气候变化、火干扰与生态系统生产力

吕爱锋^{1 3} 田汉勤^{2 *}

(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 生态系统与区域研究实验室 奥本 AL36849 美国) (3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 综述了气候变化、火干扰与生态系统生产力之间的相互作用关系以及目前相关的研究进展。侧重介绍了气候变化与火干扰之间的相互作用关系以及火干扰对生态系统生产力的影响。气候变化通过作用于可燃物质数量、湿度和火灾天气来影响火干扰的发生频率和强度,而火干扰过程释放大量温室气体和烟尘物质反过来也会对气候变化产生影响。另外,火干扰过程改变了火烧迹地的土壤生物地球化学性质、养分循环和分配以及大气组成,进而对生态系统对 CO₂ 的吸收能力产生影响。正确理解三者之间的逻辑关系,对于我们有效地利用火管理提高区域生态系统碳吸收,减少碳排放,减缓全球变化速率,都具有重要的指导意义。

关键词 气候变化 火干扰 生态系统生产力 火管理

INTERACTION AMONG CLIMATIC CHANGE, FIRE DISTURBANCE AND ECOSYSTEM PRODUCTIVITY

LÜ Ai-Feng^{1 3} and TIAN Han-Qin^{2 *}

¹ Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China, ² Ecosystem Science and Regional Analysis Laboratory, School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, Auburn AL36849, USA, and ³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract There are complex interactions among climatic change, fire disturbance, and ecosystem productivity. Fire disturbance could change the biogeochemical properties of soil and ecosystem structure, nutrient cycle and distribution as well as atmospheric composition and then influence ecosystem productivity; additionally, fire-induced emission can change the atmospheric composition and hence impacts the climate system; climate warming could alter the properties of fuel load and increase the frequency of fire-weather, and then in turn, influences regional fire regime.

In order to evaluate the impact of global change on ecosystem productivity comprehensively, it is essential to fully understand this complex interaction.

In this paper, we have reviewed the mechanisms of the interactions among global change, fire disturbance, and ecosystem productivity. Four critical issues have been explored: 1) methods used for constructing time sequence of fire information, 2) interaction between fire disturbance and global climate change, 3) interaction between fire disturbance and ecosystem productivity, and 4) changing fire management strategy in response to global change.

The comprehensive understanding of the complex interaction will be an important basis for further study how ecosystem pattern and process respond global change.

Key words global change, fire disturbance, ecosystem productivity, fire management

近些年来,火干扰与全球气候变化之间的相互作用关系引起了人们日益广泛的关注。气候变化框架公约以及《京都议定书》的签订使得政府决策层开始关注生物物质燃烧与大气中温室气体浓度变化之间的关系,而 1997 ~ 1998 年间极端气候事件所引起的印度尼西亚、巴西、澳大利亚的特大火灾,使得两

者之间的关系得到了空前的关注(Innes, 2000)。

气候系统不仅为火干扰的发生、发展提供了直接的天气条件,而且间接影响火干扰发生所需要的燃料物质。火干扰过程中生物物质燃烧所释放的大量温室气体和颗粒物质以及受干扰地表对区域辐射平衡和气候变化都具有重要影响(Moraes *et al.*, ,

收稿日期:2006-11-15 接受日期:2006-12-20

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 交叉学科计划资助项目(NNG04GM39C)和美国能源部全球变化资助项目(DUKE UN-07-SC-NICCR-1016)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: tianhan@auburn.edu

2004)。生物物质燃烧是大气中温室气体(如 CO_2 、 CH_4 、 N_2O)和颗粒物质的主要来源(Crutzen *et al.*, 1979)。温室气体对太阳辐射具有很高的透射率,同时又能强烈地吸收地表发射的长波辐射,从而减少了地表能量的流失,进而起到“地球温室”的作用。大气中的颗粒物质不仅本身可以直接对太阳辐射进行反射、吸收和散射,减少地气系统的能量输入,而且作为大气中的凝结核,对云层的形成、改变地表的辐射平衡也起到重要作用。火干扰造成的温室气体和颗粒物质浓度的升高,能够影响局部地区乃至全球范围内的气候系统。不同尺度上生物物质燃烧释放的温室气体和颗粒物质估算研究的迅速开展,为火干扰与气候变化的相互关系研究提供了数据基础(Crutzen *et al.*, 1979; Andreae & Merlet, 2001; Lü *et al.*, 2006)。但是,随着对生态系统碳过程研究的不断深入,人们逐渐认识到,火干扰不仅仅增加了大气中温室气体和颗粒物质输入,同时由于其打破原有系统的物质循环,改变系统的生物地球化学性质,进而影响了生态系统对于大气中主要温室气体 CO_2 的吸收能力。因此,在评价火干扰与全球气候变化之间的相互作用关系时,我们不能单纯地考虑火干扰造成的物质排放,而应该考虑其所引起的物质排放与吸收之间的平衡。综合评价火干扰在生态系统过程中的作用对于我们研究、控制和利用火干扰都具有重要的指导意义。在长时间尺度上,当火干扰频率和强度处于稳定状态的前提下,生态系统的自身恢复会补偿火干扰过程中燃烧释放的碳量,最终达到碳吸收和释放的平衡(Crutzen & Andreae, 1990)。但是,全球气候变化的加速使得火干扰有不断增强的趋势(Flannigan & van Wagner, 1991; Wotton & Flannigan, 1993; Conard *et al.*, 2002)。因此,认识和理解火干扰、全球气候变化与生态系统生产力三者之间的相互作用机理是分析和预测未来气温和降水等气候要素时空格局变化以及这种变化所引起的火势(Fire regime)改变的关键问题。

