

二维能量平衡模式中大气温度对 二氧化碳增温效应的响应^{*1}

巢纪平¹ 李耀锟^{2,3}

CHAO Jiping¹ LI Yaokun^{2,3}

1. 国家海洋环境预报中心,北京,100081

2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京,100029

3. 中国科学院研究生院,北京,100049

1. *National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China*

2. *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

2008-12-08 收稿,2009-07-08 改回.

Chao Jiping, Li Yaokun. 2010. Response of atmospheric temperature to CO₂ warming effect in a 2-dimensional energy balance model. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(2):147-152

Abstract A 2-dimensional climate model is established, which considers the radiant energy transfer process. Through using it, the relationship between the ice line latitude and concentration of CO₂ as well as the curve of mean global surface temperature change with concentration of CO₂ are analytically gained. And then an explicit analysis has been made and some interesting results have been obtained. It is suggested that if the concentration of CO₂ increases from the level of 280×10^{-6} in pre-industrial era to 700×10^{-6} , the ice line will recede northward by several latitudes (in the North Hemisphere); while the concentration continues to increase, there will be a quick receding and even no ice covers the earth eventually. Accompanying with this, the mean global surface temperature will rise, with a slowed down increasing velocity before the level of 700×10^{-6} reached but an accelerating rate after 700×10^{-6} . To verify the impact of albedo, the different albedo values ranged from 0.1 to 0.32 are tested. It is found that with the change of albedo the results vary little. The model does not have much sensitivity to albedo. According to the calculation, the warming effect incited by CO₂ seems to tend to approach a quasi-saturated state in the current situation, that is, the climate system will not transform fast to a warming globe due to the increase of CO₂. A more realistic circumstance might be that the global temperature will rise robustly after an andante increasing. According to the computational results, this critical value is near 700×10^{-6} . However, that does not mean the warming effect of CO₂ can be ignored. It can be implied from the results that the climate will be in a very warm state and the temperature will rise robustly after exceeding the critical value.

Key words CO₂ warming effect, 2-dimensional energy balance model, Mean global surface temperature, Ice line latitude, Albedo

摘要 利用一个考虑了辐射能传输的二维能量平衡气候模式,解析地分析了二氧化碳浓度改变后冰界纬度的变化,得到了冰界纬度随 CO₂ 浓度变化的关系以及全球平均温度的变化曲线。结果表明,当 CO₂ 浓度由工业革命前的 280×10^{-6} 增加到 700×10^{-6} 时,冰界仅后退(北半球向北)几个纬度;当 CO₂ 的浓度继续增加时,冰界纬度会加速向极地退缩,直至出现全球无冰覆盖的现象。同样地,当 CO₂ 浓度由 280×10^{-6} 增加到 700×10^{-6} 时,全球地表平均温度虽然在增加,但增加的速率很小,并且增加的速率在减小,而当大于 700×10^{-6} 之后,温度增加的速率会快速增大,温度将加速上升。对不同反照率进行敏感性试验,发现当反照率从 0.1 到 0.32 时,结果并没有显著地改变,即结果对反照率的变化并不敏感。这一计算结果表明,在

* 资助课题:国家海洋局海洋领域海洋应对气候变化业务化研究。

作者简介:巢纪平,主要从事热带大气海洋动力学等方面的研究。E-mail:321019chao@sina.com

目前的状态下,由 CO₂ 引起的增温作用似乎处于变化很小的准饱和状态,即目前气候不会因为 CO₂ 浓度的增加而迅速变暖。较为实际的情形可能是大气温度在缓慢增加到一定程度后才会迅速升高。这并不意味着可以忽视 CO₂ 的增温效应,因为根据计算结果,这个临界值大概在 700×10^{-6} 左右,当 CO₂ 浓度增加到超过临界值之后,气温会剧烈上升,气候将会处在一个非常温暖的阶段。

关键词 CO₂ 增温效应,二维能量平衡模式,冰界纬度,全球地表平均温度,反照率

中图法分类号 P423

1 引言

工业革命以来,全球平均温度总体上在升高,根据 IPCC AR4 (2007) 的结论,增加的数值大约为 0.76 °C。在导致全球平均温度升高的众多因素中,温室气体含量增加被认为是非常重要的一个原因(马晓燕等,2005)。

