

气候变化对森林演替的影响*

王纪军^{1,2,3} 裴铁璠^{1**}

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院研究生院, 北京 100039; ³河南省气象台, 郑州 450003)

【摘要】 森林演替是森林生态动力源驱动下森林再生的生态学过程, 自 20 世纪初建立群落演替理论以来, 演替研究成为生态学研究中的热点。客观准确地认识森林演替规律, 研究森林演替动力学机理及其模型, 是科学管理森林生态系统的需要; 对于天然林保护工程与森林植被的恢复重建, 具有重要的理论与实际意义。干扰是森林循环的驱动力, 导致森林生态系统时空异质性, 是更新格局和生态学过程的主要影响因素。它可改变资源的有效性, 干扰导致的林隙是森林循环的起点。回顾了目前演替研究的几种方法, 即马尔科夫模型、林窗模型(GAP)、陆地生物圈模型(BIOME)和非线性演替模式。介绍了气候变化对森林演替的影响; 并在已有成果的基础上, 提出了目前研究存在的问题及未来的发展方向。

关键词 森林演替 人为影响 气候变化

文章编号 1001-9332(2004)10-1722-09 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

Effects of climate change on forest succession. WANG Jijun^{1,2,3}, PEI Tiefan¹ (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; ³*Meteorological Observatory of Henan Province, Zhengzhou 450003, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2004, 15(10): 1722~1730.

Forest regeneration is an important process driven by forest ecological dynamic resources. More and more concern has been given to forest succession issues since the development of forest succession theory during the early twentieth century. Scientific management of forest ecosystem entails the regulations and research models of forest succession. It is of great practical and theoretical significance to restore and reconstruct forest vegetation and to protect natural forest. Disturbances are important factors affecting regeneration structure and ecological processes. They result in temporal and spatial variations of forest ecosystem, and change the efficiencies of resources. In this paper, some concepts about forest succession and disturbances were introduced, and the difficulties of forest succession were proposed. Four classes of models were reviewed: Markov model, GAP model, process-based equilibrium terrestrial biosphere models (BIOME series models), and non-linear model. Subsequently, the effects of climate change on forest succession caused by human activity were discussed. At last, the existing problem and future research directions were proposed.

Key words Forest succession, Human activity, Climate change.

1 引 言

20 世纪初, Cowles、Clements 等建立了群落演替的理论^[70], 演替的研究成为生态学研究中的热点。森林演替是生态系统动态中森林资源再生产的一个重要的自然生态学过程, 以木本树木为主的生物种群在时间和空间上不断延续、发展或发生演替, 对未来森林群落的结构及其生物多样性具有深远的影响, 因而一直是森林生态系统动态研究中的主要领域之一^[20]。初期的研究多局限于定性的描述, 20 世纪 50 年代以后才开始群落演替定量分析^[10, 11, 27]; 国内群落演替定量研究始于 80 年代初; 近年来, 由于深入地研究反映林地生长条件的相互作用与累积效应, 即比较真实地重现(仿真)现有林地的结构和演替历史^[7], 对于天然林保护工程与植被的恢复重

建, 具有重要的理论意义, 因此其研究引起了密切关注^[38, 45]。在演替过程中, 森林更新受物理环境、自然和人为干扰、更新树种的生理生态特性、树种对干扰的反应等因素及其相互作用的影响^[20]。

当前因人类活动所导致的全球变暖已成为超出科学界的重大环境问题, 由于陆地生态系统不但是人类赖以生存的物质和环境主体, 而且是全球碳循环的重要碳库之一, 因此陆地生态系统如何响应和影响全球气候变化成为全球变化研究的核心问题之一^[80]。该问题一方面为植被类型的空间分布对气候变化的响应; 另一方面, 植被类型的空间分布的变化会反馈给气候系统。

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-425)和国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111503)。

** 通讯联系人。

2004-03-29 收稿, 2004-05-08 接受。

2 干扰

对于生物群落来说,总是有各种外力对其产生作用,当作用力超过一定范围,造成群落正常结构或功能发生变化时,就构成了对群落的干扰^[71].干扰是森林时空异质性的主要原因,是更新格局和生态学过程的主要影响因素,也是森林循环的驱动力,由此引起的生境和资源的空间异质性使森林更新表现出明显的空间格局特征.干扰的主要作用是改变资源的有效性,干扰形成林隙是森林循环的起点.只有将干扰状况与树种特性紧密结合起来,才能比较全面地认识森林的结构动态变化规律.

对于生物群落发生作用的外力或源于自然,或来自人为活动.前者称为自然干扰,后者称为人为干扰^[33].影响森林系统的自然干扰中既有生物因素,也有非生物因素.非生物因素如火、暴风雨、侵蚀、淤积、雪崩、台风、洪水、滑坡、地震、火山喷发、冰川活动等;生物因素如动物、微生物、病虫害等.对于干扰特征的描述随干扰类型而异,一般用干扰频率、恢复速率、干扰事件影响的空间范围、时间尺度和形状等来说明干扰的特征.自然干扰发生的频率、强度、空间范围和形状不尽相同,这些特性决定着对森林生态系统的影响程度.过度频繁的干扰,可限制许多树种发生和生长,这是因为树种在很短的干扰间隔内来不及完成生命周期;有的干扰虽然罕见,但对森林的形成和结构亦有决定性的作用.例如,非生物因素林火干扰能使生态系统、群落或种群的结构遭到破坏,导致局部地区光、水、能量、土壤养分等的改变,进而导致微生物环境的变化,直接影响到地表对土壤中各种养分的吸收与利用,使资源、基质的有效性或物理环境发生变化^[9].其次,林火干扰的结果还可以影响到土壤中的生物循环、水分循环、养分循环,进而通过影响很多生物个体的死亡、生长和发育,影响到种群和群落的结构特征,影响到群落的演替规律.高强度火烧对土壤结构破坏严重,使空隙度和分散系数增高;而中低强度火烧对土壤坚实度和空隙状况影响不大,但对土壤的保水保肥能力有显著影响^[75].又如生物因素外来物种,通过各种渠道进入以后,自然隔离作用大大减小,对生态、经济和社会产生了一系列的不利影响,业已受到人们的关注和学术界、政府机构的高度重视.外来种入侵是自然生态系统面临的全球性问题之一^[15],它不仅导致生物多样性丧失,且威胁着全球的生态环境和经济发展^[19].

