

气候与环境演变中的非线性关系—— 以末次冰期为例*

汪品先

(同济大学海洋地质系)

内容提要 通过末次冰消期国内外实例,说明在气候和环境演变中广泛存在非线性关系,简单地按辐射量增大→气温增高→海面上升→岸线后退视作线性系统,会导致错误的模式和错误的预测。由于非线性反馈的结果,当末次冰消期辐射量最大时,反而出现新仙女木期突然变冷事件,在我国也已发现相应或近似事件的证据;冰后期海面随气候转暖的上升,同样也包含曲折和反复;海面上升在某些河口可以促使沉积加速,岸线并不向后退。

主题词 非线性关系 末次冰消期 新仙女木期 古气候

一、引言

地球的气候、环境是个结构复杂,层次繁多的反馈系统,其中每一项参数的变化都受着不止一种因素的控制。而在古气候、古环境研究中,我们却往往只考虑单项因素的控制关系,并且还是简单的比例关系。我们习惯于按“指温种”的含量推算古温度,而很少考虑到还有许多其他生态因素在影响其含量;习惯于用砂泥岩比值指示古深度,却不大注意到在水体复杂的流场中水动力并非是水深的简单函数。于是,在环境参数与替代性标志之间,在任意两种相关的变量之间,往往按假定的线性关系加以处理。如果说,当研究目标只是求某种粗略的近似值时,这种处理有时也还过得去,甚至当资料缺乏时还是唯一可行办法的话,那么在“全球变化”研究中便不能适用。以气候、环境预测为目标的“全球变化”研究,要求在高分辨率的时间序列里求取定量数据,提出和检验数值模式。为此,就必须意识到气候和环境都不是线性系统,其中每一项变化都可能引起一系列的非线性反馈。忽视这种复杂的关系,依靠简单化的线性模式进行预测,就会导致错误的结论和对策。

当我们讨论人类活动给自己生存环境带来的威胁,即 CO_2 增多→气温增高→海面上升→岸线后退这一系列可能的变化时,就必须充分考虑其中的非线性关系。由于对全球气候和环境变化不可能进行实验,就要从过去的(历史与地质)记录和现代的观测中求取规律、检验模式,识别其中的非线性关系。在大约 14 000—6 000a.B.P. 之间的末次冰消期^[1](或称“冰期-全新世过渡期”,约 15 000—8 000a.B.P.^[2]),提供了这种研究的最佳材料。在这 8 000 年里,北半球厚近 3 000m 的大陆冰盖融化消失,世界洋面上升近百米,大气中

作者简介:汪品先 男 54岁 教授 海洋微体古生物学与古海洋学专业

* 国家自然科学基金和国家海洋局科技发展基金联合资助项目。

CO₂浓度增加约1/3。近年来的研究表明,在这段环境剧变的时期里充满着非线性关系的实例:辐射量增长时,气温也可以回降;气温升高时,海面也不一定上升;海面上升的结果,岸线也不见得都会后退。

二、辐射量与气温

第四纪冰期-间冰期旋回的原因,主要在于地球轨道几何形态的波动,造成太阳辐射量的周期性变化。这种米兰科维奇周期的学说,已被广泛接受。近年来进一步的研究发现,这种天文机制引起的线性反应,只能解释气候变化总量中的一部分,其余的部分除随机机制外,应归因于气候系统内部的非线性反馈^[1]。比如更新世冰期旋回总是冰盖增长过程慢、消融过程快,与米兰科维奇周期的线性效果不相一致,就需要用冰盖消融时基底反弹的迟慢、海边冰山的消融以及大气中CO₂的增加等各种非线性反馈的加速作用来解释^[1]。

在末次冰消期,也存在着“非米兰科维奇气候偏移”^[2]。末次冰消期的气候变化、冰盖融化,可以考虑有三种模式:逐渐连续变化的平滑模式(图1A),中间一度停顿的阶段模式(图1B),以及转暖过程中一度反复、短暂变冷后继续升温的新仙女木模式(图1C)^[1]。按照米兰科维奇理论的计算,北半球高纬度区夏半年辐射量最大值在11 000—10 000a B.P.(图2A),由此产生的冰盖融化过程应当符合平滑模式(图2B),但实际在北欧与北大西洋均呈阶段模式或新仙女木模式^[1](图2C),说明在辐射量与气温之间有明显的非线性关系。

