

· 么枕生 主编

# 气候学研究

—— 气候与中国  
气候问题

气象出版社

# 气候学研究—— 气候与中国气候问题

么枕生 主编

Climatological Studies

3

Edited by  
Yao Zhensheng

气象出版社

China Meteorological Press

(京)新登字046号

### 内 容 简 介

本书反映了我国气候学的研究现状,内容既有数值模拟与分析,也有统计分析与模拟;既有理论研究,也有应用实例;既有分析诊断,也有预报实践。虽有国外引进的成果,但主要是我们自己的新贡献。在气候形成理论、周期振荡、区域气候、古气候,以及今后气候变化趋势等方面的研究成果,都为我国气候学的新发展奠定了基础。

本书可供天气、气候、天文、地理、地质、地貌、水文、环境、冰川、农林、考古,以及其他科学领域中研究与业务人员的参考,也可作为高校教师丰富教材和学生课外读物。

## 气候学研究——气候与中国气候问题

么枕生 主编

责任编辑:杨长新 终审:刘宏勋

封面设计:牛涛 责任技编:岳景增 责任校对:吕影

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:346千字

1993年10月第一版 1993年10月第一次印刷

印数:1-800 定价:11.10元

ISBN 7-5029-1343-2/P·0584

## 序 言

气候系统就是地球大气系统内外（概括为天-地-生气候）变化相互联系而又反馈，所形成的非线性随机变化的随机系统。因此，统计理论就成为分析气候，尤其是预报气候变化的首要手段。为了诊断气候形成原因、预测气候未来变化，数值模拟更是不可少的有力研究工具。统计分析与数值模拟是气候学研究中两种不同的数值化方法，各有优势，也各有不足，应相得益彰，不宜偏废。

现代气候学要研究气候预测的理论与方法。这是气候学的最新发展。现在举世瞩目的气候预测问题就是地球气候变暖的趋势。为了解决这一重大气候预测问题，自然应掌握更长的气候变化史料，分析其历史背景，诊断其未来变化，史料愈长就愈便于气候的分析诊断与模式检验。这个问题须有多学科的协作，根据日-地关系、地球环境等，去分析诊断近100年来发现在温室效应趋势上，多种时间尺度的周期振荡，以及根据米兰科维茨强迫振荡，结合温室效应去分析推测这个间冰期何时结束和如何结束问题。这些都是研究地球气候变化问题时，应当考虑的问题。

另一个关系到国计民生的大问题就是特大旱涝问题。因为这是极值统计问题，如无大样本也势难推测于未然。我国器测记录多不满百年，就有必要考虑历史时代以及地质时代的代用记录，去订正加长记录序列，才能研究特大旱涝事件所遵循的随机系统，尤其是应当研究至少5000年来冷-暖循环中特大旱涝出现的规律。

本书的出版当然是为了促进近百年现代气候的研究，但是现代气候的过去称为古气候，未来的气候又是现代气候的延伸，所以为了推测地球气候的未来变化，以及可能有的气候自然灾害，就必须尽量参考过去的气候变化特征。这样，这一辑的论文势必偏多，出版也就较难。幸经本人的努力和作者们的支持，才使本书得以和读者见面。更令人鼓舞的，就是许多友好人士给予经济支持，甚或以私蓄予以资助。气象出版社各级领导、南京大学大气科学系、南京气象学院与有关气象部门，为了发展我国气候科学，给予许多照顾与重视，在此一一致谢。还有不能不表示谢意的，就是南京大学大气科学系气候教研室副主任马开玉与南京气象学院应用气象系气候教研室主任丁裕国都为出版这一辑论文集给予很多帮助。

么枕生于1992年5月17日

# 目 录

## 序 言

### (一) 气候问题

#### 1. 天、地、生气候

- 地球轨道长周期变化同古气候变迁的关系 ..... 易照华 ( 1 )
- 气候——天、地、生的综合产物 ..... 崔启武 王汉杰 ( 9 )
- 山地可照时间的理论计算和变化特点 ..... 傅抱璞 ( 20 )

#### 2. 气候成因

- 北半球夏季大气环流和亚洲季风对土壤含水量的响应 ..... 朱乾根 胡江林 杨松 ( 30 )
- 区域气候形成理论与中尺度数值模拟 ..... 施永年 ( 39 )
- 我国的“核冬天”气候的模拟 ..... 曹鸿兴 王永中 林芸美 ( 55 )
- 气候变率谱间歇区雷诺方程的性质及描述气候变化的扩散差分模式 ..... 徐大海 ( 64 )
- 南亚高压强度对东亚天气气候的影响 ..... 钱建华 钱永甫 ( 73 )
- 非线性相互作用对年际气候变化影响的数值试验及其统计拟合 ..... 丁裕国 兰红平 ( 83 )
- 二氧化碳和臭氧气候效应的数值模拟 ..... 刘健 钱永甫 ( 93 )

#### 3. 气候变化

- 海气热交换的年际振荡及与30—60天振荡的关系 ..... 陈隆勋 宋毅 ( 104 )
- 厄尔尼诺/反厄尔尼诺年夏季大气低频波的振荡特征 ..... 孙安健 唐国利 黄荣辉 ( 119 )
- 旱涝气候的随机非线性变化 ..... 么枕生 ( 132 )
- 旱涝气候中的随机周期变化 ..... 么枕生 ( 139 )

#### 4. 气候统计数学分析与预测

- 二氧化碳浓度增加与温度变化的关联分析 ..... 曹鸿兴 江野 ( 148 )
- 新疆日平均气温的正态性 ..... 张学文 沙拉买提等 ( 155 )
- EEOF和低通循环滤波方法在极冰统计分析中的应用 ..... 施能 陈寅生 ( 163 )
- 基于PRESS准则的逐步回归周期分析 ..... 姚棣荣 ( 169 )

