

# 大气科学的热点问题

钱维宏 林 祥

随着社会的发展和科学的进步,人类对于地球大气的认识在不断深入,关注在不断增加,但未知领域和迷惑依旧存在。这里,我们将针对当前大气科学领域的几个热点问题展开讨论,希望了解大气科学的现状和未来,促进大气科学的健康发展。

## 一、全球温度变化的新认识

大气的变化包含很多的周期,比如日周期、年周期,每个周期都对应着自己的规则波动,这些波动反映的是大气中的一些自然现象,比如白天温暖黑夜凉爽的气温<sup>①</sup>日变化和夏季炎热多雨冬季寒冷干燥的气候年(四季)变化,显然这些变化是规则的波动。一般来说,这种规则的波动通常代表自然变率,因为其背后对应的是规则的物理机制,比如太阳辐射的日变化和年变化。我们常说的异常变化,指的是叠加在规则波动上的不规则波动,背后对应的可能是非正常的扰动或强迫,比如太阳强度的异常波动、火山活动对太阳辐射的影响或人类活动的影响等。

目前主流的观点认为,人类活动造成了全球增暖,并且增暖趋势还将继续持续下去。理论依据主要是广为人知的温室效应,核心是强调人类碳排放的影响,相对忽视了区分自然变率和人类活动的不同。然而温室效应仅仅是大气中无数物理过程的一员,过分强调温室效应可能导致研究结论就是该效应的变体而不是事实真相的全部。因此,笔者在此将结合自己的研究,介绍一些全球温度变化研究中的新认识。这些认识未必是广为人知的,但却是最新的,是尊重事实的。

### 1. 百年温度变化

人们把年与年之间的气温变化称为年际气温变化,它是不规则的。相邻两个十年之间的气温变化称为十年际气温变化,几十年间的气温变化称为年代际气温变化。这些气温变化是不同时间尺度规则变化上的不规则气温波动。十年的气温波动中包含了5年增暖和5年降温,这种现象在中心彩插第2页第2图所示的1975年至1998年全球平均温度上升过程中有较为明显的波动表现,这种上升趋势中的周期性波动有可能与气候自然变率,或者说地球

自身的因素有关<sup>②</sup>。更长时间尺度波动则包含多个十年际波动。有观测以来的150年中,全球气温变化表现有年际、十年际和年代际的三个时间尺度波动。

从月分辨率资料<sup>③</sup>描述的年际气温变化,它的变幅比用年资料描述的几十年气温变化大。前者,在2~3年内气温变化了0.6℃。对后者,在20~30年中气温变化了0.5℃。历史上,年与年之间气温变化幅度为0.6℃的现象很多,并没有引起争论,是海洋与大气耦合的结果。对20世纪60~70年代的全球平均气温偏低和近20~30年全球平均气温偏高,人们感到不安。一百年中,能够见到这样几十年的气温波动没有多少次。全球平均的温度中有10年、20年和60年左右的变化波动。

气温变化接近或即将退出一个平台时会出现更短时间的温度涨落,或小尺度的波动。这种小尺度的涨落可能是进入平台和退出平台的前期信号。2008年以来北半球不断发生的大范围寒冷、雨雪、冰冻天气过程也可能是全球平均气温要退出前期暖平台和进入新阶段的前兆。自然界中,人们可以列举很多这样的例子。北京地处北半球温带地区。太阳辐射最强的时间在6月22日,但最高的北京气候温度在7月底,比太阳最强辐射的时间滞后39天。最低气候温度出现在1月19日,比太阳辐射最少时间晚了27天。这个时差反应了大气和海洋对太阳加热响应的迟缓特性,也反映了大气的辐射平衡过程。围绕北京气温的季节循环常常出现天气波动引起的气温变化。冬季的明显降温是受寒潮影响。夏季的升温受到热浪的影响。寒潮和热浪,相邻1~2日的温差可以达到8~10℃。在夏季季节气候暖平台出现之前,逐日气温表现为波动式上升。在快要进入暖平台的时候会出现一次明显的天气尺度升温。反过来说,一次暖的天气尺度扰动后,气温就进入了气候暖平台时期。

气温变化的暖平台或波动是属于自然变率,还是一个气候极端事件,只有通过多次类似暖平台或波动的分析才可以得到认识。一个观测站的长期气温变化有波动,全球平均的气温变化也存在波动。由于气温存在多时间尺度的波动,各个时段的增暖

趋势和降温趋势就不一样。全球真实的温度序列应该只有一条，但不同的研究者有不同的全球温度序列，美国和英国长期合作的2个气候学家就先后有4~5条不同的全球温度序列。这里用最权威的联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)2007年气候变化评估报告使用的全球平均气温来描述这些变化。1850~2008年、1911~2008年和1976~2008年三个时段，增温趋势分别是每百年0.44℃、0.73℃和1.75℃。如果保持最近33年的全球增暖速率(1976~2008年这一时段的增暖趋势1.75℃/百年)不变，21世纪末的气温距平值是2.03℃。从气温上升趋势过渡到气温下降趋势，中间会出现一个高温平台。从气温下降趋势过渡到气温上升趋势，中间会出现一个冷的低谷。过去的159年中，全球气温经历了3次年代尺度的暖平台和3次年代尺度的冷低谷。由相邻暖平台和冷低谷可以给出气温变化的阶段性趋势。最近33年的增暖趋势与1911~1944年的增暖趋势相当。1878~1911年经历了全球降温的趋势。从1944年到1975年全球平均气温维持了一个相对低温时段，没有明显的趋势变化。1998年是过去百年来气温最高的一年，2002~2005年全球平均气温位于次高，但从2006~2008年气温在持续下降。由此可见，1998~2008年已经形成了一个十年尺度的气温平台。这个气温平台类似于20世纪40年代的十年尺度的暖平台。

全球平均温度变化中，交替出现的暖平台和冷低谷是客观存在的自然变化。两个相邻暖平台出现的时间间隔大约是60~70年，从暖平台过渡到冷低谷的时间大约为30多年。21世纪之交过后会自然地出现一个冷低谷。暖平台和冷低谷是叠加在更长周期性温度变化上的现象。虽然我们暂时还未明了其背后的物理机制，但多次有规律出现的暖平台和冷低谷反映了自然变率的表现这点应该是可以认定的。

