

# 气候变化综合评估模型

张雪芹 葛全胜

(中国科学院地理研究所, 100101 北京)

**摘 要** 本文概述了气候变化综合评估模型 (IAM) 的定义、组成、特点及应用。IAM 可视为一种促进人类更好地理解气候变化问题的工具, 它为研究者和决策者提供了一种十分有益的关注环境问题的框架或方法论。在此基础上, 该文具体介绍了国外一个发展相对成熟的气候变化综合评估模型——温室效应综合评估模型 (IMAGE2.0)。

**关键词** 气候变化 综合评估模型 温室效应的综合评估模型 (IMAGE2.0)

全球变化研究至今已有 20 余年, 与气候有关的研究通常围绕着气候变化问题的一个方面或空间尺度, 在现实中气候问题却涵盖社会、生物圈、气候系统等相互关联的诸多因素。目前该项研究侧重于研究自然过程、生物过程以及人类活动过程的相互作用, 涉及意义重大的跨学科协作, 而非多学科分别进行的合作研究<sup>[1,2]</sup>。气候变化的综合评估模型正是跨学科协作的一个重要尝试和新的生长点。90 年代以来, 经欧美国家学者的深入研究, 气候变化综合评估模型已从纯理论探讨进入应用阶段。近年的有关模拟结论已为 IPCC 和 UNFCCC 重视并采纳<sup>[3]</sup>。

## 1 气候变化综合评估模型 (IAM)

### 1.1 概念

气候变化综合评估模型 (Integrated Assessment Models, 简称 IAM) 是基于建模系统物理特性而进行输入条件假设的计算模型。采纳了相关学科包括被证明合理的尺度转化、非线性简化的无量纲化和参数化方案以及专家模型, 可基本上描绘整个系统的关键动力学过程及相互关联的连续图象。尽管 IAMs 无法进行具体的预测, 但可提供不同 (或若干组) 综合假设条件 (又称情景 (Scenario)) 下气候变化可能产生的影响, 用以支持各种层次上的决策。IAM 的优势就在于它能计算不同外部假设条件下以及多个因子同时相互作用时的结果。

### 1.2 要素组成

气候变化 IAMs 要素可分为 4 类 (见图 1): 人类活动、大气成分、气候和海平面、生态系统<sup>[4]</sup>。其中, 人类系统通过两种途径与自然系统建立联系。一方面, 人类活动 (如 CO<sub>2</sub> 排放或土地利用) 直接影响气候变化; 另一方面, 人类活动亦受气候变化直接或间接地影响, 譬如温度变化可直接影响室内取暖或制冷的需求, 也可间接影响海平面、作物生产力

