

清華大學

中國經濟研究中心



學術論文

全球变暖的宏观经济模型

钟笑寒 李子奈

清华大学中国经济研究中心

No.200002

2000年2月

Working Paper

National Center for Economic Research

At

Tsinghua University, Beijing

论文摘要

本文对全球变暖的减排对策及其经济-环境影响进行了理论分析。全部的分析基于一个连续时间的动态模型。模型是在考虑代际关系的背景之下提出来的,属于通行的代表性代理人模型一类。模型还和全球变暖问题研究上广泛运用的综合评价模型(IAMs)在结构和功能上保持一致,不同的是,作者做了大胆的简化和抽象,既保证模型的解析可推导性,又不失其对实践的指导意义。同时,模型的某些方面,如引入气温的效用,也是过去的模型所不具备的。作者运用动态最优化的数学方法,在对基本模型进行推导的基础上,讨论了该动态系统的稳态解和最优路径等理论问题。本文的研究对我国制定全球变暖的对策有一定的启发意义。

关键词: 全球变暖, 减排, 代表性代理人模型, 动态最优化

全球变暖的宏观经济模型

钟笑寒 李子奈

清华大学中国经济研究中心

No.200002

2000年2月

作者简介

钟笑寒: 博士, 讲师; 李子奈, 教授, 博士生导师, 通讯地址: 清华大学中国经济研究中心, 邮编: 100084, E-mail: zhongxh@em.tsinghua.edu.cn; lizinai@mail.tsinghua.edu.cn。

A Macroeconomic Model on Climate Change

Zhong Xiaohan, Li Zinai

National Center of Economic Research at Tsinghua University
(NCER)

Abstract

This paper conducts a theoretical analysis on emission-reduction decisions dealing with global warming and their effects on economy-environment system. This analysis is entirely based on a continuous-time dynamic model. Reflecting considerations of intergenerational relationship, the model is classified to the widely accepted ‘representative agent model’. The models also follow the structures and functions of frequently used Integrated Assessment Models (IAMs) of global warming. Beyond this, the author boldly proceeds abstracts and simplifications to balance mathematical tractability and practical reasonability. Other features such as utility measuring of temperature also distinguish the models. Using mathematical methods of dynamic optimization, the author deduces the basic models and discusses theoretical problems such as the steady state and optimal path of the system. The results have some implications to national strategies dealing with climate change.

Key Words: Global Warming, Emissions Reductions, Representative Agent Model, Dynamic Optimization

全球变暖的宏观经济模型

钟笑寒 李子奈

清华大学中国经济研究中心

1 问题的提出

工业革命以来，向大气排放的 CO_2 等温室气体日益增多，温室气体浓度不断增加。温室气体的人为排放，主要是由于人类活动中化石燃料的大量燃烧引起的，另外森林植被的人为破坏也减少了对大气中 CO_2 的吸收。根据测算，目前大气中温室气体的浓度比工业革命开始时的浓度增加约 25%，如果这一趋势持续下去的话，在下一世纪末，温室气体的浓度将是工业革命前的 2 倍，此后还会继续上升。科学研究表明，温室气体浓度上升极有可能引起全球平均气温的持续上升，并由此导致一系列严重后果，如海平面上升，农业收成、森林植被和水资源分布的巨大变化以及风暴天气等自然灾害增加，等等。九十年代以来，全球变暖问题引起了世界范围的关注。1992 年，155 个国家签署了《联合国气候变化框架公约》。在此基础上，1997 年底召开的第三次缔约方大会又达成了旨在减少发达国家温室气体排放（简称“**减排**”）的“京都协议”。这标志着减缓与适应气候变化的对策已由理论探讨逐步过渡到具体实施阶段，对建立完整有效的“减排”对策评价方法也提出了更加迫切的要求。