仍然以1850年以来的全球平均气温作为例说明问题(图1)。当剔除过去159年来的长期趋势后，就可得到全球温度变化的偏差部分。受气温资料长度的局限，我们只能得到少数几个周期性变化的波动(图2)。其中有21.2年和64.1年两个时间尺度的周期波动。这两个周期性分量的叠加就能较好地模拟出三次暖平台和两次冷低谷。周期性分量反映的是自然变化。在第一个暖平台之前，两个周期性

分量的增暖部分，叠加上每百年0.44℃的趋势，就得到一个明显的增暖趋势。在第二个暖平台之前，两个周期性增暖，叠加上每百年0.44℃的趋势和百年尺度波动，就得到一个更明显的增暖趋势。第三个暖平台也是增暖趋势和周期性增暖分量叠加的结果。可见，159年来的全球平均温度曲线中，除了21.2年和64.1年两个尺度周期性分量外，还应该有百年和几百年尺度的周期性变化分量。

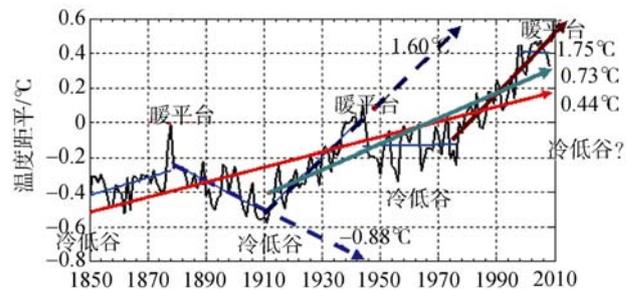


图1 1850~2008年逐年全球平均气温和各个时段的气温趋势。1850~2008年、1911~2008年和1976~2008年三个时段的每百年增温趋势分别是0.44、0.73和1.75℃

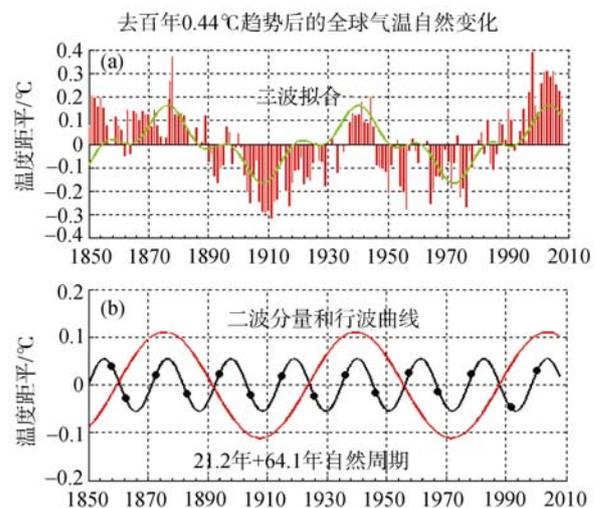


图2 (a) 剔除长期变化趋势后的逐年气温变化(柱状线)及其两个自然周期性波动分量叠加的模拟(曲线)(b)两个周期性波动分量随时间的变化,带点黑线和不带点线分别为21.2年和64.1年周期性波动分量

这种周期性分解,只是说明全球平均气温变化中的暖平台和冷低谷是一些自然温度变化波动的叠加。这种周期性分量,过去有,将来还会出现。这是未来气候预测中必须考虑和必须利用的预报信息。

## 2. 千年温度变化

一百多年的全球平均温度资料中,只可以分析

得到几十年的周期性波动分量。要分析出百年的周期性波动分量,就需要千年以上长度的温度资料。美国气候学家曼(Mann)在2008年给出了一条形似“湿面条”走势的全球平均温度序列(图3a)。这条序列有1500年长随时间变化歪歪扭扭,像一根湿面条。这根湿面条气温中有几个走势和台阶。公元1100年前,温度站在一个高的台阶。公元1100年之后,平均温度下降了 $0.18^{\circ}\text{C}$ ,走下到第二个台阶。公元1450年附近,温度又下降 $0.20^{\circ}\text{C}$ ,再下到第三个台阶。公元1850年开始,温度以每百年 $0.44^{\circ}\text{C}$ 的趋势持续爬升。相对这之前的三个下降台阶,1850年以来开始了全球增暖期,这个与人类工业化几乎同步开始的增暖趋势其增幅之强,增速之快,使得近千年来的全球平均温度曲线整体看上去更像曼在1998~1999年发表的“曲棍球杆(Hockey Stick)”温度序列(曲线)。

尽管曼的“曲棍球杆”温度序列可能是当今全球最为人知或者引用最多的一条曲线,但其受到的质疑和非议大概也是全球最多的。质疑之一是来自曼的序列的原始信息来源。由于早期没有温度计和气温的观测资料,当今古气候学界的研究方法基本都是采用各种气候代用数据,通过科学途径提取留存在自然(树木年轮、冰芯等)或者人为(史料记载)记录中的气候信息,以此恢复历史上的气温变化。这种恢复通常都很讲究科学原理(如树木年轮记录气候信息的原理是基于植物生长对于温度变化的响应)和严谨的技术手段(如恢复树木年轮中气温信号时需要先去除树木一生中的自然生长趋势)。但毫无疑问这样的恢复是有局限的,再好的恢复也不是真实的观测,而是对于真实气候的近似。故而几乎所有的古气候研究者都会讨论利用代用资料过程中可能存在的不确定性。曼的序列虽然经过复杂的计算和变换,但数据源依然来自分布于全球的有限树木年轮和冰芯等代用记录,因此也逃不过受到质疑的宿命。另一部分质疑来自于古气候学界内部,争议的是曼的部分结论和数据处理过程。事实上,古气候学界存在不少类似的千年气温序列,并且多数都表现出近一百多年来全球的持续增暖,而曼的曲线最受关注的原因在于这条序列削弱了“中世纪暖期”<sup>④</sup>时温度上升的幅度,使得近百年的增暖在近两千年内显得更加突兀,这种工业化前后温度变化迥然不同的戏剧化效果转化为人类影响导

致全球增暖论的关键证据之一。可想而知的,曼的序列遭受了很多依然坚信中世纪暖期温度增幅较大的专家学者的非议,这些争议更加专业和技术,涉及具体的数据质量和数学方法等。事实上,曼也曾经针对专业的科学意见对自己的序列做出过修正和更新。