1 火干扰与全球气候变化

1.1 火干扰信息的获取方式

火干扰所具有的偶然性和短暂性是其区别于其它生态过程的鲜明特点。这一特点决定了对火干扰的描述不能用一般生态过程所用的变化率,而只能用频率、周期等长时间尺度概念来描述。另外,由于火势是气候特征、大气组成、可燃物质属性以及人类活动共同作用的结果。因此,单纯从目前的生态环

境条件很难反演过去和预测未来的火干扰情形(Clark & Robinson, 1993)。定量评价火干扰与生态系统生产力、全球变化之间的相互作用关系,需要有较为详细的长时间序列的火干扰时空信息为基础。目前获取火干扰信息的方法主要可以归纳为3类:重建、观测、模拟。重建主要是针对于人类历史以前或者无火灾记录区域干扰信息的获取。重建通过分析火疤木年轮、土壤中的碳粒、沉积层中的烟尘,以及现存植被的年龄组成及空间分布的信息来推测历史时期火干扰的频率和强度等信息(徐化成等, 1997; Bird & Cali, 1998; Tinner *et al.*, 1999; Niklasson & Drakenberg, 2001; Flannigan *et al.*, 2001)。观测是从有火灾文字记载起到目前主要的干扰信息获取方式。通常观测是一种政府行为,在区域上进行干扰信息的获取和记录,这种信息通常缺乏详细的空间信息(吕爱锋等, 2005)。随着学术界对火干扰、生态环境和大气组成之间关系研究的不断深入,对火干扰信息时空分辨率的要求也越来越高。遥感方法的出现为获取火干扰时空信息提供了方便、经济的手段(Cochrane, 2003)。近年来,各种遥感平台与算法在火干扰信息获取中得到了广泛、有效的应用(Li *et al.*, 2001)。虽然这些平台和算法由于各自的局限性,都存在着一定的误差(Li *et al.*, 2001),但是不断出现的新的遥感平台和算法,将会大大提高基于遥感获取火干扰信息的精度(Cochrane, 2003)。模拟方法主要应用于未来全球变化背景下火干扰信息的获取。通过构建火干扰发生和行为模型,结合未来全球变化情景,来模拟未来的火势信息(Flannigan *et al.*, 2001; Brown *et al.*, 2004),为政府决策和科学研究提供依据和指导。在实际应用中3种方法并不是截然独立的,而是相互补充,集成应用的。政府统计资料可以验证基于遥感的信息,而重建资料和观测数据可以用来对模拟方法进行辅助建模和验证。3种方法的集成应用,将会为火干扰的相关研究提供强有力的数据支持。

1.2 全球气候变化对火干扰的影响

大量研究表明,气候与火干扰之间存在着紧密的内在联系(Kasischke & Bruhwiler, 2003),气候变化可以引起火势的改变。气候变化所引起的温暖、干燥的天气以及雷电数量的增加会导致火干扰数量的增多。即使随着人口数量的不断增加,人类活动对火势影响日益加强,气候仍然是火势变化的主导因素。从某种意义上讲,气候变化可以增强或减弱人为因素的影响(Swetnam & Betancourt, 1998)。气候

变化通过作用于可燃物质性质和火灾天气来影响火干扰(Overpeck *et al.* , 1990 ; Price & Rind , 1994a , 1994b ; Fosberg *et al.* , 1996 ; Brown *et al.* , 2004 ; Larjavaara *et al.* , 2004)。首先 ,全球气候变化会影响森林生物量的累积速率 ,改变可燃物质的供给(Li *et al.* , 2000)。另外 ,全球气候变暖所导致的植被带北移过程中 ,由于不能适应新的环境所导致的植被死亡 ,立地更替 ,将会导致大量可燃物质的累积(Martin , 1993)。同时 ,随着全球气候变暖 ,其它干扰形式的发生频率也会相应升高(Dale *et al.* , 2001) ,如虫害、大风和洪灾等 ,也会造成大量的植被死亡 ,为火干扰提供了物质基础。气温升高 ,植被蒸发的增大 ,使得地表物质含水量不断降低 ,使得这些可燃物质的易燃性不断升高。全球气温、降雨格局的改变使得干旱、强风和自然火源等火灾性天气的出现频率不断升高(Overpeck *et al.* , 1990)。地表温度的升高 ,地气之间对流的增强 ,大大提高了发生雷击的几率(Price & Rind , 1994a , 1994b ; Fosberg *et al.* , 1996)。

伴随着雷击数量的增多 ,雷击火源也会越来越多。在美国 ,雷击频率的增加使得着火点数量增加了约 40%(Price & Rind , 1994a)。同时 ,人口数量的不断增大 ,道路的延伸 ,生态系统的开发强度加大 ,也为火干扰提供了大量的人为火源(Cochrane , 2003)。火源的增加 ,可燃物质的不断累积 ,火灾性天气的频繁出现 ,使得火干扰发生的频率不断升高。而且温度升高 ,大气运动更加活跃 ,大风的发生几率也会随之升高(Berz , 1993)。大风是发生高强度火干扰的主要动力源之一。另外 ,全球变化背景下 ,气候异常年份的不断出现 ,也对火干扰产生重大影响(Langenfelds *et al.* , 2002 ; van der Werf *et al.* , 2004 ; Brown *et al.* , 2004)。1997 ~ 1998 年是过去 150 年间厄尔尼诺现象表现最强的年份 ,持续的干旱使得全球火干扰数量和强度大幅度上升(Page *et al.* , 2002 ; van der Werf *et al.* , 2004) ,印度尼西亚、巴西和澳大利亚等地都发生了高强度的火灾。1972 年 ,在印度尼西亚和巴西大约有 500 万公顷的森林和灌木受到火干扰的影响(Associate Press , 1997)。异常干旱年份使得生态系统具备发生大规模火干扰的物质和气候条件 ,而异常湿润年份对于火干扰也具有同样重要的作用。对于处在干旱环境下的荒漠等植被稀少的区域 ,异常湿润的气候使得地表生物量快速积累 ,当恢复到原来干旱气候时 ,火干扰发生的几率也会增大(Brown *et al.* , 2004)。

