

深海氧同位素第 3 阶段 古气候—海平面变化研究进展

仇建东^{1,2}, 刘 健^{1,2}, 白伟明²

(1 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

2 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘 要:根据近年来的主要研究成果, 简要综述了深海氧同位素第 3 阶段(MIS 3)气候—海平面变化特征及其沉积记录的研究进展。MIS3 期间的气候变化是古气候研究中的重要组成部分, 该时段的某些气候特征与现今十分类似。取自极地冰心、海洋沉积物和陆地的古气候记录表明, 在 MIS3 阶段全球经历了一系列数百年至千年时间尺度的快速气候突变事件, 其成因、机制和影响范围还存在明显的不确定性。利用深海沉积物的氧同位素、珊瑚礁阶地、陆源碎屑沉积记录分析得出的 MIS3 古海平面高度偏差较大, 主要认为在 -50~-90 m 之间波动, 但也有研究表明 MIS3 海平面可达 -15~-20 m。对 MIS3 古气候和海平面变化的深入研究, 有赖于全球范围内更多不同类型和高分辨率的地质记录所提供的证据。

关键词:MIS3; 气候突变事件; 海平面变化; 沉积记录

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

距今 60~25 ka 的深海氧同位素第 3 阶段(MIS 3)^[1]是末次冰期中一个特殊时期, 气候条件极不稳定, 存在多次气候突变事件, 该时段的某些气候特征与现代存在一定的相似性。MIS3 古环境格局介于末次冰盛期(LGM)和全新世适宜期之间, 许多特征与现在十分类似, 如这个时期的沙漠分布也更接近于现代^[2]。MIS3 的古海面高度是近年来全球变化研究的热点问题, 但限于研究手段和方法, 研究结论远未达成共识。随着近代全球气候的变暖, MIS3 古气候、海平面变化特征已然成为全球变化研究的热点之一。

1 MIS3 古气候变化及其沉积记录

近年来, Antje 等^[3]对来自全球冰心、陆地和海洋的 MIS3 气候记录进行了分类和总结, 发现全球现有 183 个 MIS3 的气候记录, 空间分布上主要集中于北半球。海洋中的 MIS3 阶段气候记录几乎是陆地和冰心中的 2 倍, 海洋中共 119 个, 集中在北大西洋区域; 陆地上 51 个, 集中在西欧、美国西部和中国, 其中大部分集中在中国的黄土高原, 对于这种千年尺度变化的气候记录, 黄土是最好的记录者, 因此, 国内外学者对黄土做了大量的研究^[4,5]。冰心中气候记录主要来自格陵兰和南极冰川, 如 GRIP 冰心^[6]、GRIP2 冰心^[7]和南极的 Vostok 冰心^[8], 唯一的一个“热带”冰心是古里雅冰心^[9]。除此之外, 在中国南方石灰岩洞穴中的石笋也有 MIS3 阶段的气候记录^[10]。

收稿日期:2012-10-08

基金项目:地质调查专项(GZH201200505)

作者简介:仇建东(1983—), 男, 博士, 主要从事海洋沉积地质与第四纪地质的研究工作。Email:jiandongqiu@163.com

MIS3 阶段发生了多次气候快速变化事件,具有高度的不稳定性和周期性波动的特征。据研究,MIS3 时全球气候处于弱暖期,全球气温较此前的 MIS4 和其后的 MIS2 均有所升高,但上升的幅度很小,远未达到末次间冰期的水平^[11,12]。在末次冰期中,全球气温的峰值出现在 MIS3 的早期(3c 阶段),MIS3 晚期(3a 阶段)的气温增加较弱。在古里雅冰心中,MIS3(58~32 ka BP)则出现异常高温, $\delta^{18}\text{O}$ 值高于现代^[18]。换言之,MIS3 阶段在古里雅冰心的大部分即 MIS3c 与 3a 温度已经高出现代 3℃和 4℃,达到间冰期程度,而中期 MIS3b 阶段又相当寒冷,低于现代 5℃。古里雅冰心中 MIS3b 冷阶段开始于 54 ka BP, $\delta^{18}\text{O}$ 值从-13‰下降至-17‰,相当于降温 6℃,以后又有所回升,至 45 ka BP 时更降至-19‰,即较 MIS3c 降了 8℃左右,以后转为升温,至 40 ka BP 时 $\delta^{18}\text{O}$ 值上升至-12‰,相当于升温 9℃左右,转入 MIS3a 暖阶段。

