

全球气候变化对中国森林生态系统的影响

王 叶 延晓冬

中国科学院大气物理研究所-东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029

摘 要 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引起人们越来越多的重视。作为全球陆地生态系统一个重要组分, 中国的森林生态系统对未来全球气候变化的响应更是人们关注的重点。作者系统地总结了全球气候变化对中国森林生态系统分布、生态系统生产力、森林树种以及森林土壤的影响, 指出了现阶段该领域研究中存在的一些问题, 并对今后需要加强的一些核心问题与研究重点作了展望。

关键词 全球气候变化 中国森林生态系统 影响 响应 反馈

文章编号 1006-9895 (2006) 05-1009-10

中图分类号 S718

文献标识码 A

The Response of the Forest Ecosystem in China to Global Climate Change

WANG Ye and YAN Xiao-Dong

Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract More and more attentions have been paid to the human-induced greenhouse effects and their impacts on global climate and eco-environment changes. The global climate changes affect the forest ecosystems, which inversely give a feedback to the global climate changes in a certain extent. As an important part of the global terrestrial ecosystem, the responses and feedbacks of the forest ecosystem in China to the future global climate changes have become very attractive issues. This paper summarizes systemically the impacts of the global climate change on forest distribution, forest productivity, forest species composition and forest soil, and also points out the main problems in the present researches, such as taking into account the extreme climate events rarely, ignoring the interaction between different forest species, considering not enough about the mutual effects and feedbacks between the global climate changes and the forest ecosystem in China, understanding superficially the mechanism on the responses of the forest succession to the global climate changes, and employing the immature model and insufficient data. This paper has applied systemic and exhaustive analyses on the present researches and problems of the impacts of the global climate changes on the forest ecosystem in China, and given some reasonable proposals. In the end, the core issues and key contents about future researches on the forest ecosystems are advanced.

Key words global climate change, forest ecosystems, effect, response, feedback

1 引言

森林生态系统是主要地球陆地生态系统之一, 也是陆地上最为复杂的生态系统, 它具有很高的生

物生产力和生物量以及丰富的生物多样性。虽然森林面积仅占陆地面积的 26%, 但是其碳储量占整个陆地植被碳储量的 80% 以上, 而且森林每年的碳固定量约占陆地生物碳固定量的 $2/3$ ^[1]。森林生态系

统不仅向人类提供木材及淀粉、蛋白质等众多副产品,而且具有涵养水源、减轻自然灾害、调节气候、孕育和保存生物多样性等生态功能,同时还具有医疗保健、陶冶情操、旅游休憩等社会功能。所以,森林在维系地球生命系统的平衡中具有不可替代的作用。第六次全国森林资源清查(1991~2003年)结果显示,中国森林面积达到17500万公顷,森林覆盖率为18.21%。中国森林资源分布不均匀,主要分布在东北和西南,林龄结构以幼龄林、中龄林和人工林为主。

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第三次评估报告中指出,在全球变暖的大背景下,中国气候也发生了明显变化,主要表现在:近百年来,中国气温上升了 $0.4^{\circ}\text{C}\sim 0.5^{\circ}\text{C}$;从地域分布来看,中国气候变暖最明显的地区在西北、华北和东北地区;从季节分布看,中国冬季增温最明显^[2]。在假定大气二氧化碳浓度从1990年起渐进增至2100年,并考虑气溶胶浓度变化的情景下,不同全球气候模式对中国气候变化的情景预测总趋势一致表现为,中国将持续不断地变暖,降水也将增加,中国的极端气候事件呈增加趋势,而极端高温事件应是增加的;干旱和洪涝灾害将增加^[3]。

由于森林与气候之间存在着密切的关系,气候的变化将不可避免对森林产生一定的影响。随着全球气候的变化,中国未来主要森林分布可能发生明显变化,除云南松和红松分布面积有所增加(分别约12%和3%)外,其他树种的面积均有所减少,减少幅度为2%~57%,草原和荒漠分布范围将向中国西部和高海拔地区扩展^[4]。同时,气候变化引起的生态系统变化还将使得生物多样性减少,许多珍贵的森林树种丧失^[5]。大气 CO_2 浓度上升及由此而引起的气候变化将还改变森林的生产力和生物量^[6~12]。随着全球气候变化,中国植物物候也发生显著变化,冬季和早春温度的升高使春季提前到来,使它们提早开花放叶,从而导致森林生态系统的结构和物种组成的改变。此外,气候变化还影响着森林的土壤,它通过对土壤碳库、氮库、甲烷排放以及土壤呼吸的影响进而影响着整个生物地球化学循环过程。因此探索森林生态系统对气候变化的响应,不仅具有科学意义,而且还将为制定减缓与适应气候变化的措施提供科学依据。

2 全球气候变化对中国森林生态系统的影响

全球30%的陆地是森林^[13]。由于森林对气候变化的适应性比较迟缓^[13],因而可能是最易受到气候变化不利影响的生态系统,气候变化对森林的影响主要表现在改变了森林生态系统的分布、生产力、树种组成以及森林土壤的分布与性质。

2.1 全球气候变化对中国森林生态系统分布的影响

每类生态系统中都包含着众多的物种,虽然这些物种生长在同一气候条件下,但对气候变化的适应能力却不同。在剧烈的气候变化条件下,某些物种可能会因完全不能适应而死亡,另一些则仍然能够生存,变化后的条件还有可能更适合于区域物种的入侵,从而导致森林生态系统的结构发生变化^[13]。关于全球气候变化影响森林生态系统的研究,按方法不同主要分为:植被-气候分类研究和森林生长演替的模拟研究。

