

试论未来极端气候事件发展趋势的不确定性

李志忠¹, 刘秀铭^{1,2,3*}, 陈秀玲¹, 姜修洋¹, 雷国良¹, 朱 芸¹, 靳建辉¹, 胡凡根¹

(1. 福建师范大学 a. 地理科学学院, b. 地理研究所, 福州 350007;

2. 兰州大学 a. 西部环境教育部重点实验室, b. 西部环境与气候变化研究院, 兰州 730000;

3. Macquarie 大学 环境与地理系, 澳大利亚 悉尼 NSW 2109)

摘要: 极端气候事件是在一定时间尺度上发生的不同于气候系统平均状态的气候突变。早第三纪的最热事件 (PETM), 第四纪中国黄土高原古土壤 S4、S5 记录的暖湿事件, 砂黄土 L9、L15 记录的干冷事件等都是在轨道时间尺度上发生的极端气候事件。末次冰消期的 YD 冷事件、全新世 9 次冷事件是在千—百年尺度上发生的极端气候事件。这些极端气候事件出现于地球气候系统不同的冷暖背景下, 它们的成因机制和表现形式有很多不确定性。20 世纪以来发生的干旱、洪水、飓风、雪灾、沙尘暴等极端气候事件, 无法用持续增加的温室气体的变化来解释。关于极端气候事件发生频率和强度随“全球变暖”而增加的结论也存在一定程度的不确定性。因此, 简单地将现代极端气候事件统统归因于“气候变暖”既不科学也不合理。深入研究各个时间尺度上发生的极端气候事件的波动性、周期性和不确定性特征, 有助于科学预测未来气候变化背景下极端气候事件的发展趋势。

关键词: 极端气候事件; 全球变暖; 时间尺度; 周期性; 不确定性

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1673-7105 (2012) 01-0012-09

Discussion on the Uncertain Development Tendency of Extreme Climate Events in Future

LI Zhi-zhong¹, LIU Xiu-ming^{1,2,3*}, CHEN Xiu-lin¹, JIANG Xiu-yang¹,

LEI Guo-liang¹, ZHU Yun¹, JIN Jian-hui¹, HU Fan-gen¹

(1. a. School of Geographical Sciences, b. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. a. Key Laboratory of West China's Environmental Systems (Ministry of Education), b. Research School of Arid Environment & Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Department of Environment and Geography, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia)

Abstract: Variations and trends in extreme climate events have recently received much attention since it is becoming more frequently and costly. Extreme climate events are happening on a certain time scale, being different from the abrupt climate change of climate system on the average state. The extreme climate events had happened at orbit scales and Millennial-Centennial scales, such as Paleocene-Eocene Thermal Maximum, the great warmth in Quaternary reflected by S4, S5 soils, and the severe dry-cold periods evidenced by the L9 and L15 at Chinese Loess Plateau, and the Younger Drays Event, the nine severe cold events respectively occurred in the last deglaciation and Holocene. These extreme climate events appeared in the earth's climate system under the background of different changes in temperature, however, there are a lot of uncertainties in their formation mechanism and

收稿日期: 2011-12-20

基金项目: 福建省公益类科研院所专项基金 (2010R1037-3) 和国家自然科学基金项目 (41072124、40830105、40721061) 资助

作者简介: 李志忠 (1962—), 男, 四川绵阳人, 博士, 教授, 主要从事干旱区地貌与环境研究, (E-mail) lizzfz@163.com.

* 通讯作者: 刘秀铭 (1956—), 男, 福建福州人, 博士, 教授, 主要从事第四纪地质与环境演变研究, (E-mail) xliu@fjnu.edu.cn.

representation. Since the 20th century, many extreme climate events such as droughts, floods, hurricanes and dust storms have taken place, which could not be explained only by the increasing of greenhouse gas, and the conclusion that the frequency and intensity of extreme climate events would increase along with the global warming still remains uncertain. Therefore, it is neither scientific nor reasonable if we simply ascribe modern extreme climate events to climate warming. So, an intensive study for the volatility, periodicity and uncertainty of the extreme climate events happened at different time scales will help us to predict the development tendency of extreme climate events under the background of climate change in the future.

Key words: extreme climate events; global warming; time scale; periodicity; uncertainty

0 引言

2011年11月28日—12月9日《联合国气候变化框架公约》第17次缔约方大会暨《京都议定书》第7次缔约方会议在南非德班举行,全球气候变化问题再度引起世人广泛关注.在世人就如何应对“全球变暖”进行热烈讨论的同时,各种昭示“全球变冷”的极端气候事件也在频频发生.例如,2010年新年伊始,凶猛的寒潮席卷了整个北半球.中国北方京津冀地区出现罕见的强降雪.北半球各地也都遭遇了暴雪与寒流的袭击.同时,南半球却暴雨成灾、洪水泛滥.未来全球气候是变暖还是变冷?未来极端气候事件的发展趋势是什么?这是IPCC AR4发表以来全球气候变化研究中各界普遍关注的问题.