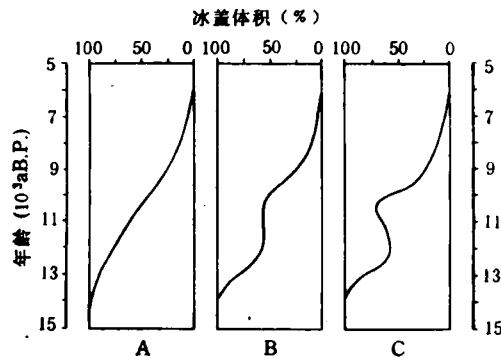


图1 末次冰消期的三种模式(示冰盖体积变化)^[1]

A. 平滑模式 B. 阶段模式 C. 新仙女木模式

新仙女木期(Younger Dryas)是约11 000—10 000a.B.P.期间一次气温骤降的短暂事件,系末次冰消过程中非线性反馈的结果。这次突然变冷事件最初根据古植物特征在丹麦发现,以后在45°N以北的北大西洋及其两侧欧美陆地均有报道^[3]。在北欧,曾有冰川重新扩大的证据发现,但据研究北美冰盖并未有相应扩大的迹象(图2B)^[1]。至于末次冰消期出现新仙女木期这种短期回返现象的具体原因,至今仍在争论中,关键在于这究竟是全球性现象还是局限于北大西洋北区。作为区域性现象,可能是北美冰盖融蚀后退引

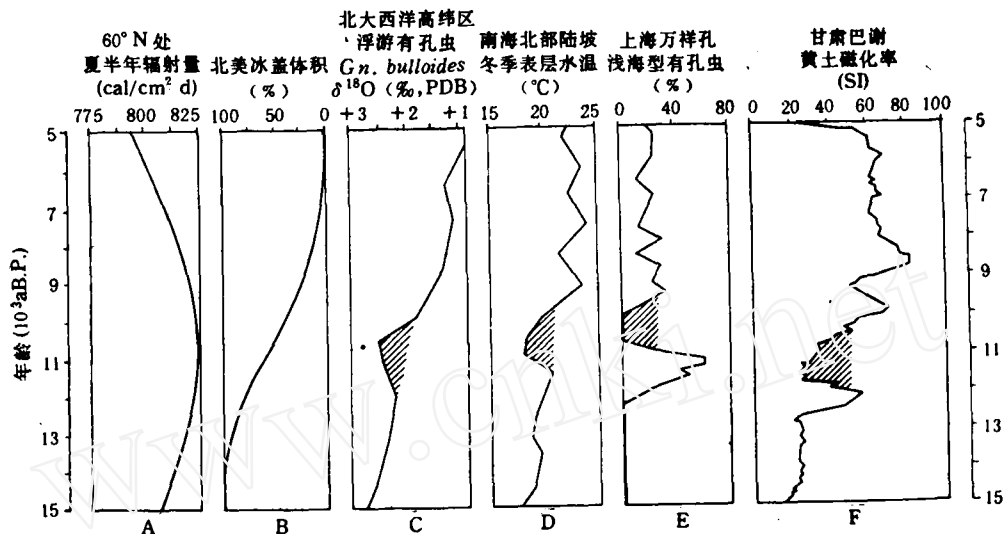


图 2 末次冰消期转暖过程中的非线性关系

- A. 60°N 处夏半年平均辐射量(理论计算值)^[1] B. 北美冰盖体积缩小过程(可能性较大的模式)^[1]
 C. 北大西洋高纬区 CH73139 柱状样浮游有孔虫 *Globigerina bulloides* 壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(‰, PDB, 据 Duplessy *et al.*^[4] 改绘) D. 南海北部陆坡下段表层海水冬季古温度, 据 V36-06-3 柱状样浮游有孔虫转换函数计算结果(年代按 $\delta^{18}\text{O}$ 分期及按沉积速率内插法推得) E. 长江三角洲东端(上海南汇县万祥钻孔)地层中浅海相分子占有孔虫全群百分含量图(反映海面变化) F. 甘肃巴谢黄土剖面磁化率曲线^[5] D-F 三剖面测年工作仍在进行, 此处所示仅系初步推算结果

