《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

好氧甲烷氧化加剧古新世-始新世极热事件气候变暖

董丽华[1,2]，包锐[1,2*]

1. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心，海洋化学理论与技术教育部重点实验室，海洋碳中和创新研究中心，青岛 266100
2. 青岛海洋科学与技术中心，海洋地质实验室，青岛 266237
* 通讯作者，E-mail：baorui@ouc.edu.cn

2025-10-26收稿，2026-05-25修回，2026-06-17接受，2026-09-03网络版发表
国家自然科学基金项目(42525604)、国家重点研发计划项目(2025YFF0516900、2025YFF0516903)和国家自然科学基金项目(42450135)资助

海底甲烷水合物是全球碳循环的重要组成部分，其在海洋沉积物中的碳储存超过500 Gt(Milkov，2004)。在气候变暖或海平面下降等外部条件的扰动下，海底甲烷水合物可能发生分解，并向海洋和大气释放甲烷(Ruppel和Kessler，2017)。在现代高硫酸盐海洋环境中，约90%的渗漏甲烷在沉积物中通过厌氧甲烷氧化作用(Anaerobic Methane Oxidation，AOM)被转化消耗(Reeburgh，2007；Regnier等，2011；Yang等，2020)。因此，现代海洋对大气甲烷排放的贡献较小(<2%)，其直接气候效应相对有限(Weber等，2019)。然而，在地质历史时期，海洋氧化还原状态、硫酸盐浓度等化学环境可能与现代显著不同，导致当时甲烷氧化过程及其气候效应至今仍缺乏清晰认知。

古新世-始新世极热事件(Palaeocene-Eocene Thermal Maximum，PETM；约5600万年前)是新生代最典型的全球快速增温事件之一，全球平均温度升高约5–11 °C(Stokke等，2020；Tierney等，2022；Újvári等，2025)，并伴随显著的碳、氧同位素负偏移(Kennett和Stott，1991；Gutjahr等，2017；Westerhold等，2020)。这一事件通常被认为与大量^{13}C亏损的碳向海洋–大气系统输入有关，其中甲烷水合物分解释放甲烷被视为重要机制之一，即“甲烷水合物假说”(Dickens等，1995；Sluijs等，2007；Ruppel和Kessler，2017)。然而，该假说很大程度上忽略了海洋内部甲烷氧化过程对碳循环和环境反馈的影响，也难以单独解释PETM长达17–20万年的持续变暖过程(Röhl等，2007)，这表明，除短时间尺度上甲烷的灾变式释放外，PETM期间可能还存在持续的碳强迫及其引发的环境扰动(Frieling等，2016；Lyons等，2019；Kim等，2025)。

近期，Kim等(2025)基于地质生物标志物证据，揭示古新世-始新世极热事件期间北冰洋曾发生显著的好氧甲烷氧化作用(Aerobic Methane Oxidation，AeOM)，为理解PETM持续变暖提供了新的机制约束。现代海洋硫酸盐浓度约为28 mmol/L(Algeo等，2015；Kim等，2025)，而PETM早期北冰洋可能处于低硫酸盐状态(约5–10 mmol/L)。较低的硫酸盐浓度会抑制以硫酸盐为电子受体的AOM过程，降低沉积物中甲烷的消耗效率，从而使更多甲烷从沉积物释放进入水体。进入水体的甲烷可能进一步通过AeOM被氧化为二氧化碳(CO_2，图1)。指示甲烷氧化细菌群落发育的藿烷类化合物hop-17(21)-ene显示出^{13}C亏损信号(Kim等，2025)，为水体AeOM过程提供了关键证据。与发生于沉积物中，并生成HCO_3^-而增加碱度的AOM过程不同，AeOM直接在水体中产生CO_2，可能促使北极转变为净CO_2源，进而为PETM期间长期变暖提供正反馈(Kim等，2025)。因此，Kim等(2025)的研究表明，在PETM时期低硫酸盐海洋背景下，AeOM可能是维持气候变暖的重要机制。

除海洋甲烷氧化过程外，湖泊和湿地等陆地环境中的甲烷氧化作用也可能参与维持PETM时期的温暖气候(Pancost等，2007；Chen等，2025b)。在PETM期间，东亚湖泊中受变暖驱动的水体分层和底层水脱氧可能促进了甲烷生成与排放，并增强水体甲烷氧化过程，从而进一步加剧了PETM气候变暖(Chen等，2025b)。此外，来自英格兰东南部和中国东北地区湿地的细菌源标志物，如^{13}C亏损的藿烷类化合物，表明PETM期间湿地系统存在活跃的甲烷氧化菌群落，指示增强的AeOM过程，该过程将甲烷进一步氧化为CO_2，从而为PETM长期变暖提供持续的碳源和正反馈(Pancost等，2007；Chen等，

