

黄山、天目山第四纪冰期气候

傅逸贤

提 要

本文计算了黄道倾斜的温度灵敏度参数,其中考虑了天顶角反馈、生物反射率反馈和潜热反馈。经过计算表明,在有冰雪反射率的情况下,天顶角反馈的重要性,以及反馈机制在米兰柯维奇冰期理论中的重要作用。这种全球性的冰期气候背景对中国东部气候的影响是十分重要的。本文还以第四纪冰期庐山气候的研究为基础,进一步计算了冰期黄山、天目山的温度与冰雪质量平衡,指出冰期低温的春秋季节十分有利于降雪和冰雪积累的。文中经过理论推算得出第四纪中国东部山地的雪线高度;它与地理地质学的考察结果很相近。最后计算得出,在有利地形条件下,黄山500年的冰雪净积累厚度可达200米以上,天目山也接近于100米左右。

时间尺度二、三百万年左右的第四纪,在地球史上占有重要地位。当今人类文明的许多重大基本建设,诸如:国土整治、流域开发、矿物勘探、工程建设以及地下水的开发利用等,都必须考虑第四纪冰川作用的因素。它不仅与生产需要有关;而且在理论上,古生物学、人类学、构造地质学、地史学、地理学、气候学以及考古学等许多学科也与第四纪研究有密切的关系。

第四纪发生了多次的冰期、间冰期相交替的气候波动。近年来,关于岩石圈运动、海面升降、海底沉积变化以及生物迁移等方面的深入研究,都证实第四纪具有显著的气候变化。在这时期,极地与东亚大陆的气候变化尤为敏感。数十年来,这方面的研究工作很多。三十年代,李四光^[1]首先提出庐山地区有第四纪冰川流行。它在国内外地学界都有较大的影响,争论颇多,肯定的和否定的都有,成为半个世纪以来东亚第四纪研究的一大难题。

早期, Wissmann, H.v.,^[2]根据对气温、降水资料的分析,认为长江中下游地区的气候是有利于冰川发育的。七十年代,冈本庆文^[3]也赞同这个观点,他还在日本南部找到广泛的古冰川遗迹。景才瑞^[4]在庐山冰川遗迹方面有重要的新发现,并且阐明了

1985年2月收到,9月10日收到修改稿

庐山古冰川形成的气候条件。八十年代, 杨怀仁等^[5]进一步提出“冷槽”理论, 从而为冰川的存在提供了有力的依据。但是多年来一些学者, 如Barbour, G. B.^[6]等也提出了许多相反意见或保留意见。本文认为, 庐山冰期气候的问题, 是多学科的综合问题。早在三十年代, 李四光就已指出: “若夫阐明全国冰期之经过, 及全世界冰期之所由发生, 则有待于地理、地质、古生物、人类、气象及大地物理专家合力为之, 庶可睹其大成焉。”为此, 本文在文献[7]的基础上, 试图在多学科之间进行渗透, 并结合天文学来进一步探讨黄山、天目山的古气候环境, 分析其形成原因。

第四纪气候波动对自然环境的影响极为深远, 它可直接、间接地影响到现在的工农业生产。有的学者甚至认为, 人类本身的发展与第四纪冰期是有关的。因此, 对冰期的研究实际上已超出了气候学的意义。

一、第四纪冰期的黄道倾角温度灵敏度参数的计算

黄山、天目山古气候是与当时的全球气候背景有密切关系的。

地球运行的三个天文参数: 黄道倾斜、偏心率和岁差, 在地质时代的变化对太阳辐射及相应的全球气候是有一定影响的。早在三十年代, 波兰学者米兰柯维奇^[8]认为太阳辐射的这种变化是造成第四纪冰期、间冰期交替的重要原因。后来这方面的研究工作很多, 因而逐渐建立了米兰柯维奇冰期理论。也有的学者^[9]认为, 它的变化较小, 不足以产生冰期、间冰期。1976年Hays, J. D.等^[10]根据海底岩芯所取得的古气候记录, 发现其时间序列和地球轨道要素的变化有显著的对应关系。他的工作受到各方面的重视。所以近年来, 有的学者^{[11][12]}试图以考虑反馈机制的气候模式来进一步探讨这三个参数的变化对全球气候的影响。

