

从地球系统的观点看气候突变

高晓清^{1,2}, 朱德琴³, 姚济敏¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002;
3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要:在地球的气候史中, 经历了许多次气候突变事件。这些突变对地球表层系统的演变与进化产生了巨大影响。随着全球气候变暖的持续发展, 人类赖以生存的气候环境正在经历重大变化。如何科学地理解和认识这些变化, 尤其是气候突变, 是人类寻求对策, 应对气候变化, 保护自己持续发展的科学基础。文中从地球系统的角度对气候突变的科学问题进行了探讨, 认为对气候突变的研究不应仅局限于大气圈, 而应该对地球系统的整体变化进行研究。

关键词:地球系统; 气候系统; 气候变化; 气候突变
中图分类号: P461 **文献标识码:** A

引言

随着人类经济社会的不断进步, 与人类生活及生产活动紧密相关的气候变化问题越来越受到社会各界的极大关注。全球变暖、温室效应、厄尔尼诺、臭氧洞等气候变化的有关名词已进入人们的日常生活中。可以说, 人类对自身生存的危机感从来没有像现在这样紧迫。因此, 对气候变化的原因、规律及预测问题已成为当今地球科学领域研究的重要内容和热点问题。气候变化的研究目前主要从事事实的揭露、机制的探索、人类影响的判断、未来气候的预测及人类为了可持续发展需要采取的适应对策研究等方面进行^[1]。

我们知道, 地球气候总是处在不断的变动之中。这种变动既包括缓慢的、连续性的周期变化, 也包括快速的、不连续的突变。在气候变化研究领域, 为了预测未来气候的变化, 气候学家的注意力主要集中在过去气候变化的规律性方面, 揭示气候变化的内在原因和外部驱动力的作用机理。这些研究的基础认识是: 气候是“随时间演变的, 其变化服从一定的规律, 当初始情况确定以后, 未来的情况将由这个变化规律来决定”^[2]。这实际上是一种“渐变论”的观点。但从对古气候代用资料(湖芯、冰芯、树轮、黄土沉积、深海岩芯、苞粉等)的研究中, 早已发现在地球

气候的演化史中曾经多次发生过大范围、不同时间尺度上的气候突变事件。这些事件的发生具有随机性、跳跃性、不连续性。就目前的认识而言, 这些事件的因果之间呈现非线性关系^[3]。气候突变事件的发现对气候变化的研究提出了新的挑战。地球系统概念的提出, 使我们有必要从地球系统这一角度对气候突变重新思考。

1 近代大气科学发展回顾

大气科学作为一门有物理基础的自然科学学科从 17 世纪开始创建以来已经有 300 多 a 的历史了。综观这一发展历史, 大气科学已经经历了 4 个飞跃时期, 每次飞跃都是以思想的扩展和研究工具的重大突破, 并随之引起学科研究方向的转移为标志。

18 世纪到 19 世纪 60 年代是大气科学发展的最初阶段。在这段时期, 气象仪器相继发明, 如温度表、雨量器、气压表等。气象学也从定性分析迈向定量的气象观测数据而形成。另外在这段时期, 随着航海业的发展, 加之气象仪器的应用, 导致了对信风和全球大气环流的研究。

19 世纪 60 年代到 20 世纪 40 年代是大气科学发展的第 2 个时期, 在这一时期由于无线电报的发明, 使得观测的地面数据能迅速传递集中, 地面气象站在这一时期得到迅速发展, 形成了有一定密度的

收稿日期: 2004 - 11 - 15; 改回日期: 2004 - 12 - 03

基金项目: 国家自然科学基金委员会地球科学部重点项目“全球变化背景下华北持续干旱的成因与预测理论研究”(40231005) 资助。

作者简介: 高晓清(1966 -), 男, 甘肃人, 研究员, 从事气候变化研究。

地面观测网,随之地面天气图得到广泛应用。天气图的诞生是近代气象学建立的标志。在 1918 ~ 1928 年间,挪威气象学家, V. Bjerknes 创立了锋面学说,同时将流体力学和热力学应用于大气和海洋的大尺度运动的研究,提出了著名的环流理论,形成了著名的“挪威学派”,从此天气学和动力气象学形成并得到发展。