2.1.1 植被-气候分类研究

气候是决定森林类型或物种分布的主要因素。植被物种分布规律与气候之间的关系早就被人们所认知,并由此提出一系列气候-植被分类系统,其中典型的有 Holdridge 生命地带系统^[13], BIOME 模型^[14~16]以及赵茂盛等改进的 MAPSS 模型^[17, 18]等。

Holdridge 生命地带系统反映的是潜在植被类型与气候之间的关系。该方案认为地球表面的植被类型及其分布主要取决于三个要素:年降水量、年生物温度与湿度。该方法可根据某一地区的气候指标值来估测其植被类型,并用以表示生物群区的分布格局。特别是在现今全球气候变化对生态系统影响的评价研究中, Holdridge 生命地带系统被用来测试陆地生态系统分布对模拟的气候变化的敏感程度,以及全球气候变化后的生命地带图,可显示 CO_2 浓度倍增条件下的植被变化格局^[13]。针对不同的研究目的,还可对其进行局部调整,使其更加符合实际。陈育峰^[19]以地理信息系统为支持手段,研究了在目前气候条件下中国 Holdridge 生命地带空间分布的基本格局;然后采用 GCMs 模拟的 $2\times\text{CO}_2$ 情景下的气温和降水作为未来气候条件,揭示了在此情景下中国 Holdridge 生命地带在空间分布

格局及面积等方面的变化。考虑到 Holdridge 生命地带分类系统发展于中美洲的热带地区, 张新时等^[20]对中国的亚热带地区做了局部调整, 他们通过计算表明, 该系统的可能蒸散率(PER)指标与 CHIKUGO 模型的辐射干燥度(RDI)显著相关, 因而可以采用便于取得资料并易于计算的 PER 来进行潜在净初级生产力(NPP)的估算。经验证 Holdridge 生命地带分类系统可用于全球变化条件下中国各植被地带或生态系统主要类型及其 NPP 变化的预测^[20]。

BIOME^[14~16]模型主要描述了植被的结构特征, 如叶面积指数等。不足的是, 这类模型关于植被类型与气候之间相互关系的描述是静态的, 它没有反映植被结构与功能的综合作用。BIOME 模型从植物生理特征和优势度、土壤特性及气候来预测全球植被分布格局, 共产生了 17 类生物群区。该模型可用于评价未来气候变化对潜在植被的格局、陆地表面特征和陆地碳储量的影响, 并可用来分析过去气候变化对这些变量的影响^[13]。具体就中国来说, 它可模拟中国植被的潜在分布和 NPP, 还可模拟中国年度总 NPP 的分布格局和数量特征及不同生物群区类型 NPP 的月动态, 利用其模拟的生物群区地理分布及其面积, 并根据植被和土壤的碳密度, 还可分析中国陆地生态系统的碳储量特征及其对气候变化和 CO₂ 浓度增加的响应。Ni 等^[16]利用 BIOME 模型模拟了当前气候条件下中国植被的潜在分布和 NPP, 根据 ΔV 的数值化图像比较结果表明, 除了北方落叶林/疏林、温带针叶林、干湿稀疏草原、高草草原、干旱疏林/灌丛和冰雪/极地荒漠之外, 其他类型潜在植被的模拟结果与潜在自然植被图^[16]基本上吻合 ($\Delta V=0.23$)。

Neilson 基于联系植被和水分平衡的过程, 在区域、洲际和全球尺度上建立了一个生物地理模型, 即绘制大气-植被-土壤系统 (MAPSS)^[17]。该模型考虑了热量和水分限制。它可用来预测未来气候变化下的植被分布格局、土壤湿度和径流格局, 还可根据所研究区域及目的对其进行适当的调整。赵茂盛等^[18]依据中国植被和气候的关系对 MAPSS 中的某些参数和过程进行了调整, 并将其模拟的当前气候状况下植被类型及叶面积指数的分布与中国植被区划图和多年平均的 NDVI 进行比较, 发现结果有了明显的改进。

2.1.2 森林生长演替的模拟研究

为将植被的结构与功能动态地反映于气候-植被分类之中, 中国也开展了生态系统的动态模拟研究。延晓冬等^[21]通过对长白山森林生态系统的研究, 针对林窗模型难以在区域尺度应用的不足, 强调考虑树种的生命史, 基于 Zelig 模型^[22]建立了长白山森林生态系统林窗模型——NEWCOP^[22]。该模型自建成后已先后在大兴安岭、小兴安岭和长白山地区得到验证和应用^[23]。该模型不仅可以模拟目前气候条件下东北地区森林的水平分布和垂直分布, 而且也可再现森林的更新、演替和生产力。延晓冬^[23]以中国东北长白山阔叶红松林为例, 应用 NEWCOP 探索了不同模拟样地面积对林窗模型输出结果的影响, 结果表明, 模拟样地面积大小变化可影响模拟出的森林群落的树种组成和模拟样地的林窗出现周期, 通过应用这一特点确定了阔叶红松林的林窗面积为 400~800 m²。除 NEWCOP 之外, 描述森林生长演替的模型还有 BKPF 林窗模型, 该模型可用于研究森林对气候变化的潜在反应^[24]。陈雄文等^[24]运用 BKPF 模拟了伊春地区红松阔叶混交林采伐对气候变化的潜在反应。研究表明: 气候变化有利于采伐迹地阔叶红松林恢复。此外, 邓惠平等^[25]还应用林窗模型模拟了小兴安岭阔叶红松林对未来气候变化的动态响应过程。结果表明, 在美国高达空间研究实验室和美国俄勒冈州立大学 GCMs 预测的 CO₂ 倍增未来气候情景下, 与本底生物量(当前气候条件下)相比, 阔叶红松林生物量逐渐升高, 目前云冷杉阔叶红松林将逐渐向枫桦、紫椴和裂叶榆阔叶红松林演变; 但在普林斯顿大学地球流体动力学实验室和英国气象局 GCMs 预测的未来情景下, 由于较大幅度的增温, 云冷杉红松林将向以蒙古栎、紫椴和裂叶榆为主要树种的阔叶林演变, 未来增温速率决定了阔叶红松林未来的演替方向。

