

小 参 数 气 候 模 式

В. Н. Степанов

提要 本文提出了海洋-大气-冰气候系统的综合模式, 它由描述海面平均温度变化和海冰扩展边界变化的两个非线性预报方程所组成。在该模式描述的气候系统内会产生自振动状态。研究了系统对地球轨道参数扰动所造成的日射率变化的响应。已经证明, 为了正确地描述气候的长周期振动, 必须考虑世纪间的气候变率, 根据模式, 这种气候变率对气候振动谱有重大影响。本文还模拟了气候系统从非周期状态到周期状态的转变(从上新世到更新世的转变)。

引 言

用海洋环流三维模式和区域大气模式进行的数值试验^[2,5,6], 有助于阐明海洋在形成地球气候长周期振动中的作用。这些试验表明, 海面温度降低到一定程度才能导致冰层的扩大。海面的强烈冷却使气候大陆度加强(它能导致冰盾退缩)。在文献[2, 6]的试验中, 其反气旋单体出现经向强烈收缩的大尺度环流与北大西洋冰层极明显地向南扩展(气旋环流圈和反气旋环流圈的交界大约在北纬40度)相一致。这种气流系统促使高纬度经向热量输送明显减少, 因而也促使从海面蒸发的水汽量明显减少。在建立由海面平均温度(Θ)和由冰所覆盖的海面平均温度(γ)这两个分量组成的海洋-大气-冰气候系统的综合模式时, 根据上述研究结果可以把从低纬向高纬的海洋经向热量输送强度 q_m 视为与带反符号的赤道-极地温差值 $-\Gamma$ 成比例。由于 $\Gamma \sim -\Theta$ (见文献[12]), 故 $q_m \sim \alpha_m \Theta$, 这里的 α_m 为比例系数(当海洋的几何形状给定时, 海洋越

温暖, 经向热量通量越大)。

模式的描述

我们从北半球现代几何形状出发来看一下中纬度的海洋区域。该区域的南部边界位于18000年前的冰河时期的反气旋环流单体发生极大收缩的地理纬度(见上述)。被研究的试验区由特征深度 H_0 和特征经向尺度 L 确定。由于降水量 P 与蒸发量 E 之差的绝对值比蒸发量本身小得多, 因此可以近似认为: $P \approx E$ 。热量和水汽的乱流流入量用下式求算^[5]:

$$H = \frac{b_1 \Gamma}{L} (\Theta - T_0) \quad (1)$$

$$L' E = a_2 H + a_3 \quad (2)$$

式中 $T_0 = T + \gamma \Delta z$;

γ 表示垂直温度梯度;

Δz 表示从平均大气高度到大气边界层上界的特征距离;

T 表示平均气温;

L' 表示汽化比热;

a_2, a_3 表示经验常数。

在推导关于 y 的方程式时, 可以认为海冰边界位置与冰盾的扩展半径 R 之间存在线性关系, 即 $\dot{R} = \alpha_k \dot{y}$ 。当海面平均温度相对于现代值发生变化时, 冰盾边界位置变化由下式求算:

$$\bar{h} \dot{R} \sim \alpha_k \dot{y} \bar{h} =$$

$$(1-y)P^*/(\rho L') \frac{1-A}{A} - l^* d/L + N_1 \quad (3)$$

式中 $\bar{h}$ 表示冰盾边缘区域的平均厚度;

P^* 与 l^* 分别表示降落的雨量与冰融化的数量相对于它们的现代值的变化;

A 表示陆地等级;

$d = \varepsilon y L (\varepsilon - 0.1)$ 表示冰融化区域的宽度;

N_1 表示现代冰盾的增长速度;

l^* 借助霍达科夫公式^[10]进行计算, 而 P^* 借助(2)式和(1)式计算。

在(3)式中代入已求得的 P^* 和 l^* 的表达式之后有:

$$\dot{y} = [F(1-mx) - My]x + N \quad (4)$$

式中 $x = (\Theta - \Theta_0)/M_0$;

