

文章编号: 1001-8166(2008)10-1084-08

# 气候变暖成因研究的历史、现状和不确定性\*

任国玉

(中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081)

**摘要:** 简要回顾了关于气候变暖成因研究的历史和现状, 重点评述了当前气候学界对全球和中国气候变暖原因的认识及其仍存在的不确定性。气候学者对气候变暖与大气中温室气体浓度关系的认识, 目前比过去任何时候似乎都更加清晰, 但他们眼前仍然弥漫着重重迷雾。引起观测到的气候变暖的因子十分复杂, 相关问题的研究仍存在大量不确定性。未来气候变化科学的进步依赖于对这些尚存不确定性的认识水平和削减程度。

**关键词:** 气候变化; 地面气温; 成因; 热岛效应; 古气候

**中图分类号:** P467; X16 **文献标志码:** A

## 1 引言

气候变化的观测事实及其成因研究是气候变化科学的基础工作。作为气候变化观测和成因研究的核心问题, 地面和大气温度变化规律和原因历来受到瞩目。当前科学界十分关注的全球和区域气候变暖现象, 及其由此派生的一系列全球环境变化问题, 其实质就是地球表面气温和水温的显著上升。因此, 尽管气候变化不等同于气候变暖, 但当前气候变化的核心问题就是地球表面温度的普遍上升。

对于全球和区域气候变暖的原因, 人们很早就开始进行研究。目前, 气候学界把这种研究称为气候变化的检测和归因。检测 (detection) 就是证实一个变化显著不同于自然内部变率所能解释的过程。但检测到变化不一定意味着其原因已经认清, 把变化和各种自然与人为因子关联起来的过程叫归因 (attribution)。尽管有关气候变化检测和归因研究取得了重大进步, 但目前对于气候变暖原因的了解仍然不够完善。气候变化的归因过去是、现在仍然是气候变化科学研究中最具争议性的问题。

本文尝试对全球和中国气候变暖原因研究的历

史、现状和主要问题进行简要回顾, 重点讨论对 20 世纪气候变暖原因的现有认识水平及其仍存在的科学不确定性。

## 2 气候变暖研究简史

人类对气候变暖现象及其原因的研究具有很长的历史。这里首先对近百年来国际上相关研究的一个侧面做简要介绍。对 20 世纪 60 年代以前的介绍主要参考 Weart<sup>[1]</sup> 的综述。

在 20 世纪 20 年代, 人们发现, 欧洲和北美地区的气温自 19 世纪晚期以来表现出上升趋势。到 30 年代中后期, 美国科学家利用东部观测资料和世界其他地区的稀疏资料, 获得了“全球”平均气温序列, 发现自 1865 年以来全球陆地平均气温已明显上升。不过他们认为, 这种变化可能是气候长周期变化的表现。1938 年, Callendar 发现, 从 1890 年到 1935 年全球陆地平均气温上升 0.5<sup>°C</sup>, 并认为这可能是人为 CO<sub>2</sub> 温室效应造成的。但其他科学家认为观测的变暖可能是自然变化的一部分, 变暖不会一直持续下去<sup>[1]</sup>。随着多数地区 30 年代后期的继续升温, 温室效应引起增暖的观点变得逐渐流行起

\* 收稿日期: 2008-03-16; 修回日期: 2008-08-21.

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目“中国地面气温变化趋势中的城市化影响”(编号: 40575039); 科技部科技支撑项目“全球与中国气候变化的监测和预测”(编号: 2001BA611B-01)资助.

作者简介: 任国玉 (1958-), 男, 辽宁康平人, 研究员, 博士, 主要从事气候变化与古气候研究. E-mail: guoyou@cma.gov.cn

来,但与气候自然变化观点仍然存在着明显的争论。

实际上,早在 19 世纪中后期, Tyndall 等就认识到大气中的水汽和  $\text{CO}_2$  等气体具有所谓的“温室效应”,并可影响地球的气温。19 世纪末,瑞典科学家 Arrhenius 和 Högbom 计算了大气  $\text{CO}_2$  浓度变化对欧洲地面气温的影响,指出人类活动引起的温室气体浓度增加,可能造成地球表面气温上升。Arrhenius 甚至计算了  $\text{CO}_2$  浓度加倍情况下,地球表面平均气温将增加  $5 \sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,不过他认为要达到那一浓度可能需要很长时间。

