

曾庆存, 周广庆, 浦一芬, 等. 地球系统动力学模式及模拟研究. 大气科学, 2008, 32 (4): 653~690

Zeng Qingcun, Zhou Guangqing, Pu Yifen, et al. Research on the earth system dynamic model and some related numerical simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (4): 653~690

## 地球系统动力学模式及模拟研究

曾庆存 周广庆 浦一芬

(以下按拼音字母排序)

陈文 李荣凤 廖宏 林朝晖 刘辉志 王必正 谢正辉

徐永福 薛峰 曾晓东 张凤

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 将地球上大气、海洋、地理环境和生态各圈看成一个有机的整体进行研究, 并统一协调全球气候、生态与环境变化的有关研究 (如 WCRP、IGBP、IHDP、DIVERSITAS 及 IPCC、Global Change 等), 现称为地球系统动力学。它是新兴的学科, 其核心之一就是要建立地球系统动力学理论模式并作模拟研究。本文主要概述了我国地球系统动力学模式研制和发展的有关现状及近年来特别是中国科学院“三期创新”资源和海洋科技创新基地重要方向项目群“地球系统动力学模式研究”启动前后所取得的阶段性成果及主要进展, 指出了我国地球系统动力学模式发展应重点研究和解决的科学问题及其主要特色, 其中有不少结果是新颖的和具有我国特点的。

**关键词** 地球系统 动力学 模式 模拟

**文章编号** 1006-9895 (2008) 04-0653-38

**中图分类号** P461

**文献标识码** A

## Research on the Earth System Dynamic Model and Some Related Numerical Simulations

ZENG Qingcun, ZHOU Guangqing, PU Yifen

(alphabetic taxis below)

CHEN Wen, LI Rongfeng, LIAO Hong, LIN Zhaohui, LIU Huizhi, WANG Bizheng, XIE Zhenghui, XU Yongfu, XUE Feng, ZENG Xiaodong, and ZHANG Feng

*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** Recently, a new multidisciplinary scientific study, called earth system dynamics, is developing on the basis of considering the atmosphere, oceanosphere, geographic environment and biosphere in the Earth and their linkages together as a whole system. By so doing, the scientific community is able to combine the global climate change studies (such as WCRP and IPCC) and the so-called global change studies (such as IGBP) and some other important scientific plans in the world (such as IHDP and DIVERSITAS) as unified scientific problems to understand more correctly and all-roundly the laws governing the changes in the climatic, environmental and ecological systems, and

**收稿日期** 2008-03-05, 2008-03-17 收修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新工程重要方向项目群: KZCX2-YW-217、218、219、220

**作者简介** 曾庆存, 男, 1935 年出生, 中国科学院院士, 研究方向: 地球流体力学、大气环流、数值天气预报理论、气候动力学和气候数值模拟、环境生态动力学、自然控制论、大气遥感等。E-mail: zengqc@mail.iap.ac.cn

to provide more reliable prediction of their changes in the future. One of the major tasks in the earth system dynamics is to set up an earth system dynamic model with sound theories because a reliable prediction for climatic and environment-ecological change can be made only by the use of such model.

This paper summarizes some related researches and achievements of the earth system dynamic model in recent years in China, especially those just before and during the implementation of the science plan in the Chinese Academy of Sciences (CAS) named "Study on the Earth System Dynamic Model", in which some results are found to be unique and new although the studies are preliminary. The main tasks and some important scientific problems for development of the earth system dynamic model in China are also pointed out. The paper is arranged by the main subsystems of the earth system, except for the introduction and summary. They are the atmospheric general circulation model (AGCM), the physical-hydrological process model in the earth surface layer (LSM), the oceanic general circulation model (OGCM) and the oceanic biogeochemical model, the aerosol and atmospheric chemistry model, the dynamic global vegetation model (DGVM) and some related ecological problems, the biogeochemical model and some related studies of the ground-based stations for surface physical and biogeochemical observations in the arid and semi-arid regions, and some specific studies of land-atmosphere interactions in the arid and semi-arid regions and their influences both insitu and on monsoon.

**Key words** earth system, dynamic, model, simulation

## 1 引言

鉴于当今全球气候与环境变化的事实及人类活动对这种变化的可能影响,世界上有关全球气候与环境变化的四大科学计划(世界气候研究计划-WCRP、国际地圈生物圈计划-IGBP、全球环境变化人文因素计划-IHDP、生物多样性计划-DIVERSITAS)已组成了地球系统科学联盟(ESSP),旨在促进各学科的深入和相互交叉,弥补空白,集成研究地球系统、其变化及对全球可持续发展的影响,提高人类对复杂地球系统的认识和理解,因此一致认为建立描述“地球系统”内部的过程及其相互作用的理论模式,亦即“地球系统动力学模式”,以便阐明全球(包括大地区)气候和环境变化的机理和进行预测,指导国际上就这类问题进行协商和制定协议的科学问题(如 IPCC)是十分重要的,这已经成为当今国际上地球系统科学研究的重要内容。“世界气候研究计划”(WCRP)在其未来 10 年(2005~2015)的战略框架“地球系统的协调观测和预报”(COPEs)就明确指出:“这个新的战略框架将需要一个集成的方法,以使大气圈、海洋圈、陆地圈和冰雪圈的作用能在气候系统的综合模式里考虑,这些综合模式也有能力同化天气和气候观测资料。这意味着需要对耦合系统的气候模式以及数据同化技术和工具的验证与发展有一个长期稳定的科研努力”。应该指出的是,这里所说的“地球系

统”其实为由“气候系统”和“生态和环境系统”组成,尽管该文件中没有明确写出“生态系统”等词。不过,在讲气候变化问题时却是重点强调了影响预测问题最不确定性的因素是“生态系统”,即全球的植被分布及其变化,这正是目前地球系统动力学研究中最薄弱的一环。就现在“地球系统动力学模式”研究内容来说,主要包括四大块,即“大气环流系统”(包括其中的化学-辐射等过程)、“海洋系统”(包括其化学过程)、“陆地表层系统”(包括地下水及淡水问题)以及“全球生态系统”(目前主要限于植被系统,尚未包括微生物、动物等),暂不包括固体地球内部系统和与日地间的空间系统(图 1)<sup>[1,2]</sup>。国际上提出地球系统模式问题大约在 2002 年(或 2003 年)。

鉴于环流有同类性质,有时又把地球系统模式考虑为三个部分,即物理气候系统模式(大气和海洋)、生物地球化学系统模式(包括生态和地球生物化学过程)、人文过程影响模式。但这样一来,就必须把大气化学过程单列为一类,因为像 CO<sub>2</sub> 这样的大气中气体被认为是全球气候变化的首要因子。现阶段模拟地球系统的方法主要是以扩展物理气候系统的细致模式(全球气候模式——GCMs)同时发展地球系统的生物地球化学部分为特征的,特别是包含植动力模块和交互式海洋生态系统的大气化学和碳循环的细致模式,使二者能相互包含,这目前正在发展并被应用于 GCMs 中。此外发

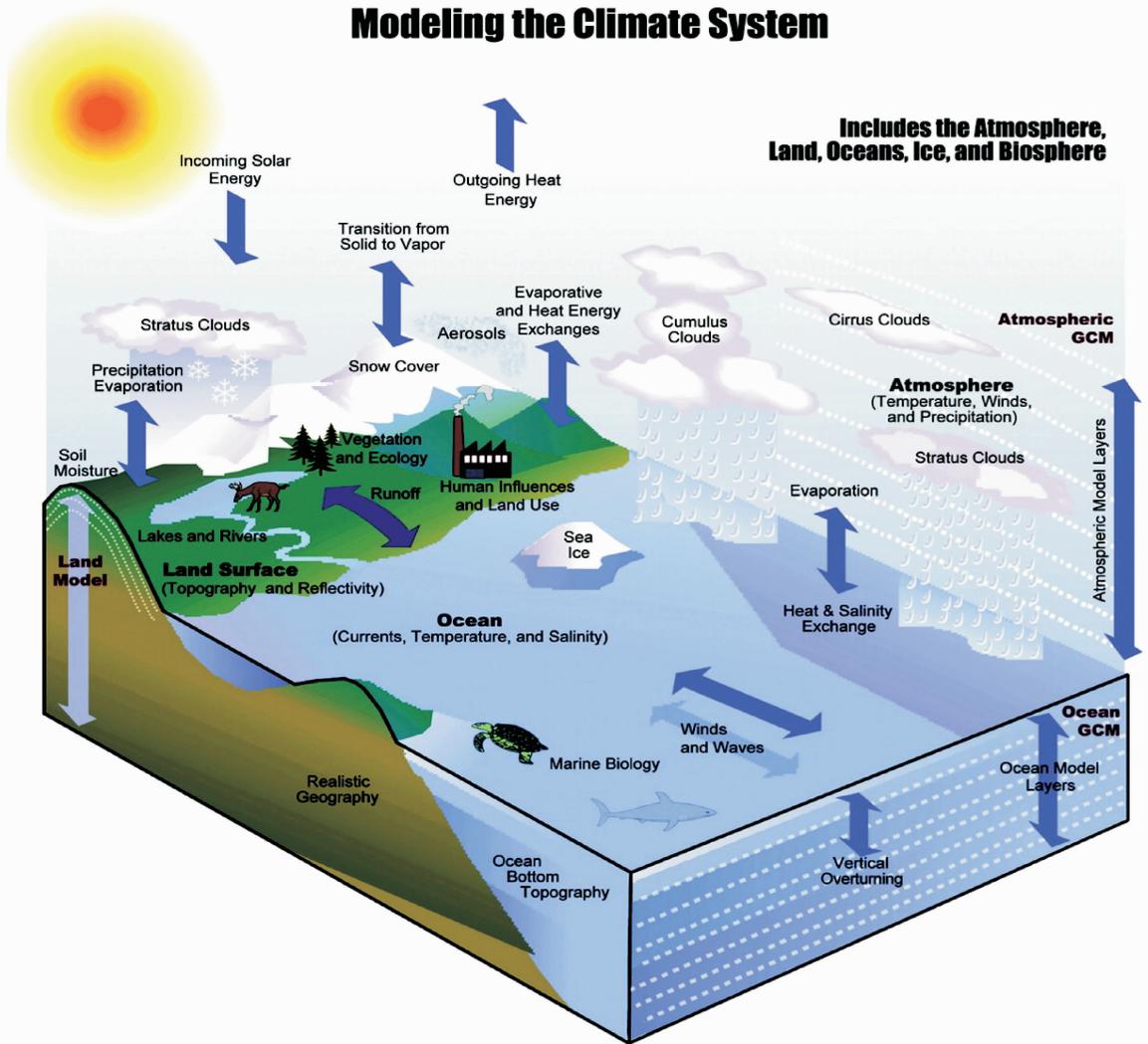


图1 地球系统各分量及其相互作用示意图 (引自文献[1]图3)

Fig.1 Components of the earth system model and the interactions among them, including the human component (from reference [1])

展新的物理参数化, 给出更准确和有更牢固的动力学描述基础并能更好地体现动力学与物理参数化之间联系的新的数值技术也是地球系统模式发展的重要方向。总体说来, 现阶段物理气候系统动力学模式(包括大气环流模式、海洋环流模式、陆表层过程物理和水文模式以及三者的耦合)已渐趋成熟, 现有的气候系统模式已能模拟出当今和古代的世界气候大格局, 甚至可以用来做季度至年度的短期气候预测, 以及做全球气候变暖趋势情景预测的模拟。尽管如此, 模拟或预测的结果尚有颇需消除的不确定性或误差, 比如大气中的云、辐射及与之相关的过程十分复杂, 大气边界层过程、海洋混合等过程以及复杂的地表特征的描述尚待进一步精细完善地用理论方法表达等<sup>[3]</sup>。

至于植被生态动力学系统(DGVM)目前尚处于初始阶段, 只有这部分搞好了, 才能认识环境生态系统与气候系统的相互作用以及前者对后者的反馈的机理。

现有的关于全球植被分布的现场观测和遥感资料, 大体上可用于对全球植被生态系统动力学模式(DGVM)进行粗的验证。但总体说来, 现有的观测资料以及DGVM还过于粗糙, 其各类植被的生理、物理等参数有很大的不确定性, 生消规律、相互竞争规律、斑块和大范围之间的相互作用等也远未弄清楚, 需要大为改进<sup>[3]</sup>。

一个完整的地球系统耦合模式还应包括发生于各圈层尤其是生态圈中的各种尺度的生物、化学、物理过程。因此发展可充分描述陆面、海洋碳循环

等过程的地球-生物化学模型,也是现阶段地球系统模式发展的重要方向。此外,流域水文模式、地下水模式等也均需要加以发展,并耦合到区域的地球系统模式中去<sup>[3]</sup>。

地球系统模式发展的技术路径是最终将描述地球各分系统的动力学模型有机地结合起来,建立完整协调的地球系统耦合动力学模式。这是一个非常复杂的开放的巨系统,涉及地球系统不同时间、空间尺度的相互作用,因此耦合的模式系统必须在总体框架和统一的思想原则指导下进行,以便在整体上遵守物理原则,如质量守恒、能量不灭、热力学第二定律等。地球系统各分量模型间的模块化及其耦合方法和技术研究以及相应的计算方法和计算环境,也是现阶段地球系统模式发展的重要研究内容之一<sup>[3]</sup>。

我国于 2005 年首次由王会军等为召集人召开了主题为“地球系统模式研制及其应用”的中国科协青年学者论坛,与会专家学者当时一致认为在国内,虽然已经建立了尚堪应用的气候系统模式,但是整体的地球系统模式的研制当时在我国还没有开展(例如至少缺少生态系统动力学和地球生物化学过程的模式这一环),大家一致呼吁应该加快我国地球系统模式的发展进程,以期改进现在和将来对气候、环境和自然灾害的预报和预测能力,制定出本国的政策和方略使适应和减轻这些变化的不利方面,以及规划本国人类活动和自然界的和谐发展,以应对国际社会和各国政府对全球气候和环境变化的严重关切(这已成为国际政治和外交的重大问题)<sup>①</sup>。2006 年王会军等<sup>②</sup>又给科学院提交了“关于科学院设立地球系统动力学模式研究”的项目建议并受到关注;2007 年 1 月 20~22 日曾庆存院士<sup>[2]</sup>在 CNC-WCRP、CNC-IGBP、CNC-IHDP 和 CNC-DIVERSITAS 联合学术大会上做了“地球系统动力学模式”特邀报告。此后,中国科学院“三期创新”资源和海洋科技创新基地重要方向项目群“地球系统动力学模式研究”立项,这就标志着中国开展地球系统动力学模式的研究已经正式全面铺开。通过几年的准备,尤其是一年来研究努力,我们已初步搭起我国自己的地球系统动力学模式的框架,有些已做出很好的结果,有我国的特色,还有

一些思想也是新颖的,我们将在今后的工作中使之实现。这些大部分都将在本文叙述到。

本文编排及主要撰稿人如下:引言(浦一芬、周广庆、曾庆存),大气环流模式子系统(薛峰、张凤、王必正、林朝晖、曾庆存),陆表层物理及水文过程模式子系统(林朝晖、谢正辉),海洋环流模式及海洋生物地球化学模式子系统(周广庆、徐永福、李荣凤、浦一芬),气溶胶及大气化学模式子系统(廖宏),全球植被动力学模式子系统及有关的一些生态动力学问题(曾晓东),生物地球化学过程子系统及地表和地球生物化学观测研究(刘辉志、陈文、曾晓东),干旱、半干旱地带陆-气相互作用及其对东亚气候的影响研究(陈文)和结语(周广庆、浦一芬、曾庆存)。全文由曾庆存修改统稿。

## 2 大气环流模式子系统

天气和气候异常和变化复杂多端,而且影响大气运动过程的物理-动力过程甚至化学过程也极其复杂,影响因子极多。因此,反映气候状态及其变化的大气环流模式(AGCM)是气候研究的重要工具。AGCM 发展最早,是地球系统动力学模式中最为成熟的一个子系统。我们从 20 世纪 80 年代开始,设计了我国第一代大气环流模式即 IAP AGCM,并用于实际气候预测<sup>[4]</sup>。但是,由于日常的天气和气候预测一般不需考虑那些超过预报时限而经过长期积累才起作用的因素。因此,为研究较长时间尺度(如十年以上)的气候变化,就得将现有的 AGCM 大为改造,或者重新研制。在我们的研究工作中,二者兼而有之,即对现有的 IAP AGCM-3.0 加以改造,成为 IAP AGCM-3 和新研制 IAP AGCM-4,这样就可以相互比较,相互融合,最后定出我们的地球动力学模式的 AGCM 子模式。

### 2.1 IAP AGCM-3 和 IAP AGCM-4 简介

IAP AGCM-3 是以 IAP 九层格点大气环流模式经过很大的改造而成的,现为垂直方向 21 层,水平方向分辨率可调<sup>[5~7]</sup>。其中最重大的改进在于云和辐射相互作用部分,这也是目前国际上的热点研究对象,这是因为有云的大气其对辐射强迫的响应就总体而言是气候变化中最关键的因子<sup>[8~11]</sup>。

① 林朝晖. 科协青年科学家论坛第 98 次会议简报. 2005 年 7 月 28~29 日,北京. 1~5

② 王会军,等. 地球系统动力学模式研究项目建议书. 2006. 1~3

这其中, (1) 计入  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $O_3$  及其外的所有其他非灰色气体 (包括近红外波段水汽连续吸收谱) 对短波辐射的作用, 并发展一个新的参数化方法<sup>[12,13]</sup>; (2) 计入卷云粒子形状的效应, 将卷云的消光系数参数化为波长的函数<sup>[14]</sup>; (3) 云的不均匀性的影响<sup>[15]</sup>。数值模拟结果表明, IAP AGCM-3 能很好地模拟出当今气候的季节变化及东亚降雨区的分布, 图 2 给出的是模拟和实测的 7 月份太平洋副高, IAP AGCM-3 模拟的副高位置和强度更接近实测, 比原来的 AGCM 有很大改进。

由于这个模式不算太复杂, 我们原来是用它来做跨季度预报试验 (与热带太平洋区域海洋环流模式耦合), 得到较好的结果。由于这模式加入细致的云与辐射的相互作用, 可以计入长时期辐射因子影响的积累, 对全球气候与环境变化做模拟是合适

的。当然, 这模式还将再继续改进。例如在模式中计入云的微物理特征以及我们关于云-辐射相互作用更新的研究结果等。

IAP AGCM-4 的动力框架是将我们以往的 AGCM 动力框架进一步加以改进, 使之做到完全的内部协调性以及大气和陆地及海洋表面的边界条件的协调性<sup>[16,17]</sup>, 并改进了一些算法, 以便既准确又省时。这个模式现为 26 层, 水平分辨率为  $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ , 与 NCAR 相当, 并且先套用 NCAR 的 AGCM (CAM) 的全部物理过程<sup>[18]</sup>, 但二者的差别在于 IAP AGCM-4 的动力框架是网格点的, 而 NCAR 的是谱模式。我们将二者的模拟结果相比较, 发现动力框架的不同也可以引起模拟结果的不小差异, 特别是海平面上的场和高纬准定常大气中心的位置和强度上, 似乎 IAP AGCM-4 的更接近实际。图 3 为 IAP-4 模拟的 7 月份海平面气压场<sup>[18]</sup>, 模式较好模拟出主要的高压和低压中心, 位置也接近观测, 但个别高压中心如北太平洋副高的强度略偏强。我们先将 NCAR 的物理过程全套嵌入 IAP AGCM-4 的另一个原因是: 在设计我们自己的模式时, 必须有一个可以相互比较的“标准”, 而 NCAR 的 CAM 是国际上最早的“全球动力学模式” (即今称为“地球系统动力学模式”) 的大气部分, 国际公认为水平较高, 尤其是其辐射平衡的计算是经过卫星测值校准过的。我们新模式的总体结果应该不低于它的水平。

我们将进一步提高水平分辨率 (现在我们已经取为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 并有计算结果), 改进算法和配上我们自己设计的物理过程, 如改进水汽传输的算法, 加进云水、云冰、降水、降雪的预报方程等<sup>[16]</sup>。此外, 还有一些国际上未计及的, 或方法完全不同的, 见

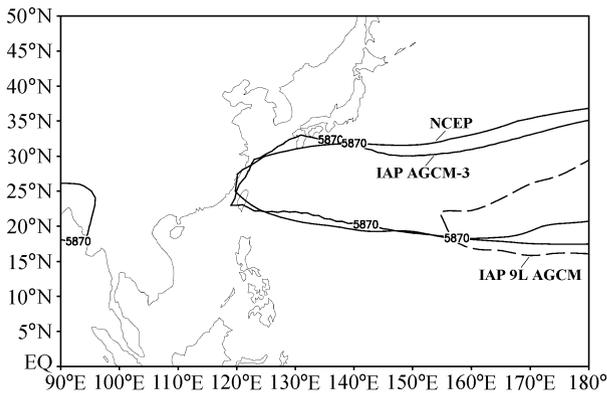


图 2 模拟和观测的 7 月份太平洋副高的位置和强度 (单位: gpm)。虚线: IAP 9L AGCM 模拟结果; 实线: NCEP 再分析资料和 IAP AGCM-3 模拟结果

Fig. 2 The simulated and observed western Pacific subtropical high (gpm) in Jul from IAP 9L AGCM, IAP AGCM-3 and the NCEP reanalysis

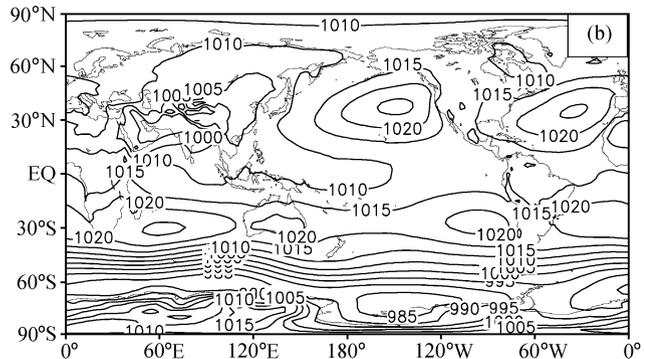
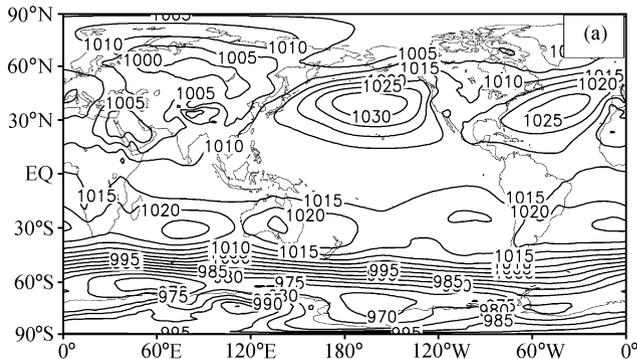


图 3 7 月份海平面气压场: (a) IAP AGCM4.0 的模拟结果; (b) ERA40 再分析资料分析结果

Fig. 3 Sea level pressure (hPa) in Jul (a) simulated by IAP AGCM4.0 and (b) from the ERA40 reanalysis

下一小节。

## 2.2 新 IAP AGCM 的一些新特点

除去上述的我们的格式是内部完全协调的和较多地考虑到云与辐射相互作用的复杂方面和云的不均匀影响之外<sup>[19~21]</sup>，我们在物理过程方面还有一些新的思想。

(1) 三度空间不均匀云的动力学表述及计算方法。当然，这需要云系的超级参数化方法，即列出三维云方程及其与大尺度过程的耦合。我们考虑了云表面特征的几何不光滑性、各种尺度运动的相互作用等。三维云模式中考虑了云水、云冰和雨、雪的预报方程，微物理过程和滴谱分布<sup>[22, 23]</sup>。计算采用特征线方法，正因为如此，我们可以巧妙地克服

