

全球气候变化中的物理问题*

丁一汇[†]

(中国气象局国家气候中心 北京 100081)

摘要 全球气候变化是一个复杂的科学问题,它涉及到气候系统或地球系统的变化,不但需要考虑它们所包含的这些系统内各部分本身的变化,以及它们之间复杂的相互作用,而且还需考虑物理与地球生物化学等许多过程.文章主要讨论全球气候变化中的物理问题,主要有三个方面:(1)辐射传输和全球辐射平衡:不论是由于自然的原因或人类活动(如太阳活动与火山爆发以及温室气体排放增加导致的温室效应加强)一旦破坏全球的辐射平衡,则会引起气候变化,这是气候变化的主要原因与驱动力;(2)大气波动和气候变化的内部变率:除上述外强迫的作用外,气候变化还可通过气候系统内部的变率引起,这包括大气内部变率和耦合气候变率.它们主要是通过产生各种大气的波动而实现的.其中最重要的是罗斯贝(Rossby)波.它们的传播和不稳定发展是造成气候变化的另一个原因;(3)气候系统的混沌性质和可预报性:数值预报模式的预报结果对初始场很敏感,即初始场的微小误差可导致完全不同的预报结果,同时模式中物理过程描述的真实程度也影响预报的结果.大气的这种混沌性质限制了天气的可预报性在2周以内.但气候预测由于明显受外强迫的作用,可使大气的混沌时效延长到月、季、年、几十年甚至上百年.为了减少由初始场误差和模式不完善而造成的预报误差,目前气候预测是采用多初值和多模式的集合预报方法,因而气候预测实际上是一种概率预报.

关键词 气候变化 物理问题 辐射平衡 可预报性

Physical problems in the global climate change

DING Yi-Hui[†]

(National Climate Center , China Meteorological Administration , Beijing 100081 , China)

Abstract Global climate change is a complicated scientific problem that involves changes in the climate system or the Earth's system. It is necessary to consider changes of each system component and their complex interactions, as well as multiple physical and geobiochemical processes. This paper will focus on the fundamental physical problems in the following three aspects. (1) Radiative transfer and global radiation balance. Global climate changes will occur once the global radiation balance is destroyed, either due to natural causes (solar activity and eruption of volcanoes), or due to human activities, such as an increase in emission of greenhouse gases which leads to enhanced greenhouse effects. These are the main drivers responsible for global climate changes. (2) Atmospheric waves and internal climate variability. Besides the above-mentioned external forcings, climate change can also be caused by internal climate variability, including atmospheric internal variability and coupling of the climate variability. These mainly exert their effects through various kinds of atmospheric waves. Among them, the Rossby wave is a most important mode. Their propagation and unstable development is a cause leading to climate change. (3) The chaotic nature and predictability of the climate system. The prediction of future climate change based on a climate model is very sensitive to initial values, i. e., small errors of initial fields can lead to completely different results. At the same time, the fidelity of climate modes can also cause significant prediction errors.

* 国家科技支撑计划(批准号 2007BAC03A01)、国家重点基础研究发展计划(批准号 2006CB403604)资助项目
2008-12-10 收到

[†] Email: dlingyh@cma.gov.cn

This chaotic nature of the atmosphere limits weather prediction to a range of two weeks. However, due to significant weakening of the chaotic nature under external forcings, climate prediction may extend up to a month, a season, a year, or even multi-decades and multi-centuries. In order to narrow down predictive uncertainty caused by initial errors and incompleteness of the physical model, climate prediction now uses ensemble prediction techniques, thus leading to probabilistic predictions.

Keywords climate change, physical problems, radiation balance, predictability

1 全球气候变化及其发生的原因

地球的气候一直在不断的变化着. 从几亿年前大冰期(雪球)到炎热的热室时期(水球)的交替, 演变成 250 万年以后冰河期与间冰期的循环, 再到现代气候的全球迅速变暖, 地球的温度、温室气体含量、冰雪覆盖、海平面以及其他生态与环境条件出现显著甚至激烈的振荡和变化. 长期以来, 地球的气候变化虽然以全球平均地表温度作为主要的衡量参数或标准, 但实际上它涉及的是全球气候系统的变化. 全球气候系统指的是一个由大气圈、水圈(含海洋)、冰雪圈、岩石圈(含陆面)和生物圈组成的高度复杂的系统(图 1). 这些圈层不但自身发生着明显的变化和演变, 而且它们之间有着明显的相互作用. 在这个系统自身动力学和外部强迫作用下(如地质构造变化, 火山爆发, 太阳变化, 人类活动引起的大

气成分的变化和土地利用变化等), 气候系统不断地随时间演变(渐变与突变), 结果形成了不同时空尺度的气候变化(如寒冷期与温暖期, 干旱期与湿润期)与气候变率与变异(如月、季、年际、年代际、百年尺度等). 现代气候主要是指人类社会工业化以后(1750 年), 尤其是 1850 年全球有了准确的气象仪器记录以来的气候变化. 它表现为全球平均温度、温室气体浓度、海平面的迅速的上升与积雪面积的明显减少等主要特征(图 2). 虽然与漫长的地质年代相比, 它们的变化幅度有些并没有完全超过自然的脉动, 但它们的变化速率是空前的, 如 CO_2 浓度, 地质年代的变率约为 $\sim 100ppm/$ 百万年, 即 $0.0001ppm/$ 年(或 $0.001ppm/$ 年), 而近百年的 CO_2 增长率为 $1-1.9ppm/$ 年, 约为地质年代的 10000 倍(至少是 1000 倍)! 温度增加率为 $0.0001^{\circ}C/$ 年或 $0.00001^{\circ}C/$ 年, 而近百年的温度增加率是 $\sim 1^{\circ}C/$ 100 年 $\approx 0.01^{\circ}C/$ 年, 是地质年代的 100—1000 倍!

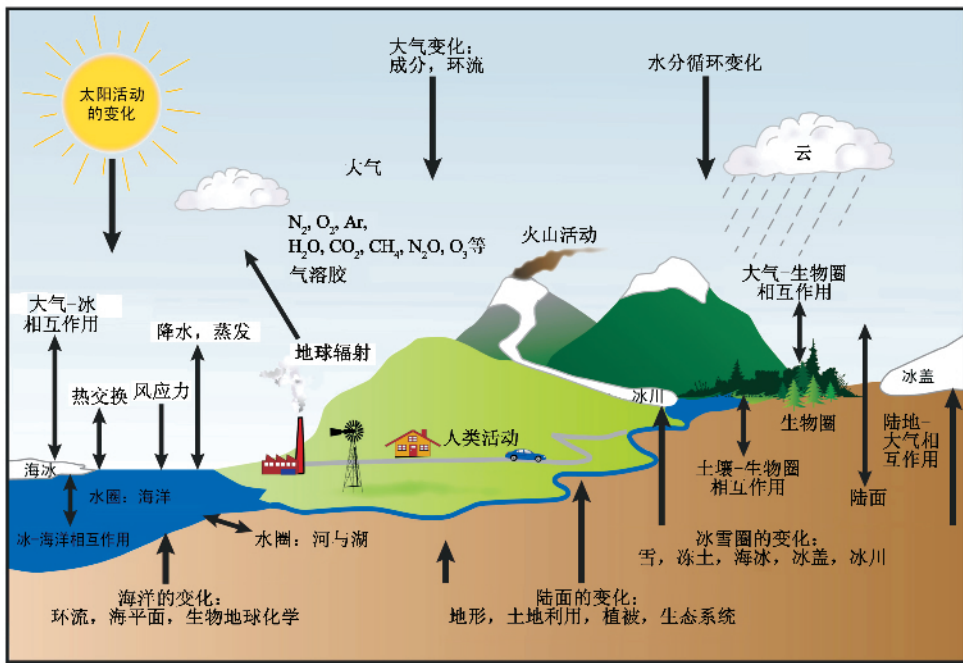


图 1 气候系统及其圈层, 它们的相互作用过程概略示意图^[1]