在米兰柯维奇机制中, 黄道倾斜是较为重要的一个地球运动轨道参数, 它的变化对气候的影响较大。黄道倾斜的温度灵敏度参数, 对北半球平均而言, 可写为:

$$\beta_{\delta} = \delta_0 \int_0^1 \frac{\partial T_s}{\partial \delta} dx \quad (1)$$

其中 δ_0 : 现在的黄道倾斜, T_s : 近地面气温, $x = \sin \varphi$, φ : 地理纬度, δ : 各个时期的黄道倾斜。

在建立纬圈的年平均能量平衡方程中, 如果考虑黄道倾斜、温度以及云量的扰动作用, 有

$$Q_{abs}[\delta, T_s(\delta), A_c[T_s(\delta)]] - F[T_s(\delta), A_c[T_s(\delta)]] = D[T_s(\delta)] \quad (2)$$

其中 Q_{abs} : 吸收太阳辐射, A_c : 云量, F : 射出红外辐射, D : 极向潜热输送通量的散度。上式可写为如下形式

$$\frac{\partial Q_{abs}}{\partial \delta} + \frac{\partial Q_{abs}}{\partial T_s} \frac{dT_s}{d\delta} + \frac{\partial Q_{abs}}{\partial A_c} \frac{\partial A_c}{\partial T_s} \frac{dT_s}{d\delta} - \left[\frac{\partial F}{\partial T_s} + \frac{\partial F}{\partial A_c} \frac{dA_c}{dT_s} \right] \frac{dT_s}{d\delta} = \frac{dD}{dT_s} \frac{dT_s}{d\delta} \quad (3)$$

由于

$$Q_{abs} = SP(x)(1 - \alpha)/4 \quad (4)$$

式中 S : 太阳常数, α : 地—气系统反射率, $P(x)$: 射入辐射经向变化的分布函数。因此, (3)式等号左面第一项为

$$\frac{\partial Q_{\text{abs}}}{\partial \delta} = \frac{S}{4} (1 - \alpha) \frac{dF}{d\delta} - \frac{S}{4} P \frac{\partial \alpha}{\partial \mu} \frac{d\mu}{d\delta} \quad (5)$$

其中 $\mu = \cos Z$, Z : 天顶角; (5)式等号右边第一项是倾角变化的基本气候作用力, 第二项为天顶角反馈。

(2)式中的极向潜热输送通量的散度 D , 其参数化可按布德科(Будыко)的公式, 写为

$$D = v(\bar{T}_s)(T_s - \bar{T}_s) \quad (6)$$

\bar{T}_s : 半球平均温度, v : 大型涡旋系数。考虑其扰动作用, 则为

$$\frac{dD}{dT_s} = v_0 \left(\frac{dT_s}{dT_s} - 1 \right) + \frac{dv}{dT_s} (T_s - \bar{T}_s) \quad (7)$$

其中 v_0 为大型涡旋系数的现代值。

公式(3)中, 如果近似认为 $\frac{\partial Q_{\text{abs}}}{\partial A_c} = \frac{\partial F}{\partial A_c}$, 即云量的可能变化对太阳吸收辐射和红外辐射的扰动作用, 基本上相互抵消; 并且把(4)式代入(3)式, 考虑冰反射率反馈和生物反射率反馈, 经过改写则有

$$\left[\frac{dF}{dT_s} + \frac{S}{4} P \frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right] \frac{dT_s}{d\delta} = \frac{\partial Q_{\text{abs}}}{\partial \delta} - \frac{dD}{dT_s} \frac{dT_s}{d\delta} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial T_s} &= \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right)_{\text{ice}}, & \varphi > 50^\circ \text{N} \\ &= \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right)_{\text{ice}} + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right)_{\text{bio}}, & \varphi: 40^\circ \sim 50^\circ \text{N} \\ &= \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right)_{\text{bio}}, & \varphi < 40^\circ \text{N} \end{aligned} \quad (9)$$

$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right)_{\text{ice}}$: 冰反射率反馈, $\left(\frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right)_{\text{bio}}$: 生物反射率反馈。

以(5)式代入(8)式, 对(7)式作适当的变换, 再代入(1)式, 并进一步推导可得到包括有三种反馈作用(天顶角反馈、生物反射率反馈、潜热反馈)的温度灵敏度参数, 写为

$$\beta_\delta = \frac{\delta_0 \int_0^1 \frac{\partial Q_{\text{abs}}}{\partial \delta} \left[v_0 + \frac{dF}{dT_s} + \frac{S}{4} P \frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right]^{-1} dx}{1 - v_0 \int_0^1 \left\{ 1 - \frac{1}{v_0} \frac{dv_0}{dT_s} (T_s - \bar{T}_s) \right\} \left[v_0 + \frac{dF}{dT_s} + \frac{S}{4} P \frac{\partial \alpha}{\partial T_s} \right]^{-1} dx} \quad (10)$$