IPCC AR4^[1]评估报告宣称,全球变暖将导致(或正在导致)更多的极端天气事件发生.关于极端气候事件AR4和TAR都作了明确的定义^[1-2],即,在给定时期内大量极端天气事件的平均状况,这种平均状态相对于该类天气现象的气候平均态也是极端的.虽然极端气候事件是发生概率极小的事件,但是与此相关的任何变化都可能对自然和社会产生重大的影响^[3].与极端气候事件相联系的气候突变则是指气候系统受强迫驱动,超过一定阈值而向另一气候状态的转变,其转变速率受气候系统自身控制,且快于强迫力作用的时间.可见,一种气候系统是否发生了突变,取决于整个气候系统的变化尺度,如在轨道尺度上和千年尺度上气候突变的时间定义是不一样的.因此应该倾向于广义极端气候事件的概念,即在一定时间尺度上发生的不同于气候系统平均状态的气候突变都称作极端气候事件.本研究概述各个时间尺度上发生的极端气候事件记录,重点关注极端气候事件发生背景、成因机制和发展趋势的不确定性问题.

1 新生代以来极端气候事件发生的不确定性

在数十万年至万年尺度的地质记录中,早第三纪发生的极端气候事件是较接近于现今的地球气候系统,但这些事件的发生机制迄今尚不太清楚^[4-5].其中,古新世—始新世发生的最热事件(PETM)是一次突然变暖事件,在10 ka以内深海温度增加3~5℃,表层海水温度增加4~8℃,而 $\delta^{13}\text{C}$ 至少发生3.0‰的负偏移(图1).关于PETM事件的发生机制,推测可能是由于气候系统对内部反馈或外部驱动机制进行响应造成的气候快速转型,也有学者认为PETM事件是起源于与海洋碳储库有关的地球化学反馈过程,即由于海洋气—水化合物(CH_4)的巨量释放造成的.那么,其中碳输入的原因是什么? CH_4 是否是来源于海底?热盐环流发生快速倒转的原因是什么?现有证据表明,PETM事件对地球表层系统各圈层相互作用及演化都发生了巨大影响,通过对它的研究可以更好的理解当今全球气候迅速变化的起因、过程及后果,从而为预测未来气候变化提供科学依据^[6-7].

一般认为全球冰量和太阳辐射变化是第四纪全球古环境在轨道时间尺度上演化的2个主要驱动因素,但中国黄土高原黄土—古土壤序列中发育程度较高的、反映极端暖湿环境的土壤S4、S5-1和S5-3,以及反映极端干冷气候的砂黄土L9和L15在深海氧同位素记录中没有明显反映.因此,郭正堂等^[8]、丁仲礼等^[9]指出,中国黄土高原的这两类极端气候事件,既不能用全球冰量的变化来解释,也不能用太阳辐射的变化来直接解释,因为在这两类事件发生时期,无论是全球太阳辐射还是全球冰量均没有任

何特殊性. 长期以来这种海、陆相记录的差异及其产生的原因受到众多学者的广泛关注^[8]. 譬如, 关于古土壤 S5 的成因环境, Guo 等^[10] 和 Yin 等^[11] 认为当时北大西洋深层环流 (NADW) 强度增加, 可能有利于将赤道和南半球的热量带到北半球, 北半球温度增加, 强夏季风给黄土高原带来极为暖湿的气候环境, 从而有利于发育厚层古土壤. Han 等^[12] 则认为 MIS13 时期黄土高原比现在更干旱, S5-1 (对应 MIS13) 强烈发育的土壤特征可能是较长成壤期的产物, 是在 MIS14 弱冰期背景下形成的. 迄今为止, 有关古土壤 S4、S5 和砂黄土 L9、L11 形成期的气候环境状况、原因和机制等还没有统一的认识, 这些极端气候事件所代表的区域和全球性意义一直有不同看法^[13-14].

按照轨道驱动理论, 北半球高纬度地带会在末次冰期向全新世转暖的过程中出现辐射量最大值, 全球气候应出现大幅度增温, 但此时很多地质记录表明全球发生了一次剧烈的气候恶化和环境灾变事件, 即 Younger Dryas (简称 YD) 冷事件 (图 2)^[15]. 这个最初发现于北大西洋及其相邻区域的冷事件, 几乎可以在全球范围内的海洋和陆地的古气候记录中找到相应证据. 研究表明, YD 事件发生在 12.5 ~ 11.5 ka BP, 这是末次冰消期全球气候变暖过程中出现的一次千年级降温事件. 由于 YD 事件代表了千年尺度的气候变化以及约在百年尺度上的大幅度突然降温和突然增温的典型气候事件, 对其机制和成因的研究无疑对认识现代气候变化规律和发展趋势具有重要意义. 关于 YD 事件的驱动机制, 大多研究认为是地球内部驱动的结果, 即淡水注入北大西洋引起温盐环流变化的结果; 也有研究认为热带海洋通过 ENSO 进行海-气耦合作用, 从而驱动了气候突然变化. 但是关于 YD 事件研究尚有许多科学问题未解. 譬如, YD 事件是否为全球性事件? 如果是全球性事件, YD 事件在全球又是如何分布的? 不同地区 YD 事件的发生机制和表现形式如何?