施雅风等^[5,13]综合冰心及众多湖泊、孢粉记录与现在重复水准测量,认为青藏高原在 40~30 ka BP 时可能比现在低 100~200 m,而气温高出现代 2~4℃,当时青藏高原与西北干旱区有许多淡水大湖,降水量远比现代丰沛,比现代多 40%以至更多,即 40~30 ka BP 的“高温大降水事件”,代表着一次特强的夏季风事件,推测其动力有两个来源:一是高原夏季低气压强盛,增大了对夏季风的吸引力;二是热带洋面的旺盛蒸发,助长了西南季风携带丰富水汽吹越青藏高原^[14]。

根据格陵兰冰心氧同位素记录的研究,在 MIS5—MIS2 期间共出现了 24 个快速的气候变暖事件,即 Dansgaard-Oeschger(D-O)事件,这些事件导致气温变化幅度达到 5~8℃,每一个暖期之后紧接着一个冷期,并以 1~3 ka 为周期^[6]。Heinrich(1988)在大西洋东北部深海沉积物岩心中首次发现冰筏沉积物,代表了“融冰事件”,被称为“Heinrich 事件”,它们在 70~10 ka BP 一共出现了 6 次,其中在 MIS3 出现了 3 次。Heinrich 事件发生在 D-O 旋回的最冷期。除北大西洋外,Heinrich 和 D-O 事件在地中海^[15]、西北太平洋的海洋沉积记录^[16]与欧洲^[17]和北美^[18]的孢粉记录以及中国的黄土记录^[19,20]和石笋记录^[10]中都有体现。

2 MIS3 海平面变化及其沉积记录

要重建 MIS3 阶段内的海平面变化历史,必须依赖于与海平面变化关系密切的海洋沉积地质记录,主要包括:深海有孔虫氧同位素记录、被动大陆边缘或大洋岛屿附近的珊瑚礁阶地以及被动大陆边缘形成于海平面附近的陆源碎屑沉积。由于其内在的不确定性和研究方法的不同,各国学者计算出的 MIS3 期古海面高度的估算值差别很大,结果也颇具争议。

利用一系列钻孔建立的综合性的深海岩心氧同位素标准化 SPECMAP 曲线显示^[11],在 MIS3 时期,海面最低高度在-85 m 左右;Shackleton^[21]通过分析计算东太平洋 V19-30 孔的氧同位素记录,认为 MIS3 期间海平面为-75 m,这与从巴布亚新几内亚 Huon 半岛上珊瑚礁阶地计算的在 44 ka BP 时海平面为-73~-55 m 的估算值相一致^[22]。Huon 半岛位于赤道附近,该地区的流体均衡效应和全球重力效应对海平面变化的影响很小,被认为适宜于研究晚第四纪海平面变化,由其推算的海面变化基本能够代表全球模式。

Linsley^[23]通过研究苏禄海 ODP769 站浮游有孔虫的氧同位素记录发现,在整个 MIS3 期内 $\delta^{18}\text{O}$ 值相比 SPECMAP 曲线的对应值低 0.5‰,因此,认为 MIS3 期间海平面位置为-50~-40 m。Cabioch^[24]根据西南太平洋马拉库拉岛(Malakula)上抬升的珊瑚礁阶地分析认为,MIS3 高海面时期即 45~50 ka BP,海平面位于现今海平面以下-30~-60 m,这与在中国的渤海地区通过层序地层揭示的 MIS3 海平面在-35~-60 m 之间变化是一致的^[25]。

此外,也有研究表明,MIS3 海平面高度可达-15~-20 m,在东南亚^[26]、欧洲、澳大利亚、北美等地区都发现有类似的海平面高度。Mauz 等^[27]通过研究意大利南部沿岸沉积物阶地认为,在 MIS3 阶段海平面可达到-15 m 的位置;澳大利亚南部陆架碳酸盐沉积中的贝类壳体的年代学研究揭示,MIS3 阶段的海平面高度是-22~-29 m^[28];日本 Boso 半岛的上升台地区河口和火山灰沉积研究显示,在 MIS3 阶段的海平面高度是-22~-34 m^[29];根据水下地层地震反射和沉

