

叶笃正, 季劲钧, 严中伟, 等. 2009. 简论人类圈 (Anthroposphere) 在地球系统中的作用 [J]. 大气科学, 33 (3): 409-415. Ye Duzheng, Ji Jinjun, Yan Zhongwei, et al. 2009. Anthroposphere—An interactive component in the Earth system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 409-415.

# 简论人类圈 (Anthroposphere) 在地球系统中的作用

叶笃正<sup>1</sup> 季劲钧<sup>1</sup> 严中伟<sup>1\*</sup> 王叶<sup>1, 2</sup> 延晓冬<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院大气物理研究所及东亚区域气候环境研究重点实验室, 北京 100029

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 工业革命后, 人类活动影响地球环境达到了空前的程度。近年提出的人类世 (anthropocene) 概念就是为表征地球系统演变进入了这一特殊的新纪元。然而, 人类活动并非单向地影响自然, 它在改变自然环境的同时, 环境变化也影响着人类行为, 迫使人类去适应自然变化, 改变生存方式。为更深入地表征人类活动与地球环境相互作用的这种特征, 作者讨论了在地球系统模式里引入“人类圈 (anthroposphere)”的必要性以及由此带来的新的科学挑战, 并提出了构建包含人类圈的地球系统模式的一些思路。

**关键词** 人类圈 地球系统 各圈层相互作用 社会计算

**文章编号** 1006-9895 (2009) 03-0409-07

**中图分类号** P461

**文献标识码** A

## Anthroposphere—An Interactive Component in the Earth System

YE Duzheng<sup>1</sup>, JI Jinjun<sup>1</sup>, YAN Zhongwei<sup>1\*</sup>, WANG Ye<sup>1, 2</sup>, and YAN Xiaodong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Regional Climate—Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** A new concept, ‘anthropocene’, was proposed in recent years to emphasize that the Earth environment entered a new epoch in association with the Industrial Revolution, when human activities became able to influence the Earth environment at a global scale. However, human activity not only influences the environment, but also adapts itself to the changing natural surroundings. In order to characterize the interaction between human activity and natural environment, it is necessary to induce an interactive ‘anthroposphere’ in the Earth system model. Challenges in association with construction of the Earth system model including this new component are discussed.

**Key words** anthroposphere, the Earth system, interactions between different components, social computing

## 1 引言

人类从来就与自然环境相互影响着, 从自然界获取生活所需的各种物质的同时, 也不断从两个方

面改变着环境。一方面改变地表状况: 早期以狩猎和穴居为生, 工具简单, 对自然界的影 响很小; 进入农耕时代, 在原有森林和草原等自然植被上发展农牧业, 建立村落, 对自然界影响微小而分散, 产

**收稿日期** 2007-09-28, 2008-01-07 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB40050X, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY(QX)2007-6-1

**作者简介** 叶笃正, 男, 1916 年 2 月出生, 中国科学院院士, 先后从事动力气象、高原气象、海气关系、大气与地表面过程、全球变化等专业方向的研究工作。

\* 通讯作者 E-mail: yzw@tea.ac.cn

生的环境效应也是局地的。另一方面是改变大气成分：人类自从主动取火以来，就向大气释放二氧化碳，只是其量甚微；而后随着人口增长和生产规模扩大而增大。工业革命以来，人类与自然环境的关系发生了重大变化，人类活动已可以在全球尺度上影响地球环境。人类世（anthropocene）的概念就是用来表征地球系统发展史上的这个新纪元（Crutzen et al., 2000）。