总之 ,伴随着全球气候变化的不断加剧 ,火干扰频率也将随之升高、受干扰面积相应扩大、干扰强度不断加大、火灾季节也增长和提前(Flannigan & van Wagne , 1991 ; Wotton & Flannigan , 1993 ; Stock *et al.* , 1998 ; Conard *et al.* , 2002)。尽管火灾监测和防火技术不断加强 ,20 世纪 70 ~ 90 年代 20 年间 ,随着气候不断变暖 ,北美西部北方森林地区火干扰面积增加了 1 倍(从 0.28% 增加到 0.57%)(Kasischke *et al.* , 1999)。通过模拟研究表明 ,未来 CO₂ 浓度增倍场景下 ,加拿大西部的受干扰面积将会增加大约 75%(Li *et al.* , 2000 ; Flannigan *et al.* , 2000)。同样的趋势也存在于欧亚北方森林地区(Shvidenko & Nilsson , 1994 ; Kasischke *et al.* , 1999)。Flannigan 和 van Wagne(1991)研究表明 ,在全球变暖的背景下 ,北方森林的火灾频率将会增加大约 40%。相应的 ,全球变暖将使北方森林的火灾季节长度增加 20% ~ 30% ,起始时间提前至 3 月 ,并延长至 9 月 ,将有更多的地区处于高火险等级下(Wotton & Flannigan , 1993 ; Stocks *et al.* , 1998 ; Li *et al.* , 2000)。Conard 等(2002)认为随着生态系统面对的全球变化压力不断增大 ,未来火干扰的强度和影响面积将大幅度升高。大量高强度火干扰的发生 ,也将使得防火部门面临巨大的挑战。

1.3 火干扰对气候变化的影响

全球气候变化使得火干扰呈现不断增强的趋势 ,而火干扰反过来也会影响全球气候变化。火干扰过程中生物物质燃烧所释放的痕量气体(CO₂、CO、CH₄、NO_x 等)和以有机物和颗粒碳为主的烟尘物对空气质量、大气化学组成、光化学以及气候都具有很强作用(Crutzen *et al.* , 1979 ; Delany *et al.* , 1985 ; Crutzen & Andreae , 1990 ; Andreae & Merlet , 2001 ; Langenfelds *et al.* , 2002)。由于这些物质具有很强的空间运移性 ,使得局部干扰的影响会波及到区域、洲际乃至全球(Crutzen & Andreae , 1990 ; Wotawa & Trainer , 2000)。CO₂、CH₄ 和 N₂O 作为主要的温室气体 ,其浓度的变化对于全球气候变化具有重要影响(Ramanathan *et al.* , 1985)。从工业革命开始 ,随着化石燃料大量的应用 ,大气中的 CO₂、CH₄ 等温室气体的浓度不断升高 ,但是增长的速率存在着明显的年际变化(Zimov *et al.* , 1999 ; Langenfelds *et al.* , 2002)。为了更好地预测未来温室气体浓度变化及其导致的温度变化 ,我们必须理解和认识造成这种年际波动的原因。通常 ,人们认为陆地生态系统光合作用与呼吸作用的差值导致了 CO₂ 浓度增

长率的年际和季节的变化。但是,Langenfelds 等(2002)在研究 1992~1999 年大气主要气体浓度变化时发现,这些气体浓度变化幅度与火干扰具有很高的相关性。火干扰过程中生物物质燃烧所释放的温室气体对大气中温室气体浓度的变化起到了重要作用(Crutzen *et al.*, 1979; Crutzen & Andreae, 1990; Andreae & Merlet, 2001; Langenfelds *et al.*, 2002)。全球每年火干扰造成的生物物质燃烧释放大约 $8.2 \text{ Pg CO}_2 \cdot \text{a}^{-1}$ 到大气中(Crutzen *et al.*, 1979; Andreae & Merlet, 2001),这相当于每年化石燃料燃烧释放量的 35%(IPCC, 2001)。另外,生物物质燃烧还释放另一种主要的温室气体 CH_4 。火干扰所引起的 CH_4 排放量大约为 $2.5 \sim 19.4 \text{ Tg CH}_4 \cdot \text{a}^{-1}$ (Crutzen *et al.*, 1979; Andreae & Merlet, 2001),相当于全球 CH_4 年排放量的 8%~10%(Crutzen & Andreae, 1990; Laursen *et al.*, 1992)。另一种温室气体 N_2O 的全球火干扰排放量大约为 $1.1 \sim 1.3 \text{ Tg N}_2\text{O} \cdot \text{a}^{-1}$ (Crutzen *et al.*, 1979; Andreae & Merlet, 2001)。随着全球气候变暖,极端气候事件的不断出现,火干扰频率和强度的不断增强,生物物质燃烧所释放的温室气体量也将会大幅度增加。1997 年的印度尼西亚森林大火释放了大约 $0.81 \sim 2.57 \text{ Pg}$ 的碳到大气中(Page *et al.*, 2002),使得大气中 CO_2 浓度增长率比往年增长了两倍左右(Schimel & Baker, 2002)。