\* 本文受国家自然科学基金课题 (49771006) 和中国科学院重大项目 (KZ951-B1-203-1) 资助。

来稿日期: 1998-09

或生物多样性的变化。

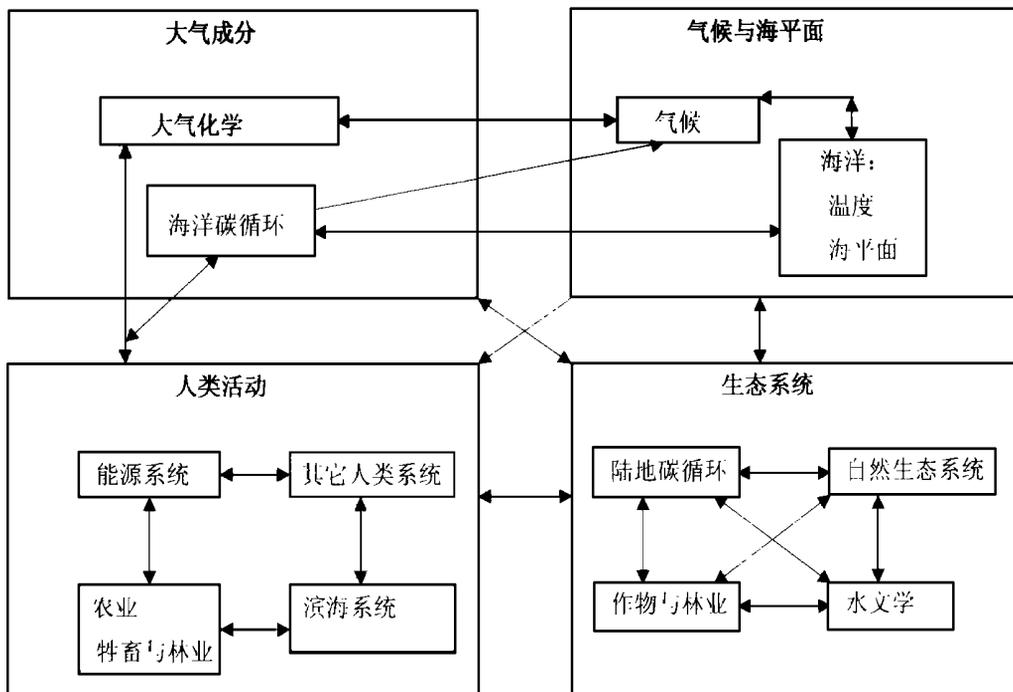


图 1 气候变化综合评估模型要素框架

Fig. 1 The key components of integrated assessment models on climatic change

### 1.3 特点

IAMs 告知人类活动与气候变化之间将可能出现什么样的相互作用情景, 它可视为一种促进人类更好地理解气候变化问题的工具, 而并不是预测未来会发生什么的模型。IAMs 考虑了信息集成与评估的连贯性, 为研究者和决策者提供了一种十分有益的关注环境问题的框架或方法论。但鉴于 IAMs 待建模的系统庞大、复杂而无序, 目前 IAMs 仅能简单表征自然与社会系统, 所给出的模拟结果也只是概念性和框架性的; 另外, IAM 所涉及的许多领域的科学知识现在尚不完备或者匮乏, 如人类、动植物的价值、健康和多样性都难以定量表述。因此, 目前 IAMs 在这些方面还无法明确告诉决策者如何采取相应的应对措施。鉴于此, 许多 IAMs 开发者倾向于低调处理 IAMs 结果的可信度, 他们认为目前的研究尚不足以构成制定相关政策响应的基础。

IAMs 不同于大气环流模型(GCMs)。它通常包括自然和社会模型, 考虑了影响温室气体排放情景以及自然气候系统的政治、经济变量。GCMs 则仅考虑自然气候系统。尽管有些 IAMs 的设计中也包括了多种气候建模计划, 如, 零维或二维能量平衡模型, 但受计算时间的限制, 集成三维大气环流模型和人文因素模型来构建综合评估模型, 当前是不可行的。即使随着计算机技术的发展, 模型运行时间显著下降了, IAMs 也不能把整个的 GCM 纳入到它们的模型结构中去, 而只能依赖简单气候模型的未来气候变化与人类活动之间所可能发生的相互作用情景。

总之, 气候变化综合评估模型的精髓可概括为: 考虑了自然-社会-经济各种关系和反馈

过程;无量纲化做得好;给出了定量框架。其不足之处在于:参数化方案过于简单,假设情景已存有误差,则参数化后误差转移,并经多个量级放大,模型结果已无预测意义。

#### 1.4 应用

首先, IAMs 主要服务于关注全球气候变化问题的决策者,它为决策者提供了一个独一无二的了解并理解气候变化问题的机遇。尽管 IAMs 无法告知决策者如何处理气候变化,但通过快速估计不同的政策可能如何影响全球气候, IAMs 能够判断不同的政策取向,并进而帮助决策者确定新的政策。当前 IAMs 的结果正开始影响着政府间有关全球气候变化政策的讨论,而决策者也逐渐向 IAM 研究团体靠拢,并提出了一些关于气候变化的建设性意见和气候变化应对策略。其次,由于当前气候变化综合评估建模领域依然处于襁褓期,许多 IAMs 模拟工作主要致力于改进新一代 IAMs,筛选出优先研究领域,而不是直接提出政策响应对策。此外, IAMs 亦为有价值的教育软件。

当今世界有 20 多个气候变化 IAMs,其侧重点与适用范围有所差异。大多数模型侧重于经济问题(如, DICE),仅少数模型侧重于自然系统(如, MAGICC)。另外,除少数模型外(如, AIM),大多数模型是从全球尺度上探讨问题的(如, MiniCAM 或 IMAGE2.0)。因此,如何选择 IAMs,将取决于拟待解决的问题或手头的任务。如就某个特定问题选择 IAM 时,有关专家建议应考虑如下基本准则:所选模型与拟解决问题尤其是关键问题最相近,其空间尺度与任务最匹配,模型由具有解决该问题相关背景和专家知识的专家所开发;模型不要太复杂以致于难以理解,模型外在假设清楚并很好地记录在档,模型不确定性在模型输入中被指定、在输出中应有所反映。