### (二) 中国气候问题

- 我国5—8月大范围降水距平的统计特征及其与ENSO的联系 ..... 屠其璞 刘健 ( 174 )
- 小冰期我国东部气温变化的研究 ..... 王绍武 ( 182 )
- 古季风、古海面与中国全新世大洪水 ..... 杨怀仁 ( 194 )
- 淮河流域降水的周期振荡 ..... 马开玉 周后福 ( 205 )
- 中国气候的干湿动态区划 ..... 么枕生 马慰曾 刘健 ( 211 )

# 地球轨道长周期变化同古气候变迁的关系

易 照 华

(南京大学天文系)

## 提 要

本文用较严格的方法, 导出太阳对整个地球的全年和半年的总辐射量同地球轨道根数(要素)之间的关系, 并用最新的地球轨道长周期变化资料, 具体讨论地球轨道变化同古气候变迁的联系以及存在问题的分析。

## 一、引 言

自从南斯拉夫学者米兰科维茨(M. Milankowitch)在本世纪30年代正式提出第四纪冰期的天文学理论后<sup>[1]</sup>, 引起了气象学和天文学界的广泛重视。1980年以前的情况, 已在比利时学者贝尔热(A. Berger)的评述中进行了小结<sup>[2]</sup>。1982年在美国召开的“米兰科维茨和气候学”专题国际讨论班的论文集, 于1984年出版<sup>[3]</sup>后, 对此课题研究形成高潮。本文着讨论下面两个问题:

1. 太阳对整个地球的总辐射能同地球轨道关系。在米兰科维茨原著以及气候学的书中, 都把太阳辐射按地理纬度 $\varphi$ 的函数表示, 并展开为太阳黄经 $\lambda$ 的三角级数, 系数中有 $\tan\varphi$ 的多项式; 然后再求出全年或半年的总辐射量(对 $\lambda$ 积分)。里面有两个问题: 一是在 $|\varphi| \geq 90^\circ - \epsilon$  ( $\epsilon$ 为黄道对赤道的倾角, 现在约 $23^\circ 27'$ )时, 级数发散; 故在南极圈和北极圈内的地区, 无法用此公式计算, 而重大气候变迁(如冰期等)是全球效应。二是根据天文观测, 纬度也有变化, 是否有大范围的长期变化还未下结论, 故用纬度表示的太阳辐射, 在纬度变化时就不够标准。而事实上, 太阳对地球总辐射, 可以避开纬度 $\varphi$ 进行计算。

2. 地球轨道的变化问题。1984年以后, 天文学界对此课题的研究很活跃, 由于影响地球轨道的因素主要是大行星之间的引力, 故结合太阳系的稳定性课题进行研究。当前已有7个研究组在进行, 其中美国两个(一个在美国海军武器实验室, 另一个在MIT), 日本一个(国立天文台), 法国一个(国家经度局), 意大利, 英国, 加拿大各一个。他们用数值方法或半分析方法讨论各大行星轨道根数的长周期变化以及运动稳定性问题。其中地球轨道的偏心率 $e$ , 倾角 $i$ , 近日点经度 $\omega$ , 升交点经度 $\Omega$ 的长周期变化, 正是这个课题所需要的。本文将根据上述研究组的最新结果<sup>[4-7]</sup>, 来具体讨论太阳对地球总辐射的长周期性变化, 并分析其中存在的问题。

## 二、太阳对地球的全年和半年的总辐射计算公式

太阳在任一时间间隔 $\Delta t$ 照射到地面任一块面积元 $\Delta s$ 上的辐射量为

$$\Delta w = \frac{I_0}{\rho^2} \cos z \Delta s \Delta t \quad (1)$$

其中  $I_0$  为太阳常数, 即太阳在标准距离处(即日地平均距离, 又称一个天文单位, 简记为  $1AU$ , 具体长度为  $149597870\text{km}$ ), 在单位时间, 对垂直于日光方向单位面积上的辐射能量;  $\rho$  为此时太阳到地球上  $\Delta s$  的距离, 以  $AU$  为单位;  $z$  为太阳在  $\Delta s$  处的天顶距。

现在通过地心  $o$ , 作一平面  $p$ , 垂直于太阳照射方向; 则  $\Delta s \cos z$  正好是面积  $\Delta s$  在平面  $p$  上的投影。如果近似地取  $\rho$  为此时太阳到地心的距离(误差约  $10^{-5}$ ), 则太阳所照射到半个地球上的  $\Delta s \cos z$  的总和, 即为地球同平面  $p$  的截面面积  $A_0$ 。因此, 在时间间隔  $dt$  内, 太阳对整个地球的总辐射  $dw$  应为

$$dw = \frac{I_0}{\rho^2} A_0 dt \quad (2)$$

下面先导出  $A_0$  的计算公式。

地面虽然高低不平, 海洋中也有潮汐涨落; 但根据天文和大地测量学的长期研究表明, 用旋转椭球体可作为地面的很好近似(误差约  $10^{-5}$ )。如采用赤道坐标系;  $xy$  平面在地球赤道面上,  $x$  轴指向春分点,  $z$  轴指向地球北极; 地心  $o$  作为坐标原点,  $x, y, z$  轴成右手系, 则用旋转椭球体表示的地面方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

其中  $a$  为赤道半径,  $b$  为极半径。最新公认数值为:  $a = 6378.140\text{km}$   
 $b = 6356.755\text{km}$

