论"天候谱"的自然分段

汤懋苍

（中国科学院兰州高原大气物理研究所）

天气和气候变化的时间尺度谱(以下简称"天候谱")非常宽，从一天到几十亿年.为了研究的方便必须将它分成若干段. 但是分段的标准是什么？不同作者有过不同的论述. 本文从支撑天气气候系统的能源的角度出发提出了一个分段标准.

一、各种气候振荡的温度变幅

地球从40多亿年前形成以来演变至今，其表面气温的最大允许变幅是多少？根据地球史上海水出现后一直存在的事实，可知全球平均气温从未升高到42℃以上，这是水汽的花房效应允许液态水存在的上限温度[1]. 又根据整个地球从未被全部冰冻的事实，说明全球平均气温从未降至−10℃以下[2]. 这就是说全球气温变化的最大允许界限是−10—42℃. 目前全球平均气温约15℃，刚好处在此允许界限的中值附近.

从原因上分，气候系统可分为外源强迫振荡和内部自由振荡两大类. 目前比较公认的周期性外源有四种，即日变化(地球自转)、年变化(地球公转)、地球轨道三要素(偏心率、黄赤交角、岁差)变化所构成的10^5年周期(可称为"米氏周期")，以及太阳系绕银河系中心的旋转周期，称为银河周期，长约2.5—3亿年. 这四种外源强迫所引起的全球气温变幅显然要小于上述最大允许界限(52℃)，有意思的是，它们都具有几乎相同的值，都在10—20℃之间[3,4]. 应该说作用于气候系统的周期性外源强迫远不止这四种，但因能量振幅太小(如月亮反射太阳光的以月为周期的变化)，被气候系统内部的自由振荡所掩盖而显现不出来.

自由振荡是由气候系统内部各子系统之间的相互反馈作用所致，因而其周期不固定，其温度变幅也比上述四种外源强迫振荡要小. 这是必然的，因为如果自由振荡的变幅更大的话，则这四种外源振荡就不会清楚地显示出来.

关于各种自由振荡的气温变幅已有不少实际资料，这方面的总结性文章也不少[4−8]. 作者曾就各学者的结果进行过归纳，列于表1，表中数值是以陆地上的半球平均值为准. 由文献[8]的图8.9可以看出10^5年的变幅达10—15℃，但10^6年的变幅则大大减小仅约1—3℃. 由表1可得到下述几条重要规律:

(1) 对短于10年的随机振荡，其温度变幅随着周期长度而衰减，大致服从平方根反比关系，即 $T_m \propto \frac{1}{\sqrt{\tau}}$ (T_m 为温度振幅，τ 为周期长度). 这与 Leith[9] 指出的下述关系是一致的，即一个随机时间序列，任取一有限时段的平均，其标准差(σ_τ)服从于 $\sigma_\tau = \sigma_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{\frac{1}{2}}$ (τ_0 大致是6天，σ_0 为 τ_0 时段的标准差).

本文1987年5月11日收到.

表 1 “天候谱”的温度变幅(以陆地上的半球平均值为准)

时间尺度	日*	天气周期	节气周期	月	季	年*	年	10 年	10^2 年	10^3 年	10^4 年	10^5 年*	10^6 年	10^7 年	3×10^8 年*
变幅(℃)	≈10	5—10	≈5	3—5	2—3	≈10	≈0.5	0.1—0.3	≈0.5	1—2	3—5	10—15	1—3	4—6	15—20

* 为强迫振荡.

(2) 对 10—10^5 年的振荡，其变幅则随时间而增大，它不服从上述随机序列的一般规律. 其变幅与周期长度的平方根大致成正比，即 $T_m \propto \sqrt{\tau}$.

(3) 10^5—10^6 年的变幅又随周期长度而衰减，与上述 10 年以内的随机振荡一致.

(4) 10^6—3×10^8 年的变幅又与 10—10^5 年的振荡相像，随着周期长度而增加，也大致符合平方根正比的关系.

为什么温度变幅与周期长度的关系，既不是单调增加也不是单调减小，而是呈现出上述复杂的关系？下面我们试图从维持气候系统振荡的能量来源的角度对此加以解释.