温室气体浓度增加对全球变暖的贡献目前似乎得到共识,通过吸收向上的长波辐射,温室气体可以使地球保持在适当的温度区间内,过多的温室气体则会使地球温度升高。水汽和 CO₂ 是最主要的温室气体。人类生产、生活活动排放的 CO₂ 是造成全球气候变暖的一个非常重要的原因。

目前 CO₂ 的浓度已经从工业革命前的 275×10^{-6} — 285×10^{-6} 增加到 2005 年的 379×10^{-6} 。而近 40 年来,其增加率约为每年 1.4×10^{-6} ,与此相应,全球平均温度升高了 0.4—0.5 °C (IPCC AR4, 2007),而 20 世纪 90 年代又是整个 20 世纪最暖的 10 年(符淙斌等,2003)。人们普遍认为,随着 CO₂ 浓度的不断增加,全球平均温度会继续升高,但升高的速率会有多大,目前似乎尚无定论。这是一个非常复杂的问题,涉及到许多物理过程,其中许多还没有被深入了解和认识,仍然需要通过多种途径,应用多种方法进行研究。例如通过耦合气候模式进行预估(IPCC AR4, 2007),如果 CO₂ 浓度由现在的水平(379×10^{-6})增加 1 倍,温度可增加 3—6 °C,海平面将上升 1 m 以上。这是一个很惊人的,并且能够威胁到人类生存的预估。

刘玉芝等(2002)研究了 CO₂ 温室效应的饱和程度后指出,大气 CO₂ 的温室效应并没有达到饱和。只是在 15 μm 这一强吸收带中心确已达到饱和。这似乎表明 CO₂ 的增温潜力仍然存在。但是他们没有讨论在这样的情况下,CO₂ 浓度继续增加会对温度增加的速率有什么样的影响。考虑到关于 CO₂ 浓度增加对温度升高速率的作用,这类研究尚不是

很多,因此这是一个值得用不同方法进一步研究的问题。

巢纪平等(1979)参照郭晓岚(1973)提出的辐射能传输的简化方案,曾发展了一个考虑长波辐射的垂直传输过程和热量垂直及水平交换过程的二维能量平衡模式。本文将应用该模式,从 CO₂ 浓度增加这一方面,初步定量地研究温度升高对 CO₂ 浓度增加的响应。

2 理论模式和方法

巢纪平等(1979)对热量方程进行经圈平均后得到方程

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum_j \alpha_j' \rho_c (A_j + B_j - 2E_j) + \alpha'' \rho_c Q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} = \alpha_j' \rho_c (A_j - E_j) \quad (2)$$

$$\frac{\partial B_j}{\partial z} = \alpha_j' \rho_c (E_j - B_j) \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = \alpha_j'' \rho_c Q \quad (4)$$

方程中 K 、 k_t 分别为水平和垂直湍流交换系数, T 为空气温度, α' 、 α'' 分别为对波长为 λ_j 的长波辐射吸收系数以及对太阳辐射的平均吸收系数; A_j 、 B_j 分别为在波长 $\Delta\lambda_j$ 区间内向下和向上的长波辐射通量; Q 为太阳辐射通量, E_j 为在 $\Delta\lambda_j$ 内的黑体辐射能量; ρ_c 是吸收介质密度。将方程写在球坐标下,方程(1)可以化简为

$$\frac{K}{a^2} \frac{\partial}{\partial x} (1-x^2) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum_j \alpha_j' \rho_c (A_j + B_j - 2E_j) + \alpha'' \rho_c Q = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{1}{4\sigma T^3} \frac{\partial E}{\partial z}$$

式中 a 为地球半径, $x = \sin\theta$, θ 为纬度。

按照郭晓岚(1973)的方案进行简化,即将整个吸收谱分为强弱两部分,在这两部分分别计算平均

吸收系数(下标 s 表示强吸收区,下标 w 表示弱吸收区)

$$\alpha_{s,w} = \frac{\int_{s,w} \alpha_\lambda E_\lambda d\lambda}{E_{s,w}} = \frac{\int_{s,w} \alpha_\lambda G_\lambda d\lambda}{G_{s,w}}$$

