

# 火干扰与生态系统的碳循环

吕爱锋<sup>1,4</sup>, 田汉勤<sup>2</sup>, 刘永强<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 美国奥本大学林业与野生生物学院, 奥本 AL36849;  
3. 美国农业部林业局森林科学实验室, 雅典 GA 30602; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**火干扰是陆地生态系统碳循环的重要影响因子。它改变着整个系统的碳循环过程与碳分布格局。正确评估火干扰在碳循环过程中的作用,对推进全球碳循环研究有着重要的意义。从 4 个方面系统的回顾了火干扰对碳循环的影响过程及其研究方法:(1)火烧过程中含碳痕量气体排放的估算;(2)火烧迹地恢复过程中净第一性生产力(NPP)与土壤呼吸的变化;(3)火干扰对生态系统碳源/汇的影响;(4)模型方法在火干扰与生态系统碳循环研究中的应用。目前火灾碳排量的估算方法业已成熟,但进行更精确的估算必须基于对受干扰生态系统的性质以及火势的时空变异性质的准确理解;相比之下,对于间接的、更为重要的影响,即对火烧迹地恢复过程中碳循环变化的研究则显不足。由于数据缺乏,现有研究大多限于对碳循环某一方面的观测与定量描述,缺乏全面的机理性分析。对此,实地观测、模型模拟与遥感观测的跨尺度集成将成为未来火干扰研究的一个主要方向。

**关键词:**火干扰;碳循环;生态系统模型;NPP;土壤呼吸

文章编号:1000-0933(2005)10-2734-10 中图分类号:Q142,Q148,X14 文献标识码:A

## State-of-the-Art in quantifying fire disturbance and ecosystem carbon cycle

LÜ Ai-Feng<sup>1,4</sup>, TIAN Han-Qin<sup>2</sup>, LIU Yong-Qiang<sup>3</sup> (1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China*; 2. *School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, Auburn, AL36849, USA*; 3. *Forestry Sciences Laboratory, USDA Forest Service, 320 Green St., Athens, GA 30602, USA*; 4. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2734~2743.

**Abstract:** The magnitude and location of carbon sources and sinks in the terrestrial biosphere are far from certain. This uncertainty is partly due to the lack of our understanding of how natural and human disturbances affect the terrestrial carbon cycle. Fire disturbance has been identified as one of the most important factors that control ecosystem processes and hence the carbon cycle. In this paper, we have reviewed the state-of-the-art in quantifying fire disturbance and ecosystem carbon cycle, which covers four critical issues as follows: (1) fire-induced immediate carbon emission, (2) postfire change in Net Primary Production (NPP), (3) postfire change in soil respiration, and (4) modeling carbon dynamics in terrestrial ecosystems associated with fire disturbance. The Seiler & Crutzen's model and its variety have widely been used for the estimation of fire-induced immediate carbon emission. These emission models usually compose of four variables: burned area, consumed biomass, carbon density and consuming efficiency. To determine the four variables is essential for accurately estimating fire-induced carbon emission. In the past two decades, great deals of efforts have been made to estimate burned area by using satellite data and to determine consuming efficiency by using field experiment. Large uncertainty still exists in estimating both consumed biomass and carbon density. NPP and soil respiration are two components that determine carbon source and sink in terrestrial ecosystems. Fire disturbance could influence NPP through altering physical environment as well as ecosystem structure. On the one hand, fire-induced change in the age structure of ecosystems could lead to a large deduction in NPP. On

基金项目:中国科学院海外知名学者计划资助项目;国家自然科学基金海外合作研究资助项目(40128005);NASA 交叉科学计划资助项目(NNG04GM39C)

收稿日期:2004-07-03;修订日期:2005-01-24

作者简介:吕爱锋(1977~),男,山东莱芜人,博士生,主要从事火干扰与生态系统功能研究。E-mail: lvaf@igsnr.ac.cn

Foundation item: Distinguished Overseas Scholars Plan of Chinese Academy of Sciences; National Natural Science Foundation of China (No. 40128005); NASA Interdisciplinary Science Program (No. NNG04GM39C)

Received date: 2004-07-03; Accepted date: 2005-01-24

Biography: LÜ Ai-Feng, Ph. D. candidate, mainly engaged in fire disturbance and ecosystem functioning. E-mail: lvaf@igsnr.ac.cn

the other hand, NPP could progressively increase as ecosystem develops from young to mature. Fire disturbance may also alter soil respiration through influencing biological, physical and chemical properties of soils. The challenge we face is also how to manage fires which aim at reducing carbon emission and enhancing the ability of carbon sequestration by ecosystems. How to balance fire suppression and prescribed fire becomes a topic that interests to policy-makers and managers. Computer models have been used for scenario analyses that evaluate potential impact of different fire management practices on carbon storage in terrestrial ecosystems. From both scientific and management perspectives, therefore, it is essential to incorporate fire disturbance into ecosystem models. Recently, such models have been developed to address fire-ecosystem complex interactions. Most of these models, however, lack confidence in predicting changes in ecosystem structure and function after fire disturbance. Further advance in understanding fire-induced carbon dynamics at a large scale will clearly rely on the intensive interactions among field experiment, remote sensing and modeling.

**Key words:** fire disturbance; carbon cycle; ecosystem model, NPP; soil respiration

在对大气、海洋和生物圈碳交换进行大量研究的基础上,科学家发现了一个大约为  $2 \text{ Pg a}^{-1}$  的“丢失的碳汇”,即人为和自然过程排放的  $\text{CO}_2$  量与大气中实际  $\text{CO}_2$  量的差值<sup>[1,2]</sup>。许多科学家认为“丢失的碳汇”可能位于陆地半球,而且最有可能位于北半球<sup>[3~5]</sup>。正确理解和认识陆地生态系统的碳循环过程,分析变化环境下生态系统碳收支变化及其空间分布,是解释这一“丢失的碳汇”的重要途径。大量研究表明, $\text{CO}_2$  浓度升高、全球气候变暖以及土地利用变化对陆地生态系统碳循环具有深刻影响<sup>[1,6~9]</sup>。但是这些研究大多针对成熟、稳定的生态系统,而忽略了另一个对生态系统碳循环有着重要影响的因子——干扰。

