

白垩纪大洋缺氧事件研究进展

范庆超^{1,2,3}, 徐兆凯^{1,2,4,5,6}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061; 5. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 6. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 陕西 西安 710061)

摘要: 系统总结了白垩纪 OAEs 的研究进展, 重点讨论了 OAE1a、OAE1b 和 OAE2 时期的有机碳(TOC)含量、碳同位素、古温度和锆同位素特征及其古环境指示意义, 综合分析了白垩纪 OAEs 的成因机制。结果表明白垩纪 OAEs 的发生可能与该时期海底大规模的火山活动以及由其引起的气温升高、碳水化合物大量分解、水文循环加快和海洋生物生产力提高等一系列变化有关。对于白垩纪 OAEs 演化特征和成因机制的深入研究具有重要借鉴意义。通过对白垩纪 OAEs 的综合分析发现, 当前的研究区域主要集中在大西洋/特提斯盆地及其周边陆地, 而对南半球高纬度地区的研究报道迄今未见, 从而无法对白垩纪 OAEs 进行全球性对比和系统性研究。今后我们将重点围绕南半球高纬度地区白垩纪 OAEs 的演化特征、成因机制及其古气候环境效应等进行深入研究。

关键词: 白垩纪; 大洋缺氧事件; 碳循环; 古环境

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2020)02-0138-08

DOI: 10.11759/hyqx20190303001

近年来, 随着大气中温室气体二氧化碳浓度的升高, 加速了全球范围内气候变暖的趋势, 并且该变化的发生速率远比现有气候模型所预期的要快, 要理解气候发生快速变化的风险, 就必须从长远的角度来看地球系统对大气温室气体升高的响应^[1]。这也是国际深海钻探研究领域最前沿的国际合作计划——国际大洋发现计划(IODP)最核心的科学目标之一^[2]。白垩纪中、晚期是地质历史上典型的极端暖室期, 如高纬度地区的古表层海水温度(SST)达到 20~30℃, 在中、低纬度地区则高达 30℃以上^[3]; 而全球大气二氧化碳浓度在白垩纪中期高达约 1 000~2 000 ppmV (ppmV 表示二氧化碳体积比的单位为 μL/L, 后同)^[4], 到白垩纪晚期仍维持在 500 ppmV 以上^[5]。此外, 该时间段还是全球超级地幔柱的强烈活跃期^[6]。上述特殊的气候和构造条件为探究关键地质历史时期的碳循环过程、成因机制及其古气候环境效应等奠定了坚实的基础。

早在 20 世纪 70 年代, 由于深海钻探计划(DSDP)的实施, 在太平洋马尼希基高原发现了白垩纪时期的、以高有机质含量为特征的黑色沉积物, Schlanger 和 Jenkyn^[7]发现此类黑色沉积物的分布具有全球性

和同时性, 并认为其形成可能与白垩纪中某些特定地质历史时期中全球(或局部)海洋出现低氧到缺氧条件有关, 因此将形成这些沉积物的事件称为大洋缺氧事件(OAEs)。其定义为: 海洋环境中大的地域范围里短期内(<1 Ma)明显增强的有机碳(TOC)沉积阶段, 并往往与海洋和陆地沉积物中碳同位素的明显偏移相对应。

通过对白垩纪富含有机碳地层的研究, 人们发现白垩纪 OAEs 是多期次的, 主要发生在阿普特期(约 125.0~113.0 Ma)—阿尔布期(约 113.0~100.5 Ma)、赛诺曼期(约 100.5~93.9 Ma)—土伦期(约 93.9~89.8 Ma)的交界时期和康尼亚克期(约 89.8~86.3 Ma)—三冬期(约 86.3~83.6 Ma), 分别被称为 OAE1、OAE2 和 OAE3, 而 OAE1 又可进一步划分为 OAE1a(约 120 Ma)、OAE1b(约 111 Ma)、OAE1c(约 105 Ma)和 OAE1d(约

收稿日期: 2019-03-03; 修回日期: 2019-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41876034)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41876034]

作者简介: 范庆超(1995-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学研究, 电话: 19801268283, E-mail: qingchao_fan@163.com; 徐兆凯(1978-), 男, 通信作者, 研究员, 主要从事海洋地质学研究, 电话: 0532-82898835, E-mail: zhaokaixu@qdio.ac.cn

100 Ma) 四期。其中以 OAE1a、OAE1b 和 OAE2 这三次事件最为显著, 具有全球性分布特征; 而 OAE1c 和 OAE3 这两次事件则具有区域性分布特征: 其中前者主要分布在古特提斯洋区域, 而后者则主要发现于大西洋地区^[8]。值得注意的是, OAE1d 事件最早是在古特提斯洋个别的海洋沉积岩中发现的, 被认为是区域性 OAEs^[8], 但随着后来该事件在大西洋^[9]和加利福尼亚地区^[10]的相继出现, OAE1d 事件也有可能具有全球意义。由于白垩纪 OAEs 关系到碳循环、古海洋-古气候变化等一系列重大科学问题, 自其定义被提出以来, 科学家们对全球主要大洋盆地及地表出露的海相地层中记录到的白垩纪 OAEs 开展了一系列的研究工作, 本文在上述研究成果的基础上从 TOC 含量、碳同位素、古温度和锶同位素等地球化学特征及其古环境指示意义等方面综述该事件的研究进展, 以探究其成因机制以及地球系统对于大气温室气体浓度升高的响应。