式中

$$E_{s,w} = \int_{s,w} E_\lambda d\lambda$$

$$G_{s,w} = \int_{s,w} G_\lambda d\lambda$$

$$G_{s,w} = A_{s,w} + B_{s,w}$$

$$E_s = rE \quad E_w = (1-r)E \quad E = \sigma T^4$$

这样,计算辐射吸收可以化简为

$$\begin{aligned} & \sum_j \alpha_j' \rho_c (A_j + B_j - 2E_j) = \\ & \alpha_s \rho_c (A_s + B_s - 2E_s) + \\ & \alpha_w \rho_c (A_w + B_w - 2E_w) \end{aligned}$$

r 表示在强吸收区中的吸收介质吸收的辐射能占总辐射能的份数, σ 为史蒂芬-玻尔兹曼常数。

进行适当的简化。最终可以得到

$$D \frac{\partial}{\partial x} (1-x^2) \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \zeta} (k_t + k_r) \frac{\partial E}{\partial \zeta} - N^2 E = -\tilde{S} \zeta_0 Q + \tilde{S} \bar{Q}_0 \left[r \left(1 + \frac{\alpha''}{\alpha_w} \right) - e^{-\zeta_0} \int_0^1 \Gamma S(x) dx \right] \quad (6)$$

边界条件为

$$\zeta = 0,$$

$$\int_0^1 E_0 dx = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\alpha''}{\alpha_w} \right) \bar{Q}_0 \quad (7)$$

$$\zeta = 1,$$

$$(k_t + k_r) \frac{\partial E}{\partial \zeta} - N^2 \int_0^1 E d\zeta =$$

$$-\frac{\alpha'' N^2}{\alpha_w \zeta_0} E_0 + \tilde{S} \bar{Q}_0 \left[\frac{\alpha''}{\alpha_w} + (1-\Gamma) e^{-\zeta_0} \right] S(x) \quad (8)$$

其中

$$\zeta = \frac{\alpha''}{\alpha_s \zeta_0} \int_z^\infty \alpha_s \rho_c dz$$

$$\zeta_0 = \frac{\alpha''}{\alpha_s} \int_0^\infty \alpha_s \rho_c dz$$

$$D = \frac{\zeta_0^2 K}{(\alpha'' \rho_c)^2 a^2} \quad k_r = \frac{8r\sigma \bar{T}^3}{\alpha_s \rho_c}$$

$$\tilde{S} = \frac{4\zeta_0 \sigma \bar{T}^3}{\alpha'' \rho_c} \quad N^2 = \frac{8(1-r)\alpha_w \rho_c \zeta_0^2 \sigma \bar{T}^3}{(\alpha'' \rho_c)^2}$$

式中, ζ 为光学厚度, ζ_0 为大气总的光学厚度。 Γ 为地表反照率, \bar{Q}_0 是大气上界接收的净的太阳辐射通量。与 k_t 相比, k_r 可以称为辐射交换系数, N^2 是弱吸收区的牛顿辐射冷却系数。 \bar{T} 为地球的平均温

度。 $S(x)$ 的定义为

$$\bar{Q}_0(x) = \bar{Q}_0 S(x) \quad \int_0^1 S(x) dx = 1$$

3 问题的解

参照 Budyko(1969),反照率取为

$$\Gamma(x, x_s) = \begin{cases} \Gamma_1 = 0.62 & x > x_s \\ \Gamma_0 = 0.32 & x < x_s \end{cases}$$

式中 $x_s = \sin \theta_s$, θ_s 为冰界纬度,冰界由温度 -10°C 定义。

令

$$H = \int_0^1 \Gamma(x, x_s) S(x) dx$$

$$h = \Gamma(x, x_s) S(x)$$

同样使用勒让德多项式进行计算,将解展开成

$$E(x, \zeta) = \sum_n E^{(n)} P_n(x) \quad (9)$$

对于纬向平均的大尺度温度结构,在此只取前两项作为近似,为了保证满足侧边界条件,根据 Sellers(1969)的说明只取偶数项,即解对赤道对称,这时侧边界条件自然满足。当 $n=0$ 时,

$$E^{(0)}(\zeta) = a^{(0)} e^{-q_0 \zeta} + b^{(0)} e^{q_0 \zeta} + \tilde{S}^* \bar{Q}_0 \left\{ \frac{\zeta_0}{q_0^2 - \zeta_0^2} e^{-\zeta_0 \zeta} + \frac{1}{q_0^2} \left[e^{-\zeta_0} H^{(0)} - r \left(1 + \frac{\alpha''}{\alpha_w} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