那么应该如何看待曼的曲线呢?在现有条件下,气候代用资料是最现实的古气候记录,其中包含了过去全球气温变化的很多信息。除了关注全球增暖的趋势外,气候学者,尤其是来自于经典气象学领域的气候动力学者,更为关注整体趋势之外的波动,因为这种波动更加可能是气候的自然变率(气候动力学的研究对象),而非人类影响(显然工业化以前的温度波动和人类无关)。

让我们再以气候动力学者的专业眼光来看曼的曲线。1850年前的三个温度台阶应该属于自然变化,它从中世纪暖期过渡到了小冰期。从三个温度台阶长度看,1850年前后也应该到了一个温度变化的边缘。温度从1850年开始要么再出现一个新的冷台阶,要么出现暖台阶。但实际上它没有出现冷、暖台阶,而是出现了增暖的长期趋势。这个与人类工业化同步的增暖趋势原因,目前主流观点认为是人类活动影响的结果,但也存在不少争议。剔除这些台阶和趋势,温度的十年尺度偏差变化达 $0.4\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 。本世纪之交就有这样的温差变幅,它在工业化时期前也有这样的变幅。可见,最近的 $0.56^{\circ}\text{C}$ 温度增暖仍然属于自然变化。工业化之前,最高的温度出现在10世纪,最低的温度出现在公元1700年附近,温差变幅 $0.86^{\circ}\text{C}$ 。20世纪的百年,温度变幅是 $1^{\circ}\text{C}$ 。

“湿面条”走势的温度变化中,到底有哪些规律性?我们取公元1000年以来的逐年温度序列做层层解剖(图3b)。气温的第一层解剖为三个时期:中世纪暖期、小冰期和全球增暖期。从中世纪暖期到小冰期,全球平均温度下降了 $0.24^{\circ}\text{C}$ ,1850年以来增暖的趋势是每百年 $0.44^{\circ}\text{C}$ 。剔除三个时期的基本温度,余留的气温变化中,工业化时期与工业化前并没有明显的不同,反映的是自然变化。在千年来的变化中,气温变幅最大的是在20世纪初到本世纪之交,变幅 $0.56^{\circ}\text{C}$ 。这个变幅加上20世纪百年增暖 $0.44^{\circ}\text{C}$ ,它们的和是 $1^{\circ}\text{C}$ 。考虑工业化前气温变化的几个台阶,工业化以来的百年增暖 $0.44^{\circ}\text{C}$ 中可

能包含有人类活动和自然变化的两种成分。城市化发展会对近百年来观测的气温变化也有贡献。

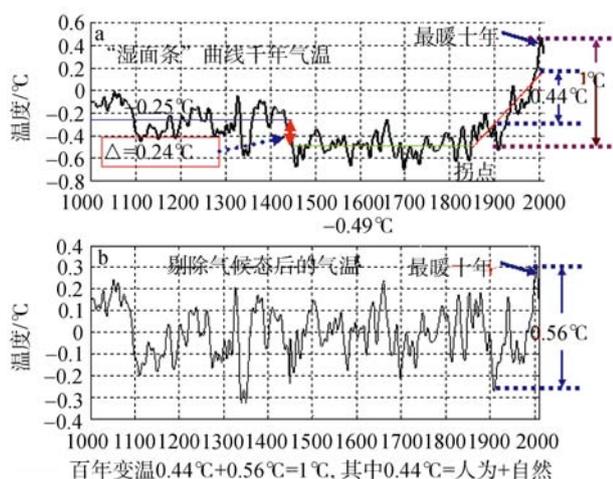


图3 千年温度变化的分解和不同时段偏差气温

在解剖了第一层次的气温变化后，余留的气温序列中仍然含有多个时间层次的变化。在千年气温变化中，工业化前后都存在十年尺度的波动。这些时冷时热的波动是自然变化。经过层层解剖(图4)，气温变化中还有21.1年、62.5年、116年和194.6等4个层次的周期性变化。21年周期的气温变化，相当于有十年暖和十年冷的重复出现。62.5年周期的气温变化有30年的暖和30年的冷，它们在交替出现，好似“三十年河东，三十年河西”，“风水轮流转”的意思。气温的116年周期，变化幅度接近 $0.1^{\circ}\text{C}$ ，194.6年的周期变幅超过了 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。这4个周期的幅度、频率和变化的最初相位都不同。在一些时间点上它们可能相互抵消，而在另外的时间点上它们可能发生同相位(或反相位)的叠加，形成异常气候。不同尺度波动的叠加会相互抵消，使单一的规律被暂时打乱。当人们相信“风水轮流转”的时候，气候的规律被这些叠加掩盖了。但当人们不相信“风水轮流转”的时候，它又出现了。自然就是这样，不断与人们捉迷藏。在一个时段检测不到某一周期变化，并不意味着那个周期就消失了。

考察过去千年的这4个周期波动发现，它们依次在2002年、1998年、1994年和1998年分别达到了最近一次暖的温度峰值，其中1998年出现了两个周期变化的正相位相遇。所有4个周期变化能在1994~2002年不到十年内，增温同期相遇是过去千年来的一回，是“千年等一回”的事件。如果

过去的千年气温资料可靠，那么未来的千年中也不会出现4个气温波动的波峰同期相遇的现象。这种多周期波动在千年中的唯一一次共相遇是奇妙的缘分。

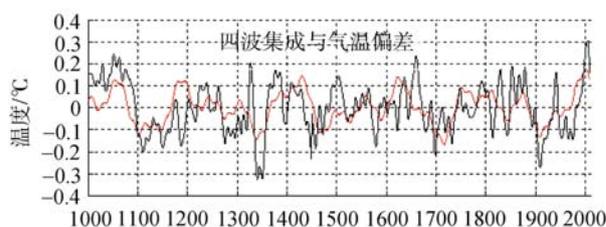


图4 千年温度变化中的四波叠加后的曲线(细线)与气温偏差曲线(黑线)的比较

1998年以来的温度下降反映的正是这4个气温波动在近年来的同步下降。这种多尺度同步下降就形成了一个与增暖趋势不同的温度平台。既然是气温平台，说明这些年的气温是高的，近年内也不会马上降温到最低。用四个气温变化的波动叠加可以较好地模拟出发生在20世纪初和20世纪70年代的冷期，以及20世纪40年代和21世纪初的暖期。最近十年的这个暖平台是过去百年未见的，也是过去千年没有的。“欲穷千里目，更上一层楼。”只有千年气温资料，才能构造出这样的气温“楼阁”。

