

全新世亚洲季风, ENSO 及高北纬度气候间的关联

洪冰 林庆华 洪业汤*

(中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002. * 联系人, E-mail: ythong@public.gz.cn)

摘要 着重评述全新世东亚季风与印度季风之间, 季风与厄尔尼诺/南方涛动现象之间, 以及它们与北大西洋气候变化之间关联方面的研究进展. 近年来的观测和气候代用记录显示, 在年际至轨道时间尺度上, 两季风强度变化存在反相变化关系, 它与赤道太平洋上的厄尔尼诺现象和北大西洋深层水变化之间可能有密切联系. 发生在全新世的 4k 事件和 8k 事件, 可能是两次严重的古厄尔尼诺事件, 集中地反映了这些重要气候变化现象和过程之间的相互作用和影响. 为了深入认识这些古气候现象之间的关系, 今后应加强亚洲季风区划及季风代用记录的对比, 加强赤道太平洋高分辨率 SST 代用记录及古气候模拟研究工作.

关键词 亚洲季风 季风区划 古 ENSO 8k 事件 4k 事件 温盐环流 全新世

20 世纪 90 年代初, 开始执行国际地圈生物圈计划(IGBP), 使人类对其生存环境有了更深入的了解. 大量事实表明, 地球环境是一个具有混沌行为, 反馈机制等非线性特征的复杂系统, 因而对地球环境未来演变的预测往往具有不确定性^[1]. 人们认识到, 要想对地球环境的演变有更准确的了解, 必须进一步突破学科限制, 努力从地球系统的整体上去把握. 反映在 2003 年开始的 IGBP 第二阶段研究计划上, 则是更强调多学科的集成研究. 实现集成研究的有效途径之一, 是加强区域研究并在区域上把重要科学问题链接起来, 寻找它们之间的关联和原因, 从而逐步认识全球变化^[1].

地球系统存在若干关键地点和作用过程, 它们起着阈值、瓶颈, 或开关作用, 对它们的扰动会触发全球环境变化^[2]. 亚洲季风, 赤道太平洋上的厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)现象, 以及北大西洋深层水形成的变化就是这样一些关键作用过程. 研究它们之间的联系及机制, 对认识地球系统的运作具有十分重要的意义, 已成为国际学术界关注的焦点之一, 也是我国正在开展的全球变化及区域响应重大基础课题的核心内容之一. 本文试图探寻全新世在这几个关键作用过程之间的关联方面所取得的研究进展, 可能存在的问题, 以期促进这一重要领域的深入研究.

1 全新世东亚季风与印度季风之间的反相变化关系

亚洲夏季风系统由东亚季风和印度季风(或西南季风)组成, 它们带来的降雨量变化影响占地球总人

口近 60% 居民的生活和生产活动. 因此深入地了解季风活动的规律, 提高预报季风变化的能力非常重要. 由于季风现象的复杂性及观测技术的限制, 长期以来对季风的研究不得不采取分别研究的方法. 总的说来, 印度及西方学者的研究似乎更多集中在印度季风区, 而中国等东亚国家学者对东亚季风研究相对较多. 针对东亚季风与印度季风相互关系的研究, 以及亚洲季风与澳洲季风, 非洲季风等之间相互关系的研究相对滞后. 这种分别研究的方法显然已不适当当今地球系统科学研究的需要, 一种新的季风研究思潮已逐渐形成, 它提倡通过研究不同时间尺度上各个区域季风子系统间的动力学联系, 了解季风活动的全球性或全球季风变化^[3].

中国大陆的夏季降雨既受东亚季风影响, 又同时受印度季风影响, 为中国大陆的季风研究增添了复杂性, 也为研究两个季风间的关系提供了天然的区位优势. Tao 等^[4]在二十多年前就提出东亚季风系统和印度季风系统是两个相互独立又相互作用的季风系统的论断, 并为之后愈来愈多的资料所证实. 但明确论述两季风之间可能呈现反相变化关系, 还是近年来的事情.

1999 年 Sun 和 Yin^[5]用美国国家环境预报中心-国家大气研究中心(NCEP-NCAR)1951~1994 年的北半球 500 hPa 位势高度场资料和相应的海温资料, 以及 1974~1993 年的外溢长波辐射(OLR)资料, 研究了西太平洋副热带高压(以下简称副高)强度异常与热带环流特别是亚洲季风的关系. 发现夏季副高增强时, 赤道辐合带(ITCZ)偏强, 特别是在赤道西太平洋地

区出现最强的对流活动区,说明在强的副高年,东亚季风是偏强的。而此时从印度洋至印度半岛的OLR则为正距平,表明印度季风区的对流活动较弱,印度夏季风的强度偏弱。相反,在弱的副高年,两个季风的反相变化关系则倒过来,东亚季风偏弱而印度季风偏强。他们在对低层风场的分析过程中,也得到同样结果,即副高偏强时,东亚季风偏强,反之则弱;而印度季风则相应地偏弱或偏强^[5]。