画阴影区表示新仙女木期或相近事件 注: 1cal = 4.1868J

起河流改道, 融冰淡水直接注入北大西洋, 使洋面盐度降低、冰点上升, 以致海冰剧增、温度回降, 或者是北冰洋、挪威海冰盖崩解, 大量冰山漂入北大西洋所致^[7]。然而, 近年来新仙女木或相近的事件在印度洋、南美洲、新西兰, 甚至南极冰盖的气候记录中都有发现^[2,7]。同时, 格陵兰冰芯的分析表明, 新仙女木期大气 CO_2 含量由 300ppm 降至 250ppm, 然后又迅速回到 300ppm^[7], 虽然 CO_2 变化的因果关系并不清楚, 但可以解释新仙女木事件可能的全球性分布。现在, 世界大洋储存的碳是大气的 55 倍, 大气中 CO_2 的浓度与大洋储存的 CO_2 保持平衡^[8], 与大洋的初始生产力、含 CaCO_3 生物的产生、沉降和溶解都有密切的联系^[3]。因此, 理解新仙女木事件和 CO_2 浓度变化的原因, 钥匙可能在于大洋。很可能是融冰淡水注入大洋, 导致洋流格局改组, 减弱或停止北大西洋深层水的形成, 甚至改变整个太平洋与大西洋水、气相互交换的总模式^[2,6,9], 不过北大西洋深层水当时是否确曾减少或停止产生, 这种古海洋学的变化对北大西洋以外的影响如何, 至今尚有争论^[10,11]。

相当或类似新仙女木期的末次冰消期非线性反馈事件, 在我国也有发现。最近我们对南海北部陆坡的 V36-06-3 柱状样 (19°00.5'N, 116°05.6'E, 水深 2 809m), 在原来研究的基础上^[12-14] 对其上部以 5cm 的间距加密分析, 用转换函数法从浮游有孔虫定量数据求出冬、夏表层海水古温度, 结果冬季水温曲线在氧同位素 1 期之初显示出急剧的温度下降和回升事件(图 2D), 很可能是新仙女木期的反映。此外, 长江三角洲东端钻孔中的有孔虫化石群, 显示出一次海侵过程中的短暂反复(详见后, 图 2E); 甘肃巴谢黄土剖面的磁化率曲线, 在大约 12 000a.B.P. 开始有过一次突然的下降(图 2F)^[5]; 内蒙古岱海湖水

位,在 10 500a.B.P. 前后也曾发生急剧的下降和回升,这些都可能与新仙女木期相近或相当,至少表明末次冰消期的回暖过程在我国也是充满着非线性反馈的气候事件。

三、气温与海面

冰后期的世界洋面上升,主要是气温回暖、冰盖融化的结果,但是,温度与海平面之间又不是简单的线性关系。即使早在五六十年代提出的各种所谓全球海面变化曲线^[15]也包含有多次的停顿或者回降;70年代以来考虑到冰圈、水圈和岩石圈的均衡代偿作用,考虑到大地水准面和“动态海面”的因素,已经认识到世界各地的冰后期海面变化曲线各不相同,过程中有着复杂的非线性关系^[16,17]。

气温与海面之间的非线性关系,从理论上讲是十分明显的,只用融冰过程为例便足以说明。笼统说来,气温越暖冰盖越小、海面越高,如果当今世界的两大冰盖(南极和格陵兰)全部融去,世界洋面可望上升 66m。但具体说来,情况复杂得多。格陵兰冰盖体积大约只相当南极冰盖的十分之一,温度却比南极冰盖高得多。如果今后由于大气中 CO₂ 浓度的增加,使地球上的年平均气温上升 3℃,格陵兰冰盖就会因融蚀量大于加积量而逐渐缩小;相反,南极气温甚低,即使上升 3—4℃ 也不足以使冰盖融化,反而因大气中含水量随温度而增高,会使降雪量加大而增加冰盖的体积^[18]。在预测下世纪世界洋面变化时要充分考虑到这种关系,在研究末次冰消期气候与环境记录时也要十分留心这种关系。