## 2 温室效应的综合评估模型 (IMAGE2.0)

### 2.1 温室效应的综合评估模型特点

在众多气候变化综合评估模型中,温室效应综合评估模型(Integrated Model to Assess Greenhouse Effect 2.0,简记为 IMAGE2.0)比较具有代表性,发展相对比较成熟。它是一个全球环境与气候变化综合模型,用以模拟全球社会-生物圈-气候系统(Global society - biosphere - climate system)动力学特征,旨在探求系统的关联与反馈,并评估气候政策的影响<sup>[5-7]</sup>。

全球社会-生物圈-气候系统的科学和政策问题是多学科的,分局地、区域和全球三个层次。当前全球变化研究多集中在该系统的一个单一层次或单一空间尺度上。IMAGE2.0 模型的目的在于提供社会-生物圈-气候系统的学科与地理描述,以缩小全球变化研究在多学科综合方面的差距。该模型能提供关于社会-生物圈-气候系统的关联与反馈相对重要性的科学信息,以及与人类活动、全球生物圈和气候相连的政策信息。

与先前的 IAM 相比, IMAGE2.0 不仅覆盖全球,而且还在全球  $0.5 \times 0.5$  经纬度的网格尺度上进行了大量计算。高分辨率的网格尺度提高了模型对测量的可检测性,同时, IMAGE2.0 充分考虑了反馈过程,且提供了更为详细的气候影响分析信息。此外,该模型相比先前的模型来说更加面向过程(Process-Oriented),而包含较少的全球参数化,因而提高了计算的科学可信度。当然,这也增大了模型计算和数据处理强度。

## 2.2 IMAGE2.0 模型描述与检验<sup>[5]</sup>

### 2.2.1 IMAGE2.0 模型的科学目标和政策目标

IMAGE2.0 模型的科学目标和政策目标主导了 IMAGE2.0 模型的设计与研制过程。

#### (1) IMAGE2.0 模型的科学目标

提供关于对社会- 生物圈- 气候系统各种要素关联重要性的理解; 探讨该系统各种反馈过程要素的权重; 估计导致相关系统内不确定性的最主要因素; 帮助确定关于该系统的知识的缺口, 以便合理安排气候变化研究议事日程。

#### (2) IMAGE2.0 模型的有关政策目标

通过明确的空间定位把有关全球气候变化的重要科学和政策内容相关联, 为决策服务; 提供气候变化影响的、动态的和长期 (50 到 100 年) 的预测; 提供该系统相互关联的有关认识及各种政策措施的副作用; 探讨经济发展和技术进步对气候变化的影响与冲击; 为因应气候变化所采取的各种措施 (包括预防和适应措施) 的成本与利润提供定量分析基础。

### 2.2.2 IMAGE2.0 模型子系统

该模型包括三个完全相链接的子系统: 能源-工业子系统、陆地-环境子系统、大气-海洋子系统 (见图 2)。IMAGE2.0 模型的重要贡献之一在于它描述了上述子系统之间、各子系统模型之间的重要反馈与关联。