Zhang^[6]也获得类似相同的结果。2001年他利用1949~1998年NCEP-NCAR的逐月降雨再分析资料,1951~1998年间160个中国气象站的逐月降雨资料,以及美国国家海洋和大气管理局1974~1998年间的逐月OLR资料,诊断分析了北半球夏季由印度季风输送的水汽与东亚季风输送的水汽之间的关系,再次发现两者之间具有反相变化的特征。当印度季风水汽输送偏强(偏弱)时,东亚上空的水汽输送偏弱(偏强),长江中下游降水偏少(偏多)。该研究同样发现季风的水汽输送与副高强度间有显著关系,印度季风水汽输送偏强(偏弱)时,副高强度偏弱(偏强),由此导致副高西侧东亚上空向北的水汽输送减弱(增强),使得长江中下游降水偏少(偏多)。

这种不同步关系在古季风研究方面也渐渐显示出来。例如在相当于全新世大暖期时,代用记录和模拟研究都指出,印度季风明显增强,印度季风区处于湿气的持续控制之下^[7,8]。此时的东亚季风区,若干代用记录显示季风似乎也增强,如An等^[9]对甘肃巴谢黄土磁化率研究发现,在9.7~5.3 ka BP期间,该区气候是较湿的,东亚季风区的北界有向亚洲大陆内部扩展的趋势^[10]。然而巴谢黄土磁化率的变化是否可解释为更多地反映了印度季风的影响是值得考虑的,因为它位于东经105°经线以西,很靠西部了(图1)。近年来,对巴谢以东的一些黄土剖面,湖泊沉积等的研究出现一些新的结果。Zhou等^[11]研究了陕西米得旺黄土剖面中的孢粉和有机碳含量,发现在7.5~3.5 ka BP期间的气候是干的,东亚季风减弱。Guo等^[12]报道从7至5.6 ka BP期间腾格里沙漠地区气候是较干旱的。内蒙达里诺尔湖从约7 ka起水位就开始下降,风沙增加,并延续到约4.5 ka BP^[13,14]。Chen等^[15]研究内蒙盐海子的沉积物粒度、矿物组成、元素含量、总有机碳含量等指标后指出,该区全新世大暖期(约8~4.3 ka BP)气候的总趋势明显是干的,其上叠加有3个突然的湿相变化。

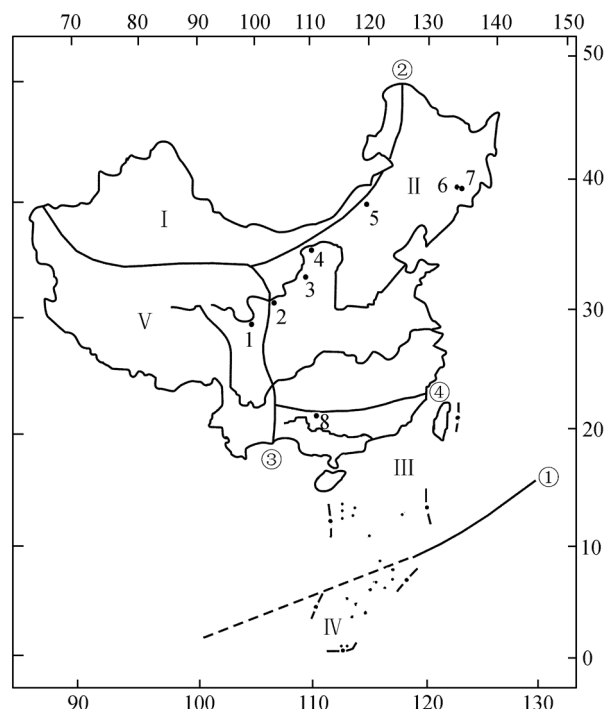


图1 中国的季风气候区划(据高由禧等^[16])及论文中涉及的一些对比研究点位置示意图

线 指示冬季风影响的南界。线 指示东亚夏季风影响的北界。线 指示冬季风的西界。线 指示印度(西南)季风的北界。() 西风带区,区内没有明显的冬季风与源于热带海洋的季风的交替。() 副热带季风区,只受东亚季风和冬季风交替作用的影响。() 热带季风区,季风活动最明显的地区,一年中分别有东亚夏季风和印度夏季风的交替影响,以及与冬季风的交替影响。() 赤道季风区,() 高原季风区。对比研究点位置:1-四川红原,2-甘肃巴谢,3-陕西米得旺,4-内蒙盐海子,5-内蒙达里诺尔湖,6-吉林金川,7-吉林哈尼,8-贵州董歌洞

上述古季风研究点位于黄土高原及内蒙等干旱-半干旱区域。在此区域以东远离印度季风影响区域,近年也陆续报道了两季风反相变化的研究结果。洪业汤等对吉林金川泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 记录研究发现,在过去6000年中,东亚季风的强度变化与印度季风是反相的^[17~19],该现象在一个时间跨度为12000年的吉林哈尼泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 记录中得到重现(图2)。图2(d), (e)可见,在轨道时间尺度上,在全新世的前半段(约11000~6000 cal a BP),当哈尼泥炭记录指示的东亚季风在波动中逐渐减弱时,四川红原泥炭记录指示的印度季风强度则在波动中逐渐增强;在全新世的后半段则相反,东亚季风逐渐增强,而印度季风则逐渐减弱^[20]。由图2还可见,叠加在这一总的反相变化趋势之上,还有一系列数百年至千年尺度的突然的反相变化,东亚季风突然增强而印度季风则