### 3. 资料方法及其不确定性

需要指出的是，美国气候学家曼等人在2008年发表的1500年温度序列，其原始信息来源是不同的。近一个半世纪中，有观测的温度信息，但在这之前，温度信息主要来自代用资料。代用温度资料的区域代表性和反映的环境意义都存在一定的局限。代用温度资料的规范性和从代用资料到观测资料之间的连续性都有很多值得探讨的话题。使用代用资料分析古气候变化成为“不得不”采取的手段，也是“没有办法的办法”。因此，长期代用气候资料的分析结果和不确定性，只能依赖于资料的可靠性。

给长期气温进行解剖涉及方法的问题。不同的解剖方法得到的分解结果，会形成对过去气温变化的不同理解，也会对未来的气温预测产生影响。分解出气温变化中的自然波动也是为找强迫归因的需要。20年的自然波动和60~70年的自然波动已经被很多人所认识。但对百年尺度的气温自然波动，不同的研究者使用了不同的方法。对长期变化，有些研究直接用多项式拟合。这样的多项式拟合就会出现“翘尾巴”的近百年增暖现象。

#### 4. 气候变化的归因

##### 太阳辐射

众所周知，太阳活动有 11 年左右的周期变化，也称为“太阳黑子活动”周期。太阳也会发生高速旋转和对流运动。这些运动会形成类似大气中的涡旋。太阳在有涡旋的地方会发生更强烈的热核反应，产生巨大的能量和强烈的辐射，这就是太阳黑子活动。太阳内部也有不同的圈层，并有相对运动，形成 22 年左右的周期变化。这种 22 年的太阳内部周期性运动也会反映到太阳的辐射变化中来，并影响地球上接受到的太阳辐射。太阳活动还有百年和更长时间的周期变化。这些长周期变化是太阳内部不同圈层相互作用的反映。

人们的研究发现，11 年周期性变化波动在太阳辐射和地球气温中都有反映。在这一周期上，太阳辐射的变化比全球气温变化早一年多。在 22 年波动上，太阳辐射变化比地球气温变化早 2 年左右。太阳辐射和全球温度还有百年尺度的波动。在百年尺度的波动上，太阳辐射量的变化也是超前全球平均温度变化的。由此可见，在年代到百年时间尺度的波动上，全球平均气温的变化是太阳辐射变化驱动的。

德国天文学家斯庞尔（1822~1895）发现，尽管人类对太阳的研究很早就开始了，但在 1400~1520 年期间有关这方面的研究记录却出奇的少。这段时期后来被称为斯庞尔极小期。斯庞尔极小期又恰恰是地球上的小冰期。波罗的海在 1422~1423 年被完全冻结。蒙德发现的太阳黑子活动极小期是在 1645~1715 年期间。这样的 70 年中，人们观测到的太阳黑子数量还没有现在平均一年里看到的。在此期间，斯堪的纳维亚半岛上的居民连极光都很少看到，以至于偶尔一次的极光竟被当地人视为凶兆。达尔顿极小期的时间大致在 1795~1820 年之间。这期间地球转为寒冷性气候，其中的 1813 年欧洲感觉不到了夏天。实际上，这三次太阳活动极小期都发生在小冰期中，也是小冰期中的三个冷的时段。太阳活动的三个极小期和小冰期中的三个冷时段反映的正是百年尺度的太阳辐射外强迫与气候变化的因果关系。

##### 海洋影响大气

海洋具有比大气大得多的热容。海洋面积是陆地面积的双倍，太阳辐射可以到达海面以下。海洋

接受到的太阳辐射，然后又可以作用于大气。在全球平均海温分布中，赤道东太平洋海温是同纬度比较低的。但在赤道东太平洋，海温年际变幅是最大的。这里是发生厄尔尼诺海温异常事件的地方。因此，赤道东太平洋的海温变化受到人们的广泛关注。在赤道东太平洋海温变化与全球月平均气温变化中（图 5），海温的变化超前全球气温变化 3~5 个月。过去的 60 年中，主要的几次厄尔尼诺海洋增暖事件后，全球平均气温也会有一次升高。这反映了热带海洋能量释放会影响到全球大气。

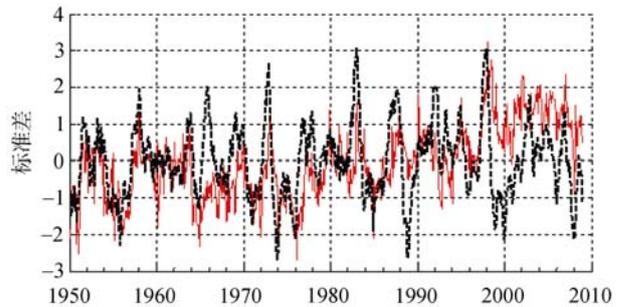


图 5 赤道东太平洋月海温变化（虚线）与全球平均月气温变化（实线）

北大西洋海温和北太平洋海温都有 60 年左右的周期性波动。有研究认为，这一周期性波动是全球尺度的海洋与全球大气相互作用的结果。因此，海温和全球平均气温中应该有基本相同的变化周期。这个周期确实是存在的。海温在这一时间尺度上的变化也是超前气温变化的。

在全球气温的自然变化中，准 60 年的周期变化是主要的。既然气温与海温的变化有关，又滞后海温的变化，那问题已经转移到了海温变化为什么会这个周期性的波动。太阳活动也有一个 43 年左右的变化周期，但不是很稳定。作为一个系统的三个部分，海洋-大气-固体地球，它们之间有没有一个相互作用的关系是有待研究的。

##### 人类活动

工业化以来，人类活动排放到底对全球增暖具有怎样的贡献？这不仅仅是当前科学界激烈争论的焦点，也是关系到国际社会将采取什么行动的问题。20 世纪，美国是世界上化石燃烧排放第一大国。美国化石燃烧排放具有长期趋势，也有年际和年代际变化。长期以来，化石燃料的燃烧驱动了发达国家的经济高速发展，形成了发达国家排放的长期增加趋势。此外，发达国家与发展中国家人们的生活条