云模式的界面和大尺度动力学网格匹配的困难。

(2) 考虑大到暴雨发生时雨滴下降对低空气温的巨大冷却作用<sup>[24]</sup>。

(3) 整体或区域嵌套中采用新的分块地形坐标，尤其可以考虑高地形的绕流作用<sup>[25~27]</sup>。

(4) 对于复杂的地面边界层，采用动力统计学方法。

## 2.3 模拟结果的诊断分析新方法

除国际上通用的诊断量而外，针对我国受季风的影响巨大而国际上又较少注意季风本质方面的分析方法，我们已提出一些有效的方法，如季风区的定义域<sup>[28~30]</sup>。初步分析表明，IAP AGCM-3 能较好地模拟出季风的斜压结构。图 4 为 IAP AGCM-3 模拟

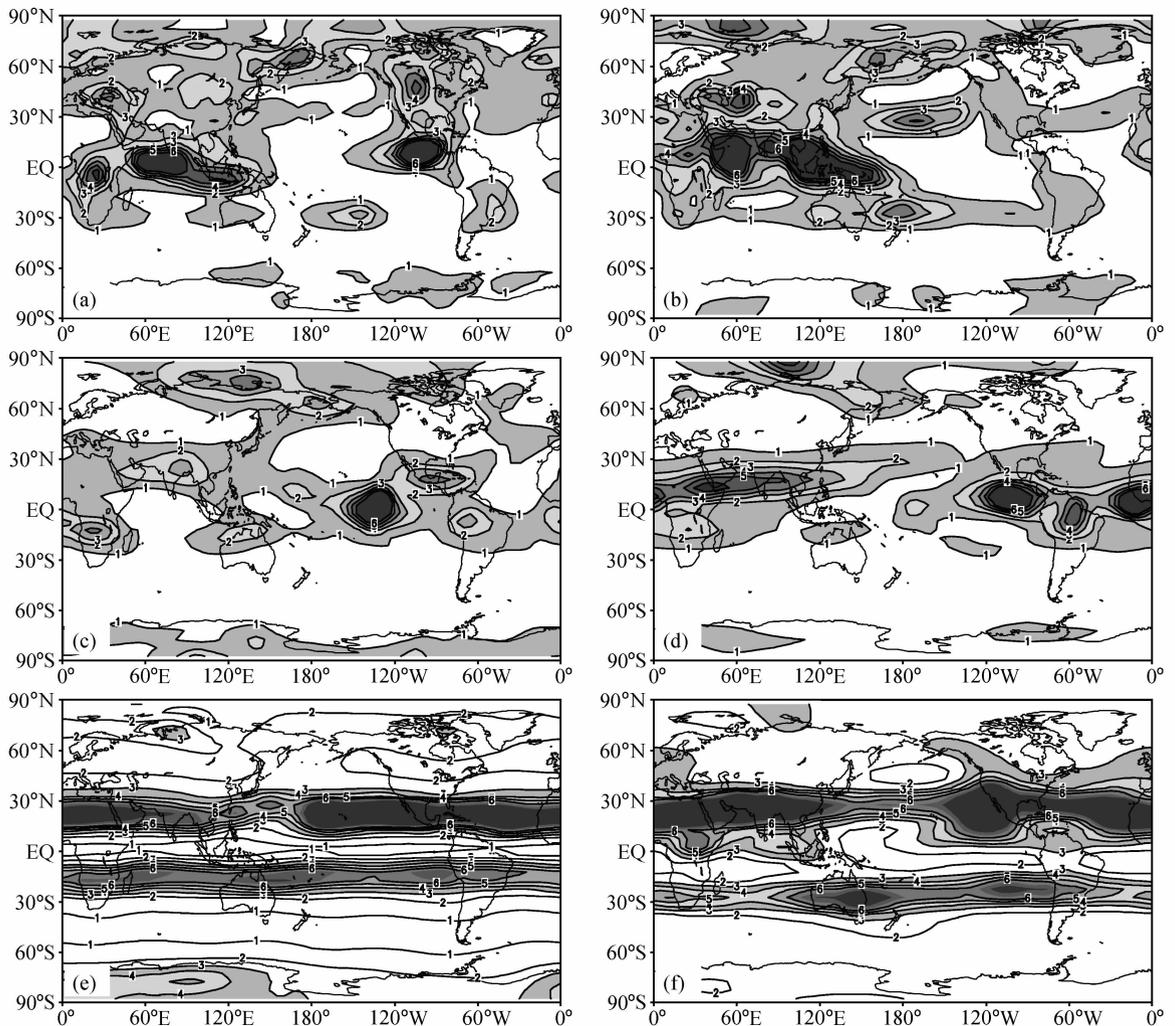


图 4 850 hPa (a, b)、200 hPa (c, d) 和 50 hPa (e, f) 标准化季节变率：(a, c, e) IAP AGCM-3 模拟的 15 年气候平均结果；(b, d, f) NCEP 再分析资料的分析结果

Fig. 4 The normalized seasonality at 850 hPa (a, b), 200 hPa (c, d) and 50 hPa (e, f): (a, c, e) 15-year mean results simulated by IAP AGCM-3; (b, d, f) the corresponding results based on NCEP reanalysis

的标准化季节变率，模式能模拟出 850 hPa 层热带、副热带和温寒带季风区，但模拟的副热带季风强度偏低，同时模式还模拟出 200 hPa 层的行星季风区和 50 hPa 层的平流层季风区。值得注意的是，由于垂直分辨率不够，IAP9 层 AGCM 模拟的平流层季风不够理想<sup>[31]</sup>，这在 IAP AGCM-3 模拟结果中有显著改进。此外，我们还提出季节的定义和季节来临的早晚<sup>[32~34]</sup>，南北两半球大气环流相互作用的表达<sup>[35]</sup>，这也将分析我们的模拟结果时使用。研究还表明，南半球环流变化对北半球气候尤其是东亚夏季风有显著影响，对我国夏季降水也有重要的预测意义<sup>[36]</sup>。我们拟将这些研究成果应用于模式的检验中，模拟结果应该与实况相符。

### 3 陆表层物理和水文过程模式子系统

陆地表面是大气运动的重要下垫面，也是人类生存环境的重要组成部分。表层的物理水文过程通过陆气间的能量和水分交换影响局地、区域乃至全球气候的基本特征。为此，世界气候研究计划(WCRP)下一个子计划 GEWEX 就专门研究这些过程，水文界也十分重视这些问题，但由于它们的复杂性，尚需大力研究。此外陆表过程模式以及植被系统与大气环流模式的耦合，也是需要进一步解决的问题。

### 3.1 陆表层物理过程模式的发展

中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所)地球系统动力学模式中的陆表物理过程模式将以 CLM/CoLM 为蓝本，并在此基础上予以改进。上述模式的发展也均有我们的重要贡献，如大气物理所自行发展的陆面过程模式 IAP94<sup>[37]</sup> 就是 CLM/CoLM 通用陆面过程模式的三个蓝本之一。CLM 是由曾旭斌发起，戴永久作为首席科学家发展起来的，后移交给 NCAR 的科学家而成为后来的版本<sup>[38]</sup>，在国际上均广泛应用；随后戴永久等又对该版本的模式进行了一系列改进和发展，并命名为 CoLM。利用包括中国地区的各种野外观测试验的离线(off-line)试验结果表明，CLM/CoLM 能够较为合理地模拟出世界上不同地区的陆面物理过程<sup>[38,39]</sup>。随后 CLM 也得到了改进和发展，如 Zeng 等<sup>[40]</sup>通过考虑模式中植被下层湍流交换系数的内部一致性，从而在很大程度上减小了半干旱地区地面温度过高的偏差。又如 Zeng 和 Wang<sup>[41]</sup>发展了新的计算地表粗糙度和零平面位移的参数化方案，结果表明，新的参数化方案大大改善了感热的模拟能力，此外对潜热的模拟也有一定的改善(见图 5)。随后，王爱慧等<sup>[43]</sup>还按 Zeng 等<sup>[42]</sup>的思想在 CLM 模式中引入枯叶层，在一定程度上解决了现有 CLM 在蒸散发各组成部分分配比

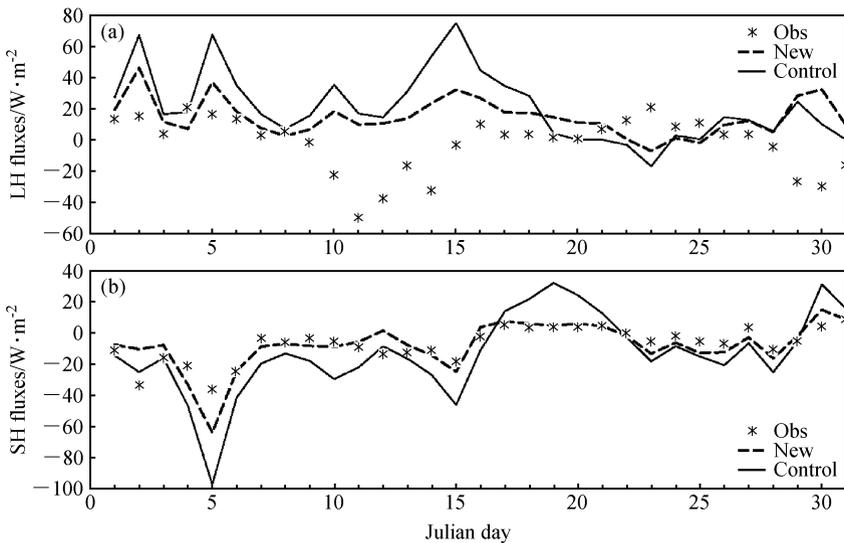


图 5 不同版本通用陆面过程模式 CLM 对 1987 年 1 月 Cabauw 观测站的日平均通量的模拟情况及其与观测的比较：(a) 潜热；(b) 感热。实线代表标准 CLM 的模拟结果，虚线代表考虑了粗糙度和零平面位移参数化方案后的结果  
Fig. 5 The simulated daily average fluxes by different versions of the Common Land Model (CLM) and their comparisons with observations at Cabauw in Jan 1987: (a) Latent heat (LH); (b) sensible heat (SH). Solid line; simulated by the standard CLM; dashed line; simulated by CLM with parameterizations of roughness length and zero-plane displacement

例上的不合理；而 Wang 和 Zeng<sup>[44]</sup> 基于低矮植被积雪的垂直覆盖度新的参数化，较好地改变积雪的融化速率，而相应地面通量模拟的量级也更趋于合理。

还应指出，陆表层过程模式还应包括起沙机理，如气溶胶和大气化学模式提供下边界条件，如阵性起沙机理<sup>[45]</sup> 和更多依赖于大气和气候的、虽是局地但很有影响的过程，如雨水冷却地面等。

### 3.2 陆表层物理过程和大气环流模式的耦合

作为地球系统模式的一个重要分量，陆面过程模式的发展最终需要与大气环流模式进行耦合，并在耦合系统中考察该分量模式对改善耦合地球系统模式系统模拟能力的影响。如前所述，IAP 地球系统模式将有多个不同的大气模式、陆面模式子系统，为了便于实现不同分量模式之间的耦合，也许通过引入“耦合器”的概念，更便于使它们能够相互适应和匹配，我们已能通过“耦合器”的方法，实现 CoLM 陆面过程模式与 IAP AGCM-II 大气环流模式的耦合 (IAP9L\_CoLM)<sup>[46]</sup>。

地球系统不同分量界面（如陆气、海气界面）能量收支的平衡在很大程度上可以影响到整个耦合模式系统的性能，图 6 则给出耦合了 CoLM 前后的 IAP 陆面耦合模式的地表能量平衡情况。从图可以发现，对于原先的 IAP 陆气耦合模式，在陆地表面存在着约  $19 \text{ W/m}^2$  的能量盈余，但是对于耦合了 CoLM 的 IAP 陆气耦合模式而言，则地气界面间的能量基本上达到了平衡（偏差约为  $0.5 \text{ W/m}^2$ ），说明 IAP9L\_CoLM 可以更好地保持地表的能量平衡。

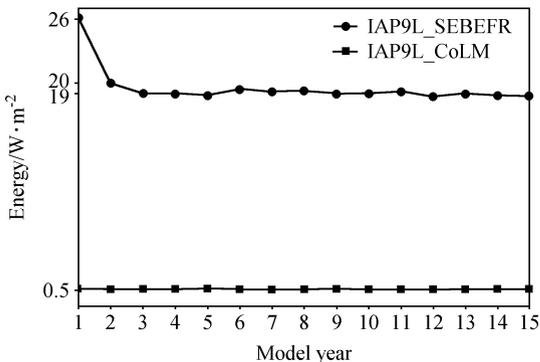


图 6 IAP9L\_CoLM 和 IAP9L\_SEBEFR 模拟的全球陆面年平均的能量收支状况

Fig. 6 The simulated annual-averaged global mean residual energy at land surface for IAP9L\_CoLM and IAP9L\_SEBEFR

比较耦合了 CoLM 前后的 IAP 陆气耦合模式对当今气候态的模拟结果表明，IAP9L\_CoLM 可以较好地模拟出冬季和夏季降水、近地面气温、海平面气压和地表感热通量、潜热通量等的基本气候态，对东亚地区雨带进退的模拟也比较成功，而且还极大地改善了非洲和南美降水的模拟，成功地再现夏季非洲沿赤道降雨带<sup>[46]</sup>。

考虑到现阶段在气候系统模式中大都没有考虑动态植被及其与气候之间的相互作用，更谈不上与植被动力学模式（如 DGVM）的耦合，在 IAP9L\_CoLM 的基础上，通过“耦合器”我们又耦合了动态植被模式<sup>[47]</sup>，初步建立了一个大气-陆面-动态植被耦合模式 IAP9L\_CoLM-VEGAS<sup>[46]</sup>。结果表明，耦合了动态植被模式后，可以较好地模拟出观测的叶面积指数的空间分布及其季节变化特征。但需要指出的是，由于这里的 VEGAS 模式相对简单，只是考虑了四种不同 PFTs 功能分类，因此迫切需要发展更为复杂的、包括尽可能多 PFTs 功能分类、而且生消自洽的动力学模式，即 DGVM，才可能解决气候与环境变化两方面的问题，这部分的详细内容可参见第 6 节。

### 3.3 大尺度陆面水文模型

虽然现阶段各种不同复杂程度的陆表面过程模式可以较好地模拟出大气-陆表面之间的能量和水分平衡过程，但对于地表以及地下水文过程的模拟，仍然有很大的问题，存在着很大的不确定性，因此发展可充分考虑地表、地下水运动过程的大尺度水文模型，并通过陆面物理和水文过程模式最终实现与气候系统模式的耦合，也是地球系统模式发展的重要方面<sup>[48,49]</sup>。在我们发展的地球系统模式中，我们拟分别采用基于 HMS 以及 VIC 的大尺度水文模型。

在 VIC 模式的基础上，Liang 等<sup>[50]</sup> 和 Xie 等<sup>[51]</sup> 引入可同时考虑蓄满产流和超渗产流机制的水文过程，并考虑土壤特性的次网格非均匀性对产流影响，对 VIC 模式进行了进一步改进和完善；在此基础上建立基于全国  $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$  网格的大尺度陆面水文模型框架<sup>[52]</sup>。Xie 等<sup>[53]</sup>、袁飞等<sup>[54]</sup> 和 Yuan 等<sup>[55,56]</sup> 在上述模型框架下，模拟了气候变化对流域水文特性的影响。Xie 等<sup>[57]</sup> 随后发展了模型参数移植方法，提高陆面水文过程模型参数在资料缺乏区域的有效性，从而改进陆面水文过程模拟，

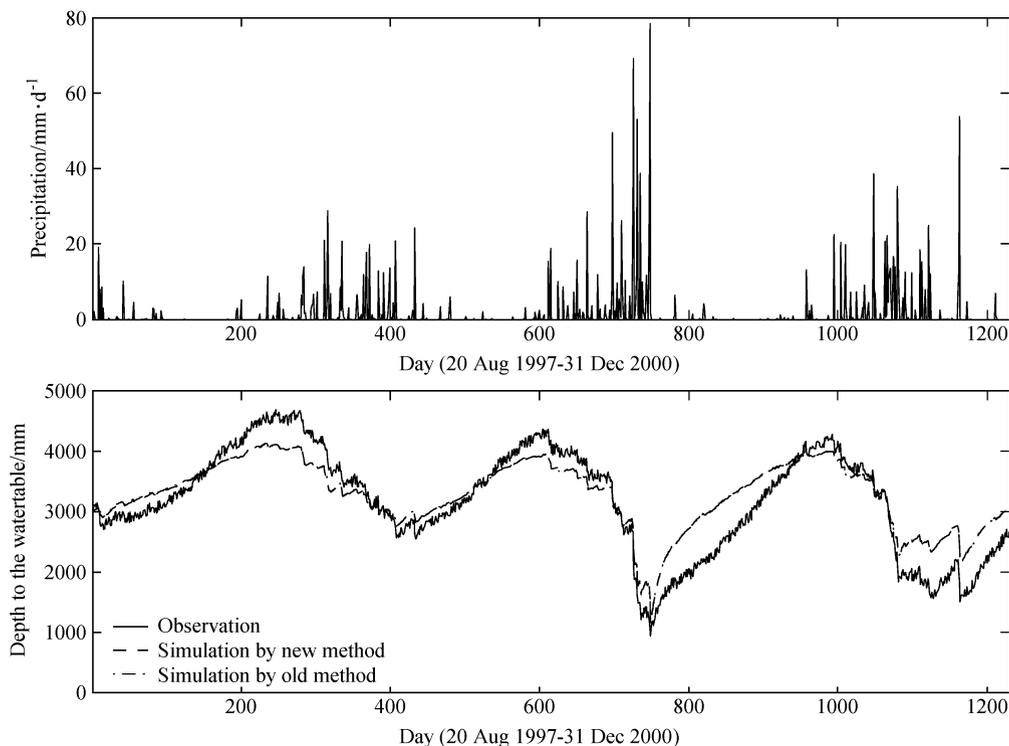


图 7 Donghua 站(42.93°N, 123.4°E)逐日的模拟与观测的地下水位的对比图

Fig. 7 Comparison of daily groundwater tables between the CLM-IAG simulations and the observations at Donghua station (42.93°N, 123.4°E)

并给出该模型在中国区域的一个参数估计。Tian 等<sup>[58]</sup>根据潜水面坡度的不同,基于 Boussinesq-Storage 方程,建立同时考虑潜水面水分储存和非饱和层水分入渗两方面影响的地下径流机制。

另外一个水文模式则是基于 Yu 等<sup>[59]</sup>所发展的的大尺度分布式水文模式 (Hydrologic Model System, 简称 HMS) 建立起来的。首先,杨传国等<sup>[60]</sup>提出一种基于 1 km 数字高程 (DEM) 生成更大网格尺度 DEM 数据,同时可以保持流域河网信息并减缓高程、坡度等地貌参数信息量衰减速度的有效方法——ZB 算法。与常规的网格平均法对比结果显示,随着网格尺度的增大,ZB 算法获得的 DEM 数据可以保持河网的连续性,提取出合理的流域范围,减缓地形信息量的衰减速度。在此基础上,通过地质数据、下垫面资料等数据的搜集整理,生成一套适合于中国区域的陆面水文过程模式的数据资料集,进而初步建成了适合于中国区域的大尺度网格化水文模型<sup>[61]</sup>。该模式在淮河流域的应用实践表明,该模式可以较好地考虑地表水、地下水、土壤水和河流-地下水相互作用等各个水文过程,尤其是可以较好地模拟出淮河流域的水文循环过程。

此外,作为水文过程中的重要部分,地下水与

区域气候之间的相互作用也得到越来越多的重视,目前用于全球和区域气候研究的陆面过程模式大都忽略地下水位的变化,因此发展相应的地下水模块也是十分重要的。Liang 等<sup>[62]</sup>和谢正辉<sup>[63]</sup>首先将地下水位的动态表示问题归结为运动边界问题,利用有限元集中质量法直接求解<sup>[64]</sup>,发展了用于气候模拟的地下水模型。随后,Yang 和 Xie<sup>[65]</sup>针对上述运动边界问题,通过数学变换将其转换成固定边界问题进行求解,在离散时只需对非饱和区域进行分层,在同样的分层数下,提高了网格的分辨率,也使得将该模型引入当前的耦合气候陆面水文模式中用于气候与地下水的相互作用研究成为可能(如图 7)。在上述研究的基础上,通过将上述地下水模型与地表径流模型<sup>[50, 51]</sup>以及基流模型<sup>[58]</sup>,实现了与 CLM 陆面模式的耦合,从而建立起可考虑地下水动态变化的陆面过程模式 CLM-IAG。

## 4 海洋及其生物地球化学模式子系统

### 4.1 海洋环流模式

海洋占地表面积的 70%,海洋环流及其变化是地球(气候与环境)系统演变的重要环节,对气候系统间能量和物质循环具有直接影响,一个月以上

的气候演变即应考虑海洋过程的作用,因此大洋环流模式是继大气环流模式之后发展并应用最为成熟的一个子系统,海气耦合模式也是地球物理气候系统中较易实现耦合的两个子系统模式。大气物理所自 20 世纪 80 年代开始发展自己的海洋环流模式 (OGCM),其显著的特点之一即是可以直接计算海表的起伏随时间的变化,而且与我们的 AGCM 动力框架一样,我们的 OGCM 也满足平方守恒<sup>[66, 67]</sup>。目前,大气物理所的海洋模式已发展为包括全球海洋、区域海洋及中国近海的多种形式,并在不同的科学研究和预测中得以应用。现今海洋模式的发展趋势首先体现在高分辨率模式的建立,而考虑耦合多种过程和影响的更精细的上层混合参数化方案也是当今海洋模式研究和发展的重点。

海洋环流的运动尺度具有较小的 Rossby 变形半径,因此用于描述海洋运动的数值模式就要求具有更高的空间分辨率,与复杂的海陆分布和海底地形有关的环流更要求数值模式对其应有足够的分辨能力。因此不断地提高模式的空间分辨率一直是海洋模式发展的主要方向。IAP 大洋环流模式近年来的一个重要进展即是建立一个涡许可 (eddy-permitting) 的全球海洋环流模式 LICOM<sup>[68]</sup>,它采用全球  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的统一分辨率。这个分辨率刚好能满足分辨赤道 Rossby 变形半径要求,可以明显改善对赤道波动过程的描述,因此其模拟的北赤道逆流 (NECC) 和赤道潜流 (EUC) 均有明显的加强,同时西边界流和径向热输送的强度也有明显改善。

提高分辨率的另一个好处是大大改善了印度尼西亚海域复杂地形的描述,尤其是连接太平洋和印度洋的通道,结果是印度尼西亚贯穿流 (ITF) 的模拟大为改善 (图 8),不论是年平均的 ITF 还是其季节变化均与实际更为接近,其中年平均 ITF 输送达到了  $14.5 \text{ Sv}$  ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )<sup>[69]</sup>。

在高分辨率海洋模式发展上的另一重要进展是建立了一个区域和近海三维斜压海洋环流模式 (IAP-ROCM)。模式采用自由海面起伏和适合处理陡峭地形的  $\eta$  坐标<sup>[70, 71]</sup>。为了解决中国近海大范围的水边界问题,建立了三重嵌套区域海洋环流模式系统,其范围涵盖印度洋-太平洋区域、中国近海和西北太平洋区域以及台湾周围海域,模式最高分辨率达到  $1/8^\circ$ 。同时通过合理处理开边界条件,又分别建立高分辨率的南海区域海洋环流模式和渤海东海区域海洋环流模式,分辨率为  $1/12^\circ$ <sup>[72, 73]</sup>。利用这些高分辨率模式,可以对中国近海流系进行更细致的刻画和描述,例如证实了琉球群岛东南海域终年存在东北向的琉球海流,其最大流速出现在次表层;揭示了东北向琉球海流下面的西南向的琉球潜流,以及台湾和菲律宾以东强大的黑潮下面存在的南向逆流;分析了南海月平均环流的主要特征、形成机制以及黑潮入侵南海的季节变化;讨论了冬季黑潮水入侵东海大陆架以及冬季对马暖流的源地<sup>[74~77]</sup>。