将公式(5)和(8)代入(1), 则灵敏度参数为

$$\beta_s = \frac{\delta_0 \int_0^1 \frac{S}{4} (1-\alpha) \frac{dP}{d\delta} dx}{dF/dT_s} \quad (11)$$

将(11)式称为模式1, (10)式称为模式2, 在(10)式 $\partial Q_{abs}/\partial \delta$ 中, 令 $\partial \alpha / \partial u = 0$ 的情况, 称为模式3。对这三种模式进行计算, 其中一部分数值取自文献[13], 一部分取自[11], δ 值从 23.45° 到 22.45° 。计算结果如表1。

表1 不同模式灵敏度参数的对比

模 式	计 算 者	本 文 作 者	Cess和Wronka
模 式 1		-0.9°C	-1.5°C
模 式 2		+19.4°C	+19.5°C
模 式 3		+9.5°C	+9.3°C

由于本文取用的资料与Cess和Wronka的不完全相同, 因而两者计算结果有一定差别, 但基本上还是较为接近的。必须指出, 按模式1和2或3的计算结果, 其正负号是不同的; 而按米兰柯维奇的要求应当是正的。这说明在这三种反馈机制综合作用之下, 情况截然相反, 而且数值变化很大, 灵敏度可提高几倍。布德科^[14]根据能量平衡模式, 考虑了冰雪反射率反馈机制也得出在瑞士境内阿尔卑斯山第四纪群智、民德、里斯、武木等四个冰期期间温度急剧下降的结果。模式2考虑了三种反馈机制, 而在模式3中只考虑生物反馈和潜热反馈; 但是两者的灵敏度相差一倍之多, 可见在有冰雪反射率反馈的情况下, 天顶角反馈的作用是十分重要的。本文对各种模式进行数值计算的目的, 主要是可以在相互比较中了解不同反馈机制所起的作用大小。Cess和Wronka在他们的论文中也提到这个问题。

行星轨道参数的长期变化, 过去有许多的研究工作。五十年代van Woerkom在现代天体力学微分方程中, 进一步考虑了木星、土星运动的影响, 求解得出黄道倾斜的计算公式如下

$$\begin{aligned} \delta = h^* &- \sum_i C_i N_i \cos[(-S_i' + k)t + \beta_i + \alpha] \\ &- \sum_{ii} C_{ii} N_i^2 \cos 2[(-S_i' + k)t + \beta_i + \alpha] \\ &- \sum_{ij} C_{ij} N_i N_j \cos[(-S_i' - S_j' + 2k)t + \beta_i + \beta_j + 2\alpha] \\ &+ \sum_{ii} C_{ii}' N_i N_i \cos[(-S_i' + S_i')t + \beta_i - \beta_j] + \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $h^* = h - \sum_i N_i^2 \left\{ \frac{1}{2} a_i (a_i - 1) \tanh + \frac{1}{4} (2a_i - 1) \cosh \right\}$, $\alpha = 1.965^\circ$, $h = 23.401^\circ$,

$k = 50.44''$, 解微分方程的数值常数: C_i 、 N_i 、 S_i 和 β_i 等可查表(见文献[15]中的p. 119, 表1)。 C_{ii} 和 C_{ij} 为复杂的运算公式(参见文献[15])。t为热量年的时间。

在第四纪冰期中，黄道倾斜比现在小，大约在 $22.30^{\circ} \sim 22.25^{\circ}$ 之间。根据Berger, A. L.^[16]等的计算表明，在夏半年情况下，黄道倾斜小，高纬度太阳辐射量是减少的；但是在赤道附近的纬度则有所增加。对于 $30^{\circ}N$ 而言，如果再综合考虑其他两个天文要素(偏心率和岁差)的影响，在第四纪冰期的热量夏半年太阳辐射可比现在少 15.990 瓦/米²[17]，即约比现在少3.6%左右。显然，这对于当时的气候是有一定影响的。然而，本文在上面已经指出，如果考虑了三种反馈机制，这种影响则是较大的。因此，当时在世界范围内各地温度较现在明显偏低，这无疑是重要原因之一。例如，中欧平均温度比现在低 $15-16^{\circ}C$ (Kaiser, K., 1969)，北半球温带则低 $8-13^{\circ}C$ (Schwarzbach, M., 1963)等等。在冰期全球性低温的气候背景下，很显然，中国东部山地的温度也是很低的。