M_0 表示根据古地理资料确定的平均地面温度的变化范围。

$F = F(P_4)$, $M = F + M_1(P_5)$ 表示与现代状况的参数 P_4 、 P_5 有关的系数。 P_i 表示诸如大气和下垫面吸收和射出长波辐射的性质、大气的光学性质(反射率、不透明度)和盆地沿经向的宽度等(F 与 M 的表达太长而未列出, 详见文献[7,8])。

$m = 3 M_0/\Gamma_0$, Γ_0 表示现代赤道-极地间的温差;

$N = \alpha_k N_1/\bar{h}$ 。因在数值试验开始时表征尺度的乘数 M_0 未知, 故 m 是在数值试验过程中被挑选出的经验系数。

由于保留了苏联盆地的热量平衡, 所以将求算地面平均温度变化的方程简写为:

$$C_B \rho S d/dt \int_0^{H_0} \Theta_1(z) dz = H_s S + q_m S_H \quad (5)$$

式中 S 表示海洋同大气之间相互作用面的面积;

S_H 表示盆地在其下界的截面;

ρ 与 C_B 分别表示水的密度与比热;

H_s 表示通过海面的热流量强度;

$\Theta_1(z)$ 表示海温的自动模拟廓线。

从已考虑到陆地冰层融化(形成)时消耗(放出)热量的大气辐射平衡方程以及海面热量收支出发, 可计算到达海洋的热流量 H_s 。将 H_s 代入(5)式, 然后使这个方程相对于现代状况值(Θ_0 , y_0)线性化, 对于地面平均温度的变化, 可借助(4)式进行估计而得到(详见文献[7,8]):

$$\dot{x} = (1-y) \cdot$$

$$(Ax^2 - Bx + D(y_0 - y)) + \alpha x + G \quad (6)$$

式中 $(A, B, D) = 1/C(A_1(P_1), B_1(P_2), D_1(P_3))$, 系数 A 和 B 表示长波辐射效应;

D 表示因地面反射率的变化而引起的短波辐射流入量变化的效应;

A_1, B_1, D_1 表示依赖 F, M 的相同参数的系数(因 A_1, B_1, D_1 的表达太长, 这里未清楚地列出, 可详见[7,8])。

$C = \mu \rho C_B H_0$, $\mu = \int_0^1 \psi(\xi) d\xi$ 表示自动模式廓线 $\psi(\xi)$ (ξ 为无量纲的厚度)的厚度积分时得到的常数, 这个自动模拟廓线 $\psi(\xi)$ 描述了主要斜温的垂直热力结构 $\Theta(z) = T_H + (\Theta - T_H)\psi(\xi)$ (在斜温 T_H 的下边界处的温度变化);

$$b_0 = b_1 \Gamma_0 / L(1 + \alpha_2);$$

$$\alpha = \alpha_m / (\mu \rho C_B L) - MK_1 y (1-y);$$

$$K_1 = \bar{h} \rho \theta / \alpha_k;$$

θ 表示冰融解比热;

y_0 表示海冰边界的现代状况;

G 表示在我们的试验区内热流入量与流出量之间的现代平衡。

由于参数 α_m 是在数值试验过程中挑选出来的, 所以为简单起见, 取 $\alpha = \text{常数}$ (下面将完成这样的试验: 在试验中 α 与 y 有

关，但模拟结果在 $|Mk_1| \sim 2 \alpha_m / (\mu \rho C_B L)$ 之前并不改变)。

对(6)式的常定解使用图解法 (参见文献[11]的例子) 进行的稳定性研究 (y 作为一个参数) 表明，当 $y=1$ 时，唯一的常定解总是不稳定的 (鞍形奇点)。当 $y \neq 1$ 时，有两个常定解 (节)，其中一个是不稳定解，另一个是稳定解。