在建立我国自己的地球系统动力学模式中,上述两模式 (即全球的和区域的) 及其嵌套都将作为海洋环流模式子系统的基础,同时我们亦拟参考国

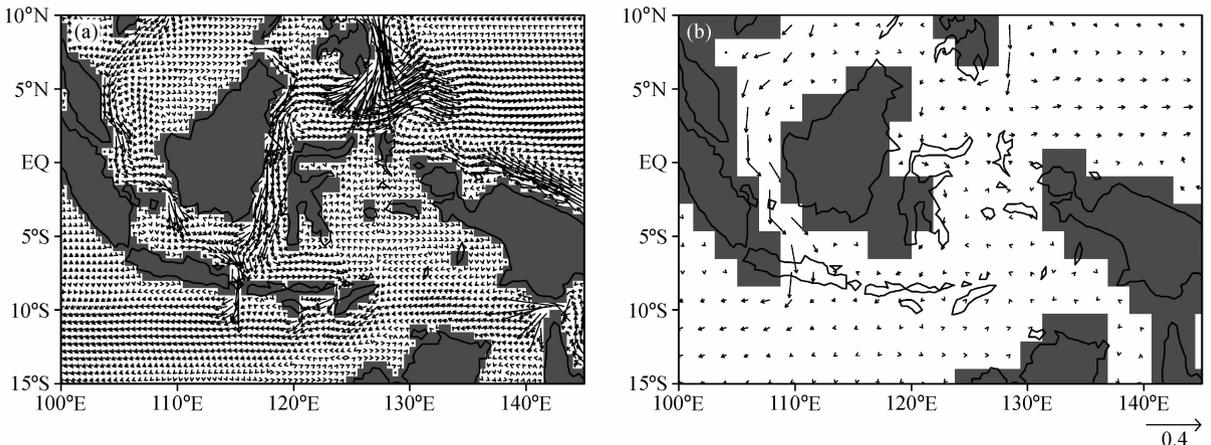


图 8 IAP 全球模式模拟的印度尼西亚海域上部 300 m 的平均流 (引自文献<sup>[68]</sup>): (a) 高分辨率模式 LICOM 的结果; (b) 低分辨率模式 L30T63 结果

Fig. 8 The upper 300-m averaged currents around Indonesian Seas simulated by IAP global OGCM (from reference <sup>[68]</sup>): (a) From high resolution model LICOM; (b) from low resolution model L30 T63

外的模式以资比较。

### 4.2 海表及上混合层的物理过程及其计算方法

海洋上混合层动力学过程支配着大气与海洋之间的动量、热量及物质的交换,其季节和年际变化影响着主温跃层的热结构。因此,海洋上混合层是海洋环流和气候变化的重要影响因子之一。传统的上混合层模式有块体模式、湍流封闭模式和 k 剖面参数化方案等。但是这些模式和方案并不完善,OGCM 进而 CGCM 都存在着一一定的模拟偏差。其中盐度模拟问题最为严重,是当前海洋环流模式面临的主要难点之一。例如,在海表,盐度的边界条件常常处理为向观测值恢复的牛顿冷却形式,而没有直接考虑淡水通量的作用过程,究其原因是由于原有的淡水通量边界条件是不适定的<sup>[16, 17]</sup>,直接应用并与大气模式进行耦合常常出现计算不稳定。曾庆存和穆穆<sup>[17]</sup>通过合理的物理考虑而改进了淡水注入影响混合层盐度的计算,可以克服上述困难。河流作为沿岸主要的淡水注入,对沿岸环流具有重要影响,上述海表混合层盐度计算方案的思想

亦可用于侧边界的淡水通量计算问题。海洋模拟另一个有明显偏差的例子是对赤道太平洋而言,许多模式(包括 OGCM 及 CGCM)模拟的冷舌过冷,赤道温跃层过于松散;其年际变化强度在赤道东太平洋和南美沿岸地区明显偏低,而振荡频率过高。其部分原因在于模式对上层海洋的夹卷过程(entrainment)及垂直扩散过程的描述存在较严重偏差<sup>[78~80]</sup>,导致赤道地区温跃层变化对混合层温度影响不够。最近,Zhang 等<sup>[81]</sup>提出一种描述次层上卷海温的非局地参数化方法,有效地改进了中等复杂程度耦合模式(IOM)对 ENSO 的模拟。朱杰顺等<sup>[82]</sup>将这一方案引进到 IAP 热带太平洋环流模式,并利用经验方法将海洋上混合层底部海温变化与海表面起伏联系起来,从而可以方便地利用模式模拟的海表起伏描述温跃层的变化情况及其对混合层海温变化的影响。与一个统计大气模式建立的混合型热带太平洋海气耦合模式模拟显示,赤道东太平洋海温距平的分布形式及周期与观测更为接近(图 9),而且还能模拟出观测中 ENSO 振荡的季节

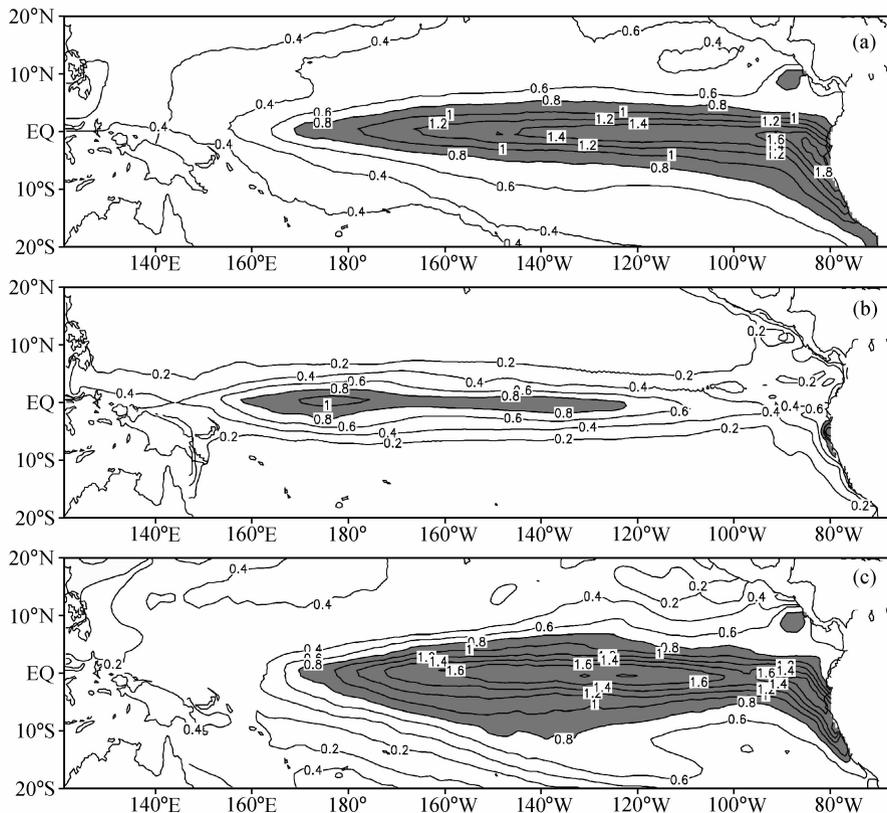


图 9 SSTA 标准差空间分布图(引自文献[83]): (a) 观测(1981~2000 年); (b) 参数化改进前的模拟; (c) 参数化改进后的模拟。等值线间隔为 0.2 °C

Fig. 9 SSTA standard deviations for (a) observation based on 1981 - 2000, (b) simulation before the parameterization improvement, (c) simulation after the parameterization improvement (from reference [83]). The contour interval is 0.2 °C

依赖性特征<sup>[83]</sup>。进一步,该方案还有助于提高 ENSO 预测技巧<sup>①</sup>,多年后报试验表明,其整体距平相关系数提高了 0.1~0.2,预报时效延长了 3~4 个月。上述这些方法在我们的地球系统动力学模式中亦将被采用。

#### 4.3 海洋生物地球化学模式

海洋生物地球化学过程是控制海洋系统的一个十分重要的组分,海洋生物地球化学是研究海洋环境中生物参与下的生源要素或与生物有关元素的生物地球化学过程或循环,如碳、氮、磷、氧、硅等生源要素的循环。目前与全球气候变化直接关联的碳循环(包括海洋生态系统)的研究是一个要点<sup>[84]</sup>。当前包含海洋生物过程的碳循环模式主要有三种类型:(a) 基于营养盐的模式,(b) 营养盐恢复模式,(c) 显式描述生态系统的模式<sup>[84]</sup>。其中大尺度的环流碳循环模式有不少是属于 a、b 类型。显式描述生态系统的模式及其与环流模式的耦合是发展方向<sup>[85~87]</sup>。从 20 世纪 90 年代以来,国际上已经开展了全球海洋碳循环模式的比较计划,其第一、二阶段的模式主要注重物理过程对被动示踪物的影响。我国海洋碳循环模式的研究始于 20 世纪 90 年代,分别对一维、二维及三维海洋碳循环模式进行了研究<sup>[88~90]</sup>,包括生化过程对碳循环的影响<sup>[91~93]</sup>,同时也发展了海洋生态系统模式并研究其对碳循环的影响<sup>[94,95]</sup>。其实对于碳循环的数值模拟而言,正如碳循环模式比较计划指出的那样,第一步要做的就是选择一个能准确反映大洋物理场特征,并能合理描述海洋通风过程的海洋环流模式。因此,国际上广泛采用的被动示踪物方法近年来也被大气物理所的研究人员引进并用以评估模式以及研究某些重要的物理过程参数化方案。

近年来,研究人员采用一个北太平洋海盆尺度环流模式,详尽研究了中尺度示踪物参数化方案以及南边界条件对北太平洋中被动示踪物输送和储存的影响<sup>[96]</sup>。发现等密度面扩散混合方案(GM90)中等密度面扩散系数大于倾斜扩散系数(常称厚度扩散系数)时,模拟的水流和被动示踪物分布均能得到较大的改进。在南边界无论是刚性边界条件还是开边界条件时,GM90 中等密度面扩散系数与倾斜扩散系数的比值较大时,有利于北太平洋中层水

的形成,被动示踪物的模拟结果更接近于观测;得到了在副热带海区核弹<sup>14</sup>C 的水柱总量存在一个从西到东的纬向梯度,与观测结果比较符合<sup>[97~100]</sup>。此外,使用 CFC-11 对 IAP/LASG 全球大洋环流模式 L30T63<sup>[101]</sup>吸收存储被动示踪物的能力进行考察<sup>[102]</sup>。通过模拟结果与观测的比对可以看到,L30T63 与同类模式相比有较大的优越性,但仍存在现今模式普遍存在的 CFC-11 穿透深度不足的问题。针对该问题,李阳春等<sup>[103]</sup>进一步考察了次网格尺度参数化方案(GM90)的不同参数对大洋温盐结构以及被动示踪物吸收分布的影响。结果表明,两个主要参数能显著影响大洋水团结构以及对被动示踪物的吸收存储能力,其中,加大等密度面扩散系数可显著改善被动示踪物穿透深度不足的问题。在此基础上,徐永福等利用 IAP/LASG 新的海洋模式 LICOM<sup>[68]</sup>构建了一个太平洋海盆模式<sup>[104]</sup>,并研究了该模式模拟吸收被动示踪物(如 CFC-11,核弹<sup>14</sup>C)的能力<sup>[105]</sup>。结果表明,模式对此类被动示踪物的模拟吸收和存储与观测事实比较吻合,说明该模式完全可以作为碳循环研究的工具。

在碳循环的模拟研究中,徐永福等<sup>[106]</sup>使用开边界的北太平洋海盆尺度环流模式进一步估计北太平洋对人为 CO<sub>2</sub> 的吸收和存储。模拟结果表明,无论是刚性边界还是开边界,模式均在西北太平洋和赤道东太平洋海区产生大的交换通量(图 10)。在 1800~1997 年的 198 年模拟中,与基于观测资料的估计相比,开边界模式能较好估计北太平洋中人为 CO<sub>2</sub> 的储存总量,差别仅在 4.5%之内,其中 1980~1989 年的 10 年年平均吸收量约为 0.38 Gt(C)。在对基于 LICOM 的太平洋海盆模式经过被动示踪物的研究后,也使用该模式估计了人为 CO<sub>2</sub> 在整个太平洋中吸收和存储<sup>[105]</sup>。在这些工作基础上,发展了一个包含 4 个变量的生物地球化学模式,并将其耦合到太平洋环流模式中,建立一个太平洋碳循环环流模式。对模拟结果的初步分析显示,可再现太平洋海气碳通量的年际变化特征,并与观测资料及其他模式的结果比较一致,因此可应用于对碳循环进一步的研究和预测中<sup>[105]</sup>。目前及近几年时间内,在上述工作的基础上要将该物地球化学模式耦合到全球海洋环流模式中,进行全球海

① 周广庆,朱杰顺,Zhang Rong-Hua,等. 参数化次表层上卷海温改进 ENSO 模拟/预测研究. 2007. 内部交流

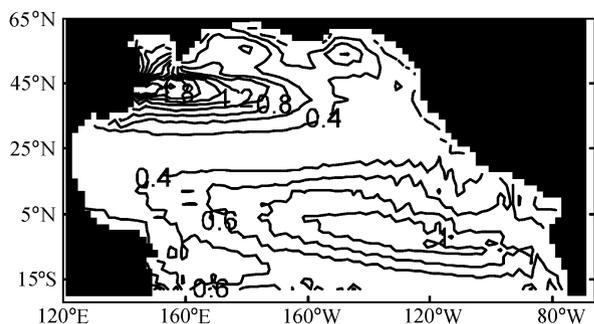


图 10 1990 年人为 CO<sub>2</sub> 海气交换通量 (单位: mol·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 年平均分布 (引自文献[106])

Fig. 10 Annual mean distribution of sea-air exchange fluxes of anthropogenic CO<sub>2</sub> (mol·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) in 1990 (from reference [106])

洋碳循环的模拟研究,以评估海洋中的碳水平的演变并预估未来海洋对大气 CO<sub>2</sub> 的吸收和储存能力,同时将该海洋碳循环作为地球系统模式的一个重要子模式。另外,在更长的时间内发展三维海洋生态系统模式是一个重要的方向,大气物理所的研究人员也正在做这方面的工作,期望今后将海洋生态系统模式与全球海洋环流模式耦合,并最终将纳入到地球系统模式中。

## 5 大气化学及气溶胶模式子系统

地球系统模式中考虑大气化学与气溶胶,关注的是对大气辐射有影响的那些气态化学物质和气溶胶成分。气溶胶是固态或液态的小颗粒,大气中主要有硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、有机碳、沙尘和海盐这几类气溶胶。由于气溶胶的形成和演变直接依赖于复杂的大气化学过程和各类气态化学物质的浓度,因此必须进行大气化学和气溶胶的同步模拟。

随着经济的发展,人类活动导致长生命周期温室气体 (CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 等)、臭氧和气溶胶的浓度大幅增加并成为影响气候变化最重要的人为因子<sup>[107]</sup>。温室气体导致全球气候变暖。气溶胶可通过反射或吸收太阳辐射直接影响气候变化,也可作为云凝结核,影响云对太阳光的反射率、降雨量和云的寿命,从而间接的影响气候变化。

大气化学过程和气溶胶也是大气污染研究的重要内容,不论它们是否与大气辐射直接相关。近地面层臭氧和气溶胶对人体、植物和土壤等生态环境有着直接的危害,是当前城市空气污染研究与治理的主要对象。传统上全球变化和大气污染研究是各

自独立进行,但由于它们在考虑大气成分排放、化学反应、传输和沉降上有许多共性,而且还在中长期影响评估和应对措施计划方面相互依赖,因此全球模式中气候变化与大气污染的模拟近年来逐步统一。我们这里重点讨论全球变化问题,也涉及到大气污染及其中长期评估问题。

### 5.1 大气化学和气溶胶与气候的耦合及目前的水平

利用大气环流模式 (GCM) 模拟大气化学和气溶胶始于 20 世纪 90 年代初。到目前为止,已有不少 GCM 能在线同步模拟气态物质浓度 (包括 O<sub>3</sub>、OH、NO<sub>x</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、NMHC 等)<sup>[108~115]</sup>。GCM 中气溶胶的模拟也从模拟单一气溶胶成分发展到多类气溶胶 (如硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、一次有机碳、二次有机碳、沙尘和海盐)<sup>[111, 112, 116~118]</sup>。因气态物质的浓度影响气溶胶的形成和增长,而气溶胶通过其表面的非均相化学反应和影响气态物质光解速率影响气相大气化学,最近的全球模式已开始在 GCM 中同时模拟大气化学和气溶胶<sup>[111, 112, 116, 118, 119]</sup>。因为有些大气化学过程与气溶胶密切相关,模式研究结果已表明考虑大气化学与气溶胶的耦合对于模拟化学物质的浓度及其气候效应都非常重要。如采用实验室测得并经过区域性污染过程观测结果验证的气溶胶表面对 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、NO<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 的吸附系数,全球模式研究发现 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 在气溶胶颗粒表面的水解和气溶胶对 NO<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的吸收影响 O<sub>3</sub> 的浓度,使北半球高纬度地区地面的 O<sub>3</sub> 浓度减少 30%~35%<sup>[111]</sup>。此外, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 在气溶胶表面的水解可让人口密集处硝酸盐浓度增加 2~5 倍<sup>[120]</sup>。在利用类似方法得到的沙尘和海盐气溶胶对气态 SO<sub>2</sub> 和 HNO<sub>3</sub> 的吸附系数时,模式结果表明沙尘气溶胶对气态 SO<sub>2</sub> 和 HNO<sub>3</sub> 的吸收,以及海盐气溶胶对 SO<sub>2</sub> 的吸收均能显著影响全球硫酸盐和硝酸盐气溶胶的辐射强迫<sup>[120, 112]</sup>。大气化学与气溶胶耦合的重要性如图 11 所示。

最近,大气化学、气溶胶与生物地球化学过程的耦合逐渐成为国际地球系统模式发展的重点之一。CO<sub>2</sub> 和臭氧浓度,以及气溶胶的浓度变化导致辐射、降雨和云的改变,影响植被的分布和类型。一方面,植被种类及分布直接影响植被碳氢化合物的排放以及相应臭氧和二次有机气溶胶的形成<sup>[121~124]</sup>。二次有机气溶胶是植被排放的碳氢化合物在大气中被 OH、O<sub>3</sub> 和 NO<sub>3</sub> 氧化后通过气粒转

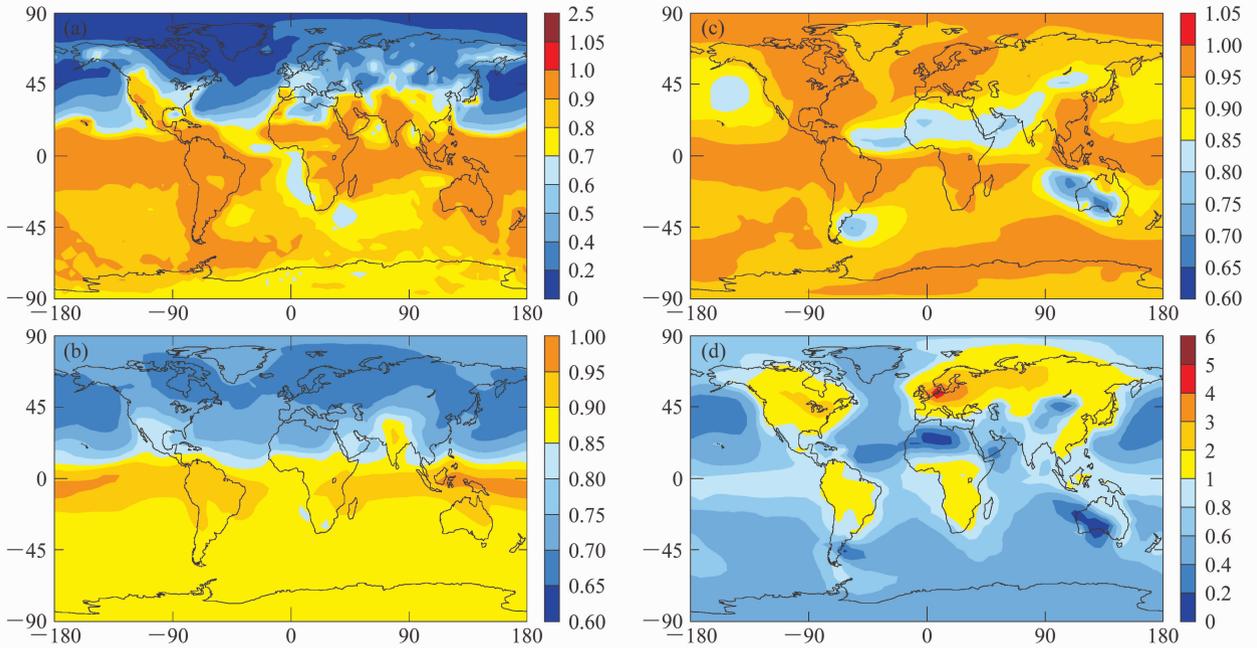


图 11 考虑非均相化学反应时 (a) 氮氧化物、(b) 臭氧、(c) 硫酸盐、和 (d) 硝酸盐在地面浓度的模拟值与不考虑非均相化学反应时相应模拟值之比 (引自文献[111])。所考虑非均相化学反应包括  $\text{N}_2\text{O}_5$  在气溶胶表面的水解, 湿气溶胶对  $\text{NO}_3$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{HO}_2$  的吸收, 以及沙尘气溶胶对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$  和  $\text{O}_3$  的吸收

Fig. 11 Ratios of annual mean mixing ratios calculated in the presence of heterogeneous reactions to those in the absence of them for (a)  $\text{NO}_x$ , (b)  $\text{O}_3$ , (c)  $\text{SO}_4^{2-}$ , and (d)  $\text{NO}_3^-$  in the GCM surface layer (from reference [111]). Heterogeneous reactions considered are hydrolysis of  $\text{N}_2\text{O}_5$  and absorption of  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , and  $\text{HO}_2$  on wetted aerosol surfaces, as well as the uptake of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ , and  $\text{O}_3$  by mineral dust