1 白垩纪 OAEs 的标志性特征

OAEs 往往对应着 TOC 在短期内迅速而大量地埋藏, 其中白垩纪 OAEs 的标志性特征是在全球范围内广泛分布的黑色页岩^[11]。这是一种泥质岩类, 一般由包含有机质和石英粉砂的黏土矿物组成, 其中 TOC 含量极高, 往往可达 10%~30%。TOC 埋藏量在阿普特早期迅速升高, 至阿尔布早期达到一个较高的值之后开始下降, 在赛诺曼末期埋藏量迅速增加, 至土伦早期埋藏量持续增加, 这段时间也正是 TOC 埋藏速率的高峰期^[12-14]。

在空间分布上, 在阿普特早期的 OAE1a 中, 阿尔卑斯山、地中海地区的沉积物中 TOC 含量在 2%~18%^[15], 同时在美国加利福尼亚州的佛兰西斯科杂岩以及太平洋中部和北部的海底高原、海山等处均发现了高 TOC 含量并广泛分布的黑色页岩, 其中北太平洋沙茨基海隆沉积物中 TOC 的含量更是达到了 40%以上^[16]。在希腊西部发现的 OAE1b 沉积物中 TOC 的含量也达到了 30%以上。赛诺曼期和土伦期交界的 OAE2 黑色页岩沉积在全球都有广泛分布, 其有机质含量整体偏高, 但不同海区沉积物的 TOC 含量有所差别。如加勒比海、大西洋、阿尔卑斯和地中海地区沉积物中 TOC 的含量在 30%以上, 在印度洋埃克斯茅斯深海高原海洋沉积物中的 TOC 含量也达到了 25%^[17], 而太平洋多数海区沉积物的 TOC 含量则在 8%~10%^[11], 但在亚洲发现的黑色页岩沉积

厚度和 TOC 含量都有明显降低, 如西藏地区 OAE2 沉积物中的 TOC 含量小于 2%^[18]。

OAEs 中有机质埋藏增加的原因可能有以下几个方面: (1)海洋生物生产力的提高^[19]。赛诺曼晚期—土伦早期的 OAE2 与海平面上升的高峰期是一致的, 全球海平面的抬升使得陆架海扩展, 暖盐水生物生产力增加, 而这又进一步影响到中—深层水团, 如北大西洋中层水(500~1 000 m)温度在赛诺曼末期突然从 15℃上升到 20℃^[20], 且引起了深层水团上涌的增加, 从而导致了海洋中高的生物生产力^[6], 如赤道大西洋在 OAE2 期间沉积物中 Ba/Al 比值的大幅升高^[11]。此外, 大量地质温标记录显示 OAEs 期间大气温度升高, 可能加速了水文循环和陆地硅酸盐的化学风化作用, 而海洋沉积物中的锶同位素组成变化也证实了这一点, 从而引起了陆地入海营养物质的增加, 这也促进了海洋初级生产力的上升^[15, 20]。(2)海洋底层水缺氧环境。目前已有大量证据证明在 TOC 的加速堆积阶段, 海洋处于缺氧状态。如在多次 OAEs 中发现了指示厌氧环境的生标化合物^[15, 21]。又如在大西洋附近的 OAEs 沉积物中记录到了 Mo 同位素比值的明显升高, 而 Mo 同位素组成与其自身的赋存状态密切相关, 从氧化态-次氧化态到缺氧态(硫化态)其同位素值依次加重, 同时亲硫元素(如 As、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、Mo、Ni 和 Sb)以及一些变价元素(如 Ti、Fe、V 和 U)的富集也证明了当时这种硫酸化海洋水体的存在^[11]。而一些具有旋脊的浮游有孔虫、一些菊石类和底栖海洋生物在 OAE2 时期的贫乏也可能是由于此时广泛而强烈的缺氧环境造成了海洋中浅至中层生活环境的破坏^[13]。生物生产力的上升促进了有机质的形成, 海洋的缺氧环境又有利于有机质的保存, 二者共同作用, 最终导致了 OAEs 中有机质埋藏量的显著增加。

2 白垩纪 OAEs 的碳稳定同位素特征

自然界中的碳有两个基本储库: 海相碳酸盐和 TOC^[22]。碳酸盐岩中的碳同位素相对富 ¹³C, 而沉积有机质中的碳同位素则相对富 ¹²C。碳循环以及碳同位素的演化实际上就是这两个基本碳库之间的转化: 植物光合作用从大气二氧化碳中优先吸收 ¹²C, 将其固定在有机质中, 经过生物的呼吸及死亡分解氧化又会把富 ¹²C 的碳返回到大气中, 从而构成了地球系统稳定的碳循环过程。在 OAEs 期间, 海洋浮游植物通过光合作用将更多的 ¹²C 固定在有机质中, 由于此