地面子午截线椭圆的偏心率为  $e'$ ,  $e'^2 = 0.00669438$ 。

在赤道坐标系下, 太阳坐标要用赤经赤纬表示, 后面推导更繁, 现变换为黄道坐标系:  $0-x'y'z'$ , 其中  $x'$  轴仍指向春分点,  $z'$  指向北黄极,  $y'$  轴在黄道面上。相当于把原  $yz$  平面逆时针旋转  $\epsilon$  角(黄赤交角), 坐标变换关系为:

$$\left. \begin{aligned} x &= x' \\ y &= y' \cos \epsilon - z' \sin \epsilon \\ z &= y' \sin \epsilon + z' \cos \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

地面方程(3)式成为:

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{(y' \cos \epsilon - z' \sin \epsilon)^2}{a^2} + \frac{(y' \sin \epsilon + z' \cos \epsilon)^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

在此黄道坐标系下, 太阳坐标为  $(\rho \cos \lambda, \rho \sin \lambda, 0)$ , 故平面  $p$  的方程应为:

$$x' \cos \lambda + y' \sin \lambda = 0 \quad (6)$$

椭球面(5)式与平面(6)式相交曲线就是截面  $A_0$  的边界。要在  $p$  平面上讨论才能正确表达, 故再作坐标变换, 使  $y', z'$  轴在平面  $p$  上。现取  $x'y'$  平面逆时针旋转  $\lambda$  角, 使  $x'$  轴指向太阳, 相应  $y'z'$  平面就与平面  $p$  重合。这相当于坐标变换

$$\left. \begin{aligned} x' &= x'' \cos \lambda - y'' \sin \lambda \\ y' &= x'' \sin \lambda + y'' \cos \lambda \\ z' &= z'' \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

即新的  $x''$  轴指向太阳方向,  $y''$  轴指向黄经等于  $90^\circ + \lambda$  方向,  $z''$  轴就是  $z'$  轴, 指向北黄极。

在此坐标系下，平面 $p$ 的(6)式变换为：

$$x'' = 0 \quad (8)$$

以(7)式代入(5)式后，令 $x'' = 0$ 得：

$$Ay''^2 + By''y'' + Cz''^2 = 1$$

$$\left. \begin{aligned} \text{其中 } A &= \frac{\sin^2\lambda + \cos^2\epsilon\cos\lambda}{a^2} + \frac{\sin^2\epsilon\cos^2\lambda}{b^2} \\ &= 2\cos\epsilon\sin\epsilon\cos\lambda\left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2}\right) \\ C &= \frac{\sin^2\epsilon}{a^2} + \frac{\cos^2\epsilon}{b^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这就是截面 $A_0$ 的边界曲线在平面 $P$ (即 $y''z''$ 平面)上的表达式。它是圆锥曲线，容易判断它是椭圆( $B^2 - 4AC < 0$ )。要求出此椭圆的面积，最好先求出此椭圆的长半径和短半径，设为 $a', b'$ ，则面积为 $\pi a' b'$ 。这样就要再作旋转，使(9)式化为标准形式：

$$A' y''^2 + C' z''^2 = 1 \quad (10)$$

$$\text{则 } A'^{-1} C'^{-1} = a'^2 b'^2.$$

由解析几何公式知

$$\frac{1}{a'^2 b'^2} = A' C' = AC - \frac{B^2}{4}$$

以(9)式中 $A, B, C$ 代入，化简后得：

$$\frac{1}{a'^2 b'^2} = \frac{1}{a^2 b^2} (1 - e'^2 \sin^2\epsilon \sin^2\lambda)$$

$$\text{故 } A_0 = \pi a' b' = \pi ab (1 - e'^2 \sin^2\epsilon \sin^2\lambda)^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

其中 $e'$ 即为上述地面子午截线椭圆的偏心率。代入(2)式得：

$$dw = \frac{\pi I_0 ab dt}{\rho^2 \sqrt{1 - e'^2 \sin^2\epsilon \sin^2\lambda}} \quad (12)$$

由于 $e'^2 \sim 0.0066, \sin^2\epsilon < 0.2$ ，此式无奇点，而且推导严格。

用(12)式容易积出全年或半年内太阳对地球的总辐射量。全年总辐射量为( $T$ 为一年时间)：

$$w = \int_0^T \frac{\pi I_0 ab dt}{\rho^2 \sqrt{1 - e'^2 \sin^2\epsilon \sin^2\lambda}} \quad (13)$$

如果略去地球公转轨道根数在一年内的变化(误差小于 $10^{-5}$ )，则地球在一年内运动可用二体问题描述。用开普勒(kepler)第二定律有

$$\rho^2 \frac{d\theta}{dt} = h = n \sqrt{1 - e^2} \quad (14)$$

其中 $\theta$ 为地球在轨道上的经度，从某固定方向起算。看太阳黄经 $\lambda$ 是按某固定时刻的春分点起算，则可取 $\lambda = \theta$ ；相应的 $\lambda$ 从 $0^\circ$ 到 $360^\circ$ 所需时间 $T$ 称为恒星年。(14)式中 $h$ 为地球向经在运动时扫过的面积变化速率的两倍， $n, e$ 为地球公转的平均角速度和轨道偏心率。仍取日地平均距离( $1 AU$ )为单位。在(14)式中取 $\theta = \lambda$ 后代入(13)式，则得 $I$ 恒星年内太阳总辐射 $w$ 为：



$$w_s = \int_0^{2\pi} \frac{\pi I_0 ab}{h} \frac{d\lambda}{\sqrt{1 - e'^2 \sin^2 \varepsilon \sin^2 \lambda}}$$

$$= \frac{4\pi I_0 ab}{h} K(k) = \frac{2\pi^2 I_0 ab}{h} \left(1 + \frac{k^2}{4} + \frac{9}{64} k^4 + \dots\right) \quad (15)$$