人为干扰则包括土地利用历史、森林砍伐、林地清理、农药使用、空气污染、人为气候变暖等,人为干扰较自然干扰发生频繁,它可以掩盖、减小或增强自然干扰的作用^[33].人类活动所引起的温室效应及由此造成的全球气候变化和对全球生态环境的影响正越来越受到各国政府、科学家和公众的注意,作为全球陆地生态系统一个重要组分的森林对未来气候变化的响应更是人们关注的重点^[37].现在有证据表明:最近 50 年人类活动对全球气候变化影响特别明显^[26,27,77].气候模式模拟研究表明,考虑人类活动增加温室气体排放,东亚和中国的气候可能将发生明显的变化^[74,78,79].气候变化对陆地生态系统的影响及其反馈是全球变化研究的重要内容,而由土地利用-土地覆盖变化引起的气候变化一直是其中的研究焦点之一^[8].森林植被的变化对于气候系统的反馈可能加强或减缓气候的变化,对于植被覆盖对气候系统反馈的研究,将帮助我们认识气候变化的机理并提高预测气候变化的能力.林分受到人为火的干扰后,会减少雷电火干扰的可能性.人为的防火措施一方面可延长自然火的发生周期,而另一方面又因长期对森林的封禁,致使林内易燃物大量积累,可诱发强度火干扰的发生.由于几十年来的砍伐和其他人为的土地利用,东北温带森林已经从空间分布上严重偏离了自然的演替^[25],为了客观准确地认识森林演替的动力学机制及其模型势在必行,同时也是科学管理森林生态系统的需要^[76].

在森林演替中,无论是自然干扰还是人为干扰,也不管是生物因素还是非生物因素,它们常常相互组合、相互影响.不同干扰因子的时空组合,对森林生态系统的格局和过程有重要的作用,如在欧洲半干旱稀树草原,利用降雨量、湿度有效性、植被动态、草原火、放牧等因子进行模拟研究,不能说明树草能够长期共存而不是演替为森林或草原群落格局的机制;然而降雨、火和放牧等干扰因子的组合,却可以维持长期而稳定的树草共存格局^[30,31].

森林对于干扰的反应表现在许多方面,这些方面的内在联系十分复杂,因此,很难用森林中某个现象或某几个现象,来说明森林生态系统对干扰的反应;但从森林中各树种及其林木个体的空间格局和生态学过程看,不外乎两种格局:植被结构的重组和形成新的植被.根据干扰对植被系统的影响程度,将干扰分为轻度干扰、中度干扰、严重干扰、剧烈干扰^[28].在出现弹性限度之前,小的系统内外环境变化(轻度干扰)会造成植被系统的波动,但波动振幅

不大,只在平衡状态中围绕中心位置发生摆动,应力消除后系统能恢复原状,应变为零.此阶段应变与应力成正比关系,属于弹性变形,可以通过植物自组织力得以恢复,这是由于组成森林的各种树种在长期的自然进化过程中,已形成了一些特有的解剖构造和生理机制,可适应较规律的、季节性的干扰,并能忍受一定程度的非规律性干扰.但当环境系统受到中度干扰,系统有了较大变化,超过平衡位置而不再处于平衡之中,处于预警状态,此时表现为非演替种的树木个体或小的树种组的更替动态过程.系统应变可以通过植物自组织力逐渐恢复,但耗时较长,如能结合人为辅助手段来加以恢复,效果明显.此阶段属于塑性变化范围,恢复力以植物自组织力为主,人为为辅.植被系统在遭受严重干扰后,应力作用于系统后的应变更大,仅凭植物自组织力恢复的难度很大,耗时很长,系统处于终极预警状态.应力撤除后,需要通过更大力度的人为措施来加以恢复,系统一般会建立新的波动平衡状态,而难以在短期内纯粹复原到初始状态.此阶段仍属塑性变化范围,恢复力在初期恢复阶段以人力为主,植物自组织力为辅;后期阶段仍要重点利用植物自组织力的自我恢复功能.剧烈干扰后会导致系统彻底毁坏,面目全非,应力撤除后为极度干扰立地,应进行植被重建.植被重建也包括自然和人工两方面,不过自然重建的速度极慢,人工植被重建应以仿拟自然林或近自然林为主要手段,前期恢复力主要为人力;后期阶段仍要充分发挥植物的自组织力.

3 森林演替的难点

美国生态学家 Clement 在 20 世纪初就提出了生态过渡带 (eco-tone) 概念,自 80 年代以来该领域重新成为生态学研究的一个热点,这是因为生态过渡带是一种植被类型逐渐被另一种植被类型取代的张力区,或称由一类生态系统向另一类生态系统空间转换的相变区^[73].环境因子和生物类群均处于相对复杂的临界状态,不论对于全球气候变化还是人类干扰均极端敏感,生态过渡带实际上是外界干扰信号的放大器,全球变化重要的预警区.这决定了演替模型对于生态过渡带的研究就显得比较迫切,就对目前模型中的生态限制因子及其阈值的科学确定提出了挑战.

在传统的植被分布与气候关系研究中,通过确定气候界限指标划分植被的分布范围,忽视了分布区内因生态环境要素的梯度变化对植被的影

响^[65,66].植被分布区内热量、水分等重要生态气候因子的梯度变化不仅影响植物物种的生存状况和生产力,还会影响其动力演替过程.因此,也就形成了生态环境质量差异和生态气候适宜性差异^[64].在森林植被带中由于分布区内树种生存的基本生态气候要素存在着梯度变化或差异,树种的分布就会形成核心分布区和边缘分布区.核心分布区内生态气候条件最为适宜,树种生产力最高,成为群落的优势种,边缘分布区生态气候条件逐渐变为不适宜,树种生产力也渐低,在群落中逐渐变为次要地位,直至消失.所以在森林演替中就不得不考虑空间分布的异质性,而空间的异质性存在于所有尺度的生态学过程,影响着生态学系统的重要功能和过程,这就造成了生态系统属性在空间上的复杂性和变异性^[34,35].