$$b^{(0)} = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{\alpha''}{\alpha_w} \right) \bar{Q}_0 + \frac{\tilde{S}^* \bar{Q}_0}{2q_0^2} \left[r \left(1 + \frac{\alpha''}{\alpha_w} \right) - e^{-\zeta_0} H^{(0)} - \frac{\zeta_0 q_0}{q_0 + \zeta_0} \right] \quad (11)$$

$$a^{(0)} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\alpha''}{\alpha_w} \right) \bar{Q}_0 + \frac{\tilde{S}^* \bar{Q}_0}{q_0^2} \left[r \left(1 + \frac{\alpha''}{\alpha_w} \right) - e^{-\zeta_0} H^{(0)} - \frac{\zeta_0 q_0^2}{q_0^2 + \zeta_0^2} \right] - b^{(0)} \quad (12)$$

当 $n \neq 0$ 时(计算中我们只取到 $n=2$),

$$E^{(n)}(\zeta) = a^{(n)} e^{-q_n \zeta} + b^{(n)} e^{q_n \zeta} + \tilde{S}^* \bar{Q}_0 \frac{\zeta_0}{q_n^2 - \zeta_0^2} e^{-\zeta_0 \zeta} S^{(n)} \quad (13)$$

$$b^{(n)} = \frac{\tilde{S}^* \bar{Q}_0}{2} \left[\frac{(q_n^2 - q_0^2) \text{ch}(q_n)}{q_n} + \frac{q_0^2}{q_n} \right]^{-1} \times \left\{ \left[-\frac{\zeta_0}{q_n^2 - \zeta_0^2} \left(\frac{q_n^2 - q_0^2}{q_n} e^{-q_0} + \frac{q_0^2}{q_n} \right) + \frac{\alpha''}{\alpha_w} + \frac{q_0^2}{q_n^2 - \zeta_0^2} + e^{-\zeta_0} \frac{q_n^2 - q_0^2}{q_n^2 - \zeta_0^2} \right] S^{(n)} - e^{-\zeta_0} h^{(n)} \right\} \quad (14)$$

$$a^{(n)} = -\tilde{S}^* \bar{Q}_0 \frac{\zeta_0}{q_n^2 - \zeta_0^2} S^{(n)} - b^{(n)} \quad (15)$$

和的,其效果是从工业革命前的 280×10^{-6} 到按目前值加倍后的 758×10^{-6} ,冰界纬度仅向后退缩了不到 5 个纬度。但是伴随着 CO_2 浓度的继续增加,到 758×10^{-6} 后冰界纬度的退缩将加速,甚至出现全球无极冰覆盖的气候。

图 1 的结果在一定程度上表明,虽然 CO_2 浓度的增加会导致全球平均温度的上升,但是并不会像耦合模式中模拟的那么严重,这是因为 CO_2 的温室效应增温的饱和作用看来是存在的,耦合模式在某些方面可能放大了 CO_2 浓度增加的影响。

在这 3 个浓度下地面温度的分布(图 2)可以看出,在目前的 CO_2 浓度下,地面温度的分布是接近观测的,工业革命前的结果也在合理的范围之内。为了与实况比较,在图中给出 1951—1980 年及 1981—2005 年的地面气温观测值纬向平均后的曲线(资料取自 NCEP 的再分析资料),由此可见,这两个时段的全球经圈平均地面气温的经圈分布并无明显变化,与 CO_2 当前值 379×10^{-6} 算得的理论温度相比,只在副热带到中纬度,观测值略高于理论值,它大致上相当于 CO_2 浓度为 400×10^{-6} 的理论值。从这一比较可以认为这个简单模型,在一定程度上能够反映 CO_2 的增温效应。

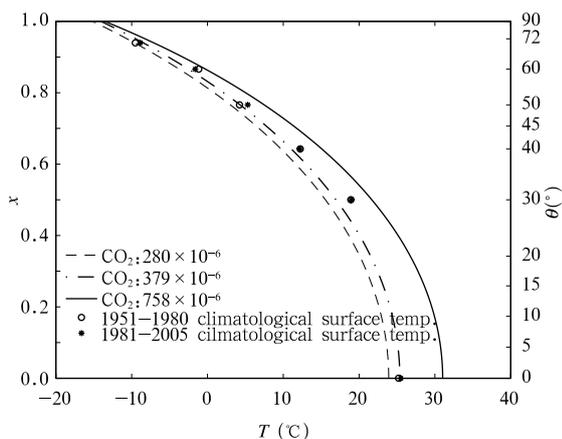


图 2 不同 CO_2 浓度下地面温度的分布和地面观测资料

Fig. 2 The calculated surface temperature compared with the observations

5 讨论

在上面的计算中,冰界以南的反照率是按照早期 Budyko(1969)取的 0.32 计算的,事实上冰界以南并非全为荒漠,植被的覆盖将会减小反照率,为此我们取反照率分别为 0.10、0.15、0.20、0.32,重新