时海洋处于贫氧或者缺氧状态,生物死亡后得不到充分、及时的氧化分解,使得富含 ^{12}C 的大量有机质在海底埋藏,从而导致海水和大气中的碳相对富集 ^{13}C 。由于海相碳酸盐岩与海水的碳同位素保持平衡,因此海相碳酸盐岩的 ^{13}C 会发生正偏;同时地球系统的碳循环过程继续进行,植物将大气中相对富集 ^{13}C 的碳固定在有机质中,因此新形成的沉积有机质中的 ^{13}C 也会发生正偏^[23]。

对全世界范围内OAE2事件的研究结果也显示,海洋碳酸盐岩和有机质中的 ^{13}C 均出现了不同程度的正偏移,其偏移约为2‰~5‰,持续时间约为0.5 Ma^[29]。如德国北部黑色页岩相记录到的OAE2事件显示,碳酸盐岩和有机质中的 ^{13}C 正偏了2‰~3‰,并且有机质中 ^{13}C 的偏移幅度相对更大^[24-25]。又如藏南岗巴地区海相碳酸盐岩的 ^{13}C 含量在OAE2事件期间骤增,达到2.7‰的正偏移量^[26]。再如美国内陆海道地区沉积物中记录,OAE2事件中有机质 ^{13}C 的正偏移量为4‰,碳酸盐岩 ^{13}C 的正偏移量为2‰^[27]。而意大利中部翁布里亚-亚平宁山脉地区的黑色页岩沉积记录则显示,有机质的 ^{13}C 在OAE2早期有3‰的负偏移,但这可能与当时地面大规模火山活动所释放的温室气体有关^[28]。

然而,OAE1a和OAE1b事件内的海相碳酸盐岩、有机质和生标化合物中碳同位素既有出现正偏移、又有出现负偏移的情况^[30-31]。如在太平洋中部海山区ODP866站点,OAE1a中海相碳酸盐岩中碳同位素组成剖面变化开始于剧烈的 ^{13}C 负偏移(0.5‰~3.0‰),随后 ^{13}C 升高并长期保持正偏^[11]。此外,在阿尔布早期的OAE1b时期, ^{13}C 也先发生1‰的负偏移,随后升高并保持正偏^[32-33]。这种现象表明在OAEs发生早期必定有偏轻的 ^{12}C 同位素进入到当时的海洋-大气系统中。同时,研究还发现OAE1b早期的 ^{13}C 呈阶梯状下降,表明富含 ^{12}C 的物质在极短时间内以快速脉冲的形式进入到海洋-大气系统中。据此可以推测这可能是火山排气作用^[28]、天然气水合物分解^[34]以及煤层热分解^[35]单独或者共同作用的结果。比如现在一般认为OAE1a的发生是翁通-爪哇太平洋超级地幔柱喷发的结果^[6, 36]。由于海底大规模火成岩省的活动导致了海水温度升高,在短时间内使水合甲烷分解而释放出大量的二氧化碳进入到海洋-大气系统中,从而造成了海洋-大气系统中碳同位素的显著变轻。

3 白垩纪 OAEs 的古海水温度背景

前面已经提到,白垩纪中、晚期全球气温处在一

个整体偏高的水平,是典型的极端暖室期。根据全球不同地区的底栖有孔虫氧同位素重建的古温度记录显示,当时全球底层海水温度在8~20℃范围变化。从整体趋势上来看,从115 Ma开始底层海水逐渐升温,至97~91 Ma达到最高,其后则开始缓慢降温,至78 Ma左右达到8~12℃,其后直至白垩纪结束则基本保持稳定^[37]。

根据全球范围内大洋钻探(ODP)站位的浮游有孔虫氧同位素记录可知,白垩纪中、晚期全球SST较现在也有显著的提高,如白垩纪极热期赤道大西洋的SST可达33~34℃^[38]。Norris和Wilson等^[39]对30°N的ODP1052站点古海水温度的重建研究表明,阿尔布期至早侏罗曼期的SST也达到了30~31℃。而高纬度地区的SST在白垩纪中、晚期同样有较大幅度的升温,如南半球高纬度地区的SST在晚阿尔布期与赤道SST相差接近14℃,但到了白垩纪极热期其差距则仅为0~4℃^[40]。

海洋钙质超微化石的氧同位素则显示,白垩纪多数的OAEs均发生在海水温度最高的时期前后,但是在某些OAEs发生期间也会发生短暂的降温事件。如赤道大西洋DSDP367和ODP1260站位根据有孔虫氧同位素和生标化合物TEX86重建的古温度记录显示,该海区在OAE2事件开始时SST先快速地从约33℃升温至35~36℃,然后降温约4℃,之后再次升温直到OAE2事件结束^[41]。OAEs开始时期快速升温、之后发生降温的情况也发生在OAE1a和OAE1b事件期间。如赤道大西洋ODP1049站位有孔虫氧同位素数据显示,SST在OAE1b事件开始时快速上升了约8℃,随后降温约3℃,之后再次升温^[42]。又如赤道太平洋DSDP463站高分辨率氧同位素数据显示,在OAE1a开始时SST快速上升了约8℃,之后则开始缓慢降温^[43]。