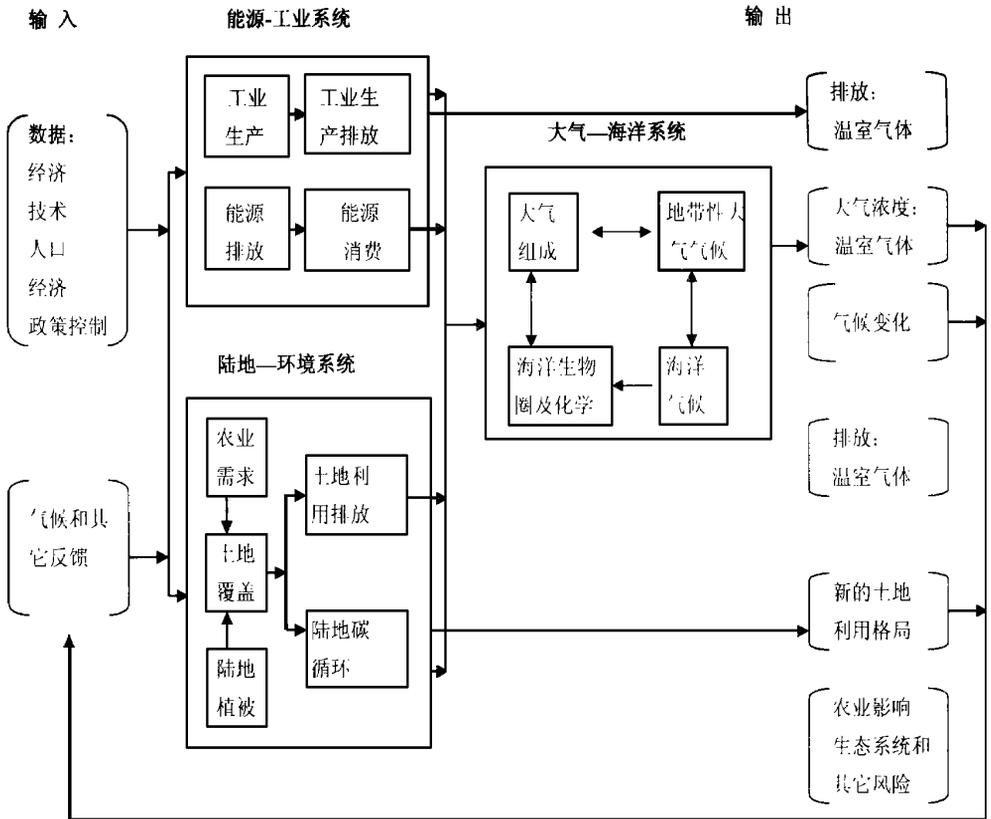


图 2 IMAGE2.0 结构图

Fig.2 A structural diagram of IMAGE2.0

### (1) 能源-工业子系统

能源-工业模型把世界分为 13 个区域, 各区域温室气体排放为能源消费和工业生产的函数, 并利用各种经济/人口预测结果计算最终能源消费。该子系统包括以下子模型: 能源经济、能源排放、工业生产、工业排放。

### (2) 陆地-环境子系统

基于气候与经济因子、生物圈排放到大气中的  $\text{CO}_2$  通量和其它温室气体, 陆地环境模型模拟了网格尺度上全球土地覆盖的变化。该子系统包括以下子模型: 农业需求、陆地植被、土地覆盖、陆地碳循环、土地利用排放。

### (3) 大气-海洋子系统

大气-海洋模型计算了大气中温室气体的增加及其所导致的温度与降水的分布。该子系统包括以下子模型: 大气组成成分、地带性大气气候、海洋气候、海洋生物圈/化学。

## 2.2.3 IMAGE2.0 模型的时空尺度

该模型的时间水平跨越为 1970 年~2100 年。不同子模型的时间步长因其数学和计算要求而异, 但一般来说变化从一天到五年不等。

模型的空间尺度, 就陆地计算来说为  $0.5 \times 0.5$  经纬度的网格尺度; 基于经济的计算(与能源、工业生产、农业需求有关)是将全球分为 13 个区域; 大气和海洋的气候计算则采用二维网格(100 个纬度带以及 9 个或更多的垂直层)。之所以选用  $0.5 \times 0.5$  经纬度的网格尺度, 是考虑到: ① 几乎所有的气候变化潜在影响(如对生态系统、农业和滨海洪涝的影响)都有很强的空间变化率, 与土地利用有关的温室气体排放(如土壤排放的  $\text{N}_2\text{O}$  或农业活动排放的  $\text{NH}_4$ ) 很大程度上依赖局地环境条件和人类活动。而且, 气候反馈, 如温度对土壤呼吸作用的影响或  $\text{CO}_2$  浓度变化对植被生产力的影响等, 区位之间变动尤为剧烈。② 决策者关注的是气候变化的区域或国家政策。一般而言, 大部分气候政策是就特定区位制定的, 尤其是森林与人工林的碳汇作用, 或改变农业操作方式而减少的  $\text{N}_2\text{O}$  含量。③ 与其它更为综合的模型相比, IMAGE2.0 模型的网格尺度信息会提高模型对观测值的可检验度。

## 2.2.4 关于建模方法及模型检验

由于 IMAGE2.0 模型基于大型的全球数据系列及知之甚少的全球过程, 许多参数定义不当、有很大的自由度是难免的。基于此, 建模的基本方法是提出有过程细节可比水平的子模型, 调整具有最大自由度的有限参数, 在合理拟和度下模拟运算 1970 年~1990 年数据。建模者检验了各子系统的每个子模型并调整了它们的参数, 然后对模型的三个子系统进行关联和检验, 最后检验了整个相关联的系统。检验再现了区域能源消费及与能源有关的排放、温室气体排放与陆地  $\text{CO}_2$  通量、大气温室气体浓度与土地覆盖变化等观测事实。此外, 该模型也能模拟长期地带性平均地表温度和垂直温度。这表明模型可以较好地解释 1970 年~1990 年期间所发生的全球变化。

