

陆地表层碳循环模型研究及其趋势^{*}

王绍强 陈育峰

(中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要 对国外陆地表层碳循环 OBM、TEM、CASA、CARA B、DEMETE-1、MAGE 2.0、SB2 等模型进行了评述, 同时也简要介绍了国内陆地表层碳循环模型的研究。通过对国内外研究现状的对比分析, 我们可以看到国外陆地表层碳循环模型的发展特点: 已经从静态模型转向动态模型, 综合考虑了动力学特点, 并且集成陆地表层碳循环的各个过程, 与气候模型耦合研究陆地表层对全球变化的响应, 建立生态生理模型和决定植被对气候反应的植物生态生理机制; 研究陆地生态系统与大气之间的动态响应和相互作用, 揭示其中的反馈机制; 加强各种情景研究, 同时包括人为的影响, 尤其是土地利用和土地覆盖变化对陆地碳存储的影响, 预测未来全球陆地表层的动态变化及其反馈; 由于遥感数据已经成为全球变化研究重要的数据来源, 遥感、地理信息系统技术在陆地表层碳循环研究中得到了重视和应用。这些正是我国陆地表层碳循环模型研究应注意和加强的方面。

关键词 陆地表层 碳循环 全球变化 模型

陆地表层碳循环是一个复杂的过程。通过光合作用, 绿色植物固定 CO_2 , 将大气 CO_2 转换成生物有机碳。陆地碳库的增加或减少取决于光合作用量、分解量及有机质燃烧量。陆地表层中的植被生物量、残落物量、土壤腐殖质三大碳库, 构成了陆地表层碳循环的主要组成部分。它们之间的相互联系构成了陆地表层碳循环的最基本模式: 大气中的 CO_2 通过光合作用被植被吸收, 形成有机碳; 植物枯死之后落于土壤表面, 形成残落物层, 经腐殖质化作用, 形成土壤有机碳; 土壤有机碳经微生物分解产生 CO_2 , 重新释放到大气中^[1]。陆地表层碳循环过程研究是对陆地表层碳循环具体过程的有组织的系统研究, 目的在于识别所涉及的碳循环所有状态变量并建立它们之间的关系, 过程研究形成的数值算法, 将各状态变量连结在一起, 并确定它们的变化速度^[2]。

事实上, 陆地表层碳循环过程及各个碳库之间的碳通量和反馈机制是非常复杂的。其中, 土地利用模式和土地覆盖变化对陆地表层碳库和通量上的影响及其反馈是当前研究的难点和热点, 目前已经开始在大陆到全球尺度上模拟未来土地利用模式和土地覆盖变化对陆地表层碳动态变化影响^[3]。碳循环模型是深入研究陆地表层碳循环和全球气候变化相互作用的重要手段和工具, 其主要用于对陆地表层碳循环变化情况进行描述、理解、模拟和预测。模型研究分析表明: 全球变化在未来温室气体释放和陆地表层生物圈影响上对碳的存储有明显的反馈作用^[4]。一些研究已经检验了气候变化对全球陆地植被分布、陆地碳存储潜力的潜在影响^[5~7]。植被类型和相对应的土壤碳存储量的估计, 与植被覆盖面积相结合,

^{*} 国家“95”重点科技攻关项目(96-911-01-01)部分成果

本文在写作过程中得到李克让研究员的热心指导, 谨致诚谢。

来稿日期: 1998-08

能够估计目前气候模式下陆地的碳存储量, 这是基于 GCM 模型模拟气候变化的情况下, 对未来碳存储的预测^[8]。对陆地表层- 大气碳交换的全面评价要求解决净碳吸收的时空估计问题, 在过去数十年, 大量的基于机制的模型用来评价从区域到全球尺度的陆地表层碳循环过程。例如: CENTURY、B D M E- BGC、TEM、CA SA、B D M E3、L N K A G E S、M - A G E 2. 0, 这些模型的基本理论是模拟控制生态动力学的物理和生态过程, 为检验陆地表层碳循环假说提供一个坚实的理论基础^[9]。

1 国外陆地碳循环模型研究现状

在 IGBP 计划中, 全球尺度的模型化工作最初集中于碳循环^[10], 国外科学家很早开始对陆地碳循环过程进行研究, 并建立各种各样的模型进行模拟, 这也是 IGBP 的全球分析、解释与建模 (GA M) 工作组的核心任务。