4 OAEs 期间的锶同位素相对丰度比值变化及其古环境指示意义

^{87}Sr 相较于地幔更容易在地壳中富集,因此常用海水中 ^{87}Sr 和 ^{86}Sr 的相对丰度之比 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 来指示海底热液活动和大陆化学风化作用^[44-45]。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 降低,指示着海底火山热液活动的增强,而其比值的升高则指示着大陆化学风化作用的加强。多数的OAEs前期往往对应着海底热液、火山活动的明显增强,引起了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的降低,其后随着全球温度的升高,引起了水文循环和大陆化学风化作用的增强

以及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的相应升高^[31]。

对意大利某一碳酸盐岩台地中保存完好的双壳类生物方解石壳体的研究发现,在赛诺曼—土伦期, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 整体上呈现下降的趋势,可能指示着热液源或其他镁铁质火成岩源地幔 ^{87}Sr 的补充。但在 OAE2 开始阶段, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 呈脉冲式升高,说明该时期的水文循环和大陆化学风化作用都有着明显的增强,并且也表明了大陆化学风化作用的增强效应足以掩盖地幔来源锶同位素的增加趋势^[32, 46]。

在太平洋地区,根据对 ODP886 站点海山区沉积物的研究发现,在 OAE1a 早期, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 先是小幅度降低然后急剧升高。对于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的降低, Jenkyns 等人的解释是在该事件发生初期,海水锶同位素受地幔成因非放射性锶同位素影响较大,有热液源或其他镁铁质火成岩源获得的地幔锶同位素的补充;之后大陆化学风化作用对于锶同位素变化起到了主要作用,即 OAE1a 时期全球温度升高,导致大陆化学风化作用加强,致使锶同位素比值升高^[32-33]。与之相类似, Bralower 和 Fullagar 等^[47]对大西洋地区多个 DSDP 站位的研究发现, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在 OAE1b 时期显著升高,也指示着当时全球温度的升高以及大陆化学风化作用的加强。

Ingram 等^[45]对亚平宁山脉东北部和威尼斯阿尔卑斯山脉地区白垩纪 OAEs 的研究结果显示,在阿普特早期、阿尔布早期以及赛诺曼—土伦期交界的缺氧事件中,整体上 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 都有一定程度的正偏,指示着此时大陆化学风化作用和水文循环的相应加强。其中,在阿普特早期和赛诺曼—土伦期的 OAEs 事件早期, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 有小幅度的负偏移,表明 OAEs 初期海水锶同位素受到了地幔成因非放射性锶同位素的较大影响,即存在热液源或其他镁铁质火成岩源地幔锶同位素的补充。而地幔源非放射性成因的锶同位素可能与海底扩张速率和板块俯冲速率的加快以及大火成岩省的活动有关。如 OAE1a 事件一般认为是与翁通-爪哇太平洋超级地幔柱的喷发活动有关^[6, 36]。而 OAE2 早期海水锶同位素比值的降低也记录到了太平洋、加勒比海等地区广泛分布的海底火山活动^[48]。

5 白垩纪 OAEs 的成因机制

白垩纪 OAEs 的成因机制比较复杂,涉及地球内、外各圈层的共同作用,至今尚无定论。但总体而言, OAEs 的发生可能与大火成岩省的活动密切相关(图 1)。白垩纪海底岩浆的大规模喷发改变了洋盆体

积,引发了海水温度和海平面的升高及全球性的海侵,导致了海陆性质的改变,加强了对太阳辐射的吸收,最终促进了全球大气温度的升高^[49];另一方面由于大规模的火山喷发,引起地球内部大量热能和二氧化碳等温室气体的释放,这也会引起大气温度的升高^[50]。白垩纪中期大气二氧化碳浓度为现今大气二氧化碳浓度的 9 倍,到晚白垩纪尚为现在的 1.5 倍;白垩纪时期全球古海水温度也提高了 3~8°C^[41-43]。大气二氧化碳浓度和海水温度的提高是 OAEs 发生的前提,即两者的升高会共同导致海水中溶解氧含量的下降,是大洋缺氧环境的一个重要原因。同时由于海底大规模火山活动,释放出大量的营养物质进入到底层海水中,而底层海水因为温度的升高又会发生上涌,从而引发海洋中大面积的生物生产力水平的上升^[51];更何况全球气温的上升,还会促进大陆化学风化作用和水文循环,加强陆地营养物质向海洋的输送,这也会使得海洋生物生产力大幅度提高^[52]。海洋生物生产力的提高及其产物的向海底沉降和分解会进一步消耗水体中的氧气,使得海洋中的缺氧环境进一步加剧。海底缺氧环境不利于有机质的氧化,进而使其在海底得以有效埋藏和大量保存,从而形成大洋缺氧时期全球范围内的黑色页岩沉积。