2 全新世极端气候事件发生的不确定性

Bond 等^[16] 最早根据浮冰碎屑 (IRD) 指出全新世北大西洋有 8 次流冰事件, 称之为冷事件, 包括

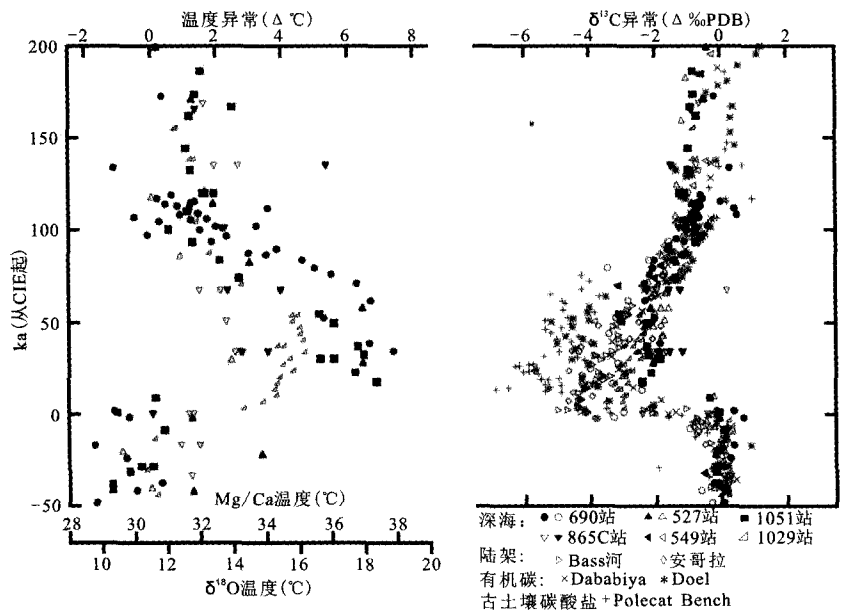


图 1 全球海洋和陆地记录的 PETM 时期有孔虫氧同位素和 Mg/Ca 温度及碳同位素负偏移^[5]

Figure 1 Compilation of carbon isotope records (right) and temperature proxy records (left) through the PETM

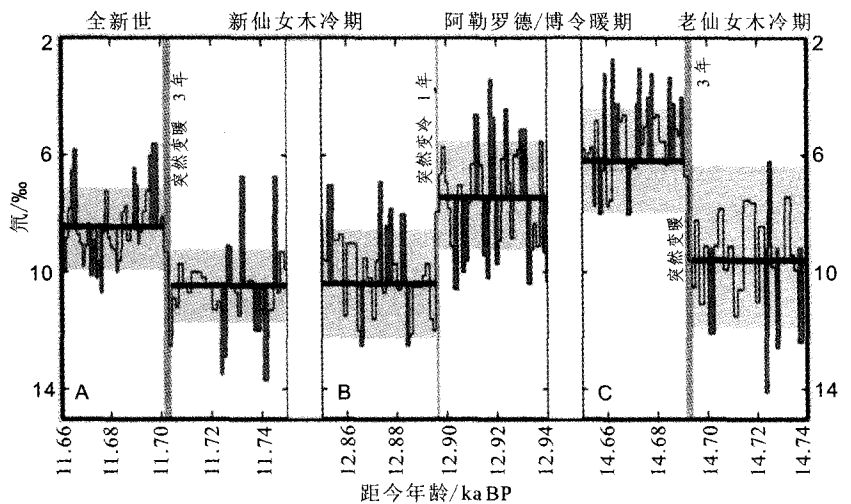


图 2 末次冰消期的气候突变事件^[15]

Figure 2 Abrupt climate events during the last glacial termination

后来发现的小冰期 LIA (Little Ice Age), 全新世 11.5 ka BP 至今共 9 次冷事件 (图 3)。研究表明, 这些冷事件与北半球乃至全球气候异常有密切的关系, 这些冷事件不仅对大西洋两岸的气候有重要影响, 而且可能通过大气环流和海洋环流影响到世界上其他地区^[17]。全新世冷事件一般仅维持 100~200 a, 而且开始和结束多在较短时间内完成, 所以也称为气候突变或快速气候变化。全新世中晚期发生的冷事件对人类古文明发展进程产生过重要影响。例如, 李瑜琴等^[18]根据地层学对比和剖面文化遗物分析, 确定黄河中游泾河在 4 200~4 000 a BP 发生了特大洪水事件。王绍武等^[19]综合历史学、考古学和古气候学证据也发现, 世界各地人类文明史在 2 200~2 000 BC 时期发生过重大变化, 这些事件主要发生在 4.2 a BP 冷事件前后。Brown 等^[20]发现 5 300 a 以来, 北美密西西比河流域发生的 7 次大洪水中有 5 次都发生在寒冷期。

小冰期寒冷气候事件最受关注, 因为它是距现代最近的全球性的典型寒冷气候期, 也是全球性的气候异常期, 曾对人类社会产生了深刻的影响 (图 4)^[21]。世界各地学者陆续报道了小冰期发生的干旱、洪水、飓风等极端气候事件。例如, Stahle 等^[22]认为过去 600 a 间北美洲最严重的干旱主要发生于小冰期。Schimmelmenn 等^[23]分析了北美洲西南部以及南美洲历史上发生的几次大洪水: 1029 年和 1605 年的洪水似乎与短暂寒流有关, 1418 年洪水发生在全球开始进入小冰期之际。Kalugin 等^[24]发现西伯利亚过去数百年的干旱事件主要发生在小冰期。Nesje 等^[25]对挪威南部湖泊的一个沉积岩芯分析发现, 中世纪之后是洪水频发期, 由于小冰期空气温度较低, 广泛的积雪与频繁的风暴引起了气候恶化。