人类在利用和改造自然的过程中，也不断地加深对自然界及其变化规律的认识。对自身所居住的地球环境的认识也从局部到整体不断深化。20世纪70年代提出的气候系统概念，包含了大气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈五大圈层以及圈层之间的相互作用，后来又发展成为地球系统。这是对自然界认识的重大飞跃，不仅使气候学跨出了大气圈，而且使人们把地球环境各圈层作为一个整体系统去研究其演变规律，极大地推动了地球科学的发展。人类圈的提法也应运而生（周秀骥，1994）。人类在地球系统中具有特殊的地位，它与一般生物圈的根本差异在于，人类可以通过有意识的生产活动影响和应对地球系统的变化。然而，人类作为地球系统中的一个与其它部分相互影响的特殊部分，至今并未在有关研究中得到完整的体现。

本文目的是：论述在地球系统里加入人类圈的必要性和由此产生的科学研究方面的新挑战，以求比以往更完整地体现人类在地球系统变化中的作用。

## 2 地球气候环境的自然变化

约250万年前北半球高纬冰盖形成以来，地球气候环境经历了多次冰期-间冰期旋回。这是现代气候变化的一个大的自然背景。最近的冰期极盛期出现在1.5~1.8万年前，其后全球迅速增暖进入著名的中全新世暖期（0.3~1万年前）（竺可桢，1973；Vettoretti et al., 1998）。人类社会主要就是在全新世期间发展起来的，但直至工业革命以前，人类活动影响气候环境的方式和规模主要是局部的。16~17世纪前后的小冰期是中全新世暖期后最受关注的相对寒冷期，也是近百年全球变暖的一个最直接的历史背景。

自然气候环境的变化程度从温度来看，我国区域在中全新世暖期期间很多地区较今偏暖2℃左

右，而在小冰期期间偏冷1℃左右（吴祥定等，1981；Wang et al., 2001）。千年尺度大范围平均的变率应在0.1℃/100 a以内。

自然气候环境演变过程中也会在各地发生相对较为剧烈的跃变或突变，这在季节转换、历史旱涝以及冰期循环的各种时间尺度上都有所表现（叶笃正等，1958；Berger, 1990；Yan et al., 1992），反映了地球环境这个复杂系统的混沌本质。然而，从系统的能量平衡考虑，除非外源性的强迫发生明显变化，地球自然气候环境的总体热力学特征应该近似守恒。

## 3 自然变化的原因（圈层相互作用）

太阳辐射作为地球系统的唯一外热源，其变化无疑将导致气候环境变化。进入地球系统的太阳辐射量及其全球分布的变化，主要是由地球绕太阳运转时的位置变化引起的。这种天文学上的周期变化，不仅导致地球上的春夏秋冬之季节变化，也是导致冰期-间冰期旋回的基本驱动因素——即著名的米兰科维奇理论（石广玉等，2006）。太阳活动（如黑子）本身导致的辐射变化相对说来较小，但1580年代前后的太阳黑子极小期（Maunder Minimum）应对小冰期的发展起了作用。火山爆发所产生的大量火山灰阻碍太阳辐射进入地球系统，导致全球性降温。小冰期期间全球火山活动较为活跃，是火山活动影响百年尺度自然气候变迁的例证。

然而，外源性变化无法完全解释地球气候环境的自然变化。在各种尺度上气候变化都是通过地球系统各圈层相互作用体现出来的。例如，地球轨道参数变化导致近极地区太阳入射辐射量变化，但其量值不足以解释近极地区冰期和间冰期之间的巨大温度差异。一个关键的物理过程是，当极区增温触发冰盖消融时，地表反照率减小，导致地气系统吸收更多太阳辐射，由此引起的增温进一步加速冰盖消融，形成强烈的正反馈效果，从而放大了变温效应。在大气环境变暖过程中，各地植被的响应会引发类似的反馈过程。冰期间冰期转换就是在一系列这样的不同圈层之间的反馈过程（也即相互作用）中实现的。