件最大的不同是，前者出门有汽车，回家有空调。对北半球发达国家，排放最多的季节是冬季的取暖。在 1981~2002 年冬季美国气温和美国冬季化石燃烧排放量数据去除趋势部分的偏差序列中，逐年冬季美国气温和冬季化石燃烧排放量之间存在相反的变化关系（图 6）。2000 年和 1981 年是美国这 22 年中冬季气温最低的两年，对应的美国冬季化石燃烧排放量也是最多的两年。1982、1986、1991、1997 和 2001 年是美国冬季气温偏高的 5 年，也是美国冬季化石燃烧排放相对低的年份。这个关系是确定的，就是美国冬季气温高与低决定了美国化石燃烧的少与多。排放多是因为气温低，人们增加了化石燃烧量以提高生活所需的温度。从这个关系看，是自然的气温变化引起了人类活动的排放量变化，而不是人类活动排放改变了自然的气温变化。

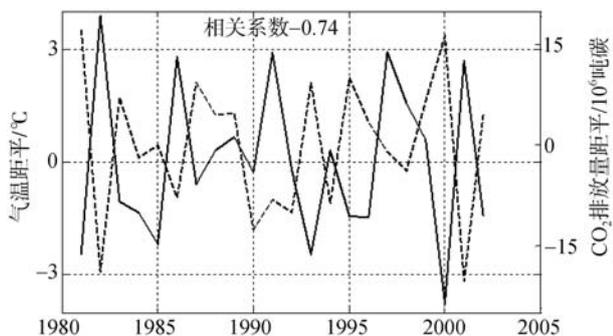


图 6 1981~2002 年去长期趋势后的美国冬季气温距平（实线）和去长期趋势后的美国冬季化石燃烧排放量距平（虚线）

从 1850 年到 1918 年前后，英国、美国、法国和德国的化石燃烧排放量都是增加的。20 世纪 20 年代是四国碳排放量总和的第一个峰值期，而这时正经历着 20 世纪的第一个气温冷低谷时期。20 世纪 30 年代，这四国的总排放量经历了低值期，而全球平均气温在 40 年代出现了一个暖平台。20 世纪 60 年代至 70 年代，四国排放量经历了第二次的显著增加并在 70 年代末期达到峰值，而同期全球气温出现了持续的下降。1980 年至 2006 年的排放量，先经历了一次小低谷，然后缓慢增加，主要来自美国的贡献，其他三国持平或有减少的趋势，然而对应的这段时间是有记录以来全球气温最暖的时期。

为了更形象地比较气温变化与排放之间的关系，结果只需先剔除西方四国碳排放总量序列中的长期趋势，也剔除全球气温序列中的长期趋势，最后比较两者的偏差序列。在年代际时间尺度上，全

球气温与西方主要发达国家碳排放总量之间有完全相反的变化关系，碳排放量增加对应的是全球气温降低，反之碳排放量减少对应的是全球气温升高。1910 年前后的全球低温期，碳排放量达到了峰值，而 1940 年前后的暖期对应的是 20 世纪 30 年代和 40 年代四国排放量的低谷期；70 年代的气温低谷，恰恰是四国排放的高峰。世纪之交十年的气温暖平台，又恰恰是四国排放量的下降期。

在这一时间尺度上，碳排放量多对应的是全球气温偏低，反之碳排放量少对应的是全球气温偏高。它们之间的相关系数为  $-0.40$ ，这说明，年代温度低，需要的燃烧排放量多，气温的冷暖变化是人类活动碳排放增减的诱因。

本节所介绍的内容与人类活动导致全球增暖的主流观点有所不同。当前仅有的一个半世纪时间长度的温度观测和碳排放量数据，只能从年与年的变化上和年代与年代的变化上得到分析的关系，即自然的温度变化是人类活动碳排放量变化的诱因。全球温度变化除了年际和年代际的时间变化外，还存在百年尺度的变化，后者可以用太阳辐射的百年尺度变化解释。但近一个半世纪的全球温度长期上升与人类仅有的近一个半世纪长度的碳排放量长期增加同步，这就难以说清其间的因果关系了。150 年前人类活动碳排放量没有数据，二氧化碳浓度变化也不大，但全球温度的百年变化是存在的。如果我们不相信 150 年前二氧化碳浓度与温度变化的历史，则只能等待百年后的实况了。

#### 全球温度变化预测

根据理论，我们能够预测的气候是那些规则性外强迫的部分。如果这样的强迫是周期性的，或系统内部的振荡是周期性的，这样的周期性一定存在于过去的变化中。分析过去气候变化中的周期性是预测未来的有效方法之一。国际上有一些大气和海洋科学家分析发现气候变化具有准 70 年的周期振荡。这样的准 70 年周期振荡也存在于 20 世纪的气温变化中。因此我们在 2002 年认为：“气候变化等于长期趋势加短期振荡”。长期趋势是过去一个半世纪的线性拟合。用这个百年气温趋势叠加上 70 年的气温振荡称为“一波叠加预测模型”。

用过去一百多年观测的全球温度减去长期趋势后，得到了 70 年左右的温度振荡。1870 年前后的暖平台到 1940 年前后的暖平台是 70 年。1940 年后

的再一个暖平台就应该出现在本世纪之交。“一波叠加预测模型”是我们在 2002 年做出的,结果显示从 1998 年开始到 21 世纪 40 年代全球平均温度达到一个低谷,21 世纪 70 年代再次达到暖的平台。这样的温度振荡叠加上长期增暖的百年趋势,预估的 21 世纪 40 年代温度在  $0.1^{\circ}\text{C}$  上下。实际情况是,从 1975 年开始,全球平均温度是上升的。1998 年气温达到一个峰值,此后全球平均温度进入到了一个暖的平台,没有再继续上升。按照当时的预估,1998 年以来的十多年预测是基本兑现了的。

过去温度变化中的周期性波动反映的是自然变率,在未来的气候变化中这些自然波动还会存在。这里给出对过去 159 年气温序列及其不同周期性波动的模拟和对未来到 2100 年的气温预测。用两个周期性波动时间序列和长期趋势的叠加结果较好地模拟了过去 159 年的温度变化。在对未来的预测中,全球平均气温从最近的暖平台开始阶段性下降,到 2035 年走进一个低谷,平均温度为  $0.13^{\circ}\text{C}$ ,之后温度又开始逐步上升,到 2068 年达到一个  $0.60^{\circ}\text{C}$  的暖平台。21 世纪的温度预测是两个自然波动(独立的 21.2 年和 64.1 年周期)与长期趋势(每百年增暖  $0.44^{\circ}\text{C}$ )叠加的结果。我们可以简单地称为“二波叠加预测模型”。