Mock^[26]指出, 美国路易斯安那州 1779 年以来的飓风和热带气旋的活跃期是 1820s 早期, 1830s 早期和 1860s 早期。Björck 等^[27]分析认为, 北大西洋风暴高峰值发生在小冰期, 而低谷值出现在中期变暖时期, 并且最强冬季风暴的发生和强度与太阳活动减少有关。Jiang 等^[28]认为, 1 000 a 以来中国长江三角洲地区干湿交替, 极端天气频发、严重的时期发生在小冰期, 而不是温暖期。Liu 等^[29]发现中国广东省受台风袭击最频繁的 2 个时期都与小冰期内最冷最干旱的时期重合。此外, 张德二^[30]以持续时间 3 a 以上、干旱区覆盖 4 个省份以上的干旱事件为标准, 查得最近 1 000 a 来中国东部发生的重大干旱事件 14 例, 这些事件出

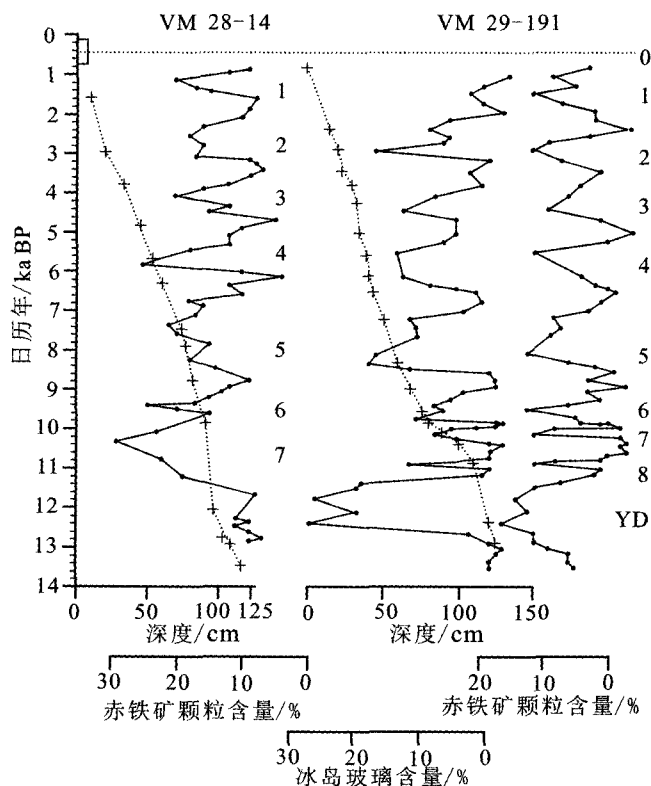
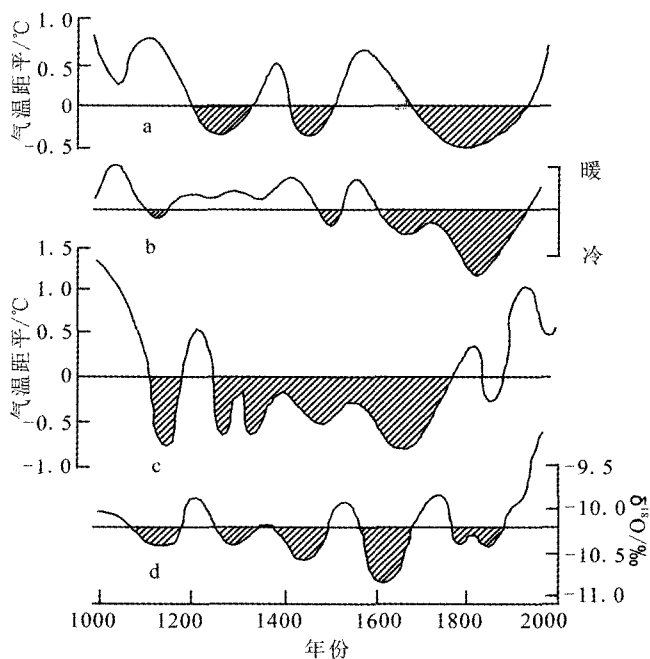


图 3 北大西洋全新世冷事件^[16]

Figure 3 The cold period in Holocene, different Holocene records compared, and Holocene events numbered from Bond et al



(a) 喜马拉雅喀喇昆仑山冰川; (b) 日本史料;
(c) 中国史料; (d) 中国冰芯 $\delta^{18}\text{O}$

图 4 小冰期东亚温度变化^[20]

Figure 4 Temperature changes of East Asia during LIA

现于宋元明清等不同朝代和不同的冷暖气候背景下。

上述全新世百年一千年尺度冷事件的动力学机制是什么?很显然难以用代表第四纪长期气候变化的地球外部动力机制的米兰科维奇理论来解释。随之诸多学者提出了众多以地球气候系统内部动力因素对气候突变的触发和放大效应为主要思路的解释机制。如冰盖系统内部动力驱动下的冰山涌进、大气系统内部的冷循环、大洋内部的不稳定^[31]等等。王绍武认为北大西洋早全新世冷事件可能与融冰淡水脉冲有关,中-晚全新世太阳活动减弱可能是冷事件发生的主要原因,但不排除有气候系统内部振荡的影响^[17]。小冰期气候的形成,可能受到太阳活动、火山活动、大气环流以及大气、海洋和陆地间相互作用的影响。但是,究竟太阳活动及其他自然因素能在多大程度上抵消或加强人为温室效应的影响尚须进一步研究。

3 近现代极端气候事件发生的不确定性

关于现代发生的极端气候事件, Easterling 等^[32]将其归为2类:一类基于简单的气候统计学。这些极端事件每年都会发生;另一类是更复杂一些的直接由事件发生与否来决定的。也有很多学者采用某个百分位值(如观测值中1%的最大或最小值)作为极端值的阈值,超过这个阈值被认为是极值,该事件可以认为是极端事件^[33]。