式中  $k^2 = e'^2 \sin^2 \varepsilon$  约  $10^{-3}$ ，最多取到  $k^4$  项就够了。 $K(k)$  称为第一类完全椭圆积分。若考虑岁差， $\lambda$  从变化的春分点起量，则有关系：

$$\theta = \lambda - \phi t \quad (16)$$

式中  $\phi$  为黄经总岁差（约每年  $50''$ ），可近似地取  $d\lambda = ndt$ ，则以 (16) 式代入 (15) 式。再代入 (14) 式，相应  $\lambda$  从  $0^\circ$  增到  $360^\circ$  所需时间称为回归年，记为  $T_p$ 。由此可得一回归年内的太阳总辐射  $w_t$  为：

$$w_t = \int_0^{T_p} dw = \frac{n - \phi}{n} w_s \quad (17)$$

前面的因子  $(n - \phi)/n$  正好是回归年与恒星年的时间比。

由此可看出，一年内太阳对全地球的总辐量，与地球近日点方向无关，只与  $n$ ， $e$ ， $I_0$ ， $\varepsilon$ ， $e'$ ， $a(b = a\sqrt{1 - e'^2})$  有关。用 (15) 式计算  $w_t$  很简单。

米兰科维茨提出热量半年概念。由于  $e \neq 0$ ，故当地球在近日点附近接受到太阳辐射更强，另外，因太阳在不同方向，日照面积大小不同（春秋分时最小，夏冬至时最大）。设太阳黄经  $\lambda = \lambda_1$  时为热量夏季半年开始，对应时刻为  $t_1$ ； $\lambda = \lambda_2$  时为热量冬季半年开始，时刻为  $t_2$ 。则由 (14) 式，取固定春分点情况 ( $\theta = \lambda$ )，根据热量半年定义可得关系：

$$\frac{T}{2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\rho^2 d\lambda}{n\sqrt{1 - e'^2}} \quad (18)$$

以及

$$\frac{\pi I_0 ab}{\rho_1^2 \sqrt{1 - e'^2 \sin^2 \varepsilon \sin^2 \lambda_1}} = \frac{\pi I_0 ab}{\rho_2^2 \sqrt{1 - e'^2 \sin^2 \varepsilon \sin^2 \lambda_2}} \quad (19)$$

其中

$$\rho_i = \frac{1 - e^2}{1 + e \cos f_i} \quad f_i = \lambda_i - \tilde{\omega} \quad (20)$$

$f_i$  称为  $t_i$  时地球的真近点角，即近日点起算的角度； $\tilde{\omega}$  称为近日点经度，是由春分点到近日点的角距。(18)、(19) 式是按米兰科维茨定义的热量半年条件给出的，但米兰科维茨的定义是对某纬度圈而提出，热量半年明显；这里推广到全球，但可得同样结果。

(18) 式中的平均角速度  $n$  可用  $2\pi/T$  代替。用 (20) 式代入后，只写出准到  $e$  的结果为：

$$\pi = \lambda_2 - \lambda_1 - 2e \sin(\lambda_2 - \tilde{\omega}) + 2e \sin(\lambda_1 - \tilde{\omega}) + o(e^2)$$

$$= \lambda_2 - \lambda_1 + 4e \cos\left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} - \tilde{\omega}\right) \sin\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right) + o(e^2) \quad (21)$$

式中三角函数项前面已有  $e$  的因子，故三角函数中的  $\lambda_1 \pm \lambda_2$  只要准到不含  $e$  的结果就行了。在 (19) 式中，令  $e = 0$ ，相应  $\rho_1 = \rho_2 = 1$ ，则得：

$$\sin^2 \lambda_1 = \sin^2 \lambda_2, \quad \text{即 } \cos 2\lambda_1 = \cos 2\lambda_2$$

而  $\lambda_1, \lambda_2$  都小于  $2\pi$ ，即得：

$$2\lambda_2 = 2\pi \pm 2\lambda_1, \quad \text{即 } \lambda_2 \pm \lambda_1 = \pi \quad (22)$$

代入 (21) 式得：

$$\pi = \lambda_2 - \lambda_1 + 4e \sin \tilde{\omega} + o(e^2) \quad (23)$$

用  $w_h$  和  $Q_h$  分别表示在天文夏季半年和热量夏季半年内，太阳对全地球的总辐射量，则有

$$\begin{aligned} w_h &= \int_0^\pi F d\lambda = \int_0^{\lambda_1} F d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F d\lambda + \int_{\lambda_2}^\pi F d\lambda \\ &= Q_h + \int_0^{\lambda_1} F d\lambda + \int_{\lambda_2}^\pi F d\lambda \end{aligned}$$

式中  $F$  为 (15) 式中的被积函数。由 (22)，(23) 式知  $\lambda_1$  和  $\lambda_2 - \pi$  都是与  $e$  同量级小量，故上式可写为：

$$Q_h = w_h - (\pi + \lambda_1 - \lambda_2) \bar{F}$$

式中  $\bar{F}$  为  $F$  在半年内的平均值，即可取为

$$\bar{F} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi F d\lambda = \frac{1}{\pi} w_h$$

与 (23) 式一起代入上式得：

$$Q_h = \left(1 - \frac{4e}{\pi} \sin \tilde{\omega}\right) w_h = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4e}{\pi} \sin \tilde{\omega}\right) w_s \quad (24)$$

误差为  $e^2$  量级。同样可导出另外半年的总辐射

$$Q_h' = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4e}{\pi} \sin \tilde{\omega}\right) w_s \quad (25)$$

这都依赖于近日点方向。

### 三、地球轨道根数的长周期变化

太阳对全地球的年辐射量  $w_s$  及半年辐射量  $Q_h$  (或  $Q_h'$ ) 依赖于地球大小和形状参数  $a$ ， $e'$  以及公转轨道有关参数  $e$ ， $\varepsilon$ ， $\tilde{\omega}$ ；而  $\varepsilon$  又依赖于黄道变化参数  $i$  (对某固定平面倾角)， $\Omega$  (黄道对某固定平面升交点经度) 以及赤道的变化 (岁差和章动)；还有太阳常数  $I_0$ 。这里只讨论同地球公转轨道有关的参数的长周期变化。