当条件 $[B(1-y)-\alpha]^2 = 4AD(1-y)(D$

$$\vec{X}_1 = (0, 1) \vec{X}_{2,3} = \left(\frac{B(1-y_0)-\alpha \pm \sqrt{[B(1-y_0)-\alpha]^2 - 4AD(1-y_0)^2(y_0 - y_c)}}{2A(1-y_0)}, y_0 \right)$$

式中 $y_0 = F/M$ 。

用扰动法对该方程组的稳定性进行分析表明，如果 $y_0 > y_c$ ，则

$$y_0 \geq 1 - \alpha/B \quad (7)$$

其解 $\vec{X}_1$ 、 $\vec{X}_2$ 对模式的任意参数都是不稳定的，而解 $\vec{X}_3$ 失去稳定性。由于 α/B 与海洋经向热通量的积累值除以被考虑地区上空的大气向外层空间放射的长波辐射总量之值成比例关系，因此在上述方程组中，条件[7]式得到满足 (即发生不稳定) 也可能不会出现海冰边界向南的极大扩展。于是，当向外层空间放射的长波辐射明显减弱 (例如，由于 CO_2 浓度发生变化) 时，可以出现冰层的明显收缩。

包含在简化方程组中的物理学基本原理，也在方程组(4)~(6)式中保持不变。令 $G = N = 0$ ，则存在一个对应于现代状况的常定解 (对稳定性的分析表明，当 $y_0 > y_c$ 时，采用各种模式的参数，其解都是不稳定的)。在(4)式中作出附加的简化 ($mx \approx 0$)，可导致 y_0 的计算不完全精确。为描述小参数模式再现的过程，这些简化都不是带原则性的，但却使(4)式和(6)式的分析大大地简化。因此对简化方程组的分析结果也被应用在方程组(4)、(6)式。

求方程组(4)、(6)式的数值解的初始条

($y_c - y) + G$) 或 $B(1-y) = \alpha$ (当 $y > y_c$) 得到满足时，稳定的常定解将失去稳定性，也就是当达到某种临界值时，系统的位相图象发生质变 (分歧)。对 (4)、(6) 式的方程组进行类似研究相当复杂。若在(4)式的第一近似中忽略赤道-极地间的温度变化，即 $mx \approx 0 (|mx| < 1)$ ，并认为现代状况是常定的 ($G = N = 0$)，则问题可以被简化。被简化的方程有以下常定解集：

件为：

$$x|_{t=0} = x_0, \quad y|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

式中 $x_0 = 0, 1$ 。

当模式参数取值为 $A = 7.5 \times 10^{-12} c^{-1}$ 、 $B = 7.5 \times 10^{-12} c^{-1}$ 、 $D = 1.6 \times 10^{-13} c^{-1}$ 、 $\alpha = 3 \times 10^{-12} c^{-1}$ 、 $F = 3.5 \times 10^{-10} c^{-1}$ 、 $M = 4.4 \times 10^{-10} c^{-1}$ 、 $G = 7 \times 10^{-14} c^{-1}$ 、 $N = 7 \times 10^{-13} c^{-1}$ 时，系统内会建立以振动周期约为 4 万年的自振荡状态。

改变模式参数值 (改变上述数值的 10%) 的试验，可区分出能确定本模式描述的气候状态的参数。这些参数就是比值 α/B 、 F/M 和海洋深度 H_0 (A 、 B 、 D 、 G 与 H_0 成反比关系)。于是当比值 α/B (或 F/M) 不变时， α 和 B (或 F 、 M) 的变化也不致于使系统位相发生变化。但如果 α/B 或 F/M 发生变化时，则系统转变为非周期状态。参数 A 的较大变化对于系统的性质并不会造成任何影响，而且可以认为： $A = 0$ 。当 H_0 的数值增大 10% (因而 A 、 B 、 D 、 G 减少相同数值) 时，系统不会产生任何响应。但当深度 H_0 的增加数值较大或减少 10% 时，则系统内的振荡将消失。必须指出，参数 A 、 B 、 D 不仅因海洋深度的变化而变化，而且也因诸如大气光学性质 (大气不透明度、反射率) 和大气气体成分 (它能影响