但是, Ahmann 在 1952 年发现,北方的气温实际上从 40 年代初开始就降下来了。气温下降无疑给温室效应增暖学说泼了冷水,有关气候变化原因的争论曾一度停息下来。1961 年, Mitchell 发现全球地面平均气温从 40 年代初开始下降。不过他认为,原来的增暖可能仍和大气  $\text{CO}_2$  浓度增加有关,而温度逆转可能和火山或太阳活动影响有关<sup>[1,2]</sup>。20 世纪 60 年代到 70 年代初,全球地面气温一直较低,欧亚大陆尤其明显。气候学界对  $\text{CO}_2$  引起变暖的推测产生怀疑。Landsberg 认为,气候可能正在发生间歇性的波动,而不是持续地变暖。在全球尺度上,自然因子的作用还是主要的,但不排除遥远未来全球变暖的可能性。

20 世纪 70 年代是异常气候事件频繁发生、学术思潮激昂荡漾的时期。北非等地一系列异常气候事件和进一步的转冷引发了思考和争鸣。一些学者倾向于气候变化的自然控制作用,并认为太阳输出辐射变化可以引起气候变冷<sup>[3]</sup>,地球轨道参数变化也可能正在引起气候长期缓慢变冷,甚至有可能返回到一个新的冰期阶段<sup>[4-7]</sup>;一些学者认为,火山活动或人类排放的气溶胶可能正在引起气候变冷<sup>[2,8-11]</sup>。

但 70 年代早期仍有人坚持认为,人为排放的  $\text{CO}_2$  将导致未来全球气候增暖<sup>[12-15]</sup>。他们认为当时的变冷可能是暂时的,温室效应引起的全球变暖在未来几十年终将显露出来。Budyko<sup>[12]</sup> 和 Manabe<sup>[14]</sup> 采用气候模式对未来可能由大气  $\text{CO}_2$  浓度增加引起的气候变暖趋势进行了模拟。到 70 年代末,全球陆地平均气温停止下降,转而上升,关于未来温室效应将增强的观点逐渐占了上风。

与此同时,古气候研究证实,地球轨道参数的周期变化与北半球冰期和间冰期交互转换步调一致,而且过去的地球系统存在着若干突然的状态变化<sup>[15-17]</sup>。简单气候模式模拟<sup>[12]</sup> 和北极地区雪盖面

积的剧烈年际波动等观测事实<sup>[16]</sup> 表明,气候系统对外强迫的响应可能是更敏感、迅速的。这些都进一步唤起科学界对气候变化问题的关注。

到 80 年代初,人们由原来担心核战争会导致平流层臭氧显著下降,现在变为担心核战争可能引发“核冬天”,导致全球变冷和地球生物大灭绝<sup>[17-19]</sup>。与此同时,美国、英国和前苏联的科学家分别对全球地面气温资料进行了系统整理,获得了更可靠的全球陆地地面平均气温序列。Hansen 等<sup>[20]</sup> 证实,全球地面平均气温在经历了 20 多年的变冷后,70 年代中后期开始转暖。Jones 等<sup>[21]</sup> 和前苏联的学者获得了同样的结论。此后,不断更新的观测资料序列表明了持续的全球气候变暖<sup>[22-26]</sup>。

另一方面,自 1957—1958 年国际地球物理年期间开始的  $\text{CO}_2$  浓度监测已积累了足够长的序列。20 世纪 80 年代中后期的冰芯资料分析还发现,当前大气  $\text{CO}_2$  浓度已明显超出自然波动范围,在过去的几十万年时间里它和地面气温同步波动<sup>[27,28]</sup>。这些说明,人类活动是工业革命以来大气  $\text{CO}_2$  浓度持续上升的主要原因,同时至少在千年以上尺度上,大气  $\text{CO}_2$  浓度波动可能是引起气温变化的原因之一。

20 世纪 80 年代末,联合国环境署和世界气象组织共同成立了政府间气候变化专门委员会 (IPCC),负责对气候变化研究进展进行定期评估。至此,全球变暖和气候变化的名词开始真正流行起来,学术界主流观点对气候变暖的解释倾向于温室效应增强理论。与此同时,一系列国际合作研究计划也在 80 年代初以后陆续启动,包括国际地圈生物圈计划 (IGBP)、世界气候研究计划 (WCRP) 和全球变化的人文因素计划 (IHDP) 等,着重探讨由于人类活动引起的全球变暖现象、机理及其影响<sup>[17,29-31]</sup>。

### 3 气候变暖的观测研究

探讨气候变暖的成因离不开对气候观测事实的了解。最近 IPCC 报告<sup>[32,33]</sup> 表明,全球平均表面温度在 1906—2005 年期间增加了  $0.74 \text{ }^\circ\text{C}$ ,考虑到资料的误差,实际增温幅度介于  $0.56 \sim 0.92 \text{ }^\circ\text{C}$  之间。其中 20 世纪起初的 10~40 年代和 70 年代至 21 世纪初是两个明显的增温阶段,近 30 年增温趋势尤其明显。20 世纪中期以来的线性增暖趋势几乎是近 100 年的 2 倍。在近 100 年里,20 世纪 90 年代是最暖的 10 年,1998 年是最暖的 1 年。近 100 年来,北极地区平均气温增加速率约是全球平均的 2 倍。北