在以上的“二波叠加预测模型”基础上,还可以叠加百年以上周期性波动。把 159 年的周期波动叠加到二波模型上,拟合过去历史温度和预测未来温度变化的方法称为“三波叠加预测模型”。三波更能拟合出 19 世纪 70 年代和最近的十年暖平台,也较好地拟合出了 1910 年前后和 1970 年前后的冷低谷。三波(独立的 21.2 年+64.1 年+159 年周期)与长期线性趋势的叠加预测,全球平均气温从最近的暖平台开始阶段性下降,在 2035 年达到一个低谷,平均温度在  $0.22^{\circ}\text{C}$ ,之后温度又开始逐步上升,在 2068 年达到一个  $0.58^{\circ}\text{C}$  的暖平台。

那么,二波和三波叠加预测模型意味着什么?二波叠加相当于在全球大气中考虑了两个已知的 21.2 年和 64.1 年周期波动与一个百年以上趋势的叠加。三波叠加相当于在全球大气中考虑了三个已知的 21.2 年、64.1 年和 159 年周期波动与一个百年以上趋势的叠加。在这些预报模型中普遍存在的是 64.1 年的周期波动和一个百年以上的趋势。64.1 年的周期波动是所有波动中最主要的。百年趋势可能

是百年以上波动的一个上升支部分。这个长期趋势是属于自然的变化,还是人类活动的影响需要有更长的气温资料来确定。大气是一种流体,包含有时间尺度从几天到几十年和上百年的波,也有几十千米到上百千米和上千千米的波。气温的波动是大气中质量分布波动的反映。用多个独立波动叠加的思路去分析过去的气候变化和预测未来的气候变化是合理的。

另外,这些预测是在仅仅用不同的波动函数组合下线性外推累加的结果,并没有考虑气候系统中可能出现的非线性相互作用。非线性相互作用的可能变幅在  $0.2^{\circ}\text{C}$  左右。于是,21 世纪的温度变化可能会在气候变化的高温期出现  $0.8^{\circ}\text{C}$  的高温年份和  $0^{\circ}\text{C}$  左右的低温年份。

IPCC 第四次(2007 年)评估报告的多模式集合预测 2090~2099 年相对 1980~1999 年的全球平均气温增加在  $1.8\sim 4.0^{\circ}\text{C}$  之间。全球平均温度增暖  $2^{\circ}\text{C}$  的阈值已成为当前国际谈判的焦点。如果认为 1911~2008 年的每百年增暖  $0.73^{\circ}\text{C}$  和 1976~2008 年每百年增暖  $1.70^{\circ}\text{C}$  是人类活动碳排放量增加的结果,则 21 世纪末全球平均气温达到和超过  $2^{\circ}\text{C}$  就是理所当然的。在这里,过去千万年来长期存在的多时间尺度周期性全球气温变化都在未来的世纪中消失了。相信哪种预测结果并不在等待未来,而是看看历史。

## 二、大气中的极端事件

### 统计角度看极端事件

极端事件是统计意义上的小概率事件,通常对应于概率分布的两端。比如将某地多年的日温度拟合出一个统计的概率分布,自然就可以确定一个阈值,所有的日温度中只有 5% 的温度值大于该阈值,如此我们可以以此阈值为标准,以后当有温度记录大于该标准时,就认为是一次极端高温日。类似的,我们也可以得到极端低温日的标准,只不过这一次不是在概率分布的右端附近,而是在其左端附近去确定这个阈值。连续几天的极端高温日就构成了一次极端高温热浪事件。同样,连续几天的极端低温日就构成了一次极端低温冷害事件。

既然极端事件是所有事件中落在概率分布两端的那一部分,显然概率分布的变化也会引起极端事件的增减。随着全球平均温度的多尺度变化,平均温度的升高和降低往往伴随着整个分布型的变化。

概率分布型伴随着均值整体右移，无论是分布型形态变化与否（主要看新旧分布的离差值），都会有更多的热事件和创纪录热事件，相应的冷事件会减少。

#### 从大气运动角度看极端事件

从大气运动的角度来看，极端天气和气候事件往往对应于持续异常的大气环流形势（如阻塞型环流形势的出现和维持），而大气环流的异常则可能对应于各种各样外强迫信号的复杂作用，比如海温异常、大陆上冰盖的变化等。

阻塞型环流的出现和维持，是我国气象灾害发生的重要原因之一。以 1991 年夏季我国江淮流域洪涝期间的环流形势为例，就对应于典型的阻塞形势，高纬地区的截断低压与阻塞高压和副热带高压堪称势均力敌，加上高原影响，这种四足稳固的对峙形势维持了相当长时间，造成冷干气流从高原北侧和暖湿气流从高原南侧不断地汇聚到江淮流域，在两个月间有三次较大规模降水，造成罕见洪灾。由此可见，洪涝灾害的直接原因是持续多次降水过程，深层原因是造成降水过程的环流形势的出现和维持，而更深层次的原因可能来自于高纬度环流系统和低中纬高压系统的势均力敌，以及高原的阻挡扰流和热力作用。

### 三、气候中的自然变率：厄尔尼诺

#### 从厄尔尼诺到 ENSO 循环

在秘鲁沿岸，那里常年是由南向北流动的冷水洋流。但早在 19 世纪 90 年代，南美洲太平洋沿岸的人们注意到了与平常不同的洋流。这种在圣诞节期间发生的异常暖洋流现象，当地人称为厄尔尼诺（El Niño），是“圣婴”（the Child Jesus）的意思，意味着给当地带来了温暖的海浴场所。

直到 1957 年，由于观测资料的缺少，人们还认为厄尔尼诺是发生在南美沿岸的一种区域海温异常现象。1957 年是国际地球物理年，有 60 多个国家参与了对地球的观测，恰好这年也发生了厄尔尼诺事件。观测的结果让人们认识到厄尔尼诺增暖不仅仅限制在南美沿岸，而是一个跨越热带太平洋的海温异常现象。今天厄尔尼诺的定义是赤道附近东太平洋表层海水温度的异常增暖现象。与厄尔尼诺恰好相反的是拉尼娜（La Niña），拉尼娜指的是赤道太平洋东部和中部海面温度持续异常偏冷的现象。