积物年代学的研究, Suter 等提出在 MIS3 时期在路易斯安那州沿岸的海平面高度是 -20 m ^[30]。

Rodriguez 等^[31]结合德克萨斯州陆架区已建立的地层框架结构和 MIS3 阶段的古环境图, 利用新的高分辨率地震剖面, 对 MIS3 的最大海泛面进行了连续追踪, 认为 MIS3 阶段形成的障壁岛的残留沉积物, 即现在的 Freeport Rocks 海底高地, 基本代表了当时的古海岸线位置。Freeport Rocks 海底高地目前水深 -18 m , 经过构造沉降校正, Rodriguez 认为 MIS3 的最高海平面位置达 $(-15 \pm 2)\text{ m}$ 。然而, Simms^[32]等对该观点提出了质疑, 他认为 MIS3 阶段内的¹⁴C 测年接近该测年方法的极限, 不能对地层年龄进行有效控制, 所以对取自 Freeport Rocks 海底高地的柱状样沉积物用了光释光(OSL)测年, 年龄为 $(90.7 \pm 5.5)\text{ ka}$, 因此, 他认为海底高地是 MIS5a 阶段的沉积物, 代表的是 MIS5a 时的古海岸线位置; 不过他利用研究区 MIS3 古三角洲的高度, 认为当时的海平面位置可达 $(-42.8 \pm 6.7)\text{ m}$ 。

最近, Chappell^[33]根据在巴布亚新几内亚 Huon 半岛抬升珊瑚礁平台系列多年的研究成果, 指出 $30 \sim 65\text{ ka}$ 之间的海平面变化与气候变化有密切的关系, 存在 $6 \sim 7\text{ ka}$ 的海平面变化周期。每个周期的结束是持续 $1 \sim 2\text{ ka}$ 的 $10 \sim 15\text{ m}$ 的海平面上升事件, 然后是一个较长时间的海平面下降; Huon 半岛海平面变化珊瑚礁记录的 38 ka BP 、 44.5 ka BP 和 $58 \sim 60\text{ ka BP}$ 是海平面变化 $6 \sim 7\text{ ka}$ 周期结束时段, 与 Shackleton^[34]等在大西洋 MD95-2042 孔的氧同位素记录一致, 气候变化也存在 $6 \sim 7\text{ ka}$ 的变化周期。两者的研究证实, $30 \sim 65\text{ ka BP}$ 海平面上升与气候增温、北大西洋 Heinrich 事件相当一致, 说明在 MIS3 阶段的海平面变化方式是周期性的升降变化。

在中国的沿海平原、黄渤海以及东海地区都保存了 MIS3 的沉积记录。苏北平原西部宝应 By1 钻孔岩心沉积记录了 MIS3 阶段海侵事件, 最明显的是深度约 $19 \sim 26\text{ m}$ 的层段, 其¹⁴C 年代在距今 $26 \sim 39\text{ ka}$ 之间, 沉积相为半封闭的潟湖相和潮滩相, 微体古生物组合特征指示为咸水环境, 该孔距离目前海岸线 120 km , 是迄今为止苏北平原向陆伸进最远的 MIS3 阶段海相沉积记录^[35]。在华北, 该期海侵称为献县海侵, 渤海西

岸该时期海相地层降至 -30 m 左右^[36]。这次海侵地层中暖水种较多^[37], 海侵范围较大。在长江三角洲的太湖、上海等地区, 通过钻孔都发现有 MIS3 晚期海侵沉积层, 并且 MIS3 海侵为该地更新世以来的最大海侵, 当时海平面高度达 -10 m 左右, 洪水位高达 $-2.50 \sim -6.63\text{ m}$ ^[38]。根据浅地层剖面和钻孔岩心资料, Liu 等揭示出在南黄海的南部有一个大型古三角洲^[39]。从时间上看, 该三角洲要早于末次冰期最盛期下切谷的形成时间, 但要晚于 MIS5 陆架冷水团沉积和 MIS4 海平面下降时期。古三角洲表面古水深 $(25 \sim 50\text{ m})$ 可视为在该三角洲形成时期海平面高度的最小值, 考虑到 MIS3 海平面变化, 可以把该古三角洲的发育时间限定在 MIS3。同时, 浅地层剖面和钻孔资料还揭示了 MIS3 在东海的内陆架和大陆架发育一个大型海岸平原—三角洲复合体系^[40,41], 长江是该三角洲的骨干河道。

3 研究展望

在深海沉积物、冰心、黄土、石灰岩洞穴中石笋等地质记录中, 都有 MIS3 古气候变化的体现, 但各种记录分布不均, 分辨率和所反映环境的真实程度差别较大, 应谨慎对待。同时, 同一气候事件在不同地区的地质记录中强弱和时间都有较大的差异, 反映了不同地区对气候突变的敏感性。通过剖析 MIS3 气候波动的规律及其与全新世乃至现今的气候变化有什么异同, 对于了解现今气候所处的位置和未来气候发展方向有着积极的启示意义。