## 2.3 IMAGE2.0 计算情景<sup>[6,7]</sup>

### 2.3.1 主要情景简介

模型开发者们利用 IMAGE 2.0 对社会-生物圈-气候系统的某些方面(包括初级能源消费、各种温室气体的排放、大气温室气体浓度、温度、降水、土地覆盖和其它指示因子)(表 1)进行了初步运算, 包括一个“常规假设”情景(“Conventional Wisdom”

Scenario) 和该情景的三个变种: “生物燃料作物”情景 (“Biofuel Crops” Scenario)、 “非生物燃料”情景 (“No Biofuels” Scenario)、 “海洋加盟”情景 (“Ocean Realignment” Scenario), 后三种情景可视为 “常规假设”情景的敏感性研究。

表 1 IMAGE2.0 模型中情景所赖以生存的主要变量

Tab.1 Main scenario- dependent variables in IMAGE2.0

社会-经济变量	与能源有关的变量	与农业有关的变量	与大气-海洋有关的变量
人口	工业输出增加值	粮食贸易, 进口/出口	海洋环流格局
GNP	商业服务增加值	氮肥使用	
	个人消费	与技术有关的作物产量提高	
	乘客车辆数	动物生产系数	
	燃料混和比	粗饲料比率: 家畜用粗饲料	
	燃料价格	以特定农作物为食的动物饲料	
	初级能源转化率		
	自行效率提高		

(1) “常规假设”情景 (“Conventional Wisdom” Scenario) 对未来人口、经济和技术驱动进行了常规假设, 其主要驱动力的输入数据部分基于 IPCC 的 IS92a 情景的输入假设。由于该情景没有做与气候有关的政策假设, 故称之为参考情景。

(2) “生物燃料\* 作物”情景 (“Biofuel Crops” Scenario) 在全球能源系统中与前述情景生物燃料使用量相等, 差别在于有关现代生物燃料在哪里或如何种植的假设: “常规假设”情景中假设生物燃料不需要新增农田就可获得; 而 “生物燃料作物”情景假定大部分生物燃料将由新增农田所获得。

(3) “非生物燃料”情景 (“No Biofuels” Scenario) 作为 “常规假设”情景的一个变种, \* 此处术语 “生物燃料”与 “生物量”交叉使用, 二者均指从农作物残渣、能源农作物、人工林和其它类似来源中获得的现代生物燃料, 而非传统的生物燃料, 如薪材。IMAGE 2.0 的能源模型分为以下三类: 现代生物量、薪材、可更新能源 (不包括现代生物量和薪柴, 如水电、太阳能和风能)。

它将后者的生物燃料用石油所代替, 检验了全球气候系统对现代生物燃料使用的敏感性。(4) “海洋加盟”情景 (“Ocean Realignment” Scenario) 讨论了海洋环流大规模变化对全球社会-生物圈-气候系统的影响, 它表明一个发生可能性极小的事件不仅能促进温室气体的增长, 而且也能造成北半球地表气温的暂时变冷。

### 2.3.2 情景结果

表 2 仅列出全球尺度的部分主要情景结果。由表 2a 可知: 四种情景下, 世界能源/工业系统在 1990 年~2100 年间 CO<sub>2</sub> 排放都将显著上升, 从 1990 年的 6.1Pg C/yr 升至 2100 年的 24.0Pg C/yr 或之上; 生物圈将扮演着一个越来越大的大气 CO<sub>2</sub> 汇, 其值从 1990 年的 1.2Pg C/年增至 2100 年的 7.6Pg C/yr 或更高; 海洋也作为一个 CO<sub>2</sub> 净汇, 其值从 1990 年的 1.6Pg C/年增至 2100 年的 4.1Pg C/yr 或之上。从 CO<sub>2</sub> 收支平衡看, 上述趋势主要表现为大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 其中 “常规假设”情景下 2100 年大气 CO<sub>2</sub> 通量净增加为 11.6Pg C/yr (24.0- 8.2- 4.2= 11.6), 大气 CO<sub>2</sub> 浓度从 1990 年的 358 ppm 增至 2100 年的 777 ppm

(表 2b)。此外,从全球来看,农田总量在下个世纪末将扩展(表略)。由于农业活动在下世纪将扩展,作为主要与土地有关的排放(例如,湿地和动物),甲烷排放将持续增加(表 2a)。