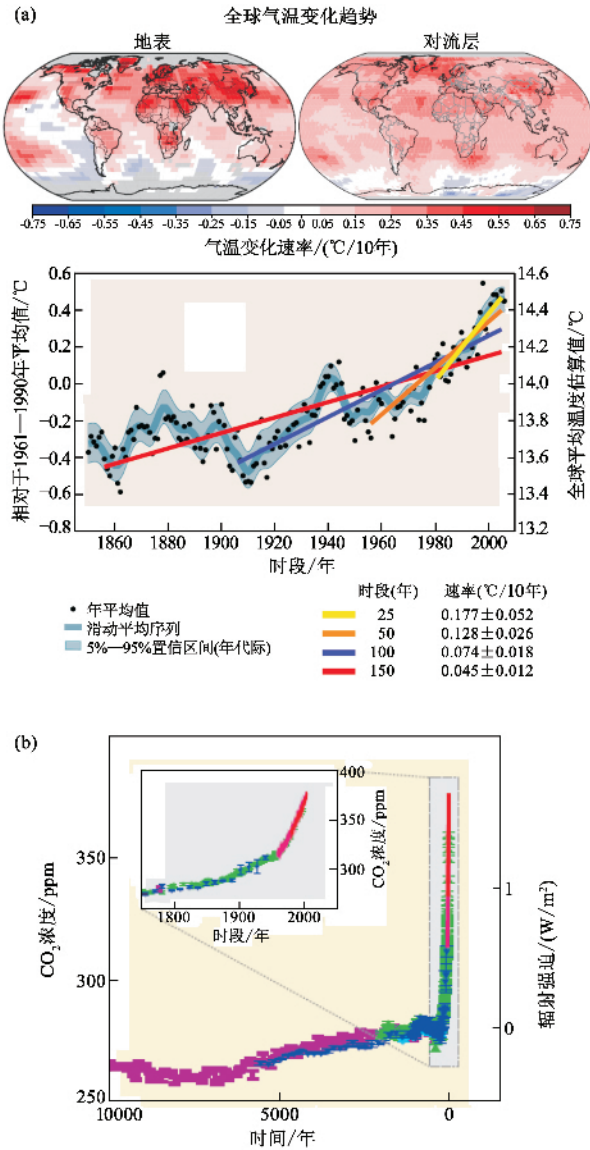


图2 (a)顶部左图是地表 1979—2005 年全球温度线性趋势分布,右图是卫星测量的对流层线性全球温度趋势。底部是 1850 年以来,全球平均的地表温度的变化及同时段的线性趋势。相对于 1961—1990 年的气候平均值。平滑曲线(蓝线)代表 10 年尺度的变化。从 1850—1899 时段到 2001—2005 时段总温度增加为 $0.76 \pm 0.19^\circ\text{C}$ 。(b)过去 10000 年大气 CO_2 浓度的变化(相对于 2005 年)。这是从冰芯资料分析和仪器测量得到的。纵坐标是 CO_2 的浓度,单位为 $\text{ppm}^{[1]}$

另外,现代的气候变化已不完全由自然的因素造成(太阳活动、火山爆发、气候系统的内部变率等),人类活动起着重要作用,在最近 50 年甚至可能起主要作用^[1]。

人类活动对气候变化的作用主要表现为三个方面^[2](1)化石燃料燃烧排放的 CO_2 等温室气体通过温室效应影响气候,这是人类活动造成气候变暖的主要驱动力;(2)农业和工业活动排放的 CH_4 ,

CO_2 , N_2O , PFC, HFC, SF_6 等温室气体,也通过温室效应增强气候变暖;(3)土地利用变化导致的温室气体源(汇)变化和地表反照率变化进一步影响气候变化,这包括森林砍伐、城市化、植被改变和破坏等所引起的温室气体浓度增加和减少或清除。应该指出,在地球的气候长期演变过程中,温室气体(导致变暖)和气溶胶(导致变冷)始终是两个主要的影响因子,只不过在气候变化的早期或地质年代,这两种因子是自然起源的,而不是人类起源的。

最近几十年,随着气候科学的迅速发展和地球气候的实际演变,人类活动影响气候变化的科学认识不断加深,所提供的证据不断增多,目前科学界比以往任何时候都肯定地确认人类活动对地球气候的影响。在这个过程中所出现的科学争论大大推动了气候变化科学研究的进展,其结果是明显改变了人类对气候变化本质的认识。这些新的科学成果引起了各国政府和科学界的广泛重视和关注,并最终导致了国际上的共识和应对全球气候变化的共同行动(联合国气候变化框架公约和京都议定书)。因而以全球变暖为主要特征的现代气候变化已不仅是一个科学问题,已演变成全球性的政治、外交、环境和能源问题。

气候变化是一个高度复杂的过程,它不但涉及到各种物理过程,而且涉及到地球生物化学过程,并且它们大部具有明显的相互作用,这就是说,不仅要考虑一个过程 A 对另一个过程 B 的作用,而且还必需考虑过程 B 对过程 A 的反馈作用。此外气候变化本质上主要是一种非线性过程,因而从数学上如何处理如此复杂的过程也是一个难题。应该指出,不论气候变化涉及的过程多么复杂,物理过程是最重要的,也是最基本的,大部分数学问题也是围绕物理问题来求解的。因而本文将重点阐述全球气候变化中包含的三个主要物理问题(1)全球辐射平衡和温室效应(2)大气中的波动和振荡与气候的内部变率(3)大气的混沌特性与气候的可预报性。这三个问题贯穿了全球气候变化的主要方面,是认识和了解气候变化本质的科学基础。

2 全球辐射平衡与温室效应

太阳辐射是驱动地球上所有天气和气候现象的能量来源。由图 3 可见,就全球和年平均而言,有 $343\text{W}/\text{m}^2$ 的太阳辐射(又称短波辐射)入射到大气顶,但其中三分之一($103\text{W}/\text{m}^2$)被云层和地表面反

射回太空中,因而只留下 $240\text{W}/\text{m}^2$ 被地球的气候系统所吸收.大气本身对太阳辐射的直接吸收很少,大部分被陆面、海洋、冰面所吸收,使它们温度升高.为了维持地球的气候长期不变,根据辐射平衡的原理,地球作为一个黑体(严格地说应为灰体)被地表和大气吸收的太阳辐射必须在大气顶被地球自身放射的红外辐射(又称长波辐射)所平衡,其量值也应该是 $240\text{W}/\text{m}^2$.在这种情况下,地球系统由于没有任何净能量输入,则能保持地球气候状况(主要由全球地表平均温度表征)不变.因而维持全球辐射平衡是维持和稳定地球气候的基本原理.不论何种原因,如果这种平衡一旦被破坏,则全球辐射平衡不能维持,地球系统将获得或损失能量,从而导致地球气候的变化.破坏全球辐射平衡可以有两种方式:一是入射到大气顶的太阳短波辐射量发生了改变,它主要由太阳活动本身的变化或太阳常数的变化引起,也可以由地球围绕太阳公转的轨道参数(偏心率、进动和倾斜角)变化引起(即米兰科维奇循环),也可以是大气中的云层覆盖面积或大气气溶胶颗粒物含量发生了变化,从而使反射的太阳辐射量发生了变化(用反照率表示).这些变化是引起气候自然变化的主要原因之一.它可以影响不同时间尺度的气候变化.二是射出长波辐射的变化.能够影响地球射出长波辐射向外空传输的主要因子是大气中的水汽、 O_3 和温室气体等.它们能捕获或拦截地球和大气向外射出的长波辐射,使射出的长波辐射减少,从而破坏了全球辐射平衡.由上述可知,能够改变大气顶净辐射或使辐射平衡发生扰动或破坏的任何因子都可以引起全球气候变化,它们被称为辐射强迫.实际上,全球气候变化是对辐射强迫的响应,通过这种响应过程,地球系统改变自身的气候状况,以重新恢复原来的或建立新的全球辐射平衡.在这个过程中,由于气候系统中各圈层响应的快慢不一样,其所表现出的气候变化状况就不一样,大气的对流层和海洋响应较慢,因而它们在几十年之后才可能表现出明显的气候变化,而平流层大气响应快,一般在一个月左右就可发生明显的变化.正的辐射强迫可使地表温度上升,导致全球变暖,负的辐射强迫(如火山爆发)使全球变冷.应该指出,辐射强迫的计算是研究气候变化原因和预测气候变化的一个关键.它所关心的是太阳辐射和长波辐射的变化,而不是其本身,从这个意义上讲,入射的太阳辐射并不是辐射强迫,只有它的变化量才是辐射强迫.如前所述,现代气候变化的研究主要关注近百年来人类活动(尤其

是工业化后温室气体排放不断增加)是如何影响全球气候变化的,因而下面重点讨论温室气体的增加通过什么物理过程和机理来影响全球气候变化,简言之,这个物理过程和机理就是所谓的温室效应.温室效应是引起现代气候变化的关键的物理原理和解释全球变暖的基石,因此下面将比较详细地说明它的由来和增温作用.近200年来,许多物理学家为此做出了重要贡献.