干扰作为一种突发事件,剧烈的改变着生态系统的结构与功能,从而使得整个系统失去了原有的平衡状态<sup>[10]</sup>。干扰包括人为干扰(森林砍伐、作物收获等)和自然干扰(地震、虫害、火灾等)。火干扰是森林生态系统最主要的干扰之一。全球平均每年大约有 1% 的森林遭受火干扰的影响<sup>[11]</sup>。而森林生态系统是全球碳循环的最重要的组成部分:全球森林的碳储量占整个陆地生态系统碳量总和的  $2/3$ <sup>[12]</sup>;森林生态系统的碳吸收能力占陆地生态系统 NPP 总和的 60%<sup>[7]</sup>。火干扰通过改变森林生态系统的格局与过程,进而改变整个系统的碳循环过程与碳分配,对生态系统碳循环产生着深刻的影响。正确评估火干扰在碳循环中的作用,将会有力的推进全球碳循环研究的进程。火干扰包括两个过程:火灾过程(生物物质的燃烧过程)和火灾后生态系统的恢复过程。目前相关研究主要集中于以下几个方面:(1)对在火灾过程中生物物质燃烧释放出的含碳痕量气体的估算<sup>[13~22]</sup>;(2)生态系统恢复过程中呼吸作用(有氧呼吸和异养呼吸)的变化,即火灾后生态系统向大气排放碳量的过程<sup>[23~26]</sup>;(3)生态系统恢复过程中 NPP(net primary production)的变化,即火灾后生态系统通过光合作用固定碳的过程。其中第一方面关注的是火干扰对生态系统的直接影响,是短期的;后两方面为其间接影响,是长期的<sup>[25,27~30]</sup>。从长时间尺度上来看,间接影响造成的碳损失要大于直接影响<sup>[17,25,31,32]</sup>。因此,在分析某一地区某一时期是碳汇还是碳源时,必须考虑火干扰引起的碳收支变化<sup>[33~35]</sup>。

火势(fire regime)是火干扰的一个重要属性,是对某一生态系统长时间内火干扰自然属性的描述,包括火干扰的强度、频率、季节性、大小、类型以及破坏性(severity)<sup>[36]</sup>。不同的火势对碳循环的影响程度与过程也是不同的。火势会随着气候的变化而变化<sup>[37]</sup>。大量研究表明,随着全球气温的升高,火干扰的频率、破坏性会升高,干扰历时也会随之变长<sup>[38,39]</sup>。温室气体的排放是公认的全球变暖的缘由之一,而火干扰又恰恰影响到了生态系统对温室气体,尤其是  $\text{CO}_2$  的吸收与排放。因此,火干扰、温室气体排放以及全球气候变暖之间存在着因果循环关系,这使得火干扰对碳循环的影响不仅成为科研界的热点,也引起了政府部门的极大关注。

## 1 火灾过程中含碳痕量气体排放的估算

火灾过程中释放大量含碳气体是火干扰对碳循环最直接的影响,也是陆地生态系统中碳的净损失过程。据 Andreae & Merlet<sup>[20]</sup>估算,全球每年火灾释放大约  $4 \text{ Pg}$  的碳到大气中,相当于每年人为化石燃料燃烧释放量的 70%<sup>[40]</sup>。火灾过程中释放的含碳气体主要包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  以及  $\text{CH}_3\text{Cl}$ 、NMHC 等等,其中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  为其主要成分,分别占各自全球所有源排放总量的 45%、21% 和 44%<sup>[16]</sup>。表 1 为 Andreae & Merlet 估算的全球生态系统火灾释放的主要含碳气体量<sup>[20]</sup>。

对火灾过程中释放的含碳痕量气体进行准确估算,不仅可以评价火干扰对碳循环的直接影响,而且有助于分析火灾后生态系统各碳库的变化,从而为火干扰后生态系统恢复过程中的碳循环研究提供背景值(表 2)。目前,火灾过程释放的含碳痕量气体估算的研究主要针对于北方针叶林地区<sup>[15,18,22,41]</sup>,赤道雨林地区<sup>[42]</sup>以及热带(或亚热带)稀树大草原(savanna)<sup>[43]</sup>。

对森林火灾释放含碳痕量气体的估算开始于 20 世纪 70 年代后期<sup>[13,14]</sup>。主要基于 Seiler 和 Crutzen<sup>[44]</sup>提出的火灾损失生物量估算模型,即:

$$M = A \times B \times a \times b \quad (1)$$

式中, $A$  为单位时间内的火灾面积; $B$  为某一特定生态系统内单位面积的有机物量; $a$  为地上部分生物量占整个系统生物

量的比重;  $b$  为燃烧效率。基于上述模型, 如果知道不同火灾地区燃烧物质的碳密度, 可以对模型(1)进行变形, 用来估算火灾过程中释放的碳量<sup>[18,38]</sup>即:

$$C_t = ABf_c\beta \quad (2)$$

式中,  $A$  为火灾影响的面积;  $B$  为火灾范围内的生物量密度( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $f_c$  为生物量中碳所占的比重;  $\beta$  为燃烧效率, 即火灾中消耗的生物量占火灾前同一地区生物量的比重。

通常, 根据(2)式估算的碳排量会小于实际碳排量。因为它计算火灾消耗生物量时忽略了地表物质(包括凋落物、地衣、活的或者死的土壤有机质)<sup>[45]</sup>。而对于北方针叶林, 每次火灾消耗的高达 2/3 的物质是来自地表物质<sup>[46]</sup>。针对此, French 等<sup>[18]</sup>对模型(2)进行了改进:

$$C_t = A(B_a f_{ca} \beta_a + C_g \beta_g) \quad (3)$$

式中,  $B_a$  表示地上物质的生物量密度( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $f_{ca}$  指地上物质中碳所占比重;  $\beta_a$  是火灾过程中地上部分的燃烧效;  $C_g$  为地表有机层的碳密度( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $\beta_g$  为火灾过程中地表物质的燃烧效率。

表 1 20 世纪 90 年代末期全球主要地区火灾直接释放含碳气体量( $\text{Tg/a}$ )<sup>[20]</sup>

Table 1 Fire-induced emission of four carbon-containing species from main regions in late 1990s<sup>[20]</sup>

地区 Regions	二氧化碳 CO <sub>2</sub>	一氧化碳 CO	甲烷 CH <sub>4</sub>	非甲烷烃 NMHC
全球排放总和 Total	13400	690	39	49
热带森林 Tropical forest	2101	139	9	10.8
稀树草原与草地 Savanna and grassland	5096	206	7.4	10.7
非热带地区 Extratropical forest	1004	68	3	3.6

目前, 模型中的各个参数主要通过小范围的控制实验<sup>[47]</sup>以及经验确定, 进行尺度扩展后用于大尺度研究, 这使得各参数均一的运用在较大的范围内。但是, 各因子都具有很强的时空变异性。因子的时空变异性与模型参数的均一化, 就导致了碳排量估算的不确定性。火灾面积是导致估算误差的一个重要因素<sup>[48]</sup>。目前用于估算排放碳量的火灾面积数据主要来源于政府部门统计数据与 FAO (Food and Agriculture Organization) 统计数据<sup>[16]</sup>、政府部门火灾时空信息数据库<sup>[49]</sup>、遥感<sup>[15,22,38,41]</sup>以及经验公式<sup>[17]</sup>。统计资料的时空分辨率通常不适合用于排放量估算。因为统计资料通常是以行政单元为空间单位, 以年为时间单位。而目前的生态系统模型一般以栅格为计算单元。