2.2 气候变化对森林生态系统生产力的影响

森林生产力是衡量树木生长状况和生态系统功能的主要指标之一。气候变化强烈地影响着森林生产力。森林生产力分布格局主要取决于气候环境的水热条件^[26]。森林生产力是研究中国森林生态系统对全球气候变化响应很重要的一方面。目前国内关于森林生产力的研究很多。方精云^[27]对中国的森林生产力进行了归纳和总结, 对其与全球气候变

化的关系作了初步分析。结果表明,中国森林的总生物量为 $4.0 \sim 7.1 \text{ Pg}$ ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$), 总生物生产力(不包括经济林和竹林)为 $0.4 \sim 0.6 \text{ Pg/a}$, CO_2 浓度倍增后,中国森林生产力将有所增加,增加的幅度因地区不同而异,变化于 $12\% \sim 35\%$ 之间。 $\text{Ni}^{[28]}$ 计算的总碳储量为 154.99 Gt , 在目前气候条件下, CO_2 浓度为 340×10^{-6} 时,其结果与 BI-OME3 生物量预测的结果具有很大的相似性。此外,刘世荣等^[29] 构建了中国森林气候生产力模型,在此基础上研究了气候变化对中国森林生产力的影响。结果表明:所构建的模型基本反映了中国森林现实生产力的地理分布格局;中国森林生产力的分布格局主要取决于气候环境中的水热条件;气候变化并没有改变中国森林第一性生产力的地理分布格局,即从东南向西北森林生产力递减趋势不变,但不同地域的森林生产力有不同程度的增加。气候变化后中国森林生产力变化率的地理分布格局与森林第一性生产力的地理分布格局相反,呈现从东南向西北递增的趋势。

2.3 气候变化对中国森林树种物候的影响

物候是反映气候变化对植物发育阶段影响的综合性生物指标。随着全球气候的变化,植物的物候也将发生显著变化。冬季和早春温度的升高使春季提前到来,从而影响到植物的物候,使它们提早开花放叶,这将对那些在早春完成其生活史的林下植物产生不利的影响,甚至有可能使其无法完成生命周期而导致灭亡,从而导致森林生态系统的结构和物种组成的改变。气温升高也将导致地面蒸散作用增加,使土壤含水量减少,植物在其生长季节中水分严重亏损,从而使其生长受到抑制,甚至出现落叶及顶梢枯死等现象而导致衰亡。但是对于一些耐旱能力强的物种来说,这种变化将会使它们在物种间竞争处于有利的地位,从而得以大量的繁殖和入侵。总之,全球气候变化影响着植物物候的变化。郑景云等^[30] 分析了近 40 年我国木本植物物候变化及其对气候变化的响应关系,及当前气候增暖背景下物候期地理分布规律变化对气候变化的响应关系。结果表明:温度上升,我国的木本植物春季物候期提前,20 世纪 80 年代以后,东北、华北及长江下游等地区的物候期提前,西南东部,长江中游等地区的物候期推迟,同时物候期随纬度变化的幅度减小。张福春^[31] 论证了气温是影响中国木本植

物物候的主要因子,又利用其建立的统计模式分析计算了未来全球年平均气温升高 $0.5 \sim 2.0^\circ\text{C}$ 和未来大气中 CO_2 浓度倍增而增暖情况下,我国主要木本植物物候期的大致变幅。

2.4 气候变化对森林土壤碳氮循环过程的影响

气候变化影响着森林土壤碳氮循环过程,其中温度和降雨等是直接影响土壤碳氮循环过程(特别是土壤 C 库和 N 库及 C、N 微量气体排放)的直接或间接的关键因子。具体来说,气候变化对森林土壤碳氮循环过程的影响主要表现在其对森林土壤碳库和氮库、土壤呼吸以及土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响方面。

2.4.1 气候变化对森林土壤碳库和氮库的影响

森林土壤中的碳占全球土壤有机碳的 73%,是森林生态系统中最大的碳库,它每年释放 $68 \sim 75 \text{ Pg}$ 碳到大气中^[32]。中国土壤有机碳库是陆地碳库的主要组成部分。气候变化在两个方面影响土壤碳蓄积过程:一是温度、降水变化影响植物生产力和凋落速率;二是气候变化影响微生物活性从而改变地表凋落物和土壤有机碳分解速率^[33]。周涛等^[34] 的研究表明:碳储量与年平均温度(T)、年降水量(P)之间的相关性在不同的温度带下具有很大的差异,在 $T \leq 10^\circ\text{C}$ 的地区,土壤有机碳储量与温度的负相关性最强;在 $10^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$ 的地区,受与降水正相关的影响,土壤有机碳储量与年平均温度表现出一种正相关性;而在 $T > 20^\circ\text{C}$ 的地区,土壤有机碳储量与温度和降水的相关性都很差。全球气候变暖、平均降水量增加,会使土壤微生物和土壤动物活动加剧,土壤呼吸加快,这就必然导致土壤碳库释放 CO_2 速度的加快^[35]。