大气放出和吸收长波辐射的能力)的变化而变化。这些关系也能够使系统转变为非周期状态。

振荡状态存在的可能性与表征现代冰期来临快慢的 G 、 N 的选择有关。但如果考虑到实际气候系统与固有的外部参数(例如因地球轨道参数变化而引起的日射率变化^[31])有关,则 G 和 N 的选择并不带有原则性。于是,此时在(6)式内存在以下形式的强迫力:

$$\phi_k = G_0 \sin \Omega_k t, \quad k=1, 2, 3 \quad (9)$$

式中 $\Omega_k = 2\pi/T_k$, $T_1 = 2 \times 10^4$ 年、 $T_2 = 4 \times 10^4$ 年、 $T_3 = 10^5$ 年分别表示由于岁差、黄道倾角、离心率的变化而造成的日射率变化周期所对应的周期^[13,15], G_0 表示温度的变化幅度,故可以说明在 $G \neq N \neq 0$ 和 $G = N = 0$ 两种情况下所确定的状态是相同的。的确,对后一种情况,所确定的状态的输送时间较长些。此外,试验资料表明,系统内将发生这样的参数共振现象:当出现以 4 万年和 10 万年为周期的振动时,可获得最大响应。

我们来介绍由地球轨道参数扰动造成的地面气温变化,其公式为:

$$\phi = \phi_0 \Delta T \quad (10)$$

式中 ϕ_0 表示统一比例尺的乘数, ΔT 根据文献[4]表示为:

$$\Delta T = 0.2 + 0.5 \sin \Omega_1 t + 0.3 \sin \Omega_2 t + 0.1 \sin \Omega_3 t \quad (11)$$

于是,从(4)式和(6)式的解(其中在方程(6)的右边增加了强迫力,(10)式可补充到(6)式的右边)可以看出,轨道扰动使自振荡气候系统的周期大约延长了 1.5 倍。

当(6)式右边存在模拟世纪间变率的随机扰动时,模式参数试验能将在无噪声的类似试验中出现的分支参数值大大缩小。在试验中可以确立具有周期性变化的振动,而不是像无噪声系统中大多数模式参数条件下所观察到的那样出现振动逐渐衰减现象。当比值 α/B 或 F/M 发生变化(达 30%)时,

可看到系统状态发生极强烈的变化。而在这种情况下并不会出现振动。因而,若海洋-大气-冰气候系统部分(如大气 CO_2 含量、海面污染等)的性质不发生变化,则气候系统内在有噪声的条件下改变模式参数并不会使系统转变到非周期状态,也就是说,地球不可能完全没有冰或完全由冰所覆盖。随机噪声还影响振动谱,从而发生振幅为 1 万年到 10 万年的振动。

海洋-冰系统从非周期状态 变为振荡状态的模拟

根据古地理资料^[9,11],格陵兰冰盖已存在 300~500 万年。因此,更新世的气候变化出现在大陆冻结之后(文献[14]指出,更新世出现年代距今 180 万年)。基于上述数值试验结果,可以模拟出气候系统从上新世到更新世的转变。

上新世并没有宽广的冰川,北纬 45—65 度的海洋区域比现今偏暖约为 $\Delta\Theta \sim 10^\circ\text{C}$ 。在较温暖的海面,气团和水体的交界并没有出现明显的锋面。因此在导致大尺度环流发生不稳定的这些地区并不存在急流的不稳定,从而可以认为,这时的海洋几乎无“噪声”。

方程组(4)、(6)式[(6)式右边加入随机强迫项]可以在初始条件(8)式下进行数值求解,而该初始条件取值 $x_0 = 0.5$ 是为了与 $\Delta\Theta = 10^\circ\text{C}$ 相对应。强迫项(10)式从初始时刻起就置于系统之中。系统内出现噪声的时间是在海洋降温到 8°C 左右之后。模式参数取值如下: $A = 8.5 \times 10^{-13} \text{c}^{-1}$, $B = 8.5 \times 10^{-13} \text{c}^{-1}$, $D = 2 \times 10^{-14} \text{c}^{-1}$, $\alpha = 3.2 \times 10^{-13} \text{c}^{-1}$, $G = 8.5 \times 10^{-15} \text{c}^{-1}$, $F = 7 \times 10^{-10} \text{c}^{-1}$, $M = 8.8 \times 10^{-10} \text{c}^{-1}$, $N = 7 \times 10^{-12} \text{c}^{-1}$ 。