在上述四种情景下,由于人类活动导致了温室气体排放大幅度提高,大气温室气体浓度增加,从而引起南北半球温度上升,造成全球变暖(表 2b)。

表 2 情景结果

Tab. 2 Summary of scenario results

表 2a 主要温室气体排放

年+ 情景	碳循环 (Pg C/yr)			甲烷排放 (Tg CH <sub>4</sub> /yr)
	能源/工业 CO <sub>2</sub> 排放	生物圈净通量*	海洋通量*	
1990	6.1	- 1.2	- 1.6	492
2050				
常规假设	15.2	- 7.2	- 3.0	688
生物燃料作物	15.2	- 6.0	- 3.1	692
非生物燃料	17.0	- 7.5	- 3.2	677
海洋加盟	15.2	- 4.5	- 3.1	686
2100				
常规假设	24.0	- 8.2	- 4.2	778
生物燃料作物	24.0	- 6.7	- 4.5	793
非生物燃料	29.2	- 8.9	- 4.8 746	
海洋加盟	24.0	- 6.7	- 4.1 778	

注: 除非特别指明,表中数据为全球平均值或总量。

表 2b 大气浓度与温度变化

年+ 情景	大气浓度			温度变化 ( )	
	CO <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	对流层 O <sub>3</sub>	北半球	南半球
1990	358	1.7	-	14.2	13.0
2050			* *	* * *	* * *
常规假设	522	2.5	+ 11.6%	+ 1.4	+ 1.0
生物燃料作物	534	2.6	+ 12.6%	+ 1.5	+ 1.0
非生物燃料	539	2.4	+ 9.0%	+ 1.4	+ 1.0
海洋加盟	563	2.6	+ 12.7%	+ 0.0	+ 1.1
2100					
常规假设	777	2.3	+ 10.0%	+ 2.4	+ 1.8
生物燃料作物	821	2.4	+ 12.0%	+ 2.7	+ 2.0
非生物燃料	857	1.7	+ 0.2%	+ 2.4	+ 1.9
海洋加盟	863	2.4	+ 11.7%	+ 1.2	+ 2.0

注: 除非特别指明,表中数据为全球平均值或总量

## 参 考 文 献

- 1 Miller R B. 全球变化研究中的社会科学与自然科学间的相互影响与协作. *AMBIO* (中译本), 1994, **23**(1) 19~24.
- 2 国家自然科学基金委员会. 全球变化: 中国面临的机遇和挑战. 北京 高等教育出版社, 1998. 15~28.
- 3 Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H etc. eds. 6. *Climate Change 1995—Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific- Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- 4 IPCC Asia- Pacific Workshop on Integrated Assessment Models. *Climatic Change and Integrated Assessment Models<sup>[IAMs]</sup>— Bridging the Gaps.* 1997. 1~123.
- 5 Alcamo J, Kreileman G J J, Krol M S et al. Modeling the Global Society- biosphere- climate System: Part 1: Model Description and Testing. In *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*, ed. J. Alcamo. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- 6 Alcamo J, Van Den Born J G, Bouwman A F et al. Modeling the Global Society- biosphere- climate System: Part 2: Computed Scenarios. In *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change* ed. J. Alcamo. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- 7 Alcamo J, Kreileman G J J, Bollen J C et al. Baseline scenarios of global environmental change. *Global Environmental Change*, 1996, **6**(4) 261~303.

## INTEGRATED ASSESSMENT MODELS ON CLIMATIC CHANGES

Zhang Xueqin    Ge Quansheng

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

### Abstract

This paper presents a brief introduction of integrated assessment models (IAM) of climatic change. Then the Integrated Model to Assess Greenhouse Effect 2.0 (IMAGE2.0), a multi-disciplinary, integrated model designed to simulate the dynamic of the global society- biosphere- climate system and to evaluate consequences of climate policies is introduced. This suggests that IAMs are useful tools so far to quantify as much as possible the cause-effect relationships of the climate change problem and the cross- linkages and interactions between diverse issues concerned. Chinese research community should pay more attention to the development of IAMs so as to broaden our understanding of climatic change and to aid the decision-making process about influences of human activities on environmental and climatic change.

**Key words**    climatic change, integrated assessment models (IAM), Integrated Model to Assess Greenhouse Effect 2.0(IMAGE2.0)

### 作 者 简 介

张雪芹, 女, 1971年9月生。1993年毕业于山东师范大学地理系, 1996年获该校理学硕士学位, 现为中国科学院地理研究所博士研究生。主要研究方向为气候变化和环境变迁, 已发表论文3篇。