突然减弱,这与其他代用记录分别记录到的在新仙女木事件^[11,15,21]和全新世一些时段^[15]东亚季风突然增强的现象是一致的。

在中国大陆南部近年来也获得了一些高分辨率的全新世气候代用记录。Yuan等^[22],Wang等^[23]分别测定了贵州荔波董歌洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,重建了末次间冰期至全新世的季风活动状况。由图 2(c)可见,不论在轨道时间尺度的低频变化上,还是数百年至千年尺度的突然变化方面,贵川董歌洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列都与反映全新世印度季风的四川红原泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列以及阿拉伯海沉积物代用记录相似(图 2(b)~(d)),而与反映全新世东亚季风的吉林哈尼泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列相反(图 2(e))。但是这两篇论文都回避说明,董歌洞 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列反映的是印度季风还是东亚季风的历史,只笼统地称为亚洲季风。这种谨慎的态度突出了困扰研究东亚季风气候科学工作者的一个基本科学问题,即如何划分亚洲季风,或亚洲季风的区划问题。

1962 年高由禧等^[16]根据 1955~1958 年期间的季风流场、气压场、湿度场和云雨等现象的季节变化资料,对中国大陆及其相邻海域进行了季风区划,把中国划分为五个不同的季风气候区(图 1)^[16]。尽管高由禧等^[16]明确而客观地指出,该季风区划仅利用 4 年的气象观测资料,“对锋面的位置作了初步确定”,“还没有得出公认的结论”。但它实际上已成为研究东亚古季风的基础坐标,并在实际应用中还进行了两点简化。首先是往往忽略了所谓热带季风区的存在,忽略了在中国大陆南部及近海区域有一个印度季风与东亚季风相互交替,重叠发生影响的区域,它既不能简单化为东亚季风区,也不能简单化为印度季风区。这或许正是上述董歌洞记录的作者们采取谨慎态度的原因。其二是默认以东经 105°经线作为印度季风区与东亚季风区的截然分界线,忽视了过度地区的存在。这样一来,中国大陆被分为 3 块,除了西北部的常年西风带外,就是东经 105°线以西的印度季风区和以东的东亚季风区。这种默认的季风区划虽然简洁明了,但未能准确反映不同季风的影响范围,从根本上影响了亚洲古季风的对比研究。今后不仅需要进一步论证沿东经 105°的季风分界线是否合适,并划出过度区域的范围;同时,关于中国南部东亚与印度季风交替重叠作用区域的北界(图 1 中的线 4)是否应当往北移,例如北移至约长江一线,有待研究确定;

两季风对所谓西风带区降雨是否有影响也有待深入研究。总之,根据新的观测资料修订现代和地质历史时期东亚大陆季风区划,是应当认真对待的问题,是中国科学工作者的学术责任。

亚洲季风间的反相变化关系表明影响中国大陆降雨因素的复杂性。当试图预测未来降雨和干旱的演变时,对中国大陆尺度来说,单考虑一个季风的影响是不够的,至少要综合考虑东亚和印度季风不同的贡献;对区域尺度来说,应当阐明是何种季风过程在起控制作用;还必须仔细考虑不同时间尺度上不同的驱动因素对两个季风的的不同影响。

2 亚洲季风与 ENSO 和北大西洋气候间的关系

影响亚洲季风变化的因素和过程很复杂,涉及到青藏高原的加热作用,欧亚雪盖的变化,极地冰盖的变化,热带太平洋的热状态,副高,印度洋海温,北大西洋气候环境的变化,太阳辐射和火山喷发作用等。当前对古气候领域中一系列大的突然气候变化的驱动机制,认识上主要有两种学术思潮或假说^[24]。一种主要强调海洋温盐环流的影响。这种假说认为,由于突然的,灾难性的淡水大量注入北大西洋,导致温盐环流传送带的运转放慢甚至停顿,进而改变全球能量分配,触发全球变化。因此高纬度北大西洋区域是全球变化的关键区域。另一种思潮主要强调热带海洋-大气系统的动力学变化的影响,认为热带对流系统是地球系统中的主要因素,气候突然变化的触发器很可能存在于厄尔尼诺-拉尼娜周期变化的区域中,即赤道太平洋之中。盛行于中低纬度区域的亚洲季风处于上述两个关键区域之间的位置上,因此季风对这两种作用过程的响应,或它们之间的关联,成了全球环境变化研究中引人注目的问题。

一个重要进展首先出现在研究基础较好的印度季风区。Shukla等^[25]在统计分析近百年中印度季风降雨变化与 ENSO 的关系时,发现在厄尔尼诺年印度季风倾向于减弱,而在拉尼娜年则倾向于增强。对这种相关性的进一步研究认为,这种关系具有预报 ENSO 出现的意义^[26]。但是 Kumar 等^[27]认为,这种关联在 20 世纪 90 年代断裂了。在 1997 年强的厄尔尼诺事件时,印度季风降雨几乎是正常的,而在 1877 年强的厄尔尼诺事件时,印度曾发生严重干旱,致使大范围歉收。他们推测,印度季风与 ENSO 关系的异常变化

