

陆地生态系统模型及其与气候模式耦合的回顾

毛嘉富^{1,2} 王斌¹ 戴永久³

1 中国科学院大气物理研究所地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

3 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875

摘要 陆地生态系统和气候系统通过能量通量、水汽通量、物质交换相互影响、作用。作者对陆地生态系统模型及其与气候模式耦合的研究进行综述和讨论, 总结了当代5类主要全球陆地生态系统模型, 即生物地理模型、生物地球化学模型、森林林窗模型、陆面生物圈模型和动态全球植被模型, 以及它们与气候模式耦合的研究进展。阐述了动态全球植被模型及其与气候模式耦合研究在全球变化研究的重要作用。最后, 对未来模拟研究的方向进行了分析。

关键词 陆地生态系统模型 气候系统模式 耦合 动态全球植被模型

文章编号 1006-9585(2006)06-0763-09 **中图分类号** P461+.7 **文献标识码** A

Perspective on Terrestrial Ecosystem Models and Their Coupling with Climate System Models

MAO Jia-Fu^{1,2}, WANG Bin¹, and DAI Yong-Jiu³

1 State Key Laboratory of Atmospheric Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

3 School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract Terrestrial ecosystem and climate system interact with each other through biophysics and biochemical processes that involve the transfers of energy, water, and other matters. Ecosystem models and their coupling with climate system models are the most important means to study ecosystem and climate interaction. Five global terrestrial ecosystem models developed are reviewed and they can be classified into biogeography, biogeochemical, biophysical, forest gap and dynamic global vegetation types considering their functions and complexities. The coupling models between terrestrial ecosystem models and climate system models, as a result, also have five classifications. The most comprehensive model, dynamic global vegetation models and their coupling models, can simulate land surface physics, canopy physiology, plant phenology, vegetation dynamics, carbon cycling and nutrient cycling in an integrated system. They have the great potential to provide a fully interactive representation of biosphere ecosystems within GCMs to investigate the potential for vegetation climate interactions and feedback mechanisms. Finally, we have some perspectives and suggest a few problems in the modeling of ecosystems and their coupling with climate system models in future.

收稿日期 2005-09-15 收到, 2006-09-18 收到修定稿

资助项目 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”、国家重点基础研究发展项目G2005CB321703、国家创新群体项目40221503和国家自然科学基金资助项目G40225013、G40233031

作者简介 毛嘉富, 男, 1979年出生, 博士研究生, 主要从事陆地生态系统和气候系统相互作用的模拟及动态全球植被模型的发展、应用。E-mail: maojiafu@mail.iap.ac.cn

Key words terrestrial ecosystem model, climate system model, coupling, dynamic global vegetation model

1 引言

陆地生态系统在地球系统中起着重要的作用，它与大气、海洋通过生物物理过程、生物地球化学过程相互影响、作用^[1]。陆地生态系统通过改变陆地表面的物理特性，如：反照率、粗糙度，以及大气气体成分，如： CO_2 、 CH_4 等，调节大气和陆地表面之间能量、水分和动量的交换^[2,3]。Douville 等^[4]指出：由于雪、植被的反照率反馈作用，如果用苔原和裸土替代北方森林，全球气候将会变得更冷；Levis 等^[5]用耦合的气候模式模拟末次盛冰期时发现：对于低纬地区，寒冷、干燥的冰期气候能够缩减热带地区的森林覆盖，而这种变化又能使大气的温度升高、降水减少；对于高纬地区，森林覆盖度虽然也降低，但是，这种反馈却使得大气温度变得更低。此外，陆地生态系统植被、土壤对全球碳循环、大气 CO_2 浓度变化也起着重要的作用^[6]。植被和土壤有机物中共含有约 2 200 Gt 碳，是大气碳含量的两倍多，而且，植被、土壤系统和大气间的碳通量，大约是化石燃料燃烧所释放 CO_2 的十几倍^[7]。因此，植被、土壤的碳库含量以及它们的转换速率，能够对大气中 CO_2 的含量产生重要的影响^[8]。