森林土壤也是森林生态系统中一大重要的氮库。在无干扰的生态系统中,氮的输入和输出是平衡和稳定的。但在气候变化的情况下,植被覆盖、枯枝落叶输入量、土壤条件都会受到影响,从而影响到土壤中有机的分解和稳定,影响氮的动态^[36, 37]。张金屯^[38] 关于全球气候变化对氮循环影响的研究表明,随着全球气候的变化,土壤有机氮库储量将减少,但在不同的生态系统中,其变化是不平衡的。另外,气候变化可能影响土壤微生物和土壤动物的活性、数量以及分布等,从而影响到土壤生物多样性,而生物多样性的变化又影响到土壤碳和氮的变化^[39]。荣兴民等^[40] 的研究表明,全球变化

也可以通过影响土壤温度、土壤水分及土壤微生物及酶的活性,从而影响到土壤碳氮过程。

2.4.2 气候变化对土壤呼吸的影响

土壤呼吸作用是指未受扰动的土壤中产生 CO_2 的所有代谢作用,它的变化将显著地影响大气中 CO_2 的浓度。控制土壤呼吸作用将有效地缓和大气中 CO_2 浓度的升高和全球变暖,反过来,气候变化也会对土壤呼吸造成重要影响,尤其是大气 CO_2 浓度升高本身将使土壤有机质增加,但其中大部分又通过微生物分解作用返回到大气圈。只有在分解作用受温度限制的地区碳才能被截留和得以聚集,使土壤成为 CO_2 的汇。蒋延玲等^[41]的研究表明,温度升高可以提高土壤呼吸作用强度,地下 5 cm 的土壤温度比气温更能准确地反映土壤呼吸作用的动态变化。李玉宁等^[42]的研究表明全球温度升高使分解作用受温度限制的地区(比如北方森林和苔原)减少,扩大了全球土壤呼吸的范围,加快了 CO_2 从土壤中的释放,使土壤日益成为 CO_2 进入大气的源。大气 CO_2 和全球温度升高的联合作用使土壤呼吸加剧,加快了碳从土壤中的释放。由于全球变暖将导致更多的 CO_2 释放到大气中,因此土壤呼吸与全球变暖是一个正的反馈关系^[43, 44]。刘绍辉等^[45]关于全球变化与土壤呼吸关系的研究表明,温度与土壤呼吸速率之间有相当明显的对应关系,土壤呼吸速率与纬度关系形成指数式变化,这也是高纬度地区土壤有机碳得以积累的原因。土壤呼吸速率与同纬度温度之间有一定的相关性,也就是说,年土壤呼吸速率的差异,从全球范围上看,实质上主要是各地温度的变化造成的,那么,如果全球气温上升的话,至少可以肯定,森林土壤的 CO_2 通量将会增加。

2.4.3 气候变化对土壤甲烷排放和氧化亚氮排放的影响

CH_4 和 N_2O 是与全球气候变化密切相关的两种主要温室气体。据报道,全球大约有 40% 的甲烷来自土壤^[46],土壤是甲烷重要的源和汇。王明星等^[45]通过对中国 CH_4 排放量的估算得出,中国的 CH_4 排放源主要是稻田 CH_4 的排放,约占全国 CH_4 总排放量的一半。影响土壤甲烷排放的因素很多,如植物生长和全球气候变化等。张金屯^[38]的研究表明,在气候变暖的情况下,全球土壤甲烷的产生可能增加。由于全球温度升高,各种作物的

北界要向北发展,稻田等作物面积要增加,甲烷的释放量将会加快^[47]。

土壤中的 N_2O 形成于反硝化过程中^[48]。森林土壤作为 N_2O 的源或汇,对大气 N_2O 浓度有重要影响,不同地区、不同季节,森林土壤对 N_2O 排放通量有变化。在气候变化的情况下,植被覆盖、枯枝落叶输入量、土壤条件等环境因子都会受到影响,从而影响土壤中有机质的分解和稳定,这将会影响 N_2O 的动态变化。在气候变化的情况下,全球土壤有机氮库储量也将减少,这同土壤碳动态变化相一致。但在不同的生态系统中,其变化是不平衡的。这同样是受到有机质输入和输出量变化的影响^[38]。

3 森林生态系统对气候的反馈

全球气候变化影响着森林生态系统,然而森林生态系统对气候也产生一定的反馈作用。其反馈作用主要表现在,植被对于全球气候变化有减缓作用,植被的存在将使一地的径流量减少,增加了保水能力,对于一地降水量无明显影响,而对于气候变化的作用是增温还是降温须视具体地点的情况而定^[49]。

3.1 森林破坏对中国气候的影响

森林等土地覆被是地球陆地表面的“保护层”,具有减缓水土流失、调节气候等作用。但由于人类进行开荒种植、砍伐林木、建设城镇等活动,天然的土地覆被不断改变。这种土地利用和土地覆盖的变化,将会对气候产生重要的影响。土地利用变化和土地覆盖变化影响碳通量和温室气体排放,进而直接改变大气成分和辐射强迫特性。土地利用变化和土地覆盖变化改变了土地表面特性从而间接地改变气候过程。地面覆盖的调整和转变也会改变生态系统的特性和它们对气候变化的脆弱性。Feddemma 等^[50]进行的模拟表明,土地利用和土地覆盖的变化影响了 Hadley 环流和季风循环,进而影响着高纬度的气候变化,下个世纪土地利用和土地覆盖的变化将会是影响气候变化的一个非常重要的因素。Roger 和 Pielke^[51]也指出土地利用和土地覆盖变化改变了地球表面热通量和水汽通量,这种通量的改变将会影响到大气边界层,为雷暴天气的发生积累能量。雷暴空间模式的改变会造成对流层热量的区域改变,这将直接改变大气和海洋的环流形式,而