可能是全球变暖的结果^[27]。然而前述“正常”的关联最近似乎又恢复,在2001~2002年温和的厄尔尼诺事件中,印度季风又变弱^[28]。

在东亚季风与ENSO的关联方面也开展了很多研究工作。2003年Wang等^[29]利用美国NCEP-NCAR的大气再分析资料,海表面温度(SST)资料以及降雨资料,较全面地分析研究了相应于ENSO从发展到衰弱等不同相位的变化,亚洲季风的不同响应。发现在年际尺度上,在厄尔尼诺发展年的夏季,由于一个拉长的反气旋从印度洋西部沿海大陆延伸到印度半岛,致使印度夏季风减弱。但另一方面由于此反气旋北侧异常的西风活动,导致在西太平洋东亚区域形成频繁的热带风暴。在ENSO的这一相位期,阿拉伯海上的西南季风明显减弱,而南中国海上的季风则明显加强。在厄尔尼诺衰减年的夏季,不论阿拉伯海还是南中国海上的季风都减弱,但与副高有关的东亚副热带锋面降雨则倾向于增加^[29]。由于印度季风区夏季水汽来源较单一,而东亚季风区的水汽输送可以通过东亚副热带锋面降雨和西太平洋上的热带风暴等进行,因此,在一次厄尔尼诺事件从发展到衰落,当印度季风的强度持续遭到压抑时,东亚季风区的降雨却有可能通过事件发展年加强的南中国海季风,频繁的热带风暴,特别是事件衰减年加强的副热带锋面降雨来增强。

此研究结果与前述亚洲季风间的反相变化结果是互为支持的。Zhang^[6]曾识别出印度季风弱而东亚季风水汽输送强的一些年份,它们是1953, 1964, 1966, 1976, 1977, 1983, 1988, 1995, 1996和1998年,尽管对这些年份出现季风反相变化的原因未予更多讨论。但现在如果把这些年份与Wang等列出的1951~2000年间12个厄尔尼诺事件相比较的话,可以很容易看出,除1953和1996年外,所有印度季风弱而东亚季风水汽输送强的年份都是厄尔尼诺事件年,而且除1976年是厄尔尼诺发展年位相, Niño 3区域的SST正异常处于逐渐增大过程外,其他都处于厄尔尼诺的衰减位相, Niño 3的SST正异常处于逐渐减小过程。值得强调的是识别出1998年这个结果。发生于1997~1998年的厄尔尼诺是近几十年来最强的一次事件,当时秘鲁和厄瓜多尔西海岸发生大洪水,印度尼西亚,新几内亚和澳大利亚则发生严重干旱,加里曼丹森林大火散发的浓烟扩散到东南亚上空,使新加坡,马来西亚的机场一度关闭^[28]。可能正是

这次厄尔尼诺事件的影响,在事件衰减年的1998年,而不是事件发展年的1997年,中国大陆发生了特大洪水,长江洪水为20世纪第二位全流域型大洪水;松花江洪水为20世纪第一位大洪水;珠江流域的西江洪水为20世纪第二位大洪水;闽江洪水为20世纪最大洪水^[30]。

亚洲两季风年际尺度上的不同步变化,起因于两季风区域不同的海陆分布格局所造成的两季风不同的空间结构,以及它们对ENSO驱动的不同响应^[25,26,29],因此,可以认为亚洲季风与ENSO间的关系具有某种结构上的紧密性质,提示古季风与古ENSO之间可能也存在类似年际尺度上的关系。有资料显示,当早全新世东亚季风逐渐减弱,而印度季风逐渐增强时^[20], Koutavas等^[31]通过对东赤道太平洋冷舌SST的研究,发现早全新世赤道太平洋正处于一种长期的类拉尼娜态。当晚全新世东亚季风逐渐增强,而印度季风逐渐减弱时,赤道太平洋则可能表现为长期的类厄尔尼诺态^[32]。这种轨道尺度上季风的反相变化与赤道太平洋类ENSO状态的相关性,与年际尺度上季风的反相变化与ENSO的相关性是相似的。图2中9次千年尺度东亚季风突然增强而印度季风突然减弱现象,可能指示了自末次冰消期以来,在热带太平洋出现过9次千年尺度的类厄尔尼诺状态。这9次长期的类厄尔尼诺状态与9次北大西洋浮冰事件一一对应,显示了热带太平洋类ENSO暖事件,亚洲季风反相变化,北大西洋气候突然变冷之间紧密的关联^[20]。这一重要的全球变化现象有待通过更多的气候代用记录,特别是全新世敏感的高分辨率的SST记录和模拟研究来证实。值得注意的是,古ENSO研究是古全球变化研究中一个正在迅速兴起的新领域,古ENSO方面的知识只是在过去5年中才迅速地增长起来^[28],一些基本的科学问题还在争论中,它呼唤寻找物理意义更明确,更敏感的高分辨率古ENSO代用记录。由于季风与ENSO的紧密关系,从古季风去研究古ENSO可能是一条值得今后深入开展工作的路子。