2 陆地生态系统模型

为了更准确地理解、模拟全球陆地生态系统及它们与地球系统其他成员相互作用的机理，20世纪中叶以来，一系列陆地生态系统模型及它们与气候模式耦合的模式相继出现。

2.1 生物地理模型

生物地理模型又称平衡的植被模型，如 Holdridge 模型^[9]、Box 模型^[10]、BIOME1 模型^[11]及 MAPSS 模型^[12]等，它们是用来模拟陆地生态系统类型潜在的自然分布状况，是用于描述气候和自然植被分布之间关系的非机理性模型^[13]。这类模型虽然能够大范围地模拟植被潜在的空间分布形式，但其用于各种植被类型划分的生态、生理和气候限制因素是基于统计、非机理

的各种关系。例如 Holdridge 模型，是根据年降水量、积温和潜在年蒸发散与年平均降水量之比等推理出的二维气候空间内植被分布状况和气候条件之间的相互关系。然而，Holdridge 模型中没有包括温度、湿度季节变化的重要影响。Box 模型通过定义许多植被功能类型（Plant functional type）及其相应的各种气候限制条件而不同于 Holdridge 模型。一种植被功能类型代表了一些具有相似生理、形态特征的植被种类（如热带落叶树、北方针叶常青树等）。每种植被功能类型的气候限制条件决定了各种植被种类可以生存的气候空间范围，两个或更多的植被功能类型共存的区域代表植被群落。BIOME1 模型和 MAPSS 模型同样采用植被功能类型的划分方法，但它们显式地使用了生态生理的、资源的限制条件来模拟植被功能类型的分布状况。其中积温、冬季最低温度等生物气候变量的生态生理限制决定了植被的特性，如木本植被的类型（如针叶树或阔叶树）；水、光照、营养等资源限制条件决定了植被的主要结构特征，如叶面积指数等。BIOME1 模型又不同于其他的几种模型，它是用各种限制条件，如最冷月温度、最暖月温度、积温、年平均湿度指数等对气候限制进行表述，而不是完全地基于各种观测的统计相关性。

2.2 陆地生物地球化学模型

陆地生物地球化学模型如 TEM^[14]、CENTURY^[15]、CASA^[16]、BIOME-BGC^[17]、CARAIB^[18]、DEMETER^[19]、DOLY^[20] 以及 CEVSA^[6] 等模型，它们使用全球固定的植被、土壤分布类型，模拟全球净初级生产力、碳存储和营养物质循环。陆地生物地球化学模型一般以周或月为积分时间步长，可以同生物地理模型相结合，检验气候引起的植被分布变化对生物地球化学过程产生的影响^[21]。但是，这种连接不能模拟生物地球化学过程对植被分布的影响，也不能模拟植被分布的变化对气候的反馈作用。目前，许多陆地生物地球化学模型由于十分关注陆地生态系统中碳、氮动力过程，结果很可能难于在全球尺度上进行参数化研究。此外，陆地生物地球化学模型并不是用于检验碳存储的变化是如何改变和影响陆地

表面的物理特性, 因此, 它们对陆地表面的能量、水分平衡的参数化过程处理相对简单, 同气候模式相耦合时, 可能与气候模式本身的陆地表面参数化过程不相匹配, 从而导致能量、水分不守恒。

2.3 陆面生物圈模型

陆面生物圈模型是用于模拟全球土壤—植被一大气连续体中能量、水分以及动量平衡的模型。这类模型如 BATS^[22]、SIB^[23]、LSX^[24]、LSM^[25]、IAP94^[26]和 CoLM^[27]等, 通常以固定的植被、土壤类型为输入条件, 可以同气候模式直接耦合, 模拟陆地表面和大气间生物物理过程的相互作用。陆面生物圈模型一般使用基于生理过程的 C₃ 和 C₄ 光合作用公式^[28]、气孔传导公式^[29,30]以及简单的呼吸参数化公式, 模拟植被冠层和大气之间能量、水分和 CO₂ 的交换过程。但是此类模型没有包括同化物分配、植被演替等植被动态变化过程, 它们对土壤以及凋落物中的生物地球化学过程处理也相对简单。因此, 陆面生物圈模型不能够模拟对气候系统产生重要影响的植被分布类型的潜在变化, 对全球碳循环的模拟仍存在一定的局限性。