Esser^[11]于 1987 年发展的 OBM 模型, 主要研究陆地表层生物圈的碳通量, 此外还包括海—气碳交换的子模型。该模型中碳的转换率和转化系数, 是由环境变量得到的, 这些环境变量包括: 年均温、年降水、大气中 CO₂ 含量、土壤肥力、相关植被类型和土地利用类型等。OBM 模型过于庞大, 计算量相当大, 模型中又有一些不确定性的因素, 反而降低了模型计算的精度。由于对全球碳循环过程的认识有限, 数据不充足, OBM 模型存在着不确定性方面, 同时它假定内在的植被参数和碳通量是不变的, 当环境发生变化时, 这个假定就不对了。这类模型对于陆地碳循环对气候变化的反馈作用机制未作定量化的分析, 也没有考虑人类的影响。

随着全球环境变化研究的深入, 各国科学家们认识到土地利用和土地覆盖变化 (Land use/cover change, LUCC) 是造成全球变化的一个重要原因, 因而在建立陆地表层碳循环模型时也逐渐开始重视对 LUCC 的研究。例如, Emanuel 等^[12]描述了一个分析土地利用对陆地表层碳存储影响的动力学模型, 模拟了 1700 年到 2050 年间全球陆地表层碳存储分布的变化, 其中包含一个箱式子模型模拟陆地表层碳库对森林砍伐、收割或其他土地利用活动的响应; 一个面积分布函数, 按照植被碳密度统计每个生态系统类型的面积范围, 进一步描述植被中的碳。在该模型中, 陆地表面被分成一个或多个生态系统类型占据主导地位的土地单元, 而且面积分布函数由于植物生长和森林砍伐而改变, 但仅仅是一个一般的非线性差分方程, 并未揭示土地利用变化和全球气候变化之间的相互作用及反馈关系。

CA SA 是一个基于过程的模型^[13, 14], 耦合了生态系统生产力和土壤碳、氮通量, 由网格化的全球气候、辐射、土壤和遥感植被指数数据集驱动。模型包括土壤有机物、微量气体通量、营养物利用率、土壤水汽、温度、土壤结构和微生物循环。模型以月际时间分辨率来模拟碳吸收、营养物分配、残落物凋落、土壤营养物矿化化和 CO₂ 释放的季节模式。Potter 和 Kloster^[15]为了包括人为活动导致的土地覆盖变化, 对 CA SA 模型以及某些参数做了一些的调整, 来改善与植物吸收需求有关的土壤碳循环和总生态系统氮量可行性的计算。

由 Melillo 等于 1991 年发展的 TEM 模型是一个基于过程的生态系统模型, 模拟不同陆地生态系统中碳、氮通量和库^[16], 驱动变量包括每月气候 (降水、平均温度、云量)、植被和水容量、土壤属性、海拔高度。TEM 模型和 2 维气候模型的耦合, 可以研究生物地球化学循环在气候、生物和经济相互作用条件下的响应^[17]。人类和自然活动造成的温室气体

排放是大气化学和 2 维陆地海洋气候耦合模型的驱动力。但是, 在该模型研究中, 仅仅模拟大气 CO_2 浓度倍增的情况下陆地表层生态系统的响应, 没有考虑土地利用和管理对碳和氮动力学的影响, 所以碳和氮通量和库大小的估计仅仅应用到成熟的、未受干扰的植被和生态系统。

从 OBM 模型到 CASA、TEM 模型, 均以陆地表层碳循环过程研究为重点, 研究陆地表层和大气圈之间的相互作用, 用一些状态变量来描述其中的变化和反馈关系, 并通过建立全球数据库来实现模拟。陆地表层碳循环模型进行过程研究, 加深了对碳循环和全球变化的认识和理解, 并在此基础上建立了各种数值模式, 进行不同的情景模拟, 揭示了陆地生态系统和大气圈之间一定的响应关系, 对陆地表层碳循环过程的变化趋势进行了预测。