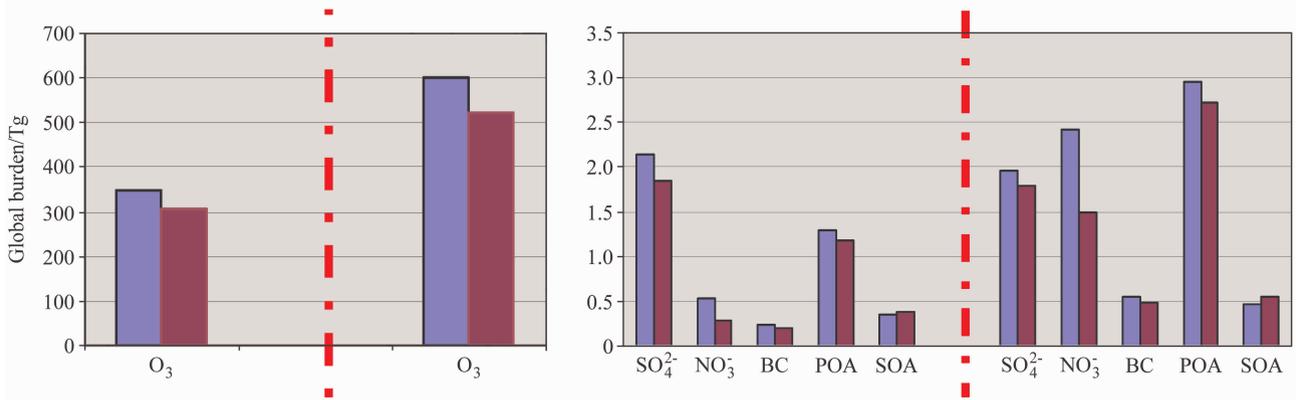


图 12 气候变化和排放变化对臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 和硫酸盐 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )、硝酸盐 ( $\text{NO}_3^-$ )、黑碳、一次有机碳 (POA) 以及二次有机碳 (SOA) 对流层总量的影响。红色虚线左边和右边为利用 2000 年和 2100 年人为 (臭氧和气溶胶本体及前体) 排放模拟结果; 自然源排放由相应气象参数计算; 蓝色和紫色为利用 2000 年和 2100 年气候条件下的模拟值; 2100 年气候是根据 IPCC A2 情景温室气体浓度改变模拟所得 (引自文献[124]表 4)

Fig. 12 Effects of changing emissions and changing climate on global burdens of ozone ( $\text{O}_3$ ), sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), black carbon, primary organic carbon (POA), and secondary organic aerosols (SOA). Year 2100 climate was driven by future changes in  $\text{CO}_2$  concentration based on the IPCC SRES A2. Bars on the left and those on the right of the red dash line were estimated with year 2000 and year 2100 anthropogenic emissions (of ozone precursors and aerosols/aerosol precursors), respectively. Natural emissions were calculated based on the simulated climate. Bars in blue and purple indicate the burdens simulated in present-day climate and in the year 2100 atmosphere, respectively (from Table 4 in reference [124])

化形成的。在夏季植被排放最强时, 观测表明二次有机气溶胶在微颗粒状气溶胶质量中所占的比例可达 10%~60%<sup>[125]</sup>, 其环境气候效应日益受到重视。另一方面, 植被分布直接影响沙尘气溶胶的起沙过程。此类耦合在数十年时间尺度上对环境气候影响的研究还处于起步阶段。

## 5.2 与全球变化研究有关的未解决的主要问题

大气中臭氧和气溶胶的含量决定于其本体和前体的排放、大气中化学反应以及气象过程, 但所有这些过程都会随气候变化而改变, 引起复杂的反馈机制。在保持目前臭氧前体人为排放量的情形下, GCM 耦合模拟结果表明气候变暖导致的增温和水汽增加, 会使对流层臭氧总量减少<sup>[110, 124, 126]</sup>, 但同时也增加人口密集地区的对流层臭氧浓度<sup>[124, 126~128]</sup>。气候变化还通过温度、降雨、风速等的变化, 影响自然源物质的排放、气溶胶热动力学平衡以及气溶胶湿沉降等主要过程, 从而显著影响气溶胶的浓度、分布和气候效应<sup>[124, 129]</sup>。如图 12 中比较了未来气候变化和未来排放变化对臭氧和硫酸盐、硝酸盐、黑碳、一次有机碳以及二次有机碳的对流层总量的影响。虚线左边结果表明即使人为的臭氧和气溶胶本体前体排放维持在目前水平, 2000 至 2100 年温室气体增加(采用未来排放增加最大的 IPCC A2 情景)导致的气候增暖能使臭氧、硫酸盐、硝酸盐、黑碳、一次有机碳气溶胶在对流层的总量分别减少 12%、14%、47%、13%、9%, 同时使二次有机碳气溶胶的总量增加 17%<sup>[124]</sup>。若利用 2100 年人为排放(虚线右边), 考虑气候变化的模拟结果与不考虑时的模拟结果有较显著差异, 这对未来污染评估和气候模拟都有重要意义。对流层臭氧和气溶胶的生命周期很短(从几天到几周), 所以它们在空间上的分布很不均匀, 使臭氧和气溶胶与气候变化间的相互影响复杂化。目前, GCM 在气态大气化学-气溶胶-气候耦合的程度上还参差不齐。如是否考虑大气中所有主要的气溶胶, 是否考虑气态化学与气溶胶之间的相互影响(即气溶胶表面的非均相化学反应), 以及是否及时将模拟臭氧和气溶胶的辐射强迫反馈到气候模拟等方面还存在着差异。

与气溶胶直接气候效应的模拟相比, 间接气候效应的模拟具有更大的不确定性。这是因为云的空间尺度变化很大, 从几十米到数百公里, 导致了气

溶胶和云相互影响的复杂化。大气环流模式的空间分辨率通常为数百公里, 需利用次网格参数化的方法来模拟从气溶胶到云和降水的转化过程。另外, 气溶胶间接气候效应的研究目前大多只考虑气溶胶对水状云形成的影响, 对冰状云影响的研究还有很大的不足。利用 GCM 模拟气溶胶间接气候效应时有考虑硫酸盐<sup>[130~133]</sup>、考虑硫酸盐和黑碳气溶胶<sup>[134]</sup>、模拟硫酸盐和有机碳<sup>[135, 136]</sup>以及考虑硫酸盐、黑碳和有机碳<sup>[137, 138]</sup>。到目前为止, 模拟气溶胶的间接气候效应时大多还未能考虑大气中所有主要的气溶胶成分, 而且在由气溶胶到云滴和降雨的参数化方案上还有很大的不确定性。

关于大气化学、气溶胶和生物圈的耦合, 动态植被模式的准确性以及植被排放碳氢化合物定量估算的不确定性是最近一段时期亟需改进的方面(详见第 5.5 小节)。

## 5.3 国内研究应着重解决的一些问题

二十多年来我国经济总量一直保持高速增长, 但工业活动等形成的气态物质和气溶胶的不利影响也很严重。目前已有华北、四川盆地、长江三角洲、珠江三角洲四大空气污染区。气溶胶在中国区域浓度远高于其他国家<sup>[139]</sup>, 因而气溶胶的气候效应在我国值得关注。Li 等<sup>[140]</sup>认为中国四川盆地近四十年来气温的变冷趋势可能与这一地区硫酸盐气溶胶含量的增加有关。Menon 等<sup>[141]</sup>利用大气环流模式模拟研究了黑碳气溶胶对东亚夏季气候的影响, 发现黑碳气溶胶吸收短波辐射, 从而产生大气异常加热, 引起东亚中部大气的上升运动和南北两侧气团的下沉, 造成了我国东部的南涝北旱。到目前为止, 模拟气溶胶对中国气候影响的研究还相对较少, 须加以改进。例如:

(1) 气溶胶成分考虑不全。大气中有硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、一次和二次有机碳、沙尘和海盐气溶胶, 但以前的模拟通常只考虑了硫酸盐或黑碳气溶胶。

(2) 中国区域气溶胶光学特性未得到很好的观测验证。光学厚度和单一反射率的时空分布直接影响模拟的气溶胶的局地气候效应的准确性。

(3) 大多未考虑气溶胶间接气候效应。

(4) 未考虑气候变化对气态物质和气溶胶的影响。

(5) 气相化学和气溶胶的模拟需与动态植被变化模拟相耦合。

#### 5.4 关于下边界条件和排放量问题

大气中气态物质和气溶胶的模拟均需考虑排放、化学反应、传输、沉降这几个方面。除了通过化学反应形成的大气化学物质,以及像 CO<sub>2</sub> 等可以视为在大气中充分混合的成分而外,化学物质大都是由地面或近地面层内以通量的形式排放进入大气模式的下界面,它们的时间和空间分布都是很不均匀的。建立包括所有这些化学物质的排放量的分布的模块,是一项相当重要而又艰巨的工作。

化学物质的排放分为人为排放和自然源排放两大类。国际国内均有根据社会经济发展等估算的过去、现在和将来的各种重要大气成分的人为排放清单(应该指出,这清单的准确度是很有问题的,我们姑且认为“有总比无好”吧),气候模式中通常采用具有空间分布的月平均排放量。大气化学和气溶胶模拟需要人为排放清单的化学物质如表 1 所示。作为举例,表 1 中也列出了这些化学物质在 2000 和 2100 (依据 IPCC A2 情景)年全球排放总量。自然源的排放依赖于气象条件。最重要的自然源排放包括海洋排放的二甲硫醚(dimethylsulfide, 或简称为 DMS)和海盐气溶胶、陆表上的沙尘气溶胶以及植被排放的碳氢化合物(第 5.2 小节提到的二次有机碳气溶胶即来源于此类)。不像水汽通量等一些物质通量的计算已包含在陆表层物理和人文过程模式(LSM)子系统中那样,自然源化学物质的通量是 LSM 所没有的,所以全球模式需加入计算所有这些自然源化学物质排放量的模块。

自然源排放的模拟有很大的不确定性。如沙尘气溶胶的起沙依赖于临界摩擦速度、土壤湿度、植被分布以及比全球模式格点尺度小很多的阵风和对流等<sup>[45, 142, 143]</sup>。全球或大尺度的大气化学和气溶胶模式中,最好可以用嵌套的方法把现有的区域尺度和中尺度模式(用于天气预报或大气污染预报)计算的化学物质通量用于全球模式的下边界条件。此外,关于植被碳氢化合物的排放,因涉及到很多类碳氢化合物、植被种类、叶面积指数、气候条件等多种因素,测量和计算均较为复杂,具体参数化方案可参见文献<sup>[144, 145]</sup>。我们希望国际 FLUXNET(虽然很稀疏)能够扩大其观测项目,把有关大气化学的通量包括进去,有助于改进化学物质通量参数化,为全球模式提供更准确的化学下边界条件。

表 1 大气化学和气溶胶模拟需要人为排放清单的化学物质,以及这些化学物质 2000 和 2100 年(依据 IPCC A2 情景)的全球排放总量(引自文献<sup>[124]</sup>)

Table 1 Global annual anthropogenic emissions for years 2000 and 2100 (IPCC SRES A2) for the simulations of gas-phase chemistry and aerosols (from reference <sup>[124]</sup>)

化学物质	2000 年	2100 年	
NO <sub>x</sub> (Tg N yr <sup>-1</sup> )	化石燃料燃烧	20	96
	生物量燃烧	11	11
	土壤施肥	0.5	0.5
	飞机	0.5	2.2
	总量	32	109.7
CO (Tg CO yr <sup>-1</sup> )	化石燃料燃烧	390	1858
	木材燃料燃烧	130	130
	生物量燃烧	510	510
总量	1030	2498	
Ethane (Tg C yr <sup>-1</sup> )	工业活动	6.2	97.7
	生物量燃烧	2.4	2.4
	总量	8.6	100.1
Propane (Tg C yr <sup>-1</sup> )	工业活动	6.7	28.1
≥C <sub>4</sub> alkanes (Tg C yr <sup>-1</sup> )	工业活动	30.1	60.5
	≥C <sub>3</sub> alkenes (Tg C yr <sup>-1</sup> )	工业活动	10
	生物量燃烧	12	12
	总量	22	41
	生物量燃烧	9	9
SO <sub>2</sub> (Tg S yr <sup>-1</sup> )	工业活动	69	60.3
	生物量燃烧	2.3	2.3
	总量	71.3	62.6
NH <sub>3</sub> (Tg N yr <sup>-1</sup> )	农业活动	37.4	88.8
	生物量燃烧	6.4	6.4
	其他	3.1	7.4
	总量	46.9	102.6
POA (Tg OM yr <sup>-1</sup> )	生物量燃烧	54	
	化石燃料燃烧	28.2	
	总量	82.2	189.5
BC (Tg C yr <sup>-1</sup> )	生物量燃烧	5.6	
	化石燃料燃烧	6.6	
	总量	12.2	28.8

## 6 全球植被动力学模式 (DGVM) 及有关的一些生态动力学问题

### 6.1 DGVM 在地球系统动力学模式和全球变化研究中的地位

在地球系统各组成部分中,生物圈最为复杂、最具多样性,且与人类活动息息相关。生态系统

(特别是植被)的分布及变化和气候及地理环境,对全球能量和物质循环有重要影响。研究生物系统的构成、演变及其与气候和地理环境的相互作用,正是生态学的一些主要内容。生态学研究主要有野外观测、实验方法、数学模型和数量分析方法等。地球系统动力学模式中主要应用的是数学建模及数值模拟(即生态动力学方法)。生态动力学,顾名思义,主要是利用数学、物理学方法建立被研究的生态系统的动力学模型,用来解释和预测其变化规律及其对气候变化的响应和反馈,以及和人类活动的相互影响,进而提出人工合理调控的策略和措施,以利于人类和自然界的和谐,利于人类的可持续发展。

在地球系统动力学模式中,生态系统主要简化为陆面植被系统[近年来海洋生物化学模式也有进步(见本文第4节)]。非植被系统,例如动物种群,对气候系统的影响只是在植被系统中被间接地考虑到(例如参数化表达方法等)。通常的陆表层模式(LSM)中包含有生物地球化学过程(如光合作用)和生物地球物理学过程(如蒸腾作用),可以模拟陆表的碳排放和吸收以及水汽和水分循环,进而模拟植被对气候和环境的调节(如温度、降水、土壤湿度等)。但模式中的植被特征(如植被类型分布、季节变化等)通常是预先给定的,且一般不考虑植被的年际变化。注意到气候变化通常伴随着生态系统结构的改变,因此通常的陆表层模式及其与气候模式的耦合,不适合于研究全球气候变化及其相应的生态环境变化。另一方面,原有的生态动力学模式,包括便于进行数学分析的简单的理论模型(如基于平衡态的生物地理模式),以及主要通过计算机模拟来描述生态系统中个体发育的复杂模式(如 forest gap model 等),虽然可以模拟由气候变迁引起的生态变化,但它们大多不考虑生物地球化学过程,因而不适合与陆面模式耦合。为了研究全球气候与生态环境变化问题,专门发展了全球植被动力学模式(Dynamic Global Vegetation Model,简称 DGVM)。现有的 DGVM 将上述几类模式的主要特点整合在一个自洽的、符合现有的陆表层模式(LSM)的框架结构之内。DGVM 耦合到 LSM 及大气环流模式(AGCM)中去,主要用于研究全球及区域气候变化引起的生态环境的结构演变(特别是有无突变)及相应的全球碳、水循环的变化。

因此, DGVM 是当今 WCRP-IGBP 重点研究的一个前沿课题,是当今地球系统动力学模式不可缺少的重要有机部分。

## 6.2 DGVM 的构成和目前的水平

DGVM 在 20 世纪末才开始发展起来,仍处于草创阶段。迄今为止,主要有七、八种,如 HYBRID、IBIS、LPJ、CLM-DGVM、SDGVM、TRIFFID、VECODE、ED 等。

目前 DGVM 一般包括三个主要部分:(1)生物地理学模块:描述各植被类型生存所需的气候条件;(2)生物地球化学模块:模拟植被的生长(如光合作用、呼吸作用——其中许多部分与陆面模式相通);(3)植变动力学模块:描述各植被类型的生态特征变化(如物候学、生理学、形态学和物种竞争等)。在 DGVM 中全球植被区分为若干种植物功能类(plant functional type,简称 PFT),分别赋予各自的生物-物理参数,于是按照物理学定律和其他一些限制条件和法则,就构成了各个 PFT 和整个系统的方程式组。

DGVM 与 LSM 耦合,可模拟出当今气候条件下的全球植被主要类型的大致分布。例如,CLM-DGVM 可模拟出全球的森林带、草原带、荒漠带,并区分热带、温带、寒带植被等<sup>[146]</sup>。

将 DGVM 与 AGCM 耦合,用来对气候变化条件下的植被系统的演变作预测<sup>[147, 148]</sup>,这正是研制地球系统动力学模式最重要的任务之一。这不仅是因为由此可同时对全球的气候和生态环境变化作出预测;更重要的是,如果 DGVM 模拟不好,或不能很好地与 AGCM 耦合,就不能正确描述全球的碳循环过程,从而无法解除全球气候变化预测中最大的不确定因素。然而,目前 DGVM 与 GCM 的耦合上有许多问题有待解决。

## 6.3 灌木林的重要性和 DGVM 中灌木林子模式(shrub submodel)

现有大多数 DGVM 的一个很大缺陷是不能单独分出灌木林带或模拟出森林与灌木以及灌木与草原的区分,灌木或者附属于森林,或者附属于草原。事实上,自然界中灌木幅员广大,全球灌木林覆盖率超过陆地面积的 10%,而我国灌木林覆盖面积甚至近 20%,为我国森林面积的近 2 倍。灌木林带在影响气候的一些要素、土地利用、碳循环等方面都与森林和草原有着十分明显的不同,因此植物

学家和地理-生态学家将它区分出来,作为独立的 PFT。灌木主要生长于干旱、半干旱地带或高纬度贫瘠地带等生态系统脆弱的地带,最易受气候变化的影响。不能明确模拟出灌木林带就难于预测全球变化中的这个最敏感的地带,而对敏感地带的预测是全球变化研究中最有价值的核心。有鉴于此,尤其是要解决我国有特点而且是很实际的问题,我们对在 DGVM 研究中如何正确表达灌木林问题给予特别的关注。

我们参加过世界上较好的 DGVM 之一即 CLM-DGVM 的设计,深知其对灌木林的主要生理-物理特性均没有正确的考虑,例如高耐热性(在寒带是高耐寒性)、高耐旱性、单位叶面对光合作用的高效和对贫瘠养分的高利用率,以及与之相适

应的型态特征等。为此,我们分析考虑了这些因素并利用我们的观测资料,研制一个灌木林子模式<sup>[149]</sup>,加入到 CLM-DGVM 中去,成功地模拟出全球干旱和半干旱地区的灌木林(见图 13)。

当然,无论是灌木林子模式还是整个 DGVM 都需大大改进完善。我们对植被生长和枯萎过程及竞争法则等已有自己的理论方法,下一步将同时充分利用我国的野外观测资料,研制我国的 DGVM,并参加到国际的 WCRP 和 IGBP 中去。

#### 6.4 植被对气候变化和人类活动的相互作用以及突变和多样性

气候学、地理学和地质学(主要是古地层学)的研究结果表明,从地质年代至今,全球范围的气候以及生态和环境都有很大的变化,而且气候变化

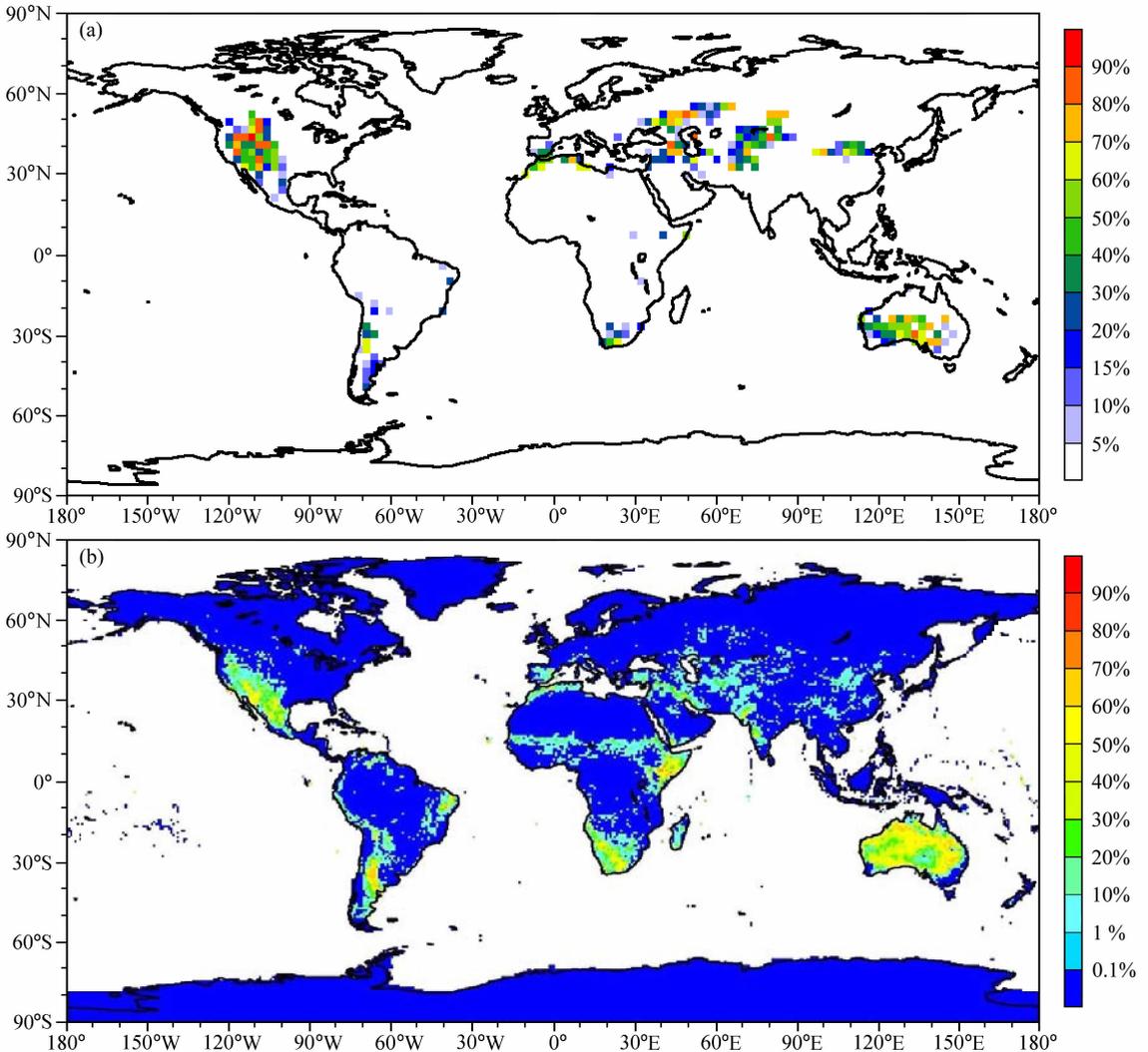


图 13 CLM-DGVM 中引入灌木子模式模拟 (a) 和由 MODIS 数据得到 (b) 的全球温带灌木分布图

Fig. 13 (a) Global distribution of the percent coverages of temperate shrub from CLM-DGVM with shrub submodel; (b) observed distribution of temperate shrub from MODIS dataset

和生态系统尤其是植被格局的变化有很好的对应关系。当今各国政府和公众关注,尤其是国际上专门设立的大科学计划如 WCRP-IPCC 以及 IGBP 全球变化等所关注的问题,是近百年来全球平均气温的变暖(与地质年代相比是相对小的和相对缓慢的),是否会导致全球植被分布格局的显著变化?甚至是急剧的不可逆转的灾难性变化?遗憾的是目前用地球系统动力学模拟尚不能回答这样的问题。这可能有三方面的原因,一是气候系统模式和 DGVM 模式各自都有不足之处;二是此二者的耦合尚有未解决之问题;三是现有的资料库本身样品的数量或质量都有问题,而这些资料是上述诸模式中的众多参数的基础。姑且不论何者为主,最少我们应该大大改进 DGVM。

尽管目前 DGVM 与 LSM 耦合能模拟出当代气候条件下全球植被分布的大格局,但如前已指出, DGVM 与气候系统模式耦合的模拟结果却与当代的气候与植被分布格局有较大偏差,原因有待查究。由此做出的未来气候和生态变化的预测,其结果是有疑问的。Cox 等<sup>[150]</sup>和 Huntingford 等<sup>[151]</sup>指出,在假设全球大气二氧化碳浓度加倍的条件下,亚马孙雨林将会在未来五十年内消失,该结果在学术界引起了广泛的关注和讨论。