计算了冰界纬度的变化(图 3)。

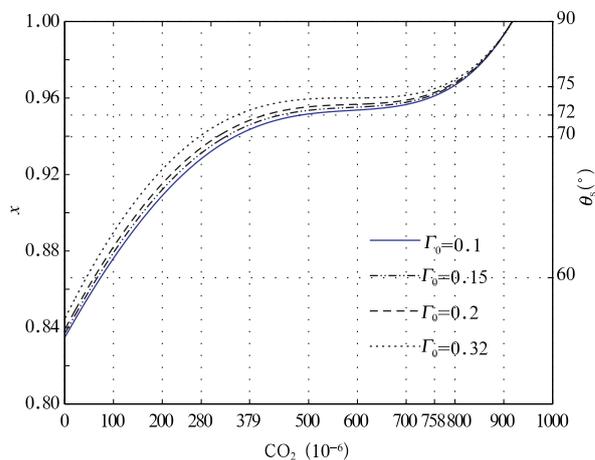


图 3 不同反照率时冰界纬度随 CO_2 浓度的变化
Fig. 3 Changes in the ice line latitude with the CO_2 concentration under different surface albedo

由图可见,当所取的反照率比较小时,冰界也稍有北退,但幅度不大,从 300×10^{-6} 到 750×10^{-6} 这一浓度区间内冰界向北退缩十分缓慢,这和反照率取 0.32 的图 1 结果并无实质性差别。图 4 是反照率为 0.15 时地面温度随纬度的分布,这一结果较反照率为 0.32 时略有改进,在中、高纬度更接近观测值。在赤道附近则高于观测值,这是由于反照率减小后,吸收长波辐射通量增多造成的。

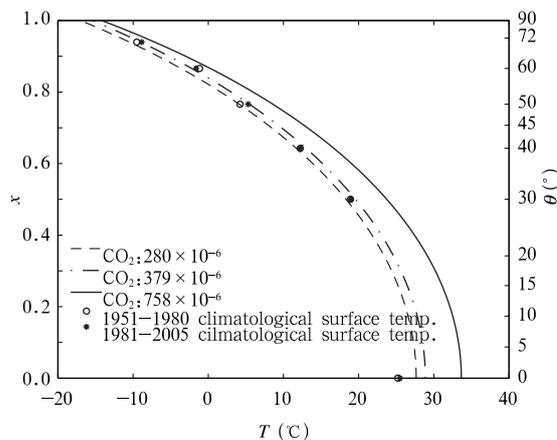


图 4 反照率为 0.15 时地面温度的纬度分布(说明同图 2)

Fig. 4 The calculated surface temperature (under the albedo of 0.15) compared with the observations

图 5 给出不同反照率时全球地面平均温度随 CO_2 浓度的变化。虽然取不同的反照率,全球地面

平均温度将随 CO_2 浓度增加而增高,但 CO_2 浓度在 300×10^{-6} — 750×10^{-6} 这一区间内增加时,温度升高得很慢,这和图 3 冰界纬度向极地退缩的现象是相应的。为了进一步说明这一现象,图 6 给出了文章给定的几个反照率值时全球地面平均温度随 CO_2 浓度变化率,即温度增加的梯度,由图可见,在上述 CO_2 浓度范围内,温度增加的速度较小,并且增速是逐步减小,大概在 600×10^{-6} 以后增速开始增加。

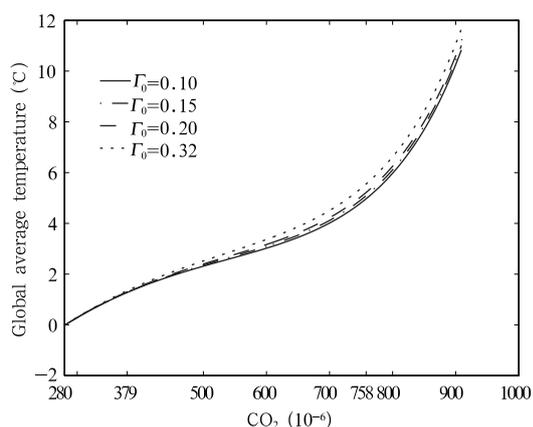


图 5 不同反照率时全球地面平均温度随 CO_2 浓度的变化

Fig. 5 Changes in the global mean surface temperature with the CO_2 concentration under different surface albedo