到 20 世纪 40 年代左右,无线电探空仪的发明使人类对大气圈的认识拓展到四维空间,使大气科学发生新的飞跃。在此期间的重要进展是 C. G. Rossby 从高空天气图上发现了长波,提出长波动力学,创立了长波理论,形成著名的“芝加哥学派”。“芝加哥学派”和“挪威学派”奠定了天气学和动力气象学的基础,从而使大尺度气象理论得到迅速发展。这是第 3 个发展时期。这个时期大致发展到 20 世纪 80 年代。这 40 a 中,全球大尺度大气运动的研究取得了巨大进展,许多理论,如准地转理论、适应理论、突变理论和不稳定理论等相继被提出,大尺度天气学进入成熟阶段;计算机技术的出现和发展为大气科学的发展提供了强有力的工具,数值实验成为研究大气科学的重要手段,是大气科学从描述性学科成长为具有坚实数值基础的学科;同时,气象卫星、气象火箭、激光、微波、红外和声学等遥感探测手段以及各种化学痕量分析方法等新技术的使用,许多新的学科分支如大气遥感、卫星气象学、大气边界层物理、大气辐射和大气光学、雷达气象、中层大气物理、大气化学和雷电气象学等相继兴起和发展,使大气科学发展成为分支学科众多的综合学科。

之后到现在,是大气科学发展的第 4 个时期。这个时期开始的标志是“气候系统”和“地球系统”概念的提出。

随着人类经济社会的进步和科学的深入发展,大气科学家们越来越认识到,人类赖以生存的大气环境的变化不止受到大气圈自身运动规律的控制,还受到来自与大气圈进行物质和能量交换的其他圈层的影响。“气候系统”(Climate System)的概念在 1974 年的一次国际气候讨论会上被首次提出^[4]。接着在 1979 年的“世界气候大会”上,明确要求将气候系统的 5 个圈层(岩石、水、冰雪、大气、生物)结合起来研究^[5]。这标志着人类在气候变化问题认识上的一次质的飞跃,将气候学从气象学与地理学之下的一个分支学科,提升为地球物理学、地质学、海洋学、水文学、气象学和生态学之间的一个交叉学

科。使气候变化研究不再仅局限于大气圈,而将它视为是“气候系统各子系统间的相互作用在大气圈中的反映”。在此思想的指导之下,近 30 a 来,气候学得到了突飞猛进的发展。其实早在 1967 ~ 1982 年间,由世界气象组织与国际科联理事会共同组织和领导的“全球大气研究计划”(GARP)中,气候系统的概念已经被体现,只是没有被明确提出而已。该计划中的重要目的之一就是要了解决定大气环流统计性质的各种因子,以便更进一步认识气候形成和变化的物理基础。1997 年 2 月 12 ~ 23 日,在日内瓦召开的“气候与人类”专家会议上,由世界气象组织提出的“世界气候计划”(WCP)得到大会通过。该计划由世界气候资料计划(WCDP)、世界气候知识应用计划(WCAP)、世界气候影响研究计划(WCIP)和世界气候研究计划(WCRP)组成。其中,WCRP 的目标是研究气候变化和变迁的机制,通过物理—数学模型模拟气候系统和估计气候系统在时空两方面的可预报性;研究气候对自然和人为影响的敏感性和反应;搞清楚自然和人类影响的相互关系。由此可见,气候系统的概念在此计划中得到明确体现,并成为指导以后气候研究的重要思想。