4 演替过程模型

一般在建立模型时常常把演替理论和观点以不同的形式反映到数学模型中,模拟陆地生态系统植被动态的模式多种多样^[32],这是由模型构造者的知识背景和多种多样的生态理论形成的^[51].大部分用于模拟森林立地和林窗的植被动态^[5,6,18,32,44,54,62]和森林生态系统过程^[1,2,42,43,49,50].从这种方式上说,模型实际上表示了生态系统功能和行为的预先假设,模型的限制条件,反映了对生态系统的认知程度.

4.1 马尔科夫模型

马尔科夫模型是一个经验模型,基于植被-气候之间的统计关系,在这种统计关系的基础上对未来生态系统的响应进行预测.以马尔科夫理论为基础的模型都或明确或隐含地认为:植物群落的演替过程是一个线性系统,这种植物群落的演替是一种必然的过程,其基本特征是经足够的时间以后收敛在一个稳定的组成中.也就是说,马尔科夫模型建立在 3 个假设的基础之上^[17]:①植被和物种在现在和将来都与气候处于平衡状态;②气候变化以后,植被和气候的关系不会发生改变,演替转移概率具有时间上的不变性;③被选择的气候变量被认为对植被起着关键的作用,是生态限制因子,而其他次要的相互关系不予考虑.具体来说,就是演替的初始状态不管是什么原因造成的,植物群落将按既定的方向发生演替,这种既定的方向就是成熟稳定的植物群落^[38].这种模型把演替系统用马尔科夫过程来近似地描述,即认为系统在已知现在情况的条件下,系统未来时刻的情况只与现在有关,而与过去的历史无

直接关系。

植物群落演替的马尔科夫过程常用更新概率模型来描述,即用表示一些植物在一定时间里将被另一些个体或另外一些种更替的概率表来构造马尔科夫过程的一些平稳转移概率(矩阵)。这种更替概率表(或转移矩阵)一般是通过实验(包括野外调查)的手段得来的。

马尔科夫模型包括单一马尔科夫链模型和时空的马尔科夫链(spatio-temporal Markov chains, STMC)模型。前者表现为静止或时间均一的,这种模型仅当系统具有时间不变的转移概率和不变的状态或类别才是可用的,所以对于原生演替是不适宜的。后者则尝试将空间维引入模型,将每一点单独通过马尔科夫链,解释它的位置,形成了每一时间步骤的状态空间图^[36]。转移概率用复合因子赋予权重,业已证实,空间零阶 STMC 模型在一定条件下具有遍历态分布。模拟显示,较高空间阶的 STMC 模型也具有遍历态分布。

4.2 林窗模型(GAP)

由于树木枯死形成的林窗在森林群落中具有重要的生态作用,因为他通过改变林间的日照条件影响着森林的优势木、动态和组成^[3]。林窗模型是一种“多物种”和“多龄级”的随机样地模拟器,用于模拟森林内部控制树木定居、生长、替换和死亡的过程,可以用来预测全球变化对森林种类、森林第一性生产力、森林生物量的影响,也可以通过多点模拟间接推断植被边界的变化,还可以找出影响森林对气候变化响应的重要因素^[17]。林窗研究已成为当前森林生态学关注的热点之一,是森林循环更新的一个重要阶段,也是维持森林生物多样性的一个重要环境。林窗模型首先由 Botkin 及其同事们于 1972 年建立^[4],其第一个版本为“JABOWA”,以后 Shugart 等又开发了新的版本,例如“FORET”、“FORENA”等。

Solomon^[56,57]用 FORENA 模拟了美国东部 CO₂ 浓度的升高引起的气候变化对森林的影响,在区域尺度上探讨了森林分布、第一性生产力和碳沉降的改变。中国在这方面也做了不少有益的探索:NEWCOP(Northeast Woods Competition Occupation Processor)模型是一个新的适于模拟东北森林的种类组成动态的林窗类计算机模拟模型,它通过模拟在每一个林分斑块上的每株树木的更新、生长和死亡的全过程来反映森林群落的中长期生长和演替动态^[69]。NEWCOP 模型是一个由气候动力驱动的生

态系统模型,故也可以用于评价气候变化对东北森林生长和演替的影响。在东北大兴安岭、小兴安岭和长白山地区对 NEWCOP 模型进行了验证和校准。沿环境梯度对 NEWCOP 模型的数字模拟实验表明:它能准确地再现顶极森林中树种组成及其在东北地区的水平、垂直分布规律;并能准确地再现大兴安岭、小兴安岭和长白山的主要类型森林的生长和演替规律;在一定的场合 NEWCOP 还可反映林分的径级结构;NEWCOP 模型还具有对现有森林的跟踪模拟能力。

LINKAGES 模型是在 JABOWA/FORET 模型的基础上发展起来的一个综合模型,基于树种组成、生物量、净第一性生产力、土壤有机质、土壤有效氮等独立变量,模型在不同地区得到验证^[24],该模型包括了分解、矿化、土壤水分等子模块,将土壤的水分养分循环与树种演替间的相互作用联系起来。郝占庆等^[21]曾用该种模型,选择目前(模型使用目前的气象参数)和未来变暖(各月温度均增加 5℃、降水无明显变化)两种气候条件,对长白山自然保护区内主要树种在各斑块类型中对气候变化的潜在响应进行了模拟。

在森林林窗模型模拟中,各个林窗上森林动态各不相同,具有随机性,但所有林窗平均状态反映出森林群落演替的有序性是林窗模型成立的主要原理,样地面积不同可导致模拟出的森林群落的树种组成和结构不同,只有当样地面积为林窗大小时,模拟结果才最合理^[67]。另外,按照林窗模型的定义,样地多少实际上代表着斑块复合体的大小,如果样地太少,作为斑块复合体所反映的就不是当地的森林群落的特征和动态;如果样地数量太大,既增加了计算量,又掩盖了作为反映森林群落的某些本质特征。样地的数量用差异指数来进行确定,用最小的样地个数保证群落组成的相似性增加,群落组成动态的稳定性增加^[68]。