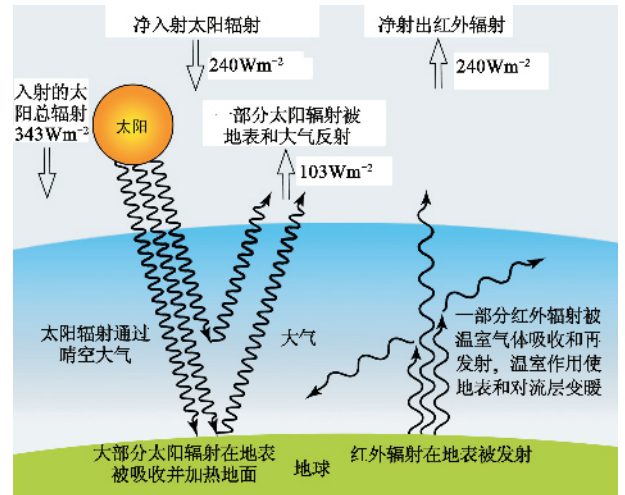


图3 大气顶的全球辐射平衡简图.太阳辐射的净输入必须被地球的净红外辐射输出平衡($240\text{W}/\text{m}^2$).入射太阳辐射的三分之一被反射回太空($103\text{W}/\text{m}^2$),其余主要被地表所吸收.射出的长波辐射被温室气体和云吸收,使地球比没有温室效应时要高 33°C 左右^[3]

人类对温室效应的认识大致经历了3个阶段^[2].早在3个多世纪以前,马里奥特(Edme Mariotte)在1681年指出,虽然太阳光及其热量容易通过玻璃和其他透明物质,但其他来源的热量却不能穿过玻璃^[1].18世纪60年代,桑修莱(Horace Benedict de Saussure)用一个日射温度计(在一个涂黑盒内放上温度计并覆盖上玻璃嵌板)做了一简单的温室效应试验,它第一次显示了产生人工增暖的能力,这是一次观念上的飞跃,人们认识到空气本身也能够截获热辐射.1824年,法国科学家约瑟夫·傅里叶(J. Fourier)引证了上述Saussure的结果时,进一步指出,地球的温度因受空气的影响而能够提高,大气和温室玻璃一样会产生相似的增温结果,这就是温室效应这一名称的由来^[4].1836年,普里(Poulliet)依据傅里叶的思想指出:大气的层结状态使空气对地球放射的射线(辐射)比太阳射线具有更大的吸收.这个观点第一次说明了大气的温度层结(在对流层中温度随高度下降)在产生温室效应

中的重要作用.但到这时为止,人们并不了解是大气中的什么物质吸收了地球放射的热辐射.1839年,英国科学家丁德尔(J. Tydall)通过实验室试验认识到了复杂分子(如水汽和 CO_2)对热辐射的吸收特性不同于占主要大气成分的双分子 O_2 和分子 N 的吸收特性,并测量了水汽和 CO_2 对红外辐射的吸收,进一步阐明了大气中微量的温室气体对地球温度变化的特殊作用.他指出,任何辐射活跃的大气成分(如水汽和 CO_2)在量上的变化都能够产生地质学家的研究所揭示出的气候变化.

第二阶段主要是对温室气体增暖效应的定量计算和预测.在19世纪后期以及以后的50年中,不少人进行了这种计算.1895年,瑞典化学家阿尔赫尼斯(J. Arrhenius)通过计算指出,由于燃烧煤使 CO_2 的大气浓度加倍时全球平均温度将增加 $5\text{—}6^\circ\text{C}$.这个结果已十分接近我们现在由复杂气候模式计算的结果.他同时指出,如果大气中痕量的 CO_2 含量增减40%,则可能触发冰河期的进退.100年以后,人们发现,在冰期和间冰期, CO_2 确实以这个数量变化.但现在认识到,初始的气候变化似乎超前于 CO_2 的变化,而 CO_2 温室效应反馈作用进一步增强了这种变化.在这个时期,兰利(S. Langley)和伍德(R. Wood)也指出了实际温室与大气中温室效应的差别.1938年,卡伦德尔(G. S. Callendar)求解了一套联系温室气体和气候变化的方程组,他发现 CO_2 加倍后可使全球平均温度增加 2°C ,并且极地(指北极和南极地区)增温明显,他把增加的化石燃料燃烧与 CO_2 及其温室效应增加联系在一起.他指出,随着人类现在正以比地质年代十分异常不同的速度在改变着大气成分,寻求这种变化的可能结果就是十分自然的事了.从最好的实验室观测看,增加大气中的 CO_2 的主要结果将是地球冷区平均温度的逐渐增加.在1947年,阿尔曼(Ahlmann)报告了自19世纪以来,北极地区出现了 1.3°C 的增暖,但他的解释并不完全正确,他相信这种气候脉动可能完全由温室增暖造成.1956年,普拉斯(G. N. Plus)得到了类似的模式预测结果:“如果在本世纪(20世纪)末,测量表明全世界的 CO_2 含量明显增加,并且同时温度继续在全球上升,则能肯定地确认, CO_2 是引起气候变化的重要因子”.在这个时期,人们试图进一步了解化石燃料的排放怎样改变大气 CO_2 浓度,这涉及到碳循环的问题,从而开始了新的多学科交叉的碳循环问题的研究.在这个问题中首先考虑的是 CO_2 的海气交换过程.1957年,瑞威拉(R. Revelle)和瑞

斯(H. Suess)解释了为什么排放的 CO_2 能够在大气中不断积累,而不是被海洋吸收.他们指出, CO_2 的混合过程能够迅速地发生在海洋的上部混合层中,而与深层海洋的混合时间则长达几百年,正因为如此, CO_2 的大气浓度将显著增加,而消失非常缓慢.科学界已预测,气候变化与海洋环流和生物地球化学过程的相互作用,将进一步改变海洋对人类排放的 CO_2 的吸收作用,有可能使全球温度进一步上升.

1957年,在夏威夷的蒙纳罗亚和南极建立了 CO_2 测量站,从而进入了温室气体的实际测量阶段,并以精确的测量结果表明,大气中的 CO_2 浓度确实在不断地增加,由此揭开了近代全球气候变化研究的序幕.特别应该提及的是基林(G. D. Keeling)在20世纪50年代对于 CO_2 的系统测量和分析工作.在这个时期,主要测量的是 CO_2 与 H_2O ,前面指出,这两种温室气体早在100多年前已由丁德尔确认.直到上世纪70年代,其他温室气体如: CH_4 、 N_2O 和CFCs才被公认为是另外对气候变化有影响的重要温室气体.现在温室气体的测量表明, CO_2 已从工业化前(1750年)的280ppm增加到了2005年的379ppm.2005年 CO_2 的大气浓度值已远远超出了根据冰芯记录得到的65万年以来浓度的自然变化范围(180—280ppm).并且近10年(1995—2005年)来 CO_2 大气浓度的增长率(每年 1.9ppm)比过去有连续直接大气测量以来的增长速率(1960—2005:每年 1.4ppm)要高很多.其他温室气体的大气含量增加都十分明显,其量值也都超过了65万年以来的自然变化范围.由此引起的温室效应,如以辐射强迫为计量单位,全球平均达到了 1.6wm^{-2} ($0.6\text{—}2.4\text{wm}^{-2}$ 范围 χ 与1750年相比).其中 CO_2 的辐射强迫从1995—2005年增加了20%,这可能是近200年中增长最快的10年.