研究表明,19世纪以来世界各地发生的极度干旱、特大洪涝、超强飓风等极端气候事件与全球气候变化的关系十分复杂。Woodhouse 等^[34]认为20世纪世界各地的干旱在历史上处于中度水平,持续时间也比较短。Nicholson 等^[35]指出20世纪全球变暖并不是导致非洲大部分地区极度干旱的原因。Knapp 等^[36]研究发现太平洋西北部在20世纪极端干旱年份的数目(26个)少于比较冷的16世纪及17世纪(38个)。

Gedalof 等^[37]发现在19世纪40年代俄勒冈州戴尔斯哥伦比亚河水量持续减少可能是过去250 a间最严重的,而20世纪发生的干旱事件比过去许多干旱的持续时间都要短。Hidalgo 等^[38]发现科罗拉多河上游地区极端干旱事件在世纪尺度上存在周期性变化现象。Andreadis 等^[39]发现,在20世纪美国大部分地区的干旱持续期变得更短,干旱发生频率和程度更低,发生范围也减小了。Van der Schrier 等^[40]发现,北美大部分地区在20世纪70和90年代比较湿润,未发现1901—2002年间存在干旱加剧的趋势。Lins 等^[41]通过美国1500个观测点的流量数据,发现在20世纪大气温度逐渐升高,气候也随之湿润,并且极端事件并未增加。

王欣等^[42]基于湖南1951—2006年期间的气温、降水资料,分析了研究区极端高温、极端低温、暴雨和干旱事件的变化特征。结果表明:研究区极端高温、低温和干旱事件变化总体上呈显著下降趋势;虽然暴雨频次略有上升但不显著。陈效述等^[43]利用黄河流域58个气象站点1961—2005年气象要素观测数据,分析了黄河流域极端气候事件的变化趋势及其空间格局。结果表明:黄河流域极端低温和极端高温天数分别呈减少和增加趋势,年极端强降水总量的变化趋势存在着明显的区域差异。

Bove 等^[44]发现,在1966—1995年间所有在美国登陆的飓风和强飓风数量都呈现下降趋势。Landsea 等^[45]认为,1991—1995年由暖期(厄尔尼诺期)向冷期(拉尼娜期)的转变引起了一系列天气条件的剧烈变化。Balling 等^[46]建立了一个1950—2002年间的的海热带风暴数据库,发现热带风暴的发生和持续时间并不与全球气温变化相关。Parisi 等^[47]利用1900—2006年的历史数据,从统计上证明美国飓风袭击的频率随全球变暖而上升这一假设是不成立的。

Singh 等^[48]分析了北印度洋1877—1998年间的的海热带气旋数据。这一时期全球正在转暖,但热带气旋的频率却在降低,平均每年飓风的发生次数减少1次。Raghavan 等^[49]发现孟加拉湾的印度安德拉邦在1891—1997年间的飓风频率出现了显著下降趋势,过去40 a下降幅度最大。张德二^[50]研究指出,最近50 a来西北太平洋生成的强热带气旋的个数呈减少趋势,影响中国的台风个数也呈显著减少趋势,登陆中国的热带气旋频数也趋于减少,而且西北太平洋热带气旋的平均强度和超强台风个数并没有随全球变暖而显著地线性递增(图5)^[51]。

关于中国最近数十年沙尘暴的变化趋势。从气象观测记录来看,在全球平均温度迅速上升时,中

国北方地区的沙尘天气日数总体上呈减少趋势。中国沙尘暴的发生频数与温度背景存在负相关关系（图6）^[52]。

4 全球气候变化趋势及极端气候事件发生的不确定性

虽然 IPCC AR4 对持续数十年“全球变暖”的事实及其成因做出了进一步的肯定判断，但是上述支持“全球变冷”的证据也并不少见。从各种时间尺度极端气候事件发生规律分析，在全球变暖的同时也面临着突然进入“冰川时代”的可能，因为现今的全球变暖很可能是在轨道时间尺度变冷趋势过程中的次级波动。Dansgaard 等^[53]发表的格陵兰冰芯氧同位素谱分析表明，地球气候有 10 万年的轨道周期变化。其中，9 万年为冷期，1 万年为暖期。迄今全新世暖期已持续了 1 万年左右，理应在数十或数百年内结束。2007 年，俄罗斯科学家提出，对地球气候影响最大的是太阳系活动的变化，而不是温室气体的排放，地球冷暖变化是对太阳黑子数量和大小变化的反映。目前太阳已进入“冷却周期”，太阳辐射强度正在缓慢地下降，人类活动导致的“温室效应”无法阻止全球性的气候变冷趋势。王绍武等^[54]指出，无论从近千年还是近万年来看，太阳活动均存在一系列的极大期和极小期，近千年就有 4 次太阳活动极小期。根据 1965 年以来各种与太阳活动有关指数的观测，太阳活动已经或即将回到 20 世纪初期的低点。这标志着 1920 年以来的强太阳活动期（现代极大期）即将结束。

全球气候变化是地球气候系统的次一级子系统，具有不同时间尺度的波动性、周期性和不确定性特征，同时又有时间与空间、整体与局部的复杂关系。因此，极端气候事件不仅可以在冷期发生，也可以在暖期发生，或在冷暖干湿气候转换的过渡时期发生。因此，对于未来极端气候事件发展趋势预测，既需要了解那些基于地球轨道参数变化所导致的万年尺度的气候长期波动和基于火山活动、太阳活动、南方涛动、厄尔尼诺等所导致的短期气候颤动，也需要了解那些基于地球气候系统对其内外部气候驱动因子的非线性反馈所导致的持续数百年、数千年的气候突变事件。