果然,在长江三角洲东端,上海南汇县东南的东海农场和万祥镇钻孔中,都在硬粘土层之上埋深 25m 左右处发现含正常海相有孔虫群的薄层,其上被不含海相化石的地层覆盖,有孔虫群中浅海相分子占全群百分比值曲线明显地表示出这是海侵过程中一次短暂的反复(图 2E),可能是海面上升进程中相当于新仙女木期的突然回降。尽管此层的确切年龄尚待进一步厘定,末次冰消期中海面上升中非线性关系的存在已不容置疑。

四、海面与岸线

海面上升,自然会引起海水入侵陆地,岸线相应向陆退移。然而,岸线的进退一方面固然受海面高低与风暴潮多寡等边界条件的控制,另一方面又受沉积平衡系统内部的调节^[19]。换言之,岸线位置并不是海面升降的线性函数,在一定条件下,沉积作用的加速可以抵消海面上升的影响。末次冰消期里已有这种先例。

澳大利亚北部澳北区的南阿利盖托(South Alligator)河泛滥平原,属冰后期海侵范围。在 8 000—6 000a.B.P. 期间,海面上升 12m,理应导致岸线大幅度后退,但因同时沉积加速,在河口内堆积了 8—14m 厚的红树林沼泽沉积^[20],使得 7 000—6 000a.B.P. 的海面上升速度与沉积物堆积速度持平(图 3)。这种沉积速率的加快,本身就是海面上升的非线性反馈。南阿利盖托河长百余公里,集水面积不过 9 000km²,年输沙量仅 40 000t,比上述红树林沼泽的堆积速率差两个数量级。因此,大部分沉积物源自海区,海面上升时河口外的浅海区有大量可供搬运的泥沙,随着潮流大量进入这个强潮河口(半日潮,潮差 6 m)。旱季时,淡水径流几乎完全消失,加以受热带强烈蒸发作用的影响,使进入河口的涨

潮水远远多于退出河口的落潮水,于是潮水携来的海上泥沙在河口迅速堆积,抵消了海面上升造成的海侵¹⁾。

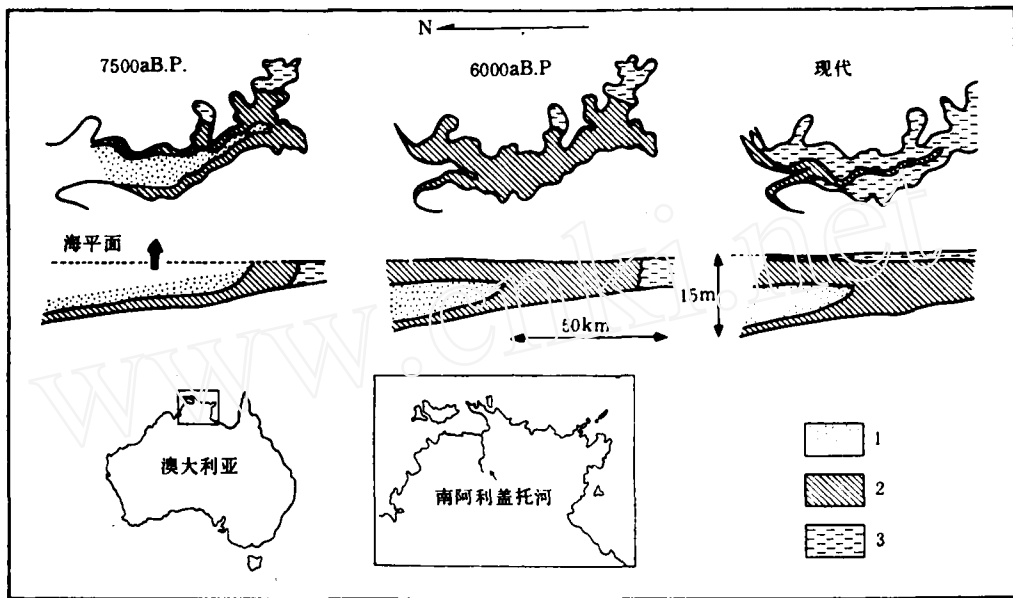


图3 澳大利亚北部南阿利盖托河全新世沉积分布

(据 Chappell 手稿*编)

图示不同时期的平面分布图和纵向剖面图

1.河口-浅海 2.红树林沼泽 3.泛滥平原

* Chappell, J., 1989, Some Effects of Sea Level Rise on Riverine and Coastal Lowlands (MS).