为什么由温室气体造成的温室效应可以引起全球气候变化呢?这是了解全球气候变化原因的最重要的物理基础之一.当前的温室效应有两部分:一部分是自然的温室效应;另一部分是增强的温室效应,即人类活动引起的温室效应.我们首先考察一下自然的温室效应,它不但发生在地球的气候演变中,也发生在其他行星的气候形成中,就目前知识而言,至少在我们地球的近邻行星金星(离太阳比地球近)与火星上(离太阳比地球远).在地球大气中,除了含有占99%的氮、氧以外,还含有其他少量的微量气体如 CO_2 、 CH_4 等以及云、水和尘埃等,后者虽

然所占体积和数量很少,但它们可以吸收地表放射的一部分红外热辐射,根据基尔霍夫定律(Kirchoff定律),大气中的一个气层如果吸收辐射,它也在同一频率下,正比于吸收后再以自己的温度放射出辐射.因而大气中,上述这些微量气体和水汽、云等在吸收大气与地表发射的长波热辐射的同时,也以自身的温度向外空放射出热辐射.在大气高层的这些气体、水汽与云,由于其温度比地表低得多(大气中的气温从地表到对流层顶(平均约12km)平均以 $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 下降,因而在5—10km的高层大气,比地表冷 $30\text{—}50^{\circ}\text{C}$),发射的热辐射量比较小,因此这些高层的温室气体吸收了全部(看作黑体)由地表和低层大气发射的长波辐射,但向外发射了比其吸收小得多的长波辐射.这比没有这些水汽与温室气体情况下的大气损失于外空的热辐射要小得多.因而这些温室气体的作用犹如覆盖在地表上的一层棉被(即被毯作用),棉被的外表比里表要冷,使地表热辐射不致于无阻挡地逸向外空,从而使地表比没有这些温室气体时更为温暖.从辐射传输的观点看,也可以认为是增加了中、上层大气中温室气体、水汽、云等向下放射的长波辐射,使地表和近地面空气增温.

由上可见,地球上如果没有温度随高度减小的温度垂直分布,就不会有温室效应.

温室气体和水汽对红外辐射的吸收是在不同的光谱带发生的.整个吸收谱相当复杂,如温室气体中最重要的二氧化碳(CO_2),其吸收带有 $15\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $5.2\mu\text{m}$, $4.3\mu\text{m}$ 以及 $2.7\mu\text{m}$ 和 $2.0\mu\text{m}$,其中最强烈的是 $15\mu\text{m}$ 与 $4.3\mu\text{m}$ 两个吸收带.在气候变化的研究过程中,曾有人认为大气 CO_2 吸收带已经饱和,因而温室效应已经达到饱和,即使将来 CO_2 浓度再增加也不会产生明显的温室效应.但事实并非如此,许多红外光谱与大气辐射的研究表明, CO_2 的吸收作用或温室效应在 $15\mu\text{m}$ 的中心波段确实已经达到饱和^[3],但在 CO_2 整个吸收区间($14\text{—}18\mu\text{m}$)(尤其是中心峰值的两翼)以及其他吸收波段(如 $10\mu\text{m}$, $5.2\mu\text{m}$ 等)远未达到饱和,最近的将来也不会达到饱和.

应该指出,不论地表和大气内部的物理过程如何复杂,都如本节开始时所指出的那样,进入与离开大气顶的辐射能量之间必须保持平衡.前面已经指出,在有云的大气中,进入大气的净太阳辐射为 $240\text{W}/\text{m}^2$,则射出的长波辐射必须要有这个量.这种平衡一旦被破坏,它可以通过地球表面温度的升高

来恢复平衡.由于大气成分中存在着自然产生的温室气体、云和水汽,通过它们产生的正辐射强迫和温室效应,即自然的温室效应可使地表增暖,温度比没有这些温室气体和水汽条件下的大气上升了 33°C ,即从 -19°C (雪球)上升到 $14\text{—}15^{\circ}\text{C}$.这是地球上适合生命存在的温度,可以说,没有自然的温室效应,生命就难以维持.火星与金星上有类似的自然温室效应,但由于 CO_2 含量和温度与地球不同,它们最后达到的平衡行星温度不是太高就是太低,不适合生命的存在.

可以造成全球辐射平衡破坏的主要因子也可以是由于人类活动引起的大气中温室气体的增加.由此而造成的地表温度的进一步增加被称为增强的温室效应.因而,这种增强的温室效应实际上是由于人类活动引起的附加在自然温室效应之上的一种温室效应.虽然其量值比自然温室效应要小得多,但其增暖作用的意义是非常重要的.通过这种人为的温室效应,可进一步增强阻止长波辐射向外辐射的被毯作用,这就意味着高层大气向外空放射长波辐射进一步减少.从辐射传输和辐射平衡的角度看,相当于大气顶产生一向下的辐射通量密度增加,而使大气顶辐射不平衡(净长波减少).因而地表温度将会进一步增加,以响应这种不平衡(辐射强迫),直到大气顶射出的净长波辐射量又等于入射的净太阳辐射.当地球系统完全向这种人类活动引起的辐射强迫调整后,地球的平均温度将会增加到某一量值的温度,以响应增强的或人为的温室强迫作用.

图4说明了自然的温室效应(图4(a))与增强的温室效应(图4(c)).在图4中,由于大气中水汽和温室气体的存在,使地球的温度由 -19°C 上升 15°C .如果由于人类的排放,大气中 CO_2 浓度增加一倍(图4(b)),这时大气顶的辐射平衡将受到破坏,由于增加的 CO_2 拦截了地球和大气放射的长波辐射,使离开大气的长波辐射量只有 $236\text{W}/\text{m}^2$,因而气候系统内部将进行调整,以恢复原有的平衡.根据斯特藩-玻尔兹曼辐射定律,辐射通量密度 $E = \sigma T_s^4$ (T_s 是地表平均温度),地表必须升温 1.2°C .温度升高之后,根据克劳修斯-克拉珀龙方程,大气中的水汽将增加,这将使温室效应进一步加强.通过这种正反馈作用,地表的增温将不是 1.2°C ,而是 2.5°C ,所以反馈作用是非常明显的.

由上可见,现代全球气候变化的原因从物理上讲,除了自然的外强迫因子像过去历史时期和地质年代那样继续影响地球的气候外,还增加了由于人

类活动因素造成的影响,并且随着人类活动引起的温室气体排放的增加,这种人为产生的强迫作用可能会不断增强.气候模式的模拟和预测表明,它的作用在将来可能会超过自然变化的因素,使地球的气候不断地变暖,至少在21世纪人类将进入一个更加变暖的世界(图5).得到这个结论的科学基础就是近200年大气中温室气体和地球温度不断增加的事实与温室效应的物理原因.

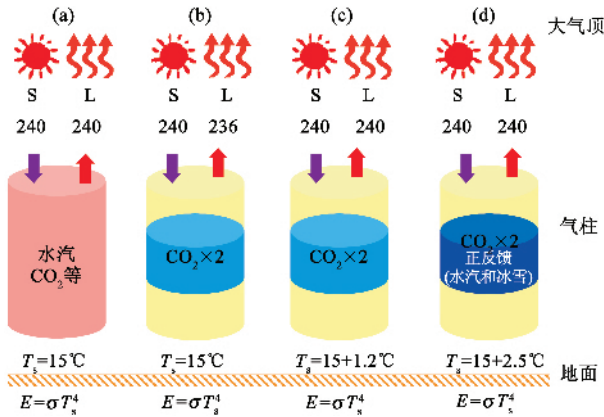


图4 地球的自然温室效应和增强的温室效应示意图(图中S为短波辐射,L为长波辐射, T_s 为地表平均温度, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数).(a)自然的温室效应(b) CO_2 浓度增加到原来的2倍(c)增强的温室效应(d)反馈作用^[4]

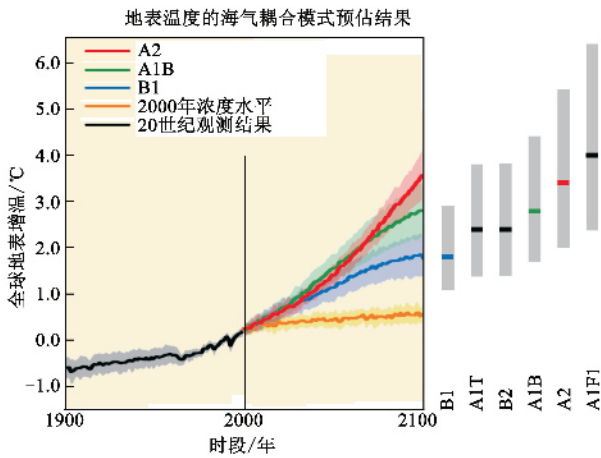


图5 各实线分别表示在A2、A1B和B1情景下的多模式全球平均地表变暖(相对于1980至1999年平均)并作为20世纪模拟结果的延续,阴影区表示各模式年平均值的一个正负标准差区间.橘红色线表示将 CO_2 浓度控制在2000年浓度水平上的模拟试验结果,右侧的灰色条表示最佳估算值(各条中间的实线)和6个SRES标志情景可能范围的温度预测结果^[1]