“气候系统”的概念提出后,明确了今后气候研究的指导思想,即各子系统之间的相互作用决定着系统的整体特征。这一概念扩展了气候研究的视野和思路。它是如此之吸引人,以至于地球科学家紧跟着在 20 世纪 80 年代初提出了“地球系统”(Earth System)的概念^[6]。两者的差别仅在于将前者中的“岩石圈”换成为“固体地球圈”(包括岩石圈、上下地幔和内外地核)。气候变化的研究也随之扩充为“全球变化”(Global Change)的研究。由此,“气候系统”实际上就成为“地球系统”的表层系统,其质量比地球系统小 2 数量级。1998 年美国气象学会计划委员会在向其理事会的 10 a 展望研究报告中曾明确指出:“许多大气过程若按地球系统的孤立成分对待,就无法进行全面的分析、理解和预测。”全球变化研究开始的标志是“全球变化研究计划”(GCRP)的实施。该计划是国际科联理事会(ICSU)于 1986 年就开始组织的以全球变化为核心的综合国际计划。这个计划包括 3 个大型国际计划,即国际地圈与生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)和全球环境变化的人为影响研究计划(HDP)。IGBP、WCRP 和 HDP 一起成为制定保护全球气候公约和人类生存环境的重要科学支柱,同时又是当前地学、

生物学的前沿科学领域。它以新兴的地球系统科学为指南,必将对未来科学的发展产生深远的影响。

地球系统概念的提出是长期科技发展,特别是过去几十年地球科学、生命科学各分支研究和技术发展的必然结果。目前,地学和生物学各学科的研究已渐趋成熟,并相互交叉渗透,圈层之间的界面过程研究已成为学科发展的当务之急。地学家们已经认识到地球系统各部分相互作用及其对外源的响应是理解地球这一系统整体行为的关键。对全球变化过程的研究关系到未来人类生存和可持续发展的进程。气候变化作为全球变化的核心问题应从地球系统的高度认真加以研究。而作为气候变化重要内容的气候突变问题更应该从地球系统的角度来认识。

2 气候系统与地球系统

下面我们看一下气候系统和地球系统的各自特点,以了解自然演变进程的矛盾性。

表1是地球系统各圈层的基本参数,其中固体部分是根据“初步参考地球模型”(Preliminary Reference Earth Model)计算得到的^[7]。可见,在地球系统各子系统中,地圈的质量是水圈的 10^3 倍。是大气圈的 10^6 倍;若取大气圈的热容量为1,则水圈的热容量是大气圈的 10^3 倍,地圈是大气圈的 10^6 倍。这就是说,整个地球系统的质量和热容量有99%以上集中在“地圈”中。水圈、大气圈,包括生物圈总加起来亦不足整个地球系统质量和热容量的1%。于是“地圈”自然成为地球系统的中心。

表1 地球系统中各圈层的基本参数^[7]

Tab. 1 The some parameters of the sub-systems in Earth system^[7]

名称	厚度(km)	质量(kg)	定压比热(J/G·K)	热容量比	相态
大气圈	8 ^注	5.3×10^{18}	1.00	1	气
水圈	2.7	1.4×10^{21}	4.20	10^3	液
冰雪圈	0.07	3.00×10^{19}	2.10	10	固
岩石圈	77	0.1×10^{24}	1.24	2×10^4	固
上地幔	590	1.0×10^{24}	1.26	2×10^5	二相态
下地幔	2 220	3.0×10^{24}	1.26	7×10^5	固
外核	2 260	1.8×10^{24}	0.68	2×10^5	液
内核	1 221	0.1×10^{24}	0.64	10^4	固

注:取均质大气厚度

图1和图2是气候变化和地圈变化的特征时间尺度^[8]。从图中可以看到,气候变化的特征尺度只是地圈变化特征尺度的一个子集。地圈的所有变化都在气候变化的特征尺度中有对应。这种影响通过两种形式来达到,一是地圈通过与大气圈的能量(热