综合评价模型就是常见的一类评价方法。所谓**综合评价模型**（Integrated Assessment Models, or **IAMs**），就是从与全球气候变化有关的社会经济问题的整体机制入手，综合包括自然和社会科学上与之相关的原理性知识而构造的，对 CO_2 等温室气体的排放（或减排）对策进行综合评价的模型。模型的规模一般都比较庞大，需要采用计算机进行模拟运算。最早的全球变暖模型是 Nordhaus 在 1991 年提出的，在此基础上发展而来的 DICE（the Dynamic Integrated model of Climate and the Economy）模型（[1]）具有广泛的影响力。目约有 20 个开发和使用较活跃的模型。在我国，具有代表性的有清华大学核研院开发的 I/O-INET 模型等。

本文提出的模型和综合评价模型在结构和功能上是一致，不同的是，作者的模型主要用于理论分析而非模拟计算。为此，模型做了大胆的简化和抽象，既保证模型的解析可推导性，又不失其对实践的指导意义。同时，模型的某些方面，如引入气温的效用，也是过去的模型所不具备的。作者运用动态最优化的数学方法，在对基本模型进行推导的基础上，得出了关于最优减排对策的一些具有重要理论意义的结论。

2 模型概述

模型的目标函数设定为代表性个人（也可理解为国家）的效用贴现总和。不同代之间不存在交叠，且每代人只生活很短时间，其瞬时的效用函数是拟线性（quasi-linear）形式的，它是由两部分相加组成的：一是普通“复合”商品的效用，直接用消费量的货币价值进行度量，二是气温对人类的直接效用，代表气候变化的影响。作为影响模型结果的重要因素，作者对效用函数的形式进行了较为详细的讨论。这也是模型与 DICE 等模型的区别所在，它使人们能从一个新的角度理解气候变暖对人类的影响。

模型将排放机制和减排机制做了区分。排放是生产部门产生的。生产是资本和劳动的

凹函数，且规模报酬不变。劳动的投入是无弹性的，每人每时期投入 1 单位劳动。生产部门产生的排放与其产出成正比，比例系数成为排放因子，在技术不变的情况下也假定为常数。

假定存在一个独立的减排部门，用减排函数来表示减排量和减排成本投入之间的关系。模型假定这个成本函数是凹的，只有一种投入——资本，如果有其他形式的投入，如劳动，也假定和资本是完全替代的，通过工资等形式转化为等量资本来看待。需要指出的是，这个减排成本函数是整个社会宏观的减排成本函数，减排活动具有公共品的性质，需要通过一定的机制来解决“投资不足”的问题。

增温机制是 DICE 模型的简化，假设温室气体的浓度可以很快稳定下来，温度上升与过去所有时期的排放量都有关系，同时由于温室气体可以逐步被吸收，温度也有自动衰减的机制； δ 为温度衰减因子。

3 模型分析

模型为：

$$\begin{aligned} \underset{c_t, G_t}{\text{Max}} U_0 &= \int_0^{\infty} \exp(-\theta t) [u(T_t) + c_t] dt \quad (1.1) \\ \text{s.t.} & \\ \begin{cases} \dot{k}_t = f(k_t) - c_t - G_t & (1.2) \\ \dot{T}_t = \beta[ef(k_t) - g(G_t)] - \delta T_t & (1.3) \\ T_0, k_0 \text{ 给定} \end{cases} & \end{aligned} \quad (1)$$

式中： T_t 为 t 时期气温； c_t 为 t 时期消费； k_t 为 t 时期资本存量； $f(\cdot)$ 为生产函数 $f' > 0, f'' < 0, f'(0) = \infty, f'(\infty) = 0$ ； G_t 为 t 时期的减排成本（或减排投入）； $g(\cdot)$ 为减排量-减排成本的函数关系 $g' > 0, g'' < 0, g'(0) = \infty, g'(\infty) = 0$ ； e 为排放因子。

模型求解如下。首先，构造当期值的 H 函数为：

$$H_c = u(T_t) + c_t + p_t [f(k_t) - c_t - G_t] - q_t \{ \beta [ef(k_t) - g(G_t)] - \delta T_t \}$$