生物物质燃烧过程同时也会产生大量的烟尘物质,这些物质通常由有机物质和石墨组成。烟尘以及其作为云结核(Cloud condensation nuclei, CCN)形成的云能改变地表的辐射平衡,从而对气候系统产生直接影响(Crutzen & Andreae, 1990)。烟尘颗粒通常会散射或者反射太阳辐射,从而减少到达地表的辐射量,使得地表温度降低(Robock, 1988)。全球每年火干扰所产生的烟尘物质大约可以使地表接收的能量减少 $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Dickinson, 1993)。Robock(1988)在研究加利福尼亚北部森林火灾时发现,大量烟尘使得该地区地表温度大幅度降低,而这种地表温度低,空气温度高的逆温现象使得烟尘不断积聚,不易扩散,致使地表在火干扰后 3 周内都保持较低温度。另外,石墨颗粒对太阳辐射具有很强的吸收能力,从而使空气温度升高,而到达地表的辐射能减少。这种影响就使得地表温度降低,而对流层底部气温升高,从而在地表附近形成稳定的空气层,利于云的形成(Robock, 1988; Crutzen & Andreae, 1990)。生物物质产生的烟尘是大气中云结核的主要来源之一(Hobbs & Radke, 1969)。不断增加的 CCN 会影响到

云的粒子物理学特性,改变云层的反射率,进而改变陆地的辐射平衡。CCN 数量越多,形成的水滴(Cloud droplets)就越多,水滴的尺寸就越小。含有大量小尺寸水滴的云层就会反射更多的太阳辐射(Crutzen & Andreae, 1990)。Kaufman 和 Fraser(1997)在对亚马逊地区 1987 年火灾季节的烟尘颗粒进行研究时发现,烟尘物质使得云滴粒径从 $14 \mu\text{m}$ 降到 $9 \mu\text{m}$,同时反射率从 0.35 升高到 0.45。而且这种小尺寸水滴形成的云层形成降雨的可能性通常较小,而云层的覆盖范围也会逐渐变大。由于云层是控制地表热量平衡的重要因子,因此云层性质在大尺度上的改变,势必会对区域气候产生影响(Crutzen & Andreae, 1990)。

2 火干扰与生态系统生产力

陆地生态系统生产力是描述区域碳吸收能力的一个主要指标。作为陆地生态系统重要的干扰形式之一,火干扰剧烈地改变了生态系统原有的格局与过程。它改变了土壤的生物物理化学性质,影响系统的养分循环和物质分配,进而对生态系统生产力产生重要影响。另外,火干扰所引起的大气化学性质的改变,也对生态系统生产力产生重要的作用。理解干扰环境下生态系统生产力的变化对评价火干扰对大气痕量气体浓度(如 CO_2)以及气候变化的影响都具有重要意义。

2.1 火干扰对土壤性质的影响

土壤是生态系统水文与生物地球化学等重要过程的载体,它为生态系统地上、地下生产力提供了水分和养分的保证。土壤的生物物理化学属性和过程对生态系统生产力以及生态系统的可持续发展具有直接影响(Nearby *et al.*, 1999)。火干扰改变了土壤的生物物理化学属性,进而间接地对生态系统生产力产生影响(吕爱锋等, 2005)。

火干扰打破了大气-植被-地表凋落物-土壤之间的水热平衡,进而改变了土壤的水热状况(Ogee & Brunet, 2002)。首先,具有热绝缘性质的地表凋落物和土壤表层有机物在燃烧中被消耗,使得更多的地表热量能够传输到土壤。同时凋落物蒸散的降低也使得热量消耗减少(O'Neil *et al.*, 2003)。其次,植被冠层的破坏或者完全去除,使得更多的太阳辐射能量透过冠层到达地表。研究表明,在受到火干扰的区域,有大于 90% 的太阳辐射到达地表(Kasischke *et al.*, 1995)。最后,生物物质燃烧残留的黑色灰烬具有低反射率和高吸收率(Nearby *et al.*, 1999)。

上述 3 种因素的综合作用,使得受干扰区域的土壤温度在一定时间内高于未干扰区域(Amiro *et al.* , 1999 ;O'Neil *et al.* , 2003)。 Amiro 等(1999)在 BORE-AS 试验中发现,干扰迹地或者树龄较小立地的地表温度较成熟立地高 6 ℃,而且这种情况可以持续 15 年。地表物质的消耗和冠层的破坏同时也影响到土壤、冠层的蒸发和蒸散等水分交换过程,进而对土壤水分产生影响(Neary *et al.* , 1999 ; Zhuang *et al.* , 2003)。

生物物质燃烧所残留于地表的含有碱性离子的灰烬会使得土壤 pH 值升高(Christensen , 1994 ;Pardini *et al.* , 2004)。火干扰对土壤微生物的影响可以分为直接影响和间接影响两部分。火灾过程中,一部分土壤微生物会被高温杀死,从而使得土壤微生物短时间内数量减少(Adersson *et al.* , 2004)。干扰后土壤温度升高、土壤 pH 值升高以及灰烬中所含的大量营养物质会刺激土壤微生物的数量和活性在干扰后一段时间内迅速升高(Neary *et al.* , 1999 ; Fioretto *et al.* , 2002)。同时,由于不同微生物种类抗高温的能力不同,火干扰条件下不同微生物的响应各异,进而改变了微生物的群落结构。微生物数量、活性和群落结构对于土壤中的有机质分解和养分供应都具有重要作用(Neary *et al.* , 1999 ; Fioretto *et al.* , 2002)。综上所述,土壤生物物理化学性质的改变会影响到土壤有机质的分解和矿化,对迹地的养分循环产生重要影响。

2.2 火干扰对生态系统养分循环的影响

养分是生态系统生产力的限制因素。从某种意义上讲,营养元素的多少决定了在适宜的水热条件下系统能否达到最高的生产力水平。火干扰改变了生态系统的养分循环,并对系统的养分进行了重新分配,从而会对受干扰区域的生产力以及系统恢复产生影响。生物物质燃烧使得大量的营养物质以气体和烟尘的形式释放到大气中,造成系统养分的流失。全球每年大约有 20 ~ 36 Tg N·a⁻¹通过生物物质燃烧释放到大气中,这相当于每年有大约 20% 的生物固氮量(Levine *et al.* , 1996)或者 30% 左右的人工氮肥返回到大气中。