有些学者尝试,不用复杂的 GCM,也不用复杂的 DGVM,而用中等简化程度的模式,并做一些假定,结果是可以得到耦合系统中有多平衡态<sup>[152]</sup>和生态系统的较快变化(类似于突然)<sup>[153]</sup>。这些结果虽未能解答人们最关注的问题,但有启发性。

在自然界中确实观测到在不小的区域有植被系统的显著变化,如非洲草原的退化,北美西南部原来的草地今为灌木林所取代,我国北方也有草原退化和沙化等;还有些地区,大规模植树造林改善了局部地区的气候和环境,等等。在这里肯定有人文因子在起作用,不完全是甚至不是由于气候变化所造成。因此,一个更实际的问题是:在给定气候态情况下是否存在植被系统的多样性(如多平衡态)。一些生态动力学研究已经给出肯定的答案。例如,我们的草原动力学理论模型<sup>[42, 154]</sup>表明,存在着分别与草原态及荒漠态对应的气候湿润度的两个临界值,而当湿润度在这两个临界值之间时,荒漠态和草原态可以并存,从而可有生态的突变:如草原经过过度放牧就会退化为荒漠,但荒漠通过植草并经

过一定时间的灌溉,草生长到一定程度之后,又可以维持原来的草原态。在这理论中第一次指出了枯草覆盖的重要性:枯草覆盖地面,保持了土壤水分以供生草生长和生存使用(蒸腾),所有这些都与我国生态学和地理学学者以及广大群众的实践完全相符[本工作亦被 IGBP 最新科学计划 iEAPS (2005) 引用]。

由上述结果也可明显看到,植被生态系统具有多样性,而这些则主要是发生在“过渡带”的气候条件下。

一种植被类型要经过“强度多大”和“时间多长”的气候变化或“多少次”气候灾难(如干旱)之后,才会不可逆转地变为另一种类型(例如草地完全沙化),这也是非常重要和有实际意义的问题,这可以通过 DGVM 与 LSM 或 AGCM 耦合来研究,也可以先用一些比较简单的模式作机理性和启发性的研究,我们曾用上述的研制草原生态动力学模式,通过引入随时间而变的湿润度来作积分<sup>[155]</sup>,结果是在强度不太大的且持续时间不太长的气候扰动情况下,草原表示出混沌的演变行为,但仍可恢复为草原;可是在几次很强和持续时间较长的干旱年代之后,草原就不可逆地退化为不毛之地(图 14),这些结果至少有启发性。

## 6.5 区域或景观 (Landscape) 尺度和斑块 (Patch) 的植被生态动力学问题

DGVM 研究的是全球植被系统的大格局,即针对有关全球尺度的气候变化的问题。一个更为重要的问题是如何使人类活动适应于这种变化,如何采取措施避灾和转祸为福,以及如何合理利用或改善自然生态环境,以利于人类可持续发展的问题。这却是个区域问题,因为不同区域的变化可以是迥然不同的。事实上,传统的生态学和地理学以及地理气候学研究的主要对象正是在区域尺度和景观尺度甚至斑块尺度,与物种多样性有关的国际科学大计划 Converstus 针对的也是这些尺度内的问题。正是地理环境的非均匀性和特异性,保护了丰富的物种。试以我国黄土高原及其附近而言,那里丘壑密布,山丘上可为裸土,沟壑中却是郁郁葱葱的林木和绿油油的农作物。因此,要模拟预测和规划人类相关的活动(如土地利用、生态保护、改良局地气候环境、优化生态系统等),就必须发展区域和景观尺度的陆表层过程模式(不妨记之为 RLSM)

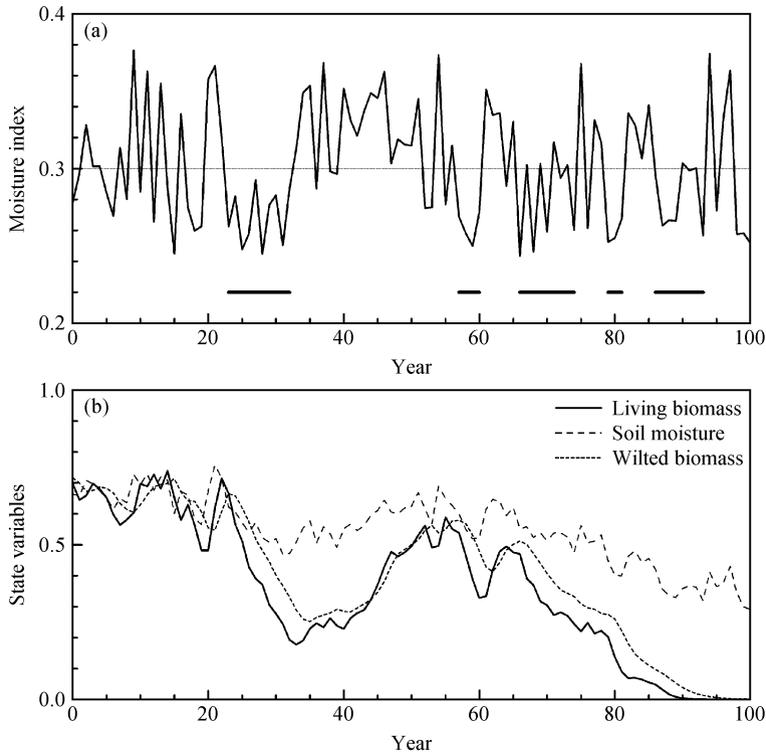


图 14 由草原生态动力学模型模拟得到气候扰动引起的草原荒漠化示意图 (引自文献[155]): (a) 模拟使用 100 年的气候湿润度曲线 (持续干旱年份用横线标出); (b) 模拟的鲜草量、枯草量及土壤湿度的变化曲线

Fig. 14 The desertification of existing grassland induced by climate change: (a) The 100-year trail of annual moisture index used as the input in the simulation, and the horizontal bars indicate the continuous drought periods; (b) the trails of the annual averages of the simulated living biomass, wilted biomass and soil moisture (from reference [155])

和植被系统动力学模式 (不妨记之为 DRVM), 并与区域气候模式耦合。这里暂且不谈如何将它们与大尺度的 AGCM 和 LSM 嵌套的问题。从本质来说 RLSM 和 DRVM 应与现有的 LSM 和 DGVM 各不相同。至少在区域和景观尺度问题中, 水平面上的非均匀性是必须充分考虑的, 即必须考虑水文、养料以及植被生态繁衍和竞争的水平相互作用问题。甚至还需考虑局地的环流和径流问题。

不光是地理或土壤及气候的水平非均匀性可导致植被的非均匀性, 在一定条件下, 光是生态系统在水平方向上的相互作用, 也可导致自身的水平非均匀性。干旱地带草原的斑块就是例子<sup>[156]</sup>。特别是在适度干旱情况下, 斑块的暂时缺失 (如放牧毁损) 经若干年后可以自然恢复; 但在更干旱的恶劣条件下, 被毁减的斑块是不可能自然恢复的 (见图 15), 必须再植入并加以一定时段的灌溉方能使之继续维持。这些结果启发我们: 对于贫瘠的生态系统, 应取之慎之又慎, 并细心呵护。

## 7 地球生物化学过程子系统及地表和地球生物化学观测研究

### 7.1 地球-生物化学过程子系统

地球-生物化学过程研究的是地表层 (包括陆地和海洋表层) 内及通过其与海、气界面进行的化学过程和物质交换过程。就目前来说, 地球-生物化学过程是地球系统动力学中最复杂和人们认识最少的部分, 这也是刚提出不久的国际研究计划 iLEAPS/IGBP(2005) 重点的研究对象<sup>[157]</sup>。在时空尺度上, 地球-生物化学过程跨度很大, 按 iLEAPS/IGBP 可以将参与的物质分为: (1) 长寿命的和参与碳循环的气体成分, 如  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ; (2) 中等寿命的但影响大气中辐射过程的  $\text{CH}_4$  等; (3) 土壤中和地表的挥发性有机物, 如  $\text{NO}_x$  等; (4) 参与植物营养循环的物质, 除长寿命的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  外, 尚有碳 (C)、氮 (N)、磷 (P)、硫 (S) 等; (5) 非气体部分, 如细菌、尘土、气溶胶, 还有由植被排放的

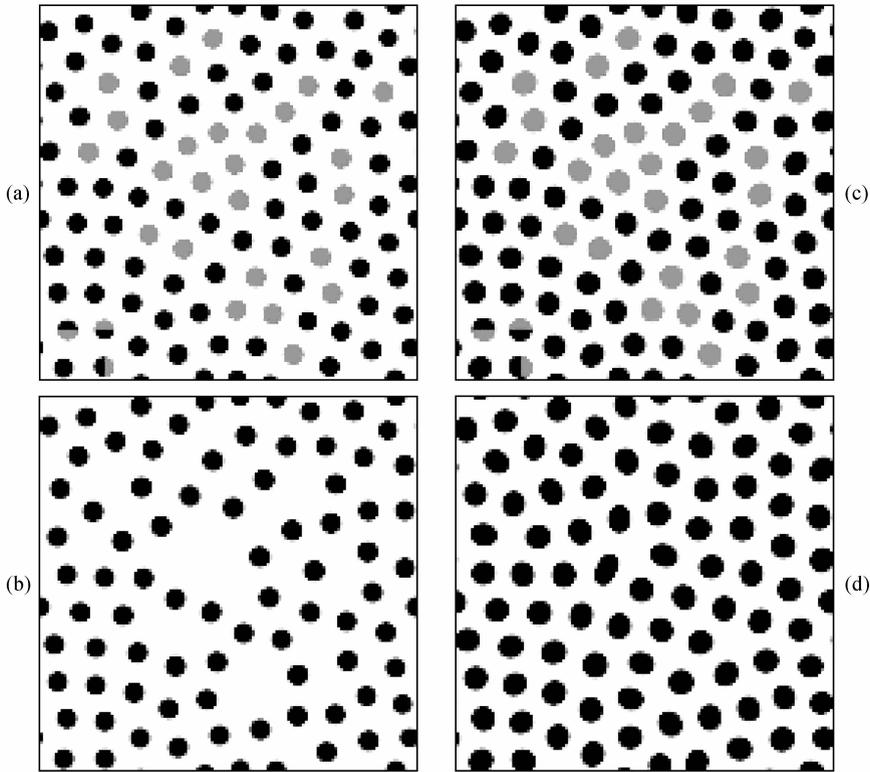


图 15 干旱(a、b)和湿润(c、d)条件下植被斑块结构对扰动的响应(引自文献[156]):(a、c) 初始植被斑块图(黑色: 扰动后保留的植被; 灰色: 被破坏的植被);(b、d) 恢复后的植被图

Fig. 15 The responses of vegetation patches to perturbations under (a, b) dry and (c, d) wet condition (from reference [156]): (a, c) The initial vegetation patterns (black areas show the remaining vegetation after the perturbation, and the light gray areas show the removed part); (b, d) the ecosystem recovered from the perturbation

碳氢化合物(见本文第 5 节)等。这些过程的产物进入大气或者海洋,甚至过程的一部分仍发生在大气和海洋中,影响到环流过程,从而被引入到环流过程中去。所以,地球-生物化学过程子系统集中研究的是地表层过程,尤其是通过界面的各种通量及其源汇。不同时间尺度的过程影响不同空间尺度的环流过程,最终不同空间-时间尺度、不同的环境又影响大尺度和全球范围的变化(图 16) [157]。由于资料和认识的双重缺乏,国际上目前尚未有一个包括上述诸多物质循环和化学反应过程的模式,只从两个方面分出一部分列入全球气候与环境变化的有关模式中,如将与水汽有关的蒸发和蒸腾、与 CO<sub>2</sub> 和 C 有关的光合作用等并入 LSM 模式中,又将它们列入 DGVM 模式中;将土壤中含的挥发物、尘土等列入 LSM 中,同时也将枯萎凋落物的碳化和分解过程以及营养物质本身部分、粗略地列入 LSM 和 DGVM 中。另一类模式则侧重植物生长

(尤其是农、林、牧业有关物种)的土壤有机质的变化,构成在区域尺度上实用的模式。这其中最著名的就是 CENTURY 模式,它主要是描述农作物和草场等生长过程有关的营养物质碳、氮、磷、硫和水的循环过程。与地球系统动力学模式其他子系统不同的是,CENTURY 模型主要是建立在各研究对象的各地区观测经验的资料基础上列出框图(当然也应有经验公式,对各物种甚至各个地区连公式都不同,不止是公式中参数不同),时至今日应用虽然广泛,但至少在我国尚未知其具体的方程式。关于我国应用 CENTURY 模式(同时也加入了中国自己研发的另外一部分)对我国陆地和近海生态系统碳收支的研究,详见中国科学院知识创新工程重大项目的总结报告[158]。我国也自行研制一个区域性的陆表层模式 AVIM2[159](亦可与 CENTURY 耦合),用于国内一些地区的水、热、碳的模拟。在目前阶段,设观测站(包括遥感)作长期的连续的

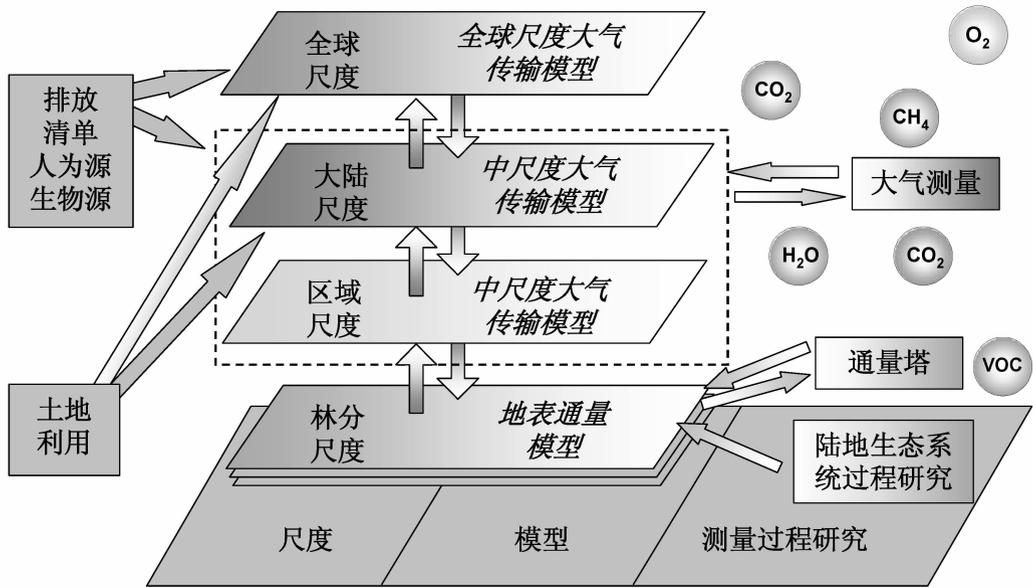


图 16 研究方法及协作和整合的示意图(引自文献[157])

Fig. 16 Schematic illustration of a collaborative and integrated research approach (from reference [157])

观测研究是当务之急(我国在设站观测方面已有较好基础),在国际上和我国都是如此。本节将主要叙述我国的陆表观测研究及一些结果,由于它与地表层过程密切相关,同时也叙述一些陆表过程的观测结果。

## 7.2 国内外观测研究的概况

野外观测实验是确定陆面过程模式中的参数和地球生物化学过程的重要手段。从 20 世纪 80 年代中期在 WCRP 和 IGBP 的协调下,国际上在全球具有代表性的主要气候或生态区相继进行一系列陆面过程实验研究,而国际 FLUXNET 就是进行陆面过程的地球生物化学过程的研究(www.fluxnet.ornl.gov)。其中代表性的有 HAPEX/MOBILMY、FIFE、EFEDA、BIREAS、NOPEX、GAME、CEOP 等实验计划以及 FLUXNET 等。这些实验研究均从局地的土壤-植被-大气相互作用的加强观测入手,借助空间遥感资料由点及面,并进行时间以及观测项目的扩展,通过数值模拟把已有的认识集中起来,对一个区域尺度上的陆面过程进行系统分析,以建立较好的陆面过程模式和 GCM 尺度上较好的陆面过程参数化方案。至于稍为系统一些包括各种时间尺度的地球生物化学过程的观测研究则仍处于计划起步阶段<sup>[157]</sup>。

我国早在 1979 年开展中国第一次青藏高原气象科学实验“亚洲季风实验-青藏高原实验(OX-

PMEX)”,其后相继进行了“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究(HEIFE)”、“亚洲季风实验-淮河/青藏高原实验(GAME-HUBEX/TIBET)”、“第二次青藏高原科学实验(TIPEX98)”和“内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)”<sup>[160~163]</sup>。上述观测实验除 GAME-HUBEX 在东亚副热带半湿润地区外,主要集中在我国干旱/半干旱区,而且观测实验一般采取加强期(夏季)进行通量等的综合观测。

2000~2003 年,在黄荣辉主持的国家重点基础研究发展规划项目(简称 973 项目)的支持下,在我国典型干旱区塔里木盆地的下风口——敦煌双墩子戈壁、青藏高原五道梁地区和巴丹吉林沙漠临泽地区进行了“我国西北干旱区陆气相互作用野外观测实验(敦煌实验)”(DLSPFE, 1999~2003 年)<sup>[164,165]</sup>,这是目前在干旱区进行的为数不多的地表过程观测实验。2002 年 10 月,在符淙斌主持的 973 项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”的支持下,中国科学院大气物理研究所在我国东北西部的吉林通榆建立了“干旱化和有序人类活动”的长期观测实验站,该站也是国际协同加强观测计划(CEOP)地面基准站观测台站之一。该长期观测实验改变了过去仅在加强期(一般在夏季)进行湍流通量的加强观测,而采取一年四季连续观测地气间通量交换(www.ceop.net)<sup>[166,167]</sup>。

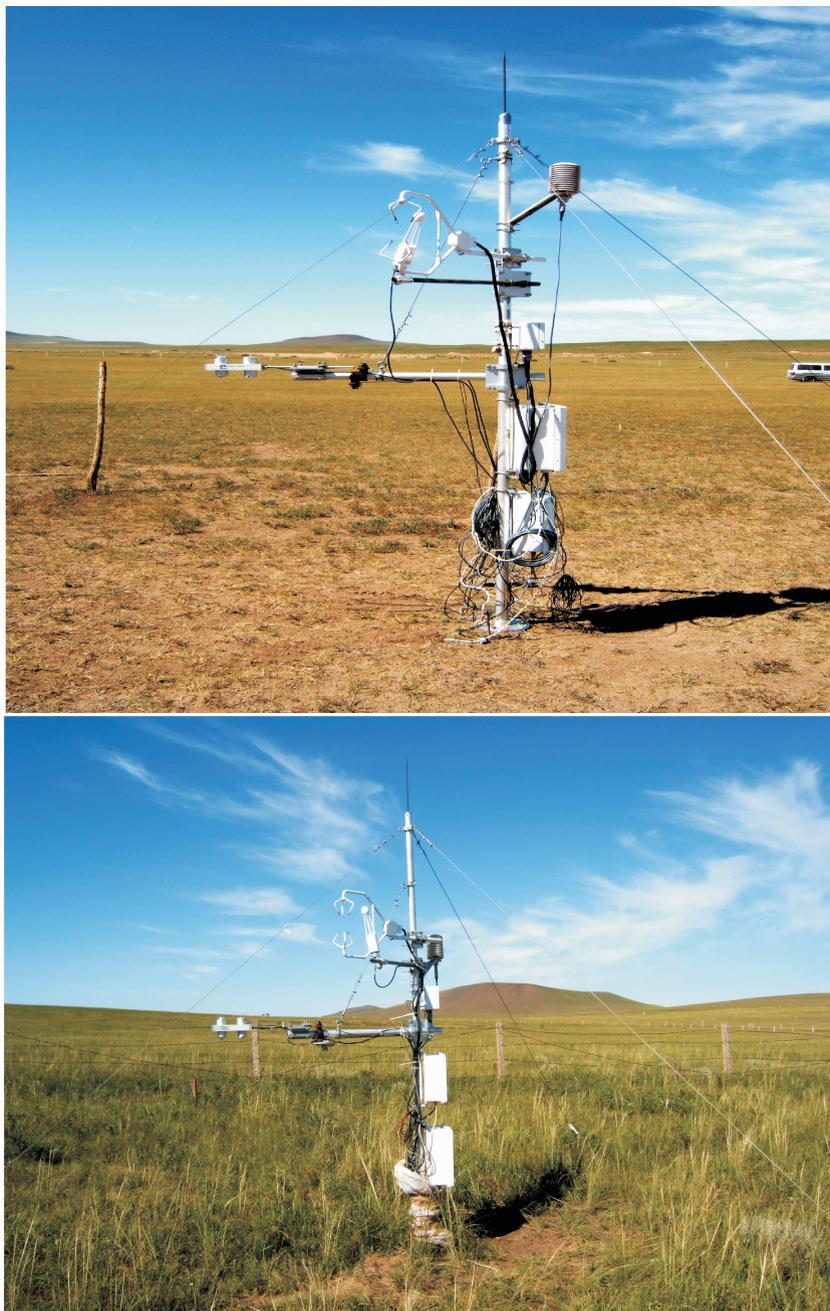


图 17 不同放牧强度草原下垫面涡动相关测量系统（上图：过度放牧；下图：1979 年围封样地）

Fig. 17 EC (eddy covariance) measurement system on grassland surface with different grazing intensity: Overgrazing (top) and ungrazed grasslands since 1979 (bottom)

我国早已建成“中国生态系统研究网络站 (CERN)”，并在此基础上建成了我国陆地生态系统碳循环网络 (CHINAFLUX)，纳入到国际的 FLUXNET 中去<sup>[158]</sup>，还有中国和德国合作的重大项目“不同放牧强度对内蒙古草原生态系统物质流的影响 (MAGIM, 2004~2010 年)”自 2004 年 5

月起在锡林浩特草原不同放牧强度的样地建立了通量观测塔 (图 17)，研究气候变化和不同放牧强度对草原生态系统地气间物质和能量交换过程的影响 ([www.magim.net](http://www.magim.net))。这些实验取得的资料，可以为全球和区域模式中陆面过程参数化的改进及参数的确定提供可靠的验证数据。我们希望 CHIN-

AFLUX 能进一步发挥作用,使我国的地球生物化学实验研究能在国际上起更大的作用。

### 7.3 近年来取得的主要进展

以往,我国对地表过程各参数的测定研究方面主要着重于动力过程方面,如各种陆表面拖曳系数、粗糙度和零平面位移等;也有一些重要的发现,例如高原地区拖曳系数比国际上常用的要大很多。近几年来,我们也开展研究与热力过程有关的参数,例如热力平衡各分量、地表反照率、波文比等,发现一些很有特色的现象。这些参数将在研制我国的地球系统动力学模式得到应用,或对模式作检验。例如在干旱区进行的敦煌实验发现,在典型干旱区地表热量平衡主要由净辐射、感热和潜热通量以及地热流量等分量构成。沙漠和戈壁的蒸发量极其微小,热量平衡中潜热几乎可以忽略不计,净辐射主要同感热和地热流量平衡。白天 Bowen 比基本在 10~100 范围之内;西北干旱区尤其是敦煌戈壁地区,由于地表温度高,空气中沙尘含量较多,致使地面向上长波辐射和大气逆辐射都比藏北高原的五道梁地区大。基于干旱/半干旱区陆面过程野外观测资料,利用陆面过程模式,应用多判据(MC)方法,对这些地区的陆面过程基本参数进行评估,初步结果比较表明目前陆面模式中对这些地区的参数选定还有相当的不准确性和不确定性<sup>[168, 169]</sup>。