Conard 等<sup>[17]</sup>利用不同生态系统的火灾周期近似的估算了俄罗斯平均每年的燃烧面积。这种方法方便快捷, 但是缺少时空信息。火灾的时空信息对于准确估算碳排量具有决定性意义<sup>[50]</sup>。统计信息和经验公式得到的火灾面积不能满足以时空信息为基础的估算模型的要求。政府部门建设火灾时空信息数据库可以为火灾排放碳量的估算提供强有力的数据支持<sup>[51]</sup>。最典型的当属美国的火灾信息系统<sup>[89]</sup>。该系统由美国农业部林务局与内务部共同建立, 包含了历史火灾的类型、发生区域、面积等火干扰信息。利用这一数据库, Liu<sup>[51]</sup>对美国大陆部分火灾的碳排量及其季节与年际变化进行了分析。但是目前, 只有少数几个国家或地区建立了这种火灾时空信息数据库。

遥感以其宏观性和周期性的特点, 已成为大尺度火灾面积估算以及获取时空化火灾信息的强有力的手段。近年来, 各种遥感平台与算法在火灾面积估算中得到了有效的应用<sup>[11,15,22,52]</sup>。但同时, 不同的遥感平台分辨率不同, 应用算法也有一定的局限性, 因而估算面积存在一定的误差<sup>[53]</sup>。目前, 许多学者通过多元数据相互校正的方法, 来提高遥感火灾面积估算的准确性<sup>[54,55]</sup>。Potter C 等<sup>[54]</sup>利用高分辨率影像(TM)来对基于 AVHRR 估算火灾面积的算法进行评价。Barbosa 等<sup>[55]</sup>利用遥感估算面积与政府统计资料进行比较, 并得出两者的换算关系。可见, 随着遥感数据精度的提高和算法的改进, 遥感估算火灾面积的精度正在逐渐提高。

燃烧效率也是火灾过程碳排量的主要影响因子。它不仅直接影响了燃烧物质的数量, 而且间接影响到森林生态系统中各个碳库的变化。燃烧效率受火灾强度、火灾类型、植被类型以及气候条件等因素影响。当某地区长时间干旱少雨时, 就会出现大范围的可燃物质, 容易发生破坏性较大的火灾<sup>[15]</sup>。Cahoon 等<sup>[15]</sup>详细分析了 1987 年中国以及俄罗斯特大森林大火发生的气候条件。林冠火(crown fire)的破坏性大于地表火(surface fire)<sup>[17]</sup>。不同的生态系统燃烧效率存在很大的差异, 热带(或亚热带)稀树大草原(savanna)的地上物质燃烧效率最高, 大约为 0.8~1, 而赤道或北方针叶林的燃烧效率较低, 大约为 0.2~0.3<sup>[50]</sup>。

火灾破坏性(Fire severity)的时空差异直接导致了燃烧效率的时空变化, 进而影响了碳排量的准确估算<sup>[17,41]</sup>。Conard 等<sup>[17]</sup>在对俄罗斯火灾碳排量研究时发现, 最大破坏性火灾的碳排量是最小破坏性情况下的 4 倍。因此在估算碳排量时必须考虑燃烧效率在时空尺度上的变化<sup>[48]</sup>。准确地获取燃烧效率一般通过控制实验来得到<sup>[47]</sup>, 但是控制实验成本太高, 不适合于大范围推广。许多学者尝试不同方法获取燃烧效率, 以使估算更加准确快捷<sup>[18,47,56]</sup>。Kasischke 等<sup>[47]</sup>通过测定不同植被的燃烧效率, 结合植被与土壤排水条件的关系, 建立了燃烧效率与土壤排水等级的关系。在大量实地测量的基础上, Shvidenko 等<sup>[56]</sup>建立了平均

燃烧效率与燃烧物质总量之间的回归方程。基于火灾面积、燃烧效率与气温的年际变化之间的相关关系, French 等<sup>[18]</sup>建立了不同生态区燃烧效率与火灾面积的线性关系。另外,也可以通过遥感方法判断火灾类型,进而得到燃烧效率<sup>[22]</sup>。由此可见,建立有效的火灾的破坏性模型,理解火灾破坏性的年际与区域变化将是火灾过程碳排放研究的主要方向<sup>[48]</sup>。

表 2 不同物质燃烧类型主要含碳痕量气体的排放因子(g/kg)<sup>[20]</sup>

Table 2 Emission factors for main carbon species emitted from various types of biomass burning (g/kg)<sup>[20]</sup>

燃烧物质类型 Biomass burning types	二氧化碳 CO <sub>2</sub>	一氧化碳 CO	甲烷 CH <sub>4</sub>	非甲烷烃 NMHC
稀树草原与草地 Savanna and grassland	1613±95	65±20	2.3±0.9	3.4±1.0
热带森林 Tropical forest	1580±90	104±20	6.8±2.0	8.1±3.0
非热带森林 Extratropical forest	1569±131	107±37	4.7±1.9	5.7±4.6
生物燃料 Biofuel burning	1550±95	78±31	6.1±2.2	7.3±4.7
木材干馏 Charcoal making	440	70	10.7	2.0
木炭燃烧 Charcoal burning	2611±241	200±38	6.2±3.3	2.7±1.9
农业残余物 Agricultural residues	1515±177	92±84	2.7	7.0

对火干扰区域内的生物量的计算是整个含碳痕量气体估算的基础,也是整个估算模型的一个难点。大多数的研究采用的是经验值<sup>[15,41]</sup>。为了更精确估算火灾过程中排放的碳量,必须准确估算燃烧物质的质量,了解其时空分布特征。目前生物量的估算主要有 3 个途径:(1)国家统计局资料与 FAO 统计资料(2)经验模型方法(3)生态系统模型<sup>[9,22,35,54,57,58]</sup>。统计资料的时空尺度较粗,一般以省、年为时空单位。经验模型方法是一种通过建立生物量与时空变量的相关关系获取高分辨率生物量数据的有效方法。WRAP(U.S. Western Regional Air Partnership)<sup>[59]</sup>研究了美国国家森林火险等级系统(NFDRS)划分的 20 种植被类型<sup>[60]</sup>的可燃物质量。通过 NFDRS 的可燃物质模拟图,可以获取每一种植被类型的位置<sup>[61]</sup>,从而获取某一区域某次火灾所消耗的可燃物质量。WRAP<sup>[59]</sup>利用这种方法对美国环境保护局国家基准年排放总量的火灾部分进行了研究。生态系统模型是准确估算生物量的有效手段。Potter 等<sup>[54]</sup>利用 NASA-CASA 模型估算了巴西亚马逊地区的生物量,并计算了 20 世纪 90 年代该地区火灾释放的碳量。Kasischke 等<sup>[22]</sup>利用立地年龄分布曲线建立了生物量随时间变化的模型,用来计算阿拉斯加地区 1990~1991 年火灾释放的碳量。采用 TEM 模型与火灾轮回周期,Zhuang 等<sup>[58]</sup>分析了阿拉斯加地区火灾过程中生物量的损失以及碳排放量。随着生态系统模型的发展,对生物量的质量以及时空分布信息的估算精度将会持续提高。