量和动量)交换改变大气圈的热状况,使气候发生变化;另一种是地圈与大气圈的物质交换改变大气圈的物质组成,即通过地球生物化学循环来影响。

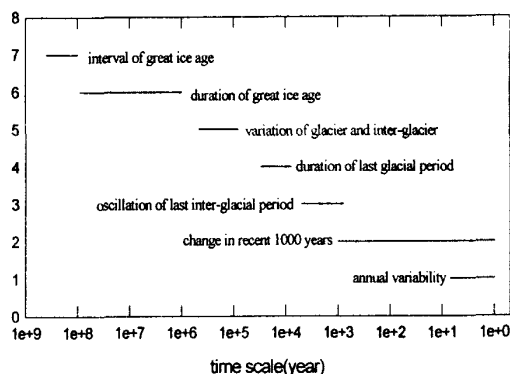


图1 气候变化的时间尺度范围

Fig. 1 The time scale range of climate change

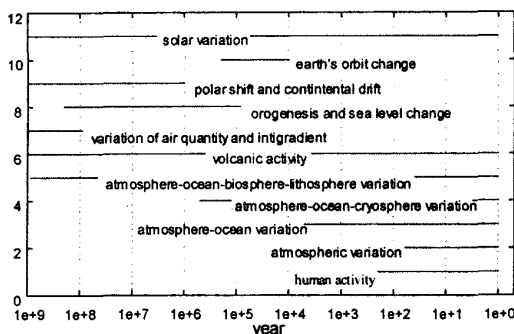


图2 地圈变化的时间尺度范围

Fig. 2 The time scale range of geosphere

汤懋苍从大气运动的能量观点将气候谱分为7段见表2^[9]。由表可见,不同时间尺度的大气运动其扰动能源是不同的。随着时间尺度逐渐变长,大气运动已不再仅由其本身所决定,而逐渐由地球及其以外的因素所控制。因此,对于气候变化而言,其主要矛盾在于地圈的变化。对于气候变化,尤其对于气候突变现象而言,应从地球系统的角度去研究、

表2 天气谱分段一览表^[9]

Tab. 2 The spectrum of weather and climate^[9]

谱段区间	0~5 d	5~10 d	10 d~3个月	3个月~ 10^0 a
扰动能源	动能转换	潜能转换	辐射能转换	能量随机耗散
习惯名称	短期天气	中期天气	长期天气	短期气候
外源强迫	日变化	-	-	年变化
谱段区间	$10^0 \sim 10^5$ a	$10^5 \sim 10^6$ a	$10^6 \sim 10^9$ a	
扰动能源	地热释放	能量随机耗散	地幔对流宇宙因素	
习惯名称	历史气候	古气候(或地质气候)	地质气候	
外源强迫	米氏周期	-	银河周期	

认识和把握。

3 气候变化和气候突变

所谓气候是地球与大气之间长期的能量和物质交换过程所形成的一种自然环境因子。气候的含义不只是几个要素简单的平均状况,而是热量、水分及空气运动的大气综合状态的统计特征,既包括平均状况,也包括各种可能状况的概率分布,及其极端状况。在气候的概念中,已经包含了气候变化的含义,即气候变化是长时期内气候状态的变化。它通常用气候要素统计量的差异来表示。气候变化的原因很复杂,至今看法分歧。在现代气候形成的研究中,注意到太阳活动、大气环流、下垫面性质和人类活动等各方面的因子。这些因子中具有时间尺度从几年到几百年的变化,与现代气候变化的尺度相当,是研究现代气候变化的主要方面。但是,对更长时间尺度的气候变化来说,其他因子,如地壳变化(海陆变迁、地势升降等)和地球天文参数的变化(如地轴倾斜度、岁差、地球轨道、偏心率等),都有重要作用,他们是地质历史时期气候变化研究的重要方面。

当气候在一个较短的时期内,在一个大范围内发生剧烈变化时,可以简单地认为就是气候突变。这种突变比我们一般给定的时间内(如 30 a)的变化要快。从冬到夏的温度变化(在有些地方比冰期—间冰期的温度变化还大),是在太阳辐射强迫下近似于正弦变化的一种渐变过程。它不是我们所说的气候突变。所谓突变不仅是指快速变化,还意味着这种变化达到了一个突破点——一个门槛,既这种变化不是平滑地随着强迫变化,它比这种强迫的变化还快还剧烈。气候突变是对这种强迫的一种非线性响应。