式中 p_t, q_t 为 H 乘子，在我们的问题范围内，二者均为非负。其经济含义分别为资本品（以效用来衡量的）价格和气温下降（或上升）的(负)价格。根据极大值原理，经化简合并后得到（详细推导参见拙文[2]）：

$$\begin{cases} 1 = q_t \beta g'(G_t) & (2.1) \\ f'(k_t) - \theta = q_t \beta e f'(k_t) & (2.2) \\ \dot{q}_t = (\delta + \theta) q_t + u'(T_t) & (2.3) \\ \dot{k}_t = f(k_t) - c_t - G_t & (2.4) \\ \dot{T}_t = \beta [ef(k_t) - g(G_t)] - \delta T_t & (2.5) \end{cases} \quad (2)$$

(2.1)是关于减排成本的，减排成本 G_t 只与气温的“价格” q_t 有关，而与其他因素无关。因此不妨设 $G_t = \phi(q_t)$ ，则有： $\phi'(q_t) = -\frac{g'}{q_t g''} > 0$ ，即 G_t 与 q_t 正相关。另外，当 $q_t \rightarrow 0$ 时 $G_t \rightarrow 0$ ，当 $q_t \rightarrow \infty$ 时 $G_t \rightarrow \infty$ 。

(2.2)式是关于资本积累的。同样资本 k_t 只与 q_t 有关，可设 $k_t = \varphi(q_t)$ ，则有：

$\varphi'(q_t) = \frac{\beta e f'}{(1 - q_t \beta e) f''} < 0$ (其中 $1 - q_t \beta e > 0$ 是根据极大值的充分条件 H_c 对 f 为凹得到的, 这一充分条件使 q 不至于大到哪怕很少的生产都会因其产生的排放而成为负效果), 即 k_t 与 q_t 负相关。另外, 当 $q_t \rightarrow 0$ 时, $k_t \rightarrow f'^{-1}(\theta)$, 这恰好是不考虑全球变暖因素的修正黄金律; 当 $q_t \rightarrow \frac{1}{\beta e}$ 时, $k_t \rightarrow 0$ 。

将 G_t, k_t 的表达式带入(2.5)式, 得到只含有 T_t 和 q_t 的动态方程:

$$\dot{T}_t = \beta \{ e f[\varphi(q_t)] - g[\phi(q_t)] \} - \delta T_t \quad (2.5')$$

它和(2.3)式一起, 可求出系统的动态特征。

下面我们试着来研究系统的动态特征。这里的研究只能是定性的, 使用的是相位图 (the phase diagram) 的方法。研究 (T, q) 空间的相位图。首先看 $dT/dt = 0$ 的轨迹, 它由(2.5')式决定:

$$T \Big|_{dT/dt=0} = \frac{\beta}{\delta} \{ e f[\varphi(q)] - g[\phi(q)] \} \quad (3)$$

$$\text{当 } q \rightarrow 0 \text{ 时, } T \rightarrow \frac{\beta}{\delta} e f[f'^{-1}(\theta)] \equiv T_h; \text{ 当 } q \rightarrow \frac{1}{\beta e}, T \rightarrow -\frac{\beta}{\delta} g \left[\phi \left(\frac{1}{\beta e} \right) \right] \equiv T_l$$

并且,

$$\frac{dT}{dq} \Big|_{dT/dt=0} = \frac{\beta}{\delta} (e f' \varphi' - g' \phi') < 0$$

即轨迹向下倾斜, 说明稳态的温度随气温“负价格” q 的增大而减小, 这是容易理解的。

再看 $dq/dt = 0$ 的轨迹。由(2.3)得到:

$$q = \frac{-u'(T)}{\delta + \theta} > 0 \quad (4)$$

至于轨迹的斜率, 有:

$$\frac{dq}{dT} \Big|_{dq/dt=0} = \frac{-u''(T)}{\delta + \theta}$$

要想得到该轨迹斜率的符号, 必须对 $u''(T)$ 的正负进行讨论, 这对系统的动态特性至关重要! 我们分 $u''(T) < 0$, $u''(T) > 0$ 和 $u''(T) = 0$ 三种情况来进行讨论, 看看系统究竟有怎样不同的稳态和动态的特征。