3 大气内部变率与大尺度波动

由图2可以看到,在近百年气温的线性上升趋势

势上还叠加着不规则的脉动变化,有时在平均趋势线之上(正的脉动或正异常),表明气候状况要比平均的全球变暖状况更暖(如在1860—1900年代和1920—1940年代);有时气候变化在平均趋势线之下(负的脉动或负异常),这时气候比平均变暖状况要冷,如1950—1970年代是一个著名的冷期.迭加在气候变暖趋势线上的冷暖异常期被称为气候脉动或气候变率.这种气候变率具有各种时间尺度和空间尺度.短的只有几十天,长的可达几十年;范围小的只有几百或上千公里,范围大的可达半球尺度.它们形成的原因与外强迫或温室气体增加引起的全球气候变化不同,主要是由大气内部的变率和气候系统各圈层之间的耦合变率造成,统称为气候的内部变率(应该指出,气候的内部变率有时也可以由外强度产生,例如火山爆发与太阳活动).这种变率本质上是由大气波动的形成、传播、振荡和 instability 发展造成的(见图6),它们不但可以通过波能的传播或波导影响下游的天气气候异常,而且可以发生定常性传播,使一个地区的天气或气候异常传播到很远的地区(即大气遥相关).另外,在耦合强迫或人类活动产生的气候变化背景下,大气中出现大尺度静止性振荡,表现为此起彼伏的翘翘板形式的变化.这种现象被称为大气涛动.它们可形成优势的气候异常模态.它们也是大气波动变化的一种形式.能够产生天气变化和气候异常的大气波动最主要的是大尺度行星波,其次是重力波,声波的作用可以忽略.在地球上,大尺度行星波的波长一般在几千公里到一万公里左右,其最简单的形式就是罗斯贝(Rossby)波.这种波是由于在旋转的地球上柯利奥里斯参数($f=2\omega\sin\varphi$, φ 是纬度, ω 是地球自转角速度)随纬度的变化产生.波动一旦产生,波动本身相对于大气的基本气流以每秒几米的速度向西漂移或传播,波长越长,向西传播的相速度越大,但由于这种波动是迭加在中高纬基本西风气流中,合成的运动表现为波动性的向东传播(见图6).三维的罗斯贝波不但可以水平传播,而且还可以垂直传播(如由对流层到平流层或反之).应该指出,大气中的波动也可由地球上赤道与极地的南北或经向温度差造成.图6的左侧说明,由于热带地区接受的太阳辐射多于射出的长波辐射,净的辐射平衡是正,即辐射是盈余的,而高纬和极区正好相反,是亏损的,因而热量必须通过大气与洋流从热带向极区输送,以达到全球辐射的平衡,同时建立了从热带指向极区的经向温度梯度.并通过斜压不稳定产生大尺度行星波(又

称斜压波),承担这种热量的南北输送或交换.

在实际大气中,情况比上述单一的简谐波要复杂得多.一个天气扰动可以看成是由许多不同振幅、不同频率的简谐波叠加而成,这种合成波称为波群或波包.波群传播的速度称为群速,它与相速是有差别的.群速是波动频散理论中最重要的概念之一.从动力学观点看,它代表能量传播的速度.

在频散介质中,谐波分量的相速与波数有关,谐波分量之间的位相差将不断改变,因而会发生谐波分量之间振幅相互抵消或相互叠加增强现象.在这种情形下,波群在传播中不但其廓线形状会发生变化,而且波群作为一个整体的传播速度与单个谐波分量的相速也不相同.

大气是频散介质,当大气中产生了某种扰动后,

其能量是按群速传播的.当群速 $C_g > 0$ 时,若群速大于相速(C),即 $C_g > C$,扰动能量先于波动向下游传播,在下游产生新的扰动或使下游原有的扰动增强,这种效应称为上游效应.因此罗斯贝波作为旋转大气中最重要的频散波,它的频散对大尺度天气和气候的演变非常重要.它的形成或被激发、传播、振荡和不稳定发展是造成大气中天气与气候变化和异常的直接原因.如果没有外源作用,由于能量的频散,大尺度扰动终将消失,所以外源或外强迫(加热场,地形等)作用对于激发罗斯贝波很重要的.概括起来,大尺度大气波动能够通过下列5种方式影响气候异常和气候变化.

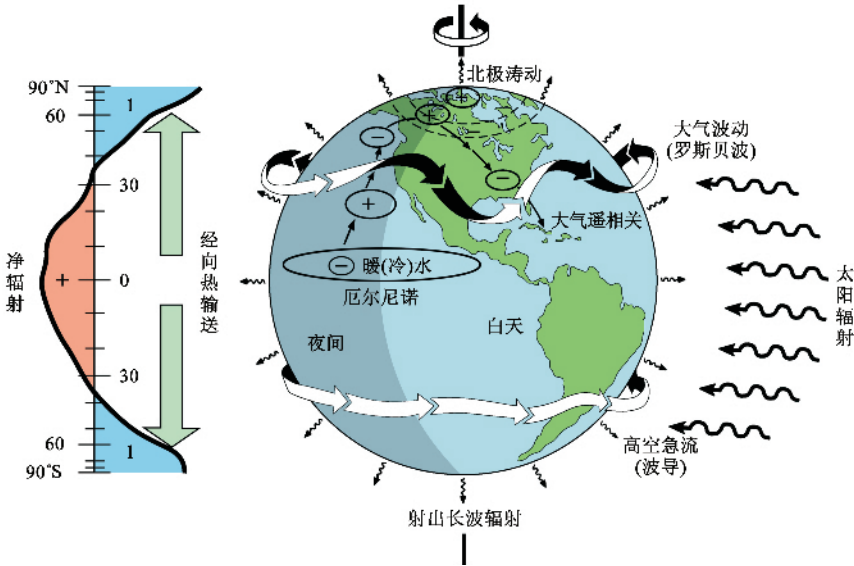


图6 大尺度罗斯贝波、遥相关和大气振荡示意图(根据文献[5]改绘)

3.1 罗斯贝波波动的传播和能量频散与扰动的发展

罗斯贝波是频散波.在沿纬向方向,它的群速度总是大于相速度的,因而它可以先于罗斯贝波波峰(波脊)和波谷(波槽)到达之前在下流引起新的扰动或使原扰动加强(或减弱),从而引起下游地区天气或气候的异常.此外,罗斯贝波的不稳定性,即它的发展和减弱,新生和消失以及波动状况的调整(如移动变静止,波数变化等)也能影响天气与气候,尤其是当波动的槽脊振幅不断加大形成准静止的南北振幅很大的定常波动时(即由阻塞高压和切断低压组成气压场偶极子型时),对天气气候的异常影响更为明显和持久.一个突出的例子是在2008年1月10日至2月5日期间,中国南方罕见的低

温、冰冻、雨雪灾害发生时,在欧亚地区出现了持久性阻塞高压形势,它不断地导致冷空气从西伯利亚和中亚侵入中国,造成了中国南方极端异常的天气气候条件^[6].