目前,对于气候突变的机理已经提出了一些看法,对它们的模拟也在不断改进,但用来评价人类活动对气候影响的模式对过去气候变化的模拟精度还不高。现在,人们关注的主要是温室气体排放的气候效应及其对人类社会的影响,科学家和决策者对大范围气候快速变化的可能性还重视不够。这种气候突变可能有自然原因,也可能由人类所引起。

地球上长期稳定的反馈过程形成了地球表层的环境条件,使得地球生命得以生存。然而,资料也表明,在年到百万年的时间上,气候系统中那些主要的反馈过程可以放大大气扰动。比如,在冰期旋回中,全球平均气温可以变化 $5 \sim 6$ ^[10],一般认为这是

由于较小的全球净辐射强迫造成的。

“技术上讲,气候突变是由于气候系统被强迫作用下超过某种临界状态,以超过强迫因子变化的速度向一种新状态的演化”^[11]。甚至一个慢强迫也可以引发气候突变,这种强迫可能是混沌的,也可能小的不能被测到。器测资料给我们提供了全球较详细的突变信息。如 20 世纪北半球多数地区气温的持续升高主要在 2 个快速阶段,并认为是人类活动导致的多年变化和自然原因形成的年代际变率共同作用的结果。在 1920s,北极地区靠大西洋一侧升温达 4 以上^[12]。在随后的 10 a 间,美国经历了大范围严重的干旱^[13]。这种突然变化在器测时期在美国并不常见,而在撒赫尔地区却很普通^[14]。这种旱涝与 ENSO 发生的位置变化关系密切^[15~16]。而据研究 ENSO 的发生很可能与东太平洋海地热液活动有关^[17],东太平洋海底热液活动与这里的海底火山活动及地震有关^[18],全球火山活动和地震的发生与地球自转关系密切^[19],而地球自转与地球内部物质的运动及分配有关^[20],同时还与月地、日地间的引潮力、磁场相互作用有关^[21]。因此,地面上的气候变化原因,除了大气自身的特点以外,必须考虑地球系统的各个方面才有可能真正找到。

1976~1977 年间的太平洋快速漂移可能与 ENSO 有关,它使得主要的大气环流型得到加强(包括阿留申低压加强),海温大范围变化(热带海温升高,温带海温下降),由于海温升高导致美洲沿岸生态系统发生漂移^[22]。在大西洋,过去 30 a 的资料显示低盐深海水在次极地北大西洋和格陵兰—欧洲之间的海洋中大量分布,这里是温盐环流发生突变的关键地区。过去多次气候突变事件都与它有关。

器测资料的增多对我们认识这些变化越来越有价值,但对我们全面了解气候变化还不够。自全新世以来的古气候资料显示过去气候变化比目前器测资料所显示的气候变化更强烈,且范围更广。这些变化包括飓风频率的突变、洪水及严重干旱范围的变化。如非洲和亚洲季风区湖泊的干涸与古代玛雅文化文明消失相关的几十年连续干旱及导致古代阿卡得帝国消亡的几百年的干旱。干旱区的变化和迁移过去往往表现为突发性。

青藏高原的隆升也是地球系统变化的一个很好实例。它的隆升造成了北半球气候的大变化。高原季风的形成演化与高原的抬升始终相伴。高原季风发展的 3 个阶段都是与高原的抬升达到一定高度后

气候突变的结果^[23]。另外,经研究发现,青藏高原上地面气温的分布特点与高原温泉的分布有很好的对应^[24]。我们知道,温泉是地球内部热量分布在地表的直接表现。根据研究,地球内部的热状况与地球内部构造和地球内部的电流分布(地球发动机原理)密切相关。因此通过地球内部热量的释放就可以把气候变化与地磁场联系起来^[25]。所以,研究气候变化问题就应该考虑大气以外的因素,也就是要考虑地球系统内各子系统间的相互作用,使我们对气候变化有更深入的了解和认识。