燃烧结束后,干扰区域会残留大量的灰烬和死亡植物体。灰烬物质是有机物质经过燃烧和高温加热而形成的易被植被吸收的无机养分形式,这对于植被的快速恢复是有利的。火干扰后,适宜的生物物理化学条件加速了残留物质的分解(本文 2.1 部分),这也为植被的生长提供了养分来源。因此,在

许多研究中发现,火灾后,尽管系统的氮储量总体减少,但是可利用氮却会在短时间内增长(Driscoll *et al.* , 1999 ; Brais *et al.* , 2000)。相应的,干扰区域会表现出较高的生产力。

除了营养元素以气体和烟尘的形式排放到大气中,风力和水力搬运也是干扰区域养分流失的重要途径之一。生态系统受到火干扰后,地表残留的灰烬、颗粒物质以及植被残骸易被风和水搬运,而损失的数量主要取决于干扰后的天气以及降雨事件所导致的地表径流和侵蚀的强度(Macadam , 1989)。水力侵蚀是生态系统地表有机物和土壤养分流失的主要途径之一(Thomas *et al.* , 1999)。大量研究表明,火干扰对生态系统土壤性质和水分传输过程的改变(Neary *et al.* , 1999 ; Martin & Moody , 2001 ; Wondzell & King , 2003 ; Pardini *et al.* , 2004)会加速土壤的侵蚀过程(Martin & Moody , 2001 ; Meyer *et al.* , 2001 ; Pardini *et al.* , 2004)。植被冠层的破坏降低了冠层对降水的截流以及蒸发,从而使更多的降水参与到产流过程。同时,大量地表物质的消耗,降低了其对降水的吸收、储存和缓冲作用。另外,干扰迹地表面大量的细小灰烬容易堵塞土壤孔隙,加之雨点对裸露土壤的压实作用,使得土壤的渗水性降低(Neary *et al.* , 1999 ; Martin & Moody , 2001)。伴随着产流效率的升高,加之土壤渗水性的降低,发生超渗产流的几率也就大大增加了。而超渗产流是驱动土壤侵蚀的主要机制之一(Wondzell & King , 2003)。地表凋落物和地表植被的去除造成的地表糙力减少也是火干扰后迹地土壤侵蚀增强的原因之一(Martin & Moody , 2001)。含有大量养分的无着附灰烬会在地表被水流侵蚀、搬运,造成迹地养分大量流失(Thomas *et al.* , 1999),生态系统生产力也相应降低,减缓了植物再生进程(Pardini *et al.* , 2004)。尤其是火干扰后高强度的降雨会使大部分的土壤被搬运,甚至会破坏迹地的种子资源,从而导致生态系统的原生演替。

2.3 生物物质燃烧对大气化学性质的影响及其生态效应

火干扰过程中生物物质燃烧是大气中痕量气体和烟尘物质的主要来源之一(Crutzen & Andreae , 1990)。这些气体和颗粒物质,能够改变大气化学性质和辐射平衡,进而对生态系统生产力产生影响。生物物质燃烧对大气化学性质的影响主要表现在:增加了对流层中温室气体(CO₂、CH₄、N₂O 等)以及臭氧的浓度;NO 经过化学反应产生的硝酸(HNO₃)是

近些年来增长最快的酸雨成分,烟尘物质是大气中重要的云凝结核(CCN)。大气化学性质的变化同时能够影响地气之间的能量传输,进而对辐射平衡产生影响。

CO₂是植物进行光合作用的主要原料之一,其浓度的变化能够直接影响到叶片内CO₂浓度,从而间接影响叶片气孔导度以及水分蒸散,进而改变生态系统生产力。研究表明,大气CO₂浓度升高,会提高植被对CO₂的吸收,减少植被水分蒸散,从而提高生态系统生产力(Tian *et al.*, 1999, 2003)。火干扰过程中生物物质燃烧是大气中CO₂主要重要来源(本文2.3部分)。火干扰与大气中CO₂浓度变化具有很强的相关性(Langenheds *et al.*, 2002)。CO₂浓度的升高,势必会对光合作用产生影响。但迄今为止,火源CO₂对生产力影响的研究还处在定性阶段。

另外,我们在研究大气化学性质改变对生态系统功能的影响时,往往忽略了一种重要的气体——臭氧(O₃)。O₃作为主要的污染气体,其对植物的危害以及对生产力的破坏已经引起了广泛的关注(任巍和田汉勤, 2007)。O₃对植物的危害主要表现在两个方面:一种是短时间内植被暴露于高浓度O₃中,会造成植物细胞壁损害、细胞死亡和组织坏疽等急性伤害症状,第二种是植被长期处于较高O₃浓度状态下,危害程度取决于气孔与周围生物、非生物因素的相互作用(Sander mann *et al.*, 1997)。生物物质燃烧释放的CH₄、CO和其它碳氢化合物等活性气体在对流层中经过复杂的光化学反应可以产生大量的O₃,从而导致O₃的浓度短期内突然升高(Delany *et al.*, 1985; Levine *et al.*, 1985; Andreae *et al.*, 1988; Thompson *et al.*, 2001)。Lacaux等(1993)在对热带非洲地区火灾季节与非火灾季节的对流层臭氧浓度的研究中发现,前者比后者高了近50%。Granier等(2000)研究表明,火干扰强烈的地区(如非洲和南美洲)生物物质燃烧导致O₃浓度升高约17%,而火干扰较弱地区,这一比例仅为4%~8%。由于O₃是生物物质燃烧的次级产物,目前对于它的估算还不是很成熟。加之O₃对生产力的影响机理研究尚未成熟,使得生物物质燃烧引起的O₃浓度变化对生产力的影响研究还未深入开展。