3.2 定常波的波导与大气遥相关

当移动性罗斯贝波变成定常或静止波时,通过其波峰和波谷的局地振荡,也可以把波动的影响逐次向下游传播到很遥远的地区,影响哪里的天气与气候异常.因而一个地方如果通过加热或地形作用激发了波动,它们常常以定常波的形式在球面上沿大圆路径传播.如果波动在低纬由大量对流加热激发产生,它可以向东北方向传播到达中高纬度,并在一定纬度(称临界纬度)处,开始折转向东南方向

传播,因而波动的影响可以到达离波动发生区很远的地点.这种在球面上按大圆路径传播的情况十分类似于光学中的斯涅尔(Snell)折射定律.这种不仅在临近地区产生影响而且还在很遥远地区发生作用或影响的现象被称为大气遥相关.在大气中有许多种遥相关现象,例如中国的气候异常或变化可受到来自欧洲到北大西洋遥相关的影响,同时也可以受到来自印度季风区和热带西太平洋暖池地区(海洋温度很高的地区)与厄尔尼诺现象(赤道中东太平洋海表温度异常升高)遥相关的影响(见图6).这大大增加了气候变化预测的复杂性和困难.遥相关的本质主要是罗斯贝波能量波导现象的结果.在中纬度中高层,主要由纬向波数为5(波长近1万公里)左右的罗斯贝波传输^[7].在传输的过程中可以造成大圆路径中气候的异常与变化.由遥相关作用形成的波导可以围绕整个全球传播,在其路径上引起风、气压的定常振荡或变化^[8].

3.3 大气振荡和优势环流型式

全球大气环流有不少优势的环流变化型式,它们常常表现为两个大气环流中心的耦合振荡,即呈翘翘板式的反向的强弱变化,两者具有很高的相关性,其时间尺度有年际的,也有几十年的.如果在某一大范围地区某一时期被这种振荡的某一相位(正或负)所控制,则气候会出现具有明显特征的持续性异常或变化.在两个固定的环流中心振荡的不同地区,气候状态可能完全相反,并在振荡的不同位相时,风暴路径的位置、强度以及相关的热量、水汽和动量南北输送都不相同,因而对于一个地区旱、涝、热浪、寒潮和其他种类气候变化的发生十分重要.从物理本质上讲,这种优势环流型或振荡的形成也是大气遥相关或定常波传播的一种表现,通过这种振荡型控制着从季节到几十年时间尺度的大范围地区的气候异常与变化.大气振荡的研究已有近百年的历史,概括起来至少有5种形式:南方涛动(SO,印度季风区与东南太平洋海平面气压有反相振荡);北大西洋涛动(NAO,冰岛低压和亚速尔高压有反相振荡);北极涛动(AO,也称北半球环状模(NAM),极地涡旋与环绕它的高压带成反向振荡(见图6));南极涛动(AAO,也称南半球环状模(SAM),南极涡旋与围绕它的高压带成反向振荡);太平洋年代尺度振荡(PDO)和北太平洋年代际振荡(IPO)两种振荡基本类似,有相同的时间演变,但后者是前者在太平洋地区的扩展,它表示阿留申

低压与北太平洋海表温度的同时变化).上述优势环流型的形成与耦合的海气强迫关系密切,近来的研究表明,它也可能与人类活动造成的气候变化有关联.从前面的阐述中可知,从物理上分析,全球气候变化是辐射强迫扰动的结果,它与耦合的海气强迫(气候系统内部变化)是不同的.但是因为气候的运动方程是非线性的,辐射强迫扰动可能会快速地激发气候变率的自然模态,因而长期的气候变化预测的准确性可能对这些时间尺度的气候异常与变化有重要影响.

3.4 波动能量的垂直传播与平流层对气候变化的影响

很早以前,人们认为平流层大气(12—50km)和对流层大气是很不相同的,两者基本上是由位于12km左右的对流层顶分开的.上世纪60年代以后,开始从动力学上认识到两者是通过波动耦合起来的.人们发现起源于对流层的行星尺度罗斯贝波、重力波、混合型罗斯贝-重力波和近赤道地区的开尔文波,其能量可向上传播到平流层,以后再在那里被吸收与耗散(即临界层处,大致在纬向风速 $u=0$ 的高度),同时引起平流层气流的变化.但反过来,平流层的变化并不能影响到对流层.因而对流层与平流层之间的相互作用是单向的,即对流层波可影响平流层环流,而平流层环流异常不能影响对流层天气和气候.这种观点一直盛行到1990年代.但是在近5—10年,这种传统观点发生了改变,许多研究证实,高纬大气环流变化清楚地反映了平流层和对流层环流双向的相互作用,也就是说,平流层与对流层环流的变化是耦合在一起的,其耦合机制就是波动的垂直传播.垂直耦合最明显的表现是中高纬大气变率的环状模(NAM与SAM, annual modes).这种环流耦合模态在两半球在垂直方向从地面扩展到平流层,主要特征是极区的位势高度场(相当于气压场)与其周围的中纬高度场上下一致地具有南北方向的振荡.平流层可以通过三种方式影响对流层的天气与气候变化:一是平流层作为对流层的边界条件,其环流变化可以以同样方式扰动对流层,尤其是极地涡旋或高纬西风,从而影响对流层的天气与气候,尤其是在一些敏感地区,其影响程度甚至超过海表温度,其影响时间可长达2个月.它主要通过由平流层环流异常产生的低频波(30—60天周期)向对流层传播实现的;二是南半球臭氧洞或平流层臭氧耗损能通过环状模态的垂直耦合影响南半球大气环

流(主要是极地涡旋),这也是一种遥相关作用.南极臭氧洞与南半球极地涡旋的正反馈作用使两者都得到加强.从而南极地区至今并未表现出全球变暖的现象,甚至在其主体,温度和冰层是增加的.这实际上反映了平流层与对流层作为一个耦合整体是人类产生的臭氧耗损(平流层冷却)与温室气体增加(也使平流层冷却)在上边界产生的一种负辐射强迫作用,它必然导致平流层大气产生低频的变化与响应,以后又引起对流层大气环流的变化与响应.类似地,太阳活动(如11年周期)也会引起平流层辐射强迫的变化,这种信号同样通过激发低频变化在平流层和对流层中传播,甚至在海洋上表层产生影响;三是平流层通过大气垂直和水平波导可能提供连接热带地区与中高纬地区或北太平洋与大西洋间的一个桥梁,从而增加了气候的可预报性.

3.5 热带行星波的传播及其对中高纬天气气候的影响

热带大气运动与全球天气和气候变化有着密切的关系.这主要是通过热带大气波动的纬向、经向和垂直传播实现的.在热带地区,存在着两种行星尺度的波动:一种是在近赤道地区向东传播的开尔文(Kelvin)波;一种是向西传播的混合型罗斯贝-重力波.这两种波动的波长都在10000km左右.开尔文波与地球旋转效应无关,本质上是旋转地球上的纯重力波,而混合型罗斯贝-重力波与地球的旋转效应 f 有关,本质上是罗斯贝波与重力惯性内波的混合波.它们产生的原因主要与热带对流性云通过凝结过程释放出的热量有关,这些热量可以加热云体周围的大气.当这些波动分别向东、向西传播时,它们产生的气压与风场扰动可不断地改变所经过地区的天气与气候,最显著地表现出30—60天周期的振荡,另外还有10—25天同期的振荡.由于这些振荡具有准周期性,目前已被用于月与季节的气候预报中,同时人们也发现全球的台风或飓风以及热带降水的发生地区,时间和强度也与这种波动有密切有关.除了纬向传播以外,这两种波动还可在垂直方向和南北方向传播.在垂直方向,可以把对流活动激发的波能传播到平流层中,造成那里基本气流的变化,最著名的是产生平流层热带风场的准两年振荡(QBO),即热带地区平流层的风场大致是一年出现东风异常,下一年出现西风异常,如此循环不已,由此改变了热带大气的风场结构和天气气候条件.在南北方向,这种波动通过遥相关可一直影响到中纬

度,甚至高纬度,改变那里的大气条件,造成天气和气候变化.这种向北的传播在亚洲与太平洋地区更明显.另外海洋中也存在这种缓慢的行星尺度波动,它们的传播与厄尔尼诺事件的发生有密切关系.因而热带地区大气和海洋的行星尺度波动对于全球的气候变化是非常重要的,由于它们都是低频波动,常常耦合在一起,这大大增加了海洋对大气的强迫作用,这就是为什么热带气候变化的可预报性要远高于中高纬地区.也就是说,热带地区的气候预测(尤其是对年代际时间尺度以下)具有更高的预报技巧.