大部分雷暴发生在陆地上空,所以土地利用和土地覆盖的变化对气候改变有很重要的影响。Chapin III 等^[52]的研究结果表明,夏季反照率的陆地变化本质上有助于造成近期高纬度变暖的趋势。符淙斌和袁惠玲^[53]利用区域环境系统集成模式(RIEMS)模拟结果表明,大范围恢复自然植被对东亚夏季气候的影响是明显的,它不仅可以改变近地面气候状况,而且可以影响季风环流强度的变化,根据当地的气候、水文和土壤等自然条件来实行退耕还林(草),恢复自然植被有可能产生显著的气候和环境效应。

3.2 中国植树造林对碳收支和气候的可能影响

植树造林有助于治理沙化耕地,控制水土流失,防风固沙,可以大大改善生态环境,减轻洪涝灾害。森林可以防止碳释放到大气中,植树造林可以增加现有碳库的容积,将大气中的碳更多地吸收储存起来,用森林生物量作为能源替代化石燃料,能够减少温室气体的排放。Houghton 等^[54]的研究结果表明,植树造林的净碳通量可以部分抵消化石燃料排放的碳通量。高志强等^[55]研究结果显示,土地利用变化使生态系统碳吸收能力有所加强,但尚不足扭转由气候变化导致的下降趋势。土地利用变化对整个区域生产力和碳循环的影响比较小,但在它所发生地区的影响大于气候变化的影响。此外,House 等^[56]研究了未来植树造林或森林砍伐对大气 CO₂ 的影响。研究结果表明,森林砍伐可能会使大气 CO₂ 浓度增加,相反,在未来 50 年,最大程度的植树造林活动可能导致大气 CO₂ 减少 $15 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 。

总之,森林在影响环境和气候方面有重要的作用。森林的破坏可能导致旱涝灾害、水源缺乏、土地沙化等生态危机,减少森林破坏可以非常有效地减少二氧化碳的排放,增加对大气二氧化碳的吸收。大范围的森林砍伐能够导致降水的巨大变化,使土地荒漠化。因此,为了保护环境,改善气候条件,植树造林是必需的。

4 存在的问题及建议

随着全球气候的变化,中国森林生态系统的分布、生物生产力、树种组成与结构以及森林土壤性质都发生了显著的变化。但是需要指出的是,目前有关全球气候变化对中国森林生态系统影响的研究

还存在很多不确定性,其原因主要体现在以下几点:

(1) 缺乏对极端气候事件的考虑。当前关于全球气候变化对中国森林生态系统影响的研究所采用的气候指标大都是年平均变化,而很少考虑其季节变化和极端气候事件。但是,未来全球气候变化却可能使极端气候事件的频度和强度加大,而极端气候事件对很多物种来说可能是致命的。另外,气候变化可能使极端灾害的发生频率和强度增加,例如,夏季的高温和干旱条件为火灾的发生提供了有利条件;海温的升高增加了飓风和热带风暴发生的可能性。这些极端气候事件将为人类生存环境带来更加严重的危害。极端灾害的增加将对森林景观造成严重的威胁。火灾和虫灾的频繁发生将对温带森林景观的演替和发展造成严重的干扰和破坏;而对于热带雨林来说破坏力巨大的飓风和热带风暴,它们对雨林生态系统结构的改变往往起着决定性作用。然而,现有模型预测的研究却很难对这些极端气候事件做出评估^[57]。

(2) 忽略了不同物种之间的相互作用。自然界不同物种都是互相影响互相依存的,每个物种有其独自的生态位。但是物种的生态位并非一成不变。由于每个物种对气候变化的反应不同,当一个物种暴露在新的气候条件下,往往可能改变其原有的竞争组合,而与其他物种形成新的竞争关系。因此随着气候的变化,实际生态位也将随着不同物种竞争组合的变化而发生变化。而生态系统的演替和发展正是这种不同物种间相互竞争作用的结果。由此可见,物种间的竞争在生态过程中起着重要的作用。但是现有大部分气候变化模拟的预测却认为:只要某地条件没有限制,那么相关的树木就可以在该地分布。这些预测往往缺乏对物种竞争的了解。因此,它们很难真实地反映未来树木和森林的分布状况^[57]。

(3) 没有考虑全球气候变化对森林生态系统的影响及生态系统对全球气候变化的响应。森林与气候之间通过陆地表面与大气间的物质和能量的相互交换而互为影响。气候变化对森林的影响是多方面的,包括对森林生态系统的分布、生产力、森林的物种组成和结构以及森林的生物地球化学循环等,而森林的这些变化可能对气候产生一定的反馈作用。首先,森林树种结构和分布的变化将改变地表

原有的反射率和全球的物质(包括水、碳和氮等)循环模式。所有这些将对气候的变化产生一定的影响,从而进一步影响到森林的结构和功能。其次,森林碳循环的改变,可能使森林成为大气中 CO_2 的源或汇,造成大气中 CO_2 浓度的升高或降低,从而进一步加强或削弱全球变暖趋势。所以森林与气候间的相互作用是非常复杂的。而现在有关的模型预测研究中为了避免这种复杂的关系,往往很少考虑到气候变化所引起的森林变化对气候的反馈作用^[57]。

