



二叠纪末超级厄尔尼诺的生物灭绝效应

孙亚东^{1*}, Alexander Farnsworth^{2,3}, Michael M. Joachimski⁴, Paul B. Wignall⁵, Leopold Krystyn⁶, David P. G. Bond⁷, Domenico C. G. Ravidà⁸, Paul J. Valdes^{2,3}

1. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074;
2. School of Geographical Sciences, University of Bristol, Bristol BS81SS, UK;
3. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101;
4. GeoZentrum Nordbayern, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 91054, Germany;
5. School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK;
6. Department of Palaeontology, University of Vienna, A-1090 Wien, Austria;
7. School of Environmental Sciences, University of Hull, Hull, HU6 7RX, UK;
8. Department of Applied Geology, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen 37077, Germany

* 联系人, E-mail: yadong.sun@cug.edu.cn

Mega El Nino primed the end-Permian world for mass extinction

Yadong Sun^{1*}, Alexander Farnsworth^{2,3}, Michael M. Joachimski⁴, Paul B. Wignall⁵, Leopold Krystyn⁶, David P. G. Bond⁷, Domenico C. G. Ravidà⁸ & Paul J. Valdes^{2,3}

- ¹ State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
 - ² School of Geographical Sciences, University of Bristol, Bristol BS81SS, UK;
 - ³ State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
 - ⁴ GeoZentrum Nordbayern, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 91054, Germany;
 - ⁵ School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK;
 - ⁶ Department of Palaeontology, University of Vienna, A-1090 Wien, Austria;
 - ⁷ School of Environmental Sciences, University of Hull, Hull HU6 7RX, UK;
 - ⁸ Department of Applied Geology, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen 37077, Germany
- * Corresponding author, E-mail: yadong.sun@cug.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2024-1034](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1034)

在工业革命之前, 巨量二氧化碳的排放主要归因于大火成岩省的喷发。显生宙以来的大火成岩省有数十个, 但能引发极热事件的却只有十几个, 能引发生物灭绝的则更少, 达到二叠纪末大灭绝规模的则绝无仅有。这种现象挑战了人们对地球气候系统拐点的认知。

2.5亿年前的二叠纪末发生了显生宙最严重的生物大灭绝^[1], 但其灭绝机制争议极大, 海洋和陆地存在显著的灭绝时间差。大洋缺氧能够造成海洋生物灭绝, 但对陆地生命几乎没有影响。全球变暖虽然可以同时杀死海洋和陆地生物, 但冈瓦纳大陆多数地区的陆地生态系统灭绝要远早于全球变暖。前人提出的野火、海洋酸化、臭氧空洞、重金属中毒等灭绝机制均不能单独解释二叠纪生物危机的严重性、地区的不均一性和海-陆灭绝的异时性。

短时间尺度的气候变化很难拓展到深时古气候研究中, 它们通常隐藏在背景变化中。本文通过二叠纪末牙形石氧同

位素组成重建古海温, 进而计算当时的纬向海温差, 并利用HadCM3BL地球系统科学模式模拟和沉积学证据进行相互验证, 建立了一个适用于二叠纪末的海-气耦合过程的新理论。

纬向和经向海温梯度通过沃克环流和哈德利环流对大气产生反馈, 从而控制低纬气候。在现代海洋, 受赤道东风影响, 温暖的表层海水被推向大洋西岸, 产生西太平洋暖池, 东太平洋而受上升流影响产生冷舌区。在晚二叠世, 特提斯洋的赤道纬向海温梯度比现代太平洋的更大, 从气候变暖前的>7℃迅速下降到~3℃, 并在整个早三叠世都保持低值。与海温条件对应, 模式模拟显示沃克环流随CO₂强迫的增加而减弱和收缩。纬向海温梯度和沃克环流变化互为因果, 因而减弱的纬向海温梯度和沃克环流暗示着更强的厄尔尼诺现象会出现。本研究显示, Nino 3.4指数随pCO₂增加而增加, 厄尔尼诺持续时间可达10年; 多年拉尼娜频发, 厄尔尼诺-南方涛

动(ENSO)由不对称震荡转向近对称震荡。

长时间、周期性的超级厄尔尼诺导致气候异常多变。全球中-低纬度陆地气候条件趋同,区域多样化的沉积环境过渡到高能辫状河沉积,预示着出现了更加不稳定的气候状态。湿度不足和无规律的降雨,使得地表径流量普遍增大,并出现极端温度。这些情况可能受盘古大陆季风和ENSO周期的驱动。但在高纬地区不明显,这可能是由于ENSO主要驱动低纬气候异常。