4.3 陆地生物圈模型

20 世纪 90 年代以来,基于过程的平衡态陆地生物圈模型-BIOME 系列及其动态发展(LPJ-DGVM^[55])已经成为模拟大尺度(全球至区域)的植被地理分布、净第一性生产力和碳平衡以及预测气候变化对陆地生态系统潜在影响的有效工具。这种模型开始逐渐引入植物功能类型的概念,并以此取代生物群区类型作为变量输入模型。

BIOME1 以影响不同植物的功能型分布的生理限定性为基础,预测植被外貌的全球格局^[48]。模型

假设不同的植物型生活在一定的环境中,他们中间存在潜在的优势类型,生物群区是这些优势植物类型的归并. BIOME1 可被用来评价气候模型的性能以及过去、现在和未来气候条件下预测植被和格局和潜在碳储量^[11,46,47]. Sykes 等^[59~61] 基于 BIOME1 模拟了北欧现状和未来主要树种的潜在分布,以及瞬时的森林动态变化. BIOME6000 计划采用 BIOME1 的分类作为描述古气候模拟结果的基础,并尝试重新定义一些新的分类^[41].

BIOME2 通过碳和水通量的生物地球化学计算来获取大尺度的环境对植被结构和物候型自然分布的控制^[23],模型要求高精度、高质量的气候、土壤和植被数据. BIOME2 增强了对生物群区的预测能力,能够模拟许多定量指标,并尝试比较了遥感数据驱动和预测的植物投影盖度(Foliage Projective Cover, FPC)及其季节变化以验证模型.

评价气候变化对自然生态系统影响的诊断模型必须包括生物地理模型和生物地球化学模型,于是在 BIOME1 和 BIOME2 的基础上建立了平衡态陆地生物圈模型 BIOME3^[39]. BIOME3 利用每个植物功能型的最适净第一性生产力(Net Primary Production, NPP)作为竞争性指数,以及近似估计光竞争所驱动的自然干扰和演化之间的动态平衡来模拟植物功能型之间的竞争. BIOME3 模型成功地模拟出了潜在自然植被分布的大尺度格局,与 NPP 测量值的比较以及与遥感驱动的绿度值(Greenness values)为基础的分段吸收光合有效辐射(fractional absorbed photosynthetically active radiation, FPAR)的比较,提供了模型内在逻辑上的进一步检验. 该模型正成为气候和 CO₂ 浓度对生态系统结构和功能影响整合分析的有效工具. 利用 BIOME3 模型和高精度的气候、土壤和植被数据,可以模拟现状气候条件下 10° 经纬网格点上中国植被的潜在分布和净第一性生产力,模拟的潜在植被与潜在自然植被图基本吻合^[40]. 利用英国 Hadley 气候中心的耦合海洋-大气 GCM(包括温室气体和气溶胶)的输出结果驱动模型模拟 21 世纪末期气候和 CO₂ 浓度变化情况下中国植被的响应,结果表明,该模型可成功地应用于区域尺度的模拟.

为了解决 BIOME3 模型中存在的不能明确模拟氮循环和没有从机理上把火和其他自然干扰嵌入到模型中的缺陷,Prentice 教授的研究组发展了第四个版本,即 BIOME4^[22],这是一个交互式的、平衡耦合的生物地理和生物化学模型,增加了对自然火

干扰的考虑,使模型更加完善.

BIOME1 到 BIOME4 的发展均未考虑植被与环境的变化,因而无法模拟植被的瞬时变化与气候的动态影响,全球动态植被模型(Dynamic Global Vegetation Model, DGVM)应运而生. 这种模型在同一个模式框架中联合了机理性的陆地植被动态、碳和水循环,模拟的全球植被格局与遥感观测匹配较好. 该模型可以比较合理地预测出陆地植被在未来十年甚至百年时间的可能变化,较好地模拟过去植被的变化以与孢粉、湖面数据进行比较,因为模式能够考虑到各种全球变化和干扰对陆地生态系统产生的不同影响在时间上的差异,即时滞效应;还能比较准确地预测植物物候变化,特别是叶面积指数的动态;评价模拟地球系统变化的能力,有效地帮助我们评价未来气候变化、土地利用、自然和人为干扰等对潜在自然植被格局和动态的影响^[17].

MAPSS 为一基于过程的模拟全球潜在自然植被分布的生物地理模式,依据我国植被和气候的关系对模式中的某些参数和过程进行了调整^[80]. 将改过后 MAPSS 模拟的当前气候状况下潜在植被类型及叶面积指数的分布与我国植被区划图和多年平均的 NDVI(NOAA/AVHRR)比较,发现结果有了很大的改进. 将大气环流模式 HadCM2 对未来气候变化的预测结果应用于改进后的 MAPSS 对我国植被未来的变化进行了模拟,发现模式对植物水分利用率(water-use-efficiency, WUE)非常敏感.

4.4 非线性动力学模型

正当人类向 21 世纪迈进之时,以非线性理论研究为中心的自然科学领域中正在发生着一次无比深刻的科学革命^[12]. 20 世纪 70 年代出现在非线性科学领域内的混沌学正在科学的舞台上扮演着越来越重要的角色,正如混沌科学的倡导者之一 M. Shlesinger 所说,混沌是 20 世纪物理学上第 3 次最大的革命,它与相对论及量子力学一样冲破了 Newton 力学的教规. 事实上,相对论消除了关于绝对空间与时间的幻想,量子力学消除了关于可控测量过程的 Newton 的梦,而混沌则消除了 Laplace 关于决定论式可预测性的幻想. 以混沌学为主题之一的非线性科学也因此而令人瞩目. 它们横跨于众多的学科间,探索大自然中复杂的非线性问题,从不同的角度来揭示复杂自然现象中的规律性. 张嘉宾^[72]提出的系统森林学、系统林学,从发展的眼光,从系统动态演变的角度,给出了林业研究的新思路,是对传统林学的发展. 他在系统林学中提出的动态系统和静

态系统概念,事实上是对实际复杂森林学系统的概括.动态系统的数学模型中的状态变量应是空间和时间的函数,空间代表位置,不同的位置具有不同的环境条件,而静态系统的数学模型中的状态变量则只是空间的函数,不随时间而变化,因此静态系统便成为动态系统的一类特殊情形和极限状态,是一类稳定的系统^[14].显然可以看出,森林学所涉及到的林业系统、森林生态系统、林产业系统等都属于动态系统工程范畴.而森林演替受干扰的影响从来不是线性的,从根本上去探求这个问题,就需从非线性的角度去考虑.