那么,气候为什么会发生剧烈的变化呢?众所周知,任何一个系统都有门槛行为。譬如:一个人在一个小船上慢慢地靠向船的一侧,船就会倾斜,当超过一定限度时,就会连船带人翻进水里。这样2种不同状态之间的快速转化现象可以在许多气候模式中出现。一个突变必须要有一个触发器和一个放大器,这种触发因子必须要有一定的持续性。

这种触发器可以是快速变化的因子(如冰坝湖的洪水爆发、冰盖的坍塌、温盐环流的改变),也可以是一种缓慢变化的因子(如大陆漂移、轨道强迫、地热释放等),还可能是介于上述2种因子之间的(如人类产生的温室气体),甚至有些触发因子是混沌的。当然,气候突变还可以同时有多个触发因子。在气候系统中已经发现了很多这样的触发器。如全新世后期的撒哈拉变干、冰期 Dansgaard - Oeschger 振荡(简称 DO 振荡)在时间和机制上和地球轨道强迫相关联。由于夏季太阳入射辐射减少,使得非洲季风减弱,从而使撒哈拉地区降水减少,气候变干^[26]。DO 振荡在地球轨道由冷向暖变化的阶段十分显著。

在气候系统中放大器使较小的强迫产生大的变化。气候系统中有多种放大器,如植被大气反馈。在发生干旱时,植被将萎缩或死亡,使蒸腾减少(植被蒸腾在许多大陆区域是降水的重要水汽来源),从而使降水减少,又加强了干旱,甚至产生沙漠化^[26]。在寒冷地区,降温使地面积雪和冰的覆盖度增加,从而增加了太阳入射辐射的反射,在这一冰—反照率反馈中使温度进一步降低。这些过程必须要有一定的持续性,才能产生气候态发生变化。

除了上述的一些突变过程外,火山爆发^[27~28]、地球放气^[29]、地热释放^[30]、地球自转变化^[31]、太阳活动^[32]、陨石击地等都可以触发气候突变。这些都是地球系统变化的表现。

4 结束语

怎样使我们的社会科学、和谐、可持续地发展是全世界共同关心的重大问题,也是人类生存与自然的基本矛盾,更是地球科学家所面临的严重挑战。气候变化问题,尤其是气候突变问题涉及人类社会的各个方面,对社会进步、经济发展和生态环境改善有至关重要的作用。气候突变往往给人类带来一些无法预见的后果。而气候突变的形成实质上是地球各圈层相互作用的结果。随着“气候系统”和“地球系统”概念的提出和发展,科学家们才普遍认识到,地球上的许多现象必须在“地球系统”或“气候系统”思想的指导下才能完整地理解,气候突变现象更是如此。这2个概念的提出对地球科学研究的方向及方法论的改变有决定性的影响,大大拓展了人类认识地球视野,提高了人类认识地球的能力。所以,只有在系统思想的指导下,通过学科交叉,才能更深刻地理解气候突变的原因,推动地球科学的发展,为人类更美好的明天服务。这是我们应该努力的方向。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report [Watson, R. T. and Core Writing Team (eds.)] [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 148.
- [2] 王绍武. 现代气候学研究进展 [M]. 北京: 气象出版社, 2001. 3 - 20.
- [3] Pittock A B, Frakes L A, Jenson D, et al. Climate Change and Variability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. 150 - 166.
- [4] 曹鸿兴译. 气候的物理基础和数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1982. 7 - 25.
- [5] WMO/ICSU. Scientific Plan for World Climate Research Programme [M]. WCRP Publication Series, No. 2, WMO/TO - No. 6, 1984.
- [6] 陈泮勤. 地球系统科学的发展与展望 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 974 - 979.
- [7] 王家映编. 地球物理学 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1988. 58.
- [8] 高晓清, 汤懋苍, 朱德琴. 关于“气候系统”与“地球系统”的若干思考 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 364 - 368.
- [9] 汤懋苍. 论“天候谱”的自然分段 [J]. 科学通报, 1988, 9: 1680 - 1683.
- [10] 施雅风主编. 中国冰川与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 320 - 355.
- [11] Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, et al. Abrupt Climate Change [J]. Science, 2003, 299: 2005 - 2010.
- [12] Delworth T, Knutson T R. Simulation of Early 20th Century