CARAB 模型是一个描述陆地生物圈碳吸收的机理性模型^[18], 以经纬度 $1^\circ \times 1^\circ$ 为一个格点, 估计全球陆地生态系统生产力。该模型包括每日和每年的物质循环, 它是基于三个子模型的耦合: 一个叶面吸收模型; 一个冠层模型; 一个木质呼吸模型。CARAB 同时也是一个陆地表层生物生产力的全球模型, 可用来估计由于人类活动对大气和生物圈之间碳交换可能的影响。

Woodward 的模型^[16]是建立在植物对最低温度、生长季长度、热量和水分平衡的反应上, 包括辐射、温度、湿度和降水三项响应机制的复合, 预测物种功能和能在给定气候中生存一年以上或更长时间的植被面积指数, 该模型已用于预测随气候变化植被的变化情况, 而且用现存植被的分布进行了检验。Woodward^[19]重新修正了这个全球第一性生产力和植物地理学的机理性模型, 融入了光合作用的生物化学过程。其中经验函数表现了第一性生产力需要依靠大气 CO_2 的浓度, 在某些情况下, 为了更好地将模拟的 CO_2 与观察的大气 CO_2 进行拟合, 从而调整了响应函数参数。这种方法能指明陆地表层碳汇的数量级, 但提供不了对模型中环境因子机制的理解、认识。该模型没有明确地解释碳循环的基本过程, 而且经验方法不能用于确定对模拟或观察的反馈机制。模型由多个模块组成, 能从区域尺度到全球尺度上进行运行, 同时整合进气候模型, 考虑了 N、水的条件, 具有非常详尽的机理, 但是过于复杂。

Raich^[9]使用半机理性、半经验性基于统计的模型来预测全球陆地表层土壤释放 CO_2 的时空模式, CO_2 释放包括土壤有机物和植物根的呼吸作用。对于全球尺度, 土壤呼吸释放 CO_2 的速率与温度和降水紧密相关, 与土壤碳库、氮库、碳氮比相关不好。土壤 CO_2 通量在大部分地区有一个很强的季节性模式, 最大的释放量恰好是植物积极生长时期。该模型把经纬度 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 作为一个格点, 时间分辨率是月际变化, 按年际变化模型能模拟预测 CO_2 释放的季节和空间动态分布。

机理性模型着重考虑碳循环过程中的各种物理、化学、生物生态学机理, 重点分析生物对气候变化的响应, 描述详尽, 能解释变化的内在原因和规律, 然而建立的模型过于庞大, 运行复杂, 数据获取非常困难。所以, 详细的机理性模型逐渐向半机理性、半经验性模型以及基于过程的动态模型发展并开始采用简化手段来适应批量数据^[16]。

King 等^[20]于 1995 年建立的陆地表层生物圈碳循环模型包括生态系统对土地利用干扰的响应和植被对大气 CO_2 的响应。在该模型中, 陆地表层碳库分为三个部分: 活植被、残落物、土壤。该模型模拟了 1700 年到 2000 年间全球 NPP 的变化, 并且考虑土地利用的变化以及植被的响应, 通过模拟, CO_2 增肥效应并不能解释缺失的碳库, 然而仅仅考虑陆地表

层碳循环过程、CO₂ 增肥效应和土地利用变化, 却不包括温度、降水的变化及其影响, 这与实际全球气候变化是不相符合的。

Foley 发展的DEMETER-1 模型^[21], 以经纬度 1°×1° 的精度把全球格点化, 模拟碳在植被生物量、残落物、腐殖质之间的通量, 从而模拟得到平衡态的陆地碳存储分布。DEMETER-1 模型是简化的基于过程的陆地表层碳平衡模型, 不同于许多其他的陆地表层碳模型, 它主要关注于陆地表层碳库的动力学, 不考虑与之相联系的矿物营养元素 (N、P 等) 的动力学, 预测而不是描述植被覆盖。但是DEMETER-1 模型描述碳在陆地表层的分布和流动, 没有反映出气候变化对陆地表层碳存储的影响以及两者的反馈关系, 也不包括对机制的解释。

MAGE 2.0 模型是一个描述土地利用和土地覆盖变化的全球综合模型, 它能模拟农业生产模式 and 评价不同土地利用的区域制约, 而且对大范围生物量作为可更新的能源进行综合分析, 包括了一个农业需求变化驱动的土地覆盖变化模块, 它的主要目标是把全球能源/工业系统和陆地-环境中的人类活动与生物圈和大气圈的相互变化耦合起来^[22]。