5 气候变暖对森林演替的影响

20世纪80年代中期出现了全球变化的研究,其中尤其强调了人类活动的重要性,明确指出它对包括气候在内的环境变化的强迫力在十年到百年尺度变化上已和自然界相当或过之.由于人类在社会和经济活动等诸多方面的活动彼此关联,其影响可以散布到地球各子系统^[80].森林对人为活动的反应体现在不同的时空尺度上,人为活动的不同方面通过影响生物的生理、种间相互作用,甚至改变物种的遗传特性,从而影响整个生态系统的种类组成、结构和功能.

土地覆盖和利用的改变对陆地生态系统功能的影响主要体现在生物地球化学循环的变化.无论是土地利用的转变,还是土地覆盖的改变都影响到区域到全球范围内陆地生态系统中碳、氮和其它元素的利用和循环^[17].土壤覆盖和利用的改变所释放的CO₂量占化石燃料利用所造成CO₂释放量的30%左右;同样地,土壤覆盖和利用的改变也影响着其它温室气体的释放.另一方面,土地利用也会影响到区域内的气象和水文条件,从而影响到陆地生态系统的功能.

人类活动对气候的影响,主要表现在人类活动对大气成分的扰动上^[63].观测表明,大气CO₂浓度从工业革命前的280 μmol·mol⁻¹增加到1999年的367 μmol·mol⁻¹,大气甲烷浓度从工业化前的约0.8 μmol·mol⁻¹增加到1998年的1.75 μmol·mol⁻¹;大气氧化亚氮浓度从工业化前的约280 μmol·mol⁻¹增加到1998年约330 μmol·mol⁻¹.这些变化有少部分是人为活动引起的^[29].强有力的证据表明20世纪的增温明显不同于自然强迫的响应,尤其是后50年每10年约0.1℃的增温主要归因于人类的活动^[32].而与此同时,许多地区人为的硫排

放在快速增长,结果导致大气中气溶胶大幅度增加,气溶胶目前的浓度已明显高于工业革命前的水平.高浓度的气溶胶,一方面直接散射和吸收太阳辐射,从而改变地气系统的能量平衡,直接影响气候;另一方面以云凝结核的形式改变云的光学特性和生命期,从而间接影响气候.越来越多的研究表明,随着社会经济的飞速发展,人类活动对地球气候系统的影响越来越大^[53].大气成分浓度的这种变化被认为是气候变化的重要原因.由此引起的气候变化(如气温升高、降水分布改变等)将会对地表植被产生间接和直接的影响^[58].

由于CO₂浓度升高和全球变暖是最为明显和肯定的全球变化,加上在控制植物生长及其生态功能上的重要性,人为活动对陆地生态系统功能影响方面的研究侧重在CO₂浓度增加和温度升高对陆地生态系统所产生的影响.概括起来有几方面的影响:①对初级生产力的影响,大多数生态系统水平CO₂浓度增加试验表明,陆地生态系统的初级生产力在CO₂浓度增加条件下比正常CO₂浓度下高得多;②对凋落物分解的影响,绝大部分的温室试验都发现植物叶中的碳/氮比随CO₂浓度的提高而提高;但高CO₂浓度下调落物在大多数情况下具有和正常CO₂浓度下形成的凋落物相类似的C/N比;③对水分有效性的影响,幼树在CO₂浓度增加条件下降低了气孔传导率,森林生态系统中的成龄植物没有表现出这种反应;④温度升高对植物生长的影响比原先预计的要小得多,这是因为大多数植物对温度的变化有适应范围.但是温度的升高会加快植物的发育,改变水分平衡,促进凋落物的分解,从而加速温室气体的排放.

人为活动导致的氮沉降已超过了自然固氮的总和,其中相当一部分人为氮输入是以大气氮化物沉积的形式进入陆地生态系统,会改变植物组织的化学组成、凋落物的累积和分解以及土壤氮的矿化.大气降氮会增加初级生产力和生物量,也可能会提高叶片含氮量,从而提高了植物受虫害的可能性^[17].

由于不同物种对全球变化的反应有很大的差异,可以预计陆地生态系统的种类组成会随气候变化而发生显著的改变.例如在冻原或高山寒冷地带,气温的升高已经证实能改变群落的物种组成.哥斯达黎加的热带山区,过去二十多年来的气温升高已造成二十多种青蛙和蟾蜍类动物的灭绝以及鸟类和爬行类动物种类的减少.气候变化对生态系统结构的影响体现在多个方面:种类组成的改变会直接导

致生态系统结构的变化;通过改变植物的死亡率以及随后的幼苗生长影响陆地生态系统的结构。

通过对中国历史资料的分析,结合已有研究成果,对我国历史上由于森林的大幅度减少所造成的黄河、长江等流域的洪水和西北地区的气候干旱、沙漠化,进行了系统的分析研究。结果表明,4000年间,由于人口的增长和人为不合理的活动,我国森林覆盖率约由60%下降到10%左右,毁林先是在黄河流域,后来扩展到长江流域等几乎全国所有的林区。黄河、长江上中游地区大规模的森林破坏,导致了中下游地区发生严重而频繁的洪水灾害,而且越到后来就愈加严重^[16]。

尽管温室气体的增温效应及幅度大小具有很大的不确定性,存在许多分歧^[52],然而植物对于气候变化的响应研究仍然成为众多学者关注的热点。近10年来,国内外学者从模型模拟的角度进行了多层次定量研究^[36]。