$\varepsilon$  是黄赤交角，黄道和赤道的变化对它都有影响。先改虑赤道变化，即岁差和章动。但章动项最长周期只有 18.6 年，不能反映气候变迁，故只需要考虑岁差。气候学中有两种岁差：一是由于地球自转轴绕黄极转动，使春分点每年 (作为时间单位，采用儒略年，365.25 平太阳日) 沿黄道西退  $50''.296$ ，对应周期约 25800 年，称为黄经岁差；另一种是同时改虑近日点移动，由于地球近日点每年东进  $11''.635$ ，故相对春分点每年移动  $61''.926$ ，相应周期约 20900 年，称为气候岁差。这两种岁差并不是通过  $\varepsilon$  起作用，而是气候岁差通过  $\tilde{\omega}$  起作用。影响  $\varepsilon$  变化的量主要是  $i$  和  $\Omega$ ，下面与  $e$ ， $\tilde{\omega}$  一起讨论。

由于在  $e=0$ ， $i=0$  时，行星运动方程有奇点；故不是直接用  $e$ ， $i$  作为变量，而采用一些组合，可避免运动方程中的奇点出现，常用的一种是：

$$\left. \begin{aligned} h &= e \cos \tilde{\omega}, & k &= e \sin \tilde{\omega} \\ p &= \sin \frac{i}{2} \cos \Omega, & q &= \sin \frac{i}{2} \sin \Omega \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

即用  $h$ 、 $k$  代替  $e$ 、 $\tilde{\omega}$ ； $p$ 、 $q$  代替  $i$ 、 $\Omega$ 。

各研究组分别用半分析方法或数值方法求出  $h, k, p, q$  为三角级数, 每项三角函数的角度是时间  $t$  的线性函数。所谓半分析方法是將运动方程右端函数展开为时间  $t$  的三角级数, 系数为  $h, k, p, q$  的多项式, 用初值定出系数的数值; 数值方法是直接把运动方程进行数值解, 再从长时期的数值结果中, 用谱分析求出主周期项, 表达为三角多项式。

下面给出法国经度局的拉斯卡 (*J. Laskar*) 在1988年给出的结果<sup>[4]</sup>, 他是用半分析方法, 展开式准到行星质量二阶,  $h, k, p, q$  的与阶, 形式为:

$$\left. \begin{aligned} h &= \sum_{i=1}^{80} A_i \cos(n_i t + \phi_i) \\ k &= \sum_{i=1}^{80} A_i \sin(n_i t + \phi_i) \\ p &= \sum_{i=0}^{79} B_i \cos(m_i t + \delta_i) \\ q &= \sum_{i=0}^{79} B_i \sin(m_i t + \delta_i) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

其中  $A_i, B_i$  为系数;  $\phi_i, \delta_i$  为位相角;  $n_i, m_i$  为频率, 相应的周期(频率以角秒/年为单位)为

$$P_i = \frac{1296000''}{n_i} \text{ 年, 或 } \frac{1296000''}{m_i} \text{ 年,}$$

拉斯卡给出的三角多项式有80项; 在表1, 2中只写出系数最大的18项。由  $p, q$  的结果可得  $\epsilon$  的表达式:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \sum_{i=0}^{79} \frac{m_i B_i}{m_i + \phi} \cos[(m_i + \phi)t + \delta_i] \quad (28)$$

表1  $h, k$  的主周期项中  $A_i, n_i (p_i), \phi_i$  值

序号 $i$	$A_i \times 10^6$	$n_i$ (角秒/年)	$P_i$ (年)	$\phi_i$ (度)
1	1897001	4.248976	305014	30.613021
2	1631751	7.455487	173831	199.811097
3	1298909	17.922491	72311	151.997510
4	813631	17.377742	74578	310.08552
5	387047	5.568471	232738	77.058878
6	255684	17.104716	75768	36.737898
7	224715	17.654277	73409	38.339829
8	199607	6.922888	187205	143.317597
9	183885	16.833084	76991	110.602530
10	152836	27.960642	46350	126.426025
11	133092	17.329172	74787	287.612479
12	131928	17.826517	72700	87.910250
13	127119	7.363107	176012	207.854098
14	122639	17.966230	72135	22.356505
15	122535	18.196357	71223	248.338542
16	115231	18.012859	71948	46.053080
17	108585	18.464923	70187	180.405296
18	107889	5.480739	236464	253.472094

其中 $\phi$ 即为黄经岁差,  $\epsilon_0$ 为公元2000年初的 $\epsilon$ 值, 应为 $23^\circ 26' 21''.448$ 。表2中给出的 $m_i$ 为负值, 在(28)式中取正值。 $\phi$ 也取正值, 因春分点是西退, 应为负值, 与 $m_i$ 同号。

表2  $p, q$ 的主周期项中 $B_i, m_i(p_i), \delta_i$ 数值

序号: $i$	$B_i \times 10^8$	$-m_i$ (角秒/年)	$P_i$ (年)	$\delta_i$
0	1377224	0	—	107°.584204
1	798880	18.850133	68752	245.275610
2	515448	5.604358	231248	17.092978
3	402485	17.761344	72967	286.939567
4	284848	7.052737	183758	143.691432
5	268489	18.304928	70800	263.476756
6	224745	6.962954	186127	311.907333
7	170037	5.513825	235045	8.033427
8	154555	7.004642	185020	119.415527
9	146128	7.150155	181254	332.581197
10	139612	6.861649	188875	303.906805
11	136764	19.393984	66824	41.333570
12	133576	26.330042	49221	127.730350
13	97416	7.190984	180225	302.731053
14	96140	19.123718	67769	149.577002
15	89461	2.985806	434053	142.209681
16	76207	6.812257	190245	329.815268
17	73737	5.687881	227852	230.338124