在没有外源性强迫变化的情况下，地球系统各圈层也始终处于相互作用过程中。这是导致自然气候变率的根本原因。例如，厄尔尼诺南方涛动

(ENSO) 现象, 就是热带海洋和大气相互作用所导致的最显著的年际到年代际气候振荡 (Nagura et al., 2007)。中高纬海气相互作用则可以导致更长时间尺度气候变率。例如, 从冰期到间冰期的万年尺度全球变暖过程中曾经突发的百年尺度变冷事件 (如全新世之前的 Younger Dryas), 就被认为是起因于北大西洋深海环流对全球变暖的某种响应, 进而形成剧烈的负反馈效应而形成的 (Stouffer et al., 2007)。

在小冰期前全球气候变化主要属于自然变动。人类活动或许对一些局部气候环境的演变有一定影响。如我国区域小冰期期间持续而颇具规模的农业扩张, 一定程度上促成北方农牧业交错带沙化发展。由此改变的陆面植被状况, 也可对我国区域气候变异有所影响 (严中伟等, 1999; Fu et al., 2001)。

#### 4 近百年全球变暖和人类活动

20 世纪以来的全球变暖速率约为  $0.6^{\circ}\text{C}/\text{ha}$ , 超出了以往数千年来自然气候变化程度 [图 1 (见文后彩图)] (Mann et al., 2003; <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>)。很多研究表明: 单纯考虑太阳和火山活动等自然因素解释不了这一变暖过程, 考虑了人类活动排放导致的大气温室气体增长, 才能更好地模拟出观测到的异常变暖趋势 (Shi et al., 1997)。

与近百年全球变暖相应, 世界人口也在 20 世纪中期迅速增加。由图 2 (资料源自 <http://www.census.gov/ipc/www/idb/worldpopinfo.html>) 可见, 几千年来直至 19 世纪前世界人口总数在 10 亿水平以下缓慢增长; 19 世纪人口突破 10 亿, 其后开始迅猛增长, 至 2000 年突破 60 亿。人口激增必然伴随地球资源利用的激增, 工业革命则加剧了这一过程。其结果之一是排放二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 等大气温室气体。现有记录表明, 近几十年大气  $\text{CO}_2$  的增长主要来自人类活动的排放 (IPCC, 2007)。当前的大气  $\text{CO}_2$  浓度及其致暖效应已超出过去 65 万年来的自然变化范围, 其十年尺度平均增长率则大于有记录的近 2 万年来任何时期的水平。空前的人类活动排放大气温室气体, 是导致当前异常全球变暖的最确凿无疑的一个因素。

一个可预见的后果是, 即使人类停止排放, 大气中已有的二氧化碳仍有百年尺度的生存期; 而由

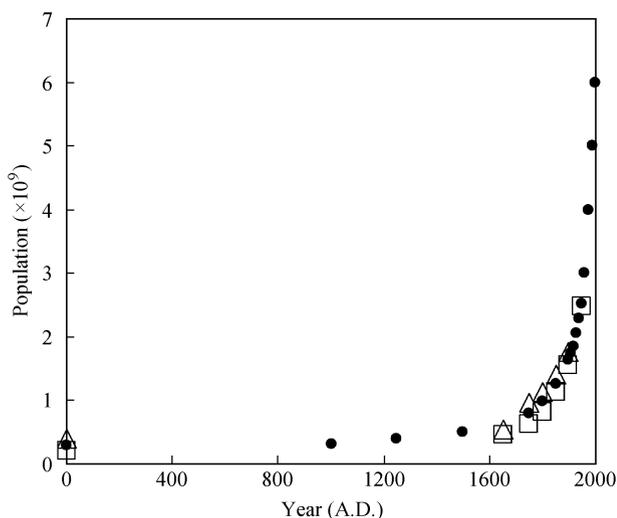


图 2 世界人口增长历史 (引自 <http://www.census.gov/ipc/www/idb/worldpopinfo.html>)。圆点: 联合国有关机构认可的最佳估计; 不同点代表不同研究者或机构的估计

Fig. 2 World population (quoted from <http://www.census.gov/ipc/www/idb/worldpopinfo.html>). Dots: the optimal estimate acknowledged by the United Nations; other marks: estimates from different institutions