南阿利盖托河的上述认识,是在大量钻孔和¹⁴C测年数据的基础上取得的。我国入海河口,虽然不乏潮水将海区泥沙携入河口沉积的实例,由于缺乏高分辨率的地层研究,目前还难以对海面上升过程中沉积速率的变化做详细讨论。值得注意的是,海面上升与岸线后退间的非线性关系并不以河口为限。就海岸沙滩而言,除海面升降外,雨量和风暴的增减,水文和地貌等因素决定的沉积均衡作用,都可以引起砂质岸线的进退^[19],无论在研究历史或预测未来趋势时,都应当注意。

五、结 语

历史的经验值得注意。如果一万年全球气温回暖到一定程度,会因为气候系统内部的非线性反馈而导致突然的变冷事件,如果几千年前的海面上升在某些河口可以促进沉积作用加剧而抵消岸线的后退,那么对今后人类生存环境做预测时也就必须充分估计再度发生类似现象的可能,而不能把预测建立在简单线性关系的基础上。

必需承认,我们对气候和环境演变中的非线性关系认识太少。对于地球系统,尤其是

1) Chappell, J., 1989, Some Effects of Sea Level Rise on Riverine and Coastal Lowlands (MS).

各流态圈层之间复杂的反馈作用,实际上还刚刚开始探索。为此,对末次冰消期之类充满着气候、环境急剧变化过程的地质历史进行定量研究已是当务之急。

正确的定量结论来自正确的定量数据。我们对晚第四纪古气候、古环境的研究已经取得了大量成果,但十分缺乏经精确年代测定、具有可靠古气候古环境定量数据的实例。如果能利用我国自然条件和地质、历史记录的优势,在高分辨率地层学基础上开展高精度的研究,将能对揭示全球气候、环境演变中的复杂关系做出重要的贡献。

参 考 文 献

- [1] Ruddiman, W. F., 1987, Synthesis: The Ocean/Ice Sheet Record. *in*: Ruddiman, W. F. and Wright, H. E., Jr. (eds.), North America and Adjacent Oceans during the Last Deglaciation, Geol. Soc. Amer., Colorado, 463—478.
- [2] Berger, W. H., Burke, S. and Vincent, E., 1987, Glacial-Holocene Transition: Climate Pulsations and Sporadic Shutdown of NADW Production. *in*: Berger, W. H. and Labeyrie, L. D. (eds.), Abrupt Climatic Change—Evidence and Implications, D. Reidel, Dordrecht, 279—297.
- [3] Sarnthein, M., Winn, K. and Zahn, R., 1987, Paleoproductivity of Oceanic Upwelling and the Effect on Atmospheric CO₂ and Climatic Change during Deglaciation Time. *ibid.*, 311—340.
- [4] Duplessy, J.-C., Delbrias, G., Turon, J. L., Pujos, C. and Duprat, J., 1981, Deglacial Warming of the Northeastern Atlantic Ocean: Correlation with the Paleoclimatic Evolution of the European Continent. *Palaeoecography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 33(1—3), 9—16.
- [5] 安芷生、吴锡浩、卢演伟、张德二、孙湘君、董光荣, 1990, 最近 2 万年中国古环境变迁的初步研究. 黄土·第四纪地质·全球变化, 第二集, 科学出版社, 1—26 页。
- [6] Broecker, W. S., Andree, M., Wolfli, W., Oeschger, H., Bonani, G., Kennett, J. and Peteet, D., 1988, The Chronology of the Last Deglaciation: Implications to the Cause of the Younger Dryas Event. *Paleoceanography*, 3(1), 1—19.
- [7] Harvey, L. D. D., 1989, Modelling the Younger Dryas. *Quaternary Science Review*, 8, 137—149.
- [8] Paterson, W. S. B. and Hammer, C. U., 1987, Ice Core and Other Glaciological Data. *in*: Ruddiman, W. F. and Wright, H. E., Jr. (eds.), North America and Adjacent Oceans during the Last Deglaciation, Geol. Soc. Amer., Colorado, 91—109.
- [9] Broecker, W. S., Peteet, D. M. and Rind, D., 1985, Does the Ocean-Atmosphere System Have More than One Stable Mode of Operation? *Nature*, 315, 21—26.
- [10] Fairbanks, R. G., 1989, Glacio-Eustatic Sea Level Record 0—17 000 Years Before Present: Influence of Glacial Melting Rate on Younger Dryas "Event" and Deep Ocean Circulation. *ibid.*, 342, 637—642.
- [11] Broecker, W. S., 1990, Salinity History of the Northern Atlantic during the Last Deglaciation. *Paleoceanography*, 5(4), 459—467.
- [12] 汪品先、闵秋宝、卞云华、冯文科, 1986, 十三万年来南海北部陆坡的浮游有孔虫及其古海洋学意义. 地质学报, 第 60 卷, 第 3 期, 215—225 页。
- [13] 王律江、汪品先, 1988, 用转换函数法推算南海古温度的尝试. 科学通报, 第 33 卷, 第 5 期, 371—373 页。
- [14] Wang Luejiang and Wang Pinxian, 1990, Late Quaternary Paleoclimatology of the South China Sea: Glacial/Interglacial Contrasts in An Enclosed Basin. *Paleoceanography*, 5(1), 77—90.
- [15] Fairbridge, R. W., 1961, Eustatic Changes in Sea Level. *Phys. Chem. of the Earth*, 4, 99—185.
- [16] Clark, J. A., Farrell, W. E. and Peltier, W. R., 1978, Global Changes in Postglacial Sea level: A Numerical Calculation. *Quaternary Research*, 9, 265—287.
- [17] Mörrner, N.-A., 1987, Eustasy, Geoid Changes and Dynamic Sea Surface Changes due to the Interchange of Momentum. *in*: Qin Yunshan and Zhao Songling (eds.), Late Quaternary Sea-level Changes, China Ocean Press, 26—39.
- [18] 任美镛, 1988, 全球气候变化与海平面上升问题. 科学, 第 40 卷, 第 4 期, 248—253 页。
- [19] Thom, B. G. and Roy, P. S., 1988, Sea-level Rise and Climate: Lessons from the Holocene. *in*: Pearman, G. I. (ed.), Greenhouse, Planning for Climate Change, 177—188.
- [20] Woodroffe, C. D., Thom, B. G. and Chappell, J., 1985, Development of Widespread Mangrove Swamps in Mid-Holocene Times in Northern Australia. *Nature*, 317, 711—713.