NO是生物物质燃烧释放的主要含氮活性气体之一,它在大气中会发生氧化反应产生硝酸,而硝酸是近些年来增长最迅速的酸雨成分之一。含氮降水是生态系统氮输入的主要过程之一(吕超群等, 2007)。但当降水的酸性超过一定值就会危害植物

健康,降低生态系统的生产力水平。另外,含不同营养物质的烟尘物质的异地沉降对生态系统养分平衡也具有较大影响。

如前所述,火干扰改变了土壤的生物地球化学性质、生态系统养分循环以及大气化学性质,这些改变都会对生态系统生产力产生影响。吕爱锋等(2005)对火干扰对生态系统生产力的影响、研究方法进行了详细的总结。不同的研究(应用不同的研究方法)都表明,火干扰后,迹地生态系统的生产力会迅速升高(Hicke *et al.*, 2003; Amiro *et al.*, 2003; Bond-Lamberty *et al.*, 2004),但当恢复到一定年份后则会出现降低的现象(Gower *et al.*, 1996; Song & Woodcock, 2003)。

3 全球气候变化背景下的火管理

全球变化、火干扰与生态系统生产力之间存在着因果循环关系。在全球变化背景下,火干扰的频率和强度将会增大,碳过程和碳收支将受到更强烈的干扰,生产力受到更严重的破坏,释放到大气中的CO₂量将会升高。日益严峻的火干扰形式对火管理提出了更高的要求。合理的火管理能够通过三者之间的反馈机制有效地减缓全球变化进程。目前火管理方式主要分为两种:防火(Fire suppression)与控制性火烧(Prescribed fire)。防火是防止火灾发生、降低火灾强度、减少干扰影响的有效管理方式。成功的防火措施能够有效地延长火灾轮回周期(Ward & Mawdsley, 2000),增加有机物质的累积(Tilman *et al.*, 2000),减少由于生物物质燃烧释放的痕量气体。但是长期的防火措施会使得生态系统的火险等级不断升高,高强度、高破坏性火干扰发生的几率升高(Neary *et al.*, 1999)。这主要是因为:1)防火使得生态系统累积的可燃物质越来越多(Brown *et al.*, 2004);2)长期缺少干扰的影响会使生态系统中抗火物种不断减少(Ward & Mawdsley, 2000)。一旦发生火灾,长期处于防火措施下的区域的火灾强度将非常高,难以得到控制(Stocks, 1991; Brown *et al.*, 2004; Keeley *et al.*, 1999)。Keeley等(1999)在对加利福尼亚灌木丛1910年来的火灾情况进行分析的基础上发现,长期高强度的防火措施,使得该地区的火灾强度、破坏性不断升高。而且随着全球气候的不断变暖,气候极端年份的不断出现,火灾发生的频率不断升高,火灾强度不断增大。在这种情况下,防火也将不再十分有效(Conard *et al.*, 2002),对人力物力的需要也将不断增长(Grissom *et al.*, 2000)。

面对越来越严峻的火灾形势,人们提出了一种新的火管理方式——控制性火烧(Grissom *et al.*, 2000)。控制性火烧是在一定环境条件下,控制性地通过人为点火来去除地表累积物质,减少林下冠层的高度,以降低火险等级的管理方法(Oucalt & Wade, 1999)。控制性火烧通常在地表物质湿度较高,风力偏小的非火灾季节进行。控制性火烧在某种程度上可以实现火灾对生态系统物质循环和森林健康的调节作用(Nearby *et al.*, 1999),并能够有效地控制火灾的灾害性后果。合理地利用控制性火烧不仅会有效地防治高强度火干扰事件的发生,减少痕量气体的排放,而且能够有效地提高生态系统的生产力(Carter & Foster, 2004),对于陆地生态系统碳增汇和控制大气中温室气体的浓度具有积极意义。在许多森林生态系统中,定期发生强度相对较低的地表火对于森林的持续健康发展是有益的,没有这种火灾,燃料累积会越来越多,一旦火灾发生就会迅速发展成林冠火,对森林造成更大破坏。利用控制性火烧作为维持生态系统、防止灾害发生、管理自然资源的重要手段,已经在世界许多国家得到广泛应用。1985~1998年,美国控制性火烧面积大约增加了5倍,从123 000 hm^2 上升到 677 000 hm^2 (Innes, 2000)。可见,控制性火烧已成为一种主要的管理措施。

4 结论与展望

气候变化、火干扰和生态系统碳循环之间存在着复杂的循环因果关系。生物物质燃烧释放了大量的温室气体和烟尘到大气中。温室气体与全球气候变暖有直接的关系,而烟尘又能改变地表的辐射平衡,对区域气候产生影响。另外,火干扰还能通过影响生产力来影响生态系统对 CO_2 的吸收,降低大气中 CO_2 的浓度。同时,气候变化通过影响可燃物质和火灾天气来影响火干扰的强度和频率。在阅读大量文献的基础上,笔者力求详尽地阐述三者之间的关系,但是目前的研究还相对薄弱,有些研究仅仅局限于定性的描述。具体表现在:

1) 对于火干扰对全球气候变化的影响研究滞后,仅限于生物物质燃烧排放温室气体和烟尘物质的估算,没有定量评价这部分增加对全球变化的贡献;

2) 对于火干扰对生态系统生产力的影响大多局限于火干扰对单个因子的改变,而没有综合考虑土壤性质改变、大气化学成分变化以及侵蚀导致的养分损失对生产力的综合影响;

3) 在研究火干扰对大气化学组成影响时,忽略了生态系统恢复过程中对温室气体,尤其是 CO_2 的吸收作用;