2.4 森林林窗模型

森林林窗模型是模拟林窗尺度小面积上每株树木生长、死亡、树种更替及其与环境因子(水分、光照、热量、养分)的关系, 因此, 林分内所有树木生长状况的综合就是林分的数量特征^[31]。目前的森林林窗模型, 如: JABOW、FORET、KIAMBRAM 等可分别适用于美国东部硬阔叶林、南部森林、亚热带雨林^[32~34]的模拟研究。延晓冬等^[35]开发的 Newcrop 模型能对我国东北广大地区林地特征和类型做动态描述, 并已经开始探索用森林林窗模型研究气候变化对局部林地生态系统的影响。森林林窗模型虽然长于模拟和预测森林生态系统的动态演替过程, 但是, 难于模拟全球其他陆地生态系统的动态变化过程, 而且, 由于计算效率较低, 此类模型进行全球范围的模拟比较困难。

2.5 动态全球植被模型

为了更充分地模拟陆地生态系统对气候变化、土地利用以及逐渐增加的大气 CO₂ 浓度瞬间的响应, 有必要发展一个更为一致、综合的陆地生态系统模型, 改进人们对陆地生物圈和大气圈之间

相互作用的理解^[36,37]。新的陆地表面模型或全球陆地生态系统模型应当能够在一个一致的模型中模拟陆地表面物理过程、冠层生理过程、植被动态过程、碳循环和氮循环等过程; 同时, 该模型也能考虑植被结构、功能之间的相互作用, 以研究陆地生态系统对环境变化潜在的大尺度响应^[38~40]。目前, 各种研究正不断朝着这个方向努力, 一些动态全球植被模型(Dynamic global vegetation models, DGVMs)相继出现, 如: 陆地生物地球化学模型和平衡的植被模型相结合的 BIOME3^[41]和 MAPSS-CENTURY1^[42]等; 陆面生物圈模型、陆地生物地球化学模型和相互作用的冠层模型相结合的 AVIM^[43]和 DGVM-BATs^[44,45]; 陆地生物地球化学模型和动态全球植被模型相结合的 TEM-LPJ^[46]; 陆面生物圈模型和动态全球植被模型相结合的 IBIS^[47]、TRIFFID^[48]、NCAR-DGVM^[49]和 ORCHIDEE^[49]等。其他的动态全球植被模型, 还有 HYBRID4.0^[38]、VECODE^[50]、SDGVM^[51]和 LPJ^[1]等。这些动态全球植被模型复杂程度各不相同, 各自所强调的功能也有所不同, 典型的动态全球植被模型结构如图 1 所示。

植被生物物理模块用于模拟短时间尺度的植被光合以及气孔传导等生化过程; 物候模块模拟植被发芽、展叶、开花、结实、落叶等物候现象与气候变化之间的联系; 植被动态模块用于模拟月至年际时间尺度上, 植被生长、演替以及各种扰动(火灾、虫灾、土地利用等)过程; 营养循环模块主要模拟植被和土壤之间碳、氮等营养物质的交换过程。因此, 在气候条件、CO₂ 浓度以及土壤质地等输入场的驱动下, 动态全球植被模型能够在一个统一的系统内模拟不同时间尺度上陆地生态系统碳、水交换以及植被的动态变化等复杂过程。

动态全球植被模型潜在的应用主要包括以下 3 个方面^[52]:

(1) 模拟未来全球气候变化和人类扰动(如土地利用/土地覆盖变化, LUCC)等各种情景下全球植被分布的瞬间变化。

(2) 评估陆地碳库、碳通量以及 CO₂ 施肥效应、大气氮沉降、气候变化、生态系统扰动的可能影响。

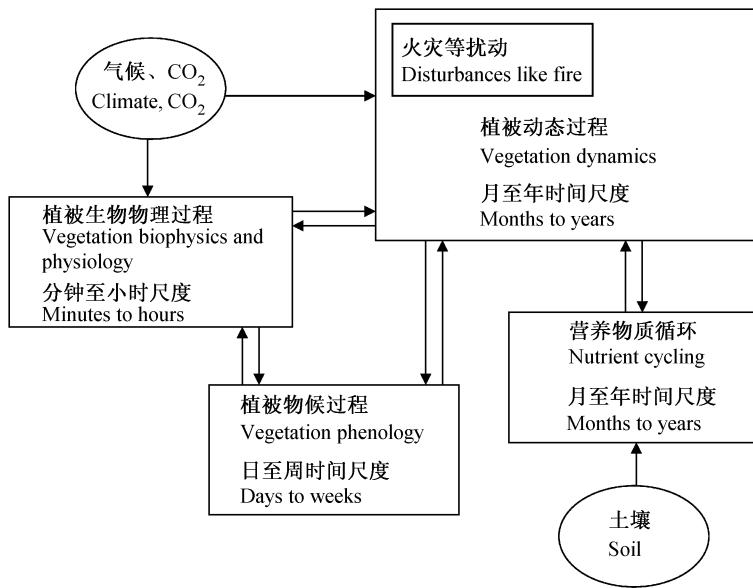


图 1 动态全球植被模型 (DGVM) 结构

Fig. 1 General structure of a DGVM

(3) 能够在全球气候系统模式中完全考虑生态系统的直接反馈过程, 研究植被、气候之间作用机制。

Sellers 等^[2]从陆地一大气相互作用的角度, 指出了陆地表面参数化方案发展的 3 个历史进程: 第 1 代陆地表面参数化方案是用来研究大气环流模式模拟结果对反照率、表面粗糙度等陆地表面物理特性的敏感性, 但是, 这种参数化方案是非机理性的、各自相互独立的过程; 第 2 代陆地表面参数化方案能够显式地模拟植被—土壤系统水、热、能量交换过程, 但是它们仅考虑陆地表面能量、水分通量对物理气候系统瞬间的、大尺度的影响; 第 3 代陆地表面参数化方案将光合—传导模型联系起来, 当植被类型给定后, 能够在耦合、一致的系统中计算水分、CO₂、能量的通量。

由于动态全球模型不但能够一致地考虑耦合系统中水分、CO₂、能量的通量, 而且, 还能同时模拟气候瞬间变化下植被的动态响应、反馈过程, 因此, 如果延续上述 Sellers 等的分类方法, 从陆地一大气相互作用的角度出发, 动态全球植被模型很可能成为未来的第 4 代陆地表面参数化方案。

3 陆地生态系统模型和气候模式的耦合研究

为了更准确理解全球陆地生态系统和地球系统其他成员相互反馈、作用机理, 伴随着各类陆地生态系统模型发展, 陆地生态系统模型和气候模式耦合的研究工作也同时展开。

3.1 迭代式的耦合过程

这种耦合包括平衡的植被模型和气候模式相耦合以及生物地球化学过程模型同气候模式的耦合。平衡的植被模型和气候模式耦合, 如: Claussen^[53]用 ECHAM AGCM 同 BIOME^[11]平衡的植被模式相连接, DeNobelt 等^[54]把 BIOME 模型同 LMD (Laboratoire de meteorologie dynamique, Paris) GCM 相结合, 用于古气候模拟研究^[55]等。此类耦合过程假设植被通过一个非同步的“更新”程序与气候状态达到平衡, 即大气模式的输出能被周期地用于诊断植被的平衡分布状况, 而植被的重新分布又可以决定陆地表面的特性, 如: 反照率、粗糙度和叶面积指数等, 这些植被的特性又可以用于影响下一步大气的状态^[56]。但是, 由于这类耦合采用的是间接、非同

步的一种耦合方式,一些短时间尺度的生物地球化学反馈,如植被系统和大气之间的碳、氮循环等过程没有被考虑。生物地球化学过程模型同气候模式耦合,如: Lu 等^[57]将生物地球化学模型 CENTURY 同区域气候模式 RAMS 相耦合,研究周、季节和年际尺度上区域大气同生态系统之间的相互作用; Xiao 等^[58]将 TEM4. 0^[59]耦合到一个用于全球变化研究的评估模式之中等。但是,这类耦合过程没有考虑长期的气候变化(如: 年际或更长时间尺度)所引起的植被种类组成和群体结构的改变,以及这种改变所产生的可能反馈。

以上的迭代式耦合模式可能存在的不足,如 Foley 等^[60,61]所指出的:由于相互耦合的气候和植被模式在考虑表面能量和水分平衡过程时可能存在着差异,因此,这种气候—植被耦合系统在物理上难以保持一致性,从而导致水分和能量的不守恒。