3.1 $u''(T) < 0$

(1) 动态特征

此时 $\frac{dq}{dT} \Big|_{dq/dt=0} = \frac{-u''(T)}{\delta + \theta} > 0$ 。进一步的, 我们假定气温的效用函数具有形如:

$$u(T) = -\frac{m}{(T - T_{\min})^\alpha (T_{\max} - T)^{1-\alpha}} + u_0$$

的形式, 其中 m, α, u_0 均为常数, T_{\min}, T_{\max} 为待定的常数, 表明人类可以适应的气温的最

大范围（详见[2]），并把讨论限定在 $T_c < T < T_{\max}$ 的范围内以保证 $u'(T) < 0$ （即仅考虑全球变暖具有负效用）。于是：

$$u'(T_c) = 0, q|_{T=T_c} = 0; \quad u'(T_{\max}) \rightarrow -\infty, q|_{T=T_{\max}} \rightarrow +\infty$$

在画出相位图以前，我们对刚才定义的几个“临界”温度之间的大小关系做出适当的规定，以避免不必要的繁琐。我们规定： $T_{\max} > T_h > T_c > T_l$ ，第一个不等号容易理解，第二个不等号表示完全不减排下的“均衡”生产必定产生“不适宜”气温——全球变暖问题；第三个不等号表示完全不生产下的减排产生的“均衡温度”（实际不可能产生最终的均衡，因为当 $k_t = 0$ 以后就不能再减排了）不可能超过适宜人类生活的气温。这显然是一种比较合理的假设。

画出相位图如下（图 1）。根据相位图，排除不满足有关假定和极大值条件的 $q \rightarrow \frac{1}{\beta e}$ 和 $q \rightarrow 0$ 两类路径，我们得到了一条收敛于稳态解 (T^*, q^*) 的鞍点路径，稳态均衡点和最优时间路径都是存在且唯一的，其中的稳态解 (T^*, q^*) 定义为 $dT/dt = 0$ 和 $dq/dt = 0$ 两条轨迹的交点。最优路径上 T, q 正相关，即随着温度的上升（下降）， q 也随之上升（下降）。而我们知道， q 和 G 正相关（ $\phi' > 0$ ）、和 k 负相关（ $\phi' < 0$ ），因此在最优路径上，温度上升（下降），减排成本也上升（下降），而生产资本的存量则下降（上升）。

