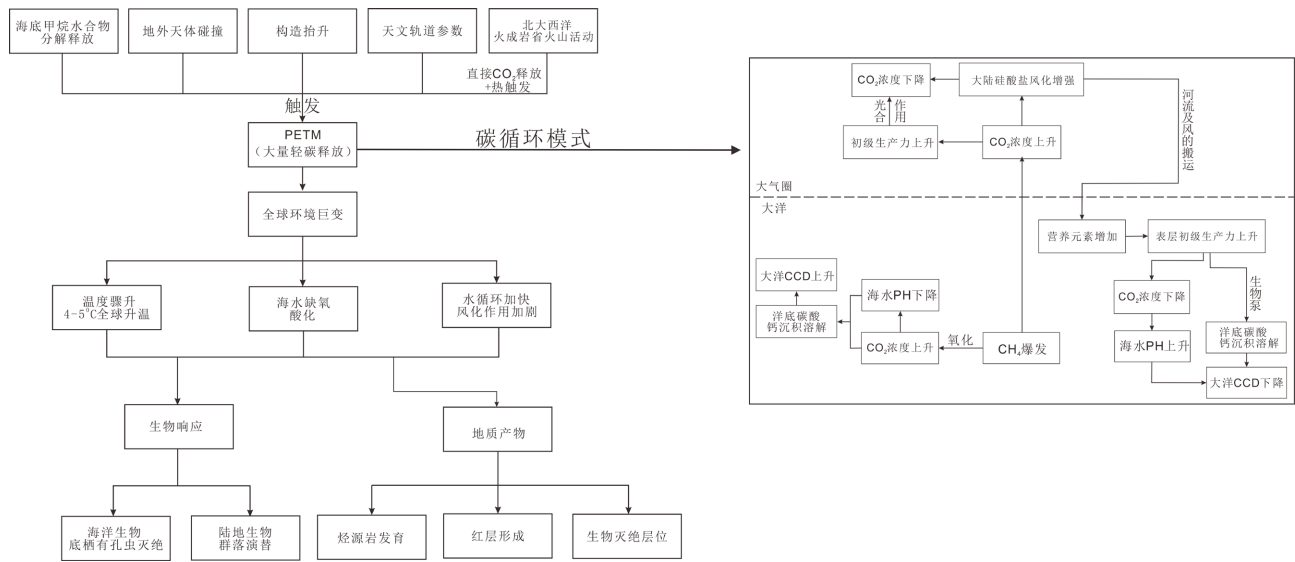


Figure 3. Schematic diagram of the PETM event Chain [11] [39]  
图 3. PETM 事件链模式图[11] [39]



PETM 作为地质历史上典型的极端碳循环扰动与快速气候响应事件, 其碳源释放、大气 CO<sub>2</sub> 浓度攀升及地球系统反馈过程, 与当前人类活动驱动的高速率 CO<sub>2</sub> 排放、碳循环失衡机制存在相似性。二者本质上均是地球碳库平衡被打破后引发的系统性气候扰动。PETM 期间碳同位素偏移的记录, 为评估现代温室气体排放的生态环境效应提供了参考, 助力构建更具科学性的全球变暖应对策略。未来研究应进一步聚焦深部碳循环与地表过程的交互作用, 在地球系统科学框架下深化对地质历史时期极端气候事件的认识, 以服务于全球气候治理。