而且白垩纪时期的几次 OAEs 的成因机制也不尽相同。根据碳同位素研究结果可知, OAE1a 事件初期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值负偏,大量富含 ^{12}C 的物质进入海洋-大气系统, Larson 认为这与翁通-爪哇太平洋超级地幔柱的喷发活动有着密切关系^[6]。同时全球大火成岩省的大规模活动以及法拉龙板块向北美板块的俯冲引起的大陆边缘沉积物中天然气水合物的分解^[34]也可能是 OAE1a 事件的诱发原因。上述活动共同作用,导致大量的温室气体——二氧化碳释放到大气中,引起了全球温度的升高以及地表化学风化作用和水循环的加强;同时海洋中营养物质输入量的增加引起了大洋中钙质生物钙化速度的降低和硅质生物的大幅度繁盛,引起了大洋酸化和底层水缺氧,导致了碳酸盐台地的消失和黑色页岩的沉积^[52]。

OAE1b 在成因机制上表现出与 OAE1a 的差异性。OAE1b 事件对应着多期的黑色页岩层, Erbacher 等^[42]通过分析北大西洋西赤道 ODP 1049 站位 OAE1b 段的浮游和底栖有孔虫稳定同位素组成,认为 SST 的升高或者陆地淡水输入的增加,造成了海水分层的加剧,从而使得底层海水缺氧。而法国

Vocontian 盆地 OAE1b 事件的研究结果表明, 该事件可能与海洋生物生产力的提高有关^[53-54]。此外, 根据对西班牙 Basque Cantabrian 盆地 OAE1b 的研究,

Millan 认为径流增加、海平面升高是 OAE1b 事件发生的重要原因^[55]。总之, OAE1b 事件的出现应该与气候变化、生产力和海平面波动等密切相关。

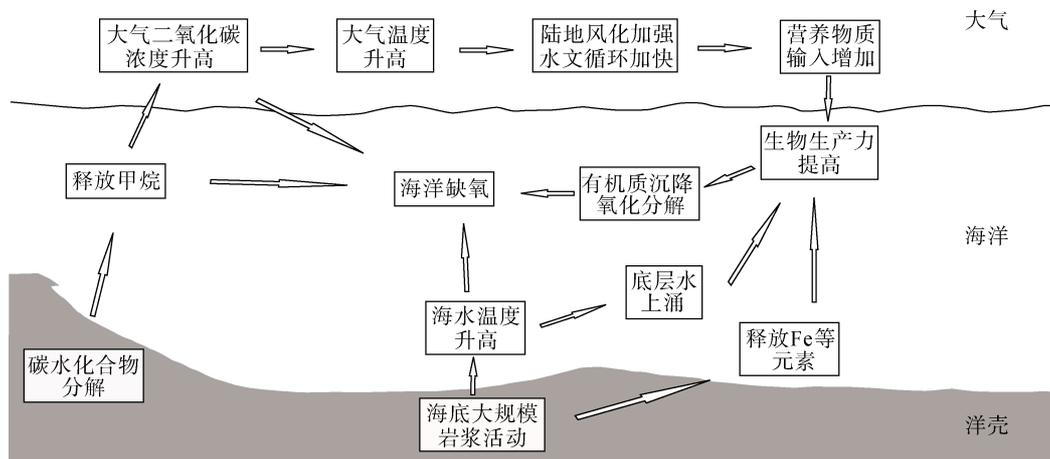


图 1 白垩纪 OAEs 成因模式图^[52]
Fig. 1 Genesis scheme for the Cretaceous OAEs^[52]

OAE2 早期并没有 $\delta^{13}\text{C}$ 的负偏, 表明此时的 ^{12}C 并没有大量进入到海洋-大气系统中, 而是表现为大量有机质在海洋中的形成和快速埋藏。因此 OAE2 的发生可能是由于全球大火成岩省的大规模活动, 释放出大量包括铁元素在内的营养物质到海洋中, 同时底层海水温度的上升还引起了富营养的中层水和底层水的上涌, 从而引发了海洋中大面积的、生物生产力水平的上升^[51]。

6 结论与展望

白垩纪 OAEs 是地质历史上极端气候时期的代表性事件, 将古论今, 通过研究白垩纪时期地球气候重大扰动的过程、成因和影响, 对于了解地球气候系统的运转机制、解决当今世界面临的“全球变暖”问题具有重大意义。白垩纪 OAEs 时期的古海水温度和大气二氧化碳浓度的升高是其发生的前提条件, 锶同位素相对丰度比值在该时期的升高还表明了当时大陆化学风化作用和水文循环的相应增强。由于此时大洋中高的生物生产力水平及缺氧性的海底环境, 使得大量的有机质得以埋藏和保存下来, 因此富含有机质的黑色页岩在全球的广泛分布是 OAEs 的标志性特征。此外, 缺氧事件时期有机质的大量埋藏, 还引起了海水 $\delta^{13}\text{C}$ 的正偏移; 但部分缺氧事件初期的 $\delta^{13}\text{C}$ 也会发生短暂的负偏移, 这与当时大量天然气水合物的分解有关。基于前人的长期研究工作可知, 白垩纪几次 OAEs 的成因虽不尽相同, 但总

体而言主要源自于海底的大规模、剧烈火山活动。

当前对白垩纪 OAEs 研究最为深入的区域为大西洋/特提斯盆地及其周边陆地。但印度洋的相关记录则非常匮乏, 特别是南半球高纬度地区的相关报道迄今未见, 而这主要是由研究材料的限制造成的。即南半球高纬度地区现有的低取芯率 DSDP 和 ODP 钻孔根本无法满足进行当地典型白垩纪 OAEs 研究的需要, 致使许多关键科学问题至今仍无法得到有效的解译。如南半球高纬度地区典型白垩纪 OAEs 期间的静海相状态是持续性的还是短暂性的? 又如南半球高纬度地区典型白垩纪 OAEs 期间所沉积的黑色页岩中是否以微量元素富集的形式记录到了当时的火山活动这一典型白垩纪 OAEs 的潜在驱动机制? 以及南半球高纬度地区 OAE2 中是否存在和北半球地区相同的短期降温事件(Plenus cold event)?