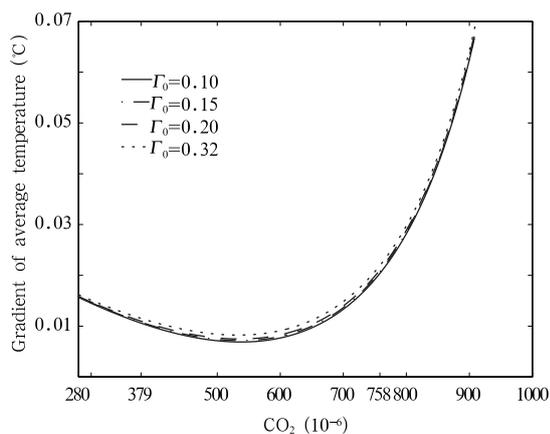


图 6 不同反照率时全球地面平均温度随 CO_2 浓度的变化率

Fig. 6 The varying rate of the global mean surface temperature with the CO_2 concentration under different surface albedo

6 结 论

本文应用二维能量平衡模式,以冰界和全球地面平均温度为指标,计算了不同反照率的情况下二

者和 CO_2 浓度增加的关系。结果表明,在 300×10^{-6} 到 750×10^{-6} 这一浓度区间内, CO_2 的增温效应无论是对冰界纬度还是对全球地面平均温度的影响都不大。由此也可认为目前 379×10^{-6} 浓度下的 CO_2 的增温效应正处于准饱和状态,即使 CO_2 浓度在目前的情况下加倍,冰界纬度也并不会向北退缩得很厉害, CO_2 的增温效应在现阶段似乎并没有人们想象得那么迅速。但这个模式计算结果也表明当 CO_2 的浓度再继续增加到 760×10^{-6} 以上时,冰界纬度将会迅速向北退缩,甚至出现全球无冰现象。

虽然在长期气候形成变化中,辐射过程是最重要的,但在这个能量平衡模式中,对辐射吸收谱的考虑过于简化(只考虑谱带的总效应),没有考虑能量经圈输送的动力过程,因此由这一简化的辐射能量平衡模式得到的结果只具有参考性。

CO_2 等温室气体的增温效应导致的全球变暖将会危及到人类社会的可持续发展。这将是人类面临的严重挑战,同时,这也是一个亟待解决的科学难题,因此百家争鸣地应用各类模式、通过各种途径来研究这一问题,都不会是多余的。

参考文献

- 巢纪平,陈英仪. 1979. 二维能量平衡模式中极冰一反照率的反馈对气候的影响. 中国科学, 12: 1198-1207
- 陈英仪,巢纪平. 1988. 对“二维气候能量平衡模式中辐射和动力学参数化的一些看法”的回答. 大气科学, 12(1): 106-112
- 崔克强. 1997. 边界层湍流通量参数化方案. 应用气象学报, 8(增刊): 43-49
- 符淙斌,董文杰,温刚等. 2003. 全球变化的区域响应和适应. 气象学报, 61(2): 245-250
- 刘玉芝,肖稳安,石广玉. 2002. 论大气 CO_2 温室效应的饱和度. 地球科学进展, 17(5): 653-658
- 马晓燕,石广玉,郭裕福等. 2005. 温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫作用. 气象学报, 63(1): 41-48
- Budyko M I. 1969. The effect of solar radiation variation on the climate of the earth. Tellus, 21: 611-619
- IPCC. Climate Change 2007. Synthesis Report. 2007. Cambridge, UK: Cambridge University Press
- J Atmospher Science, 32: 1301-1307
- Kuo H L. 1973. On a simplified radiative-convective heat transfer equation. Pure Appl Geophy, 109: 1870-1876
- North G R. 1975. Analytical solution to a simple climate model with diffusive heat transport. J Atmos Sci, 32: 1301-1307
- Sellers W D. 1969. A global climatic model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. J Appl Meteor, 8: 392-400