于海洋的热惯性滞后, 全球变暖仍将且更加迅猛地继续下去。根据最近发表的 IPCC 第四次评估报告, 在所能预计到的人类活动所导致的温室气体排放情景下, 几乎所有模式都预测 2010~2030 年的全球温度将再上升  $0.64\sim 0.70^{\circ}\text{C}$ 。毋庸置疑, 这个时代的人类已能且正在全球尺度上影响地球气候环境的演变。

近百年来, 人类活动的另一特征是大规模土地利用的变化。人口和经济的增长, 加剧粮食需求, 使大量森林和草原变成农田, 同时城市化也在全球各地迅速发展。20 世纪后半期, 全球人口增加 1 倍, 谷物产量增加了 3 倍, 能源消耗增加 4 倍, 经济活动增长 5 倍。卫星记录的全球夜间灯光分布图 [图 3 (见文后彩图)] (<http://www.solarviews.com/cap/earth/earthlights.htm>) 形象地反映了这个时代人类占据地球的规模。除了极地雪原和最干旱的沙漠, 人类几乎已“无处不在”。

#### 5 人类圈——表征人类活动与地球系统其它圈层的相互作用

鉴于工业革命以来人类活动影响地球环境的空前性, 地球环境演化的历史进入了一个全新的时

期。Crutzen et al. (2000) 称之为人类世 (anthropocene)。这一概念的提出更多地是强调了现代人类活动之于自然环境的空前影响。

事实上, 人类活动与自然环境一直是相互影响的。在人类活动改变自然环境的同时, 环境变化也改变着人类的行为, 迫使人去适应自然变化, 改变生活和生产方式, 增强抵御自然界不利变化和灾害的能力。形成如下循环:

……人类适应并改善生存环境→造成生存环境变化→又迫使人去适应变化了的环境→又造成生存环境新的变化→……

这种循环过程不是简单的重复, 而是规模不断扩大, 过程不断深化。鉴于这种人类活动与地球环境相互作用的特征, 我们认为应在地球系统模型里切实地引入“人类圈 (anthroposphere)”的模块。

圈层的概念是用以概括地球系统中相对较为独立的特殊组分。各圈层相互作用则是其构成一个完整动力学系统所必须的本质条件。下面从两个方面, 特别是从近百年来发生的事实出发, 剖析人类活动作为地球系统中一个圈层的合理性和必要性。

#### (1) 人类活动改变地球环境

首先, 考虑历史悠久的农牧业活动改变地表覆盖。现在全球的耕地面积约为  $15 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 占陆地面积的 10.7%, 而在历史上这些曾经是森林和草原。据估计 (Hooke, 2001), 人类活动每年有意识地搬移 37 Gt 物质; 在农业活动中无意识地搬移了约 80 Gt 的物质。5000 年来搬移的物质可建高 4000 m、宽 40 km、长 100 km 的山。迄今为止, 陆地表面近一半为人类所改变, 一方面建立许多宜居的环境, 另一方面造成大片土地的荒漠化。再看地表水文的变化, 人口的增长和生产活动的需求, 人类已经使用了可以获得的淡水资源的一半以上, 许多地区地下水已近枯竭。人们建造成千上万的水坝和水库用于取水和灌溉; 植被覆盖的变化也改变地表的蒸发散, 这些活动无疑影响了全球的水循环。改变地表状况的同时也改变生态环境, 大量地采伐森林, 猎捕动物, 大大地减少了生物多样性, 使许多物种绝灭或濒临绝灭。这是人类活动之于生物圈直接影响。