国际大洋发现计划(IODP)于 2017 年底在印度洋东南部执行了 369 航次, 并成功获取了典型白垩纪 OAEs 期间及其前后所形成的高质量、连续长岩芯沉积物, 为追踪南半球高纬度地区典型白垩纪 OAEs 的演化特征、形成机制及其古气候环境效应等提供了绝佳材料。在今后的研究工作中, 我们应重点探讨南半球高纬度地区典型白垩纪 OAEs 的演化历史以及火山活动、陆地风化、生物生产力和洋流循环等关键地质/气候因子在其形成演化过程中的重要性, 进而在与中-低纬度地区相关事件记录间进行系统对比的基础上, 探索典型白垩纪 OAEs 期间不同纬度

地区在生物和地球化学响应上的异同, 最终查明南半球高纬度地区乃至全球范围内典型白垩纪 OAEs 的成因机制及其在全球碳循环中的作用。

参考文献:

- [1] 田军, 拓守廷. 新十年科学大洋钻探: 照亮地球的去、现在和未来[J]. 自然杂志, 2015, 37(4): 239-250.
Tian Jun, Tuo Shouting. New decadal scientific ocean drilling: Illuminating Earth's past, present, and future[J]. Chinese Journal of Nature, 2015, 37(4): 239-250.
- [2] Bickle M, Arculus R, Barrett P, et al. Illuminating Earth's past, present and future: the science plan for the International Ocean Discovery Program: 2013-2023[R]. Washington D C: Integrated Ocean Drilling Program, 2011.
- [3] O'Brien C L, Robinson S A, Pancost R D, et al. Cretaceous sea-surface temperature evolution: Constraints from TEX86 and planktonic foraminiferal oxygen isotopes[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 172: 224-247.
- [4] Royer D L, Pagani M, Beerling D J. Geobiological constraints on Earth system sensitivity to CO₂ during the Cretaceous and Cenozoic[J]. Geobiology, 2012, 10(4): 298-310.
- [5] Wang Y, Huang C, Sun B, et al. Paleo-CO₂ variation trends and the Cretaceous greenhouse climate[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 129: 136-147.
- [6] Larson R L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume[J]. Geology, 1991, 19(6): 547-550.
- [7] Schlanger S O, Jenkyns H C. Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences[J]. Geologie en Mijnbouw, 1976, 55(3-4): 179-184.
- [8] Arthur M A, Jenkyns H C, Brumsack H J, et al. Stratigraphy, geochemistry, and paleoceanography of organic carbon-rich Cretaceous sequences[C]//Ginsburg R N, Beaudoin B. Cretaceous Resources, Events and Rhythms: Background and Plans for Research. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 75-119.
- [9] Wilson P A, Norris R D. Warm tropical ocean surface and global anoxia during the mid-Cretaceous period[J]. Nature, 412(6845): 425-429.
- [10] Robinson S A, Clarke L J, Nederbragt A, et al. Mid-Cretaceous oceanic anoxic events in the Pacific Ocean revealed by carbon-isotope stratigraphy of the Calera Limestone, California, USA[J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(11-12): 1416-1426.
- [11] Jenkyns H C. Geochemistry of oceanic anoxic events[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2010, 11(3): Q03004.
- [12] 陈兰, 夏敏全, 万云, 等. 黑色页岩与大洋缺氧事件研究进展[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2007, 9(4): 1-4.
Chen Lan, Xia Minquan, Wan Yun, et al. Study on black shales and oceanic anoxic events[J]. Journal of Chongqing University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2007, 9(4): 1-4.
- [13] 万晓樵. 白垩纪大洋缺氧事件[J]. 地质科技情报, 1992, 11(1): 35-40.
Wan Xiaoqiao. Introduction to the Cretaceous oceanic anoxic event[J]. Geological Science and Technology Information, 1992, 11(1): 35-40.
- [14] Arthur M A, Sageman B B. Marine black shales: depositional mechanisms and environments of ancient deposits[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1994, 22(1): 499-551.
- [15] Pancost R D, Crawford N, Magness S, et al. Further evidence for the development of photic-zone euxinic conditions during Mesozoic oceanic anoxic events[J]. Journal of the Geological Society, 2004, 161(3): 353-364.
- [16] Dumitrescu M, Brassell S C. Compositional and isotopic characteristics of organic matter for the early Aptian Oceanic Anoxic Event at Shatsky Rise, ODP Leg 198[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 235(1): 168-191.
- [17] Littke R, Sachsenhofer R F. Organic petrology of deep sea sediments: A compilation of results from the Ocean Drilling Program and the Deep Sea Drilling Project[J]. Energy & fuels, 1994, 8(6): 1498-1512.
- [18] Wang C S, Hu X M, Jansa L, et al. The Cenomanian-Turonian anoxic event in southern Tibet[J]. Cretaceous Research, 2001, 22(4): 481-490.
- [19] Erba E. Calcareous nannofossils and Mesozoic oceanic anoxic events[J]. Marine Micropaleontology, 2004, 52(1-4): 85-106.
- [20] Huber B T, Leckie R M, Norris R D, et al. Foraminiferal assemblage and stable isotopic change across the Cenomanian-Turonian boundary in the subtropical North Atlantic[J]. Journal of Foraminiferal Research, 1999, 29 (4): 392-417.
- [21] Bentum E C V, Hetzel A, Brumsack H J, et al. Reconstruction of water column anoxia in the equatorial Atlantic during the Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event using biomarker and trace metal proxies[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2009, 280(3): 489-498.
- [22] 仇晓华, 李铁刚, 南青云, 等. 西太平洋暖池北部 15 万年以来的碳同位素低值事件[J]. 海洋科学, 2014, 38(11): 116-121.
Qiu Xiaohua, Li Tiegang, Nan Qingyun, et al. Carbon isotope minimum events in the northern margin of western Pacific Warm Pool since during the past 150 ka[J]. Marine Sciences, 2014, 38(11): 116-121.
- [23] 胡修棉, 王成善, 李祥辉. 大洋缺氧事件的碳稳定同位素响应[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2001, 28(1): 1-6.