- Global Warming[J]. Science, 2000, 287:2246.
- [13] Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 Years of Drought Variability in the Central United States[J]. Bull Am Meteorol Soc, 1998, 79:2693.
- [14] Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An Example from the West African Sahel [J]. Bull Am Meteorol Soc, 1998, 80:815.
- [15] Hastenrath S, Heller L. Dynamic of Climatic Hazards in Northeast Brazil[J]. Q J R meteorol Soc, 1997, 103:77.
- [16] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production[J]. Bull Am Meteorol Soc, 1997, 78:1069.
- [17] 胡泽勇, 汤懋苍. 赤道太平洋海温的东西振荡及其模拟[J]. 海洋学报, 1994, 16(3):31-38.
- [18] Walker D A. More evidence indicate link between El Niños and Seismicity[J]. EOS, 1995.
- [19] 汤懋苍, 张建, 杨良. 西北太平洋强地震的节律性与 El Niño 和地球自转[J]. 高原气象, 1993, 12(3):235-242.
- [20] Garland G D. 地球物理学引论(陈灏, 唐晓明, 赵晓敏译)[M]. 北京:地震出版社, 1987. 6-10.
- [21] 曾小苹, 林云芳, 续春荣, 等. 地球磁场、天气、气候和气象灾害[A]. 中国科学院地球物理所《地磁、大气、空间研究及应用》编委会《地磁、大气、空间研究及应用》[M]. 北京:地震出版社, 1996. 393-396.
- [22] Graham N E. Decadal - scale climate variability in the tropical and north Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results[J]. Clim Dyn 1994, 10:135.
- [23] 汤懋苍. 青藏高原隆升引发气候突变的原因初析[A]. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊[M]. 北京:科学出版社, 1995. 181-187.
- [24] 江灏, 汤懋苍, 高晓清. 青藏高原温泉群对高原平均温度场的贡献[J]. 高原气象, 2003, 22(6):640-642.
- [25] 李崇银, 翁衡毅, 高晓清, 等. 全球变暖的另一可能原因[J]. 大气科学, 2003, 27(5):789-797.
- [26] Kutzbach J, Bonan G, Foley J, et al. Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to orbital forcing in the early to middle Holocene [J]. Nature, 1996, 384:623.
- [27] Gerlach T M. Etnas greenhouse pump[J]. Nature, 1991, 315:352-353.
- [28] Bray J R. Pleistocene volcanism and glacial initiation[J]. Science, 1977, 197:251-254.
- [29] 朱永峰. 地球的放气作用是全球环境变化的主导因素[J]. 地学前缘, 1997, 4(1~2):152.
- [30] 汤懋苍, 高晓清. 气候变化的“地心说”[J]. 地球科学进展, 1995, 10(1):47-56.
- [31] 郑大伟. 地球自转与大气、海洋活动[J]. 天文学进展, 1988, 6(4):316-328.
- [32] Herman J R, Goldberg R A. Sun, Weather and Climate[R]. Scientific and Technical Information NASA, 1978.

To Understand Abrupt Climate Change from the Viewpoint of Earth System

GAO Xiao - qing^{1,2}, ZHU De - qin³, YAO Ji - min¹

(1. Cold and Arid regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China; 3. Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: In the history of earth's climate, there were many abrupt climate change events. These events had great influence on the evolution of the earth's surface system. With the continuous development of global warming, the climatic environment, which human being lives in, is experiencing the great changes. How to understand and recognize these changes, especially like abrupt climate change, is the scientific foundation for countermeasures to climate change and keep the sustainable development on. In this paper, we discussed the scientific issue of abrupt climate change from the viewpoint of the earth system. It is pointed out that it is not suitable to understand abrupt climate change only in atmosphere, we must take it account as the change of earth system as a whole.

Key words: earth system; climate system; climate change; abrupt climate change