利用通榆 2002~2007 年连续观测半干旱地表的能量和物质交换及陆面过程参数的基本特征,发现半干旱退化草地和农田近地层潜热和感热通量的日变化幅度具有显著的季节特征,潜热通量日变化夏季最强,感热通量日变化春季最强。潜热和感热通量年际间的差异主要受当年的气候背景影响,尤其是降水的影响。在半干旱区降水的年际变异较大,不同年份降水及生长季的降水分布是影响地-气间能量和水分、二氧化碳交换净通量的重要因子。农田和退化草地下垫面实际蒸散量季节变化,与降水吻合,同时与土壤湿度有关。春季由于土壤解冻,土壤湿度比较高,蒸散对降水的响应非常显著,而在夏季蒸散对降水的响应叠加了植被的作用。退化草地和农田平均地表反照率具有季节变化。在生长季地表反照率与表层土壤湿度成负指数关系(图 18),其中,退化草地

$$\alpha = 0.256 \times e^{-W_s/0.049} + 0.222,$$

农田

$$\alpha = 0.637 \times e^{-W_s/0.036} + 0.207.$$

地表反照率与植被指数 EVI 具有很好的相关<sup>[170, 171]</sup>。

比较在内蒙古草原不同放牧强度草原下垫面生长季的地气间的物质和能量交换过程发现,不同放牧强度既影响下垫面地表的反照率,更影响地气间水汽和二氧化碳的交换。具体表现为不同放牧强度对半干旱区草原生态系统的碳收支影响很大,但对于生态系统在生长季的实际总的蒸散影响似乎不太明显。当然这些仅是初步的观测结果,同时也只是点上的观测<sup>[172, 173]</sup>。

我国地球生物化学观测的站点大多包括在 Chinaflux 网络中,正如国际上的 FLUXNET 各站点一样,观测项目目前还达不到 iLEAPS/IGBP 的要求。由于其地区分布的均匀性和观测时间的连续性问题,观测结果也难于直接与大尺度的地球系统模式相匹配。不过由于这网络中的站点都选在具有不同类型的生态系统地区,很有特色,并已用于分块、然后集成地估计我国陆地生态系统碳收支研究中<sup>[158]</sup>。如同世界各国的估计一样,这样的评估只能是最初级的近似。

### 7.4 未来一段时间应着重解决的问题

为了地球系统模式研究的需要,对地表层过程和地球-生物化学过程的观测,尤其是为了能够区分自然(气候变化)与人为因素(不同土地利用/覆盖)的相对作用,需要积累更长时间的资料,同时与陆表层过程模式相结合,找到影响地表过程的关键因子。充分利用卫星遥感资料,结合地表观测来校验卫星反演的结果,探讨如何从点通量观测结果升尺度到面的通量估算,为模式提供区域面上的平均通量和地表过程基本参数,从而改进地球系统模式地表过程的参数化方案。

另外,如何定量描述非均匀性的影响也是当前地表层过程模式发展的难点。在实际某个区域内往往存在多种下垫面类型,如何利用在不同类型下垫面上进行的点上地表过程观测,来优化改进模式中面上的参数;进而将这种优化后的参数组应用到地球系统模式当中,进行模式模拟的改进,这样能够提高地球系统模式的模拟性能。最后大力加强全球不同生态系统的地球生物化学过程的观测,则是 iLEAPS/IGBP 所要求的,也许只有当该计划付之

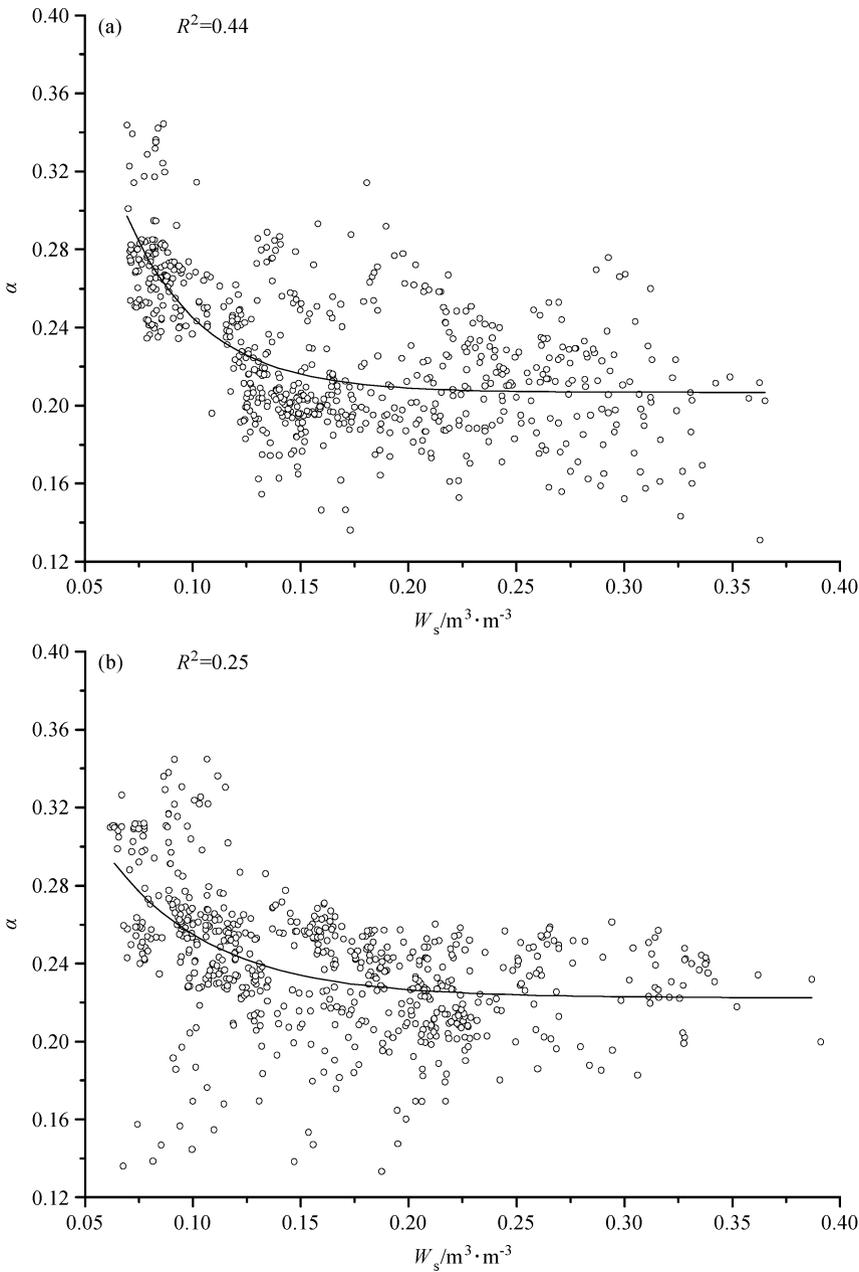


图 18 2003~2005 年农田 (a) 和草地 (b) 的土壤体积含水量日均值和地表反照率日均值的关系

Fig. 18 The change of the daily average surface albedo with the daily average surface soil moisture for (a) the cropland and (b) the degraded grassland during 2003 - 2005

实施之后，人们才有可能对关于全球地球-生物化学子系统的可靠资料、参数化方法和模式开展较全面的研究。最后，毫无疑问，从目前起，我们即应开始着手研制我国有自己知识产权的区域地球-生物化学模式，同时考虑如何改进全球大尺度的关于地球-生物化学过程模式，参加到国际合作计划中去。我们现已作了这方面的安排。

### 7.5 关于生物地球化学观测资料的整理和应用及有关问题

即使将陆表层过程和生物地球化学过程的观测资料直接按上小节所述方法进行校准订正，以便在局地或全球大尺度过程研究中使用，仍然存在着一个非常大的问题，就是如何观测不均匀的地表状态（如坡地等）。一方面由于地面不是水平面，由此观

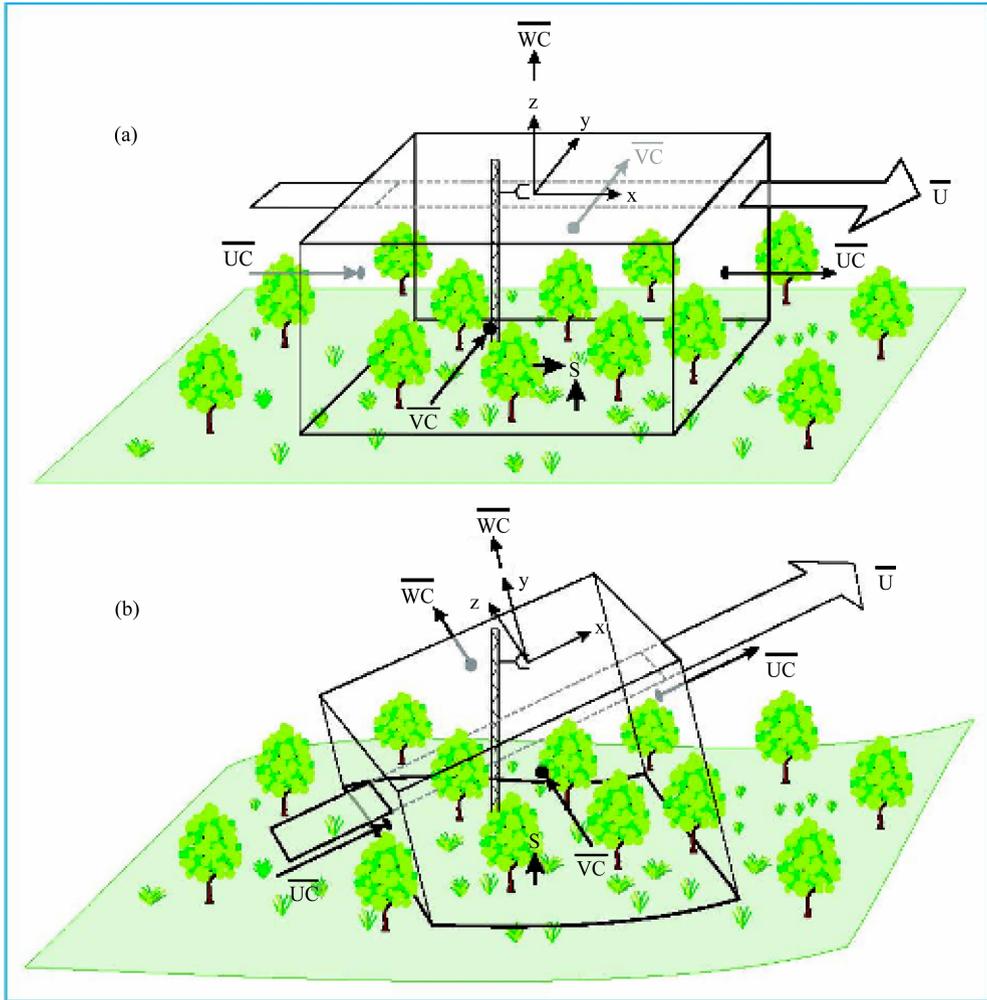


图 19 冠层斑块上的概念性控制体 (形状和方向由平均风场确定): (a) 水平均匀地形稳定气流的控制体, 平流项总量为零并且仅仅需要测量通过控制体顶面的垂直交换; (b) 复杂地形上的控制体, 平均风向不与局地地表平行, 必须考虑水平方向上的平流项 (引自文献[174])

Fig. 19 Notional control volumes over a canopy patch: the shape and orientation of the volume is determined by the mean wind field. (a) Control volume with steady flow over horizontally homogeneous terrain; advective terms sum to zero and only vertical exchange through the lid of the control volume need be measured. (b) Control volume over complex terrain; the mean wind vector is no longer necessarily parallel to the local surface, and horizontal advection terms must be included. Adapted from reference [174] with permission from Springer

测到的垂直通量就不是真正的与区域平均地平面相垂直的通量, 后者才是我们所需要的。另一方面, 由于局地的非均匀性, 即使在近地面层, 也常常引发“局地环流”, 这又使对所观测的值需要进行相应的订正。图 19 给出这两方面的问题, 上图是地表为真的地平面情况, 下图是地表为小斜坡的情况。厚箭头带  $u$  字为平行于表面的气流速度, 而带  $w$  字的小箭头是垂直于地表的垂直速度。因此, 即使从解释和订正观测资料来说, 似乎我们都应同时应用到细网格的大气边界层模拟, 将较长时间的观测值和模式的模拟得到的值合在一起, 进行四维同

化, 才能得到较好的结果。

## 8 干旱、半干旱地带陆-气相互作用及其对东亚气候的影响

如果将来气候发生变化, 首先最敏感和最明显地受到这种变化影响的地区是所谓的生物圈脆弱带, 如在副热带和中纬度占很大面积的干旱、半干旱地带, 甚至在我国有 56% 左右的国土是属于干旱和半干旱气候的区域, 特别是西北有全球典型的干旱区和半干旱区。这里有全球典型的戈壁和沙漠下垫面, 年降水量不足 50 mm, 而年蒸发能力却达到

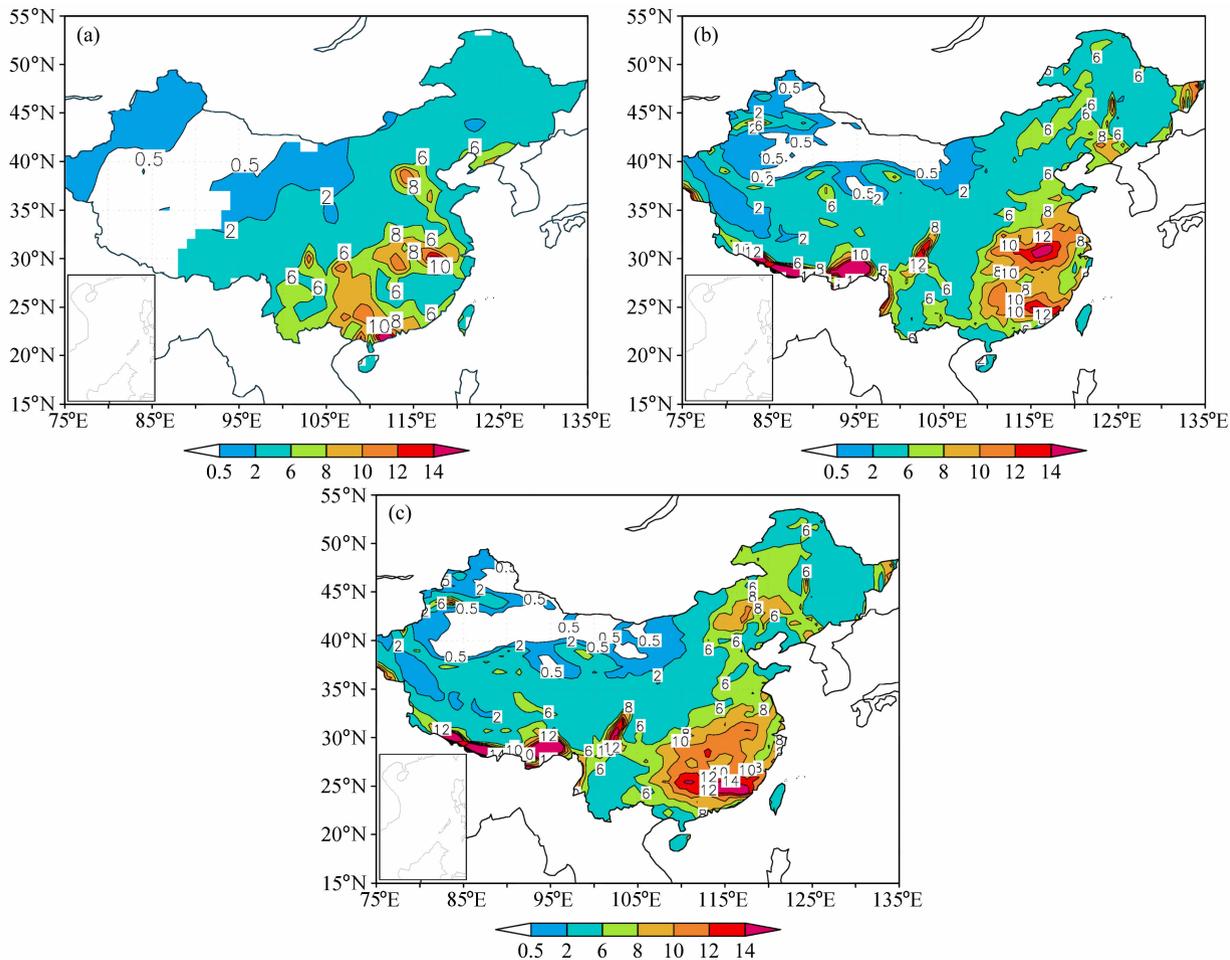


图 20 利用区域气候模式 RegCM3 对 1996 年夏季降水的模拟：(a) 实测；(b) 优化参数后；(c) 优化参数前

Fig. 20 Simulation on the summer rainfall in 1996 with the regional climate model (RegCM3): (a) Observation; (b) with the optimal parameters; (c) with the original parameters

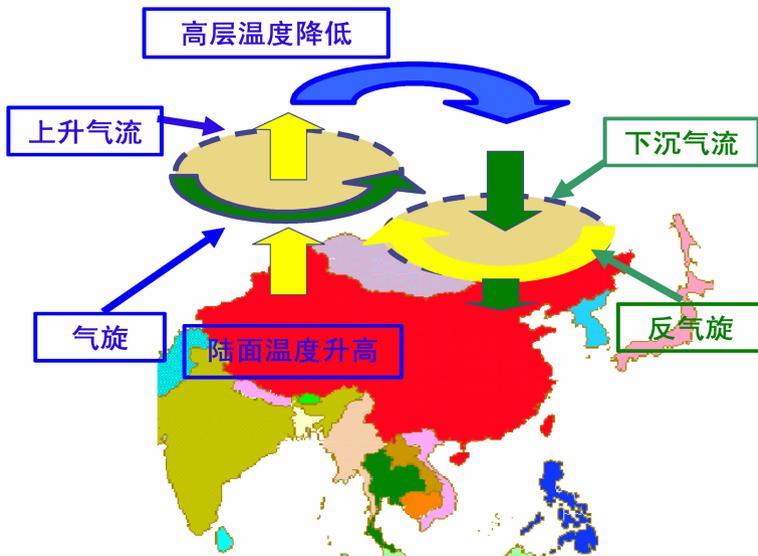


图 21 西北干旱区春季感热异常影响华北地区夏季降水的概念图(引自文献[184])

Fig. 21 Sketch map of the influence of spring sensible heating anomaly on summer rainfall in North China (from reference [184])

3000 mm 以上, 大片土地是裸露地或稀疏植被, 它们既对气候变化敏感, 也对气候有明显的反馈作用, 在我国西北部尤其如此。因此开展地球系统动力学模式研究的同时, 特别注意了干旱和半干旱地带陆面过程的观测研究, 并进行该区域对气候变化的反馈研究。前者见第 7 节, 本节讲后者。

### 8.1 干旱和半干旱地带观测对改进陆面过程和气候反馈的作用

敦煌观测资料分析结果表明, 该地区在春、夏季成为欧亚大陆地表向大气输送感热最强的区域之一<sup>[175, 176]</sup>。这些感热通过影响大气环流和东亚季风, 从而严重影响我国夏季的气候变动<sup>[177~179]</sup>。

通过对在敦煌开展的“我国西北干旱区陆-气相互作用观测试验”连续观测 7 年多和两次加强期观测所获得的大量典型干旱区原始性观测数据分析研究, 尤其是对获得的戈壁区和沙漠区陆面的辐射和热量平衡资料、感热和潜热输送通量资料等的分析研究<sup>[164, 165, 168, 180]</sup>, 我们发现, 它们对于揭示我国干旱区能量和水分循环过程具有重要作用。我们既可以将这些观测资料直接应用到陆面过程模式中去, 从而对于干旱、半干旱地区的陆面过程基本参数进行优化, 也可以应用多判据 (MC) 方法得到优化参数, 例如可以使 BATS 模式在这些地区的模拟能力得到较大的提高和改进; 又如, 在典型干旱区的敦煌戈壁地区, 模拟的感热和地表温度都更加接近于观测值, 而在半干旱区的吉林通榆退化草地, 亦可以明显改善感热的模拟<sup>[169]</sup>。进一步将优化后的陆面过程参数应用到区域气候模式中, 还可以明显改善对我国夏季降水的模拟 (图 20)。

### 8.2 东亚-中亚干旱、半干旱带与季风的相互关联

已有的研究表明, 干旱、半干旱区陆-气相互作用对季风和气候变化能起重要作用, 另一方面亚澳季风区的上升气流在北非和中东一带的下沉, 造成了北非与中东一带的干旱区和沙漠的扩大<sup>[181, 182]</sup>。因此, 干旱、半干旱区与季风湿润区气候变异的相互作用是当今季风与气候研究的前沿课题。我们希望地球系统动力学模式也能模拟出这种相互作用。

我国夏季降水在 1976 年前后发生一次明显的跃变, 从 1977 年以后, 华北地区和黄河流域夏季降水明显减少, 并导致持续性干旱的发生, 而西北地区和长江流域夏季降水明显增加。同时, 西北干

旱区春季感热输送从 1977 年之后明显增强, 相关分析发现, 当西北地区春季感热输送异常偏高时, 华北地区夏季降水偏少, 而长江流域夏降水偏多。特别是从 1977 年之后西北干旱、半干旱区春季感热输送偏强, 这导致西北地区夏季上空出现明显的上升气流异常, 而华北地区上空夏季出现下沉气流异常, 这个下沉气流的加强不利于华北地区夏季降水, 故引起华北地区夏季降水的减少, 并发生持续性的干旱<sup>[178, 183]</sup>。

进一步对西北干旱区春季感热异常对于东亚大气环流位涡异常的影响研究表明, 由于西北干旱区地气温差 ( $T_s - T_a$ ) 和感热输送自 1977 年之后明显增强, 而此地区对流层上层温度却明显下降, 这种热力变化使得此地区  $-\partial\theta/\partial p$  从 1977 年之后变成负距平, 并且, 低层垂直位涡分量也随之变成负距平, 这种位涡变化有利于西北干旱区气旋性环流异常的加强, 并造成上升气流异常的加强和夏季降水的增多, 从而有利于纬圈环流的发展。正是由于此纬圈环流的发展, 导致了华北地区上空对流层低层  $-\partial\theta/\partial p$  从 1977 年之后由负距平变成正距平, 这不仅有利于华北地区上空反气旋式环流异常的加强, 而且还有利于下沉气流异常的加强, 从而导致华北地区夏季降水偏少, 发生持续性干旱 (图 21)<sup>[184]</sup>。

这里要特别强调: 不单季风对人类的生存和发展极其重要, 而现代的亚洲干旱、半干旱区也同等重要, 不光是气候和生态环境是如此。亚洲干旱、半干旱地区在古代是繁华的丝绸之路, 那里的气候环境在气候变化与人类活动共同作用下, 现在已变得非常脆弱。如果它和亚澳季风的相互作用以及全球的变化逼使这两大区域都失调, 这将给干旱带和亚澳季风区这对孪生姊妹带来不可想像的灾难。这里, 暂且不强调非洲的干旱带和季风的关系, 世界有许多科学家在注视着, 但不等于他们的观点、方法和结论都是无可非议的, 我们也在研究, 以便找出二者间的异同、相似以及相关或相互作用的规律性。

## 9 结语

地球系统动力学模式是一个极其复杂的开放巨系统, 涉及地球系统不同时间、空间尺度的相互作用, 需要大气科学、海洋学、地球物理、化学、生态学及数学和计算科学等多学科的交叉融合, 并在统