无论未来数十年全球气候变暖抑或变冷，对未来极端气候事件发生频率和强度的预测都存在极大的不确定性，近百年发生的极端气候事件并非都与“全球变暖”有关，当今“气候变暖”尚存诸多不确定性，如果以不确定的气候变化理论来制定应对“全球变暖”的政策，显然不是科学的方法。因此，气候变化预测、极端气候事件发生机制的不确定性问题有赖于在更精确的时间标尺上，进行更加广泛的多学科交叉综合研究，对孕育极端气候事件的陆—海—气耦合系统、高一低纬相互作用等科学问题进行综合集成研究。

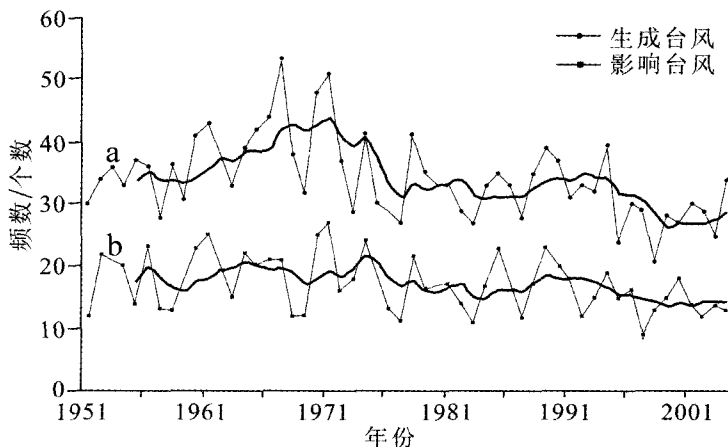


图5 西北太平洋和南海生成的台风（a）和影响中国的台风（b）频数变化（粗线为5 a滑动平均）^[51]

Figure 5 Time series of the number of typhoon in the Northwestern Pacific and South China Sea (a) and the number of typhoon affecting China (b) during 1951—2004 (Heavy lines show the 5-years running averages)

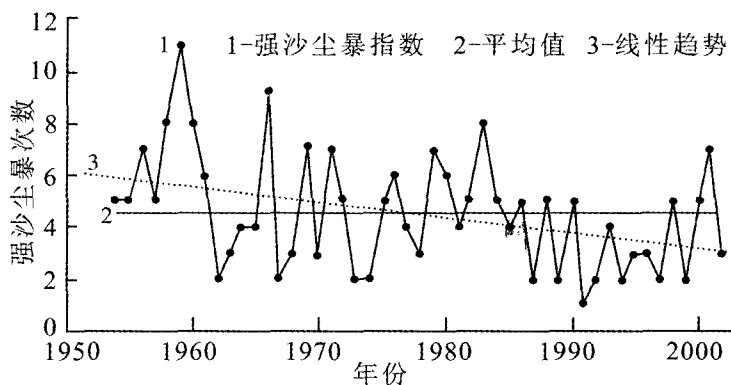


图6 中国北方强沙尘暴发生次数逐年变化^[52]

Figure 6 Times changes of heavy sandstorm every year in north China

5 小结

综上所述,各种极端气候事件的发生有着许多不确定性,简单的将它们归因于“气候变暖”是不科学的.尤其是现在,只要是灾害,各大媒体大多将它们归因于气候变暖所致,这样做显然不是科学的思维.因为,如果将降雨增多归因于气候变暖是可以理解的,因为气候变暖导致降雨增加,符合科学逻辑关系.但是干旱与水灾是对立的,干旱又如何能够与“气候变暖”联系起来?雪灾是降温,而且近年雪灾是席卷了整个北半球的“全球变冷”,如此变冷事件也能从科学上与“全球变暖”联系起来?这或许与IPCC报告密切相关.IPCC-AP4中表3.2列出由极端天气和气候事件变化引起的气候变化影响的可能性的估算.认为“很可能”导致强降水,也“可能”引起“受干旱影响的地区增加”^[1].但是“干旱”和“强降水”是一对矛盾的两方面,气候变暖可以造成局部区域“干旱”和“强降水”并存;却不可能造成“干旱”和“强降水”并存的总体趋势.IPCC并没有区分局部区域与全球总体趋势,给出“气候变暖”的估算既“很可能”导致强降水,也“可能”引起干旱.如此这般,任何灾难性气候事件都与“全球变暖”联系,是否近乎一种病态科学?而为病态科学推波助澜的背后又有什么真实目的吗?深究这些问题,岂不发人深省?