#### 四、结果和讨论

根据古气候资料的谱分析<sup>[2]</sup>, 有一些周期在 $10^4$ — $10^6$ 年量级的变化, 与 $e, \tilde{\omega}, i, \Omega(e)$ 的主周期变化符合; 而这些周期变化, 又直接影响到太阳对全地球总辐射的变化。这就是建立古气候学天文理论的根据。

在 $e, \omega$ 展开式的80项中, 除周期为30万年的最大项外, 其余70多项的周期比较集中在四个时时间范围: 7—8万年(43项), 17—18万年(18项)20万年左右(8项)23—24万年(9项)。在 $i, \Omega$ 的80项中, 有一次周期特别长, 为187万年, 但系数不大, 表2中未列出; 其余项周期集中在: 7—8万年(28项), 17—18万年(15项), 20万年左右(13项)23—24万年(14项)。但 $i, \Omega$ 变化主要通过 $e$ 起作用, 故根据(28)式可算出对应上述4个周期范围集中在1.9万年和2.3万年左右(气候岁差对应的周期2.09万年正好在中间)。总的看来, 影响太阳对地球总辐射的长周期变化的周期有: 7.5, 17.5, 20, 23.5, 2.3, 2.09, 1.9万年。更粗略一些为三个周期: 7.5, 20, 2万年。其中因偏心率 $e, \tilde{\omega}$ 的变化作用更大, 故20万年左右, 7.5万年的周期振幅大些。这与第四纪冰期和间冰期的资料大体符合。

从上面结果看来, 米兰科维茨的理论原则上是对的。若要进一步成为完整理论, 下列一些问题值得深入讨论和研究:

1. 关于地球轨道根数 $e, \tilde{\omega}, i, \Omega$ 的长周期变化研究已有200多年, 近年来所得结果在系数最大的几项是互相接近的, 系数和周期都已准到四到五位有效数字; 而且讨论的时间也越来越长。本文引用的法国拉斯卡的结果, 是以公元2000年初起算, 向前算了二千万年; 向后算

了一千万年。共给出80个周期项，精度也很高。最近英国和加拿大小组所讨论地球轨道在三百万年内的变化[8]，研究更精确，主要结果也一致。因此，对古气候学要求而言，这几个轨道根数的变化(包括 $\epsilon, \phi$ )不需要更精确讨论了。

2. 影响太阳对地球总辐射量的因素还有不少。与地球公转轨道有关的有 $n$ ，它是日地平均距离(即 $AU$ )的函数。在几百万年时间范围内可暂不考虑(周期项振幅小于 $10^{-5}$ )，但更长时期的变化必需考虑。与地球大小和形状有关的参数有 $a, e'$ (或 $b$ )，它们也是在变化的，但还不清楚是否有长周期变化，需要进一步同大地测量学一起研究。另外还有太阳辐射常数 $I_0$ ，它随着太阳活动强弱在变化；现在只知道有短周期(11年，22年等)变化，还要进一步研究它是否有长周期变化。

3. 大气作用问题。同样的太阳辐射量随着大气透明度，干湿程度，厚度等不同而有不同的气候学效果。故必需同时改虑地球大气的长期演变问题，这要同气象学家们共同研究了。

### 参 考 文 献

- [1] Milankovitch M. *Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen*, Borntraeger, Berlin, (1930).
- [2] Berger A. *Vistas in Astronomy*, Vol. 24, 103—122, (1980).
- [3] Berger A. et al (ed.), *Milankovitch and Climate*, D. Reidel Publishing Company, (1984).
- [4] Laskar J. *Astron. Astrophys*, Vol. 198, No. 1—2, 341—362, (1988).
- [5] Wisdom J.; Holman M. *Astron. J.* Vol. 102, No. 4, 1528—1540, (1991).
- [6] Kinoshita H. et al., *Proc. 23 th Japanese Symp. on celestial Mechanics*, P. 1—8. (1990).
- [7] Richardson D.L.; Walker C.F., *J. Astronautical Science*, Vol. 37, 159—178, (1987).
- [8] Quinn T.R. et al: *Astron. J.* Vol. 101, 6, 2287—2305, (1991).

### Abstract

On the relation between the long periodic variation of earth's orbit and paleoclimatic changes.

Yi Zhaohua

(Department of Astronomy, Nanjing University)

This article gives the concrete relations (15) and (24) between the earth's orbital elements and the annual or semiannual global radiation on the whole terrestrial surface by means of a more exact method. Then it discusses the connections of paleoclimatic changes with the variations of earth's orbit, based on the new results of astronomical study. In addition, it analyses the remain problems of this subject.

# 气候——天、地、生的综合产物

崔 启 武

王 汉 杰

(中国科学院沈阳应用生态研究所)

(南京林业大学)

## 提 要

本文利用资源系统动力学原理分析了地球生态系统中的资源利用和物能转换关系,指出发生在大气圈、生物圈、陆圈和水圈四大子系统之间的热量、水分和矿物物质流通规律和平衡状况是影响气候环境变化的直接因子。因而,现实的气候特点是天、地、生综合作用的产物。

人类活动及日益增加的人口密度是干扰和破坏天、地、生综合平衡的制约因素,努力增加和保护森林资源是维持和恢复系统良性循环较为可行和有效的方法。

## 一、引 言

气候是人类生存环境的重要组成部分。气候是变冷还是变暖?是变好还是变坏?发生变化的原因何在?人类在气候变化的进程中扮演了怎样的角色?变化以后的气候对整个地球生态环境以致人类生存有何影响?这些问题不仅仅是生态学家和气候学家所关心的学术问题,而且涉及到人类社会的每一个成员,成为当前国际社会经济和政治领域讨论的热门话题。