但是,迭代式耦合模式对人们研究气候、植被之间长期的相互作用非常具有指示意义,它揭示了在气候模式中加入植被动态变化过程的重要意义。

3.2 陆面生物圈模型同气候模式的耦合

在陆地生态系统中,叶面积指数(Leaf area index, LAI)可用于描述生物圈的状态,因为,它是最能影响大气、生物圈能量、水分和物质交换的重要植被特性^[48]。在耦合过程中,若按照对叶面积指数处理方式的差异出发,陆面生物圈模型同气候模式的耦合可分为两类:

(1) 植被叶面积指数固定的耦合模式。模式中每种植被类型的叶面积指数和植被覆盖度已事先假定好,它们仅随温度从冬季最小值到夏季的最大值之间变化^[44,45],或者直接从卫星观测资料反演出叶面积指数的变化^[2],如: BATS、SIB、LSM、IAP94 等和各类气候模式的耦合模式。

(2) 叶面积指数根据植被叶子含碳量变化而动态变化的耦合模式。这类耦合模式主要是用于模拟成熟的自然生态系统在年际、10 年际短时间尺度上叶片或冠层与大气相互作用的动态过程。如: AVIM 与 GOALS/LASG^[62]的耦合^[63]; 改进的 BATS 模式^[44,45]与 NCAR CCM3^[64]之间的耦合等。与叶面积指数固定的耦合模式相比,这种耦合模式能够通过模拟土壤、植被、大气系统的

碳循环来模拟植被叶面积指数的动态变化,同时,又能够模拟植被叶面积指数动态变化对大气的反馈作用。

以上陆面生物圈模型同气候模式之间的耦合是用于研究陆地生物圈和大气圈之间短时间尺度上生物地球化学和生物物理相互作用的过程。典型的此类模式中,无论叶面积指数变化与否,每一个模式格点或次网格点上的植被分布类型或植被功能类型以及土壤类型是固定不变的,然而,植被覆盖的变化能通过改变生物物理环境和碳循环过程对气候系统产生重要反馈。因此,此类模式忽视了植被和气候之间由于植被结构、组成和功能变化所产生的潜在的、长期相互作用。

3.3 动态全球植被模型与气候模式的耦合

研究陆地生态系统和大气圈之间潜在的长期相互作用时,应当把能量、水分、CO₂ 以及动量交换等快速的生物物理过程与植被覆盖、土壤质地等变化导致的植被种群、植被动态和营养循环等长期的演变过程作为一个整体考虑。因此,动态全球植被模型以及它们与气候模式相耦合的模式便有可能模拟这种不同时间尺度上气候、植被之间的相互作用。

同叶面积指数在区分陆面生物圈模型和气候模式耦合过程中起到的重要作用一样,植被功能类型在动态全球植被模型与气候模式耦合中也起到非常重要的作用。经典的陆面生物圈模型中,植被分布是随时间固定不变的,具有不同植被类型的大气格点或次网格点之间没有相互作用,即按照所谓的生物群系(Biome classification)方式划分。若按照植被功能类型划分植被时,各类植被可根据它们的结构、功能、叶子形状、叶子特性等分成少数的几种类型,它们的类型也很容易从遥感资料反演出来,而且,这些植被特性又是气孔传导度、光合作用以及植被生物量分配关系等重要的决定变量。因此,若陆地表面植被都按照植被功能类型的划分方式处理,气候模式及其含有的各类陆面生物圈模型将和生态领域的各种生态模型很容易地相耦合,方便地将叶面尺度的生态、生理学方法同生态学的理论直接地联系到一起^[65]。

由于功能植被类型在陆地生态系统模型和气候模式相耦合过程中所起到的重要作用,上述提

到的大部分动态全球植被模型均采用这种划分方式，如：NCAR-DGVM 就包含了温带针叶常青树、热带阔叶常青树以及 C₃植被等。但是，由于动态全球植被模型同气候模式相耦合的复杂性和不确定性，目前为止，仅有少数这方面的研究工作，如：IBIS1^[47] 和 GENESIS2^[24] 耦合，TRIFFID_MOSES2 和 Hadley Center GCM^[66] 耦合，IBIS2^[67] 和 NCAR CCM3^[64,68] 耦合，VE-CODE^[50] 和 MPM (the McGill paleoclimate model)^[69] 相耦合，NCAR-DGVM 和 CAM3.0^[70]、CCSM3.0^[71] 相耦合等。