Qi 等^[23]建立了一个模拟土地利用变化和碳动力学的基于规则的空间模型。建模的四个规则是: 最大能力原则: 土地利用模式表现遵循一定的规则, 最大可能地满足人类的能量需要, 来获取生物能量; 近邻原则: 新的开发总是位于老区附近, 空间上是自相关的, 赋以不同的等级; 分散原则: 由于某种原因, 河流、湖泊、山、保护区、人为活动使土地利用被分隔开了; 变化等比率的原则。基于规则的空间模型能够有效地弥补统计模型中由于资料不足而难以估计模型参数的局限, 且能用于模拟土地利用和土地覆盖变化及其对陆地表层碳循环的影响。但仅仅基于规则输入几个时间点的土地利用情况, 并未模拟未来气候和陆地生态系统的相互作用和影响, 且精度有待于进一步提高, 需要增加土地属性的数量, 例如: 海拔和土地利用、坡度、人口密度、森林保护区、道路距离和河流远近等。

Emmanuel^[24]建立的模型用一个面积分布函数表达土地单元面积分布, 作为植被碳密度的函数, 用一个微分方程描述了对植物生长和土地利用响应的动力学。考虑到人为和自然的干扰, 为维护所需要的空间分辨率以描述陆地表层和大气之间的碳通量, 分布函数提供了一个解释土地利用干扰对土地景观影响的方法和手段。植物生长的复杂模型能集成进入描述面积分布动力学的偏微分公式, 该方程是描述不同类型土地利用干扰的函数。由于数据和计算的可能性及可行性, 所以这种方法不能应用到可预测前景的大陆和全球尺度上。

Chan 等^[25]发展了一个 2 维 (纬度-高度) 气候/全球碳循环模型, 用于调查陆地表层生物圈在过去 150 年间微量气体的线性增长, 以及 1000GT 碳进入大气的气候/生物地球化学响应。为了调查陆地碳储量对气候参数和大气 CO₂ 含量变化的动态响应, 将一个经验性的全球陆地表层模型与一个 2 维地带性多层能量平衡气候模型耦合, 集成了一个碳传输公式, 但是没有考虑海洋的碳循环。

Denning 等^[26]使用一个新的简化生物圈模型 SB2 和科罗拉多州立大学 (CSU) 的 GCM 模型耦合研究大气和陆地表层生态系统之间的 CO₂ 交换, 与植被的范围和季节性相联系的参数是从卫星观测数据中推导的。该研究采用一个气候和陆地表层生理学及生物物理学耦合模型来模拟陆地表层碳的新陈代谢, 使用生物圈模型 SB2 模拟陆地表面过程 (包括碳通量)。SB2 模型在 CSU GCM 模型中运行, 以 6 分钟的步长模拟计算了碳通量, 解决可能影响每年 CO₂ 平均分布的重要的非线性相互作用。

Svirezhev 和 von Bloh^[27] 建立的是一个简化的气候、植被和全球碳循环的零维模型。所有参数都是在二维地球表面上的全球平均, 不包括海洋部分, 在植被与温度、大气碳、反照率构成的随机环中存在一个强烈的非线性相互作用。模型包括三个简单的子模型: 全球碳循环、植被和全球温度的模型。该模型运用非线性理论, 采用最少的状态变量集成全球碳循环的全球植被模型。然而该模型需要引进水循环, 由于系统的随机干扰, 也需要确定系统从一个稳定的平衡态到另一个平衡态的转换时间。

从以上分析看出, 研究陆地碳循环的模型大致可以分为两类: 静态模型和动态模型。静态模型假定时间静态, 是在当前气候与植被类型之间的关系基础上开始的非动态相关模型, 本质上是经典的气候-植被分类的现代工具, 用于描述大尺度的植被分布^[28]。陆地表层碳循环有一定的空间结构特征, 是一个多级系统, 系统状态有时间概念, 是动态的。所以, 动态模型更能描述陆地表层生态系统的组成和功能, 并预测陆地表层碳循环对气候变化的响应, 揭示状态变量之间互为因果的动态变化^[2]。