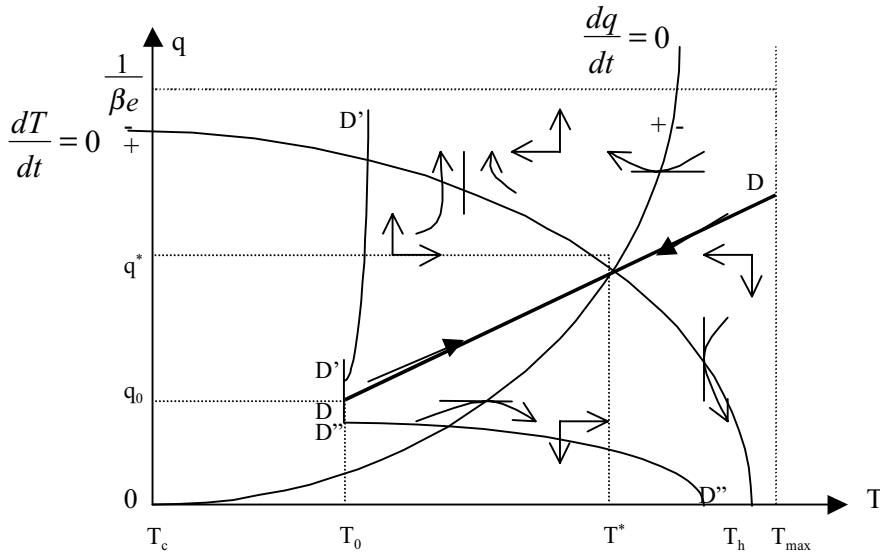


图 1 $u'' < 0$ 时 (T, q) 空间相位图

考虑初始值的确定。外生给定初始气温 T_0 ，通过唯一的最优路径，对应唯一的初始值 q_0 ，而这又决定了唯一的资本存量 k_0 及其变化率 $\frac{dk_t}{dt}|_{t=0}$ ，以及减排投入 G_0 。通过(2.4)再进一步决定了初始的消费水平 c_0 。再沿着最优轨道前进，则各变量在不同时间的值都得到了唯一的确定，特别值得注意的是此时消费的值也是唯一确定的。

3.2 $u''(T) > 0$

重新考察 $\frac{dq}{dt} = 0$ 的轨迹。现在 $\frac{dq}{dT} \Big|_{\frac{dq}{dt}=0} = \frac{-u''(T)}{\delta + \theta} < 0$ 。假定当 $T \rightarrow \infty$ 时， $u', u'' \rightarrow 0$ ，则 $q, \frac{dq}{dt} \rightarrow 0$ 。假定效用函数不规定温度下限，我们把分析的温度起点定在 T_l 上，并假定 $u'(T_l)$ 有限。画出 (T, q) 空间的相位图（图 2）。

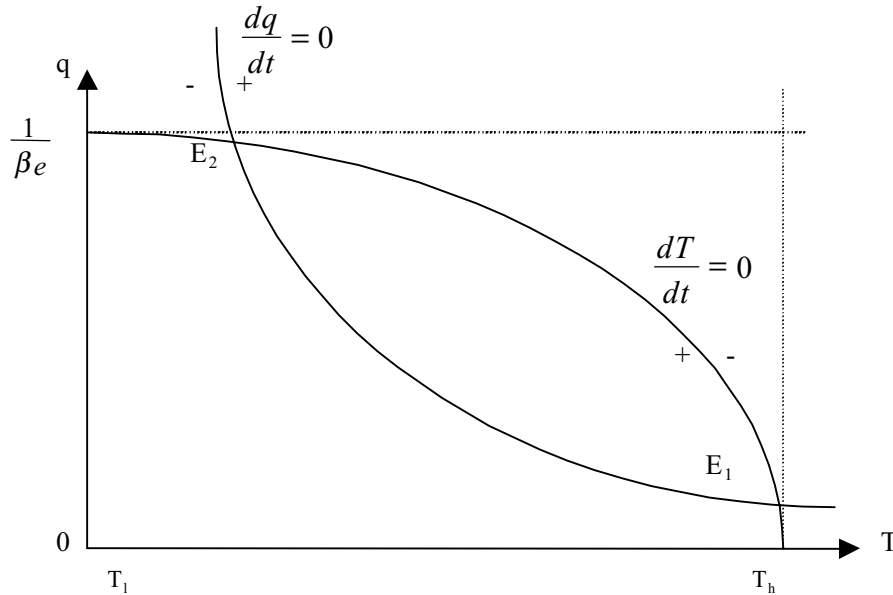


图 2 $u'' > 0$ 时 (T, q) 空间相位图

需要指出的是，图 2 只是示意性的，实际的相位图可能更为复杂。但即使从图中也可以看出存在**多重均衡**的可能。根据边界条件，可以肯定至少存在一个类似图中 E_1 的均衡点，而类似 E_2 的均衡点可能不存在（证明从略）。当然也可能存在多于 2 个的均衡点，例如曲线 $\frac{dT}{dt} = 0$ 在可行区域存在多个拐点时，可与曲线 $\frac{dq}{dt} = 0$ 多次相交。这些均衡（交）点根据 $\dot{q}_t = 0$ 和 $\dot{T}_t = 0$ 两条曲线的位置关系，可以概括为两种情况：

①若 $\frac{dq}{dT} \Big|_{\frac{dq}{dt}=0} > \frac{dq}{dT} \Big|_{\frac{dT}{dt}=0} = \frac{\delta}{\beta(efk'_q - g'G'_q)}$ （注意不等号两边都是负数），（如图