4 气候预测:气候的可预报性与大气运动的混沌特性

为了模拟过去和现代的气候变化,并在此基础上预测未来的气候变化,至今已发展了多种不同复杂程度的气候模式.这些模式可以包括自然的外强迫因子,以及 CO_2 增加产生的增强温室效应,也包括气候的内部变率,因而是研究和预测气候变化的强有力工具.最简单的气候模式是一维的,它可以粗略地估计全球平均温度对外强迫与 CO_2 增加的整体响应.以后建立了二维模式,即有了温度随纬度的变化.但气候对外强迫和 CO_2 增加的响应在全球并不是均匀一致的,简单的一维与二维模式不能或不能完全表征这种不均匀性(尤其是对大气气溶胶的作用),并且大气作为一个动力系统,它对各种辐射强迫的响应会导致复杂的热力与动力过程进行调整,这种调整过程就是产生特定的大气波动、振荡和遥相关等气候内部变率模态的过程,这必须由动力学和结构上更准确、更详细和更复杂的三维气候模式来进行表征.因而现代的气候模式包括了图1所示的绝大部分过程及其相互作用,因而它比制作中短期(1—10天)的数值天气预报模式要复杂得多.复杂气候模式唯一求解的方法是求其数值解,为了使这种模式能够运行,首先需要容量很大、速度很快的超级计算机.一般国际上运行气候模式的计算机都是世界上最大最快的计算机,它们可以积分长达几百年或上千年,这是研究人类活动影响气候变化所必需的.但这还不能完全满足模式运行的需求,有时还必须对气候模式的空间分辨率进行降级,对物理过程进行简化.数值天气预报模式的水平分辨率目前可达几十公里甚至几公里,垂直方向达50层左

右,而全球气候模式的水平分辨率一般约在 200—250km,垂直分层为 30 层左右,因而很难直接描述中小尺度的天气和气候现象与过程.在气候模式中,特别重要的是要对大气、海洋、陆面与海冰过程进行适当的耦合,以正确地表征它们之间的相互作用,这需要合理地表征这些部分分界面(尤其是海气与陆气之间的分界面)处的热力和动力学过程.图 7 是耦合的海气模式结构的示意图.可以看到,在大气与海面、陆面、冰面之间发生热量、水汽、动量交换,它们可以影响大气环流、海表温度、陆面特征等,最后影响气候系统的变化.

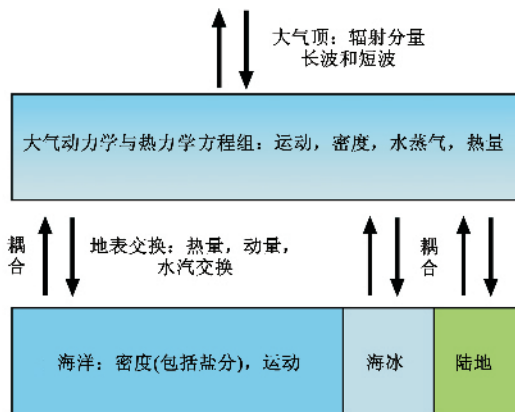


图 7 耦合海气模式结构示意图 在各部分分界面之间存在着热量、水汽、动量等交换

为了使构建好的复杂气候模式能够用于气候变化的预测,还必须对它们的正确性或有效性进行检验.这可以采用不同的方法:一是对模式运行几十年,模拟现代的气候变化,通过详细地与实际观测资料比较,可以确定模式对气候变化的模拟能力及性能;二是模拟大的强迫扰动(如火山爆发、太阳活动的变化或厄尔尼诺事件等)对地球气候的影响,以考察模式对各种强迫的响应能力.这可以了解气候的敏感性.对于同一种强迫,有的模式十分敏感,所产生的气候变化幅度大,有的不十分敏感,引起的变幅小.据此可以了解气候变化响应与辐射强迫之间的定量关系;三是用模式模拟一千年、一万年或十万年时间尺度甚至更久远的古气候演变.那时地球的轨道参数、地表特征、生态系统等与现代十分不同.通过与观测资料(由代用资料如冰芯、树轮、钻井、花粉、历史文献等多种来源的资料获得)的比较,可以确定模式是否可以很好地突出现代气候与古气候的差异.通过上述检验的气候模式基本上具备了预测未来气候变化的能力,因而利用它们可以预测来自自然的外强迫与温室气体排放人为增加条件下全

球与区域气候变化^[1].但是对于未来百年或几十年自然的外强迫的演变是很难预测的,例如现在还没有很好的方法知道未来这么长时期火山爆发或太阳活动变化的情况.即使可以根据过去的长期统计资料用各种方法去外推,但也是十分不准确的.一般在未来百年气候变化的预测中,不考虑它们的作用,因而实际上,气候变化预测主要是预测由人类活动造成的温室气体和气溶胶增加对未来气候变化的可能影响.但要确定未来 100 年和几百年全球温室气体和气溶胶的排放量与相应大气浓度的增加量并非易事.因为未来温室气体与气溶胶的排放量与全球人口增长率、经济发展速度、能源使用情况、技术进步水平、环境条件、全球化情况、公平原则等有关.对上述 7 个条件可能出现的各种情况进行组合,就可以得到不同的排放结果,这被称为排放情景.它涵盖了从最低排放(如人口增长率很低,使用高科技,经济发展速度适中等)到最高排放(人口增长不加控制,技术发展缓慢,经济快速发展等)的各种可能出现的情况.由此再根据全球碳循环的一般规律与模式可以进一步算出大气浓度的增加情况.然后可计算出它们造成的辐射强迫.再把它作为输入,放入气候模式中驱动模式气候的变化.图 5 就是 2007 年根据不同排放情景制作的本世纪全球平均地表温度的变化情况,可以看到它们的变化幅度是 1.1—6.4℃,这是一个很宽的范围.人们也把它称作气候变化预测的不确定性.由于在气候变化预测中排放情景的计算实际上是假设的,因而严格地说,图 5 中的未来百年的气候变化情况不是真正意义上的气候预测,它只是一种气候变化的可能趋势、途径和幅度.

现在的问题是由复杂的耦合气候模式预测的将来气候变化是否可靠?有多大程度上是可信的?这是许多人经常提出的一个科学问题.混沌理论告诉我们,在混沌系统中,系统具有对初始条件敏感的依赖性,也就是系统的初始条件仅仅稍有改变,足够长时间后,系统将达到完全不同的状态.由于初始条件总不能精确地知道,即使系统的运动规律是严格确定的,但是人们仍无法预测系统的长期行为(确定性混沌).简单地说,系统是确定的,但不可预测^[8].长期以来,牛顿动力学被认为是高度确定性的,因而原则上是可预测的.但这种可预报性最先在 1903 年前后被法国数学家庞加莱所质疑,他研究了牛顿动力学下物体运动的近似解,发现一些解并不收敛,他认识到在这些情况下,实际解一定是高度依赖于初条件,致使实际的可预报性不复存在.这种微小差异

的初始条件可导致不同预报结果的不可预报的混沌行为,在上世纪60年代得到了广泛的研究.并且第一次被洛伦兹(E. N. Lorenz)用于大气模式中,得到了著名的Lorenz吸引子,并形象地把这种大气的混沌行为描绘为“蝴蝶效应”^[9].

气候是一种混沌现象,它具有明显的湍流或非周期性运动特征.它的长期行为是否可预测?如果可预测,是否存在一个预测的极限?这涉及到气候的可预测性问题.由于篇幅所限,本文将不详细讨论大气或气候系统(如海洋)的混沌特性与行为,以及如何研究其可预报性,而在下面只提供重要的证据和理由来说明气候模式的预测结果在什么情况下和在多大程度上是可预报的,因而其预报结果应该是可靠的.

(1)初值决定的大尺度数值天气预报其理论可预报上限为2周,但如果数值模式十分完善,初始条件误差很小,预报时限可延长到3周,这可能是用确定性的动力模式方法获得有用预报的最长时效.但是对于某些天气和气候形势下的预报尚可继续延长,甚至达到近4周的时间.这主要是对冬季的中纬度、大尺度、大振幅、准定常波的预报.正如第3节中所述,它们常常表现为具有持续性高气压区的阻塞形势.另外,模式中对热带大气环流和行星尺度波动描述的改进也能显著改进中高纬度天气和气候异常的预报.