参考文献 (References):

- [1] IPCC-AR4. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [C] //Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC-TAR. Climate Change 2001: The Scientific Basis [C] //Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2001.
- [3] Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages [J]. *Climatic Change*, 1992, 21 (3): 289-302.
- [4] Bralower T J, Silva I P, Malone M J, et al. New evidence for abrupt climate change in the Cretaceous and Paleogene: An ocean drilling program expedition to Shatsky Rise, northwest Pacific [J]. *GSA Today*, 2002, 12 (11): 4-10.
- [5] Cramer B S, Kent D V. Bolide summer: The Paleocene/Eocene thermal maximum as a response to an extraterrestrial trigger [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 224: 144-166.
- [6] Liu Zhi-fei, Hu Xiu-mian. Extreme climate events in the Cretaceous and Paleogene [J]. *Advance in Earth Science*, 2003, 18 (5): 681-690. [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.]
- [7] Zhao Yu-long, Liu Zhi-fei. The impacts of the Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM) event on earth surface cycles and its trigger mechanism [J]. *Advance in Earth Science*, 2007, 22 (4): 341-349. [赵玉龙, 刘志飞. 古新世—始新世最热事件对地球表层循环的影响及其触发机制 [J]. 地球科学进展, 2007, 22 (4): 341-349.]
- [8] Guo Zheng-tang, Jiang Wen-ying, Lü Hou-yuan, et al. Pleistocene climate extremes in east Asia and their causes [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9 (1): 113-120. [郭正堂, 姜文英, 吕厚远, 等. 东亚季风区的极端气候事件及其原因 [J]. 地学前缘, 2002, 9 (1): 113-120.]
- [9] Ding Zhong-li. *Integrated Study on Environment Evolution in West China* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 95-107. [丁仲礼. 中国西部环境演化集成研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2010: 95-107.]
- [10] Guo Zheng-tang, Liu Tung-sheng, Fedoroff N, et al. Climate extremes in loess of China coupled with the strength of deep-water formation in the North Atlantic [J]. *Global and Planetary Change*, 1998, 18 (3-4): 113-128.
- [11] Yin Qiu-zheng, Guo Zheng-tang. Strong summer monsoon during the cool MIS 13 [J]. *Climate of the Past*, 2008, 4: 29-34.
- [12] Han Jing-tai, Fyfe W S, Longstaffe F J. Climatic implications of the S5 paleosol complex on the southernmost Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Research*, 1998, 50 (1): 21-33.
- [13] Bronger A, Heinkele T H. Micromorphology and genesis of palaeosols in the Luochuan loess section, China: Pedostratigraphic and environmental implications [J]. *Geoderma*, 1989, 45: 123-143.
- [14] Billard A. Is a middle Pleistocene climatic optimum recorded in the loess-palaeosol sequences of Euroasia? [J]. *Quaternary International*, 1993, 17: 87-94.

- [15] Steffensen J P, Andersen K K, Bigler M, *et al.* High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years [J]. *Science*, 2008, 321: 680-684.
- [16] Bond G, Showers W, Cheseby M, *et al.* A pervasive millennial scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates [J]. *Science*, 1997, 278: 1257-1266.
- [17] Wang Shao-wu. Holocene cold events in the north Atlantic: Chronology and climate impact [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29 (6): 1146-1153. [王绍武. 全新世北大西洋冷事件: 年代学和气候影响 [J]. 第四纪研究, 2009, 29 (6): 1146-1153.]
- [18] Li Yu-qin, Huang Chun-chang, Zha Xiao-chun, *et al.* Palaeoflood occurrence in the late period of the Longshan Culture in the middle reaches of the Jinghe River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64 (5): 541-552. [李瑜琴, 黄春长, 查小春, 等. 泾河中游龙山文化晚期特大洪水水文学研究 [J]. 地理学报, 2009, 64 (5): 541-552.]
- [19] Wang Shao-wu. Abrupt climate change and ancient civilization decline during 2200—2000 BC [J]. *Advance in Natural Science*, 2005, 15 (9): 1094-1099. [王绍武. 2200—2000 BC 的气候突变与古文明衰落 [J]. 自然科学进展, 2005, 15 (9): 1094-1099.]
- [20] Brown P, Kennett J P, Ingram B L. Marine evidence for episodic Holocene mega floods in north America and the northern Gulf of Mexico [J]. *Paleoceanography*, 1999, 14: 498-510.
- [21] Wang Shao-wu. Studies on climate of the Little Ice Age [J]. *Quaternary Sciences*, 1995, 15 (3): 202-212. [王绍武. 小冰期气候的研究 [J]. 第四纪研究, 1995, 15 (3): 202-212.]
- [22] Stahle D W, Cook E R, Cleaveland M K, *et al.* Tree-ring data document 16th century mega drought over North America [J]. *EOS: Transactions, American Geophysical Union*, 2000, 81: 121-125.
- [23] Schimmelmänn A, Lange C B, Meggers B J. Palaeoclimatic and archaeological evidence for a 200-yr recurrence of floods and droughts linking California, Mesoamerica and South America over the past 2 000 years [J]. *The Holocene*, 2003, 13: 763-778.
- [24] Kalugin I, Selegei V, Goldberg E, *et al.* Rhythmic fine-grained sediment deposition in Lake Teletskoye, Altai, Siberia, in relation to regional climate change [J]. *Quaternary International*, 2005, 136: 5-13.
- [25] Nesje A, Dahl S O, Matthews J A, *et al.* A ~4 500-yr record of river floods obtained from a sediment core in Lake Atnsjoen, eastern Norway [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25: 329-342.
- [26] Mock C J. Tropical cyclone variations in Louisiana, USA, since the late eighteenth century [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9: 10. 1029/2007GC001846.
- [27] Björck S, Clemmensen L B. Aeolian sediment in raised bog deposits, Holland, SW Sweden: A new proxy record of Holocene winter storminess variation in southern Scandinavia? [J]. *The Holocene*, 2004, 14: 677-688.
- [28] Jiang T, Zhang Q, Blender R, *et al.* Yangtze Delta floods and droughts of the last millennium: Abrupt changes and long term memory [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, 82: 131-141.
- [29] Liu K B, Shen C, Louie K S. A 1 000-year history of typhoon landfalls in Guangdong, southern China, reconstructed from Chinese historical documentary records [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2001, 91: 453-464.
- [30] Zhang De-er. Major drought events over the past 1 000 years [J]. *Meteorological Knowledge*, 2005: 36-38. [张德二. 中国近 1 000 年重大干旱事件 [J]. 气象知识, 2005: 36-38.]
- [31] Xian Feng, Zhou Wei-jian, Yu Hua-gui. The abrupt changes and periodicities of climate during Holocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26 (5): 109-115. [鲜锋, 周卫健, 余华贵. 全新世气候系统的突变及周期性 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26 (5): 109-115.]
- [32] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, *et al.* Climate extremes: Observations, modeling and impacts [J]. *Science*, 2000, 289 (5487): 2068-2074.
- [33] Ding Yu-guo, Zheng Chun-yu, Shen Hong-yan. Progress in extreme climatic change [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2008, 2 (6): 1-5. [丁裕国, 郑春雨, 申红艳. 极端气候变化的研究进展 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2 (6): 1-5.]
- [34] Woodhouse C A, Overpeck J T. 2 000 years of drought variability in the central United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2693-2714.
- [35] Nicholson S E. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries [J]. *Climate Research*, 2001, 17: 123-144.