6 存在的问题和今后发展的方向

目前有关气候变化对森林生态系统影响的预测所采用的气候指标都是年平均的变化,而很少或者根本没有考虑其季节变化和极端气候事件。但是,未来全球气候变暖却可能会使极端高温和寒冷的频度和强度加大以及气候的季节波动更为明显,而极端高温或低温对很多物种来说可能是致命的。很多科学家认为极端气候事件为人类生存环境带来的危害将更加严重;极端灾害的增加将对森林景观造成严重的威胁,然而,现在模型预测的研究却很难对这些极端气候事件作出评估^[37]。

事实上,传统的森林学研究属于静态系统,片面地强调了解,而在很大程度上忽略了综合的效果。森林复杂巨系统属于动态系统,是从动态发展的、多因素影响的非线性动力学角度来分析、研究问题的。研究森林这一开放的复杂巨系统的最终目标就是期望能够在尊重森林自组织作用的前提下,发挥人类的能动作用,努力使得其沿着进展演化的方向走向整体最优,为人类更好的服务^[13]。

在传统的植被分布与气候关系研究中,重点是通过确定气候界限指标划分植被的分布范围,而忽视了分布区内因生态环境要素的梯度变化对植被的影响。植被分布区内热量、水分等重要生态气候因子的梯度变化不仅影响植物物种的生存状况和生产力,还会影响其动力演替过程。

对当前有关气候变化对森林影响模拟预测研究

工作进行了一些论述,虽然现有的模型研究还存在一定的缺陷,但是我们并不能因此而放弃对气候变化有关影响的研究。然而,为了更准确地预测未来气候变化对森林生态系统的影响,在提高对未来气候变化格局预测精度和准确度的同时,必须加强对森林的结构和动态、物质和能量的交换过程、生物地球化学循环及其它有关的生态过程进行详尽的研究。因此,要求我们设计一些样地进行长期的观测,尤其是对不同生态系统类型间过渡区各种变化的研究。而样地的设计应力求做到包括多种空间尺度和类型,以保证其时间上、空间上和气候梯度上的连续性,从而使获取的数据能为模型的设计和尺度的转换提供基本的信息。如20世纪90年代初期国际地圈-生物圈计划(IGBP)开始实施的全球变化与陆地生态系统(GCTE)项目已开始注重在各种尺度上对各生态过程的研究,它们在全球各个气候带上选取典型样带,以保证数据的代表性。此外,在模型设计中,各个参数的选择要尽可能地反映自然界的真实情况。虽然现在各类模型都存在一定的缺陷,但它们也有各自的优点,如何使它们扬长避短,发挥各自的优势,也是当前亟待解决的问题。因此,各类模型的相互结合、相互渗透也是当前更为准确地预测未来气候变化对森林影响的趋势。

参考文献

- 1 Aber JD, Federer CA. 1992. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evaporation and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, **92**:463~474
- 2 Aber JD, Ollinger SV, Federer CA, et al. 1995. Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern US. *Climate Res*, **5**:207~222
- 3 Audrey R. 2003. Simulation of the effect of topography and tree falls on stand dynamics and stand structure of tropical forests. *Ecol Mod*, **167**:287~303
- 4 Botkin DB, Janak JF, Wallis JR. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *J Ecol*, **60**:849~873
- 5 Botkin DB, Janak JF, Wallis JR. 1972. Rational limitations and assumptions in a northeastern forest growth simulator. *IBM J Res Dev*, **16**:101~106
- 6 Bugmann H. 1996. A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology*, **77**:2055~2074
- 7 Cheng G-W(程根伟), Luo J(罗 辑). 2002. Successional features and dynamic simulation of sub-alpine forest in the Gongga Mountain, China. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **22**(7):1049~1056 (in Chinese)
- 8 Daniel M, Manfred Z. 2002. Land use dynamics in the central highlands of Vietnam: A spatial model combining village survey data with satellite imagery interpretation. *Agric Econ*, **27**:333~354
- 9 Deng X-W(邓湘雯), Wen D-Y(文定元), Deng S-W(邓声文). 2003. A preliminary study of the relationship between forest fire and landscape pattern. *Fire Safety Sci* (火灾科学), **12**(4):238~244 (in Chinese)
- 10 Ding S-Y(丁圣彦), Song Y-C(宋永昌). 1998. Declining causes of *Pinus massoniana* in the process of succession of evergreen broad-leaved forest. *Acta Bot Sin* (植物学报), **40**(8):755~760 (in Chi-