2 中 E_1 点），**存在鞍点均衡解**（称为第 1 类均衡点），**也就是存在一条唯一的最优路径：随着温度下降（上升），减排成本（减排量）上升（下降）**。路径的走向刚好和 $u'' < 0$ 时的情况相反，正如刚才所说，这一类均衡点至少存在一个。

②反之，若 $\frac{dq}{dT} \Big|_{\frac{dq}{dt}=0} < \frac{dq}{dT} \Big|_{\frac{dT}{dt}=0}$ ，系统不存在唯一的最优路径。可能呈现出周期性的

特征，还有可能是发散的（如图 4-2 中 E_2 点），这一均衡点称为第 2 类均衡点。

正如刚才提到的，第 2 类均衡点可以不存在，但我们却很难给出存在性的充分必要条件。我们可以换一个问题来问：已知一个均衡点 (T^*, q^*) ，它在什么条件下不属于第 2 类

均衡点呢？回答显然是，必须保证 $\frac{-u''}{\delta + \theta} > \frac{\delta}{\beta(efk'_q - g'G'_q)}$ 在均衡点成立。

从这个不等式出发，可以求出阿罗-普拉特绝对风险爱好系数¹ ($-u''/u'$)。刚才的分析中我们曾假定 $u'' < 0$ ，在那里我们得到了唯一的均衡解，而由 $u'' < 0$ 得 $-u''/u' < 0$ ，个人是风险规避的。因此，我们可以说，对于风险规避者来说，一定存在唯一的均衡点。那么，对于现在的风险爱好的个人呢？

根据上述关于斜率的不等式条件，并利用均衡点的关系式(4)，得到：

$$-\frac{u''}{u'} < \frac{-\delta}{\beta q(efk'_q - g'G'_q)}$$

也就是说，在给定的均衡点 (T^*, q^*) ，若满足上述关于绝对风险爱好系数的不等式，那么这个均衡点就是稳定的。由此得到了一个充分条件，即：**只要个人的风险爱好程度足够小，那么那定存在稳定的均衡点。**——我们可以说，只要整个可行区域内两条曲线的可以说，只要整个可行区域内两条曲线的所有交点都满足这一条件，那么只存在稳定的均衡点。而且，它一定是唯一的，因为对于连续曲线而言，两个以上的均衡点至少包括一个第 2 类均衡点。这样，我们也就排除了多重均衡的可能性。

在下面的讨论中，我们假定个人的风险爱好程度足够小，因此不稳定的均衡点被完全避免了，剩下**唯一稳定的鞍点均衡点**。

3.3 $u''(T) = 0$

从上面对 $u'' < 0$ 和 $u'' > 0$ 两种情况的分析，合理的设想是：此时减排最优路径是时间不变的。画出相位图（图 3），这一点得到了证明。

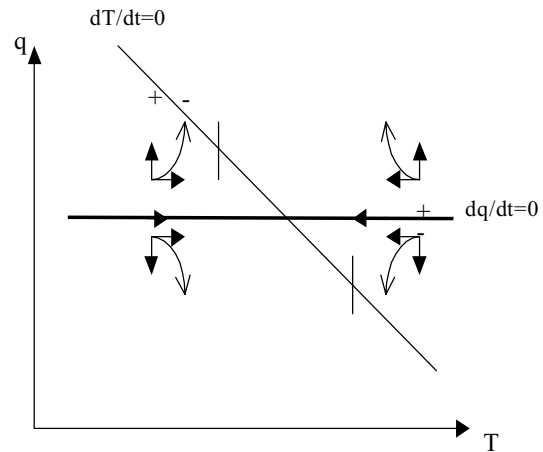


图 3 $u'' = 0$ 时 (T, q) 空间相位图

4 结论

在刚才的分析中，我们通过一个较为简单的连续时间模型，推导了全球变暖的经济-物理系统的一些“宏观”特征。假定气温的边际效用为负，也就是全球变暖总是弊大于利。在这一基本前提下，我们证明了只要个人的风险爱好程度足够小，甚至是风险规避的，那么时间足够长（理论上无限时期），温度可以稳定在一个可以容忍的水平上，而且可以排除多重均衡的可能性。同时，达到稳态的最优减排路径具有“鞍点均衡”的性质，也就是说，最优路径是唯一的，稍有偏离就可能导致系统的“崩溃”。