地上物质的碳比重以及地表有机层的碳密度也是主要通过实验方法获取。而大范围内的数值则主要来自经验估算。二者也具有很强的时空分布特征。不同生态区的值不同<sup>[62]</sup>。

综上所述,火灾过程中含碳痕量气体的排放是一个多重时空要素集成的结果。在进行含碳痕量气体排放估算时,要综合考虑其时空影响因子。

## 2 生态系统恢复过程中 NPP 的变化

净第一性生产力(net primary productivity)是生态系统中植被从大气固定的碳量与植被通过呼吸作用释放到大气中的碳量之差,是大气中的碳进入陆地生态系统的主要途径<sup>[7]</sup>。因此,理解 NPP 对火干扰的响应及其恢复过程是揭示火干扰对生态系统碳循环的间接、长期影响的基础<sup>[25]</sup>。火干扰是 NPP 的重要影响因子<sup>[63]</sup>。火干扰打断了生态系统正常的发展阶段,从而改变了整个系统的年龄结构<sup>[64]</sup>。而不同年龄的生态系统的碳循环特征是不同的<sup>[27]</sup>。生态系统发展的早期,地表植被较少,叶面积指数 LAI 较低,NPP 就比较低。NPP 随着年龄增长而提高<sup>[25,28,29,65]</sup>,但到达一定年龄开始下降<sup>[65~67]</sup>。目前,对于 NPP 在生态系统恢复过程中变化的研究主要集中于立地尺度,通常采用时间序列与观测试验的方法进行分析<sup>[27~30]</sup>。这种方法利用长时间序列的观测数据分析 NPP 在生态系统恢复过程中的变化。但是一个完整的恢复过程一般需要几十年以上,对于大多数区域,观测明显是不够的。为了弥补观测数据的不足,研究人员提出了“时空替代”的研究方法。即在一个区域内选择不同演替阶段的立地或者不同地区但具有近似相同的地理环境要素的不同演替阶段的立地,组成一个恢复的时间序列,来分析其中的规律<sup>[27,28,30]</sup>。除了时间序列与观测试验的方法以外,模型方法也是研究 NPP 在生态系统恢复过程中变化的重要工具<sup>[25,68]</sup>。大量的研究发现,在生态系统恢复的过程中,NPP 首先随着年龄增大而增大直到恢复到干扰前的水平<sup>[27,28,29]</sup>。但是不同生态系统的恢复速度和增长模式都是不同的。Hicke 等<sup>[25]</sup>利用 CASA(Carnegie-Ames-stanford-Approach)模型研究北美北方针叶林火干扰迹地 NPP 恢复时得出平均的恢复时间为 9a。Harden 等<sup>[69]</sup>在模拟北美地区火干扰对碳循环的影响时,发现 NPP 需要大约 10a 的时间恢复到干扰前的水平。基于 NDVI 与绿色生物量、光合作用的关系<sup>[70]</sup>,很多学者用 NDVI 来研究植被的恢复<sup>[71,72,73]</sup>。Kasischke 等<sup>[73]</sup>发现北方针叶林在火灾后 20~50a 内 NDVI 仍持续增长。Diaz-Delgado 等<sup>[71]</sup>利用 NDVI 研究家泰罗尼亚森林时,发现该系统恢复所需要的时间约为 7a。不仅恢复时间存在不同,NPP 的增长模式也存在很大差异。图 1 为 Amiro 等<sup>[27]</sup>在对加拿大西部北方针叶林恢复进行研究时,得出的不同生态群落 NPP 随时间的变化曲线。

### 3 生态系统恢复过程中土壤呼吸的变化

生态系统呼吸的变化是碳循环的重要组成部分<sup>[27]</sup>。绝大多数的呼吸来自土壤,它包括异养呼吸(土壤微生物)和自养呼吸(土壤根系)。火干扰改变了土壤的物理(温度、湿度)<sup>[24,73]</sup>、化学<sup>[23]</sup>以及生物<sup>[75]</sup>性质,从而对土壤呼吸产生影响。火灾后一定时间内,火干扰地区土壤的温度通常会高于未干扰的地区<sup>[23,24,76]</sup>。火灾后,地表颜色变深,有植被冠层带来的遮荫效果被移除,表层土壤得到更多的能量。同时,植被、地表生物、有机层被部分的去除减少了由于蒸散发损失的能量,这使得更多的能量被土壤层吸收<sup>[24,76]</sup>。这些变化使得迹地土壤温度高于未干扰区域。较高温度持续的时间长短也不同,从几小时到几年,这取决于火灾的破坏性。如果火灾去除了整个地表有机层,则持续很长时间<sup>[76]</sup>。Amiro 等<sup>[74]</sup>在 BOREAS 试验中发现,火灾迹地或者年轻立地的地表温度较成熟立地高 6℃,而且这种情况可以持续 15a。温度升高,会刺激土壤微生物活性,进而会增加呼吸。火灾中残留的灰烬物质会向土壤中释放碱性离子,从而提高土壤的 pH 值<sup>[77]</sup>。土壤 pH 的升高也会有利于土壤微生物生长<sup>[75]</sup>。火灾导致的土壤热力条件的改变会对微生物数量产生影响<sup>[78]</sup>。土壤温度的升高、pH 的升高会刺激土壤呼吸,而微生物数量的减少以及根系的死亡、可分解物质的减少都会降低土壤呼吸。因此,在考虑火干扰对土壤呼吸作用影响时,需要综合考虑火干扰所导致的所有环境要素的改变。但是各个要素的变化程度因地而异,因此目前并无定论。

Sawamoto 等<sup>[79]</sup>的研究发现,西伯利亚地区火灾后土壤呼吸降低,而异养呼吸却升高了。同样的,Richter 等<sup>[23]</sup>对阿拉斯加地区的研究也发现,火灾后区域的土壤呼吸大约是未干扰区域的 1/2。他认为这是由于自养呼吸的降低,而异养呼吸可能在升高。Wiseman & Seiler<sup>[80]</sup>对弗吉尼亚山麓不同年龄火炬松(loblolly pine)的土壤呼吸进行研究时发现,土壤呼吸随立地年龄的增长而增长。他将原因归结于根系生物量随年龄的不断增长。Hicke 等<sup>[25]</sup>模拟研究发现火灾造成大量可分解物质,使得异养呼吸迅速升高。但由于系统恢复初期 NPP 较低,在火灾后第 2 年异养呼吸开始降低,大约 5 a 后低于火灾前的水平。但是其没有考虑土壤性质的改变对异养呼吸的影响。生态系统恢复初期异养呼吸取决于可分解物质的多少。随着立地的发展,可分解物质不断增加,异养呼吸也随着时间增长,最终几乎与 NPP 平衡<sup>[9,57,65,81]</sup>。