纬向海温梯度的减小可能通过与沃克环流的相互作用引起两个相互关联的正反馈过程。赤道东风减弱导致暖流东退,加深了东部的暖池,这反过来又进一步增强了厄尔尼诺。越来越强的厄尔尼诺与低纬度水文循环的变化同时发生。温暖的海水会产生高度大、含雨量大的对流云,其反照率低于高度小、不含雨的层云,而层云则跟随较冷的海水团。因此,随着泛大洋暖池东扩,低纬度降水重新分配。低纬度层云覆盖的减少降低整个地球的反照率,加剧温室效应。

在更强的ENSO和温暖的气候协同作用下,陆地上产生了强烈的干-湿振荡,并在全球范围内放大了降水的不均匀性。在厄尔尼诺期间,海洋储存的热量被释放到大气中,导致了严重的干旱和极端的高温。分析表明,二叠纪-三叠纪之交的全球气候极端异常,包括热带和亚热带地区出现的强烈高温、陆地-海洋的遥相关、高纬度地区的轻度降温,以及厄尔尼诺期间降水在泛大洋和特提斯边缘低纬度地区的重新分布。这些趋势在拉尼娜期间大致相反,地质证据来自广泛发育的下三叠统的不规则径流以及湍急径流产生的河流相沉积,表明了低纬度地区气候出现了前所未有的统一,干湿变化十分剧烈。

随着厄尔尼诺的持续时间从数月延长到数年,在背景气候变暖、野火发生频率增加的情况下,盘古大陆广大地区长期的温暖和干旱会对植物造成更大的压力。当气候从潮湿过渡到半干旱时,低纬度地区泥炭地的木炭沉积达到顶峰。湿润期储备了大量的可燃物,随后的干旱和高温则引发频繁的野火。随着气候变暖和干旱加剧,植被越来越容易受到野火的影响,从而影响了陆地的碳封存,进一步又推高了 $p\text{CO}_2$ 。随着雨林最终消失,木炭的埋藏峰值也随之消失,反映了陆地生物量的减少。

频繁的干旱迫使植物出现生理变化,从而有利于能在零星的潮湿间歇期生长的短寿命类群,但在种子或孢子阶段则要忍受长时间的干旱。这反映在整个二叠纪末危机期间,植物组合转向小型灌木而非乔木。等叶茄科植物肋木属 *Pleuro-meia* 和 脊囊属 *Annalepis* 在灭绝后占优势,这与二叠纪以裸子植物为主的森林形成鲜明对比。出现适应短暂潮湿间歇期的植物,可能导致昆虫选择性地生存。昆虫的化石记录虽然零散,但大多数类群的数量出现显著下降,这与森林退化过程中栖息地的丧失和作为食物的植物的减少密切相关。然而,具有水生幼虫阶段的类群比完全陆生的类群表现得更好,因

为它们能在潮湿的间歇期生长。

ENSO的极端影响在低纬度海-气相互作用中表现得尤为明显,但后果却是全球性的,并使得平均态下的微小变化被进一步放大。二叠纪-三叠纪之交陆地生态系统最突出的变化是森林的急剧退化。落叶针叶林首先受到冲击,由冈瓦纳向极地退缩,并在~2.5万年内覆盖率减少了46.6%(相当于 $\sim 21 \times 10^6 \text{ km}^2$ 森林)。随后,北部中纬度地区和热带地区的森林相继退化。然而,在南部高纬地区,森林的早期退化原因过去并不清楚。在悉尼盆地,二叠纪舌羊齿属 *Glossopteris* 植物的灭绝要比海温升高早约38万年。模拟结果表明,与今天的澳大利亚类似,该地区极易受到ENSO的影响;在厄尔尼诺期间,夏季更热、更干旱的现象十分突出与沉积学证据一致,即在二叠纪最后的植物群之上,干旱持续的时间越来越长。