二、黄山、天目山第四纪冰期气候

本文以冰期庐山温度的研究结果为基础^[7]，再根据黄山、天目山的现在温度对于庐山的现在温度之间的回归关系，推算得出冰期黄山、天目山的温度。其结果如下：

表2 冰期温度与现在温度的比较(单位： $^{\circ}C$)

月	黄 山			天 目 山			庐 山		
	冰 期	现 在	温 差	冰 期	现 在	温 差	冰 期	现 在	温 差
1	-10.8	-3.1	-7.7	-10.5	-2.7	-7.8	-8.5	-0.4	-8.1
2	-9.6	-1.7	-7.9	-9.5	-1.5	-8.0	-7.3	1.0	-8.3
3	-4.6	2.7	-7.3	-4.2	3.0	-7.2	-2.3	6.0	-8.3
4	-1.8	7.9	-9.7	-1.3	8.9	-10.2	0.5	11.4	-10.9
5	-0.2	11.7	-11.9	0.5	12.8	-12.3	2.1	15.6	-13.5
6	2.8	14.9	-12.1	3.5	16.5	-13.0	5.1	19.2	-14.1
7	4.7	17.7	-13.0	5.4	20.0	-14.6	7.0	22.6	-15.6
8	4.2	17.3	-13.1	4.9	19.2	-14.3	6.5	21.9	-15.4
9	1.8	13.7	-11.9	2.4	15.0	-12.6	4.1	17.9	-13.8
10	-2.2	8.9	-11.1	-1.8	9.8	-11.6	0.1	12.2	-12.1
11	-6.0	3.9	-9.9	-5.7	4.7	-10.4	-3.7	7.2	-10.9
12	-8.4	-0.5	-7.9	-8.1	0.0	-8.1	-6.1	2.5	-8.6
年	-2.5	7.8	-10.3	-2.0	8.8	-10.8	-0.2	11.1	-11.6
年较差	15.5	20.8	-5.3	15.9	22.7	-6.8	15.5	23.0	-7.5

从表2可知，冰期黄山、天目山、庐山温度年较差分别为 $15.5^{\circ}C$ 、 $15.9^{\circ}C$ 、 $15.5^{\circ}C$ 。而现在分别为 $20.8^{\circ}C$ 、 $22.7^{\circ}C$ 、 $23.0^{\circ}C$ 。两者的差别主要是由于冰期夏季月份的温度明显较低造成的。必须指出，冰川的形成主要不在于很低的冬季温度，而在于较低的夏季温度和较弱的太阳总辐射。上表指出，冰期庐山夏季月份温度很低，而且冰期黄山、天目山的温度更低。显然，对冰雪面加热很弱的湍流热交换是十分有利于冰雪保存过夏

的。另一方面，夏季温度低，无疑春秋季节温度更低，因而湿度较冬季为大的春秋季节，可有较为充沛的固体降水。

关于年平均温度的降温情况，不同作者估算得出中国东部不同地区冰期降温的情况，列于表3。

表3 降 温 的 比 较

地 区	降温的度数	作 者
北京附近周口店*	12—15 C	徐仁 (1974)
天目山平溪900米	10—12.5 C	刘金陵 ^[17] (1977)
天目山冰坑450米	8—12 C	徐馨等 ^[5] (1977)
渭南(西安南)	12—14 C	浦庆余 ^[18] (1978)
黄 山	10.5 C	本文作者 (1986)
天 目 山	11.0 C	本文作者 (1986)
庐 山	11.5	本文作者 (1986)

*徐仁，〈第四纪冰川地质学习资料〉地质力学所，1974

各个作者虽然以不同的方法进行估算，但所得的结果则是相近的。

我国西藏东南部现代海洋型冰川，例如波密古乡三号冰川、阿扎冰川和恰青冰川等，其地理纬度都在30°N附近。表4列举西藏东南部波密古乡三号现代冰川的温度以及第四纪冰期黄山、天目山和庐山的温度。

表4 相近纬度、不同地区、不同时期的温度比较(单位：℃)