- nese)
- 11 Ding S-Y(丁圣彦), Song Y-C(宋永昌). 1999. Study on the synecological characteristics of the early successional stage of an evergreen broadleaved forest on Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province. *Acta Phytocol Sin* (植物生态学报), 23(2): 97~107(in Chinese)
 - 12 Dong J(董军), Dou S(窦 邃). 2001. Studies on the application of chaotic dynamics in forestry engineering. *Sci Silvae Sin* (林业科学), 37(3): 100~106(in Chinese)
 - 13 Dong J(董军), Yao S-Z(姚顺忠), Zhang J-B(张嘉宾), et al. 2003. Analysis on self-organized dynamical characteristics in forest complicated huge systems. *For Eng* (森林工程), 19(3): 9~10(in Chinese)
 - 14 Dong J(董军), Zhang J-B(张嘉宾), Yao S-Z(姚顺忠), et al. 2003. Study on behavior of complicated dynamics in modern forest engineering systems. *For Res Man* (林业资源管理), 2: 37~41(in Chinese)
 - 15 Ehrenfeld J G, Neal S. 2001. Invasive species and the soil: effects on organisms and ecosystem process. *Ecol Appl*, 11(5): 1259~1260
 - 16 Fan B-M(樊宝敏), Dong Y(董 源), Zhang J-C(张钧成), et al. 2003. Effects on flood and drought since the destruction of forest in China: A discussion on hydro-climatic effects of forest. *Sci Silvae Sin* (林业科学), 39(3): 136~142(in Chinese)
 - 17 Fang J-Y(方精云), eds. 2000. *Global Ecology: Climate Change and Ecological Responses*. Beijing: China Higher Education Press, Heidelberg: Springer-Verlag(in Chinese)
 - 18 Fischlin A, Bugmann H, Gyalistras D. 1995. Sensitivity of a forest ecosystem model to climate parameterization schemes. *Environ Poll*, 87: 267~282
 - 19 Guo C-Y(郭传友), Wang Z-S(王中生), Fang Y-M(方发明). 2003. Exotic species invasion and ecological safety. *J Nanjing For Univ* (Nat Sci) (南京林业大学学报·自然科学版), 27(2): 73~78(in Chinese)
 - 20 Han Y-Z(韩有志), Wang Z-Q(王政权). 2002. Spatial heterogeneity and forest regeneration. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 13(5): 615~619(in Chinese)
 - 21 Hao Z-Q(郝占庆), Dai L-M(代力民), He H-S(贺红士), et al. 2001. Potential response of major tree species to climate warming in Changbai Mountain, Northeast China. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 12(5): 653~658(in Chinese)
 - 22 Haxeltine A, Prentice IC. 1996. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochem Cycles*, 10: 693~709
 - 23 Haxeltine A, Prentice IC, Creswell ID. 1996. A coupled carbon and water flux model to predict vegetation structure. *J Veg Sci*, 7: 651~666
 - 24 He H-S, Mlrsdenoff DJ, Crow TR. 1999. Linking an ecosystem model and a landscape model to study forest species response to climate warming. *Ecol Model*, 112: 213~233
 - 25 He SH, Hao ZQ, Larsen DR, et al. 2002. A simulation study of landscape scale forest succession in Northeastern China. *Ecol Model*, 156: 153~166
 - 26 Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, eds. 2000. *The IPCC Special Report on Emission Scenarios(SRES)*. Cambridge: Cambridge University Press. 120
 - 27 Houghton JT, Ding Y, eds. 2001. *Climate Change 2000. The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press. 770pp
 - 28 Hu J-Z(胡建忠), Zhu J-Z(朱金兆), Zhou X-C(周心澄). 2003. Analysis on disturbance effect of vegetation system and the rehabilitation policy. *Sci Soil Water Conser* (中国水土保持科学), 1(1): 70~73(in Chinese)
 - 29 IPCC. 2001. *Climate Change 2001. Scientific Bases*. Cambridge: Cambridge University Press.
 - 30 Jeltsch F, Milton SJ, Dean WRJ, et al. 1998. Modeling the impact of small-scale heterogeneities on tree-grass coexistence in semi-arid savannas. *J Ecol*, 86: 780~793
 - 31 Jeltsch F, Milton SJ, Dean WRJ, et al. 1996. Tree spacing and coexistence in semi-arid savannas. *J Ecol*, 84(4): 583~595
 - 32 Jørgensen SR. 2000. Twenty-five years of ecological modeling by ecological modelling. *Ecol Model*, 126: 95~99
 - 33 Liang J-P(梁建萍), Wang A-M(王爱民), Liang S-F(梁胜发). 2002. Disturbance and forest regeneration. *For Res* (林业科学研究), 15(4): 490~498(in Chinese)
 - 34 Li H-B(李哈尔滨), Wang Z-Q(王政权), Wang Q-C(王庆成). 1988. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 9(6): 651~657(in Chinese)
 - 35 Li H, Reynolds JF. 1995. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 73(2): 280~284
 - 36 Li S-C(李双成). 2001. A review on simulating plant response to climatic changes. *Progr Geogr* (地理科学进展), 20(3): 217~226(in Chinese)
 - 37 Liu G-H(刘国华), Fu B-J(傅伯杰). 2001. Effects of global climate change on forest ecosystems. *J Nat Resour* (自然资源学报), 16(1): 71~78(in Chinese)
 - 38 Li X-D(李兴东), Song Y-C(宋永昌). 1993. The Markov process modeling of secondary succession in broadleaved evergreen forest in the eastern part of Zhejiang Province, China. *Acta Phytocol Geobot Sin* (植物生态与地植物学学报), 17(4): 345~351(in Chinese)
 - 39 Ni J(倪 健). 2002. BIOME models: main principles and applications. *Acta Phytocol Sin* (植物生态学报), 26(4): 481~488(in Chinese)
 - 40 Ni J, Sykes MT, Prentice IC, et al. 2000. Modelling the vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3. *Global Ecol Biogeogr*, 9: 463~479
 - 41 Ni J(倪 健). 2000. BIOME6000: Advances of palaeobiome modeling and reconstruction. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 11(3): 465~471(in Chinese)
 - 42 Parton WJ, Schimel DS, Cole CV, et al. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Am J Soil Sci Soc*, 51: 1173~1179
 - 43 Parton WJ, Stewart WB, Cole CV. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, 5: 109~131
 - 44 Pastor J, Post WM. 1985. Development of a Linked Forest Productivity-Soil Process Model. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.
 - 45 Peng S-L(彭少麟). 1994. Studies on succession of plant community. *Ecol Sci* (生态科学), 2: 117~119(in Chinese)
 - 46 Prentice IC, Sykes MT, Lautenschlager M, et al. 1993. Modelling global vegetation patterns and terrestrial carbon storage at the last glacial maximum. *Global Ecol Biogeogr Letters*, 3: 67~76
 - 47 Prentice IC, Sykes MT. 1995. Vegetation geography and global carbon storage changes. In: Woodwell GM & Mackenzie FT eds. *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Speed the Warming?* New York: Oxford University Press.
 - 48 Prentice IC, Cramer W, Harrison SP, et al. 1992. Global biome model: Predicting global vegetation patterns from plant physiology and dominance, soil properties and climate. *J Biogeogr*, 19: 117~134
 - 49 Running SW, Coughlan JC. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecol Model*, 42: 125~154
 - 50 Running SW, Gower ST. 1991. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiol*, 9: 147~160
 - 51 Sang W-G(桑卫国), Ma K-P(马克平), Chen L-Z(陈灵芝) et al. 1999. A brief review on forest dynamics models. *Chin Bul Bot* (植物学通报), 16(3): 193~200(in Chinese)
 - 52 Shackley S, et al. 1998. Uncertainty, complexity and concepts of good science in climate change modeling: Are GCMs the best tools? *Climatic Change*, 38: 159~205
 - 53 Shi G-Y(石广玉), Wang X-H(王喜红), Zhang L-S(张立盛), et al. 2002. Impact of human activities on climate II. Impact on climate variability over East Asia and China. *Climatic Environ Res* (气候与环境研究), 7(2): 255~266(in Chinese)
 - 54 Shugart HH. 1984. *A Theory of Forest Dynamics*. New York: Springer-