极气候具有很高的年代际变率,在 1925—1945 年期间也观测到一个暖期。自 1950 年以来,全球海面水温的增加大约是陆面气温增加的一半,陆地上夜间日最低气温平均每 10 年增加 0.2,约是同期白天最高气温增加速率的 2 倍。

近 50 年来,已观测到与气温相关的极端事件频率也出现了变化。全球陆地上冷日、冷夜和霜冻事件发生频率明显减小,而热日、热夜和热浪事件发生频率则明显增加<sup>[32,33]</sup>。与此对应的是,平均日最低气温一般明显上升,一些地区的平均日最高气温增加明显,陆地大部分区域气温日较差有下降趋势。

气候变化国家评估报告<sup>[34]</sup>指出,过去 100 年我国大陆地区的年平均气温增加约 0.5~0.8,与全球或北半球变暖趋势大体相近,其中冬季增暖最明显,但夏季变化很小。与全球或北半球平均比较,我国 20 世纪 30~40 年代的变暖更为突出,50~60 年代的相对冷期也较明显<sup>[34,35]</sup>。

我国 1951—2004 年期间年平均地面气温变暖幅度约为 1.3,线性增温速率约为每 10 年 0.25,比全球或半球同期平均增温速率高得多。近半个世纪的变暖在东北、华北和西北以及青藏高原北部地区更明显,多数台站冬、春、秋季升温比夏季明显,夜间最低气温上升比白天最高气温显著<sup>[34~37]</sup>。多数台站平均气温日较差明显下降。近 50 多年我国大部分地区炎热日数未见明显增多,但寒潮、霜冻和低温日数却显著减少。

值得注意的是,快速的城市化及增强的城市热岛效应对我国多数地面台站记录的气温趋势具有明显影响<sup>[36]</sup>。在增温明显的华北地区,国家级台站附近 1961—2000 年间城市化引起的年平均气温增加值占全部增温的 39% 以上。其他地区的增温趋势中也或多或少保留着城市化的影响。1961—2004 年期间我国对流层中下层气温增加趋势仅为每 10 年 0.05,比国家级地面站观测的气温变化小一个量级。这从另一个角度说明,我国地面台站记录的增温在一定程度上反映了城市热岛效应加强因素的影响。

当然,即使消除城市化的影响,我国近半个世纪地面气温仍呈较明显的增暖趋势,这和迄今报道的全球变暖是一致的。但是,考虑城市化影响以后,不论中国还是全球,陆面气温增加速率可能要比目前的估计值来得弱。这一判断对于气候变化研究来说是非常重要的。

在中国和全球陆面气温记录中保留的城市热岛

效应影响,可以看作是观测资料中的系统偏差。早在 20 世纪 60 年代就有人指出存在这个偏差的可能性,认为 40 年代以前的增温不真实,有可能是局地城市热岛效应加强的反映<sup>[38]</sup>。Karl 等<sup>[39]</sup>在美国的历史气候资料序列中检测出明显的城市化影响,并对其进行了订正。但 Jones 等<sup>[40]</sup>根据包括中国华北在内的 3 个区域分析认为,在大尺度平均地面气温序列中城市化的影响微乎其微,比观测的增温趋势小一个量值。这个结论后来得到其他分析结果的支持<sup>[41~43]</sup>,并成为近 3 次 IPCC 报告中相关评估结论的主要依据。但是,这个结论不断受到来自区域性研究的挑战。应该说,在大陆或全球尺度上,现有的气温序列中在多大程度上残留着局地人类活动的影响,还是一个有待解决的问题。

## 4 气候变暖的历史透视

气候变暖问题主要是一个年代到世纪尺度的地球大气变暖现象。要了解气候变暖的背景和原因,需要有覆盖全球的足够长的观测资料序列。但是,全球陆地上的气象站多数只有不到 100 年的记录,难以满足气候变化检测研究的需求。在这种情况下,许多学者试图采用代用资料恢复过去更长时期地面气候要素的变化。常用的气温代用资料包括树轮宽度和密度、历史文献记录、冰芯氧同位素、珊瑚和石笋化学成分等。

利用这些代用气候资料,已经对过去 1000 多年全球陆地<sup>[44]</sup>、北半球陆地<sup>[45,46]</sup>以及中国<sup>[47~49]</sup>区域平均的地面气温进行了重建。由于代用资料点分布稀疏,一些资料时间分辨率较粗,部分资料对气温变化不够敏感,单点气温重建的方法不同等原因,对同一区域重建的长时间气温序列还存在着较大差异。但是,现有分析一般表明,北半球陆地上公元 10 世纪到 13 世纪气候较暖,称为“中世纪暖期”;15 世纪以后直到 19 世纪末,气温较低,称为“小冰期”;19 世纪末或 20 世纪初以来,气候再度变暖<sup>[11,28]</sup>。对于“中世纪暖期”的温暖程度和“小冰期”的寒冷程度,特别是 20 世纪气候变暖相对于“中世纪暖期”的地位,目前还难以形成共识。