## 基金项目

大学生创新创业训练计划项目(Yz2024017), 长江大学校级重点项目。

## 参考文献

- [1] 陈祚伶. 古新世-始新世极热事件碳循环研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(15): 1704-1714.
- [2] 张少华, 纪伟强, 陈厚彬, 等. 显生宙大规模岩浆活动对温室期发育的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(5): 1042-1061+961+964.
- [3] 金思敏. 古新世-始新世极热事件期间的火山活动和水文气候[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- [4] 陈祚伶, 丁仲礼. 古新世-始新世极热事件研究进展[J]. 第四纪研究, 2011, 31(6): 937-950.
- [5] 胡修棉, 李娟, 韩中, 等. 中生代两类极热事件的环境变化、生态效应与驱动机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(8): 1023-1043.
- [6] 赵梦婷, 邱煜丹, 马明明. 白垩纪晚期-古近纪早期热事件研究进展[J]. 第四纪研究, 2022, 42(2): 512-528.
- [7] Gibbs, S.J., Bown, P.R., Sessa, J.A., Bralower, T.J. and Wilson, P.A. (2006) Nannoplankton Extinction and Origination across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Science*, **314**, 1770-1773. <https://doi.org/10.1126/science.1133902>
- [8] 罗星宇, 王平, 罗才蓉, 等. 古新世-始新世极热事件(PETM)的陆相记录: 现状与展望[J]. 地质论评, 2023, 69(5): 1899-1918.
- [9] 王阳, 张涵宇, 朱炎铭, 等. 渤海湾盆地临清坳陷西部山西组-太原组海陆过渡相泥页岩沉积环境及有机质富集[J]. 古地理学报, 2024, 26(5): 1090-1107.
- [10] Sluijs, A., Schouten, S., Pagani, M., Woltering, M., Brinkhuis, H., Damsté, J.S.S., *et al.* (2006) Subtropical Arctic Ocean Temperatures during the Palaeocene/Eocene Thermal Maximum. *Nature*, **441**, 610-613. <https://doi.org/10.1038/nature04668>
- [11] 谭先锋, 蒋威, 王敦繁, 等. 古新世-始新世极热气候下陆相沉积系统响应与油气效应研究进展[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2025, 27(1): 44-57.
- [12] 丁婷, 刘成林, 郭福生, 等. 北美板块海相钾盐沉积特征、控制因素及其对中国找钾启示[J]. 盐湖研究, 2022, 30(3): 122-130.
- [13] Li, W., Tan, X., Jiang, W., Dong, X., Wang, D., Luo, L., *et al.* (2025) Organic Matter Accumulation and Carbon Sequestration in the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Insights from the Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, **288**, Article ID: 106606. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2025.106606>
- [14] 王永达, 杨石岭, 沈冰, 等. 地球深部过程与极热和极冷事件[J]. 科学通报, 2024, 69(2): 215-229.
- [15] Dickens, G.R. (2011) Down the Rabbit Hole: Toward Appropriate Discussion of Methane Release from Gas Hydrate Systems during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum and Other Past Hyperthermal Events. *Climate of the Past*, **7**, 831-846. <https://doi.org/10.5194/cp-7-831-2011>
- [16] Cohen, A.S. and Coe, A.L. (2007) The Impact of the Central Atlantic Magmatic Province on Climate and on the Sr- and Os-Isotope Evolution of Seawater. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **244**, 374-390. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.06.036>
- [17] Jones, M.T., Jerram, D.A., Svensen, H.H. and Grove, C. (2016) The Effects of Large Igneous Provinces on the Global Carbon and Sulphur Cycles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **441**, 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.06.042>
- [18] Berndt, C., Planke, S., Alvarez Zarikian, C.A., Frieling, J., Jones, M.T., Millett, J.M., *et al.* (2023) Shallow-Water Hydrothermal Venting Linked to the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature Geoscience*, **16**, 803-809.