近代工业化和城市化使能源需求迅速膨胀。近 150 年内已经消耗了几亿年以来形成的煤、油、气资源的 40% (已探明的), 从而向大气层排放了大

量的温室气体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等, 同时也排放了黑碳、硫化物和各种类型的气溶胶。大气中  $\text{CO}_2$  浓度从工业革命前的 280 ppm ( $10^{-6}$ ) 增加到现在的 380 ppm 以上, 导致了全球性的增温、极地冰原和高山冰川的融化以及海平面的上升。地球系统中各圈层的变化, 反映了人类活动的影响已经远不是个别的、局地性的效应, 而是全球性的。

(2) 人类活动影响其它圈层又迫使自己改变活动方式

地球系统各圈层的变化又反过来影响着人类的生活, 迫使人做出相应的对策。例如, 由于人类排放大量温室气体而导致全球增暖, 对此已在 20 世纪末期取得共识, 从而引起公众, 乃至各国决策者的重视, 进而在 1997 年形成了京都议定书 (Kyoto protocol), 要求各国有计划地减少温室气体排放, 以降低全球增暖以及所引起的不利影响。

又如, 人类活动等所产生的含氟氯烃, 导致平流层臭氧减少, 危害人类健康。于是各国在 1987 年在蒙特利尔达成共识, 力求停止有关排放, 保护大气臭氧层。

再如, 人类大规模的土地利用, 改变了地表覆盖, 使得大量土地退化, 荒漠扩大, 沙尘暴增多、增强, 还造成水土流失, 加剧水旱灾害。人们逐渐认识到其严重后果, 采取一系列措施, 如有计划地植树造林, 恢复自然生态系统等。

所有上述行动表明人类活动作为一个整体, 在影响自然的同时也在不断地应对自然的变化, 采取各种适应措施, 减少风险和损失, 而其后果则是以新的方式影响自然环境。在动力学上表现为与地球环境系统其它组成部分的相互作用。因而, 为完整研究地球系统演变规律, 在其动力学模型里引入人类圈是必要的、合理的和有益的。

## 6 科学上的新挑战

人类圈之特殊性在于人类活动是以社会意识为指导的, 有主观判断, 这给定量化带来困难。与自然界的自然变化不同, 在研究人类活动的量化时必须考虑社会、经济、政治因素, 必须把人们对自然规律的认识和对人类社会变化的认识结合起来, 即把自然科学和社会科学结合起来。

以往, 人们已明确地认识到把地球环境各自然圈层统一到一个地球系统开展模拟研究的必要性

(叶笃正等, 1998)。加入人类圈的地球系统, 应能更完整地再现其过去和现在是如何演变的, 更定量地解释人类活动影响自然环境的程度, 正如传统的气候数值模拟那样在“实验室”内再现地球系统的变迁并预测未来趋势。但为实现这些目标, 还需进一步深入研究环境变化和人类活动影响的种种过程, 研究地球系统中各圈层的相互作用, 建立起生存环境和人类活动的规律及各特征量之间的定量联系, 真正使地球系统模式化, 形成一个地球系统模拟实验室。这是科学家面临的巨大挑战。

首先需要解决的一个难点是量化各种人类活动, 并把它结合到现有的地球系统模式中去。可以先从简单的统计关系着手。这里给出两个范例性思路。

### (1) 统计分析方法

以温室气体排放导致气候变暖的问题为例。影响温室气体排放的因素很多, 如工业发展水平、人口、能量需求及其能源结构的可能改变等, 于是可以建立如下的函数关系:

$$Y(\text{CO}_2) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n),$$

其中,  $Y(\text{CO}_2)$  是大气中的  $\text{CO}_2$  浓度,  $x_n$  表示  $n$  个影响因子, 这些因子包含人口、工业水平和能源需求等基本人类活动参数, 也包含人类有意识活动, 如能源结构的调整等。在各种影响因子的统计资料基础上, 用多元回归分析得到表达式, 如

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n,$$

$b_0, b_1, b_2 \dots$  是回归系数, 由此式表述现在或未来的因人类活动导致的  $\text{CO}_2$  浓度变化。回归系数可以与气候等自然因素有关, 从而反映自然之于人类活动的影响。该式和那些已经在发展中的各自然圈层相互作用模块, 如气候变化和大气化学过程的相互反馈等, 共同决定了大气  $\text{CO}_2$  含量的演变。