我国学者研究表明,在青藏高原北部,近 100 年的增暖可能是过去 1000 年里前所未有的<sup>[50,51]</sup>。但对于我国东部冬季和年平均气温的重建则说明,20 世纪气候的变暖可能尚未明显超出“中世纪暖期”的温暖程度<sup>[49,52]</sup>。东部在公元 1000—1310 年间表现出了与北半球“中世纪暖期”相对应的温暖阶段,

14世纪到 19世纪的“小冰期”也有清楚反映。19世纪中期至 20世纪 80年代,全国地面气温上升显著,但截止到 80年代末,增温似乎也并未明显超过“中世纪暖期”水平<sup>[36, 49]</sup>。

可见,当前具备的长时间古气候序列还没有令人信服地表明近百年的增暖是异常的。一些研究认为,太阳和火山活动以及气候系统内部的自然振动对长期气候变暖可能具有重要影响。显然,从古气候学角度看,现在还不能确认,20世纪的气候变暖主要是由人类活动影响造成的。在近百年全球和区域增暖的历史地位问题上,今后仍有很多工作要做。

在利用代用资料重建古气候序列时,需要对不同类型代用记录的确切气候指示意义及其局限性有深入了解。如近 1 000年左右北半球陆地气温序列主要依赖树轮宽度和密度资料<sup>[44~46]</sup>。树轮资料是气候指示意义较明确、时间分辨率较高的良好代用记录,但对于准确重建年代以上尺度地面气温变化,它也有不少局限性。其中包括:大气 CO<sub>2</sub>浓度增加本身对树木生长的影响难以完全消除,不同区域树木自身生长速率变化的影响难以精确描述和分离,重建序列在各个时间尺度上的振幅明显小于实际气温变化幅度等。在更长时间尺度上,陆生植物花粉是较好的古气候指示物,但在许多地区,中晚全新世以来的陆地植被受到人类活动影响十分明显。在这些地区,古植被与当时的气候没有达到自然平衡,用花粉重建几千年的气候演变史,其可信程度就不会很高。

## 5 气候变暖的可能原因

目前多数气候学家认为,最近 100年的全球和中国气候变暖,特别是最近 50多年的气候变暖,可能主要是由温室气体浓度增加引起的<sup>[25]</sup>。

影响地球表面气温变化的因子很多,但一般可分为自然因子和人类活动两大类。就自然因子而言,太阳活动、火山活动及气候系统内部的多尺度振动都可影响全球或区域气温变化。由于太阳辐射和火山活动历史序列资料可靠性不高,以及人们对气候系统如何响应太阳输出辐射变化认识的局限性,目前还无法准确评价其对全球和中国气温变化的影响程度。海洋—大气系统年代以上尺度的低频振动,如北大西洋涛动(NAO)、北极涛动(AO)、太平洋年代涛动(PDO)或 ENSO的多年代振动,对全球和区域气温也具有重要影响。人类活动则主要通过土地利用变化以及温室气体和气溶胶排放对地面气

温变化产生影响<sup>[31, 32, 36]</sup>。

人类向大气中排放了 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O等温室气体,导致大气温室气体浓度增加,“温室效应”增强;人类也向大气中排放了 SO<sub>2</sub>等化学物质,生成硫酸盐等各种气溶胶,引起大气化学过程、辐射过程和云物理过程的变化,导致近地表辐射平衡和气温的改变;土地利用变化通过改变陆地与大气之间的物质和能量交换,使区域或局地气温发生变化,同时也向大气中排放额外的温室气体和矿物性气溶胶。此外,包括农业灌溉等人类活动还会影响区域甚至全球的陆地蒸发量,造成大气水汽含量增加。水汽是比 CO<sub>2</sub>等气体更有效的温室气体,其含量增加也可能引起气候变暖。

目前气候学界达成的“共识”,即认为过去 50年的气候变暖很可能是由 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O等大气温室气体浓度增加引起的<sup>[25, 32]</sup>,主要是基于观测事实和气候模式分析。模拟研究一般采用全球气候模式,考虑自然强迫因子如太阳和火山活动,以及人类排放的温室气体和硫化物气溶胶等,模拟 20世纪气温的变化。这些研究表明,当只考虑自然强迫时,模拟不出来 20世纪的气候变暖;当只考虑人类活动时,基本上能模拟出 20世纪的变暖趋势;而当输入所有的强迫时,模拟与观测的气温变化吻合得最好<sup>[32, 53~56]</sup>。由此表明,影响 20世纪气温变化的主要因子是太阳活动、火山活动和人类活动,而人类排放的温室气体在近 50多年的气候变暖中起主导作用。