### 4 生态系统恢复过程中碳源碳汇的讨论

火干扰改变了干扰区域内生态系统的生产力与呼吸过程,进而对该区域的碳收支产生深刻影响。Kurz 等<sup>[32]</sup>研究发现,加拿大森林近些年来不断增长的火灾干扰与病虫害干扰使得该地区从碳汇转为了碳源。O'Neill 等<sup>[24]</sup>认为生物物质燃烧过程中以及火灾后分解损失的碳量的生态重要性最终取决于生物群落从干扰到恢复的一年乃至几十年内吸收与释放碳量达到平衡的时间尺度。生态系统恢复初期,NPP 较低,而异养呼吸相对较高,迹地为碳源。随着恢复阶段的发展,NPP 逐渐增高,而异养呼吸可是降低,迹地可是由碳源转变为碳汇。不同区域的周期可能不同。Hicks 等<sup>[25]</sup>在对北美北方林 NPP 进行模拟研究时发现在火灾后的 8a 内迹地为碳源,8a 后开始成为碳汇。Rapalee 等<sup>[82]</sup>研究北方林迹地恢复时发现火灾后大约 30a 迹地由碳源变成碳汇。

京都议定书的签订,使得全球碳循环研究成为一种政府行为。努力提高本国生态系统对碳的吸收量,同时尽可能的减少碳排放已成为每个成员国政府所面临的共同问题。为了达到这一目的,除了减少人为排放量外,加强对生态系统的碳管理也是有效的方法之一<sup>[64]</sup>。作为碳循环的重要影响因子,火干扰管理已经成为政府行为作用于生态系统碳过程的有效手段。火干扰管理主要包括两个方面:防火(fire suppression)与有计划放火(prescribed fire)。防火通过以下两条途径来影响碳源碳汇:(1)减少了由于火灾而导致的直接释放的碳量;(2)延长火干扰发生周期,从而提高了碳源时间<sup>[64]</sup>。防火是一种有效的增加碳吸收减少碳排放的有效手段,但是长期有效的防火不仅需要大量的财政投入,而且也可能造成碳的净损失<sup>[83]</sup>。这主要是由于生态系统的生产力有随年龄下降的趋势<sup>[65,66,67]</sup>。另外,长期的防火会产生大量的可燃物质,在遇到合适的气候以及火源,就会发生大范围、高强度的火灾。在全球变暖的背景下,这种可能性越来越大。

计划火烧是一种为了达到某一特定管理目标而人为点燃的火灾,是与防火相对的一种火干扰管理方法<sup>[84]</sup>。通常,它是在有控制的情况下、有计划点燃火险等级较高、生产力处于下降期的区域,从而降低发生大范围火灾的可能,提高生态系统生产力。计划火烧通常是低强度、低破坏性的,燃烧范围通常局限于地表与林下叶层<sup>[84]</sup>。计划火烧通过两个途径来影响区域的碳收支:(1)降低该区域生态系统年龄结构,提供大量养分与能量,提高生态系统的生产力,进而增加系统的碳吸收能力;(2)降低更大范

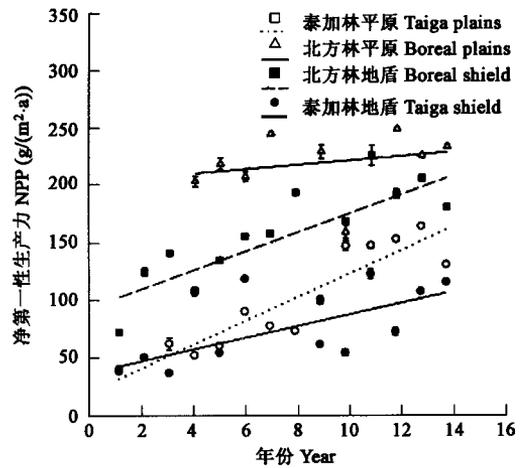


图1 火干扰后不同生态区 NPP 随时间的变化图<sup>[27]</sup>

Fig. 1 Development of NPP with time in different ecozone after fire disturbance<sup>[27]</sup>

围、更高强度火灾发生的可能,从而减少直接排放的碳量。防火与计划火烧是两种有效的管理手段,合理使用将会有力的促进生态系统对碳的吸收,同时降低碳的排放。

## 5 火干扰对碳循环影响的模拟研究

火干扰对碳循环的影响是一个复杂的过程,既包括短期的直接影响,也有长期的间接影响。火干扰不仅通过生物物质的燃烧释放大量的碳,造成生态系统碳的净损失,而且它通过改变生态系统年龄结构、物种组成<sup>[85]</sup>、系统恢复过程中叶面积指数的变化<sup>[45]</sup>以及土壤性质<sup>[76]</sup>的改变对迹地恢复过程中的碳收支产生影响。目前对于火干扰对碳循环影响的模拟主要集中于3个方面:基于年龄结构的碳循环模拟<sup>[32,86]</sup>、基于遥感方法的碳循环模拟<sup>[25,27]</sup>、基于火干扰引起的生态系统功能变化的生物地球化学模拟<sup>[8,58,87]</sup>。

火干扰改变了生态系统的年龄结构,而不同的年龄的碳循环特征是不同的。通过统计数据获取不同年龄生态系统的碳循环特征,就可以建立碳循环随年龄变化的模型。通过这个模型就可以揭示火干扰对生态系统碳循环的影响<sup>[32,86]</sup>。这一类模型通常将碳循环只作为时间的函数,而忽略了其他的重要影响因子,例如气温、降水等<sup>[32]</sup>。为了更好的预测未来不同场景下火干扰对碳循环的影响,许多模型开始考虑干扰因子(火灾、虫灾等)与非干扰因子(气候、大气成分等)对生态系统碳循环的影响<sup>[9,58,86,88]</sup>。此类模型通常基于统计数据。而统计资料的时空分辨率往往较低,所以很难在较大的时间、空间尺度上应用。

遥感作为现代信息获取的重要手段,在火干扰研究中起到越来越重要的作用。它不仅可以为我们提供长期、系统的植被特征数据,而且还为我们提供常规方法所不能获取火干扰时空信息。基于遥感的碳循环模型,通常利用火干扰区域植被特征的变化信息来揭示火干扰对碳循环的影响<sup>[25,27]</sup>。Hick等<sup>[25]</sup>通过CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)碳循环模型,利用17a(1985~1998年)的NDVI数据,研究了火干扰对NPP与NEP的影响,并揭示了NPP的恢复周期。采用BEFS(Boreal Ecosystem Productivity Simulator)模型,以AVHRR数据为数据源,Amiro等<sup>[27]</sup>研究了NPP随时间的变化关系。