3 8k和4k事件:全球气候关联研究的两个切入点

所谓“8k”事件是指发生在距今约8200年前北半球的一次大范围突然气候变化事件,以其发生年代, Alley等人^[35]把它简称为8k事件,尽管不同研究

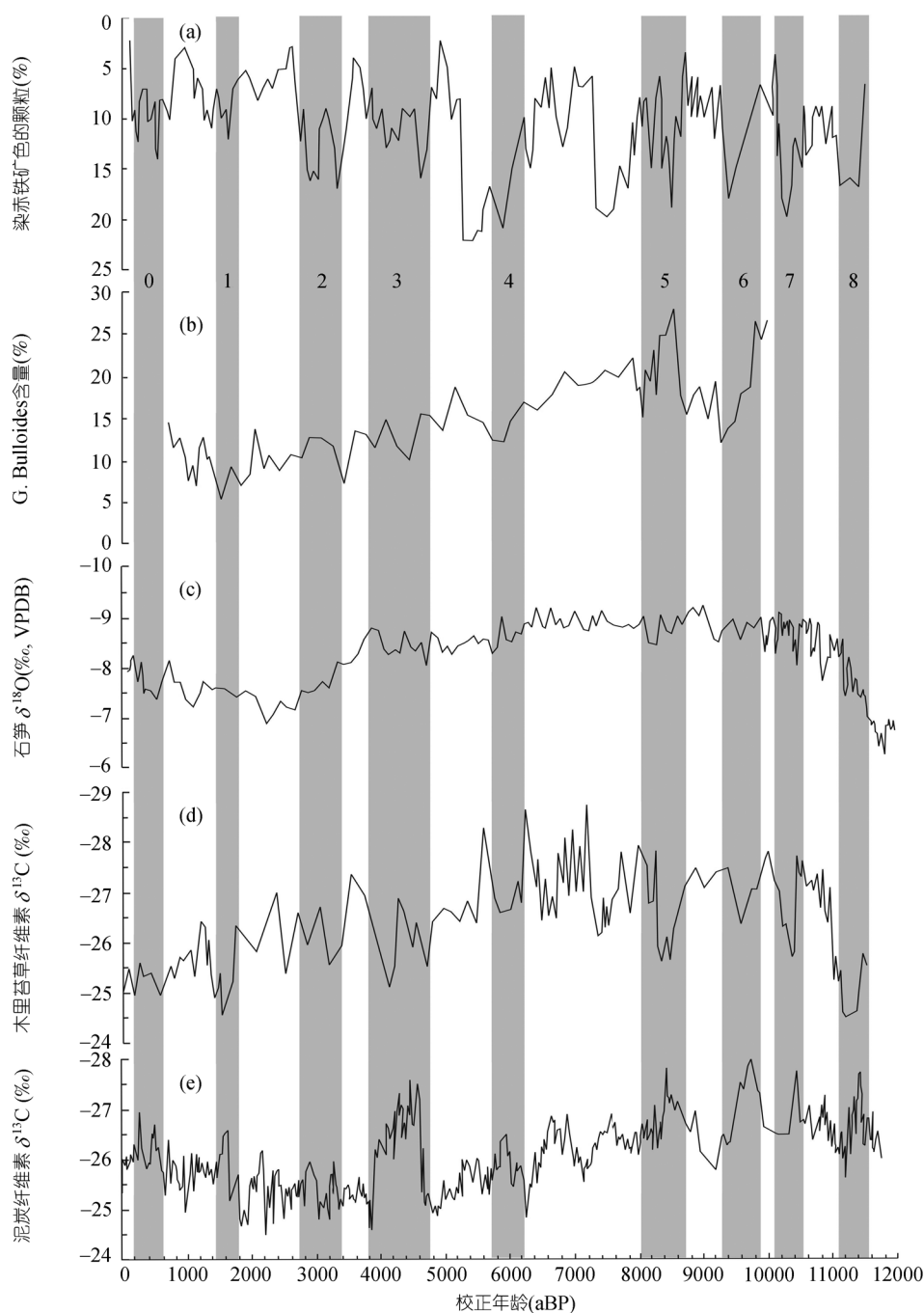


图 2 全新世亚洲季风间的反相变化及其与北大西洋气候的对比

(a) 北大西洋MC52-VM29-191 孔染赤铁矿颗粒指示的浮冰记录^[33]; (b) 阿拉伯海 723A孔RC2730 柱芯*G. bulloides*含量代用记录所指示的印度洋夏季风历史^[34]; (c) 贵州董歌洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列所指示的亚洲季风的历史^[22]; (d) 红原泥炭木里苔草(*C. muliensis*)纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列所指示的印度洋夏季风历史^[18]; (e) 哈尼泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列所指示的东亚夏季风历史^[20]. 数字 1~8 指示北大西洋 8 次浮冰事件, 0 指示小冰期事件^[33]

者对它还有不同称谓. 当时格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录指示格陵兰中部区域温度降低约 7.4 °C, 雪的累积速率减少, 风速增大. 该事件虽然在南半球几乎没有记录, 但在北半球的许多地区都有响应. 如欧洲表现为强

烈变冷, 北欧和南欧变干而中欧变湿; 撒哈拉周边区域及西亚季风区变干; 北美大部分地区变冷, 美国大平原变干^[35]. 然而这些大范围的气候变化似乎还不是引起国际学术界关注的唯一原因, 更重要的可能

是有关 8k 事件的性质及触发和影响机制。

若干地质及地球物理的调查认为,末次冰消期时在北美冰盖的周围形成了一些由冰围起来的大冰湖,其中阿加西湖(Lake Agassiz)是最大的一个。到早全新世时,随着暖期的到来,温度升高,北美劳伦泰德(Laurentide)冰盖逐渐退缩,冰的流体动力学作用最终导致阿加西湖的冰岸坍塌,贮存在湖中的巨量体积淡水(约 10^{14} m^3 数量级)在约距今 8400 年时突然大量流入北大西洋,在随后 2~300 年期间北半球出现气候异常事件,即 8k 事件^[35-37]。按照此观点,8k 事件是一次典型的自然灾变事件,是由融冰大洪水引起的。在这一时期,类似的灾变事件还不止 8k 事件,在它之前的新仙女木事件也认为与冰盖不稳导致大量淡水流入北大西洋有关^[35]。