时期、地点	经 度	纬 度	海拔高度	1 月	4 月	7 月	10 月
现代波密	96°00'E	25°55'N	2530米	-1.1	8.2	16.5	9.9
古乡三号冰川			3950米	-7.7	1.6	8.3	1.7
冰期黄山	110°09'E	30°08'N	1980米	-10.8	-1.8	4.7	-2.2
冰期天目山	119°25'E	30°21'N	1493米	-10.5	-1.3	5.4	-1.8
冰期庐山	115°59'E	29°35'N	1165米	-8.5	0.5	7.0	0.1

从上表的比较中可知，黄山、天目山、庐山的1、4、7、10月的平均温度都比西藏东南部现代冰川相应时期的温度明显偏低。前面已指出，冰期夏半年温度低既不利于夏季半年的冰雪消融，又有利于春秋季节有较多的固体降水。所以通过与相近纬度的西藏东南部现代冰川的温度比较也可以认为，黄山、天目山、庐山等山地第四纪冰川的发生是完全可能的。这也是合乎近年来地质、地理学家实地观察的结果^[4]。在有的论文^[19]中，也认为冰期庐山冰川等是属于海洋型冰川。熊毅^[20]根据胶体矿物的风化规律，从更新世一些沉积物细粒部的矿物成份，曾推论第四纪有剧烈的气候变化，而这种剧热的变化只有用冰川流行才能得到解释。

三、中国东部山地第四纪冰期雪线高度的推断

气候雪线(又称理论雪线)是固态降水与冰雪消融的零平衡线。从现代气候学观点来说,影响雪线高度的气候要素,除了温度与降水之外,还有短波、长波的辐射作用等。气候雪线主要是普遍性、抽象性的概念,雪线高度还与具体地形条件有关。一般认为,地形雪线的高度是低于气候雪线的,所以纬度、地形、云量、水汽与周围环境等均可影响雪线高度。

冰雪质量平衡方程可写为

$$I = S - M_s \quad (13)$$

其中 I : 冰雪质量平衡, S : 固态降水量, M_s : 热量夏半年冰雪消融量。冰期冬半年温度较低,其冰雪消融量可略而不计。崩解、风吹等不属于本文讨论范围。很显然,按雪线定义, $(S - M_s) = 0$ 的高度即雪线高度。

夏半年冰雪消融量公式为

$$M_s = (1/A)[R(a + bS_1)(1 - \alpha_i) - F_n - P - LE - Q_s - Q_r - Q_M] \quad (14)$$

其中 A : 冰的融化潜热, R : 天文辐射, a 和 b : 与大气透明状况以及云的辐射特性等有关的经验系数, S_1 : 日照百分率, α_i : 冰面反射率。冰期春秋季节温度低、降雪量大,冰期夏季温度也较低,所以反射率大。 F_n : 冰面有效辐射, P : 湍流热通量, L : 汽化潜热, E : 冰面水汽相变的量, Q_s : 冰面与其下层之间的热传导, Q_r : 液态降水含热量, Q_M : 冰碛层增温耗热。 F_n 、 P 、 LE 、 Q_s 、 Q_r 和 Q_M 等各项的值可正可负,因此其代数与 $R(a + bS_1)(1 - \alpha_i)$ 相比较可略去,故将(14)式代入(13)式后,(13)式可近似写为

$$I = S - \frac{1}{A} R(a + bS_1)(1 - \alpha_i) \quad (15)$$

本文根据中国东部山地的气候资料,得出云量、降水、温度等随海拔高度的变化情况以文献[7]为基础,按物理气候学方法,计算得出黄山、天目山冰雪质量平衡的情况。

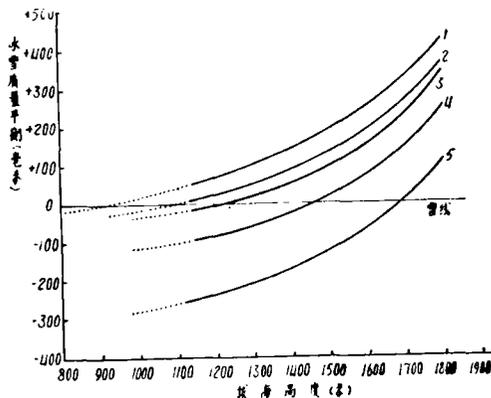


图1 冰雪质量平衡随高度的变化曲线

从表5可以看出,在同一地形,同一反射率条件下,冰雪质量平衡是随海拔高度的增加而增大。在闭塞地形、反射率大的情况下,冰雪质量平衡是较大的。由于资料限制,仅用这三个站点的冰雪质量平衡,分析曲线,如图1所示。将曲线向下延伸,便可得出质量平衡为零时的海拔高度。很显然,这就是该地形、反射率情况下的雪线高度。从图1可以看到,在地形作用比