二、气候系统振荡的能源与天候谱分段

维持气候系统平均态的能源无疑是来自太阳，但使得气候系统在平均态附近振荡（或曰“扰动”)的能源则往往不是来自太阳，而是来自气候系统内部或其它天文因素. 这种扰动能源的强度应该与相应的温度变幅有关. 作者[10]曾就零维情况(全球平均)推导出了其关系式. 假设外源(如太阳)对气候系统的加热首先是加热地表面，然后以热传导的方式同时向大气和下垫面内部加热；再假定地表温度扰动呈谐波变化(周期为 τ)，在无穷高处和无穷深处扰动为零，则由热传导方程可得到地气系统的内能扰动变幅 (E_m) 与地表温度振幅 (T_A) 之间的关系[10].

$$E_m = \lambda T_A/\sqrt{\tau}, \tag{1}$$

式中 $\lambda = \sqrt{2\pi}(C_s\rho_s\sqrt{K_s} + C_p\rho_a\sqrt{K_a})$，$C$ 为比热，ρ 为密度，K 为热传导率，下标 s 为下垫面(土壤)，a 为空气. 对陆地来说 $\lambda \approx 1.2\mathrm{W}\cdot\mathrm{s}^{\frac{1}{2}}\cdot\mathrm{m}^{-2}\cdot\mathrm{℃}^{-1}$.

将表 1 中的 τ 和 $T_m(\approx 2\,T_A)$ 值代入(1)式，可算得 E_m 与 τ 的关系曲线，绘于图 1，其上“天候谱”的阶段性表现得很清楚. 可见

(1) 四个强迫振荡点(图中“▲”点)可以连成一条直线，所有的自由振荡点都在该直线的下方，表明随机振荡的能通量都比此四种强迫振荡为小.

(2) 从自然天气周期(≈5 天)到 10 年的自由振荡，E_m 与 τ 成反比关系，依图 1 上的直线部分可写出 $E_m\cdot\tau = C_1 \approx 1500\ \mathrm{J/cm^2}$，相当于地表一天的吸收辐射量. 这表明对 $\tau < 10$ 年的振荡的总扰动能量，相当于地表吸收太阳辐射一天的量. 扰动能源是随时间而逐级耗散的.

(3) 10—10^5 年的振荡特性是扰动能源 (E_m)是一常值，$E_m = C_2 \approx 0.03\ \frac{w}{m^2}$. 有意思的是，此值与地球内部向外放散的热通量基本相等. 于是我们可以设想 10—10^5 年振荡的扰动能源可能是由地球内部的地热释放供给的.

(4) 10^5—10^6 年的振荡与 0—10 年的振荡相像，也是一种能量的耗散过程.

(5) 10^6—10^9 年的振荡又与 10—10^5 年相像，表现为 $E_m = C_3 \approx 10^{-3}\ \frac{w}{m^2}$ 比 C_2 要小约 30