对于 1950年以前至少 7个世纪北半球气温变化,一些研究也给出了解释,认为可能主要是火山爆发和太阳活动引起的,但 20世纪初的增暖仍然和人为强迫影响有关<sup>[32, 57~59]</sup>。20世纪火山活动主要施加一个弱的变冷作用,这和人为排放的气溶胶效应,可能已使全球地表趋于变冷。由于火山和人为气溶胶抵消了一部分增暖,因此若单独考虑温室气体浓度增加的效应,其导致的 20世纪气候变暖可能比观测到的更大。

多数研究者还相信,人类活动不仅引起全球平均地表气温明显上升,也是造成暖夜、暖日和热浪增多以及冷夜、冷日和寒潮减少的主要原因。有研究指出,人类活动的影响可能已经使欧洲 2003年夏季那样的高温热浪风险显著增加了<sup>[60]</sup>。

在区域尺度上检测气候变暖的影响因子更加困难,因为自然的年代到多年代尺度气候变率一般更明显<sup>[61, 62]</sup>,人为影响的信号更难识别。但近年也开

展了大区域范围的检测和归因研究<sup>[63,64]</sup>。中国学者分析了太阳、火山和人类活动对我国气候变暖的可能影响,获得了与 IPCC 报告相似的结论<sup>[65-67]</sup>,认为人类排放的温室气体可能也是造成我国近 50 年地面气候变暖的重要原因。

## 6 尚存的科学不确定性

尽管多数学者同意,过去 100 多年特别是过去 50 年的增暖很可能主要起源于人类排放的温室气体,但许多学者也认识到,引起气候变化的因子非常复杂,今后还需要做大量研究<sup>[36,68-70]</sup>。概括起来,气候变暖原因研究的不确定性主要源于 3 个方面:

(1) 仪器和代用资料本身还存在很多偏差。目前可靠的、高分辨率的代用资料还不充分,20 世纪中期以前的高质量器测资料也比较缺乏;气候资料序列的非均一性问题难以得到满意解决,不同研究人员采用不同的非均一性检验、订正方法,而气温变化趋势计算结果对订正方法和订正资料序列又十分敏感;城市化对地面气温记录的影响难以完全分离,现有的全球和区域陆面气温序列中还不同程度地保留着城市热岛效应增强因素的影响,在中国等城市发展迅速、城乡差别悬殊的国家和地区,这个问题尤为突出;高空气温变化分析还存在很多问题,探空温度资料序列和卫星遥感资料序列的可靠性仍需不断提高;区域土地利用变化对地面气温变化的确切影响还不很了解,这个影响在大多数用于检测和归因分析的气候模式里也没有包含;一些重要的外强迫因子,如太阳输出辐射、火山活动和气溶胶浓度等,其全球和区域性真实历史变化规律还不清楚。不论采用何种检测和归因分析方法,都需要利用现有的长时间序列气候观测资料。在当前观测资料完整性、均一性、连续性和可靠性存在明显缺陷的情况下,开展气候变暖成因研究的难度可想而知。

(2) 人们对气候系统运行机理的认识还不完善。气候系统包含了大气、水、冰雪、生态、固体地壳以及人类社会等多个圈层,不同圈层之间存在着复杂的相互作用,特别是具有复杂的物理、化学与生物反馈作用<sup>[35]</sup>。这些反馈过程包括水汽反馈、云层反馈、冰冻圈反馈、海洋反馈、陆地生态系统反馈等,目前对其认识还处于初始阶段。如在过去的 50 多年里,世界许多地区蒸发皿蒸发量呈现明显减少趋势,我国大部分气象台站也记录到水面蒸发显著减弱的现象<sup>[35,36]</sup>。不管造成水面蒸发减少的原因是什么,如果观测点附近的陆地实际蒸发也减弱了,那么这

一过程将对地面气温上升产生增幅作用。遗憾的是,现在对于水面和陆地实际蒸发的许多问题还没了解清楚。云和大气水汽的情况更为复杂。目前一般认为气候变暖将导致海洋上蒸发加强,大气水汽含量增加,水汽反馈将进一步增强变暖。但如前所述,如果观测的部分地区大气水汽增加是由人类活动直接引起的,而不全是温度—水汽反馈作用的结果,则气候系统对 CO<sub>2</sub> 等温室气体的敏感性就应比目前估计的要低。对气候系统运行机理的认识是气候变化检测、归因和预估研究的关键所在,但遗憾的是,目前在这方面还有大量的科学问题没有解决。借用“盲人摸象”的成语来形容当前气候学者对气候系统运行机理的探索过程,在一定程度上是比较贴切的。