### (2) 社会计算

近年来一个新的科学分支——社会计算 (social computing, Wang, 2004; 王飞跃, 2005) 正在发展中。这一多学科领域的进展有助于人类活动的模式化。例如, 土地利用、毁林、城市化、垦殖等将引起气候变化。人口的变化与耕地有下列平衡关系:

$$P \cdot D = L \cdot Y,$$

其中,  $P$  是人口,  $D$  为每人每年所需粮食,  $L$  为种粮面积,  $Y$  为谷物生产力。人口增加要保持上述平衡, 只有两种方法——增加耕地或提高生产力。由

此, 就可以推测人口增长与土地利用的关系 (谢高地等, 1999)。

这里表征人类社会经济状况的特征变量、能源、人口、生产力水平等与自然界的直接联系在一起。如果我们建立起相关的定量的“人-地关系”, 就可以构成地球系统各圈层的动力过程与人类圈变化的耦合模式, 再利用它去分析系统内部变化的机理和对环境变化的敏感性, 并预测未来可能的变化趋势。

总之, 为构建地球系统各圈层 (包括人类圈) 耦合模式, 必须在进一步改善现有各自然圈层子模式的基础上, 发展人类圈的子模式。而解决人类活动 (王喜红等, 2002) 社会性的量化问题, 是其中最主要的难点所在。但不论如何, 人类圈概念及其模式化发展和应用, 将给地球系统科学开辟一个新的发展方向。

## 参考文献 (References)

Crutzen P, Stoermer E. 2000. The 'Anthropocene' [J]. *IGBP Newsletter*, 41: 17-18.

Berger W. 1990. The younger dryas cold spell—A quest for causes [J]. *Global and Planetary Change*, 3 (3): 219-237.

Fu Congbin, Yuan Huilin. 2001. A virtual experiment on the climatic and environmental effects of East Asian summer monsoon induced by recovering natural vegetation types [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 46 (8): 691-695.

Hooke. Climate Change 2001: Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability [M]. IPCC, 2001b.

Mann M, Jones P. 2003. Global surface temperatures over the past two millennia [J]. *Geophysical Research Letters*, 30 (15): 1820-1829.

Nagura M, Konda M. 2007. The seasonal development of an SST anomaly in the Indian Ocean and its relationship to ENSO [J]. *Journal of Climate*, 20 (1): 38-52.

Shi Guangyu, Guo Jiandong, Fan Xiaobiao, et al. 1997. A physical model for the global mean surface air temperature anomalies over the past century [J]. *Chinese Science Bulletin*, 42 (8): 658-662.

石广玉, 刘玉芝. 地球气候变化的米兰科维奇理论研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21 (3): 278-285. Shi Guangyu, Liu Yuzhi. 2006. Progresses in the Milankovitch theory of earth climate change [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 21 (3): 278-285.

Stouffer R, Seidov D, Haupt B. 2007. Climate response to external sources of freshwater: North Atlantic versus the Southern Ocean [J]. *Journal of Climate*, 20 (3): 436-438.