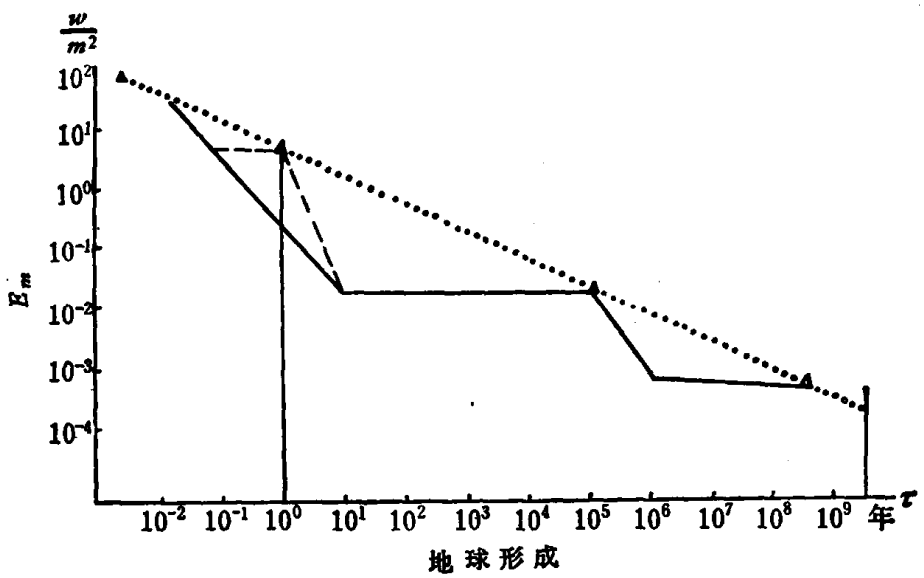

图 1　扰动能源(E_m)与振荡周期(τ)的关系折线

▲为强迫振荡点；……为四个强迫振荡点的连线；———为考虑到正常的气候年变化时所应具有的折线

倍．不过对 $\tau > 10^6$ 年的情形，推导(1)式的假定条件不一定完全满足．维持这种特长周期振荡的能源似乎与地幔对流和某些宇宙因素有关．

三、短、中、长期天气的能量划分标准

全球大气的总动能约为 8×10^{20}J(焦尔)，动能的生成率(平均来说即等于耗散率)为 2×10^{15}W，故动能耗散的特征间时为 $\tau_m = \dfrac{8 \times 10^{20}\text{J}}{2 \times 10^{15}\text{W}} \approx 5$ 天．

全球平均的气柱水汽含量为 2.4 g/cm²，全球年平均降水量是 780mm 或 2.14mm/天，故潜热耗散的特征时间是 $\tau_L = \dfrac{24\ \text{mm}}{2.14\ \text{mm/d}} \approx 10$ 天．

表 2　各天候谱分段一览表

谱段区间	0—5 天	5—10 天	10 天—3 个月	3 个月—10^0 年*	10^0—10^4 年**	10^4—10^6 年	10^6—10^9 年
扰动能源***	动能转换	潜能转换	辐射能转换	能量随机耗散	地热释放	能量随机耗散	地幔对流宇宙因素
习惯名称	短期天气	中期天气	长期天气	短期气候	历史气候	古气候(或地质气候)	地质气候
外源强迫	日 变 化	—	—	年变化	米氏周期	—	银河周期

* 有人将三个月至一年划为长期天气，1—10 年划为超长期天气(或短期气候)．

** 有人将"历史气候"规定为人类有历史记载以来的气候．这样则 10^4—10^6 年就不属于"历史气候"范畴，或可用"米氏气候"命之．

*** >10 年的扰动能源，其科学依据尚不足，或可看成是作者的设想．

全球大气的内能是 $C_v M\bar{T}_a$(M 为大气质量，$\bar{T}_a$ 为全球平均温度)，平均的逸出长波辐射是 $F = \dfrac{S_0}{4}(1 - \alpha_t)$，其中 S_0 是太阳常数，α_t 是行星反照率．于是，内能的耗散特征时间为

$$\tau_1 = \frac{C_v M\bar{T}_a}{F} \approx 3\ \text{个月}(\text{取}\ \bar{T}_a = 255°\text{K},\ \alpha_t = 0.3).$$

根据这三个特征时间可将三个月以内的天候谱划为三段：(1) 5 天以内(习惯称为短期天气) 以动能转换为特征；(2) 5—10 天 (习惯称为中期天气) 以潜热转换为特征；(3) 10—90 天(习惯称为长期天气)以辐射能转换为特征.

四、总　结

综上所述可以将天候谱的分段总结成表 2.

Saltzmanm[11] 曾根据 Mitchell 估算的气候序列的相对方差谱取其极小值的位置(分别位于 1 小时、3 个月、10 年和 10^6年)将气候分为 5 段. 可见本文的分段与他并无矛盾，只是我们划得更细一些.

参　考　文　献

[1] Goody, R. M., Walker, J. C. G., *Atmospheres*, Englewood cliffs (N.J.), Prentice-Hall, 1972, 150.

[2] Budyko, M. I., The effect of solar radiation variations on the climate of the earth, *Tellus*, **21**(1969), 611—619.

[3] 汤懋苍，气候变迁与超长期预报文集，科学出版社，1977，105—111.

[4] Монин А. С., Шишков Ю. А., *История Климата*, Гидрометеоиздат, 1979.

[5] National Academy of Sciences, Understanding climatic change, A Program for action, 1975, 239.

[6] 张家诚等，气候变迁及其原因，科学出版社，1976.

[7] 裴高法等，历史时期气候变化研究方法，科学出版社，1983.

[8] L. A. 费雷克斯，地质时代的气候，海洋出版社，1984，296.

[9] Leith, C. E., The design of a statical-dynamical climate model and statistical constraints on the predictability of climate, *GARP Publication Series*, 1975, 16: 137—141.

[10] 汤懋苍等，高原气象，1(1982)，1：23—32.

[11] Saltzman, B., Climatic systems analysis. *Advances in Geophysics*, **25**(1983). 173—233.