中文引用格式：董丽华, 包锐. 2026. 好氧甲烷氧化加剧古新世-始新世极热事件气候变暖. 中国科学: 地球科学, doi: 10.1360/N072025-0648
英文引用格式：Dong L, Bao R. 2026. Climate warming amplified by aerobic methane oxidation during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. Science China Earth Sciences, https://doi.org/10.1007/s11430-025-2004-3

© 2026《中国科学》杂志社

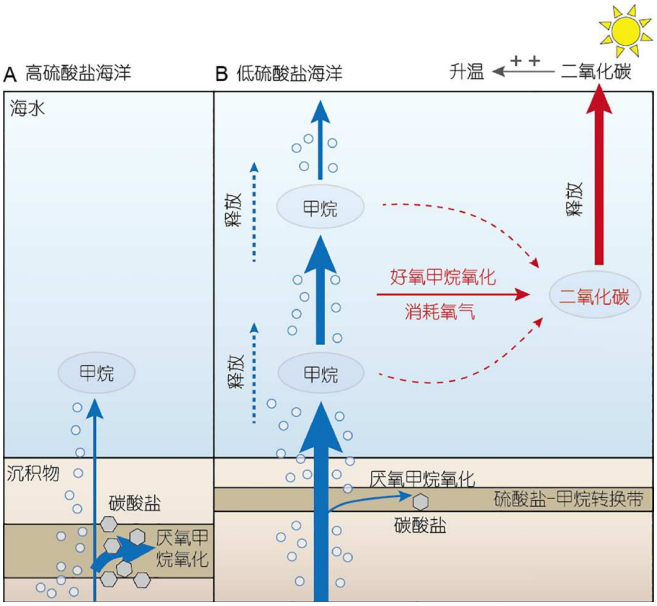

图 1 高硫酸盐与低硫酸盐海洋中甲烷氧化过程及潜在气候影响示意图。(A) 在高硫酸盐海洋中，由水合物失稳释放的甲烷主要在沉积物中的硫酸盐-甲烷转换带通过硫酸盐驱动的厌氧氧化作用被大量消耗，该过程增加碱度，促进碳酸盐形成；(B) 在低硫酸盐海洋中，厌氧甲烷氧化作用可能减弱，促使更多甲烷进入水体，甲烷进而通过好氧氧化作用被转化为二氧化碳，可能在更长时间尺度上维持气候变暖(例如古新世-始新世极热事件)。图修改自Kim等(2025)

2025a)。

AeOM过程产生的CO_2可能加剧海洋酸化(Penman等，2014)。在PETM期间，增强的初级生产力可能促进了有机碳埋藏(Bains等，2000；Wei等，2025)。然而，海洋酸化也可能通过抑制钙化作用、重塑真核浮游植物群落结构并降低有机碳的输出效率，削弱海洋有机碳封存能力(Dai等，2025)。因此，AeOM不仅直接增加水体CO_2，还可能通过酸化诱导的生物地球化学反馈降低海洋对大气CO_2的长期缓冲能力，进而维持较高的大气CO_2水平并延缓气候系统恢复。即使初始甲烷释放减弱，该反馈机制可能仍维持着增温事件。然而，这一解释目前仍属假说，需进一步验证。

碳酸盐的硼同位素组成($\delta^{11}B$)是重建海水pH值、支持PETM期间发生海洋酸化的关键指标(Foster and Rae，2016；Gutjahr等，2017)。Penman等(2014)在PETM期间对北太平洋浮游有孔虫进行检测，发现其$\delta^{11}B$值下降约0.8‰，对应表层海水pH值降低约0.3个单位。然而，Kim等(2025)未提供北冰洋PETM记录中的$\delta^{11}B$证据，尚缺乏直接支持北冰洋AeOM驱动酸化的碳酸盐地球化学证据。需要指出的是，这一证据缺失并不必然意味着酸化过程不存在。相反，PETM期间的酸化环境可能导致生物碳酸盐产量降低，并增强碳酸盐溶解作用(Gibbs等，2006)，从而削弱$\delta^{11}B$信号的碳酸盐载体保存。