(4) 缺乏森林生态系统过程对全球气候变化响应机制更深入的认识。植被生态系统的净碳通量是单位时间通过光合吸收的总碳量与通过呼吸失去的碳量之差。温度对光合和呼吸的即时、短期和直接的影响已被相对深入的了解,并被目前大部分所谓的经验预测模型所采用。但越来越多的实验表明,不同植物种、功能群或同一植物在不同生源环境下对温度升高表现出不同的适应模式。在生态系统水平光合和呼吸两个组分均涉及一系列化学、生理和物理过程,并通过系统的物流、能流和信息流耦合在一起。这些过程对温度升高的适应能够有不同的速率和敏感性。由于生态系统组分过程各自的特点以及过程之间复杂的相互作用和反馈,导致整个生态系统对气候变暖响应的时空变异和在估价碳平衡上的不确定性。

(5) 模型及数据的不完善。因为模型是自然的近似,目前描述生态系统的模型大都是生态过程简单的近似,再加上自然的多变性,其模拟出的结果在一定程度上就不能很准确地表达生态系统的真实变化过程。所以模型模拟的结果不可能完全与实际状况相符,总会有一定的误差存在。同时由于进行气象数据的差值过程中,没有考虑到台站的空间分布不均及海拔高度对数据的影响等问题,所以对当前的模拟结果也会产生一定的影响。此外,生态系统本身还存在一些不确定性:不同群落、树种对温度变化的反馈是有很大差异的,然而,目前还很难对这些差异定量地加以区别。关于二氧化碳浓度升高对森林系统的影响中,全球气候变暖的影响占多大比重还难以区分。因此,关于中国森林生态系统对全球气候变化响应的研究存在一定的不确定性。

以上论述了全球气候变化对中国森林生态系统的分布、生产力、树种组成以及森林土壤的影响及

其一些相关的模式研究与进展。虽然现有的模型研究还存在一定的缺陷与不确定性,但是我们并不能因此而放弃相关的研究。然而,为了更准确地预测全球气候变化对中国森林生态系统的影响,在提高未来气候变化预测的精度和准确度的同时,必须加强对森林的详尽研究,尤其是对森林物质和能量交换过程和生物地球化学循环及其他相关生态过程的研究。因此,这要求我们进行一些长期的观测,尤其是对不同生态系统类型间过渡区各种变化的研究,而样地的设计应尽可能全面地考虑各种存在的问题,从而使获取的数据为研究工作提供可靠的信息。其次,随着社会的快速发展,科学技术的不断进步,如何将各项新的研究技术和手段应用于全球气候变化对中国森林生态系统影响的研究,也将是未来研究的重要内容。此外,虽然现在的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,各种模型的相互结合、相互渗透也是当前更为准确地预测全球气候变化对中国森林生态系统影响的趋势^[57]。

综上所述,全球气候变化对中国森林生态系统的影响是多方面的,要正确评价全球气候变化对中国森林生态系统的影响,就必须对森林与气候和其他环境因子及森林间的相互作用进行全面和充分的了解。虽然存在很多困难,但是随着科研水平的发展,全球气候变化对中国森林生态系统影响机制的研究也将会更上一层楼。

参考文献 (References)

- [1] Blagodatsky S A, Blagodatskaya E V, Anderson T-H, et al. Kinetics of the respiratory of the soil and rhizosphere microbial communities in a field experiment with an elevated concentration of atmospheric CO_2 . *Eurasian Soil Science*, 2006, **39** (3): 325~333
- [2] 韩淑云. 气候变化对人类现实生活的影响. 城市与减灾, 2005, **1**: 25~27
Han Shuyun. The influence of climate variation on the real life of mankind. *Cities & Disaster Reduction* (in Chinese), 2005, **1**: 25~27
- [3] 刘惠民, 邓惠平. 全球气候变化影响研究进展. 安徽师范大学学报(自然科学版), 1999, **22** (4): 378~382
Liu Huimin, Deng Huiping. The progress in the global climate change impact studies. *Journal of Anhui Normal University* (Nature Science) (in Chinese), 1999, **22** (4): 378~