国外数十年陆地碳循环模型研究的发展, 使我们可以看出, 陆地碳循环模型已经从静态模型转向动态模型, 综合考虑了动力学特点, 集成陆地表层碳循环的各个过程, 与气候模型进行耦合, 建立生态生理模型和决定植被对气候反应的植物生态生理机制, 研究陆地生态系统和大气之间的动态响应和相互作用, 揭示其中的反馈机制, 用相关的气候变量来预测生物群落分布, 以及陆地生态系统对气候变化的响应, 同时包括人为的影响, 尤其是土地利用和土地覆盖变化对陆地碳存储的影响。由于遥感在全球变化研究中的重要作用, 遥感数据已经成为陆地碳循环研究的重要数据来源。同时, 地理信息系统 (GIS) 和遥感在建模过程中也得到了重视和应用^[29, 30]。

2 国内陆地碳循环模型研究现状

近年来, 我国科学家已经开始对中国陆地生态系统植被碳平衡问题进行研究, 特别是对森林碳汇的研究。康惠宁等通过研究得出中国森林目前净固碳量为 $0.862\ 7 \times 10^{14}$ gC/a^[31], 陈育峰、李克让采用 IPCC 推荐方法初步估计 1990 年中国森林净吸收碳达 $0.356\ 0 \times 10^{14}$ gC/a~ 0.6×10^{14} gC/a; 徐德应采用 CARBON 模型, 得出中国森林在 1990 年净吸收大气碳约 $0.527\ 0 \times 10^{14}$ gC; 田广生估计 1990 年中国森林吸收 $1.399\ 2 \times 10^{14}$ gC^[32]。中国森林的碳通量估计出现了这么大的差异, 一方面是由于在森林碳循环方面的基础研究还不充分, 导致碳通量估算中有较多的不确定性; 另一方面是估算模型本身尚不完善。

国内陆地碳循环模型研究始于 80 年代, 但主要是静态模型, 关于动态模型的研究国内进展缓慢, 目前国内用于全球变化研究的动态模型大多是根据生态系统的特点对国外有关模型的改进^[28]。静态模型主要是有关中国自然植被净第一性生产力估算的模型, 例如周广胜和张新时根据植物的生理生态学特点和区域蒸散模式建立植物的净第一性生产力模型^[33]。同时森林植被生产力和生物量估算模型较多^[34, 35], 但是模型大部分是根据经验关系和实测数据, 建立的区域统计相关模型, 没有研究全球变化和植被之间的响应关系, 不能解释其中的反馈关系和植物的生理反应机制。

随着各项研究工作的深入, 我国科学家也开始建立陆地表层碳循环模型。康德梦等^[36]通过建立碳循环的微分方程组, 从而得到碳元素的数学模式, 通过解算碳循环生态动态模

式, 核算碳存储量的变化。由于该模式建立的是一组微分方程组, 解算时需要相应的初始条件, 因此, 需计算某一年的存储量作为初始条件。虽然利用该模式计算了 1986 年中国大陆碳素的存储量及其年通量, 并对模型进行了敏感性分析, 但是模型没有考虑陆地表层碳循环过程中的反馈机制, 仅仅考虑碳循环中的流通率, 没有研究大气与陆地之间的各种相互关系和作用。仪垂祥^[37, 38]采用非线性方法建立了陆地表层碳循环和能量循环的耦合动力学理论框架, 研究陆地碳循环与气候变化的反馈过程, 确定这种反馈响应过程的机制。延晓东和赵士洞^[39]使用分室模型来建立温带针阔混交林乔木层碳贮量动态的模拟模型, 依据每天的碳平衡计算得到任一时期的各分室中的碳贮量变化, 考虑了植物的光合作用过程, 是一个机理性的动态模型。

这些模型有的过于简化了地表的复杂性, 忽略微地貌对碳循环的影响, 仅仅针对陆地表层碳循环的某一环节进行研究, 没有建立完整的碳循环过程研究模型, 而且不考虑人为活动对陆地碳循环的影响, 模拟预测的功能较弱, 并且尚未分析中国陆地生态系统碳存储对气候变化的响应。

陈育峰和李克让^[40, 41]利用所开发的林窗模型 FOREC 在气候-森林响应过程敏感性研究的基础上, 将全球气候变化作为扰动加入到模型之中, 模拟森林群落在组成结构以及生物量等方面的可能变化。模拟与实际状况基本吻合, 说明该模型在研究森林群落演替和生物量的影响是可行的。