率为0.70、冰雪面反射率为0.75的情况下,雪线高度大约是1225米。它与文献[21]中,

从地质地理学方法所得出的庐山冰期雪线高度极为接近。在文献[22]中,张家诚指出当时的雪线高度为800米左右。从上图可以看到,在地形比较闭塞、冰雪反射率较大情况下,雪线高度可以低于1000米。但在地形作用比率为0.85、反射率为0.75的情况下,只有海拔高度为1840米的黄山才可能出现雪线。

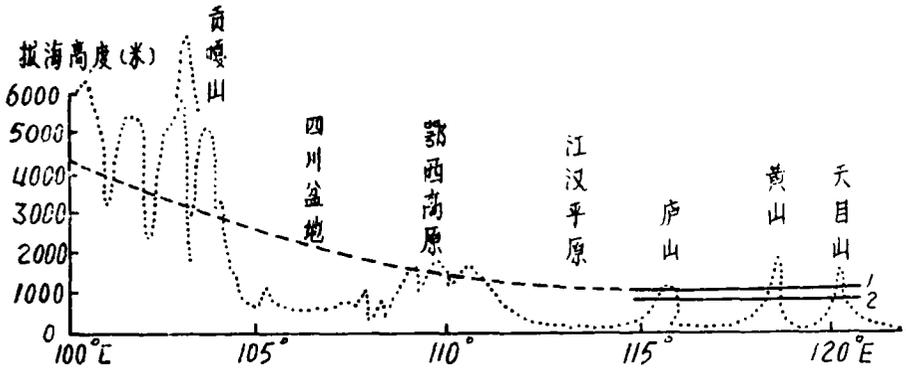


图2 庐山冰期雪线高度

实线: 1,朝北坡地的雪线高度;2,朝北较闭塞谷地的雪线高度

虚线: 引用杨怀仁的雪线高度[21]

点线: 东西剖面的地形

图2是东西剖面(30°N附近)庐山冰期雪线高度图。

四、结 语

在二、三十万年前,青藏高原及横断山脉等的海拔高度比现在低,这有利于西南水汽流的向东发展。冰期海面高度低于现在几十米,甚至一百米,因而它在某种程度上有加大海拔高度的影响。当然,一般认为冰期冬季气候较为干燥,这是不利于形成冰川的一面。然而,春秋季节低温可产生较大的固态降水,则是有利于冰雪积累的一方面。而且当时消融较弱,因此在地形闭塞、反射率大的情况下,冰雪长年积累是相当可观的,见下表。

表6 冰期各种情况下长年冰雪积累的厚度(米)

情 况	$R_T=0.80$			$R_T=0.85$			$R_T=0.70$			$R_T=0.75$			$R_T=0.85$		
	$\alpha_i=0.80$			$\alpha_i=0.80$			$\alpha_i=0.75$			$\alpha_i=0.75$			$\alpha_i=0.75$		
山 地	黄 山	天 目 山	庐 山	黄 山	天 目 山	庐 山	黄 山	天 目 山	庐 山	黄 山	天 目 山	庐 山	黄 山	天 目 山	庐 山
100年冰雪 积累厚度	42.8	18.8	7.7	36.8	12.7	1.5	33.8	9.6	0	26.3	2.0	0	11.3	0	0
500年冰雪 积累厚度	214.0	94.0	38.5	184.0	63.5	7.5	169.0	48.0	0	131.5	10.0	0	56.5	0	0