从生态学的观点来看,生态环境包括各种生物生存的大气环境,土壤环境和物质资源(包括水和各种矿物营养元素)环境,生态学就是研究生物有机体与它们的外界环境相互作用的科学。从气候学的角

度看,气候的形成和变化受天文(地球轨道参数、日地关系等)、地理(经纬度、海拔高度和海陆分布)和生物(动物、植物,特别是人)多种因素的影响,天、地、生是相互联系相互影响而又不可分割的整体,而现实气候特点则是天、地、生综合作用的产物,应该指出,这里所说的“天”主要是指包围地球表面的“大气圈”,因为大气圈间接反映了天文因素,它对地球生命活动的影响最有效,最直接。天、地、生三个子系统的关系如图1所示,如果进一步把地圈分开为水圈和陆圈,把生物圈中的人和动物、植物分开,各子系统间的关系如图2所示,图中三角形阴影区反映了气候现象受天、地、生综合作用的影响。

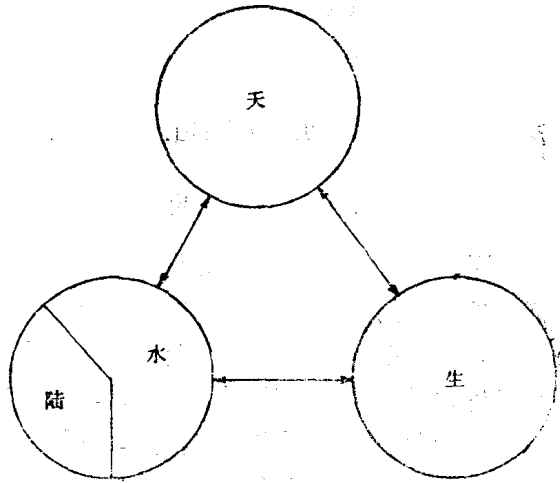


图1 天地生相互作用示意图

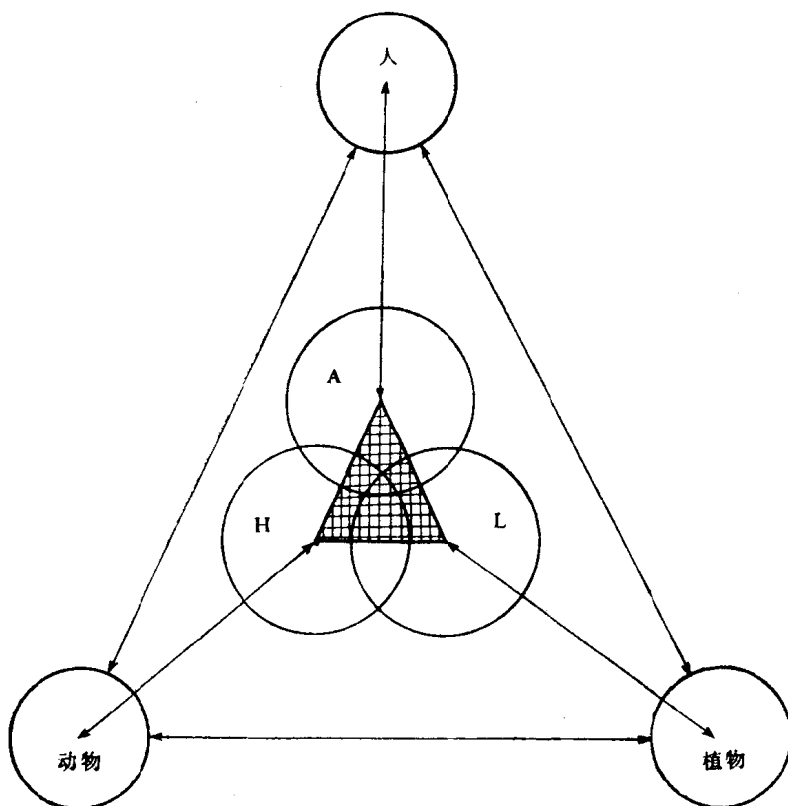


图2 生物圈和非生物环境(大气(A)、水体(H)和陆地(L))

## 二、天、地、生综合作用的一般机理

大气圈、水圈、陆圈和生物圈是构成地球生态系统的四大子系统，来自外界的太阳能量是维持系统运转的原始动力。分析发现，各子系统之间的相互作用事实上只有三条主要通道：即热量、水分和矿物物质通道，图3和表1中分别列举了这些通道，其中的字母组合规定为：第一个字母表示通道的性质（热量用H，水分用W，矿物物质用M），第二和第三个字母分别表示通道的起、止点（或源与汇）。如MAB字组表示从大气圈(Atmosphere, 简记为A)向生物圈(Biosphere, 简记为B)的矿物物质(M)输送，HLH字母组表示从陆圈(Lithosphere, 简记为L)向水圈(Hydrosphere, 简记为H)的热量(H)输送，余类推。矿物物质成分包括C, N, S, P, Ca, Mg, K等化学元素，大气中是以CO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub>等气体为主，土壤中则以N, P, K等肥料元素为重点。

各子系统之间相互作用和相互影响就表现在它们之间不断进行的热量、水分和矿物物质的输送和交换。发生在大气圈中的大气环流和各种局地环流，发生在海洋中的各种水平和垂直洋流，发生在海陆之间的水分循环等，都是他们特有的形式，这种交换或快或慢，或大或小，或狭窄或广阔，或平衡或偏颇，会有各种不同情况。表1列举了四个子系统间可能出现的各种输送方式，影响传输的因子，其间平衡状况和涉及的学科领域等。当然这里未能囊括其全部，但由表中项目可以看出，这一研究课题涉及的学科门类十分广泛，由此可见，现代气候学问题要研究天、地、生的综合作用机理，需要全球性的多学科科研合作。