382

- [4] 张明军, 周立华. 气候变化对中国森林生态系统服务价值的影响. 干旱区资源与环境, 2004, **18** (2): 40~43
Zhang Mingjun, Zhou Lihua. The influence of climate change on the value of Chinese forest ecosystem services. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 2004, **18** (2): 40~43
- [5] 刘菲, 金森. 气候变化对东北温带次生落叶阔叶混交林的影响. 东北林业大学学报, 2005, **33** (3): 16~17, 19
Liu Fei, Jin Sen. The influence of climate change on the secondary deciduous broad-leaved mixed forests in the temperate zone of Northeast China. *Journal of Northeast Forestry University* (in Chinese), 2005, **33** (3): 16~17, 19
- [6] Fajer E D, Bowers M D, Bazzaz F A. Enriched CO₂ atmospheres and the growth of the buckeye butterfly. *Junonia Coenia Ecology*, 1991, **72**: 751~754
- [7] Cipollini M I, Drake B G, Whigham D. Effects of elevated CO₂ on growth and carbon/nutrient balance in the deciduous woody shrub *Lindera benzoin* (L.) Blume (Lauraceae). *Oecologia*, 1993, **96**: 339~346
- [8] Fang J Y, Chen A P, Zhao S Q, et al. Calculating forest biomass changes in China. *Science*, 2002, **296**: 1359~1360
- [9] Myra C H, Peter S, Daniel C M, et al. Effects of elevated CO₂ on foliar quality and herbivore damage in a scrub oak ecosystem. *Journal of Chemical Ecology*, 2005, **31** (2): 267~286
- [10] 彭晓邦, 张硕新. 大气 CO₂ 浓度升高对植物某些生理过程影响的研究进展. 西北林学院学报, 2006, **21** (1): 68~71
Peng Xiaobang, Zhang Shuoxin. Research progress in effects of increased atmospheric CO₂ concentration on certain physiological process of plants. *Journal of Northwest Forestry University* (in Chinese), 2006, **21** (1): 68~71
- [11] Colin J S, Megonigal J P, James F R. Comparison of below-ground biomass in C-3 and C-4 dominated mixed communities in a Chesapeake bay brackish marsh. *Plant and Soil*, 2006, **280** (1-2): 305~322
- [12] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬. 植物地上部分对大气 CO₂ 浓度升高的响应. 生态环境, 2004, **13** (3): 390~393
Ma Hongliang, Zhu Jianguo, Xie Zubin. Study on response of vegetable aboveground to the elevated atmospheric CO₂. *Ecology and Environment* (in Chinese), 2004, **13** (3): 390~393
- [13] 周广胜, 王玉辉. 全球生态学. 北京: 气象出版社, 2003. 78, 82~153
Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. *Global Ecology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 78, 82~153
- [14] Prentice K C, Fung J Y. The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change. *Nature*, 1990, **346**: 48~51
- [15] Prentice K C, Cramer W, Harrison S P, et al. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Biogeogr*, 1992, **19**: 117~134
- [16] Ni J. BIOME 6000: advances of palaeobio modeling and reconstruction. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**: 456~471
- [17] Neilson R P. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications*, 1995, **5** (2): 362~385
- [18] 赵茂盛, Ronald P N, 延晓冬, 等. 气候变化对中国植被可能影响的模拟. 地理学报, 2002, **57** (1): 28~38
Zhao Maosheng, Ronald P N, Yan Xiaodong, et al. Modeling the vegetation of China under changing climate. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **57** (1): 028~038
- [19] 陈育峰. GIS 支持的全球气候变化对中国 Holdridge 生命地带的可能影响研究. 遥感学报, 1997, **1** (1): 74~79
Chen Yufeng. Research on impacts of global climate change to Holdridge's life zones of china by geo-information system. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 1997, **1** (1): 74~79
- [20] 张新时, 杨奠安, 倪文革. 植被的 PE (可能蒸散) 指标与植被-气候分类 (三) 几种主要方法与 PEP 程序介绍. 植物生态学与地植物学学报, 1993, **17** (2): 97~109
Zhang Xinshi, Yang Dianan, Ni Wenge. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (III) - An introduction of main methods and PEP program. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (in Chinese), 1993, **17** (2): 97~109
- [21] 延晓冬, 赵士洞, 于振良. 中国东北森林生长演替模拟模型及其在全球变化研究中的应用. 植物生态学报, 2000, **24** (1): 1~8
Yan Xiaodong, Zhao Shidong, Yu Zhenliang. Modeling growth and succession of northeastern China forests and its applications in global change studies. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2000, **24** (1): 1~8
- [22] 于振良, 赵士洞. 长白山阔叶红松林带内柞树林动态模拟. 吉林林学院学报, 1997, **13** (1): 1~4
Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Simulation of oak forest succession in broad-leaved Korean pine at Changbai mountain. *Journal of Jilin Forestry University* (in Chinese), 1997, **13** (1): 1~4
- [23] 延晓冬. 林窗模型的几个基本问题的研究 I. 模拟样地面积的效应. 应用生态学报, 2001, **12** (1): 17~22
Yan Xiaodong. Several basic issues of forest gap model. I. Effect of simulated plot area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 2001, **12** (1): 17~22
- [24] 陈雄文, 王凤友. 林窗模型 BCPF 模拟伊春地区红松阔叶混交林采伐迹地对气候变化的潜在反应. 应用生态学报, 2000, **11** (4): 513~517.
Chen Xiongwen, Wang Fengyou. Simulation of potential responses of clear-cut of mixed coniferous and broad-leaved Korean pine forest in Yichun to climate change by BCPF model.

- Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 2000, **11** (4): 513~517
- [25] 邓惠平, 吴正方, 周道玮. 全球气候变化对小兴安岭阔叶红松林影响的动态模拟研究. 应用生态学报, 2000, **11**: 43~46
- Deng Huiping, Wu Zhengfang, Zhou Daowei. Response of broadleaved pinus koraiensis forests in Xiaoxinganling Mt. to global climate change—a dynamic modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 2000, **11**: 43~46
- [26] 刘世荣, 徐德应, 王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 II. 中国森林第一性生产力的模拟. 林业科学研究, 1994, **7** (4): 425~430
- Liu Shirong, Xu Deying, Wang Bing. Impacts of climate change on productivity of forests in China. II. Geographic distribution of actual productivity of forests in China. *Forest Research* (in Chinese), 1994, **7** (4): 425~430
- [27] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. 植物生态学报, 2000, **24** (5): 513~517
- Fang Jingyun. Forest productivity in China and its response to global climate change. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2000, **24** (5): 513~517
- [28] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimation at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Climate Change*, 2001, (49): 339~358
- [29] 刘世荣, 郭泉水, 王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. 生态学报, 1998, **18** (5): 478~483
- Liu Shirong, Guo Quanshui, Wang Bing. Prediction of net primary productivity of forests in China in response to climate change. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 1998, **18** (5): 478~483
- [30] 郑景云, 葛全胜. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应研究. 中国农业气象, 2003, **24** (3): 28~32
- Zheng Jingyun, Ge Quansheng. Changes of plant phenological period and its response to climate change for the last 40 years in China. *Agricultural Meteorology* (in Chinese), 2003, **24** (1): 28~32
- [31] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. 地理学报, 1995, **50** (5): 402~410
- Zhang Fuchun. Effects of global warming on plant phenological events in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1995, **50** (5): 402~410
- [32] Cole D W, Rapp M. Elemental cycling in forest ecosystems. In: Heichle D E, Ed. *Dynamic Properties of Forest Ecosystems*. London: Cambridge University Press, 1981. 341~409
- [33] 王绍强, 刘纪远. 土壤碳蓄积量变化的影响因素研究现状. 地理科学进展, 2002, **17** (4): 528~534
- Wang Shaoqiang, Liu Jiyuan. Research status quo of impact factors of soil carbon storage. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2002, **17** (4): 528~534
- [34] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响. 地理学报, 2003, **58** (5): 727~734
- Zhou Tao, Shi Peijun, Wang Shaoqiang. Impacts of climate change and human activities on soil carbon storage in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58** (5): 727~734
- [35] 张春娜, 延晓冬, 杨剑红. 中国森林土壤氮储量估算. 西南农业大学学报 (自然科学版), 2004, **26** (5): 572~575, 579
- Zhang Chunna, Yan Xiaodong, Yang Jianhong. Estimation of nitrogen reserves in forest soils of China. *Journal of Southwest Agricultural University* (in Chinese), 2004, **26** (5): 572~575, 579
- [36] Moore T R. Litter decomposition of organic in subarctic spruce-lichen woodland soils. *Soil Sci.* 1984: 107~113
- [37] Anderson D A. The dynamic greenhouse: feedback processes that may influence future concentrations of atmospheric trace gases and climate change. *Climatic Change*, 1989, **14**: 213~242
- [38] 张金屯. 全球变化对自然土壤碳、氮循环的影响. 地理科学, 1998, **18** (5): 463~471
- Zhang Jintun. Effects of global climate change on C and N circulation in natural soils. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 1998, **18** (5): 463~471
- [39] Forman R T. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 1995, **10** (3): 133~142
- [40] 荣兴民, 陈玉成, 王开运, 等. 森林土壤碳氮过程研究现状和展望. 内蒙古林业科技, 2004, **1**: 30~35
- Rong Xingmin, Chen Yucheng, Wang Kaiyun, et al. Advances and prospect for carbon and nitrogen process in forest soil. *Inner Mongolia Forestry Science & Technology* (in Chinese), 2004, **1**: 30~35
- [41] 蒋延玲, 周广胜, 赵敏, 等. 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用的研究. 植物生态学报, 2005, **29** (3): 411~414
- Jiang Yanling, Zhou Guangsheng, Zhao Min, et al. Soil respiration in broad-leaved and Korean pine forest ecosystems, Changbai Mountain, China. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2005, **29** (3): 411~414
- [42] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. 地学前缘 (中国地质大学, 北京), 2002, **9** (2): 351~357
- Li Yuning, Wang Guanyu, Li Wei. Soil respiration and carbon cycle. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences, Beijing) (in Chinese), 2002, **9** (2): 351~357
- [43] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 21~51
- [44] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Houghton J T, et al., Eds. New York: Cambridge University Press, 2001
- [45] 王明星, 戴爱国, 黄俊, 等. 中国 CH₄ 排放量的估算. 大气科学, 1993, **17** (1): 52~64
- Wang Mingxing, Dai Aiguo, Huang Jun, et al. Sources of methane in China: Rice fields, agricultural waste treatment,

- cattle, coal mines, and other minor sources. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1993, **17** (1): 52~64
- [46] Mosier A R. Soil processes and global change. *Biol. Fertil Soils*, 1998, **27**: 221~229
- [47] Leggett J. Emissions scenarios for IPCC in climate change 1994. In: Houghton J J Ed. *The Supplementary Report to IPCC, Scientific Assessment*. Cambridge University Press, 1995, 12~231
- [48] Dyer M L, Meentemeyer V, Berg B. Apparent controls of mass loss rate of leaf litter on a regional scale. *Second. J. For. Res.*, 1990, **5**: 1~3
- [49] Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. The response of vegetation to climate. *Acta Botanica Sinica*, 1996, **38** (1): 1~7
- [50] Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, et al. The importance of land-cover change in simulating future climate. *Science*, 2005, **310**: 1674~1678
- [51] Roger A, Pielke S. Land use and climate change. *Science*, 2005, **310**: 1625~1626
- [52] Chapin III F S, Sturm M, Serreze M C. Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science*, 2005, **310**: 657~660
- [53] 符淙斌, 袁惠玲. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验. *科学通报*, 2001, **46** (8): 691~695
- Fu Congbin, Yuan Huiling. A virtual numerical experiment to understand the impacts of recovering natural vegetation on the summer climate and environmental conditions in East Asia. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2001, **46** (8): 691~695
- [54] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U. S. carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 1999, **285**: 574~578
- [55] 高志强, 刘纪远, 曹明奎, 等. 土地利用和气候变化对农牧过渡区生态系统生产力和碳循环的影响. *中国科学 (D辑)*, 2004, **34** (10): 946~957
- Gao Zhiqiang, Liu Jiyuan, Cao Mingkui, et al. Impacts of land use and climate change on ecosystem productivity and carbon circulation in the transition between farm and grassland. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2004, **34** (10): 946~957
- [56] Joanna I H, Prentice I C, Corinne L Q. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 1047~1052
- [57] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. *自然资源学报*, 2001, **16** (1): 71~78
- Liu Guohua, Fu Bojie. Effects of global climate change on forest ecosystems. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 2001, **16** (1): 71~78