方精云等^[42, 43]根据各种文献, 估算了中国陆地生态系统的碳库和碳通量, 对中国陆地生态系统碳循环的各个构成要素进行了研究, 在此基础上, 发展了一个中国陆地生态系统碳循环模式, 然而仅仅是一个碳库和碳通量的模式流程图, 并不是一个真正意义上的碳循环模型。徐德应研制了用于中国森林碳储量计算以及土壤利用方式改变后碳排放的计算机模型 (CARBON), 该模型可分区、分林种计算中国森林碳存储的分布和变化^[44], 但至今尚未见到有关该模型结构与检验的详细报道。

李忠佩和王效举^[45]采用双组分模型模拟土地利用方式变更后土壤有机碳储量的变化, 并用一些调查和监测数据进行了初步验证。此双组分模型将土壤有机碳分为新形成有机碳和原有有机碳两个组分, 每个组分有机碳的形成转化为用一级动力学方程描述, 此方法适用于模拟不同土壤类型下土地利用系统变更初期的土壤有机碳动态变化过程。但实际上该模型是根据经验关系建立的统计相关模型, 没有考虑温度、水分在土壤有机碳动态变化过程中的反应, 也未解释土地利用和土地覆盖变化中各个过程的反馈响应和相互作用。

由于我国在陆地表层碳循环方面的研究起步较晚, 数据积累很少, 目前中国陆地表层碳循环模型研究基本上还主要以静态模型为主, 大多是估算中国自然植被净第一性生产力和森林植被的生物量, 动态模型相对较少。陆地生态系统净生产力的变化以及土地利用这两个不确定因素控制着陆地碳源的大小^[46], 而我国碳循环模型研究中以前者为重点, 对后者研究较为薄弱。陆地生态系统的研究对于更好地理解生物地球化学循环及人类活动对它们的扰动来说是非常重要的^[2], 然而, 目前我国关于陆地生态系统对气候变化响应的机理研究也很少。总的来说, 我国陆地表层碳循环研究处于发展阶段, 对碳循环过程以及生态系统、气候变化相互作用的研究正不断深入, 而模型应针对不同空间尺度和时间尺度碳元素循环进行多层次研究, 尤其在中国这个区域尺度上的模拟, 并且要结合全球大气环流模型来考虑多种生态类型和气候变化的反馈。

3 结语

通过对国外陆地表层碳循环模型研究的评述,以及对国内陆地表层碳循环研究的介绍,我们可以看出国内外在碳循环模型研究上的差距,可以认为中国陆地表层碳循环模型研究应注意以下方面: 1) 注重动态模型发展,重视机理研究,模型应具有动力学的特点,能够揭示陆地表层碳循环与气候变化的反馈关系以及陆地和大气圈之间的相互作用,预测未来中国陆地表层的动态变化以及反馈影响; 2) 应能模拟人为活动的影响,分析土地利用对中国陆地表层碳循环的影响,同时必须跟踪由于土地利用变化引起的生态系统复合体面积的变化,从而模拟陆地表层碳库对任何时期人类管理或复原的土地利用干扰的响应; 3) 利用地理信息系统、遥感技术和方法为模型构建和运行提供工具和数据; 4) 陆地表层碳循环模型应与气候模型相耦合来研究气候变化对陆地表层碳循环的影响; 5) 加强各种情景 (scenario) 研究,为中国制定温室气体排放政策提供理论基础和依据。

以上综合介绍了一些主要的陆地表层碳循环模型,由于这些模型建立的时空尺度和所要解决的问题、思考角度、出发点各不相同,因此,全球模型模拟很难准确^[2]。所以,中国须先考虑区域子模型,从碳循环过程模型入手,将地球作为一个动力系统来研究,重点发展几十年至几百年的数值模型,为研究人类社会在全球变化中的作用以及研究变化着的环境对人类的影响提供一个重要的途径。