(3) 气候系统模式还有待改进。近 20 年来气候模式发展较快,对全球和区域气候已具有一定模拟能力。但总体上看气候模式对温室气体等外强迫因子的敏感性问题仍没有很好解决。这主要和观测资料的缺乏、观测资料的偏差以及人们对气候系统运行机理的了解不充分有关。由于气候模式本身的问题,同时也由于缺乏可靠的关键外强迫因子历史时间序列,利用气候模式进行全球和区域气候变暖的检测和归因分析,其结果也就不能完全令人信服。

## 7 结 语

全球和区域气候变暖原因是气候变化研究中关键的科学问题。解决这个问题,对今后气候变化科学的发展和气候变化问题的应对政策将产生深远影响。

气候变暖原因的研究源远流长,最近 20 年的研究也取得了长足的进步。但是,由于观测系统的缺陷和当前科学水平的限制,对过去气候变暖原因的认识还有待深入。未来的研究需要加深对近期地面和高空气温变化基本规律的认识,了解近千年来甚至近万年来地面气温变化以及自然和人为气候强迫因子变化历史,提升对气候系统内部各种复杂的反馈过程的认识水平,增强气候模式的模拟能力。

### 参考文献 (References):

- [1] Weart S R. The Discovery of Global Warming[M]. Harvard: Harvard University Press, 2003.
- [2] Mitchell J M Jr. The natural breakdown of the present interglacial and its possible intervention by human activities[J]. *Quaternary Research*, 1972, 2: 436-445.
- [3] Eddy J A. The maunder minimum [J]. *Science*, 1976, 192:

- 1 189-1 202.
- [4] Kukla G J, Matthews R K, Mitchell J M, *et al* The end of the present interglacial[J]. *Quaternary Research*, 1972, 2: 261-69.
- [5] Dansgaard W, Johnson S J, Clausen H B, *et al* Speculations about the next Glaciation[J]. *Quaternary Research*, 1972, 2: 396-398.
- [6] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages[J]. *Science*, 1976, 194: 1 121-1 132.
- [7] Berger A L. Long-term variations of solar insolation resulting from the Earth's orbital elements[J]. *Quaternary Research*, 1978, 9: 139-167.
- [8] Rasool S I, Schneider S H. Atmospheric carbon dioxide and aerosols: Effects of large increases on global climate [J]. *Science*, 1971, 173: 138-141.
- [9] Schneider S H, Mass C. Volcanic dust, sunspots, and temperature trends[J]. *Science*, 1975, 190: 741-746.
- [10] Bryson R A, Murray T J. Climates of Hunger: Mankind and the World's Changing Weather[M]. Madison: University of Wisconsin Press, 1977.
- [11] Lamb H H. Climate: Present, Past and Future[M]. London: Methuen, 1977.
- [12] Budyko M I. The future climate[J]. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 1972, 53: 868-874.
- [13] Kellogg W W, Schneider S H. Climate stabilization: For better or for worse? [J]. *Science*, 1974, 186: 1 163-1 172.
- [14] Manabe S, Wetherald R T. The effects of doubling the CO<sub>2</sub> concentration on the climate of a general circulation model[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1975, 32: 3-15.
- [15] Broecker W S. Climatic change: Are we on the brink of a pronounced global warming? [J]. *Science*, 1975, 189: 460-464.
- [16] Kukla G J, Kukla H J. Increased surface albedo in the northern hemisphere[J]. *Science*, 1974, 183: 709-714.
- [17] National Academy of Sciences, Committee to Study the Long-Term Worldwide Effect of Multiple Nuclear Weapons Detonations. Long-Term Worldwide Effect of Multiple Nuclear Weapons Detonations[R]. Washington DC: National Academy of Sciences, 1975.
- [18] Crutzen P J, Birks J W. The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon[J]. *AMBIO*, 1982, 11: 114-125.
- [19] Turco R P, Toon O B, Ackerman T P, *et al* Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions[J]. *Science*, 1983, 222: 1 283-1 292.
- [20] Hansen J E, Laci A, Lebedeff S, *et al* Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide[J]. *Science*, 1981, 213: 957-966.
- [21] Jones P D, Wigley T M L, Kelly P M. Variations of surface air temperatures Part I Northern hemisphere, 1881-1980 [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110: 59-70.
- [22] Jones P D, Wigley T M L, Wright P B. Global temperature variations between 1861 and 1984[J]. *Nature*, 1986, 322: 430-434.
- [23] Wigley T M L, Jones P D, Kelly P M. Warm world scenarios and the detection of climatic change induced by radiatively active gases [C]. Bolin B, ed. *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems*. SCOPE Report No. 29. Chichester: John Wiley, 1986: 271-322.
- [24] Hansen J, Ruedy R, Glascoe J, *et al* GISS analysis of surface temperature change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D24): 30 997-31 022.
- [25] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC [C]. Houghton J T, Ding Y H, *et al*, eds. *Climate Change 2001*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [26] Folland C K, Rayner N A, Brown, *et al* Global temperature change and its uncertainties since 1861 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 2 621-2 624.
- [27] Oeschger H, Beer J, Siegenthaler U. Late glacial climate history from ice cores [C]. Hansen J E, Takahashi T, eds. *Climate Processes and Climate Sensitivity* (Geophysical Monograph 29, Maurice Ewing Vol. 5). Washington DC: American Geophysical Union, 1984: 299-306.
- [28] Bradley R S. Quaternary Paleoclimatology: Methods of Paleoclimatic Reconstruction[M]. Boston: Allen & Unwin, 1985.
- [29] Mabne T F, Roederer J G, eds. *Global Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [30] Ye D, Fu C, Chao J, eds. *The Climate of China and Global Climate* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1987.
- [31] Ye Duzheng, Fu Congbin, Dong Wenjie, *et al* Progresses in studies of global change sciences [J]. *Atmospheric Science*, 2003, 27(4): 435-450. [叶笃正, 符淙斌, 董文杰, 等. 全球变化科学领域的若干研究进展 [J]. *大气科学*, 2003, 27(4): 435-450.]
- [32] IPCC. Climate Change 2007-The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC [C]. Solomon S, Qin D, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [33] Qin Dahe, Chen Zhenlin, Luo Yong, *et al* Latest understanding of climate change sciences [J]. *Advance in Climate Change Research*, 2007, 3(2): 63-73. [秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知 [J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(2): 63-73.]
- [34] Editing Committee of National Assessment Report on Climate Change. National Assessment Report on Climate Change [M]. Beijing: Science Press, 2007. [气候变化国家评估报告编委会. 气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [35] Ding Yihui, Ren Guoyu, eds. *An Introduction of China Climate Change Science* [M]. Beijing: Meteorological Press, 2008. [丁一汇, 任国玉主编. 中国气候变化科学概论 [M]. 北京: 气象出版社, 2008.]
- [36] Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Chu Ziyang, *et al* Some progresses in studies of air temperature change in China [J]. *Climate and Environmental Research*, 2005, 10(4): 701-716. [任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 中国气温变化研究的最新进展 [J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 701-716.]