Vettoretti G, Peltier W, McFarlane N. 1998. Simulations of mid-

- Holocene climate using an atmospheric general circulation model [J]. *Journal of Climate*, 11 (10): 2607–2627.
- Wang Feiyue. 2004. Social computing: concepts, contents, and methods [J]. *International Journal of Intelligent Control and System*. 9 (2): 91–96
- 王飞跃. 2005. 社会计算与数字网络化社会的动态分析 [J]. *科技导报*, 23 (9): 4–6. Wang Feiyue. 2005. Social computing and dynamical state analysis of digitalized and networked societies [J]. *Science & Technology Review (in Chinese)*, 23 (9): 4–6.
- Wang S W, Gong D Y, Zhu J H. 2001. Twentieth-century climate warming in China in the context of the Holocene [J]. *The Holocene*. 11 (3): 313–321.
- 王喜红, 石广玉, 马晓燕. 2002. 东亚地区对流层人为硫酸盐辐射强迫及其温度响应 [J]. *大气科学*, 26 (6): 751–760. Wang Xihong, Shi Guangyu, Ma Xiaoyan. 2002. The direct radiative forcing of anthropogenic sulfate and its temperature response over the eastern Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (6): 751–760.
- 吴祥定, 林振耀. 1981. 历史时期青藏高原气候变化特征的初步分析 [J]. *气象学报*, 39 (1): 90–97. Wu Xiangding, Lin Zhenyao. 1981. A preliminary study on the climatic changes since 2000 years in the Qianghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 39 (1): 90–97.
- 谢高地, 成升魁, 丁贤忠. 1999. 人口增长胁迫下的全球土地利用变化研究 [J]. *自然资源学报*, 14 (3): 193–199. Xie Gaodi, Cheng Shengkui, Ding Xianzhong. 1999. A study on global land use change under the pressure of population growth [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 14 (3): 193–199.
- Yan Zhongwei, Ye Duzheng, Wang Cun. 1992. Climatic jumps in the flood/drought historical chronology of central China [J]. *Climate Dynamics*, 6: 153–160.
- 严中伟, 魏和林. 1999. 小冰期和现代农业对我国七月气候影响的模拟研究 [J]. *自然资源学报*, 14 (4): 323–328. Yan Zhongwei, Wei Helin. 1999. A comparative study of the impact of agriculture on July climate in China between the present and the Little Ice Age [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 14 (4): 323–328.
- 叶笃正, 朱抱真. 1958. 大气环流的若干基本问题 [M]. 北京: 科学出版社. Ye Duzheng, Zhu Baozhen. 1958. A Few Essential Issues on the General Circulation of the Atmosphere (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 叶笃正, 季劲钧. 1998. 建立“地球系统模拟实验室” [M]//李喜先. 21世纪100个交叉科学难题. 北京: 科学出版社. 286–291. Ye Duzheng, Ji Jinjun. 1998. The simulation laboratory of the Earth System is established [J]//Li Xixian. 100 Interdisciplinary Science Puzzles of the 21st Century (in Chinese). Beijing: Science Press. 286–291.
- 周秀骥. 1994. 21世纪的大气科学——纪念中国气象学会成立70周年. *气象学报*, 52 (3): 257–260. Zhou Xiuji. 1994. Atmospheric sciences in 21st century—In memory of the 70th anniversary of the foundation of Chinese Meteorological Society [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 52 (3): 257–260.
- 竺可桢. 1973. 中国近五千年来气候变迁的初步研究 [J]. *中国科学*, 16 (2): 226–256. Zhu Kezhen. 1973. Preliminary studies of climate change in China over the past 5000 years [J]. *Science in China (in Chinese)*, 16 (2): 226–256.