MIS3 阶段内的气候突变事件很难用米兰科维奇地球轨道理论解释, 对这些短期气候变化的研究, 更有利于人们认识地球的环境系统, 并对未来的全球变化做出正确的预测。关于 MIS3 古海面高度, 仅根据任何一种记录, 均难以得出对全球海平面变化的完整认识, 因此, 需要将这些记录综合起来分析, 即综合利用来自被动大陆边缘、碳酸盐环礁、深海氧同位素记录 3 方面的资料来研究海平面变化。总之, 对 MIS3 古气候和古海平面变化的深入研究, 有赖于全球范围内更多不同类型和高分辨率的地质记录所提供的证据。

参考文献:

- [1] Siddall M, Rohling E J, Thompson W G, et al. Marine isotope stage 3 sea level fluctuations: Date synthesis and new outlook[J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46: RG4003, doi: 10.1029/2007RG000226.
- [2] 秦小光, 蔡炳贵, 刘东生. 深海氧同位素第 3 阶段时期东亚季风区大气湍流特征[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 31-40.
- [3] Antje H L V, Workshop participants. Global distribution of centennial-scale records for Marine Isotope Stage (MIS) 3: A database[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(10): 1 185-1 212.
- [4] 李玉梅, 刘东生, 吴文祥, 等. 黄土高原马兰黄土记录的 MIS3 温湿气候[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 69-76.
- [5] 施雅风, 于 革. 40~30 ka BP 中国暖湿气候与海侵的特征和成因探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 1-11.
- [6] Dansgaard W, Johnsen S, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice core record[J]. *Nature*, 1993, 364: 218-220.
- [7] Groote P M M, Stulver J W C, White S, et al. Comparison of oxygen isotope records from GRIP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. *Nature*, 1993, 366: 551-554.
- [8] Jouzel J, Lorius J C, Petit J R, et al. Vostok ice core: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle(160,000 years)[J]. *Nature*, 1987, 329: 403-408.
- [9] Yao T, Thompson L G, Shi Y, et al. Climate variations since the Last Interglaciation in the Guliya ice core[J]. *Science in China, Ser D*, 1997, 40(6): 662-668.
- [10] 汪永进, 吴江莹, 吴金全, 等. 末次冰期南京石笋高分辨率气候记录与 GRIP 冰心对比[J]. *中国科学(D 辑)*, 2000, 30(5): 533-539.
- [11] Imbrie J, Hays J, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: Support for a revised chronology of the marine delta ^{18}O record[C]//Berger A J, Hays J, Kukla G, et al, eds, *Milankovitch and Climate, Part I*. Reidel, Dordrecht, 1984: 269-305.
- [12] 施雅风, 刘晓东, 李炳元, 等. 距今 40~30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系[J]. *科学通报*, 1999, 44(14): 1 475-1 480.
- [13] 施雅风, 赵井东. 40~30 ka BP 中国特殊暖湿气候与环境的发现及研究过程的回顾[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 1-10.
- [14] Shi Y F, Liu X D, Li B Y, et al. A very strong summer monsoon event during 30~40 ka BP in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its relation to precessional cycle[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(20): 1 851-1 857.
- [15] Cacho I, Grimalt J O, Pelejero C, et al. Millennial scale climatic changes in the W-Mediterranean Sea: Implication for the ocean-atmosphere connections[J]. *Journal of Conference Terra Abstracts*, 1999, 4: 166.
- [16] Tada R, Irino T, Koizumi I. Land-ocean linkages over orbitaland millennial timescale recorded in late Quaternary sediments of the Japan Sea[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14: 236-247.
- [17] Thouveny N, de Beaulieu J L, Bonifay E, et al. Climate variations in Europe over the past 140 ka deduced from rock magnetism[J]. *Nature*, 1994, 371: 503-506.
- [18] Benson L W, Lund S P, Burdett J W, et al. Correlation of late Pleistocene lake-level oscillation in Mono lake, California, with North Atlantic climate events[J]. *Quaternary Research*, 1998, 49(1): 1-10.
- [19] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. *Nature*, 1995, 375: 305-308.
- [20] Parker E, Bloemendal J, Heslop D, et al. Sub-millennial scale variations in the east Asia monsoon system recorded by dust deposits from the north-western Chinese loess plateau[J]. *Journal of Conference Terra Abstracts*, 1999, 4: 160.
- [21] Shackleton N J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6: 183-190.
- [22] Chappell J, Omura A, Esat T, et al. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 141: 227-236.
- [23] Linsley B K. Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150 000 years[J]. *Nature*, 380: 234-237.
- [24] Cabioch G, Ayliffe L K. Raised coral terraces at Malakula, Vanuatu, southeast Pacific, indicate high sea level during marine isotope stage 3[J]. *Quaternary Research*, 2001, 56: 357-365.
- [25] Liu J, Satio Y, Wang H, et al. Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36: 318-331.
- [26] Hanebuth T J, Satio Y, Tanabe S, et al. Sea levels during late marine isotope stage 3 (or older) reported from the Red River delta (northern Vietnam) and adjacent regions [J]. *Quaternary International*, 2006(145-146): 119-134.
- [27] Mauz B, Hassler U. Luminescence chronology of Late Pleistocene raised beaches in southern Italy: new data of relative sea-level changes[J]. *Marine Geology*, 2000, 170: 187-203.
- [28] Cann J H, Belperio A P, Murray-Wallace C V. Late Quaternary paleosealevels and paleoenvironment inferred from Foraminifera Northern Spencer Gulf, South Australia[J]. *Journal of Foraminiferal Research*, 2000, 30: 29-53.
- [29] Kuwabara T, Kikuchi T, Suzuki T, et al. Terraces and sea