多数浮游生物的耐热极限约为 35°C ,但生命过程的最佳温度范围往往小于耐热极限,尤其是那些寿命短于一年的物种。因此,海洋浮游生物特别容易受到年际气候扰动的影响。正如近期的海洋热浪所示,浮游生物的减少会引发自下而上的营养级关联。放射虫是一类有良好的化石记录并具有硅质骨骼的异养生物,它们的多样性危机忠实地记录了浮游生物群的变化。早在海洋灭绝主幕发生前约4万年,放射虫就遭受了重大损失,与厄尔尼诺的加强的时间吻合,表明浮游生物群落最先受到加剧的年际变化和极端气候的影响。

生物礁是海洋生态系统最脆弱的部分。在近年的海洋热浪中,珊瑚礁和非珊瑚礁都出现了大量死亡,说明它们抵御海温快速上升的能力有限。在二叠纪末,所有古生代的珊瑚都灭绝了,各种类型的生物礁也相继消亡。它们的消亡与厄尔尼诺的加剧和全球经向海洋环流的减弱相吻合,预示着随后会出现更大的危机。

海洋灭绝与大范围大洋缺氧现象相吻合,出现在碳同位素负偏移开始之后。缺氧发生在海洋迅速变暖、海水分层加剧和海洋经向环流重组的阶段。当 $p\text{CO}_2$ 从412 ppm增加至857 ppm时,北半球的经向翻转环流从危机前的状态崩溃为较浅的北向环流。浙江煤山剖面记录到的海洋缺氧现象,是由于全球缺氧水团的扩张造成的,比经向翻转环流的崩溃滞后约3~5千年,这个滞后的时间与海水的滞留时间相当。随着 $p\text{CO}_2$ 的增加,经向翻转环流混合单元进一步减弱和变浅,表明危机前的盘古世界对 $p\text{CO}_2$ 的微小变化都表现出高度敏感性。

二叠纪末期向变率增强的新气候态转变的速度可能非常快。基于高精度U-Pb年龄模型估计,这个转变发生在约2~8千年的时间内,比海洋大灭绝开始的时间要早1~7万年,与 $\delta^{13}\text{C}$ 的长期下降趋势和赤道海温的小幅升高相吻合。三分之二的西伯利亚熔岩都在灭绝前喷发,与逐渐增强的ENSO活动相吻合。包括森林退化、经向翻转环流崩溃、海洋浮游生物灭绝和生物礁消亡在内的这些重大危机都发生在 $p\text{CO}_2$ 最初由412 ppm翻倍至857 ppm期间,并且与特提斯洋赤道纬向

海温梯度的下降相吻合。因此,即使较小规模的温室气体排放和气候变暖也足以使二叠纪-三叠纪的气候进入强厄尔尼诺态。这使得低纬度的温度和降水出现极端变化,干旱持续时间过长,森林无法存活,这对能够在潮湿时期完成生命周期的植物和昆虫中的机会种十分有利。在海洋中,生命周期为一年以下的浮游生物群受到了严重影响,但海洋生态系统的韧性能确保了它们生存下来,直到它们进一步遭到变暖和海洋缺氧的压制。生物量的减少反过来又降低了碳埋藏,造成了更暖的温室和更强的厄尔尼诺。

未来气候变暖是否会对厄尔尼诺的强度和持续时间产生

重大影响,目前尚存激烈争论。在二叠纪末的盘古世界,厄尔尼诺似乎随着 $p\text{CO}_2$ 增加变得越来越强。本研究强调短时间尺度的厄尔尼诺与长时间尺度气候变暖的叠加效应。虽然二叠纪末的盘古世界与人类的现代世界明显不同,其对 $p\text{CO}_2$ 强迫的反应也肯定不同于今天;由于海洋的升温速度比陆地慢,而海洋生物的运动能力更强且不受降雨影响,因此在厄尔尼诺加剧时,陆地生态系统更容易受到灭绝的威胁。因此,在二叠纪-三叠纪之交,海洋生物的灭绝滞后了约 1~7 万年,这虽然在地球历史上很短,但却发生在人类时间尺度内,而我们正在迈向一个更加多变的气候系统。相关研究结果发表在 *Science*^[2]。

致谢 感谢国家自然科学基金(41821001, 42272022)资助。

推荐阅读文献

- 1 Fan J, Shen S, Erwin D H, et al. A high-resolution summary of Cambrian to Early Triassic marine invertebrate biodiversity. *Science*, 2020, 367: 272–277
- 2 Sun Y, Farnsworth A, Joachimski M M, et al. Mega El Niño instigated the end-Permian mass extinction. *Science*, 2024, 385: 1189–1195