4) 小尺度的研究与大区域生态环境问题需求之间的尺度转换研究进展缓慢,大尺度火干扰研究滞后。

火干扰是一个综合的生态过程,它剧烈地改变着生态系统的结构和功能。因此,我们研究火干扰与气候变化、生产力之间的关系时,应该综合考虑三者之间的相互作用机理,而不能单纯从某一方面研究其影响。对三者紧密关系的定量认识将会指导我们合理地利用火管理来协调三者关系。使之朝着稳定和减少大气温室气体浓度,减缓全球变化进程的方向发展。

参 考 文 献

- Amiro BD, MacPherson JI, Desjardins RL (1999). BOREAS flight measurements of forest-fire effects on carbon dioxide and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, 199–208.
- Amiro BD, MacPherson JI, Desjardins RL, Chen JM, Liu J (2003). Post-fire carbon dioxide fluxes in the western Canadian boreal forest: evidence from towers, aircraft and remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 115, 91–107.
- Andersson M, Michelsen A, Jensen M, Kjller A (2004). Tropical savannah woodland: effects of experimental fire on soil microorganisms and soil emissions of carbon dioxide. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 849–858.
- Andreae MO, Merlet P (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 955–966.
- Andreae MO, Browell EV, Gregory GL, Harriss RC, Hill GF, Sachse GW, Talbot RW, Garstang M, Jacob DJ, Torres AL (1988). Biomass-burning emissions and associated haze layer over Amazonia. *Journal of Geophysical Research*, 93, 1509–1527.
- Associate Press (1997). Report Calls 1997 World's Worst Year for Fives. Arizona Republic, Wednesday, December 17.
- Berz GA (1993). Global warming and the insurance industry. *Interdisciplinary Science Reviews*, 18, 120–125.
- Bird MI, Cali JA (1998). A million-year record of fire in sub-Saharan Africa. *Nature*, 394, 767–769.
- Bond-Lamberty B, Wang C, Gower ST (2004). Net primary production and net ecosystem production of a boreal black spruce wildfire chronosequence. *Global Change Biology*, 10, 473–487.
- Brais S, David P, Ouimet R (2000). Impacts of wild fire severity and salvage harvesting on the nutrient balance of jack pine and black spruce boreal stands. *Forest Ecology and Management*, 137, 231–243.

- Brown TJ, Hall BL, Westerling AL (2004). The impact of twenty-first century climate change on wildland fire danger in the western United States: an applications perspective. *Climatic Change*, 62, 365 – 388.
- Carter MC, Foster CD (2004). Prescribed burning and productivity in southern pine forests: a review. *Forest Ecology and Management*, 191, 93 – 109.
- Christensen NL (1994). The effect of fire on physical and chemical properties of soil in Mediterranean-Climatic shrubland. In: Moreno JM, Oechel WC eds. *The Role of Fire in Mediterranean-type Ecosystems*. Springer, New York, 79 – 95.
- Clark JS, Robinson J (1993). Paleoecology of fire, In: Crutzen PJ, Goldammer JG eds. *Fire in Environment: the Ecological, Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires*. John Wiley & Sons, New York, 193 – 214.
- Cochrane MA (2003). Fire science for rain forests. *Nature*, 421, 913 – 919.
- Conard SG, Sukhinin A, Stocks BJ, Cahoon DR, Davidenko EP, Ivanova GA (2002). Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Climatic Change*, 55, 197 – 211.
- Crutzen PJ, Andreae MO (1990). Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 250, 1669 – 1678.
- Cruzen PJ, Heidt LE, Krasnec JP, Pollock WH, Seiler W (1979). Biomass burning as a source of the atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl and COS. *Nature*, 282, 253 – 256.
- Dale VH, Joyce LA, McNulty S, Neilson MP, Ayres MD, Flannigan PJ, Hanson LC, Irland AE, Lugo CJ, Peterson D, Simberloff FJ, Swanson BJ, Stocks, Wotton BM (2001). Climate change and forest disturbance. *BioScience*, 51, 723 – 734.
- Delany AC, Haagensen P, Walters S, Wartburg AF, Crutzen PJ (1985). Photochemically produced ozone in the emissions from large-scale tropical vegetation fires. *Journal of Geophysical Research*, 90, 2425 – 2429.
- Dickinson RE (1993). Effect of fires on global radiation budget through aerosol and cloud properties. In: Crutzen PJ, Goldammer JG eds. *Fire in the Environment: the Ecological, Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 107 – 122.
- Driscoll KG, Arocena JM, Massicotte HB (1999). Post-fire soil nitrogen content and vegetation composition in sub-boreal spruce forests of British Columbia's central interior, Canada. *Forest Ecology and Management*, 121, 227 – 237.
- Fioretto A, Papa S, Aiello M, Merola R, Pellegrino A (2002). Microbial activities in burned and unburned soils in a low shrubland ecosystem. In: Trabaud L, Prodon R eds. *Fire and Biological Processes*. Backhuys Publishers, Leiden, the Netherlands, 151 – 162.
- Flannigan M, Campbell I, Wotton M, Carcaillet C, Richard PJH, Bergeron Y (2001). Future fire in Canada's boreal forest: paleoecology results and general circulation model — regional climate model simulations. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 854 – 864.
- Flannigan MD, Stocks BJ, Wotton BM (2000). Climate change and forest fires. *Science of the Total Environment*, 262, 221 – 229.
- Flannigan MDF, van Wagner CE (1991). Climate change and wildfire in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 21, 66 – 72.
- Fosberg MA, Stocks BJ, Lynham TJ (1996). Risk analysis in strategic planning: fire and climate change in the boreal forest. In: Goldammer JG, Furyaev VV eds. *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 495 – 505.
- Gower ST, McMurtrie RE, Murty D (1996). Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *Trends in Ecology and Evolution*, 11, 378 – 382.
- Granier C, Muller JF, Brasseur G (2000). The impact of biomass burning on the global budget of ozone and ozone precursors. In: Inner JL, Beniston M, Verstraete MM eds. *Biomass Burning and Its Inter-Relationships with the Climate System*, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 69 – 85.
- Grissom P, Alexander ME, Cella B, Cole F, Kurth JT, Malotte NP, Martell DL, Mawdsley W, Roessler J, Quilin R, Ward PC (2000). Effects of climate change on management and policy: mitigation options in the North American boreal forest. In: Kasischke ES, Stocks BJ eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests*, *Ecological Studies Series*. Springer, New York, 85 – 101.
- Hicke JA, Asner GP, Kasischke ES, French NHF, Randerson JT, Collat ZGJ, Stocks BJ, Tucker CJ, Los SO, Field CB (2003). Postfire response of North American boreal forest net primary productivity analyzed with satellite observations. *Global Change Biology*, 9, 1145 – 1157.
- Hobbs PV, Radke LF (1969). Cloud condensation nuclei from a simulated forest fire. *Science*, 163, 279 – 280.
- Innes JL (2000). Biomass burning and climate: an introduction. In: Innes JL, Beniston M, Verstraete MM eds. *Biomass Burning and Its Inter-Relationships with the Climate System*, Kluwer Academic Publisher, the Netherlands, 1 – 13.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 879.
- Kasischke ES, Bergen K, Fennimore R, Sotelo F, Stephens G, Janetos A, Shugart HH (1999). Satellite imagery gives a clear picture of Russia's boreal forest fires. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 80, 141, 147.
- Kasischke ES, Bruhwiler LP (2003). Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8146, doi: 10.1029/2001JD000461.
- Kasischke ES, Christensen NL, Stocks BJ (1995). Fire, global warming, and carbon balance of boreal forest. *Ecological*