- <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01246-8>
- [19] Jiang, S., Cui, Y., Wang, Y., De Palma, M., Naafs, B.D.A., Jiang, J., *et al.* (2025) Millennial-Timescale Thermogenic CO<sub>2</sub> Release Preceding the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature Communications*, **16**, Article No. 5375. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60939-3>
  - [20] Kender, S., Bogus, K., Pedersen, G.K., Dybkjær, K., Mather, T.A., Mariani, E., *et al.* (2021) Paleocene/Eocene Carbon Feedbacks Triggered by Volcanic Activity. *Nature Communications*, **12**, Article No. 5186. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25536-0>
  - [21] Hovikoski, J., Fyhn, M.B.W., Nøhr-Hansen, H., Hopper, J.R., Andrews, S., Barham, M., *et al.* (2021) Paleocene-Eocene Volcanic Segmentation of the Norwegian-Greenland Seaway Reorganized High-Latitude Ocean Circulation. *Communications Earth & Environment*, **2**, Article No. 172. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00249-w>
  - [22] Meissner, K.J. and Bralower, T.J. (2017) Volcanism Caused Ancient Global Warming. *Nature*, **548**, 531-533. <https://doi.org/10.1038/548531a>
  - [23] Jones, S.M., Hoggett, M., Greene, S.E. and Dunkley Jones, T. (2019) Large Igneous Province Thermogenic Greenhouse Gas Flux Could Have Initiated Paleocene-Eocene Thermal Maximum Climate Change. *Nature Communications*, **10**, Article No. 5547. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12957-1>
  - [24] Gutjahr, M., Ridgwell, A., Sexton, P.F., Anagnostou, E., Pearson, P.N., Pälike, H., *et al.* (2017) Very Large Release of Mostly Volcanic Carbon during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature*, **548**, 573-577. <https://doi.org/10.1038/nature23646>
  - [25] Svensen, H., Planke, S., Malthé-Sørenssen, A., Jamtveit, B., Myklebust, R., Rasmussen Eidem, T., *et al.* (2004) Release of Methane from a Volcanic Basin as a Mechanism for Initial Eocene Global Warming. *Nature*, **429**, 542-545. <https://doi.org/10.1038/nature02566>
  - [26] Higgins, J.A. and Schrag, D.P. (2006) Beyond Methane: Towards a Theory for the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, **245**, 523-537. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.009>
  - [27] Zachos, J.C., Röhl, U., Schellenberg, S.A., Sluijs, A., Hodell, D.A., Kelly, D.C., *et al.* (2005) Rapid Acidification of the Ocean during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Science*, **308**, 1611-1615. <https://doi.org/10.1126/science.1109004>
  - [28] Liu, X., Sun, X., Sun, W., Hao, Y. and Huang, J. (2025) A Link between the Paleoenvironment and PETM via Trace Element Proxies in Southwest Atlantic Sediments. *Global and Planetary Change*, **248**, 104774. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2025.104774>
  - [29] Frieling, J., Svensen, H.H., Planke, S., Cramwinckel, M.J., Selnes, H. and Sluijs, A. (2016) Thermogenic Methane Release as a Cause for the Long Duration of the PETM. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **113**, 12059-12064. <https://doi.org/10.1073/pnas.1603348113>
  - [30] Zhu, M., Ding, Z., Wang, X., Chen, Z., Jiang, H., Dong, X., *et al.* (2010) High-Resolution Carbon Isotope Record for the Paleocene-Eocene Thermal Maximum from the Nanyang Basin, Central China. *Chinese Science Bulletin*, **55**, 3606-3611. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4092-5>
  - [31] Kirtland Turner, S., Hull, P.M., Kump, L.R. and Ridgwell, A. (2017) A Probabilistic Assessment of the Rapidity of PETM Onset. *Nature Communications*, **8**, Article No. 353. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00292-2>
  - [32] Storey, M., Duncan, R.A. and Swisher, C.C. (2007) Paleocene-Eocene Thermal Maximum and the Opening of the North-east Atlantic. *Science*, **316**, 587-589. <https://doi.org/10.1126/science.1135274>
  - [33] Zeebe, R.E., Zachos, J.C. and Dickens, G.R. (2009) Carbon Dioxide Forcing Alone Insufficient to Explain Palaeocene-Eocene Thermal Maximum Warming. *Nature Geoscience*, **2**, 576-580. <https://doi.org/10.1038/ngeo578>
  - [34] 金思敏, David B. Kemp, 张仲石, 等. 古新世-始新世极热事件期间的浊积岩沉积对气候变化和天文旋回的响应[J]. 第四纪研究, 2024, 44(5): 1225-1234.
  - [35] 李明松, 姚炜琪, 沈俊, 等. 古新世-始新世极热事件时期轨道尺度海洋脱氧的时空演化[J]. 中国基础科学, 2024, 26(3): 24-30.
  - [36] 王建, 周新郢, 李小强. 古新世-始新世暖期北半球野火演化研究[J]. 第四纪研究, 2024, 44(1): 1-16.
  - [37] 杨晨, 林雯洁, 金思敏, 等. 汞示踪古新世-始新世极热事件火山沉积记录研究进展[J]. 沉积学报, 2025, 43(6): 1935-1951.
  - [38] 王学婷, 陈祚伶, 崔琳琳, 等. 中国大陆古新世-始新世极热事件时期野火的时空演变[J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(2): 524-536.
  - [39] 赵玉龙, 刘志飞. 古新世-始新世最热事件对地球表层循环的影响及其触发机制[J]. 地球科学进展, 2007(4): 341-349.
  - [40] 马昌前, 邹博文, 黄贵治. 火山喷发机制、气候效应及火山地球工程[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 4114-4121.