一的思想原则指导下进行。地球系统动力学模式的研制和发展是一个相当长期的科研过程,既要做好各分系统的动力学模型的研究与设计,又要使各分系统模式有机地结合,即系统的集成。这里既有复杂的科学问题需要研究,也有众多的实际技术问题需要解决。例如,地球系统不同子系统之间不论是结构的空问尺度还是演变的时间尺度均存在很大的不同,其相互作用及耦合有许多问题仍不清楚,需要从理论上给予澄清和回答,并解决耦合的方法;另一方面,描述各子系统的动力模式的建立和完善,最终都是以计算机语言体现,如何将这些繁复的程序语言有机结合在一起并能不断更新和持续发展,又是一个软件系统工程,需要在各子系统模式建立之初就在一个统一的思想下做好标准和结构设计。

我国地处东亚地区,特殊的地理位置造成我国气候、环境与生态系统的独特性。因此中国的地球系统动力学模式在遵循全球总体性的同时,还要充分体现出东亚地区的独特性。当前需要在如下几个方面加强研究:

(1) 构建地球系统耦合模式中的大气、海洋、陆表层过程和生物地球化学过程(包括植被动力学过程)及大气和海洋、化学过程的耦合数值模式,一定要保证地球系统的整体性,例如要保证系统总质量和能量的守恒性以及各分系统模式之间耦合的协调性,从而才能保证模式长时间积分的稳定性。

(2) 在构建地球系统耦合模式中要重视地表、海表和生态在地球系统各圈层相互作用的重要性;且要充分考虑东亚地区及相邻的西太平洋、印度洋复杂海陆分布下的气候、环境和生态过程的多样性及其间的相互作用,即该地区特殊性问题。

(3) 考虑到季风系统在全球气候系统的重要性,尤其是描述东亚季风地形、对流活动下垫面的困难性,因此,在构建地球系统模式中的大气环流模式时,特别要注意其中一些特有的过程或其过程的特殊性。

(4) 副热带广大地区占陆地面积很大的份额,那里的植被系统是气候变化的敏感地带。灌木林、草地以及植被的过渡带十分重要,要特别加以重视。

(5) 针对副热带和中纬度地区(特别是我国西北和中亚地区)戈壁和沙漠等干旱下垫面在地球系统中的典型性和代表性,以及该地区陆-气相互作用及其对地球系统中气候、水文、环境和生态影

响的重要性,需要通过对该区域陆-气相互作用以及中国生态站网的系统观测、分析、综合、比较,从而提出地球系统中典型干旱区陆-气相互作用参数化方案并建立相应的陆面过程模式。

上述第(2)至第(5)点各自本身属于大气和海洋子系统、大气化学子系统、植被动力学以及生态动力学子系统和地表层物理和水文过程(也包括地球生物化学)子系统的研究对象。这里再一次指出,只是表明其在我国的特殊性和重要性。

总之,发展地球系统动力学模式是一个长期艰巨任务,需要不断积累和推进。我们的近期目标是利用5年左右的时间,建成一个我国自己独立自主研制的地球系统动力学模式基础框架,其各分系统模式全部、或大部分、或核心部分是我国自创的,包括新一代高分辨率大气-海洋-陆表层过程耦合模式、全球大气化学及其与大气环流模式的耦合、全球植被生态系统动力学模式及其与陆表过程模式的耦合、流域水文和地下水系统模式及其与陆表过程模式的耦合、陆地和海洋生化过程模式(以碳循环为主)的耦合,并进一步与气候模式的耦合,为地球气候环境系统的模拟和预测研究提供基础工具,也部分研究我国所特需研究的问题。再利用一段时间,才能建成具有我国自己独创特色的、完整的地球系统动力学模式(包括全球的和区域的),嵌套有区域性的模式,就可为国家制定经济和社会可持续发展战略规划提供科学依据。

#### 后记:

编辑部约此稿时,原拟由我来组织写稿。后来因家人病重,只好委托周广庆和浦一芬两位研究员组织各有关研究人员分块写成初稿,并作修改,然后由我再作统一通稿。但此时自己也因支持不住而不能照顾病人,在这万难时刻,幸赖罗明远(前副所长)、胡朝霞(博士、副研究员)等负责起全部的有关病人诊治和护理的组织、咨询和联系工作,并亲自参加护理,我所也还有不少同志参加护理,这样本文的统稿才得以完成。为此,谨写此后记,对他们的义举表示深深感激!

其实这种感激也是没法用语言和文字表达出来的!

曾庆存

于2008年2月26日

## 参考文献 (References)

- [1] Karl T R, Trenberth K E. Modern global climate change. *Science*, 2003, **302**: 1719 ~ 1723, doi: 10.1126/science.1090228
- [2] 曾庆存. 地球系统动力学模式. 地球系统过程与人类活动会议文集. “CNC-WCRP、CNC-IGBP、CNC-IHDP 和 CNC-DIVERSITAS 2006 年联合学术大会” 特邀报告. 北京, 2007 年 1 月 20~22 日. 6~7  
Zeng Qingcun. Earth system dynamic model. Earth System Processes and Human Activities, Invited Presentation at CNC-WCRP, CNC-IGBP, CNC-IHDP and CNC-DIVERSITAS Conference 2006, Beijing, 20-22 Jan 2007. 6~7
- [3] 曾庆存. 中国的地球系统动力学模式的特点. 中国科学院“三期创新”资源与海洋科技创新基地重要方向项目群“地球系统动力学模式研究”启动会及第一届“地球系统动力学模式研讨会”特邀报告, 北京, 2007 年 8 月 15~18 日  
Zeng Qingcun. The features of Chinese earth system dynamic model. Invited Presentation at The CAS conference on the Earth System Dynamic model (in Chinese), Beijing, 15-18 August 2007
- [4] 曾庆存. 我们在动力学气候模式设计和预测理论研究方面的进展. 见: 曾庆存, 丑纪范编. 气候系统的动力理论、模型和预测研究. 北京, 气象出版社, 2003. 8~15  
Zeng Qingcun. Advances in the development of the dynamical climate model and the prediction theory. *The Dynamical Theory, Model and Prediction of the Climate System* (in Chinese). Zeng Qincun, Chou Jifan, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 8~15
- [5] 毕训强. IAP 九层大气环流模式及气候数值模拟. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1993. 210 pp  
Bi Xunqiang. IAP 9L AGCM and climate simulation. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1993. 210pp
- [6] Liang Xinzong. Description of a nine-level grid point atmospheric general circulation model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, **13**: 269~298
- [7] 左瑞亭, 张铭, 张东凌, 等. 21 层大气环流模式 IAP AGCM-III 的设计及气候数值模拟 I. 动力框架. 大气科学, 2004, **28**: 659~674  
Zuo Ruiting, Zhang Ming, Zhang Dongling, et al. Designing and climatic numerical modeling of 21-level AGCM (IAP AGCM-III), Part I. Dynamical framework. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, **28**: 659~674
- [8] Cess R D, Zhang M H, Zhou Y, et al. Absorption of solar radiation by clouds; Interpretations of satellite, surface, and aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 23299 ~ 23309
- [9] Cess R D, Zhang M H, Valero F P J, et al. Absorption of solar radiation by the cloudy atmosphere; Further interpretations of collocated aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 2059~2066
- [10] Zhang M H, Cess R D, Jing X D. Concerning the interpretation of enhanced cloud shortwave absorption using monthly-mean Earth Radiation Budget Experiment/Global Energy Balance archive measurements. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 25899~25905
- [11] Zhang M H, Lin W Y, Klein S A, et al. Comparing clouds and their seasonal variations in 10 atmospheric general circulation models with satellite measurements. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D15S02, doi:10.1029/2004JD005021
- [12] Zhang Feng, Zeng Qingcun, Gu Yu, et al. Parameterization of the absorption of the H<sub>2</sub>O continuum, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and other trace gases in the Fu-Liou solar radiation program. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, **22**: 545~558
- [13] 张凤. IAP AGCM 中短波辐射方案的改进研究 I. 引入 Fu-Liou 短波辐射方案. 气候与环境研究, 2005, **10**: 543~559  
Zhang Feng. The study of the improvement of the solar radiation transfer scheme in IAP AGCM. Part I: Incorporating Fu-Liou code into IAP AGCM. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**: 543~559
- [14] 张凤, 曾庆存. IAP AGCM 中短波辐射方案的改进研究 II. 短波辐射方案的改进. 气候与环境研究, 2005, **10**: 560~573  
Zhang Feng, Zeng Qingcun. The study of the improvement of the solar radiation transfer scheme in IAP AGCM. Part II: The improvement of solar radiation scheme. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**: 560~573
- [15] 张凤. AGCM 中云的不均匀性作用的初步研究. 气候与环境研究, 2005, **10**: 574~587  
Zhang Feng. The study of the effect of cloud inhomogeneity in AGCM. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**: 574~587
- [16] 曾庆存. 气候系统动力学模式, 第二章, 跨季度气候预测. 内部技术报告, 2001  
Zeng Qingcun. The dynamical model of the climate system, Chapter 2, The extra-seasonal climate prediction (in Chinese). Technical Report, 2001
- [17] Zeng Qingcun, Mu Mu. On the design of compact and internally consistent model of climate system dynamics. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2002, **26** (2): 107~113
- [18] 张贺, 曾庆存, 林朝晖. 新一代 IAP 大气环流模式的研究. 中国科学院“地球系统动力学模型研究”项目群启动会暨国际研讨会. 北京, 2007 年 8 月 15~18 日  
Zhang He, Zeng Qingcun, Lin Zhaohui. Development of a new IAP AGCM (in Chinese). The CAS conference on the Earth System Dynamic model. Beijing, 15-18 August 2007
- [19] Zhang M H. The sensitivity of the NCAR CAM: the interaction of moist convection, cloud physics and boundary turbu-

- lence. The CAS conference on the Earth System Dynamic model, Beijing, 15-18 August 2007
- [20] Gu Y, Liou K N. Parameterizations of clouds, aerosols and radiation processes in GCMs and regional climate models. The CAS conference on the Earth System Dynamic model, Beijing, 15-18 August 2007
- [21] Liang X Z. Perspectives on integrated regional climate and impacts modeling. The CAS conference on the Earth System Dynamic model, Beijing, 15-18 August 2007
- [22] 王必正, 刘敏, 曾庆存. 大气环流模式中云系的超级参数化方案及其特征线方法之研究. 气候与环境研究, 2005, **10**: 638~648  
Wang Bizheng, Liu Min, Zeng Qingcun. Study on cloud system superparameterization and the method of characteristic lines in the atmospheric general circulation model. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**: 638~648
- [23] 王必正, 顾荣直, 章丽娜, 等. 大气模式中云量分布函数问题的研究理论基础. 自然科学进展, 2006, **16**: 843~849  
Wang Bizheng, Gu Rongzhi, Zhang Li'na, et al. The theoretical basis on cloud distribution function in the atmospheric model. *Progress in Natural Sciences* (in Chinese), 2006, **16**: 843~849
- [24] 胡朝霞, 曾庆存. 雨滴下降过程中的变化及其对空气的影响. 中国科学院“地球系统动力学模型研究”项目群启动会暨国际研讨会, 北京, 2007年8月15~18日  
Hu Zhaoxia, Zeng Qingcun. The variation of raindrop during the fall process and its impact on air (in Chinese). The CAS conference on the Earth System Dynamic model, Beijing, 15-18 August 2007
- [25] Lin Zhaohui, Zhang Ming, Liang Danqing, et al. Dynamical framework with blocking topography coordinates for atmospheric GCM and its validation. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (Supp. II): 9~17
- [26] 梁丹青, 张铭, 曾庆存. 分块地形坐标大气环流模式框架的计算稳定性及数值试验. 大气科学, 2005, **29**: 354~362  
Liang Danqing, Zhang Ming, Zeng Qingcun. A computational stability analysis and numerical experiments on the dynamic framework of the atmospheric general circulation model in the partition terrain coordinate. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29**: 354~362
- [27] 何卷雄, 曾庆存. 基于分块地形坐标对模式地形描述的改进. 中国科学院“地球系统动力学模型研究”项目群启动会暨国际研讨会, 北京, 2007年8月15~18日  
He Juanxiong, Zeng Qingcun. The improvement of the model terrain based on the partition terrain coordinate (in Chinese). The CAS conference on the Earth System Dynamic model, Beijing, 15-18 August 2007
- [28] Zeng Qingcun, Zhang Banglin, Liang Youlin, et al. Asian summer monsoon—A case study. Proceedings of the Indian National Sciences Academy, Part A, 1994, **60** (1): 81~96
- [29] 曾庆存, 张邦林. 大气环流的季节变化和季风. 大气科学, 1998, **22**: 805~813  
Zeng Qingcun, Zhang Banglin. On the seasonal variation of atmospheric general circulation and the monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1998, **22**: 805~813
- [30] 张东凌, 曾庆存. 全球季风系统, 它的本质和季风区. 中国科学院“地球系统动力学模型研究”项目群启动会暨国际研讨会, 北京, 2007年8月15~18日  
Zhang Dongling, Zeng Qingcun. The global monsoon system, its essence and monsoon region (in Chinese). The CAS conference on the Earth System Dynamic model, Beijing, 15-18 August 2007
- [31] Xue Feng, Bi Xunqiang, Lin Yihua. Modelling the global monsoon system by IAP 9L AGCM. *Advances Atmospheric Sciences*, 2001, **18**: 404~412
- [32] 曾庆存, 张邦林. 论大气环流的季节划分和季节突变 I. 概念和方法. 大气科学, 1992, **16**: 641~648  
Zeng Qingcun, Zhang Banglin. On the seasons of general atmospheric circulation and their abrupt changes. Part I. General concept and method. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1992, **16**: 641~648
- [33] 薛峰, 林一骅, 曾庆存. 论大气环流的季节划分与季节突变 III. 气候平均情况. 大气科学, 2002, **26**: 307~314  
Xue Feng, Lin Yihua, Zeng Qingcun. On the seasonal division of atmospheric general circulation and its abrupt change. Part III. Climatology. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, **26**: 307~314
- [34] 曾庆存, 张东凌, 张铭, 等. 大气环流的季节突变与季风的建立 I. 基本理论方法和气候场分析. 气候与环境研究, 2005, **10**: 285~302  
Zeng Qingcun, Zhang Dongling, Zhang Ming, et al. The abrupt seasonal transitions in the atmospheric general circulation and the onset of monsoons. Part I. Basic theoretical method and its application to the analysis of climatological mean observations. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**: 285~302
- [35] 曾庆存, 李建平. 南北两半球大气的相互作用和季风的本质. 大气科学, 2002, **26**: 433~448  
Zeng Qingcun, Li Jianping. Interactions between the Northern and Southern Hemispheric atmospheres and the essence of monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, **26**: 433~448
- [36] 薛峰, 王会军, 何金海. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年内变化及其对东亚夏季降水的影响. 科学通报, 2003, **48**: 287~291  
Xue Feng, Wang Huijun, He Jinhai. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**: 492~497

- [37] Dai Yongjiu, Zeng Qingcun. A land surface model (IAP94) for climate studies. Part I: Formulation and validation in off-line experiments. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, **14** (4): 433~460
- [38] Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. The Common Land Model (CLM). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84** (8): 1013~1023
- [39] 刘少锋, 林朝晖. 通用陆面模式 CLM 在东亚不同典型下垫面的验证试验. *气候与环境研究*, 2005, **10** (3): 684~699  
Liu Shaofeng, Lin Zhaohui. Validation of Common Land Model using field experiment data over typical land cover types in East Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 684~699
- [40] Zeng X, Dickinson R E, Barlage M, et al. Treatment of undercanopy turbulence in land models. *J. Climate*, 2005, **18**: 5086~5094
- [41] Zeng X, Wang A. Consistent parameterization of roughness length and displacement height for sparse and dense canopies in land models. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, **8**: 730~737
- [42] Zeng X D, Shen S S P, Zeng X, et al. Multiple equilibrium states and the abrupt transitions in a dynamical system of soil water interacting with vegetation. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L05501, doi:10.1029/2003GL018910
- [43] Wang A, Zeng X, Shen S S P, et al. Time scales of land surface hydrology. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, **7**: 868~879
- [44] Wang A, Zeng X. Effects of snow fraction over grassland in land surface models. *Journal Geophysical Research*, 2007 (in revision)
- [45] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 千里黄云——东亚典型沙尘暴. 北京: 科学出版社, 2006. 228pp  
Zeng Qingcun, Dong Chaohua, Peng Gongbing, et al. *Gigantic Yellow Cloud—Study of Dust Storm in East Asia* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006. 228pp
- [46] 刘少锋. IAP 大气-陆面-植被耦合模式的建立及陆气耦合强度的定量评估. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007  
Liu Shaofeng. The development of IAP coupled atmosphere-land-vegetation model and quantification of land-atmosphere coupling strength. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [47] Zeng N, Mariotti A, Wetzel P. Terrestrial mechanisms of interannual CO<sub>2</sub> variability. *Global Biogeochem. Cy.*, 2005, **19**: 2539~2558
- [48] Liang Xu, Xie Zhenghui. Important factors in land-atmosphere interactions: surface runoff generations and interactions between surface and groundwater. *Global Planetary Change*, 2003, **38**: 101~114
- [49] 杨传国, 林朝晖, 郝振纯, 等. 大气水文模式耦合研究综述. *地球科学进展*, 2007, **22** (8): 810~817  
Yang Chuanguo, Lin Zhaohui, Hao Zhenchun, et al. Review of coupling atmospheric and hydrologic models. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2007, **22** (8): 810~817
- [50] Liang Xu, Xie Zhenghui. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models. *Advances in Water Resources*, 2001, **24**: 1173~1193
- [51] Xie Zhenghui, Su Fengge, Liang Xu, et al. Applications of a surface runoff model with Horton and Dunne runoff for VIC. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (2): 165~172
- [52] 谢正辉, 刘谦, 袁飞, 等. 基于全国 50km×50km 网格的大尺度陆面水文模型框架. *水利学报*, 2004, 35 (5): 76~82  
Xie Zhenghui, Liu Qian, Yuan Fei, et al. Macro-scale land hydrological model based on 50 km×50 km grids system. *Journal of Hydraulic Engineering* (in Chinese), 2004, **35** (5): 76~82
- [53] Xie Zhenghui, Liu Qian, Su Fengge. An application of the VIC-3L land surface model with the new surface runoff model in simulating streamflow for the Yellow River basin. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment*. Proceedings of ICGRHWE held at the Three Gorges Dam, China, September 2003. IAHS Publ. 2004, No. 289: 241~248
- [54] 袁飞, 谢正辉, 任立良, 等. 气候变化对海河流域水文特性的影响. *水利学报*, 2005, **36** (3): 274~279  
Yuan Fei, Xie Zhenghui, Ren Liliang, et al. Hydrological variation in Haihe River basin due to climate change. *Journal of Hydraulic Engineering* (in Chinese), 2005, **36** (3): 274~279
- [55] Yuan Fei, Xie Zhenghui, Liu Qian, et al. An application of the VIC-3L land surface model and remote sensing data in simulating streamflow for the Hanjiang River basin. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, **30** (5): 680~690
- [56] Yuan Fei, Xie Zhenghui, Liu Qian, et al. Simulating hydrologic changes with climate change scenarios in the Haihe River basin. *Pedosphere*, 2005, **15** (5): 595~600
- [57] Xie Zhenghui, Yuan Fei, Duan Qingyun, et al. Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in China. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, **8** (3): 447~468, doi: 10.1175/JHM568.1
- [58] Tian Xiangjun, Xie Zhenghui, Zhang Shenglei, et al. A sub-surface runoff parameterization with water storage and recharge based on the Boussinesq-storage equation for a land surface model. *Science in China* (D), 2006, **49**: 622~631
- [59] Yu Z, Pollard D, Cheng L. On continental-scale hydrologic simulations with a coupled hydrologic model. *J. Hydrol.*, 2006, **331**: 110~124, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.05.021

- [60] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 大尺度分布式水文模型数字流域提取方法研究. *地理科学进展*, 2007, **26** (1): 68~78  
Yang Chuanguo, Yu Zhongbo, Lin Zhaohui, et al. Method study of constructing digital watershed for large-scale distributed hydrological model. *Progress in Geography* (in Chinese), 2007, **26** (1): 68~78
- [61] 林朝晖, 杨传国, 余钟波, 等. 中国区域大尺度分布式水文模型及其应用. 气候系统模式发展与应用研究研讨会. 湖南长沙, 2007年10月20~26日  
Lin Zhaohui, Yang Chuanguo, Yu Zhongbo, et al. The large-scale distributed hydrological model and its applications in Chinese region. Workshop on Developments and Applications of Climate System Dynamical Models, Changsha, 20~26 Oct. 2007
- [62] Liang Xu, Xie Zhenghui, Huang Maoyi. A new parameterization for surface and groundwater interactions and its impact on water budgets with the variable infiltration capacity (VIC) land surface model. *Journal of Geophysics Research*, 2003, **108** (D16): 8613, doi:10.1029/2002-JD003090
- [63] 谢正辉, 梁旭, 曾庆存. 陆面过程模式中地下水位的参数化及初步应用. *大气科学*, 2004, **28** (3): 374~384  
Xie zhenghui, Liang Xu, Zeng Qingcun. A parameterization of groundwater table in a land surface model and its applications. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 374~384
- [64] 谢正辉, 曾庆存, 戴永久, 等. 非饱和流问题的数值模拟研究. *中国科学(D)*, 1998, **28** (2): 175~180  
Xie Z, Zeng Q, Dai Y, et al. Numerical simulation of an unsaturated flow equation. *Science in China* (Series D), 1998, **28** (4): 429~436
- [65] Yang Hongwei, Xie Zhenghui. A new method to dynamically simulate groundwater table in land surface model VIC. *Progress in Natural Science*, 2003, **13** (11): 819~825
- [66] Zeng Qingcun, Zhang Xuehong. Available energy-conserving schemes for primitive equations spherical baroclinic atmosphere. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 1987, **11**: 121~142
- [67] 张学洪, 曾庆存. 大洋环流模式的计算设计. *大气科学*, 1988, 特刊: 149~165  
Zhang Xuehong, Zeng Qingcun. Computation design on oceanic general circulation mode. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1988, **12** (Special Issue): 149~165
- [68] Liu Hailong, Zhang Xuehong, Li Wei, et al. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 675~690
- [69] Liu Hailong, Li Wei, Zhang Xuehong. Climatology and variability of the Indonesian throughflow in an eddy-permitting oceanic GCM. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22**: 496~508
- [70] Li Rongfeng, You Xiaobao, Prungchan Wongwises. A three-dimensional coastal ocean circulation model. King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2002, ISBN: 974-90322-4-1
- [71] 李荣凤, 游小宝. 海洋环流模式的发展和应用 II: 近海和区域环流模式. *大气科学*, 2003, **27** (4): 729~739.  
Li Rongfeng, You Xiaobao. The development and application of the oceanic general circulation models. Part II: The regional oceanic general circulation models. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27** (4): 729~739
- [72] You Xiaobao, Li Rongfeng, Zeng Qingcun. Numerical simulation of the current system in the China Sea by using a nested mesh model. Proceedings of the Ninth Asian Congress of Fluid Mechanics, 27-31 May 2002, Isfahan, Iran
- [73] 游小宝. 中国近海海洋环流数值模拟和资料同化. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007  
You Xiaobao. Numerical simulation and data assimilation of the ocean circulation in the China Seas and adjacent areas. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [74] 游小宝, 李荣凤, 张铭, 等. 三维斜压模式对冬季南海环流的数值计算. *海洋学报*, 2001, **23** (6): 1~10  
You Xiaobao, Li Rongfeng, Zhang Ming, et al. Numerical calculation of the wintertime circulation in the South China Sea by using a baroclinic model. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23** (6): 1~10
- [75] 管秉贤, 李荣凤, 游小宝. 菲律宾海西部环流研究中若干有争论问题的回顾与探讨. *大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)技术报告 NO. 6: 北太平洋环流及其若干问题的研究*, 2001. 1~34  
Guan Bingxian, Li Rongfeng, You Xiaobao. Review and discussion of several controversial issues in the study of the circulation in the western Philippine Sea. Technical Report No. 6, State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, 2001. 1~34
- [76] 李东辉, 游小宝, 张铭. 南海各月月平均流场的数值模拟. *气象科学*, 2003, **23** (1): 31~38  
Li Donghui, You Xiaobao, Zhang Ming. Numerical simulation of every monthly mean ocean currents in the South China Sea. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **23** (1): 31~38
- [77] 李东辉, 游小宝, 张铭. 南海夏季环流机制的数值试验研究. *热带海洋学报*, 2003, **22** (6): 54~63  
Li Donghui, You Xiaobao, Zhang Ming. A study on circulation mechanism of South China Sea in summer by numerical experiments. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2003, **22** (6): 54~63
- [78] Syu H H, Neelin J D. ENSO in a hybrid coupled model. Part I: Sensitivity to physical parameterizations. *Climate Dyn.*, 2000, **16**: 19~34
- [79] Meehl G A, Gent P R, Arblaster J M, et al. Factors that af-