问题是大体积的淡水流入北大西洋和随后发生的气候异常是如何关联起来的?在过去的 10 年期间,Broecker 等人^[38-41]的调查和模拟工作逐渐形成了一个海洋环流传送带理论,认为在通常情况下,跨赤道的海洋环流向北流向北大西洋,在高纬度区域如拉布拉多海,格陵兰,冰岛和挪威海域,随着海水逐渐变冷,盐度增大,比重增大,冬季表层水还没有结冰前就向下沉入海洋深处,形成深层水,并向南流,从而形成地球系统中重要的温盐环流链。一旦有大量淡水突然注入北大西洋,高纬度北大西洋海水突然变淡,多种模型模拟的结果是北大西洋温盐环流的运转大大放慢,甚至停顿下来,其结果是通过温盐环流向北输送的热量大大减少,北大西洋区域变冷,非洲和西亚季风降雨减弱,南美附近 ITCZ 位置向南移动。由于温盐环流的运转放慢,有利于暖水更多地留在北大西洋南部,南大西洋稍为变暖,南部深层水的形成增加。这些模拟结果与多种气候代用记录的结果是一致的^[35]。

因此,人们认为,8k 事件是发生在人类活动影响之前的一次对地球系统的大的扰动,为研究地球系统中复杂的关联机制提供了一个极好机会,特别是为模拟和表征地球系统对一种强的自然扰动的响应提供了极好的机会,因而 8k 事件已成为 IGBP 的过去全球变化(PAGES)及世界气候研究计划的气候变率及预测(CLIVAR)联合工作组共同关心的课题。另一方面,现在研究全球变暖的几乎所有模型都提到了北大西洋海水未来变淡的问题^[42,43],尽管不同模型模拟的结果还不一致,但人们不能排除未来海洋温

盐环流大大减慢甚至致停顿的可能性,而一旦真的出现这种情况,8k 事件时的气候异常将能提供有用的指南^[35]。

应当引起我们注意的是,在 Alley 的与 8k 事件相关联的全球气候异常分布图上^[35],东亚季风区的响应信息却是空白,因为 Alley 引用了 Morrill 等对亚洲季风区的统计研究结果,认为“在约 8.2 cal ka 没有发现亚洲季风有变化的确切证据,需要更多高分辨率的数据来检测这一短时限的气候变化事件^[44]。”事实上,在 Morrill 的论文发表后两年,对 8k 事件时印度和东亚季风的表现都有新的进展,来自石笋^[45],海洋沉积^[34]和泥炭^[18]的气候信息表明,响应于 8k 事件,印度季风突然明显减弱;而东亚季风则明显增强^[20,46],表明亚洲季风出现反相变化,指示赤道太平洋可能出现了长期的类厄尔尼诺态^[20](图 2),为研究 8k 事件提出了重要的新问题。

除了 8k 事件外,对发生在距今约 4200 年的一次突然气候变化事件(本文简称为 4k 事件)也日益引起古气候学界注意。和 8k 事件一样,4k 事件也表现为大范围的气候异常,亚洲季风也出现反相变化(图 2)。当时,受印度季风影响的区域,如青藏高原^[7,18]及其以西的印度区域^[34,47],西亚^[48],东非^[49,50],季风降雨明显减少,气候干旱;而东亚季风区降雨则增加^[15,20],长江和黄河出现大洪水^[51,52];北美洲大陆中部明显干旱;高纬度北大西洋区域气候变冷^[53]。和 8k 事件不同的是,4k 事件出现在人类文明早期,它对人类文明的影响已可辨识。已有若干研究指出,4k 事件时印度季风区持续严重的干旱可能与西亚阿卡丁王国的解体,与希腊和埃及早期古代文明,以及位于印度河谷的哈拉潘文明的衰落有关^[48,54,55];相反,同一时期东亚季风区发生的大洪水则可能对中国龙山文化,良渚文化的衰落有重要影响^[20,52,56,57]。

但是,4k 事件与 8k 事件最重要的不同可能在触发机制方面。一方面,4k 事件时亚洲季风出现反相变化,此时从赤道东太平洋冷舌的 SST 记录上,可以清楚地看见一个突出的指示 SST 明显升高的峰值^[31],可能暗示了一个长期的类厄尔尼诺态的存在^[20]。同时,北大西洋明显变冷,和 8k 事件时一样也出现浮冰事件^[33]。这表明 4k 和 8k 事件时,亚洲季风、ENSO、和北大西洋气候间的遥相关现象似乎是相似的(图 2)。另一方面,由于 4k 事件时北半球冰盖已基本退缩,由冰盖内部动力学作用引发海洋环流重组的假说显然

不适用于4k事件。这清楚暗示,当时在地球系统中起作用的可能是另外一种触发过程机制,同样也能引起类似8k事件的全球环境变化。Hong等^[20]提出一个概念模型推测,北半球大陆冰盖的不稳定引起淡水灾难性地注入北大西洋,或者太阳辐射的变化引起北大西洋浮冰增加,都有可能引起北大西洋海水变淡,热盐环流运转变慢。在北大西洋变冷的同时,由于热量在南部积累,可能导致西太平洋暖池区域海表面水与深层水温度之间的反差增加,从而有利于厄尔尼诺现象的形成,并通过ENSO的作用,最终导致东亚季风和印度季风出现反相变化。