根据天文学计算表明,三个天文参数变化的周期是很长的。因而它们在一、二千年

内的变化是极为微弱的,天文辐射的变化自然也极为微弱。所以其相应的气候可持续较长时期。一旦有冰雪积累,对于维持较长时间尺度的冰期显然是有利的。

参 考 文 献

- [1] 李四光,冰期之庐山,中国第四纪冰川,56—110,科学出版社,1975。
- [2] Wissmann, H. v., The Pleistocene Glaciation in China, Bull. of Geol. Soc. of China, Vol. 17, No. 2, 145—168, 1937.
- [3] Okamoto, Y. (冈本庆彦), Piedmont Glaciation in the Taiga Forest of Ice Ages in Japan and Northern Italy, in 24th IGC, Section 12, 175—186, 1972.
- [4] 景才瑞等,庐山西麓第四纪冰川作用表皮构造的新发现,科学通报,25卷,9期,410—411,1980。
- [5] 杨怀仁,徐馨等,中国东部第四纪自然环境的演变,南京大学学报,1980,1,121—144。
- [6] Barbour, G. B., Analysis of Lushan Glaciation Problem, Bull. of Geol. Soc. of China, Vol. 13, No. 4, 647—656, 1937.
- [7] 傅逸贤,中国东部山地第四纪冰期气候的初步分析,中国科学, B辑, 第11期, 1050—1056, 1980。
- [8] Milankovitch, M., Mathematische Klimatlehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen, in Handbuch der Klimatologie, Verlage Brontrager, Berlin, p. 176, 1930.
- [9] Saltzman, B. and Vernekar, A. D., Note on the Effects on Earth's Orbital Radiation Variation on Climate, J. Geophys. Res., Vol. 76, 4195—4197, 1971.
- [10] Hays, J. D., Imbrie, J. and Shackleton, N. J., Variations of the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages, Science, Vol. 194, 1121—1132, 1976.
- [11] Cess, R. D. and Wronka, J. C., Ice Ages and Milankovitch Theory: A Study of Interactive Climate Feedback Mechanism, Tellus, Vol. 31, No. 3, 185—192, 1979.
- [12] Suarez, M. J. and Held, I. M., The Sensitivity of an Energy Balance Climate Model to Variations in the Orbital Parameters, J. Geophys. Res., 84, 4825—4836, 1978.
- [13] Sellers, W. D., Physical Climatology, University of Chicago Press, p. 272, 1965.
- [14] Budyko, M. I., Climatic Change, American Geophysical Union, Printed by Waverly Press, Inc. Baltimore, Maryland, p. 102, 1977.
- [15] Vernekar, A. D., Variations in the Insolation Caused by Changes in Orbital Elements of the Earth, The Solar Output and its Variation, Edited by Oran R. White, Colorado Associated University Press, Boulder, Colorado, 115—130, 1977.
- [16] Berger, A. L., Long-term Variation of Caloric Insolation Resulting from Earth Orbital Elements, Quaternary Res., 9, 139—167, 1978.
- [17] 刘金陵,叶宜芹,上海浙江某些地区第四纪孢粉组合及其地层和古气候上的意义,古生物学报,16卷,1期,1—11,1977。
- [18] 浦庆余,全国第四纪冰川与第四纪地质学术论文摘要汇编,98—99,中国地质学会编,1978。
- [19] 李吉均等,西藏东南部冰川为最新研究,兰州大学学报,1975,2,111—123。
- [20] 熊毅,由更新统沉积物的胶体矿物分析试论第四纪气候,地质学报,32卷,1—2期,28—38,1952。
- [21] 杨怀仁,雪线变化与中国第四纪冰期,第四纪冰川与第四纪地质论文集,5—15,地质出版社,1984。
- [22] 张家诚等,气候变迁及其原因, p. 27, 科学出版社, 1976。

ANALYSIS OF CLIMATE IN THE HUANGSHAN AND TIANMUSHAN MOUNTAINS DURING THE QUATERNARY ICE AGE

Fu Yixian

ABSTRACT

Parameters of temperature sensitivity to the ecliptic inclination are computed, with feedbacks of various zenith angles, of vegetation albedo and of latent heat being considered. Computation reveals the significance of feedback due to zenith angle in the presence of ice or snow cover and the important role played by the feedback mechanism in the Milankovitch ice-age theory. The background global macroclimate in the ice age yields immense influence on the climate of East China. On the basis of the investigation of the Quaternary Period climate accomplished for the Lushan Mountain, similar computations are performed on temperature and balance of mass of snow and ice for the Huangshan and Tianmushan, indicating that the low temperatures during spring and autumn are favorable for snowfall and ice accumulation. Altitude of the snow line over East China during the Quaternary Period is theoretically inferred and found to be consistent with that determined by geological study. It is further found that, with their advantageous topography, net accumulation of more than 200 meters of snow or ice may be attained over the Huangshan in 500 years, and about 100 meters for the Tianmushan.