虽然这种耦合结构能够保持陆地表面和大气之间能量、水分和 CO₂ 通量的一致性，但是，由于气候模式对气候变量模拟的偏差以及缺少火灾、土地利用、土地覆盖变化 (Land-use/land cover change, LUCC)、大范围虫灾等扰动机制，耦合模式对植被覆盖的模拟仍然在许多区域上存在着偏差。而且，由于需要较多的计算资源，这种耦合模式难以实现千年或更长时间尺度上陆地表面与气候系统之间的反馈作用。因此，必须在气候系统模式或中等复杂程度的地球系统模式中做适当简化，才能将动态全球植被模型引入。很明显，发展这种完全耦合的气候—植被模式仍处于起步阶段，而且，由于缺少长时间尺度、大范围的观测资料，以及因人类活动影响所产生的不确定性等，在全球范围内整体评价这类耦合模式变得极为困难^[51]。

4 结论及讨论

本文从陆地生态系统与气候相互作用的角度回顾了陆地生态系统模型及其与气候系统模式耦合的发展历程。指出：能够一致地模拟土壤—植被一大气连续体中能量、水气、CO₂ 通量及植被演替和植被功能变化等动态过程的动态全球植被模型，以及它们与气候系统模型相耦合的综合模型，是未来全球变化研究的重点和难点。但是，陆地生态系统与气候相互作用的模拟研究由于时、空尺度上相互作用的复杂性，考虑各种扰动可能带来的不确定性，以及受现有计算资源限制等，仍处于初期阶段，还存在许多挑战。为此，未来应加强以下几个方面的研究：

(1) 加强区域和全球尺度生态系统变化监测^[72,73]，利用观测数据，根据不同的科研目的，发展相应尺度的模型，以加深对不同区域、尺度生态系统及生态系统与气候系统相互作用的认识。

(2) 加强研究各种自然、人为扰动对生态系统结构和功能的影响机理，在模型中能够参数化火灾、土地利用和土地覆盖变化的影响。

(3) 将地理信息系统和遥感技术与生态系统及生态系统与气候系统相互作用的建模过程相结合^[74,75]。

参考文献 (References)

- [1] Sitch S, Smith B, Prentice I C et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 161~185
- [2] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, et al. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 1997, **275** (5299): 502~509
- [3] Brovkin V. Climate-vegetation interaction. *Journal de Physique IV*, 2002, **12**: 57~52
- [4] Douville H, Royer J F. Influence of the temperate and boreal forests on the northern hemisphere climate in the Meteo-France climate model. *Climate Dyn.*, 1996, **13**: 57~74
- [5] Levis S, Foley J A, Pollard D. CO₂, climate, and vegetation feedbacks at the Last Glacial Maximum. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104D**: 31191~31198
- [6] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystem and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 185~198
- [7] Schimel D, Enting I G, Heimann M, et al. CO₂ and the carbon cycle. In: *Climate Change 1994*. Cambridge: University of Cambridge Press, 1995. 35~72
- [8] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, **393**: 249~252
- [9] Holdridge L R. Determination of world formations from simple climatic data. *Science*, 1947, **105**: 367~368
- [10] Box E O. *Macroclimate and Plant Forms: An Introduction to Predictive Modeling in Phytogeography*. Hague, the Netherlands: Dr. W Junk Publishers, 1981. 258pp
- [11] Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, et al. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil

- properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, **19**: 117~134
- [12] Neilson R P. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications*, 1995, **5** (2): 362~385
- [13] Zhou G S, Wang Y H. Global change and climate-vegetation classification. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45** (1): 1~9
- [14] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, **363**: 234~240
- [15] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observation and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**: 485~809
- [16] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production, a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**: 811~841
- [17] Running S W, Hunt Jr E R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: *Scaling Physiologic Processes: Leaf to Global*, Ehleringer J R, Field C B, Eds. San Diego: Academic Press, 1993. 141~158
- [18] Warnant P, Franois L, Strivary D et al. CARAIB: A global model of terrestrial biological productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8** (3): 255~270
- [19] Foley J A. Net primary productivity in the terrestrial biosphere: The application of a global model. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99** (D10): 20773~20783
- [20] Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**: 471~490
- [21] VEMAP. Vegetation/Ecosystem modeling and analysis project: Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9** (4): 407~437
- [22] Dickinson R E, Sellers A H, Kennedy P J, et al. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community climate model. NCAR Technical Note, NCAR, TN275+STR, 1986, 69
- [23] Sellers P J, Y Mintz, Y Sud, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **6**: 505~531
- [24] Pollard D, Thompson S L. Use of a land-surface-transfer scheme (LSX) in a global climate model (GENESIS): The response to doubling stomatal resistance. *Global and Planetary Change* (MECCA special issue), 1995, **10**: 129~161
- [25] Bonan G B. Land-atmospheric interactions for climate system models: Coupling biophysical, biogeochemical and ecosystem dynamical processes. *Remote Sens. Environ.*, 1995, **51**: 57~73
- [26] Dai Yongjiu, Zeng Qingun. A land surface model (IAP94) for climate studies, Part I: formulation and validation in off-line experiments. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**: 443~460
- [27] Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. The common Land Model (CLM). *Bull. Amer. Meter. Soc.*, 2003, **84**: 1013~1023
- [28] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 1980, **149**: 78~90
- [29] Collatz G J, Ball J T, Grivet C et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, **54**: 107~136
- [30] Collatz G J, Ribas-Carbo M, Berry J A. Coupled Photosynthesis-Stomatal conductance Model for Leaves of C₄ Plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1992, **19**: 519~538
- [31] Shugart H H. *A Theory of Forest Dynamics: The ecological Implications of Forest Succession Models*. New York: Springer-Verlag, 1984
- [32] Aber J D, Melillo J M. FORTNITE: A computer model of organic matter and nitrogen dynamics in forest ecosystem. University of Wisconsin Research Bulletin, R3130. 1982
- [33] Acevedo M F, Urban D L, Ablan M. Transition and gap models of forest dynamics. *Ecological Applications*, 1995, **5** (4): 1040~1055
- [34] Acevedo M F, Urban D L, Shugart H H. Models of forest dynamics based on roles of tree species. *Ecological Modeling*, 1996, **87** (1): 267~284
- [35] 延晓冬, 赵士洞, 符淙斌, 等. 气候变化背景下小兴安岭天然林的模拟研究. *自然资源学报*, 1999, **14** (4): 372~376
- Yan Xiaodong, Zhao Shidong, Fu Congbin, et al. How should the Xiao Hinggan Mt. Forests change with potential climate change: A simulation study. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 1999, **14** (4): 372~376
- [36] Foley J A. Numerical models of the terrestrial biosphere. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**: 837~842
- [37] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 357~374
- [38] Friend A D, Stivens A K, Knox R G, et al. A process-