- fect the amplitude of El Niño in global coupled climate models. *Climate Dyn.*, 2001, **17**: 515~526
- [80] Zhang R H, Zebiak S E. An embedding method for improving interannual variability simulations in a hybrid coupled model of the tropical Pacific ocean - atmosphere system. *J. Climate*, 2004, **17**: 2794~2812
- [81] Zhang R H, Kleeman R, Zebiak S E, et al. An empirical parameterization of subsurface entrainment temperature for improved SST anomaly simulation in an intermediate ocean model. *J. Climate*, 2005, **18**: 350~371
- [82] 朱杰顺, 周广庆, Zhang Rong-Hua, 等. 参数化次表层上卷海温改进 ENSO 模拟. 大气科学, 2006, **30** (5): 939~951  
Zhu Jieshun, Zhou Guangqing, Zhang Rong-Hua, et al. Improving ENSO simulation by parameterizing the subsurface entrainment temperature. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (5): 939~951
- [83] 朱杰顺, 周广庆, Rong-Hua Zhang, 等. 一个改进的混合型海气耦合模式: ENSO 模拟. 大气科学, 2008 (待刊)  
Zhu Jieshun, Zhou Guangqing, Zhang Rong-Hua, et al. An improved hybrid coupled model: ENSO simulations. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2008, in press
- [84] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001
- [85] Six K D, Maier-Reimer E. Effects of plankton dynamics on seasonal carbon fluxes in an ocean general circulation model. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **20**: 559~583
- [86] Gregg W W. Tracking the SeaWiFs record with a coupled physical/biogeochemical/radiation model of the global oceans. *Deep-Sea Res. II*, 2002, **49**: 81~105
- [87] Christian J R, Verschell M A, Murtugudde R. Biogeochemical modelling of the tropical Pacific Ocean I: Seasonal and interannual variability. *Deep-Sea Research II*, 2002, **49**: 509~543
- [88] 董调玲, 王明星, 刘瑞芝. 二维的大气 CO<sub>2</sub>—大西洋碳循环模式. 大气科学, 1994, **18**: 631~640  
Dong Tiaoling, Wang Mingxing, Liu Ruizhi. Two-dimensional atmospheric CO<sub>2</sub>—Atlantic carbon cycle model. *Chinese J. Atmos. Sci.* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1994, **18**: 631~640
- [89] 邢如楠. 一个三维全球海洋碳循环模式. 北京气象学院学报, 1995, (2): 37~41  
Xing Ru'nan. Three-dimensional model of the carbon cycle in the ocean. *J. Beijing Meteorological College* (in Chinese), 1995, (2): 37~41
- [90] 石广玉, 郭建东. 全球二氧化碳的一维模式研究. 大气科学, 1997, **21**: 413~425  
Shi Guangyu, Guo Jiandong. One-dimensional analysis of global carbon cycle. *Chinese J. Atmos. Sci.* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1997, **21**: 413~425
- [91] 浦一芬, 王明星. 海洋碳循环模式(II)——对印度洋的模拟结果分析. 气候与环境研究, 2001, **6** (1): 67~76  
Pu Yifen, Wang Mingxing. An ocean carbon cycle model, Part II: Simulation analysis on the Indian Ocean. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6**: 67~76
- [92] 金心, 石广玉. 生物泵在海洋碳循环中的作用. 大气科学, 2001, **25** (5): 683~688  
Jin Xin, Shi Guangyu. The role of biological pump in ocean carbon cycle. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2001, **25** (5): 683~688
- [93] 邢如楠. 带生物泵三维全球海洋碳循环模式. 大气科学, 2000, **24** (3): 333~340  
Xing Ru'nan. A three-dimensional world ocean carbon cycle model with ocean biota. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2000, **24**: 333~340
- [94] 徐永福, Green J S A. 模拟浮游生物的季节变化. 生态学报, 1995, **15**: 245~250  
Xu Yongfu, Green J S A. Modelling of the seasonal variation of plankton. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 1995, **15**: 245~250
- [95] 徐永福, 王明星. 海洋生物过程对海洋吸收大气二氧化碳中的作用. 气象学报, 1998, **56**: 436~446  
Xu Yongfu, Wang Mingxing. The role of marine biological processes in the oceanic uptake of atmospheric carbon dioxide. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56**: 436~446
- [96] Xu Yongfu, Watanabe Y W, Aoki S, et al. Simulations of storage of anthropogenic carbon dioxide in the North Pacific using an ocean general circulation model. *Mar. Chem.*, 2000, **72**: 221~238
- [97] 赵亮, 徐永福. 开边界海盆尺度环流模式模拟北太平洋 CFCs 分布. 地球物理学报, 2005, **48** (4): 798~806  
Zhao Liang, Xu Yongfu. Simulation of CFCs distributions in the North Pacific using a basin-wide ocean general circulation model with open boundary. *Chinese J. Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (4): 798~806
- [98] Xu Yongfu, Aoki S, Harada K. Sensitivity of the simulated distributions of water masses, CFCs, and bomb <sup>14</sup>C to parameterizations of mesoscale tracer transports in a model of the North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 2006, **36**: 273~285
- [99] 赵亮, 徐永福. 边界条件对北太平洋海盆尺度环流模式的影响. 海洋科学进展, 2006, **24**: 292~300  
Zhao Liang, Xu Yongfu. Effect of boundary conditions on a basinwide scale ocean general circulation model for the North Pacific. *Advances in Marine Science* (in Chinese), 2006, **24**: 292~300
- [100] 储敏, 李阳春, 徐永福. 北太平洋原子弹<sup>14</sup>C分布的模拟. 热带海洋学报, 2006, **25** (6): 15~21  
Chu Min, Li Yangchun, Xu Yongfu. Simulation of bomb <sup>14</sup>C distribution in North Pacific. *J. Tropical Oceanography* (in

- Chinese), 2006, **25**: 15~21
- [101] Jin X Z, Zhang X H, Zhou T J. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1999, **16**: 197~215
- [102] 李阳春, 徐永福, 赵亮, 等. 全球海洋模式对 CFC-11 分布的初步模拟研究. *大气科学*, 2006, **30**: 671~681  
Li Yangchun, Xu Yongfu, Zhao Liang, et al. Preliminary study of the simulated distribution of CFC-11 in the global ocean circulation model. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**: 671~681
- [103] 李阳春, 徐永福, 赵亮, 等. 全球海洋模式中 CFC-11 吸收对次网格尺度混合参数化的敏感性. *海洋学报*, 2007, **29**: 31~38  
Li Yangchun, Xu Yongfu, Zhao Liang, et al. Sensitivity of CFC-11 uptake in a global ocean model to subgrid-scale mixing parameterizations. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2007, **29**: 31~38
- [104] 徐永福, 李阳春, 赵亮, 等. 一个太平洋海盆尺度环流模式及其模拟结果. *大气科学*, 2006, **30**: 927~938  
Xu Yongfu, Li Yangchun, Zhao Liang, et al. A basinwide ocean general circulation model of the Pacific Ocean and its simulation results. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**: 927~938
- [105] 李阳春. 太平洋碳循环及其对气候变化响应的模拟研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007. 116pp  
Li Yangchun. A simulation study of the carbon cycle in the Pacific Ocean and its response to the climate change. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007. 116pp
- [106] 徐永福, 赵亮, 李阳春. 北太平洋对人为二氧化碳吸收的数值模拟. *地球物理学报*, 2007, **50**: 404~411  
Xu Yongfu, Zhao Liang, Li Yangchun. Numerical simulations of uptake of anthropogenic CO<sub>2</sub> in the North Pacific. *Chinese J. Geophysics* (in Chinese), 2007, **50**: 404~411
- [107] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2007, 996pp
- [108] Mickley L J, Murti P, Jacob D, et al. Radiative forcing from tropospheric ozone calculated with a unified chemistry-climate model. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 30153~30172
- [109] Roelofs G J, Lelieveld J. Tropospheric ozone simulation with a chemistry-general circulation model: Influence of higher hydrocarbon chemistry. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 22697~22712
- [110] Johnson C E, Stevenson D S, Collins W J, et al. Role of climate feedback on methane and ozone studied with a coupled Ocean - Atmosphere - Chemistry model. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28** (9): 1723~1726
- [111] Liao H, Adams P J, Chung S H, et al. Interactions between tropospheric chemistry and aerosols in a unified general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D1): 4001, doi: 10.1029/2001JD001260
- [112] Liao H, Seinfeld J H, Adams P J, et al. Global radiative forcing of coupled tropospheric ozone and aerosols in a unified general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D16207, doi: 10.1029/2003JD004456
- [113] Wong S, Wang W, Isaksen I S A, et al. A global climate-chemistry model study of present-day tropospheric chemistry and radiative forcing from changes in tropospheric O<sub>3</sub> since the preindustrial period. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D11309, doi: 10.1029/2003JD003998
- [114] Hauglustaine D A, Lathiere J, Szopa S, et al. Future Tropospheric ozone simulated with a climate - chemistry - biosphere model. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L24807, doi: 10.1029/2005GL024031
- [115] Shindell D T, Faluvegi G, Unger N, et al. Simulations of preindustrial, present-day, and 2100 conditions in the NASA GISS composition and climate model G-PUCCINI. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, **6**: 4427~4459
- [116] Easter R C, Ghan S J, Zhang Y, et al. MIRAGE: Model description and evaluation of aerosols and trace gases. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D20210, doi: 10.1029/2004JD004571
- [117] Stier P, Feichter J, Kinne S, et al. The aerosol - climate model ECHAM5-HAM. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, **5**: 1125~1156
- [118] Verma S, Boucher O, Reddy M S, et al. Modeling and analysis of aerosol processes in an interactive chemistry general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: D03207, doi: 10.1029/2005JD006077
- [119] Bell N, Koch D, Shindell D T. Impacts of chemistry - aerosol coupling on tropospheric ozone and sulfate simulations in a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D14305, doi: 10.1029/2004JD005538
- [120] Liao H, Seinfeld J H. Global impacts of gas-phase chemistry - aerosol interactions on direct radiative forcing by anthropogenic aerosols and ozone. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D18208, doi: 10.1029/2005JD005907
- [121] Sanderson M G, Jones C D, Collins W J, et al. Effect of climate change on isoprene emissions and surface ozone levels. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (18): 1936, doi: 10.1029/2003GL017642
- [122] Lathiere J, Hauglustaine D A, De Noblet-Ducoudré N, et al. Past and future changes in biogenic volatile organic compound emissions simulated with a global dynamic vegetation model. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L20818, doi: 10.1029/2005GL024164
- [123] Wiedinmyer C, Tie X X, Gunther A, et al. Future changes in biogenic isoprene emissions: How might they affect re-

- gional and global atmospheric chemistry? *Earth Interactions*, 2006, **10**: 1~19
- [124] Liao H, Chen W T, Seinfeld J H. Role of climate change in global predictions of future tropospheric ozone and aerosols. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: D12304, doi: 10.1029/2005JD006852
- [125] Liao H, Henze D K, Seinfeld J H, et al. Biogenic secondary organic aerosol over the United States; Comparison of climatological simulations with observations. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: D06201, doi: 10.1029/2006JD007813
- [126] Murazaki K, Hess P. How does climate change contribute to surface ozone change over the United States? *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: D05301, doi: 10.1029/2005JD005873
- [127] Hogrefe C, Lynn B, Civerolo K, et al. Simulating changes in regional air pollution over the eastern United States due to changes in global and regional climate and emissions. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D22301, doi: 10.1029/2004JD004690
- [128] Steiner A L, Tonse S, Cohen R C, et al. Influence of future climate and emissions on regional air quality in California. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: D18303, doi: 10.1029/2005JD006935
- [129] Unger N, Shindell D T, Koch D M, et al. Influences of man-made emissions and climate changes on tropospheric ozone, methane, and sulfate at 2030 from a broad range of possible futures. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: D12313, doi: 10.1029/2005JD006518
- [130] Williams K D, Jones A, Roberts D L, et al. The response of the climate system to the indirect effects of anthropogenic sulfate aerosol. *Climate Dyn.*, 2001, **17**: 845~856
- [131] Rotstayn L D, Penner J E. Indirect aerosol forcing, quasi forcing, and climate response. *J. Climate*, 2001, **14**: 2960~2975
- [132] Ghan S, Easter R, Hudson J, et al. Evaluation of aerosol indirect radiative forcing in MIRAGE. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 5317~5334
- [133] Jones A, Roberts D L, Woodage M J, et al. Indirect sulphate aerosol forcing in a climate model with an interactive sulphur cycle. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 20293~20310
- [134] Kristjánsson J E, Iversen T, Kirkevåg A, et al. Response of the climate system to aerosol direct and indirect forcing; Role of cloud feedbacks. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D24206, doi:10.1029/2005JD006299
- [135] Menon S, Del Genio A D, Koch D, et al. GCM simulations of the aerosol indirect effect; Sensitivity to cloud parameterization and aerosol burden. *J. Atmos. Sci.*, 2002, **59**: 692~713
- [136] Quaas J, Boucher O, Brèon F M. Aerosol indirect effects in POLDER satellite data and the Laboratoire de Météorologie Dynamique-Zoom (LMDZ) general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: doi:10.1029/2003JD004317
- [137] Lohmann U, Feichter J, Penner J, et al. Indirect effect of sulfate and carbonaceous aerosols: A mechanistic treatment. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 12193~12206
- [138] Takemura T, Nozawa T, Emori S, et al. Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D022202, doi:10.1029/2004JD005029
- [139] van Donkelaar A, Martin R V, Park R J. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: D21201, doi:10.1029/2005JD006996
- [140] Li X W, Zhou X J, Li W L, et al. The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, **9** (1): 57~68
- [141] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, **297**: 2250~2253
- [142] 邵亚平. 沙尘天气的数值预报. *气候与环境研究*, 2004, **9** (1): 127~138  
Shao Yapin. Numerical prediction of dust weather. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 127~138
- [143] 曾庆存, 程雪玲, 胡非. 大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理. *气候与环境研究*, 2007, **12** (3): 244~250  
Zeng Qingcun, Cheng Xueling, Hu Fei. The mechanism of soil erosion and dust emission under the action of nonsteady strong wind with descending motion and gustwind. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (3): 244~250
- [144] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100** (D5): 8873~8892
- [145] Guenther A, Karl T, Harley R, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, **6**: 3181~3210
- [146] Levis S, Bonan G B, Vertenstein M, et al. The Community Land Model's dynamic global vegetation model (CLM-DGVM): Technical description and user's guide. NCAR Tech. Note TN-459+IA, National Center for Atmospheric Research, Boulder, 2004. 50pp
- [147] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 357~373
- [148] Bonan G B, Levis S, Sitch S, et al. A dynamic global vegetation model for use with climate models; concepts and description of simulated vegetation dynamics. *Global Change*

- Biology, 2003, **9**: 1543~1566
- [149] Zeng X D, Zeng X, Barlage M. Growing temperate shrubs over arid and semiarid regions in the Community Land Model-Dynamic Global Vegetation Model (CLM-DGVM). *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, in press
- [150] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, **408**: 184~187
- [151] Huntingford C, Cox P M, Lenton T M. Contrasting responses of a simple terrestrial ecosystem model to global change. *Ecol. Model.*, 2000, **134**: 41~58
- [152] Zeng N, Neelin J D. The role of vegetation - climate interaction and interannual variability in shaping the African savanna. *J. Climate*, 2000, **13**: 2665~2670
- [153] Wang G, Eltahir E A B. Biosphere - atmosphere interactions over West Africa, 2. Multiple climate equilibria. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2000, **126**: 1261~1280
- [154] Zeng X D, Zeng X B, Shen S S P, et al. Vegetation - soil water interaction within a dynamical ecosystem model of grassland in semi-arid areas. *Tellus B*, 2005, **57**: 189~202
- [155] Zeng X D, Wang A H, Zeng Q C, et al. Intermediately complex models for the hydrological interactions in the atmosphere - vegetation - soil system. *Adv. Atmos. Sci.*, 2006, **23**: 127~140
- [156] Zeng X D, Zeng X. Transition and pattern diversity in arid and semiarid grassland: A modeling study. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: G04008, doi: 10.1029/2007JG000411
- [157] iLEAPS. Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report 54. IGBP Secretariat, Stockholm, 2005. 52 pp
- [158] 黄耀, 于贵瑞, 等. 中国陆地和近海生态系统碳收支研究. 中国科学院知识创新工程重大项目科学研究工作进展总结报告, 中国科学院综合计划局. 2006  
Huang Y, Yu G R, et al. Study on carbon budget in terrestrial and marginal sea eco systems of China (in Chinese). Summary report on significant project's of CAS Knowledge Innovation Project, Bureau of Comprehensive Planning, Chinese Academy of Sciences (CAS). 2006
- [159] 陶波, 黄玫. 大气-植被相互作用模式对中国陆地生态系统水、热、碳通量的模拟. 中科院“地球系统动力学模型研究”项目群启动会暨国际研讨会, 北京, 2007年8月15~18日  
Tao Bo, Huang Mei. An atmosphere-vegetation interaction model and its application to the simulation of water, heat and carbon fluxes in Chinese ecosystem (in Chinese). The CAS conference on the Earth System Dynamic model, Beijing, 15-18 August 2007
- [160] 胡隐樵, 高由禧. 黑河试验(HEIFE)——对干旱地区陆面过程的一些新认识. *气象学报*, 1994, **52** (3): 285~296  
Hu Y Q, Gao Y X. Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the Heife. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52** (3): 285~296
- [161] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX. *高原气象*, 1999, **18** (3): 280~294  
Wang J M. Land surface process experiments and interaction study in China—From HEIFE to IMGRASS and game Tibet/TIPEX. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1999, **18** (3): 280~294
- [162] 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000  
Zhou M Y, Xu X D, Bian L G, et al. *Observation Analysis and Atmospheric Dynamics Study of the Qinghai-Tibet Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000
- [163] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草地土壤-植被-大气相互作用 (IMGRASS) 综合研究. *地学前缘*, 2002, **9** (2): 295~306  
Lv D R, Chen Z Z, Chen J Y, et al. Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil - vegetation - atmosphere interaction (IMGRASS). *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9** (2): 295~306
- [164] Zhang Qiang, Huang Ronghui. Parameters of land-surface processes for Gobi in north-west China. *Bound. -Layer Meteor.*, 2004, **110**: 471~478
- [165] 张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆-气相互作用实验 (NWC-ALIEX) 及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, **20** (4): 427~441  
Zhang Q, Huang R H, Wang S, et al. NWC-ALIEX and its research advances. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2005, **20** (4): 427~441
- [166] 符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题. *气候与环境研究*, 2002, **7** (1): 22~29  
Fu C B, Wen G. Several issues on aridification in the northern China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (1): 22~29
- [167] 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. *气候与环境研究*, 2004, **9** (2): 378~389  
Liu H Z, Dong W J, Fu C B, et al. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, Northeast China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 378~389
- [168] 朱德琴, 陈文, 刘辉志, 等. 我国西北典型干旱区和高原地区地表辐射能量收支特征的比较. *气候与环境研究*, 2006, **11** (6): 684~690  
Zhu D Q, Chen W, Liu H Z, et al. The comparison of surface radiation budget between typical arid region in North-west China and plateau region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (6): 684~690
- [169] 朱德琴. 中国干旱/半干旱区陆面过程及其对区域气候影响

- 的数值模拟研究. 中国科学院大气物理研究所 博士学位论文, 2007.
- Zhu D Q. Numerical simulation research on China's arid/semi-arid land surface process and its regional climate impact. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [170] 涂刚. 半干旱区不同下垫面地气相互作用研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007
- Tu G. Research on earth-atmosphere interaction process with different land surfaces in semi-arid areas. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [171] 刘辉志, 涂钢, 符淙斌. 半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征. 科学通报, 2008(待刊)
- Liu H Z, Tu G, Fu C B. Characteristics of albedo on different land surface in semi-arid area. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2008, in press
- [172] Fan L, Liu S H, Bernhofer C, et al. Regional land surface energy fluxes by satellite remote sensing in the Upper Xilin River Watershed (Inner Mongolia, China). *Theor. Appl. Climatol.*, 2006, doi 10.1007/s00704-006-0241-9
- [173] Ketzer B, Bernhofer C, LIU H, et al. Comparison of turbulent fluxes of momentum, energy and carbon for differently grazed sites in Inner Mongolia, China. Western Pacific Geophysics Meeting, Beijing, China, 2006
- [174] Finnigan J, Clement P, Malhi Y, et al. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: Averaging and coordinate rotation. *Bound.-Layer Meteor.*, 2003, **107**: 1~48
- [175] Huang Ronghui, Wei Guoan, Zhang Qiang, et al. The preliminary scientific achievements of the field on air-land interaction in the arid area of Northwest China (NWC-LAIX). Proceedings of the 4th CTWF International Workshop on the Land Surface Models and Their Applications, 15-18 Nov. 2005, Zhuhai, China
- [176] 黄荣辉. 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究. 地球科学进展, 2006, **21**: 564~577
- Huang Ronghui. Progresses in research on the formation mechanism and prediction theory of severe climatic disasters in China. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2006, **21**: 564~577
- [177] Huang Ronghui, Zhou Liantong, Chen Wen. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 55~69
- [178] 周连童, 黄荣辉. 中国西北干旱、半干旱区春季地气温差的年代际变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响. 气候与环境研究, 2006, **11**: 1~13
- Zhou Liantong, Huang Ronghui. Characteristics of interdecadal variability of the difference between surface temperature and surface air temperature in spring in arid and semi-arid region of Northwest China and its impact on summer precipitation in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11**: 1~13
- [179] 黄荣辉, 蔡荣硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系. 大气科学, 2006, **30**: 730~743
- Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 730~743
- [180] 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安, 等. 2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化. 大气科学, 2002, **26** (1): 1~8
- Hu Zeyong, Huang Ronghui, Wei Guoan, et al. Variations of surface atmospheric variables and energy budget during a sandstorm passing Dunhuang on June 6 of 2000. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (1): 1~8
- [181] Rodwell M J, Hoskins B J. Monsoons and the dynamics of deserts. *Quart J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 1385~1404
- [182] Webster P J, Magaña V O, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14451~14510
- [183] 苏明峰, 王会军. 中国气候干湿变率与 ENSO 的关系及其稳定性. 中国科学(D辑), 2006, **36** (10): 951~958
- Su Mingfeng, Wang Huijun. Relation between the variability of drought-wet climate in China and ENSO and their stability. *Science in China* (D) (in Chinese), 2006, **36** (10): 951~958
- [184] 周连童. 引起华北持续干旱的环流异常型及其与西北干旱区热力变化的关联. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007
- Zhou Liantong. The circulation anomalies pattern causing the persistent drought in North China and its relation to the thermal variability in the arid region in Northwest China. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007