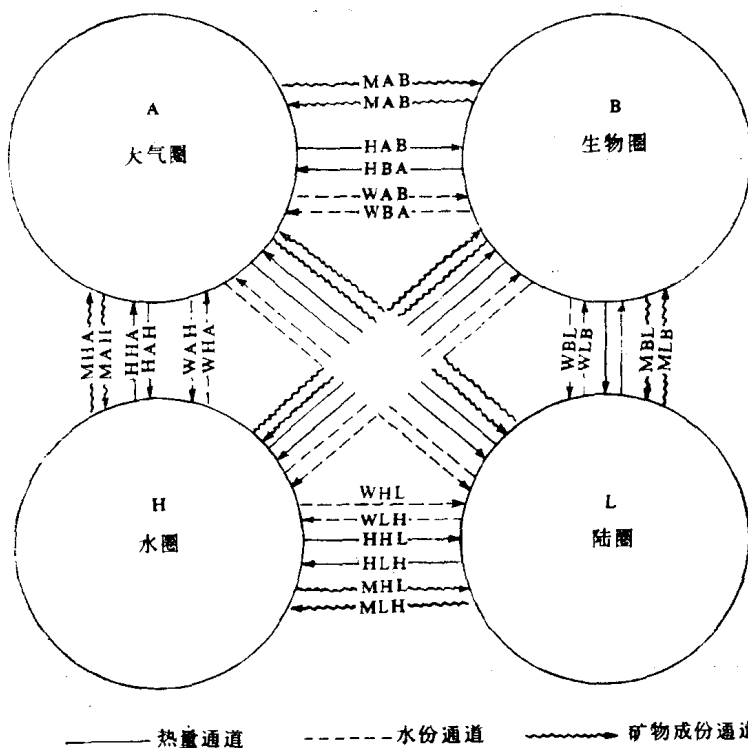


图3 地球生态系统中各子系统之间的作用通道

表1中所列情况还告诉我们，热量和水分的交换过程基本上是平衡的。几种主要的不平

表1 天地生相互作用的机理

通道	符号	主要流通方式	影响因子	平衡情况*	涉及学科
热	HAB	通过大气的太阳辐射加热对流，湍流过程造成的显热交换等	生物热储量变化，群落结构，大气成份，云天状况，湍流特征	二者基本平衡用“E”表示（下同）	边界层气象学 辐射热力学 群落生态学 动物生态学等
	HBA	湍流是热交换、长波热辐射	生物体表面温度长波发射率，其余同上		
量	HAL	同 HAB	地面粗糙度、地表反射率，云天状况，湍流特征等	E	边界层气象学 地理学 地貌学 辐射热力学等
	HLA	同 HBA	同上		
通	HAH	同 HAB	水体温度，流动特征水体表层湍流特征	E	边界层气象学 海洋气象学
	HHA	同 HBA	同上		
道	HBL	植物根系与土壤之间的显热交换，研究少，无实际意义	土壤温度，根系分布植物生长活力，植物根系表面温度等	E	植物生态学 土壤学
	HLB	同 HBL	同上		



续表

通道	符号	主要流通方式	影响因子	平衡情况*	涉及学科
热 量 通 道	HBIH	水生生物与水环境间的显热交换、研究少,无实际意义	生物体形状,表面温度,水体温度,流动性等	E	海洋生物学
	HHB	同 HBO	同上		
	HHL	季风,海陆风形成的热量水平输送,通过水份通道的潜热输送	大气环流,局地环流,水份循环机制等	E	季风气象学 水文学
	HHH	同 HGL	同上		
水** 份 通 道	WAB	大气降水(伴有矿物成份输送,如酸雨)	天气系统,大气环流等各种降雨机制	E	天气学, 大气物理学 植物生理学
	WBA	动植物呼吸蒸腾	生物活力,水份供应情况		
	WAL	同WAB	同WAB		
	WLA	地表蒸发	土壤结构,色泽,风速,温度,气压等影响蒸发的因子	E	天气学 大气物理学 土壤学
	WAH	同WAB	同WAB		
	WHA	海洋蒸发	水体蒸发速度,天气条件、风速、波浪高度等	E	海洋气象学 海洋学
	WBL	动植物排泄,死亡以后还原	生物活力	WLB> WBL地下水 过渡开采	陆地生态学 陆地水文学
	WLB	动植物直接取水人工取水,生活用水	生物活力,工农业发展情况,社会政治制度		
	WBH	水生生物排泄,死亡后还原	生物活力	E	海洋生物学 海洋学
	WHB	水生生物取水,人工海水淡化	同WLB		
矿物成份 通道C, Cu,Mg, P,K, S,N,N <sub>2</sub>	WLIH	地表径流,水汽水平输送,潮涨潮落,森林砍伐,水土流失	风速、风向、溶冰,溶雪、降水量,降水强度,兴修水利	E	水文学 水利学 冰川学 季风气象学
	WHL	水汽水平输送,潮涨潮落	同上		
	MAB	酸雨降水,植物光合作用吸收CO <sub>2</sub> ,空气净化植物吸收大气中的有害物质	降雨强度,生物活力,植被盖度	MBA>>MAB 空气污染, 温室气体增加, 地球大气增暖	酸雨气象学 大气化学
MBA	森林火灾,人工砍伐,烧荒,人工排放烟尘,工业污染,动植物呼吸	政治社会制度,工农业发展水平,污染治理能力			

\* 指全球长时期平均意义下的平衡情况

\*\* 此间总伴有潜热交换,亦可称第二热量通道