- [36] Knapp P A, Grissino-Mayer H D, Soule P T. Climatic regionalization and the spatio-temporal occurrence of extreme single-year drought events (1500—1998) in the interior Pacific Northwest, USA [J]. *Quaternary Research*, 2002, 58: 226-233.
- [37] Gedalof Z, Peterson D L, Mantua N J. Columbia River flow and drought since 1750 [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40: 1579-1592.
- [38] Hidalgo H G, Piechota T C, Dracup J A. Alternative principal components regression procedures for dendrohydrologic reconstructions [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36: 3241-3249.
- [39] Andreadis K M, Lettenmaier D P. Trends in 20th century drought over the continental United States [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 10. 1029/2006GL025711.
- [40] Van der Schrier G, Briffa K R, Osborn T J, et al. Summer moisture availability across North America [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: 10. 1029/2005JD006745.
- [41] Lins H F, Slack J R. Streamflow trends in the United States [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 227-230.
- [42] Wang Xin, Ling Juan, Mo Hong-wei, et al. Extreme climate events in Chang-Zhu-Tan District since 1950s [J]. *Tropical Geography*, 2008, 28 (6): 504-512. [王欣, 凌娟, 莫宏伟, 等. 长株潭地区 20 世纪 50 年代以来极端气候事件变化特征 [J]. 热带地理, 2008, 28 (6): 504-512.]
- [43] Cheng Xiao-qiu, Liu Li, Wei Yang-ping. Extreme climate events trend during 1961—2005 in Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 2011, 33 (5): 3-5. [陈效逯, 刘立, 尉杨平. 1961—2005 年黄河流域极端气候事件变化趋势 [J]. 人民黄河, 2011, 33 (5): 3-5.]
- [44] Bove M C, Elsner J B, Landsea C W, et al. Effect of El Niño on US landfalling hurricanes, revisited [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2477-2482.
- [45] Landsea C W, Bell G D, Gray W M, et al. The extremely active 1995 Atlantic hurricane season: Environmental conditions and verification of seasonal forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 1998, 126: 1174-1193.
- [46] Balling Jr R C, Cervený R S. Analysis of the duration, seasonal timing, and location of North Atlantic tropical cyclones: 1950—2002 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: 10. 1029/2003GL018404.
- [47] Parisi F, Lund R. Return periods of continental US hurricanes [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21: 403-410.
- [48] Singh O P, Ali Kahn T M, Rahman Md. S. Has the frequency of intense tropical cyclones increased in the North Indian Ocean? [J]. *Current Science*, 2001, 80: 575-580.
- [49] Raghavan S, Rajesh S. Trends in tropical cyclone impact: A study in Andhra Pradesh, India [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84: 635-644.
- [50] Zhang De-er. On global warming and extreme climate [J]. *Nature Magazine*, 2010, 32 (4): 213-216. [张德二. 全球变暖和极端气候事件之我见 [J]. 自然杂志, 2010, 32 (4): 213-216.]
- [51] Wang Xiao-ling, Wang Yong-mei, Ren Fu-ming, et al. Interdecadal variation in frequencies of typhoon affecting China during 1951—2004 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2 (3): 135-138. [王小玲, 王咏梅, 任福民, 等. 影响中国的台风频数年代际变化趋势: 1951—2004 年 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2 (3): 135-138.]
- [52] Zhou Zi-jiang, Zhang Guo-cai. Typical heavy sandstorm events in north China (1954—2002) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (11): 1224-1228. [周自江, 张国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件 (1954—2002 年) [J]. 科学通报, 2003, 48 (11): 1224-1228.]
- [53] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. *Climate Record Revealed by the Camp Century Ice Core* [M] //Turekian K K, ed. Late Cenozoic Glacial Ages Symposium 1969. New Haven, Connecticut: Yale University Press, 1971: 37-56.
- [54] Wang Shao-wu, Wen Xin-yu, Huang Jian-bing. Global cooling in the immediate future? [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (30): 2980-2985. [王绍武, 闻新宇, 黄建斌. 不久的将来气候会变冷吗? [J]. 科学通报, 2010, 55 (30): 2980-2985.]