4 小结

季风研究的长期积累使它在本世纪进入一个新的发展阶段,即全球季风的研究阶段。近年来的观测和古气候研究发现,东亚季风和印度季风强度变化之间呈现此消彼长的不同步关系,它与赤道太平洋热状态的变化有紧密关系。全新世东亚季风突然增强,印度季风突然减弱,与赤道太平洋出现长期类厄尔尼诺态,以及北大西洋出现浮冰事件等现象,在尺度为千年及轨道的时间上是同时发生的,但确切的因果机制还不清楚。上述现象在8k事件和4k事件时都有明显的、集中的表现。对比研究4k和8k事件,有可能获得对地球系统运作的全新认识。

中国科学工作者对4k事件在东亚区域的表现已开展了相当多的、独立的研究,不仅涉及多种类型的气候代用指标,发掘出了丰富的考古学证据,而且就事件的成因和影响提出了新的看法。下一步应当把这些工作更加系统化,加强高分率的、敏感的气候代用记录的综合对比研究,加强赤道太平洋古SST的研究工作,加强对考古发现年代的高精度测定和古气候事件的模拟研究,努力在全球变化及其区域响应的理论上有所突破。

致谢 衷心感谢评审专家对本文提出了非常有价值的建议。本工作受国家自然科学基金(批准号:40231007,40573004)项目资助。

参 考 文 献

- 1 Brasseur G P, Moore B. The new and evolving IGBP. *Glob Change News Lett*, 2002, 50: 1—3
- 2 Sahagian D, Schellnhuber J. GAIM in 2002 and beyond: a benchmark in the continuing evolution of global change research. *Glob Change News Lett*, 2002, 50: 7—10
- 3 Clemens S, Wang P, Prell W. Monsoons and global linkages on Milankovitch and sub-Milankovitch time scales. *Mar Geol*, 2003, 201: 1—3[DOI]
- 4 Tao S, Chen L. A Review of Recent Research on the East Asian Summer Monsoon in China. In: Chang C P, Krishnamurti T N, eds. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60—92
- 5 Sun S Q, Yin M. Subtropical high anomalies over the Western Pacific and its relations to the Asian monsoon and SST anomaly. *Adv Atm Sci*, 1999, 16: 559—568
- 6 Zhang R H. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. *Adv Atm Sci*, 2001, 18: 1005—1017
- 7 Gasse F, Arnold M, Fontes J C, et al. A 13000-year climate record from western Tibet. *Nature*, 1991, 353: 742—745[DOI]
- 8 Sirocko F, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. Century-scale events in monsoonal climate over the past 24000 years. *Nature*, 1993, 364: 322—324[DOI]
- 9 An Z S, Porter S C, Zhou W J, et al. Episode of strengthened summer monsoon climate of Younger Dryas age on the Loess Plateau of central China. *Quat Res*, 1993, 39: 45—54[DOI]
- 10 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. *中国科学, B 辑*, 1992, (12): 1300—1305
- 11 Zhou W J, Donahue D J, Porter S C, et al. Variability of monsoon climate in East Asia at the end of the last Glaciation. *Quat Res*, 1996, 46: 219—229[DOI]
- 12 Guo Z T, Petit-Maire N, KrÖpelin S. Holocene nonorbital climatic events in present-day arid areas of northern Africa and China. *Glob Planet Change*, 2000, 26: 97—103[DOI]
- 13 Geng K, Zhang Z. Geomorphologic features and evolution of the Holocene lakes in Dali Nor Area, the Inner Mongolia. *J Beijing Normal University (Nature Science)*, 1998, 4: 94—100
- 14 Wang H Y, Liu H Y, Cui H T, et al. Terminal Pleistocene/Holocene paleoenvironmental changes revealed by mineral-magnetism measurements of lake sediments for Dali Nor area, southeastern Inner Mongolia Plateau, China. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 2001, 170: 115—132[DOI]
- 15 Chen C T A, Lan H S, Lou J Y, et al. The dry Holocene Megathermal in Inner Mongolia. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 2003, 193: 181—200[DOI]
- 16 高由禧, 徐淑英, 郭其蕴, 等. 中国的季风区域和区域气候. 见: 高由禧, 徐淑英著. 东亚季风的几个问题. 北京: 科学出版社, 1962. 49—63
- 17 Hong Y T, Wang Z G, Jiang H B, et al. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a $\delta^{13}\text{C}$ time series from peat cellulose. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 185: 111—119[DOI]
- 18 Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 211: 371—380[DOI]
- 19 洪业汤, 洪冰, 林庆华, 等. 过去 5000 年西太平洋副热带高压活动的泥炭纤维素碳同位素记录. *第四纪研究*, 2003, 23: 485—492
- 20 Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-El Niño. *Earth Planet Sci Lett*,