- [37] Tang Hongyu, Zhai Panmao, Wang Zhenyu Change in maximum/minimum temperature and daily temperature range[J]. *Climate and Environmental Research*, 2005, 10(4): 728-735. [唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 中国平均最高、最低气温及日较差变化: 1951—2002[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 728-735.]
- [38] Dronia H. Der Stadteinfluss Auf Den Weltweiten temperaturtrend [J]. *Meteorologische Abhandlungen*, 1967, 74(4): 1-65.
- [39] Karl T R, Diaz H F, Kukla G Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record[J]. *Journal of Climate*, 1988, 1: 1 099-1 123.
- [40] Jones P D, Groisman P, Coughlan M, et al Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land[J]. *Nature*, 1990, 347: 169-172.
- [41] Peterson T C. Assessment of urban versus rural in situ surface temperature in the contiguous United States: No difference found [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(18): 2 941-2 959.
- [42] Parker D E Large-scale warming is not urban [J]. *Nature*, 2004, 432: 290-290.
- [43] Parker D E A demonstration that large-scale warming is not urban[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 2 882-2 895.
- [44] Jones P D, Briffa K R, Barnett T P, et al High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: Interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures[J]. *The Holocene*, 1998, 8: 455-471.
- [45] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties and limitations [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 759-762.
- [46] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-Frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability [J]. *Science*, 2002, 295: 2 250-2 253.
- [47] Wang Shaowu, Gong Daoyi Temperature of a few periods of Holocene over China [J]. *Progress in Natural Sciences*, 2000, 10(4): 325-332 [王绍武, 龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温 [J]. 自然科学进展, 2000, 10(4): 325-332.]
- [48] Yang B. Climatic variations in China over the last 2000 years [J]. *Chinese Geographical Science*, 2001, 11(2): 97-103.
- [49] Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Man Zhimin, et al Reconstruction and a preliminary analysis of wintertime temperature series of the past 2000 years in eastern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 169-181. [葛全胜, 郑景云, 满志敏, 等. 过去 2000 年中国东部冬半年温度变化序列重建及初步分析 [J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 169-181.]
- [50] Yao Tandong, Thompson L G Ice-core record and the temperature change of the past 5ka at Dunde [J]. *Sciences in China (Series D)*, 1992, (10): 1 089-1 093. [姚檀栋, Thompson L G 敦煌冰芯记录与过去 5ka 温度变化 [J]. 中国科学: D 辑, 1992, (10): 1 089-1 093.]
- [51] Liu Xiaohong, Qin Dahe, Shao Xuemei, et al Temperature change of the past 1000 years derived from tree-ring records in the Qinlian Mts [J]. *Sciences in China (Series D)*, 2004, 34(1): 89-95. [刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录 [J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(1): 89-95.]
- [52] Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu Global Change [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. [张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- [53] Santer B D, Taylor K E, Wigley T M L. A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere [J]. *Nature*, 1996, 382: 39-46.
- [54] Zwiers F W, Zhang X. Toward regional scale climate change detection [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16: 793-797.
- [55] Stott P A, Jones G S, Lowe J A. Transient climate simulations with the HadGEM1 model: Causes of past warming and future climate change [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 2 763-2 782.
- [56] Stone D A, Allen M R, Stott P A. A multi-model update on the detection and attribution of global surface warming [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20: 517-530.
- [57] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years [J]. *Science*, 2000, 289(5 477): 270-277.
- [58] Rind D. The relative importance of solar and anthropogenic forcing of climate change between the Maunder Minimum and the present [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(5): 906-929.
- [59] Hegerl G C, Crowley T J, Allen M, et al Detection of human influence on a new, validated 1500-year temperature reconstruction [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20: 650-666.
- [60] Stott P A, Stone D A, Allen M R. Human contribution to the European heatwave of 2003 [J]. *Nature*, 2004, 432: 610-614.
- [61] Li C Y, Li G L. The NAO/NPO and interdecadal climate variation in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 17: 555-561.
- [62] Zhou Liantong, Huang Ronghui Study of decadal variability of summer climate in China and the possible causes [J]. *Climate and Environmental Research*, 2003, 8(3): 274-290. [周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 274-290.]
- [63] Brohan P, Kennedy J J, Harris I. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, D12106, doi: 10. 1029/2005JD006548.
- [64] Zhang X, Zwiers F W, Stott P A. Multi-model multi-signal climate change detection at regional scale [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 4 294-4 307.
- [65] Shi Guangyu, Wang Xihong, Zhang Lisheng, et al Influence of human activities on climate: II climate change and variability of eastern Asia [J]. *Climate and Environmental Research*, 2002, 7: 255-266 [石广玉, 王喜红, 张立盛, 等. 人类活动对气候影响研究 II 对东亚和中国气候变化与变率影响 [J]. 气候与环境研究, 2002, 7: 255-266.]
- [66] Ma X, Guo Y, Shi G, et al Numerical simulations of global temperature change over the 20th century with IAP/LASG GOALS model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21: 234-242.