除海水酸化外，强烈的甲烷释放及其伴随的AeOM过程还可能增加局部耗氧量，促进底层水体局部低氧(Li等，2021)。在持续强烈的AeOM作用下，水体氧化还原状态的改变可能进一步引起氧化还原敏感微量元素(如Mo、U、Re和V等)的富集或异常变化(Bennett和Canfield，2020)。因此，若生物标志物、碳酸盐溶解记录、pH代用指标以及氧化还原敏感元素异常共同出现，可为AeOM及其环境效应提供有力证据。相反，若部分信号缺失，可能表明AeOM事件持续时间较短、空间影响范围有限，或其强度不足以形成地球化学响应信号。

除地球化学信号保存的不确定性外，现有记录的空间代表性也是评估AeOM气候效应时需要考虑的重要限制。Kim等(2025)的关键证据来自单个深盆站点ACEX(水深1299米)，这限制了AeOM及其气候效应结论的广泛适用。PETM时期北冰洋具有显著的水深梯度和水文差异(Gaina等，2025)，影响着甲烷的释放、迁移与氧化过程。在水深浅于200 m的陆架区域，如西伯利亚陆架和巴伦支海陆架，甲烷可能以气泡形式直接释放至海–气界面(Shakhova等，2010)，从而部分绕过水体中的氧化过程，使AeOM证据，如脂类生物标志物，难以形成或保存。与此同时，PETM记录中生物标志物证据的缺失也并不必然意味着AeOM过程不存在。在陆架等浅水环境中，较强的氧化条件和早期成岩作用可能改变生物标志物的丰度、分布及同位素组成(Sinninghe Damsté等，2002)，从而削弱AeOM信号。因此，未来研究有必要在北冰洋的盆地、斜坡和陆架等不同环境中扩大空间采样范围，结合多指标识别AeOM过程并阐明其环境效应，从而更准确地揭示PETM期间AeOM的区域响应和全球气候意义。

尽管存在不确定性，但Kim等(2025)的研究为理解北极甲烷循环与气候反馈之间的耦合关系提供了重要启示。当前人为碳排放速率约为PETM时期碳释放速率的十倍(Zeebe等，2016)，而现代持续变暖可能增加海底甲烷水合物失稳风险。这警醒我们：在未来变暖情景下，北极AeOM作用可能增强，促使甲烷的气候效应从直接辐射强迫扩展为水体持续CO_2生产及相关碳反馈。然而值得注意的是，现代与PETM时期的北极环境在硫酸盐浓度、盐度与分层结构、海洋环流及通风状态等方面均存在显著差异(Algeo等，2015；Timmermans和Marshall，2020)。因此，在现代海洋条件下，AeOM能否产生显著气候效应，仍然是一个悬而未决、值得深入探讨的问题。

要回答这一问题，未来需要在北冰洋开展持续性的多区域、多环境综合观测，系统追踪从深海盆地到大陆

坡和浅水陆架等不同沉积、水文环境下甲烷的释放与氧化动态。同时，深入研究甲烷循环的地球化学与微生物学机制，明确温度、压力、硫酸盐浓度、氧化还原状态等因素对甲烷氧化过程的控制作用，并将这些关键过程参数化，以改进地球系统模型中对甲烷-碳循环反馈的模拟。因此，整合长期观测、过程实验和模型模拟，对于厘清甲烷在未来气候反馈中的作用，并准确评估PETM事件在多大程度上可为理解和预测北极气候变化提供地质参照，至关重要。

参考文献

Algeo T J, Luo G M, Song H Y, et al. 2015. Reconstruction of secular variation in seawater sulfate concentrations. Biogeosciences, 12: 2131–2151

Bains S, Norris R D, Corfield R M, et al. 2000. Termination of global warmth at the Palaeocene/Eocene boundary through productivity feedback. Nature, 407: 171–174

Bennett W W, Canfield D E. 2020. Redox-sensitive trace metals as paleoredox proxies: A review and analysis of data from modern sediments. Earth-Sci Rev, 204: 103175

Chen Z, Lü P, Tang Z, et al. 2025a. Wetland methane feedback during the early Eocene hyperthermals. Geology, 53: 404–408

Chen Z, Lü P, Yang S, et al. 2025b. Extreme warming intensified lacustrine deoxygenation and methane cycling during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Commun Earth Environ, 6: 592

Dai R, Wen Z, Hong H, et al. 2025. Eukaryotic phytoplankton drive a decrease in primary production in response to elevated CO_2 in the tropical and subtropical oceans. Proc Natl Acad Sci USA, 122: e2423680122

Dickens G R, O'Neil J R, Rea D K, et al. 1995. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene. Paleoceanography, 10: 965–971