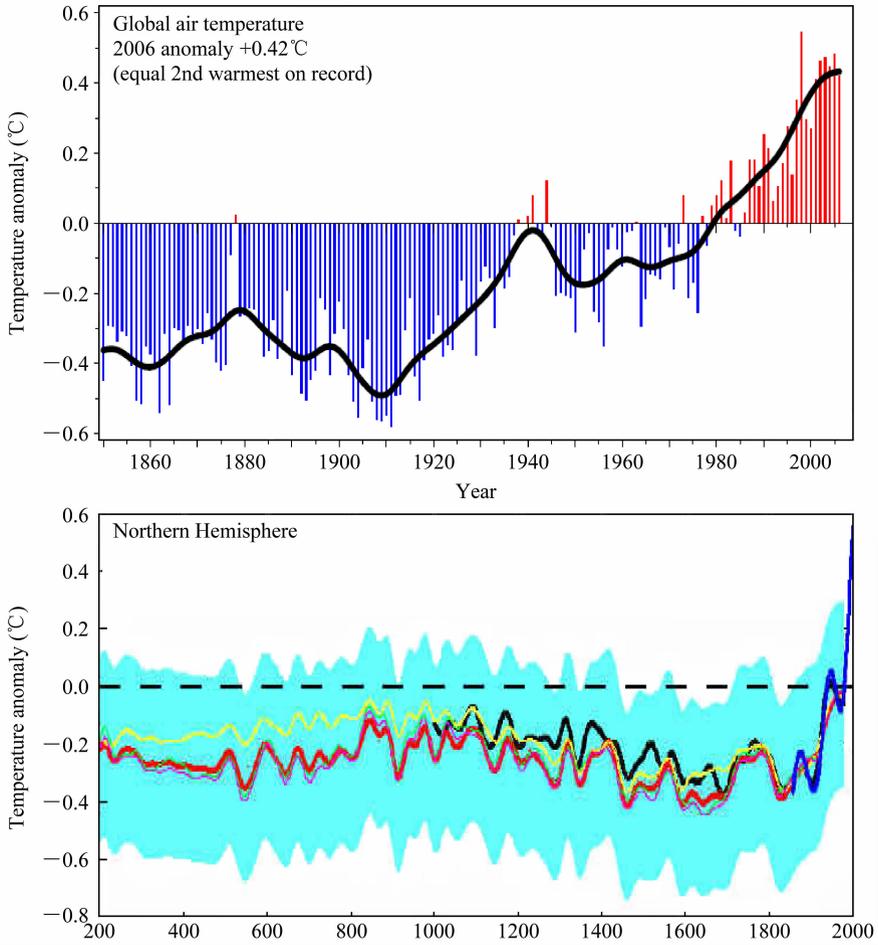


图1 (a) 近百年全球变暖 (引自 <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>); (b) 近2000年北半球平均温度变化 (引自 Mann et al., 2003), 不同曲线代表不同方法重建的温度变化, 阴影代表不确定性范围

Fig. 1 (a) Global warming over the last hundred years (quoted from <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>); (b) Northern Hemisphere temperature anomalies during the last 2000 years (quoted from Mann et al., 2003), different lines; different methods of temperature reconstruction, shallow; degree of uncertainties

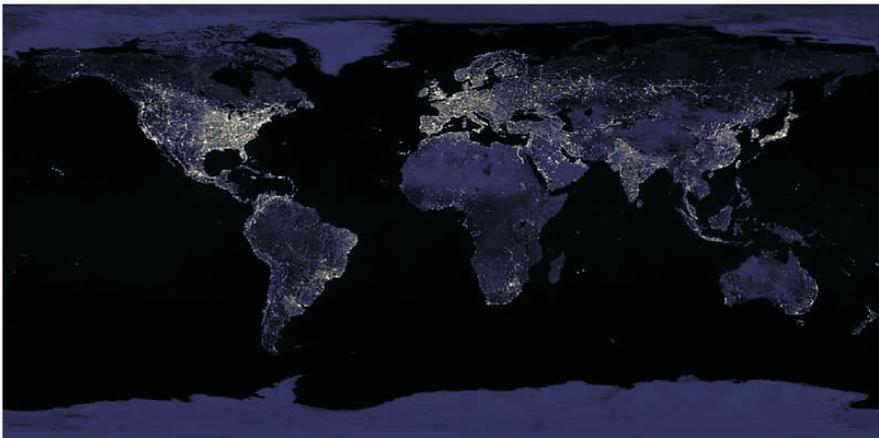


图3 地球夜光图 (引自 <http://www.solarviews.com/cap/earth/earthlights.htm>)

Fig. 3 Global Earth lights (quoted from <http://www.solarviews.com/cap/earth/earthlights.htm>)