- Valley.
- 55 Sitch S, IC Prentice, Smith B, *et al.* 2000. LPJ: A coupled model of vegetation dynamics and the terrestrial carbon cycle. In: Sitch S ed. *The Role of Vegetation Dynamics in the Control of Atmospheric CO₂ Content*. Ph. D. Thesis. University of Lund, Sweden.
- 56 Solomn AM. 1986. Transient response of forest to CO₂ induced climate change: Simulation Modeling experiments in eastern North America. *Oecologia*, **68**:567~579
- 57 Solomn AM. 1986. Transient response of terrestrial C storage to climate change: Modeling C dynamics at varying temporal and spatial scales. *Water Air Soil Pollu*, **64**:307~326
- 58 Sun R(孙睿), Zhu Q-J(朱启疆). 2001. Effects of climate change of terrestrial net primary production in China. *J Remote Sensing(遥感学报)*, **5**(1):58~61(in Chinese)
- 59 Sykes MT, Prentice IC, Cramer W. 1996. A bioclimatic model for the potential distributions of north European tree species under present and future climates. *J Biogeogr*, **23**:203~233
- 60 Sykes MT. 1996. The biogeographic consequences of forecast changes in the global environment: individual species potential range changes. *NA-TO ASI Series*, **147**:427~440
- 61 Sykes MT, Prentice IC. 1996. Climate change, tree species distributions and forest dynamics: A case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of northern Europe. *Climatic Change*, **34**:161~171
- 62 Urban DL, Harmon ME, Halpen CB. 1993. Potential response of Pacific North Western forest to climate change, effects of stand age and initial composition. *Climate Change*, **23**:247~256
- 63 Wang M-X(王明星), Yang X(杨昕). 2002. Study on the effect of human activities on climate change I. Green house gases and aerosols. *Climatic Environ Res(气候与环境研究)*, **7**(2):247~254(in Chinese)
- 64 Wu Z-F(吴正方). 2003. Assessment of eco-climatic suitability and climate change impacts of /on broad-leaved Korean pine forest in Northeast China. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **14**(5):771~775(in Chinese)
- 65 Wu Z-F(吴正方), Deng H-P(邓慧平). 1996. Dynamic responses of *Pinus koraiensis* deciduous mixed forests to global climate change in Northeast China. *Acta Geogr Sin(地理学报)*, **51**(supp.):81~91(in Chinese)
- 66 Wu Z-F(吴正方). 2002. Eco-climatic study on vegetation transitional zones in Northeast China. *Sci Geogr Sin(地理科学)*, **22**(2):219~225(in Chinese)
- 67 Yan X-D(延晓冬). 2001. Several basic issues of forest gap model I. Effects of simulated plot area. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **12**(1):17~22(in Chinese)
- 68 Yan X-D(延晓冬), Yu Z-L(于振良). 2000. A study on several basic issues of forest gap model II. Effects of simulated plot number. *Chin J Ecol(生态学杂志)*, **19**(5):1~6(in Chinese)
- 69 Yan X-D(延晓冬), Zhao S-D(赵士洞), Yu Z-L(于振良). 2000. Modeling growth and succession of Northeast China forest and its applications in global change studies. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, **24**(1):1~8(in Chinese)
- 70 Yu S-Q(余树全). 2003. The quantitative study on the second forest succession in Chun' an Country, Zhejiang Province. *Sci Silvae Sin(林业科学)*, **39**(1):17~22(in Chinese)
- 71 Zang R-G(臧润国), Xu H-C(徐化成). 1998. Advances in forest GAP disturbance research. *Sci Silvae Sin(林业科学)*, **34**(1):90~98(in Chinese)
- 72 Zhang J-B(张嘉宾). 2002. *Systematic Forestry*. Kunming: Yunnan Education Press. 1~362(in Chinese)
- 73 Zhou X-K(周晓峰), Wang X-C(王晓春), Han S-J(韩士杰), *et al.* 2002. The effect of global climate change on the dynamics of *Betula ermanii*-Tundra ecotone in the Changbai Mountains. *Earth Sci Frontiers(地学前缘)*, **9**(1):227~231(in Chinese)
- 74 Zhang XH, Shi GY, Liu H. 2000. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing/New York: Science Press. 252
- 75 Zhang M(张敏), Hu H-Q(胡海清), Ma H-W(马鸿伟). 2002. Effect of forest fire on soil structure. *J Natural Disasters(自然灾害学报)*, **11**(2):138~143(in Chinese)
- 76 Zhang P, Shao G, Le Master DC, *et al.* 2000. China's forest policy for the 21st century. *Science*, **288**:2135~2136
- 77 Zhao Z-C(赵宗慈), Ding Y-H(丁一汇), Xu Y(徐影), *et al.* 2003. Detection and prediction of climate change for the 20th and 21st century due to human activity in Northwest China. *Climatic Environ Res(气候与环境研究)*, **8**(1):26~34(in Chinese)
- 78 Zhao ZC, Li XD. 1997. Impacts of global warming on climate change over East Asia as simulated by 15 GCMs. *World Resources Rev*, **10**:17~21
- 79 Zhao ZC, Luo Y, Gao XJ. 2000. GCM studies on anthropogenic climate change in China. *Acta Meteorol Sin*, **14**:247~256
- 80 Zhao M-S(赵茂盛), Ronald PN, Yan X-D(延晓冬), *et al.* 2002. Modelling the vegetation of China under changing climate. *Acta Geogr Sin(地理学报)*, **57**(1):28~38(in Chinese)

作者简介 王纪军,男,1970年生,博士生,高级工程师,主要从事气候变化和气候应用方面研究,发表论文5篇. E-mail: wjj-wang@hotmail.com