前两类模型都是基于数据驱动的,也就是说它们只能对现势的规律进行描述,而不能进行时空的扩展。因而,它们不能对未来全球变化场景下碳循环进行预测研究。生物地球化学模型是采用数学模型来研究化学物质从环境到生物然后再回到环境的生物地球化学循环过程,是生态系统物质循环的重要研究方法<sup>[89,90]</sup>。近年来,生物地球化学模型被广泛的用来研究生态系统对气候变化、大气成分变化以及土地利用变化等全球问题的响应<sup>[7,8,9,91]</sup>。随着人们对火干扰认识的不断加深,许多生物地球化学模型引入火干扰因子<sup>[8,58,68,87]</sup>。通过分析火干扰所导致的生态环境因子的改变,结合这些因子对主要生态过程的影响,生物地球化学模型就可以模拟火干扰对生态系统碳循环的影响。目前这类模型的火干扰对生态系统碳循环影响的模拟主要是利用现有的成熟模型,耦合火干扰对主要碳循环过程的影响来实现的<sup>[58,68]</sup>。利用Century 4.0模型,Peng & App<sup>[68]</sup>对于不同的火干扰周期对NPP的影响进行了研究。模型中认为,火干扰提高了生态系统的根茎比以及根茎组织的碳氮比。模型通过将根茎比提高了35%,地上物质的碳氮比提高45%,地下物质的碳氮比提高90%来模拟火干扰对NPP的影响。利用TEM模型,并集成火干扰造成的土壤温度、湿度变化,Zhuang等<sup>[58]</sup>揭示了阿拉斯加地区火干扰对碳循环的影响。

土壤温度的日以及年际变化对土壤的生物化学过程具有深刻影响,比如微生物分解与土壤有机质的矿化等<sup>[92]</sup>。土壤温度是受多种因素共同作用的,包括气象条件(地表辐射、空气温度)、土壤性质(反射率、含水量以及质地)、地形参数(高程、坡度、坡向)以及其他地表特征(叶面积指数与地表凋落物数量)等<sup>[92,93]</sup>。火干扰破坏了土壤的一些基本性质,改变了叶面积指数与地表凋落物数量,从而对土壤温度产生影响。通过建立叶面积指数以及地表凋落物数量与土壤温度的函数关系,就可以模拟火灾干扰后土壤温度的变化<sup>[58]</sup>。土壤湿度也是生态系统碳过程的重要影响因子。火干扰改变了生态系统的叶面积指数,进而对冠层蒸发产生影响,从而影响到土壤的湿度。Zhang等<sup>[58]</sup>通过建立叶面积指数与冠层蒸发的关系来模拟火干扰对土壤湿度的影响。对包含了火干扰因子的人文模型、土壤温度模型以及生态系统的生物地球化学过程进行集成,就可以更综合的模拟火干扰对生态系统碳循环的影响。前两类模型相比,生物地球化学具有较高的时空分辨率,更能揭示各种影响因子的相互作用。但是生物地球化学模型要求的数据量较大,尤其是火干扰的时空数据。数据的可获取性是制约这类模型发展的瓶颈之一。

## 6 结论与展望

火干扰是陆地生态系统碳循环的重要影响因子,这种影响主要表现在火灾过程中对碳的再分配以及火灾导致的环境因子变化对碳过程的影响。“丢失碳汇”的讨论以及《京都议定书》的签订,使得火干扰这一科学论题,逐渐受到了政府的极大关注。加深火干扰对碳循环影响的认识,将会大大提高人类的生态系统管理水平,以便更加有效的调节生态系统的碳收支。目前,火干扰对生态系统碳循环影响的研究在含碳痕量气体估算与迹地恢复过程中NPP、呼吸作用以及碳源碳汇变化等方面都取得了一定的进展,但也存在一些不足,具体表现在:(1)对不同火势对碳循环影响的差异认识欠缺;(2)研究考虑因子单一,没有综合考虑各种环境要素;(3)缺乏整体理解,只对火干扰对碳循环的某一方面进行研究;(4)时空尺度单一,阻碍了对大尺度碳循环的认识。针对目前存在的不足,本文认为,进一步的研究应侧重以下几个方面:

(1)实地观测、政府统计资料以及遥感方法综合应用的火干扰时空数据库构建;

- (2)火干扰对主要生态环境因子影响的实验研究;
- (3)不同火干扰特征对碳循环的影响研究;
- (4)火干扰对主要生态环境因子影响的模拟以及与大尺度生物地球化学模型集成;
- (5)耦合 GCM 模型与火干扰发生模型,揭示未来气候场景下,火干扰对碳循环的影响。

## References:

- [ 1 ] Prentice I C, Farquhar G D, Fasham M J R, *et al.* The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. In: Houghton J T, Yihui D eds. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 183~238.
- [ 2 ] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems, *Nature*, 2001, **414**: 169~172.
- [ 3 ] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget, *Science*, 1990, **247**: 1431~1438.
- [ 4 ] Fan S, Gloor M, Mahlman J, *et al.* A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 1998, **282**: 442~446.
- [ 5 ] Bousquet P, Peylin P, Ciais P, *et al.* Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, 2000, **290**: 1342~1346.
- [ 6 ] Field C B, Chapin F S, Matson P A, *et al.* Responses of terrestrial ecosystems to the changing atmosphere: A resource-based approach. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1992, **23**: 201~235.
- [ 7 ] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, **363**: 234~240.
- [ 8 ] McGuire A D, Sitch S, Clein J S, *et al.* Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: analyses of CO<sub>2</sub>, climate and land-use effects with four process-based ecosystem models. *Glob. Biogeochem. Cyc.*, 2001, **15**(1): 183~206.
- [ 9 ] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle. *Global and Planetary Change*, 2003, **37**: 201~217.
- [ 10 ] White P S, Pickett S T A. Natural disturbances and patch dynamics: an introduction. In: Pickett S T A, White P S eds. *Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*, London: Academic Press, 1985. 3~13.
- [ 11 ] Fraser R H, Li Z. Estimating fire-related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION. *Remote Sens. Environ.*, 2002, **82**: 95~110.
- [ 12 ] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185~190.
- [ 13 ] Wong C S. Carbon input to the atmosphere from forest fires. *Science*, 1979, **204**: 210.
- [ 14 ] Cruzten P J, Heidt L E, Krasnec J P, *et al.* Biomass burning as a source of the atmospheric gases CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>Cl, and COS. *Nature*, 1979, **282**: 253~256.
- [ 15 ] Cahoon D R, Stocks B H, Levine B J, *et al.* Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia. *J. Geophys. Res.*, 1994, **97**: 3805~2814.
- [ 16 ] Wang X K, Zhuang Y H, Feng Z W. Estimation of carbon-containing gases released from forest fire. *Advances In Environmental Science*, 1998, **6**(4): 1~15.
- [ 17 ] Conard S G, Ivanova G A. Wildfire in Russian boreal forests-potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates. *Environ. Pollut.*, 1997, **98**(3): 305~313.
- [ 18 ] French N H F, Kasischke E S, Lee B S, *et al.* Carbon released from fires in North American boreal forests. In: Kasischke E S, Stocks B J eds *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000. 377~388.
- [ 19 ] Korontzi S, Justice C O, Scholes R J. Influence of timing and spatial extent of savanna fires in southern Africa on atmospheric emissions. *J. Arid Environ.*, 2003, **54**: 395~404.
- [ 20 ] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Glob. Biogeochem. Cyc.*, 2001, **15**: 955~966.
- [ 21 ] Tian X R, Shu L F, Wang M Y. Direct emissions from Chinese forest fires 1991-2000. *Fire Safety Science*, 2003, **12**: 6~10.
- [ 22 ] Kasischke E S, and Bruhwiler L P. Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998, *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 8146, doi: 10. 1029/2001JD000461, 3.
- [ 23 ] Richter D D, O'Neil K P, Kasischke E S. Postfire stimulation of microbial decomposition in black spruce (*Picea mariana* L.) forest soils: a hypothesis. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000. 197~213.
- [ 24 ] O'Neill K P, Kasischke E S, Richter D D. Seasonal and decadal patterns of soil carbon uptake and emission along an age sequence of burned black spruce stands in interior Alaska. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 8155~8170.