- 2005, 231: 337—346[DOI]
- 21 王苏民, 吉磊, 羊向东, 等. 内蒙古扎赉诺尔湖泊沉积物中的新仙女木事件记录. 科学通报, 1994, 39(4): 348—351
 - 22 Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 2004, 304: 575—578[DOI]
 - 23 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and north Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854—857[DOI]
 - 24 Broecker W S. Does the trigger for abrupt climate change reside in the ocean or in the atmosphere? *Science*, 2003, 300: 1519—1522[DOI]
 - 25 Shukla J, Paolina D. The Southern Oscillation and long range forecasting of the summer monsoon rainfall over India. *Mon Weath Rev*, 1983, 111: 1830—1837[DOI]
 - 26 Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons: processes, predictability, and the prospects for prediction. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14451—14510[DOI]
 - 27 Kumar K, Rajagopalan B, Cane M A. On the weakening relationship between the Indian Monsoons and ENSO. *Science*, 1999, 284: 2156—2159[DOI]
 - 28 Cane M A. The evolution of El Niño, past and future. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 230: 227—240[DOI]
 - 29 Wang B, Clemens S C, Liu P. Contrasting the Indian and East Asian monsoons: implications on geological timescales. *Mar Geol*, 2003, 201: 5—21[DOI]
 - 30 中华人民共和国水利部. 中国'98 大洪水. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. 1—5
 - 31 Koutavas A, Lynch-Stieglitz J, Marchitto T M, et al. El Niño-like pattern in ice age tropical Pacific sea surface temperature. *Science*, 2002, 297: 226—230[DOI]
 - 32 Markgraf V, Diaz H F. The Past ENSO Record: a synthesis. In: Diaz H F, Markgraf V, eds. *El Niño and Southern Oscillation-multiscale Variability and Global and Regional Impacts*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 465—488
 - 33 Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on north Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 2001, 294: 2130—2136[DOI]
 - 34 Gupta A K, Anderson D M, Overpeck J T. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 2003, 421: 354—357[DOI]
 - 35 Alley R B, Agustsdottir A M. The 8k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. *Quat Sci Rev*, 2005, 24: 1123—1149[DOI]
 - 36 Teller J T, Leverington D W, Mann J D. Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation. *Quat Sc Rev*, 2002, 21: 879—887[DOI]
 - 37 Clarke G K C, Leverington D W, Teller J T, et al. Paleohydraulics of the last outburst flood from glacial Lake Agassiz and the 8200 BP cold event. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 389—407[DOI]
 - 38 Broecker W S. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change. *Nature*, 1994, 372: 421—424[DOI]
 - 39 Broecker W S. Ocean circulation-An unstable superconveyor. *Nature*, 1994, 367: 414—415[DOI]
 - 40 Broecker W S. Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: will man-made CO₂ upset the current balance? *Science*, 1997, 278: 1582—1588[DOI]
 - 41 Broecker W S. Paleocean circulation during the last deglaciation: a bipolar seasaw? *Paleoceanography*, 1998, 13: 119—121[DOI]
 - 42 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2001: The Science of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001 and www.ipcc.ch
 - 43 Wood R A, Vellinga M, Thorpe R. Global warming and thermohaline circulation stability. *Philosoph Trans Royal Soc*, 2003, 361A: 1961—1974[DOI]
 - 44 Morrill C, Overpeck J T, Cole J E. A synthesis of abrupt changes in the Asian summer monsoon since the last deglaciation. *Holocene*, 2003, 13: 465—476[DOI]
 - 45 Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. *Science*, 2003, 300: 1737—1739[DOI]
 - 46 Shi Y, Kong Z, Wang S, et al. Mid-Holocene climates and environments in China. *Glob Planet Change*, 1993, 7: 219—234[DOI]
 - 47 Staubwasser W, Sirocko F, Grootes P M, et al. Climate change at 4.2 ka BP termination of the Indus valley civilization and Holocene south Asian monsoon variability. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1425—1428[DOI]
 - 48 Weiss H, Courty M A, Wetterstrom W, et al. The genesis and collapse of third millennial north Mesopotamian civilization. *Science*, 1993, 261: 995—1004
 - 49 Talbot M R, Delibrias G A. A new late Pleistocene-Holocene water-level curve for lake Bosumtwi, Ghana. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 47: 336—344[DOI]
 - 50 Thompson L G, Thompson E M, Davis M E, et al. Kilimanjaro ice core records: evidence of Holocene climate change in tropical Africa. *Science*, 2002, 298: 589—593[DOI]
 - 51 葛兆帅, 杨达源, 李徐生, 等. 晚更新世晚期以来的长江上游古洪水记录. 第四纪研究, 2004, 24: 555—560
 - 52 夏正楷, 杨晓燕. 我国北方 4 ka BP 前后异常洪水事件的初步研究. 第四纪研究, 2003, 23: 667—674
 - 53 Booth R K, Jackson S T, Forman S L, et al. A severe centennial-scale drought in mid-continental North America 4200 years ago and apparent global linkages. *Holocene*, 2005, 15: 321—328[DOI]
 - 54 Kutzbach J E. The Changing Pulse of the Monsoon. In: Fein J S, Stephens P L, eds. *Monsoons*. New York: A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1987. 247—269
 - 55 de Menocal P B. Cultural responses to climate change during the late Holocene. *Science*, 2001, 292: 670—673
 - 56 俞伟超. 龙山文化与良渚文化衰变的奥秘. 文物天地, 1992, 3: 27—28
 - 57 吴文祥, 刘东生. 4000 aBP 前后东亚季风变迁与中原周围地区新石器文化的衰落. 第四纪研究, 2004, 24: 278—284

(2006-04-11 收稿, 2006-05-24 接受)