参 考 文 献

- 1 田中正之, 石广玉, 李昌明译 地球在变暖 气象出版社, 1992 1~ 132
- 2 美国国家航空和宇航管理局地球系统科学委员会 陈泮勤, 马振华, 王庚辰译 地球系统科学 地震出版社, 1992 1~ 178
- 3 Brown S, Hall C S, Knabe W et al Tropical forests: their past, present, and potential future role in the terrestrial carbon budget *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70** 71~ 94
- 4 Vloedbeld M, Leemans R. Quantifying feedback processes in the response of the terrestrial carbon cycle to global change: the modeling approach of MAGE- 2 *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70** 629~ 642
- 5 Lashof D A. The role of the biosphere in the global carbon cycle: Evaluating through biospheric modeling and atmospheric measurement Ph. D. Dissertation, 1987.
- 6 Prentice K C, Fung I Y. The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change *Nature*, 1990, **346**(5) 48~ 51.
- 7 Smith T M, Leemans R, Shugart H H. Sensitivity of terrestrial carbon storage to CO₂- induced climate change: comparison of four scenarios based on general circulation models *Climatic change*, 1992, **21** 367~ 384
- 8 Smith T M, Shugart H H. The potential response of global terrestrial carbon storage to a climate change *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70** 629~ 642
- 9 Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(1) 23~ 36
- 10 Moore III B, Braswell Jr B H. 刘文新译, 田学文校 地球的新陈代谢: 了解碳循环 人类环境杂志, 1994, **23**(1) 4~ 12
- 11 Esser G. Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts *Tellus*, 1987, **39** (B) 245~ 260
- 12 Emanuel W R, King A W, Post W M. A dynamic Model of Terrestrial Carbon Cycling *The Global Cycles*, Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 1993 339~ 258

- 13 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.
- 14 Potter C S, Matson P A, Vitousek P M. Evaluation of soil database attributes in a global carbon cycle model: implications for global change research. In: Environmental information management and analysis: ecosystem to global scales (ed. W. Michener) Taylor and Francis London, U K, 1994: 281~ 302.
- 15 Potter C S, Klooster S A. Global model estimates of carbon and nitrogen storage in litter and soil pools: response to changes in vegetation quality and biomass allocation. *Tellus*, 1997, **49**(B): 1~ 17.
- 16 Walker B H. 刘金勋, 杨修译. 陆地生态系统对全球变化从景观到区域范围的效应. *人类环境杂志*, 1994, **23**(1): 67~ 73.
- 17 Xiao X, Kicklighter D W, Melillo J M et al. Linking a global terrestrial biogeochemical model and a 2-dimensional climate model: implications for the global carbon budget. *Tellus*, 1997, **49**(B): 18~ 37.
- 18 Warnant P, Francois L, Strivry D et al. CARA IB: A global model of terrestrial biological productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**(3): 255~ 270.
- 19 Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(4): 471~ 490.
- 20 King A W, Emanuel W R, Wullschlegel S D et al. A search of the missing carbon sink: a model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO₂. *Tellus*, 1995, **47**(B): 501~ 519.
- 21 Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus*, 1995, **47**(B): 310~ 319.
- 22 Leemans R, van Amstel A, Battjes C et al. The land cover and carbon cycle consequences of large scale utilization of biomass as an energy source. *Global Environmental Change*, 1996, **6**(4): 335~ 357.
- 23 Qi Y, Hall C S, Tian H et al. A Rule-Based Spatial Model for Simulating Land-Use Change and Carbon Dynamics. *Geographic Information Science*, 1996, **2**(1~ 2): 21~ 36.
- 24 Emanuel W R. Modeling carbon cycling on disturbed landscapes. *Ecological Modelling*, 1996, **89**: 1~ 12.
- 25 Chan Y, Chan D, Higuchi K. A two-dimensional energy balance climate model coupled interactively to a land carbon cycle model. *Tellus*, 1996, **48**(B): 329~ 346.
- 26 Denning A S, Collatz G J, Zhang C et al. Simulations of terrestrial carbon metabolism and atmospheric CO₂ in a general circulation model. *Tellus*, 1996, **48**(B): 521~ 542.
- 27 Sviridov Y M, von Bloh W. Climate, vegetation, and global carbon cycle: the simplest zero-dimensional model. *Ecological Modelling*, 1997, **101**: 79~ 95.
- 28 周广胜, 张新时, 郑元润. 中国陆地生态系统对全球变化的反应模式研究进展. *地理科学进展*, 1997, **12**(3): 270~ 275.
- 29 陈育峰. 自然植被对气候变化响应的研究: 综述. *地理科学进展*, 1997, **16**(2): 71~ 77.
- 30 陈育峰. 自然植被对气候变化响应的研究: 建模. *地理科学进展*, 1997, **16**(3): 24~ 28.
- 31 康惠宁, 马钦彦, 袁嘉祖. 中国森林C₂汇功能基本估计. *应用生态学报*, 1996, **7**(3): 230~ 234.
- 32 石广玉, 丁一汇, 张鹏等. 中国森林CO₂释放与吸收的评估. *中国的气候变化与气候影响研究*. 丁一汇主编. 气象出版社, 1997: 85~ 94.
- 33 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. *植物生态学报*, 1995, **19**(3): 193~ 200.
- 34 刘兴良, 鄢武先, 向成华, 蒋俊民. 沱江流域亚热带次生植被生物量极其模型. *植物生态学报*, 1997, **21**(5): 441~ 454.
- 35 李文华, 罗天祥. 中国云杉林生物生产力格局及其数学模型. *生态学报*, 1997, **17**(5): 511~ 588.
- 36 康德梦, 张孟威, 陈利顶. 中国环境中碳、氮元素变化与大气温室效应的系统分析. *中国的全球变化预研究第二部分: 分报告*. 叶笃正, 陈泮勤主编. 地震出版社, 1992: 211~ 269.
- 37 仪垂祥. 地球表层动力学理论研究: 陆地表层系统. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1994, **4**: 511~ 515.
- 38 仪垂祥. 地球表层动力学理论研究: 动力学方程组. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1994, **4**: 516~ 524.
- 39 延晓东, 赵士洞. 温带阔混交林林分碳贮量动态的模拟模型 I. 乔木层的碳贮量动态. *生态学杂志*, 1995, **14**(2): 6~ 12.
- 40 陈育峰. 气候-森林响应过程敏感性的初步研究——以四川西部紫果云杉群落为例. *地理学报*, 1996, **51**(增刊): 58~ 65.
- 41 陈育峰, 李克让. 应用林窗模型研究全球气候变化对森林群落的可能影响——以四川西部紫果云杉群落为例. *地理*