其次，对于这条唯一的最优减排路径，我们发现它的走向取决于于气温效用函数的二阶导数。如果这个导数为零，最优减排量（成本）是时间不变的；如果导数大于零，最优减排路径是时间下降的；如果导数小于零，最优减排路径是时间上升的。

¹ 特别说明的是，在正的商品效用下用来定义绝对风险规避系数的 $(-u''/u')$ ，在这里正好意义相反，它说明的却是个人的风险爱好程度， $(-u''/u')$ 越大，说明个人越是风险爱好者。

通过对上述模型（1）进行扩展，还可以讨论人口增长、技术进步和不确定性等因素对减排对策的影响。限于篇幅，这里就不再赘述（详见[2]）。从“复杂到简单”是科学研究的一种基本方法，本文的研究表明这种方法在分析全球变暖问题中同样具有指导意义。

5 我国制定全球变暖对策的启发意义

首先应该指出的是，本文的研究是基于一个代表性代理人模型的长期（甚至无限时期）的理论分析。它不能回答各国之间如何进行排放权分配这一国际谈判的焦点问题，也不能根据本文的结论制定短时期内的减排对策。但本文的研究对于我国制定全球变暖的对策也有一定的启发意义。例如：

1、本文的研究提供了一个“标准”方案，即在考虑后代利益的基础上，一个“静止”的、没有人口和经济增长的经济应该尽早从事减排活动，这样可以使更多的后代得到适宜的温度。因此，从现在开始“什么也不做”的策略肯定是不可取的。但这个策略应该是适中的，正如本文指出的，技术进步和不确定性的影响既可以是正面的（使减排投入减少），也可以是负面的，没有必要出于某种担心过多投入，也不应该借口技术不够成熟减少甚至不进行投入。在产生更多的科学发现和技术进步以前，应该根据现有的某种普遍认同的知识来行事。

2、中国是一个发展中的大国，发展经济显得更为重要。这样，考虑全球变暖问题必然居于次要地位。按照模型，在收入较低情况下，对气温的效用相对不敏感。用于减排的投入较高收入国家为小。

3、由于中国的减排资本存量少于发达国家，因此在中国减排的边际成本较低，表面看来中国应该承担更多的减排义务。但正如本文分析指出那样，这样做的条件是在发达国家和发展中国家之间的资本应该是完全流动的，发展中国家能够无限制利用发达国家的充裕资本进行减排，或者说发达国家应该无偿援助发展中国家的减排活动。

4、中国正处于经济快速增长时期，人口增长的压力不小，因此潜在排放量的增长肯定是巨大的。根据模型的分析，随着潜在排放量的增长，减排活动的投入应该有所增加，以遏止不断增长的排放量，保护更多的人群。由于减排活动的公共品性质，人均的减排支出却未必增大，也就是说，按人口平均的减排负担未必加重了。

参考文献

- 1 Nordhaus, W. D. (1994), *Managing the global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press.
- 2 钟笑寒（1999），全球变暖的宏观经济分析——代际观点和理论模型，清华大学博士学位论文。

通信地址:

北京 清华大学

中国经济研究中心

电话: 86-10-62789695 传真: 86-10-62789697

邮编: 100084

网址: <http://www.ncer.tsinghua.edu.cn>

E-mail: ncer@em.tsinghua.edu.cn

Adress:

National Center for Economic Research

Tsinghua University

Beijing 100084

China

Tel: 86-10-62789695 Fax: 86-10-62789697

Web site: <http://www.ncer.tsinghua.edu.cn>

E-mail: ncer@em.tsinghua.edu.cn