- based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0). *Ecological Modeling*, 1997, **95**: 247~287
- [39] Cramer W. Ecosystem composition and structure. In: *The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems*. Walker B H, Steffen W L, Canadell J, et al. Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 190~228
- [40] 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
- [41] Haxeltine A, Prentice I C. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10** (4): 693~709
- [42] Bachelet D, Lenihan J M, Daly C, et al. MC1. A dynamic vegetation model for estimating the distribution of vegetation and associated ecosystem fluxes of carbon, nutrients and water. Technical Documentation Version 1.0. General Technical Report PNW-GTR-508. Corvallis, OR. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2001
- [43] Ji J J. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**: 445~451
- [44] Dickinson R E, Shaikh M, Graumlich L, et al. Interactive canopies for a climate model. *J. Climate*, 1998, **11**: 2823~2836
- [45] Dickinson R E, Berry J A, Bonan G B, et al. Nitrogen controls on climate model evapotranspiration. *J. Climate*, 2002, **15** (3): 278~295
- [46] Pan Y, McGuire A D, Melillo J M, et al. A biogeochemistry-based successional model and its application along a moisture gradient in the continental United States. *Journal of Vegetation Science*, 2002, **13**: 369~382
- [47] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10** (4): 603~628
- [48] 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
- [49] Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudre N, et al. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199
- [50] Brovkin V, Ganopolski A, Sverdrup Y. A continuous climate-vegetation classification for use in climate-biosphere studies. *Ecological Modelling*, 1997, **101**: 251~261
- [51] Woodward F I, Steffen W L. Natural disturbances and human land use in dynamic global vegetation models. ICBP Report 38. International Geosphere- Biosphere Programme, Stockholm, Sweden, 1996
- [52] Peng C H. From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: A global perspective on modelling vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 2000, **135**: 33~54
- [53] Claussen M. On coupling global biome models with climate models. *Climate Research*, 1994, **4**: 203~221
- [54] DeNoblet N, Prentice I C, Jousaume S, et al. Possible role of atmosphere-biosphere interactions in triggering the last glaciation. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23** (22): 3191~3194
- [55] Claussen M, Brovkin V, Ganopolski A, et al. Modelling global terrestrial vegetation-climate interaction. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 1998, **353**: 53~63
- [56] Moorcroft P R. Recent advances in ecosystem-atmosphere interactions: An ecological perspective. *Proc. Roy. Soc. London*, 2003b, **270**: 1215~1227
- [57] Lu L, Roger A, Pielke S, et al. Implementation of a two-way interactive atmospheric and ecological model and it's application to the central United States. *J. Climate*, 2001, **14**: 900~919
- [58] Xiao X, Klooster D W, Melillo J M. Linking a global terrestrial biogeochemical model with a 2-dimensional climate model: Implications for global carbon budget. *Tellus*, 1997, **49B**: 18~37
- [59] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**: 785~796
- [60] Foley J A, Levis S, Prentice I C, et al. Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 561~579
- [61] Foley J A, Levis S, Costa M H, et al. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models. *Ecological Applications*, 2000, **10** (6): 1620~1632
- [62] Wu Tongwen, Liu Ping, Wang Zaizhi, et al. The performance of atmospheric component model R42L9 of GOALS/LASG. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (5): 726~742
- [63] 丹利. 大气和生物圈双向耦合模式中的多尺度变化模拟研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 2003
- Dan L. Simulation of multi-scale variation in the two-way interaction model between biosphere and atmosphere. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 2003
- [64] Kiehl J T, Gent P R, Bonan G B, et al. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). NCAR

- Tech. Note NCAR/TN-420 + STR, 1996, 1~152
- [65] Bonan G B, Levis S, Kergoat L, et al. Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16** (2), 1021, doi:10.1029/2000GB001360
- [66] Cox P. Description of the “TRIFFID” dynamic global vegetation model. *Hadley Center Technical Note*, 2001, **24**: 1~16
- [67] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14** (3): 795~825
- [68] Delire C, Foley J A, Thompson S. Evaluating the carbon cycle of a coupled atmosphere-biosphere model. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17** (1), 1012, doi:
- [69] Wang, Z, Mysak L A. A simple coupled atmosphere-ocean-sea ice-land surface model for climate and paleoclimate studies. *J. Climate*, 2000, **13**: 1150~1172
- [70] Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0) . NCAR Tech. Note NCAR/TN-464+STR, 2004, 226
- [71] Vertenstein M, Craig T, Henderson T, et al. CCSM3.0 User’s Guide. NCAR Tech. Note, 2004, 69
- [72] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用研究进展. 地球科学进展, 2000, **15**: 446~452
- Cao Mingkui, Li Kerang. Perspective on terrestrial ecosystem climate interaction. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, **15**: 446~452
- [73] 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 Huiyi, Dong Wenjie, Fu Congbin, 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
- [74] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003
- Yu Guirui. *Global Change and Terrestrial Ecosystem Carbon Cycle and Storage* (in Chinese) . Beijing: China Meteorological Press, 2003
- [75] 毛嘉富, 王斌, 丹利, 等. 新一代格点大气环流模式与陆面生态模式 AVIM 的耦合研究. 大气科学, 2005, **29** (6): 897~910
- Mao Jiafu, Wang Bin, Dan Li, et al. Coupling of atmosphere—vegetation interaction model (AVIM) to a new generation grid point atmospheric general circulation model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, **29** (6): 897~910