- level estimate from oxygen isotope stage 3 in the lower Isumi River Basin, Boso Peninsula, Central Japan[J]. Quaternary Research, 1999, 38: 313-326.
- [30] Suter J R, Berryhill H L, Penland S. Late Quaternary sea-level fluctuations and depositional sequence, South West Louisiana continental shelf[C]// Nummedal D ed, Sea-level Change and Coastal Depositional Systems Architecture. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1987: 199-219.
- [31] Rodriguez A B, Anderson J B, Banfield L A et al. Identification of a 15m middle Wisconsin shoreline on the Texas inner continental shelf[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 158: 25-43.
- [32] Simms A R, Dewitt R, Rodriguez A B, et al. Revisiting marine isotope stage 3 and 5a (MIS3-5a) sea levels within the northwestern Gulf of Mexico[J]. Global and Planetary Change, 2009, 66: 100-111.
- [33] Chappell J. Sea level changes forced ice breakouts in the last glacial cycle: New results from coral terraces[J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21: 1 229-1 240.
- [34] Shackleton N J, Hall M A, Vincent E. Phase relationships between millennial scale events 64 000 to 24 000 years ago [J]. Paleoceanography, 2000, 15: 565-569.
- [35] 张振克, 谢 丽, 张云峰, 等. 苏北平原 MIS3 阶段海侵事件的沉积记录[J]. 第四纪研究, 2010, 30(5): 883-891.
- [36] 杨子康, 林和茂. 中国第四纪地层与国际对比[M]. 北京: 地质出版社. 1996: 16-30.
- [37] 郑守仪, 郑执中. 山东省打渔张灌区第四纪有孔虫及其沉积环境的初步探讨[J]. 海洋科学集刊, 1978, 13: 16-30.
- [38] 杨达源, 陈可锋, 舒肖明. 深海氧同位素第 3 阶段晚期长江三角洲古环境初步研究[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 525-530.
- [39] Liu J, Saito Y, Kong X, et al. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2010, 278: 54-76.
- [40] Saito Y, Katayama K, Ikehara K, et al. Transgressive and highstand systems tract and post-glacial transgression, the East China Sea[J]. Sedimentary Geology, 1998, 122: 217-232.
- [41] Wellner R W, Bartek L R. The effect of sea level, climate, and shelf physiography on the development of incised-valley complexes: A modern example from the East China Sea [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73: 926-940.

PROGRESS OF THE STUDIES OF PALEOCLIMATE AND SEA LEVEL CHANGES IN THE MARINE OXYGEN ISOTOPE STAGE 3

QIU Jiandong^{1, 2}, LIU Jian^{1, 2}, BAI Weiming²

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology,
Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;
2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: This paper attempts to summarize the recent progress of the studies of paleoclimate and sea level changes and their sedimentary records during the period of the marine oxygen isotopic stage 3 (MIS 3). The paleoclimatic change during the MIS 3 is an important topic of the global paleoclimate research, since some of its characteristics are similar to those of today. All the evidence from ice cores and oceanic and terrestrial deposits indicates that the Earth's climate system experienced a series of rapid changes during that period on centennial to millennial timescales. However, the causes, mechanisms and impacts of these abrupt climatic events remain uncertain. The sea levels in MIS 3 estimated from marine oxygen isotopes, coral reef terraces and terrigenous clastic sedimentary records are quite deviated. The majority of the researchers believes that the sea level fluctuation during that period were in a range of -50 to -90 m, but another school suggests that it was -15 to -20 m only, much less than the previous estimation. In-depth researches of paleoclimate and sea-level changes in the future are required based on more high-resolution evidence from various channels in a global scope.

Key words: MIS 3; paleoclimatic change; sea level change; sedimentary records