- [25] Hicke J A, Asner G P, Kasischke E S, *et al.* Postfire response of North American boreal forest net primary productivity analyzed with satellite observations. *Glob. Change Biol.*, 2003, **9**: 1145~1157.
- [26] Wiseman P E, Seiler J R. Soil CO<sub>2</sub> efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *For. Ecol. Manage.*, 2004, **192**: 297~311.
- [27] Amiro B D, MacPherson J I, Desjardins RL, *et al.* Post-fire carbon dioxide fluxes in the western Canadian boreal forest: evidence from towers, aircraft and remote sensing. *Agri. For. Meteorol.*, 2003, **115**: 91~107.
- [28] Bond-Lamberty B, Wang C, Gower S T. Net primary production and net ecosystem production of a boreal black spruce wildfire chronosequence. *Glob. Change Biol.*, 2004, **10**: 473~487.
- [29] White L L, Zak D R, Barnes B V. Biomass accumulation and soil nitrogen availability in an 87-year-old *Populus grandidentata* chronosequence. *For. Ecol. Manage.*, 2004, **191**: 121~127.
- [30] Wang C, Bond-Lamberty B, Gower S T. Carbon distribution of a well-and poorly-drained black spruce fire chronosequence. *Glob. Change Biol.*, 2003, **9**: 1066~1079.
- [31] Kasischke E S. Processes influencing carbon cycling in the north American boreal forest. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000a. 103~48.
- [32] Kurz W A, Apps M J. A 70~year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecol. Appl.*, 1999, **9**: 526~547.
- [33] French N H F, Kasischke E S, Lee B S, *et al.* Carbon released from fires in North American boreal forests. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000. 377~388.
- [34] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. Changes in terrestrial carbon storage in the United States 2. The role of fire and fire management. *Glob. Ecol. Biogeography*, 2000, **9**: 145~170.
- [35] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* Parameters for global ecosystem models. *Nature*, 1999a, **399**: 536.
- [36] Weber M G, Flannigan M D. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: Impacts on fire regimes. *Environ. Rev.*, 1997, **5**: 145~166.
- [37] Burgan R E, Klaver R W, Klaver J M. Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *Int. J. Wildland Fire*, 1998, **8**: 159~170.
- [38] Kasischke E S, French N H F, Bourgeau-Chavez L L, *et al.* Estimating release of carbon from 1990 and 1991 forest fires in Alaska. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 2941~2951.
- [39] Li Z, Fraser R, Jin J, *et al.* Evaluation of satellite-based algorithms for fire detection and mapping within North America. *J. Geophys. Res.*, 2003, doi: 10.1029/2001JD001377.
- [40] Thonicke K, Venevsky S, Sitch S, *et al.* The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Glob. Eco. Biogeography*, 2001, **10**: 661~677.
- [41] Zhang Y H, Wooster M J, Tutubalina O, *et al.* Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT. *Remote Sens. Environ.*, 2003, **87**: 1~15.
- [42] Vanderwerf G R, Randerson J Y, Collatz G J, *et al.* Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems. *Glob. Change Biol.*, 2003, **9**: 547~562.
- [43] Korontzi S, Justice C O, Scholes R J. Influence of timing and spatial extent of savanna fires in southern Africa on atmospheric emissions. *J. Arid Environ.*, 2003, **54**: 395~404.
- [44] Seiler W, Crutzen P J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Clim. Change*, 1980, **2**: 207~248.
- [45] Wang C, Gower S T, Wang Y, *et al.* The influence of fire on carbon distribution and net primary production of boreal *Larix gmelinii* forests in north-eastern China. *Glob. Change Biol.*, 2001, **7**: 719~730.
- [46] Bourgeau-Chavez L L, Alexander M E, Stocks B J, *et al.* Distribution of forest ecosystems and the role of fire in the North American boreal region. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000b. 111~131.
- [47] Kasischke E S, O'Niell K P, French N H F, *et al.* Control on patterns of biomass burning in Alaskan boreal forests. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000b. 173~196.
- [48] Conard S, Sukhinin A, Stocks B, *et al.* Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Clim. Change*, 2002, **55**: 197~211.
- [49] BLM (U.S. Department of Interior Bureau of Land Management). *Federal Fire History Internet Map Service User Guide*. 2003.
- [50] Levine J S, Cofer III W R. Boreal Forest Fire Emissions and the Chemistry of the Atmosphere. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000. 31~48.