除了赤道海洋温度变化现象外，气象学家发现了热带大气中的异常现象。Walker 在 1923 年和 1924

年发现了南方涛动（SO），是一个东西半球之间的海平面气压场的翘翘板（seesaw）现象。今天南方涛动被定义为东南太平洋和印度洋及印尼地区之间气压反相振动的现象，即东南太平洋气压偏高时印度洋及印尼地区气压偏低，反之亦然。由于该现象发生的位置大多位于南半球，所以称为南方涛动。

Bjerkness（1969）考虑，能够发生这样的气压异常涛动，必然有大气质量的大规模迁移。于是，他认识到沿赤道太平洋的海面温度梯度，会引起东西向大气环流的变化，即发生大气质量的大范围的转移。Bjerkness 把这个与南方涛动气压变化有联系的大气环流称为 Walker 环流（图 7）。Walker 环流在赤道西太平洋上升，当地海平面气压降低，高层气压升高，高层大气是西风，到赤道东太平洋地区高层气压降低，为下沉气流，对应当地海平面气压升高，低层大气是东风。在这个模型图中，Bjerkness 已经认识到厄尔尼诺是海洋和大气相互作用的产物，并提出了大尺度海气相互作用的正反馈过程，即西太平洋的海温正距平引起 Walker 环流增强，赤道表面东风增强，西太平洋的海温更高。作为一个耦合系统，正的和负的反馈都应该存在。但当时 Bjerkness 并没有阐述是什么导致了海温从一个海温正异常过渡到负异常的。Bjerkness 的精湛工作当时没有得到人们的广泛注意，直到 20 世纪 80 年代，科学家们才认识到厄尔尼诺和南方涛动是海气相互作用两个方面，即一个铜版的正反两面。于是，人们有理由把厄尔尼诺和南方涛动称为 ENSO 了。

今天，科学家们对于 ENSO 循环的冷暖位相有了更形象的认识，在暖事件（厄尔尼诺）时，赤道中东太平洋海面海温偏高，气压偏低，大气在此上升，并分别向西和向东运动，异常的环流分别在西太平洋和加勒比海附近下沉。在冷事件（拉尼娜）时，赤道西太平洋海面海温偏高，气压偏低，东太平洋反之，异常气流在西太平洋上升，在东太平洋下沉。ENSO 循环目前被认为是地球热带海洋和大气运动中年代际变化最突出、最重要的一个现象。

早期，海洋学与气象学的学科研究是独立的。对厄尔尼诺这样的海洋事件，气象学家认为是海洋异常的结果，海洋学家认为是大气异常作用的结果，天文学家则认为是天文因素的结果。通过一直以来科学家们的努力，现在看来，ENSO 循环，即赤道中东太平洋海面海温正与负位相的转换，以及与此对应

的南方涛动正与负位相的转换，可能是整个地球系统多圈层相互作用的结果。从南美沿海的海流异常现象到大尺度的海气相互作用过程，这一过程充分反映了人类认识自然的复杂曲折和科学领域的拓展和融合。

### ENSO 的影响

ENSO 事件正越来越受到社会公众的关注，因为它对全球气候具有重要的影响。受直接影响的区域主要在赤道东太平洋及其沿岸国家。赤道东太平洋的秘鲁沿岸，正常的气候下那里降水稀少，为沙漠性气候。但在厄尔尼诺事件发生的时候，那里降水增多，沙漠上的花草繁盛。这是明显的气候和景观的反常。

不仅如此，远在印度洋北岸的印度降水和稻谷产量也受厄尔尼诺事件和拉尼娜事件的影响。在去除掉随技术而稳步增加的趋势后，会发现稻谷产量存在年际变化。这种年际变化与印度雨量和厄尔尼诺及拉尼娜事件有关。厄尔尼诺年，印度降水少，稻谷产量低，拉尼娜年印度降水多，稻谷产量高，即印度年稻谷产量受到 ENSO 事件的影响。

赤道东太平洋的海温异常影响低纬度地区和环太平洋很多地区的气候，如降水的异常。对内陆，如欧亚大陆的内地，就没有热带海洋性地区的影响那样大。1987 年，Ropelewski 和 Halpert 给出了北半球夏季和北半球冬季对应厄尔尼诺暖水位相下，降水和温度异常的遥相关分布。厄尔尼诺事件的冬季，在赤道西太平洋形成马蹄形的干旱区，位置在

印度尼西亚附近，而在赤道中太平洋的日界线地区附近降水增多。东南非洲和赤道巴西降水减少。南亚-东南亚、我国东北-日本温度偏高，美国的西北部、加拿大的西南部及北美洲东部大西洋沿岸温度偏高。厄尔尼诺事件发生时，北半球夏季印度、东南亚和印度尼西亚气候干旱，澳大利亚冬季风干旱，而在赤道中太平洋的日界线附近和美国西部沿岸降水增加。美国西海岸在暖水期降水增加常常出现山体滑坡和泥石流。印度尼西亚和澳大利亚降水减少，干旱发展时曾使森林和草地发生大火。

冷水拉尼娜事件的冬季，形如马蹄形的偏多降水出现在赤道西太平洋，包括东南亚-印度尼西亚-澳大利亚北部，冷干气候出现在赤道中东太平洋。赤道巴西降水偏多。冷冬出现在西非、东北亚、北美西北部。冷湿气候出现在东南非洲。

拉尼娜位相下在北半球夏季，南亚降水偏多，印度、印度尼西亚和加勒比海冷湿。赤道中太平洋和南美东南部降水偏少。西南太平洋-澳大利亚东北部暖。值得注意的是，在一些情况下，厄尔尼诺气候异常分布的遥相关与拉尼娜的情形相反。但有时这些异常分布并不出现，反映了一个地区的气候变化受到多种因素的影响。

### ENSO 与自然变率

科学家们更关注 ENSO 的原因是因为它是地球气候系统中目前已经确定的少数气候自然变率信号之一，并且在气候的年际变化中具有重要影响。如前所述，这种自然变率主要是来自于大气-海洋的相