- 学报, 1996, 51(增刊) 73~ 80
- 42 方精云, 刘国华, 徐嵩龄 中国陆地生态系统的碳库 温室气体浓度和排放监测及相关过程 王庚辰, 温玉璞主编 中国环境科学出版社, 1996 109~ 128
- 43 方精云, 刘国华, 徐嵩龄 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义 温室气体浓度和排放监测及相关过程 王庚辰, 温玉璞主编 中国环境科学出版社, 1996 129~ 139
- 44 聂道平, 徐德应, 王兵 全球碳循环与森林关系的研究- 问题与进展 世界林业研究, 1997, 5 33~ 40
- 45 李忠佩, 王效举 红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟 应用生态学报, 1998, 9(4) 365~ 370
- 46 庄亚辉 全球生物地球化学循环研究的进展 地学前缘, 1997, 4(1~ 2) 163~ 168

THE STUDY AND TRENDS ON TERRESTRIAL CARBON CYCLE MODELS

Wang Shaoqiang Chen Yufeng

(The State Key Laboratory of Resources and Environment Information System,
Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

In this paper some terrestrial carbon cycle models in the world and China are introduced. After comparing the state-of-the-art development between the world and China, it is suggested that, on the study on terrestrial carbon cycle models in China, the following aspects should be paid attention to: (1) Future terrestrial carbon cycle models should pay attention to the development of dynamic model and be able to simulate the impacts of human activities. (2) The models are dynamic. They can reveal not only the feedback relationship between terrestrial carbon cycle and climate change but also the interaction between terrestrial and atmosphere, and predict terrestrial dynamic change and feedback impact in China in future. (3) The models can utilize technique and methods of Geographical Information System and Remote Sensing to provide strong pools and data. (4) The models of terrestrial carbon cycle should couple with climate models to study the impacts of climate change on terrestrial carbon cycle. Meanwhile, the models should strengthen scenario study and predict changes in future so that the models can provide theory basis and foundation for making policy of greenhouse gas emission in China.

Key words Terrestrial, Carbon Cycle, Global Change, Model

作者简介

王绍强, 男, 1972年11月出生。1994年毕业于华中师范大学地理系, 1997年在北京师范大学资源与环境科学系获得硕士学位。现为中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室在读博士研究生。