- Hu Xiumian, Wang Chengshan, Li Xianghui. Stable carbon isotope response to oceanic anoxic events[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2001, 28(1): 1-6.
- [24] Arthur M A, Dean W E, Pratt L M. Geochemical and climatic effects of increased marine organic carbon burial at the Cenomanian/Turonian boundary[J]. Nature, 1988, 335(6192): 714-717.
- [25] 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): 1-34.
- [26] 王成善, 胡修棉, 万晓樵, 等. 西藏南部中白垩世 Cenomanian-Turonian 缺氧事件研究[J]. 自然杂志, 1999, 21(4): 244-246.
Wang Chengshan, Hu Xiumian, Wan Xiaoqiao, et al. Mid-Cretaceous Cenomanian-Turonian anoxia event of in South Tibet[J]. Chinese Journal of Nature, 1999, 21(4): 244-246.
- [27] Pratt L M, Arthur M A, Dean W E, et al. Paleo-oceanographic cycles and events during the Late Cretaceous in the Western Interior Seaway of North America[J]. Geological Association of Canada Special Paper, 1993, 39: 333-353.
- [28] Kuroda J, Ogawa N O, Tanimizu M, et al. Contemporaneous massive subaerial volcanism and late cretaceous Oceanic Anoxic Event 2[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 256(1-2): 211-223.
- [29] Frijia G, Parente M. Strontium isotope stratigraphy in the upper Cenomanian shallow-water carbonates of the southern Apennines: Short-term perturbations of marine $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ during the oceanic anoxic event 2[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 261(1-2): 15-29.
- [30] Menegatti A P, Weissert H, Brown R S, et al. High-resolution $\delta^{13}\text{C}$ stratigraphy through the early Aptian “Livello Selli” of the Alpine Tethys[J]. Paleoceanography, 1998, 13(5): 530-545.
- [31] Jenkyns H C. Evidence for rapid climate change in the Mesozoic-Palaeogene greenhouse world[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 361(1810): 1885-1916.
- [32] Jones C E, Jenkyns H C. Seawater strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous[J]. American Journal of Science, 2001, 301(2): 112-149.
- [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, 299(5): 341-392.
- [34] Jahren A H, Arens N C, Sarmiento G, et al. Terrestrial record of methane hydrate dissociation in the Early Cretaceous[J]. Geology, 2001, 29(2): 159-162.
- [35] McElwain J C, Wade-Murphy J, Hesselbo S P. Changes in carbon dioxide during an oceanic anoxic event linked to intrusion into Gondwana coals[J]. Nature, 2005, 435(7041): 479-482.
- [36] 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(6): 663-678.
- [37] Friedrich O, Norris R D, Erbacher J. Evolution of middle to Late Cretaceous oceans: A 55 my record of Earth's temperature and carbon cycle[J]. Geology, 2012, 40(2): 107-110.
- [38] Norris R D, Bice K L, Magno E A, et al. Jiggling the tropical thermostat in the Cretaceous hothouse[J]. Geology, 2002, 30(4): 299-302.
- [39] Wilson P A, Norris R D. Warm tropical ocean surface and global anoxia during the mid-Cretaceous period[J]. Nature, 2001, 412(6845): 425-429.
- [40] Huber B T, Hodell D A, Hamilton C P. Middle-Late Cretaceous climate of the southern high latitudes: Stable isotopic evidence for minimal equator-to-pole thermal gradients[J]. Geological Society of America Bulletin, 1995, 107(10): 1164-1191.
- [41] Forster A, Schouten S, Moriya K, et al. Tropical warming and intermittent cooling during the Cenomanian/Turonian oceanic anoxic event 2: Sea surface temperature records from the equatorial Atlantic[J]. Paleoceanography, 2007, 22: PA1219.
- [42] Erbacher J, Huber B T, Norris R D, et al. Increased thermohaline stratification as a possible cause for an ocean anoxic event in the Cretaceous period[J]. Nature, 2001, 409(6818): 325-327.
- [43] Ando A, Kaiho K, Kawahata H, et al. Timing and magnitude of early Aptian extreme warming: unraveling primary $\delta^{18}\text{O}$ variation in indurated pelagic carbonates at Deep Sea Drilling Project Site 463, central Pacific Ocean[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 260(3): 463-476.
- [44] 韦刚健. 海水中 Sr 同位素组成变化的环境意义与 Sr 同位素地层学[J]. 海洋科学, 1995, 19(1): 23-25.
Wei Gangjian. Evolution of the Sr isotope of the sea-water: Implications for palaeoenvironment and application of the strontiumisotope stratigraphy[J]. Marine Sciences, 1995, 19(1): 23-25.
- [45] Ingram B L, Coccioni R, Montanari A, et al. Strontium isotopic composition of mid-Cretaceous seawater[J]. Science, 1994, 264(5158): 546-550.
- [46] Frijia G, Parente M. Strontium isotope stratigraphy in the upper Cenomanian shallow-water carbonates of the southern Apennines: Short-term perturbations of marine $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ during the oceanic anoxic event 2[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008,