- [67] Zhao Zongci, Wang Shaowu, Xu Ying, *et al* Possible causes for change of surface air temperature over the past 100 years in China [J]. *Climate and Environmental Research*, 2005, 10 (4): 808-817. [赵宗慈, 王绍武, 徐影, 等. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10 (4): 808-817. ]
- [68] Ding Yihui Key findings and remaining problems of the IPCC SAR [J]. *Advances in Earth Science*, 1997, 12 (2): 158-163. [丁一汇. IPCC第二次气候变化科学评估报告的主要科学成果和问题 [J]. 地球科学进展, 1997, 12 (2): 158-163. ]
- [69] Gong Daoyi, Wang Shaowu Uncertainties of studies of global climate warming [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9 (2): 371-376. [龚道溢, 王绍武. 全球气候变暖研究中的不确定性 [J]. 地学前缘, 2002, 9 (2): 371-376. ]
- [70] Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, eds Climate and Environmental Change in China (Part One) [M]. Beijing: Science Press, 2005: 562. [秦大河, 丁一汇, 苏纪兰主编. 中国气候与环境演变 (上卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 562. ]

## History, Current State and Uncertainty of Studies of Climate Change Attribution

REN Guoyu

(Laboratory for Climate Studies, CMA, National Climate Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** An overview is made of the research history and current state of climate change attribution, with an emphasis on the studies of possible causes of the recent climate warming around the globe and across China. Also discussed are the remaining uncertainties related to some key issues. Conclusions are drawn from the overview that big progresses in studies of climate change detection and attribution have been made both internationally and domestically since 1980s, but large uncertainties still exist in many aspects of the current research. The uncertainties are mostly related to the quality of instrumental and proxy data, the complicated feedbacks among varied components of climate system, and the research tools such as global and regional climate models. A further development of climate change science will rely on the significant reduction of these uncertainties in the coming decades.

**Key words:** Climate change; Air temperature; Attribution; Urban heat island; Paleo-climate

《地球科学进展》了解地球科学发展的窗口，  
伴您从事研究的良师益友

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登宣传广告！

欢迎在线访问 ( [www.adearth.ac.cn](http://www.adearth.ac.cn) )