(2)对于月以上的气候预报如季节和年际预报,耦合强迫(如海洋与陆面过程,包括积雪覆盖)对气候异常起着非常重要的作用.例如中、东赤道太平洋海表温度一旦出现明显异常(变暖或变冷),会形成厄尔尼诺或拉尼娜现象.目前已可依据这种海洋对大气的耦合强迫作用提前1年做出全球气候变化或异常的预报.另外,海洋和陆面过程可以引起大气环流的优势模态(见第3节),这种环流的优势模态可持续数年或数十年,从而造成大范围甚至全球的气候异常或气候变化.这种行星尺度的环流优势模态或者由耦合强迫产生,也可能在人类引起的气候变化条件下产生.现在大多数国际上先进的复杂耦合气候模式能预测这种环流的优势模态,它们对于区域气候变化的预报尤其重要.从动力系统的观点看,这反映了海洋或陆面强迫或日益增加的人类活动引起的温室气体造成的辐射强迫会影响气候吸引子几何形状发生变化.混沌理论的研究表明,虽然在混沌系统中,个别轨迹可以是不可预报的,但整体几何形状的变化是完全可预报的.上述气候变率优势模态的存在和演变,反映了吸引子几何形状和优

势极性的改变.

(3)气候变化的预测不同于几周时间尺度的天气的可预报性,后者主要依赖于初值,而前者既依赖于初始条件,也依赖于边界条件或者完全依赖于边界条件.前面所述的(1)与(2)点为较短时间尺度的气候预测,又称短期气候预测,就是依赖于以上两种条件,因而在模式中,边界条件的变化(如上边界太阳辐射的季节循环,下边界的海表温度的变化)都包含在模式中.这种可预报性被洛伦兹称为第一类可预报性.对于长期(几十年或几百年)的气候变化预测,如由人类活动造成的温室气体增加引起的全球气候变化,将不依赖于大气的初始条件,这是由于在模式长期积分之后,将完全丧失对初条件的记忆,因而失去它的影响.这种完全依赖于详细边界条件变化的气候预测被洛伦兹称为第二类可预报性,其可预报性决定于外界强迫变化的时间尺度.由于气候系统的惯性,即使施加于边界(包括CO₂增加)的外强迫消失之后很久,气候系统还将继续变化相当长的时间,甚至长达千年以上.海平面上升的响应就是一个例子.在第2节已经指出,从外强迫引起的辐射平衡的变化看(即辐射强迫),由人类活动造成温室气体的增加与火山爆发、太阳活动等外强迫在引起全球辐射不平衡上是相当的和等效的.古气候模拟表明,气候模式对于自然的外强迫响应是比较合理的与正确的,因而有理由认为,气候模式对于温室气体增加的气候响应也应是基本正确的.这就是气候变化预测可靠性的基本科学基础.

(4)虽然气候本质上是一种混沌现象,表现为湍流或非周期现象,但有些情况下也表现出相当程度的周期性或准周期性,这就大大增加了气候的可预测性.目前在气候分析中广泛使用的如子波分析法等,就是为揭示其不同时空尺度的周期性而进行的.利用这种诊断方法得到的周期性也被用于气候预测中,并且取得了一定的成功,如热带平流层风的准两年周期(QBO)和季节内30—60天振荡等.另外一个气候周期性著名的例子是地球轨道参数的米兰科维奇循环.许多研究和资料证实,轨道参数的变化是启动近80万年以来冰期与间冰期气候旋回的主要因子,其周期约为10万年左右.虽然对于控制这种气候旋回的反馈过程(如由CO₂, CH₄等造成)尚需进一步研究,但从过去百万年古气候记录中得到的全球平均温度方差来看,有60% ± 10%出现在接近米兰科维奇循环理论确定的频率处.从混沌理论观点看,这种结果是令人十分意外的.它反映了气

候系统的某种规则性,表明对于一些大的气候变化,气候系统并不是强混沌性质的,而是以大致可预报的方式响应米兰科维奇的强迫作用.这种强迫产生于地球轨道变化引起的地球上太阳辐射分布的变化.前面已经指出,由温室气体增加所引起的全球气候变化也是被大气顶辐射状况的变化驱动.从性质上讲,它与米兰科维奇强迫产生的辐射状况变化并无不同,因而可以认为,从这个方面看,温室气体增加将导致基本可预测的全球气候响应,但由于气候模式中对各种物理过程的表征或参数化方案不完全相同,其气候响应的量值不同,这反映了气候敏感性的不确定性.

在阐明了上述三个气候变化中的物理问题之后,就很容易说明未来气候变化预测的发展和改进途径.由于预测结果对初始条件的敏感性,首先是要改进全球气候观测系统,以便为气候模式提供更准确的初始场.而要做到这一点,在相当长时间内是有困难的,因而目前的解决办法是用数学方法对观测的初值进行扰动,得到了在观测和分析误差范围之内相差甚小的一群初始值,它们代表在初始时刻可能出现的所有观测场,其数量可达50个以上.以后用每一初始值进行预报,最后把所有个别预报成员的结果具有低离散度,则预报具有较高的技巧和可信度.反之如果个别成员的预报相互之间有很大的离散度,则预报技巧偏低(图8)^[10].

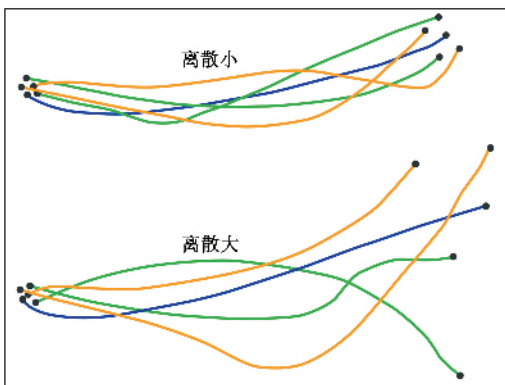


图8 集合气候预测的示意图(根据十分接近的一组初始条件制作的30天气候预测.有些集合预报整体上表现出低的离散度,有些则表现高离散度,低离散度的集合预报可用于实际的预报,它具有更大的可信度^[10])

另一方面,气候模式并不是十分完善的,尤其是对于中小尺度(如云)和湍流运动的描述是比较粗的,它们主要采用物理参数化方法,即以大尺度变量

表征它们的总体效应,这也会导致气候预测的误差,因而继续改进和完善气候模式是另一个发展方向.由于目前各国气候预报中心使用的模式并不完全相同,各具特点,因而也可以采用数学方法对各种模式的预报结果进行集合,这叫做超级集合方法.但有一个前提,就是参加模式超级集合的各气候模式一般要有较好的预报性能.通过集合,一方面可使模式的随机误差或噪音相互抵消以及系统偏差减小,另一方面可突显出由耦合强迫与外强迫在模式中产生的有用气候信号,以提高集合预报的信噪比.目前和将来的气候预测是多初值与多模式集合预报系统,因而从本质上看,气候预报演变成一种概率预报.为了给公众和用户一个确定性的预报结果,目前是对各个预报成员简单地用算术平均得到预报结果,也可根据各成员过去的预报能力和表现,采用不同的权重进行加权平均得到预报结果.这在某种程度上是解决作为混沌现象的气候变化的一个很好的途径.

致谢 感谢杜祥琬院士的建议.

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996
- [2] 丁一汇,张锦,徐影等.气候系统的演变及其预测,北京:气象出版社,2003.137 [Ding Y H, Zhang J, Xu Y *et al.* Evolution of the Climate System and Its Prediction. Beijing: Meteorological Press, 2003. 137 (in Chinese)]
- [3] IPCC. Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 339
- [4] Houghton J. Global Warming. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 351
- [5] IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 572
- [6] 丁一汇,王遵亲,宋亚芳等.气象学报,2008,66:808 [Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F *et al.* Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66: 808 (in Chinese)]
- [7] Ding Q H, Wang B. J. Climate, 2005, 18: 3483
- [8] Stocker H. Taschenbuch der Physik. Verlag Harri Deutsch 2002 (中文译本:Stocker H 著,吴锡真,李祝霞,陈师平译.物理手册.北京:北京大学出版社,2004.1040)
- [9] Lorenz E N. The Essence of Chaos. Seattle: University of Washington Press, 1993, 217 (中文译本:Lorenz E N 著,刘式达,刘式适,严中伟译.混沌的本质.北京:气象出版社,1997)
- [10] Houghton J. The Physics of Atmosphere. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 320