NONLINEAR INTERACTIONS IN CLIMATIC AND ENVIRONMENTAL EVOLUTION: EXAMPLES FROM THE LAST DEGLACIATION

Wang Pinxian

(Department of Marine Geology, Tongji University)

Abstract

The climatic and environmental system is highly nonlinear in nature, and each link in the chain of interactions increase of isolation→climate warming→sea-level rising→retreat of coastline has its own nonlinear feedback. Failure to realize the complexity of the interactions can lead to erroneous models and prediction.

Though ultimately the Milankovitch orbital forcing is responsible for glacial-interglacial cycles, the warming process during the last deglaciation does not always follow the increasing isolation. The abrupt cooling event "Younger Dryas" occurred just at the maximum of postglacial summer isolation at 60°N, suggesting a nonlinear feedback related obviously to the reorganization of oceanic circulation and the changes in CO₂ budget. As shown by recent studies in China, the Younger Dryas event or its analogues have been recognized in the Transfer Function based paleo-SST of Core V36-06-3 taken from the northern slope of the South China Sea (19°00.5'N, 116°05.6'E, water depth 2 809 m), in the marine transgression curve based on drill holes at the eastern end of the subaerial delta of the Changjiang (Yangtze) River to the east of Shanghai, as well as in the susceptibility curve from a loess profile at Baxie, Gansu Province, and in water-level fluctuations of the Dai Hai Lake, Nei Monggol, although all these occurrences are still awaiting more precise datings. An adequate knowledge of geographic distribution of the event is of great significance for correct understanding of its origin.

Nonlinearity is shown to be inherent in the climate/sea-level interactions. The sea level rising process near Shanghai, for example, has a reverse excursion early in the last deglaciation.

The nonlinear response of coast-line migration to the sea-level fluctuations is demonstrated on an example from the South Alligator River in northern Australia. According to Chappell (MS), the mid-Holocene sea-level rising there has given rise to intensified deposition of marine sediments in the river area, and the resulted aggregation of mangrove swamps, keeping pace with the rising sea-level, has compensated the effects of marine transgression.