- [51] Liu Y Q. Variability of wildland fire emissions across the continuous United States. *Atmos. Environ.*, 2004, **38**:3489~3499.
- [52] Fraser R H, Li Z., Cihlar J. Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sens. Environ.*, 2000, **74**: 362~376.
- [53] Li Z, Nadon S, Cihlar J, *et al.* Satellite mapping of Canadian boreal forest fires: Evaluation and comparison of algorithms. *Int. J. of Remote Sens.*, 2000, **21**:3071~3082.
- [54] Potter C, Genovese V B, Klooster S, *et al.* Biomass burning losses of carbon estimated from ecosystem modeling and satellite data analysis for the Brazilian Amazon region. *Atmos. Environ.*, 2001, **35**: 1773~1781.
- [55] Barbosa P M, Gregoire J M, Pereira J M C. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. *Remote Sens. Environ.*, 1999, **69**:253~263.
- [56] Shvidenko A, Nilsson S. Fire and the carbon budget of Russian forests. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000. 289~311.
- [57] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO<sub>2</sub> in the United States. *Tellus*, 1999b, **51B**: 414~452.
- [58] Zhuang Q L, McGuire A D, O'Neill K P, *et al.* Modeling soil thermal and carbon dynamics of a fire chronosequence in interior Alaska. *J. Geophys. Res.*, 2003, doi: 10.1029/2001JD001244.
- [59] WRAP (Western Regional Air Partnership). 1996 Fire Emission Inventory, *Prepared by Air Sciences, INC*, 2002
- [60] Cohen J D, Deeming J E. The National Fire-Danger Rating System: Basic equations. *USDA Forest Service, Report PSW-82*, 1995.
- [61] Burgan R E, Klaver RW, Klaver J M. Fuel models and fire potential from satellite and surface observations, *Int. J. Wildland Fire*, 1998, **8**:159~170.
- [62] Bourgeau-Chavez L L, Kasischke E S, Mudd J P, *et al.* Characteristics of forest ecozones in the North American boreal regions. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000a. 258~273.
- [63] Aber J, Melillo J M. *Terrestrial Ecosystems*. Academic Press, San Diego, USA, 2001.
- [64] Kasischke E S. Boreal ecosystem in the global cycle. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*. New York: Springer, 2000c. 19~30.
- [65] Song C, Woodcock E C. A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and landuse history, *Ecol. Model.*, 2003, **164**: 33~47.
- [66] Gower S T, McMurtrie R E, Murty D. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes, *Trends in Ecology & Evolution*, 1996, **11**: 378~382.
- [67] Murty D, McMurtrie R E. The decline of forest productivity as stands age: a model-based method for analysing causes for the decline. *Ecol. Model.*, 2000, **134**: 185~205.
- [68] Peng C H, Apps M J. Modeling the response of net primary productivity (NPP) of boreal forest ecosystems to changes in climate and fire disturbance regimes. *Ecol. Model.*, 1999, **122**:175~193.
- [69] Harden J W, Trumbore S E, Stocks B J, *et al.* The role of fire in the boreal carbon budget. *Glob. Change Biol.*, 2000, **6**:174~184.
- [70] Gamon J A, Field C B, Goulden M L, *et al.* Relations between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecol. Appl.*, 1995, **5**: 28~41.
- [71] Díaz-Delgado R, Pons X. Spatial patterns of forest fires in Catalonia (NE of Spain) along the period 1975-1995 Analysis of vegetation recovery after fire. *For. Ecol. Manage.*, 2001, **147**:67~74.
- [72] Viedma O, Meliá J, Segarra D, *et al.* Modeling rates of ecosystem recovery after fires by using landsat TM data, *Remote Sens. Environ.*, 1997, **61**:383~398.
- [73] Kasischke E S, French N H F. Constraints on using AVHRR composite index imagery to study patterns of vegetation cover in boreal forests. *Int. J. Remote Sens.*, 1997, **18**:2403~2426.
- [74] Amiro B D, MacPherson J I, Desjardins R L. BOREAS flight measurements of forest-fire effects on carbon dioxide and energy fluxes, *Agri. For. Meteorol.*, 1999, **96**:199~208.
- [75] Andersson M, Michelsen A, Jensen M, *et al.* Tropical savannah woodland: effects of experimental fire on soil microorganisms and soil emissions of carbon dioxide, *Soil Biol. Biochem.*, 2004, **36**: 849~858.
- [76] Neary D G, Klopatek C C, DeBano L F, *et al.* Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *For. Ecol. Manage.*, 1999, **122**: 51~71.
- [77] Christensen N L. The effect of fire on physical and chemical properties of soil in Mediterranean-climate shrubland. In: Moreno J M, Oechel W C eds. *The Role of Fire in Mediterranean-type Ecosystems, Ecological Studies*, 1994. 79~ 95.
- [78] Wüthrich C, Schaub D, Weber M, *et al.* Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland, *Catena*, 2002, **48**:201~215.

- [79] Sawamoto T, Hatano R, Yajima T, *et al.* Soil respiration in Siberian taiga ecosystems with different histories of forest fire. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, **46**: 31~42.
- [80] Wiseman P E, Seiler J R. Soil CO<sub>2</sub> efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *For. Ecol. Manage.*, 2004, **192**: 297~311.
- [81] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* Climatic and biotic controls on annual carbon storage in Amazonian ecosystems. *Glob. Ecol. Biogeography*, 2000, **9**: 315~336.
- [82] Rapalee G, Trumbore S E, Davidson E A, *et al.* Estimating soil carbon stocks and fluxes in a boreal forest landscape. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 1998, **12**:687~701.
- [83] Grissom P, Alexander M E, Cella B, *et al.* Effects of Climate Change on Management and Policy: Mitigation Options in the North American Boreal Forest. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000. 85~101.
- [84] Carter M C, Foster C D. Prescribed burning and productivity in southern pine forests: a review. *For. Ecol. Manage.*, 2004, **191**: 93~109.
- [85] Kasischke E S, French N H F, O'Neill K P, *et al.* Influence of fire on long-term patterns of forest succession in Alaskan boreal forests. In: Kasischke E S, Stocks B J eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*, New York: Springer, 2000d. 214~235.
- [86] Chen W, Chen J, Cihlar J. An integrated terrestrial ecosystem carbon-budget model based on changes in disturbance, climate, and atmospheric chemistry. *Ecol. Model.*, 2000, **135**: 55~79.
- [87] Lucht W, Prentice I C, Myneni R B, *et al.* Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 2002, **296**, 1687~1689.
- [88] Keane R E, Ryan K C, Running S W. Simulating effects of fire on northern Rocky Mountain landscapes with the ecological process model FIRE-BGC. *Tree Physiol.*, 1996, **16**: 319~331.
- [89] Tian H, Hall C A S, Qi Y. Modeling primary productivity of the terrestrial biosphere in changing environments: Toward a Dynamic Biosphere Model. *Critical Review in Plant Sciences*, 1998a, **17**(5):541~557.
- [90] Tian H. Dynamics of the terrestrial biosphere in changing global environments: Data, models, and validation. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**:378~388.
- [91] Schimel D, Melillo J, Tian H, *et al.* Contribution of increasing CO<sub>2</sub> and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 2000, **287**, 2004~2006.
- [92] Paul K I, Polglase P J, Smethurst P J, *et al.* Soil temperature under forests: a simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. *Agri. For. Meteorol.*, 2004, **121**: 167~182.
- [93] Kang S, Kim S, Oh S, *et al.* Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. *For. Ecol. Manage.*, 2000, **136**:173~184.

#### 参考文献:

- [16] 王效科, 庄亚辉, 冯宗炜. 森林火灾释放的含碳温室气体量的估计. *环境科学进展*, 1998, **6**(4): 1~15.
- [21] 田晓瑞, 舒立福, 王明玉. 1991~2000年中国森林火灾直接释放碳量估算. *火灾科学*, 2003, **12**(1):6~10.
- [90] 田汉勤. 陆地生物圈动态模式:生态系统模拟的发展趋势. *地理学报*, 2002, **57**: 378~388.