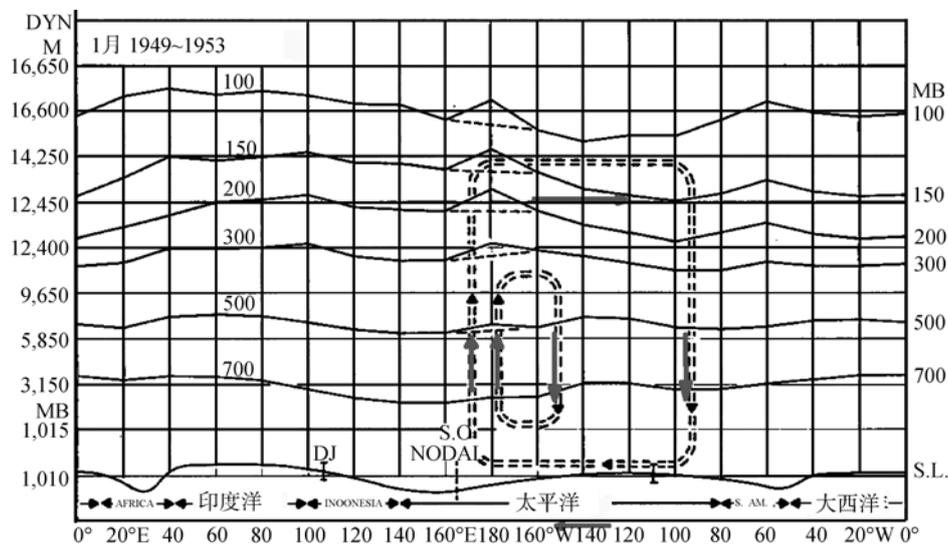


图 7 Walker 环流模型图

互作用，具有其内在的规律。值得注意的是，大气中与 ENSO 事件类似的自然变率现象还有一些，比如主要在北太平洋地区的太平洋年代际涛动（Pacific Decadal Oscillation）现象和主要位于极圈和高纬地区的北极涛动（Arctic Oscillation），它们对于全球气候也有着重要的影响。在当前人们更加关注全球增暖时，科学家们可能首先关注的是这些自然变率信号是否异常。

#### 四、预测大气

预测大气有很多方法，比如天气形势的经验推演、统计预测和数值模式预测等。其中数值模式的方法认为最客观，目前也最主流。

##### 蝴蝶效应与可预测性

人们很早就通过建立能够反映大气物理过程的数学模型来预测天气，在 20 世纪上半叶前，线性动力学理论主导科学领域时，科学家们对这种方法充满信心，认为只要不断改进模式，使其不断逼近真实的大气系统，同时不断提高观测水平，以期获得更高分辨率和精度的初始场，即可以获得天气预报的成功。然而无论在这些方面如何努力，最终总难以尽如人意，于是科学家们开始思考大气中的可预测性问题。

“蝴蝶效应”源自于著名气象学家洛伦兹的一个广为人知的提法“一只亚马逊河流域的蝴蝶，偶尔煽动几下翅膀，可以在两周以后引起美国得克萨斯州的一场龙卷风”，该提法形象地说明了初始条件十分微小的变化，经过不断放大，对未来状态会造成极其巨大的差别。根据洛伦兹自己的描述，为了预报天气，他用计算机求解仿真地球大气的 13 个方程式，意图利用计算机运算来提高长期天气预报的准确性。1963 年的一次试验中，为了更细致地考察结果，他把一个中间解 0.506 取出，提高精度到 0.506127 再回给计算机继续运算。而当他到咖啡馆喝了杯咖啡后回来再看时却大吃一惊：本来很小的差异，结果却偏离了十万八千里！再次验算发现计算机并没有出毛病。洛伦兹发现，由于尾数误差会以指数级增长，所以在这种情况下，一个微小的误差随着不断运算推移将会造成截然不同的后果。他于是认定其为“对初始值的极端不稳定性”，即“混沌”，又称“蝴蝶效应”。蝴蝶效应强调了事物结果对于初始条件的极端敏感性和非线性过程的放大作

用。由于微小的偏差难以避免，因此长期天气预报具有不确定性，不可能一直预报下去。

现在，专业上所谓的“可预报性”一般指天气预报在时效上的一种局限。对于不同的大气模式，因为条件（模式性能、初始观测、计算水平）差异肯定会存在可预报性的差异，但所有利用模式预测者都不能回避这一问题。

##### 集合预报

集合预报方法是对传统数值模型预报受限的探路，它把多个由少许不同初值计算得到的数值预报结果加以平均，得到集合的预报。其基本思想是，通过平均，减少各自决定论的预报误差，而服从大多数初值延伸的信息，从而使预报的均方根误差与各自预报的均方根误差相等或更小。目前世界上主要气象中心都在进行中期天气集合预报及延伸期预报。

自然界中的很多变化是遵循物理规则的，天气和气候变化中的波动也是一样。然而，计算机天气和气候模型中的大气波动满足数学分解的无穷级数形式的正交收敛性。数学分解的很多波动并不具有物理意义，那么经过计算机运算得到的波与波相互作用形成的新波动也是没有物理意义的。数学分解方法与物理波动原理的结合可能是未来长期天气和气候预报的希望。

（北京大学物理学院 100871）

---

①按照我国规定的地面气象观测规范，气温在每日 02 时、08 时、14 时、20 时（北京时间）人工观测，日平均气温由上述四个时次的观测值平均得到。月平均和年平均气温则是在日平均气温的基础上平均得到。目前除人工观测外，正在逐渐增多的自动气象观测系统按照上述规范是每小时观测一次。

②根据钱维宏等人的研究成果（《科学通报》2010），全球平均温度变化中的“5 年升温与 5 年降温”与太阳辐射准 11 周期（太阳黑子活动）变化有关，后文对此有详细描述。

③资料的分辨率一般指资料时空变化的最小单位。如某资料是每日一个值，则其变化的最小时间单位为一日（当日相对于前一日的变化即其最短时间的变化），该资料为日分辨率资料。同理每月一个值的资料为月分辨率资料，依次类推还有年分辨率资料等。

④中世纪暖期：10 世纪至 13 世纪出现的相对温暖的时期，在欧洲的部分地区、北美洲和大西洋等地区最为明显，中国也存在此暖期的证据。