Foster G L, Rae J W B. 2016. Reconstructing ocean pH with Boron isotopes in foraminifera. Annu Rev Earth Planet Sci, 44: 207–237

Frieling J, Svensen H H, Planke S, et al. 2016. Thermogenic methane release as a cause for the long duration of the PETM. Proc Natl Acad Sci USA, 113: 12059–12064

Gaina C, Jakobsson M, Straume E O, et al. 2025. Arctic Ocean bathymetry and its connections to tectonics, oceanography and climate. Nat Rev Earth Environ, 6: 211–227

Gibbs S J, Bown P R, Sessa J A, et al. 2006. Nannoplankton extinction and origination across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Science, 314: 1770–1773

Gutjahr M, Ridgwell A, Sexton P F, et al. 2017. Very large release of mostly volcanic carbon during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. Nature, 548: 573–577

Kennett J P, Stott L D. 1991. Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene. Nature, 353: 225–229

Kim B, Zhang Y G, Zeebe R E, et al. 2025. Arctic CO_2 emissions amplified by aerobic methane oxidation during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. Nat Geosci, 18: 975–982

Li N, Yang X, Peckmann J, et al. 2021. Persistent oxygen depletion of bottom waters caused by methane seepage: Evidence from the South China Sea. Ore Geol Rev, 129: 103949

Lyons S L, Baczynski A A, Babila T L, et al. 2019. Palaeocene-Eocene Thermal Maximum prolonged by fossil carbon oxidation. Nat Geosci, 12: 54–60

Milkov A V. 2004. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: How much is really out there? Earth-Sci Rev, 66: 183–197

Pancost R D, Steart D S, Handley L, et al. 2007. Increased terrestrial methane cycling at the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. Nature, 449: 332–335

Penman D E, Hönisch B, Zeebe R E, et al. 2014. Rapid and sustained surface ocean acidification during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Paleoceanography, 29: 357–369

Reeburgh W S. 2007. Oceanic methane biogeochemistry. Chem Rev, 107: 486–513

Regnier P, Dale A W, Arndt S, et al. 2011. Quantitative analysis of anaerobic oxidation of methane (AOM) in marine sediments: A modeling perspective. Earth-Sci Rev, 106: 105–130

Röhl U, Westerhold T, Bralower T J, et al. 2007. On the duration of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM). Geochem Geophys Geosyst, 8: 2007GC001784

Ruppel C D, Kessler J D. 2017. The interaction of climate change and methane hydrates. Rev Geophys, 55: 126–168

Shakhova N, Semiletov I, Salyuk A, et al. 2010. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. Science, 327: 1246–1250

Sinninghe Damsté J S, Rijpstra W I C, Reichart G. 2002. The influence of oxic degradation on the sedimentary biomarker record II. Evidence from Arabian Sea sediments. Geochim Cosmochim Acta, 66: 2737–2754

Sluijs A, Brinkhuis H, Schouten S, et al. 2007. Environmental precursors to rapid light carbon injection at the Palaeocene/Eocene boundary. Nature, 450: 1218–1221

Stokke E W, Jones M T, Tierney J E, et al. 2020. Temperature changes across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum—A new high-resolution TEX86 temperature record from the eastern North Sea Basin. Earth Planet Sci Lett, 544: 116388

Tierney J E, Zhu J, Li M, et al. 2022. Spatial patterns of climate change across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Proc Natl Acad Sci USA, 119: e2205326119

Timmermans M-L, Marshall J. 2020. Understanding Arctic Ocean circulation: A review of ocean dynamics in a changing climate. JGR Oceans, 125: e2018JC014378

Újvári G, Kele S, Rinyu L, et al. 2025. Substantial continental temperature rise over the Paleocene-Eocene Thermal Maximum in the Pyrenees. Commun Earth Environ, 6: 499

Weber T, Wiseman N A, Kock A. 2019. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters. Nat Commun, 10: 4584

Wei G Y, Pohl A, Jiang S, et al. 2025. Changes in continental weathering regimes inhibited global marine deoxygenation during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Nat Commun, 16: 9163

Westerhold T, Marwan N, Drury A J, et al. 2020. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. Science, 369: 1383–1387

Yang S, Lv Y, Liu X, et al. 2020. Genomic and enzymatic evidence of acetogenesis by anaerobic methanotrophic archaea. Nat Commun, 11: 3941

Zeebe R E, Ridgwell A, Zachos J C. 2016. Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. Nat Geosci, 9: 325–329

（责任编委：张传伦）