- 261(1-2): 15-29.
- [47] Bralower T J, Fullagar P D, Paull C K, et al. Mid-Cretaceous strontium-isotope stratigraphy of deep-sea sections[J]. Geological Society of America Bulletin, 1997, 109(11): 1421-1442.
- [48] 刘志飞, 胡修棉. 白垩纪至早第三纪的极端气候事件[J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 681-690.
Liu Zhifei, Hu Xiujian. Extreme climate events in the Cretaceous and Paleogene[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(5): 681-690.
- [49] Barron E J. A warm equable Cretaceous: The nature of the problem[J]. Earth-Science Review, 1983, 19(4): 305-338.
- [50] Berner R A. Atmospheric CO₂ over Phanerozoic time[J]. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(20): 10955-10957.
- [51] Meyers S R, Sageman B B, Hinnov L A. Integrated quantitative stratigraphy of the Cenomanian-Turonian Bridge Creek Limestone Member using evolutive harmonic analysis and stratigraphic modeling[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(4): 628-644.
- [52] 黄永建, 王成善, 顾健. 白垩纪大洋缺氧事件: 研究进展与未来展望[J]. 地质学报, 2015, 82(1): 21-30.
Huang Yongjian, Wang Chengshan, Gu Jian. Cretaceous oceanic anoxic events: Research progress and forthcoming prospects[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 82(1): 21-30.
- [53] Erbachen J, Gerth W, Schmiedl G, et al. Benthic foraminiferal assemblages of late Aptian-early Albian black shale intervals in the Vocontian Basin, SE France[J]. Cretaceous Research, 1998, 19(6): 805-826.
- [54] Bréhéret J G. The mid-Cretaceous organic-rich sediments from the Vocontian zone of the French Southeast Basin[C]//Masclé A. Hydrocarbon and Petroleum Geology of France. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994: 295-320.
- [55] Millán M I, Weissert H J, López-Horgue M A. Expression of the Late Aptian cold snaps and the OAE1b in a highly subsiding carbonate platform (Aralar, northern Spain)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 411: 167-179.

A review of Cretaceous ocean anoxia events

FAN Qing-chao^{1, 2, 3}, XU Zhao-kai^{1, 2, 4, 5, 6}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. CAS Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China; 5. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 6. CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China)

Received: Mar. 3, 2019

Key words: Cretaceous; oceanic anoxic events; carbon cycle; paleoenvironment

Abstract: This paper reviews the research progress on Cretaceous oceanic anoxic events (OAEs), focusing on total organic carbon (TOC) content, carbon isotopes, paleotemperature, Sr isotope characteristics, and their potential significance in the paleoenvironment during the periods of OAE1a, OAE1b, and OAE2. The mechanisms of the genesis of Cretaceous OAEs were comprehensively analyzed. The results show that the occurrence of Cretaceous OAEs may be related to large-scale submarine volcanism during these periods and its impacts, which include an increase in atmospheric temperature, massive decomposition of carbohydrates, acceleration of hydrological cycles, and an increase in marine biological productivity. It is of great significance to further study the evolutionary characteristics and genetic mechanisms of Cretaceous OAEs. Moreover, it is found that current research on Cretaceous OAEs mainly focuses on the Atlantic/Tethys Basin and its surrounding lands; a systematic study of Cretaceous OAEs in the high latitudes of the Southern Hemisphere has not yet been conducted. In the future, we will focus on the evolutionary characteristics, genetic mechanisms, and paleoclimatic and environmental effects of the Cretaceous OAEs in the high latitudes of the Southern Hemisphere.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)