将具备以上条件的气候系统设置得能够自由发展。经过百万年的时间量级后,在海洋-大气-冰系统中出现从 1 万年到 10 万年周期的自激振荡(图 1)。本模式正确地再现了气候和冰河变化的本质特点。一些小的振

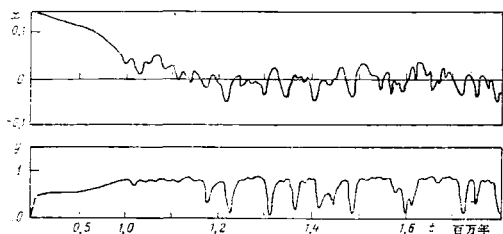


图 1 气候系统从上新世过渡到更新世的模拟情况

动为较大的振动所代替。最大的降温出现在冰盖消失之初。冰盖的消失过程本身和伴随出现的这种变暖过程比冰层的扩展以及变冷的过程要快得多。地面温度与现代值比较，其降温幅度高于升温幅度的 2—3 倍。向更新世过渡时，出现温度平均值的降低。这些结果与试验资料十分吻合。

对最近 50 万年内获得的气候变化谱分析已给出一些类似已知周期约为 10 万年的极大峰值^[15]（见图 2 a）。然而，根据较长时间的序列（150 万年）求得的谱值（图 2 b）有较短周期（约为 4.3 万年）的极大峰值。所看到的谱曲线特点，是在气候系统内有随机噪声存在的条件下由非线性气候系统本身的性质造成的。但给予这种噪声值（从而也

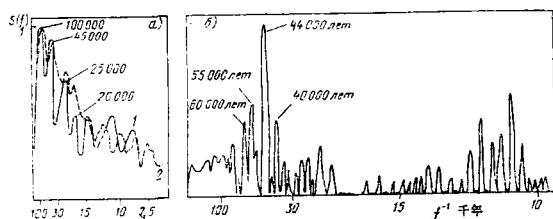


图 2 50 万年间的的变化谱值 (a) 和 150 万年间的模式气候变化 (b)。

1 表示模式， 2 表示古地理资料^[16]

给予振动谱的特征) 以重大影响的是发生在气团与水体之间锋界面径向梯度的加强程度，这主要是由太阳辐射的地区分布决定的。因此，在最近 46.8 万年的古地理资料中发现有 10 万年、4.1 万年和 2.3 万年的气候周期，这些气候周期是紧随着轨道偏心率、地球倾角和岁差发生变化而出现的，这些天文现象对日射率的纬向分布产生影响，因而也对“噪声”的性质产生影响。（因文章篇幅所限，关于天文扰动对气候振动谱如何产生影响的问题在此未进行研究）。

结 束 语

借助少量参数对气候系统进行描述当然是不够完善的。但这样的模式却能说明每一个气候因子的可能作用及反馈关系。

以上的模拟结果不仅对气候变化的原因以及寒冷期内地球冰河变化的原因作出了回答，而且阐明了为何在温暖期内不存在较大变化。已经查明，为正确再现气候长周期变化，必须考虑由气团和水体的锋界面上急流的不稳定造成的世纪间气候变率。正是产生了这种气候“噪声”的变率，才导致冰河期持续时间的重大差异。由于海洋-大气-冰气候系统的固有振动周期很长，所以在气团和水体间的锋界面上的急流没有出现不稳定（它在温暖期较弱），这将促使海洋趋于缓慢变冷。

许泊天译自《气象与水文》1990 年第 9 期
史国宁校