- Applications*, 5, 437 – 451.
- Kaufman YJ, Fraser RS (1997). Confirmation of the smoke particles effect on clouds and climate. *Science*, 277, 1636 – 1639.
- Keeley JE, Fotheringham CJ, Morais M (1999). Reexamining fire suppression impacts on brushland fire regimes. *Science*, 284, 1829 – 1832.
- Lacaux JP, Cachier H, Delmas R (1993). Biomass burning in Africa: an overview of its impact on atmospheric chemistry. In: Crutzen PJ, Goldammer JG eds. *Fire in the Environment: the Ecological, Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 157 – 191.
- Langenfelds RL, Francey RJ, Pak BC, Steele LP, Lloyd J, Trudinger CM, Allison CE (2002). Interannual growth rate variations of atmospheric CO₂ and its $\delta^{13}\text{C}$, H₂, CH₄, and CO between 1992 and 1999 linked to biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1048, doi:10.1029/2001GB001466.
- Larjavaara M, Kuuluvainen T, Kansanen H, Veäläinen A (2004). Variation in forest fire ignition probability in Finland. *Silva Fennica*, 38, 253 – 266.
- Laursen KK, Hobbs PV, Radke LF (1992). Some trace gas emissions from North American biomass fires with an assessment of regional and global fluxes from biomass burning. *Journal of Geophysical Research*, 97, 20687 – 20701.
- Levine JS, Coffey WR III, Cahoon Jr DR, Winstead EL, Sebacher DI, Scholes MC, Parsons DAB, Scholes RJ (1996). Biomass burning, biogenic soil emissions, and the global nitrogen budget. In: Levine JS ed. *Biomass Burning and Global Change VI*. The MIT Press, Cambridge, 370 – 380.
- Levine JS, Rinsland CP, Tennille GM (1985). The photochemistry of methane and carbon monoxide in the troposphere in 1950 and 1985. *Nature*, 318, 254 – 257.
- Li C, Flannigan MD, Corns IGW (2000). Influence of potential climate change on forest landscape dynamics of west-central Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1905 – 1912.
- Li Z, Kaufman YJ, Ichoku C, Fraser R, Trishchenko A, Giglio L, Jin J, Yu X (2001). A review of AVHRR-based active fire detection algorithms: principles, limitations, and recommendations. In: Ahern FJ, Goldammer JG, Justice CO eds. *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort*. SPB Academic Publishing, the Hague, the Netherlands, 199 – 225.
- Lü A, Tian H, Liu M, Liu J, Jerry MM (2006). Spatial and temporal patterns of carbon emissions from forest fires in China from 1950 to 2000. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05313, doi:10.1029/2005JD006198.
- Lü AF (吕爱锋), Tian HQ (田汉勤), Liu YQ (刘永强) (2005). State-of-the-art in quantifying fire disturbance and ecosystem carbon cycle. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 2734 – 2743. (in Chinese with English abstract)
- Lü CQ (吕超群), Tian HQ (田汉勤), Huang Y (黄耀) (2007). Ecological effects of increased nitrogen deposition in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 31, 205 – 218. (in Chinese with English abstract)
- Macadam A (1989). Effects of prescribed fire on forest soils. B.C. Ministry of Forests, Smithers, Research Report, 89001-PR.
- Martin DA, Moody JA (2001). Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Process*, 15, 2893 – 2903.
- Martin P (1993). Vegetation responses and feedbacks to climate: a review of models and processes. *Climate Dynamics*, 8, 201 – 210.
- Meyer GA, Pierce JL, Wood SH, Jull AJT (2001). Fire, storms, and erosional events in the Idaho batholith. *Hydrological Processes*, 15, 3025 – 3038.
- Moraes EC, Franchio SH, Rao VB (2004). Effect of biomass burning in Amazonia on climate: a numerical experiment with a statistical-dynamical model. *Journal of Geophysical Research*, 109, D05109, doi: 10.1029/2003JD003800.
- Neary DG, Klopatek CC, DeBano LF, Ffolliott PF (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 122, 51 – 71.
- Niklasson M, Drakenberg B (2001). A 600-year tree-ring fire history from Norra Kvills National Park, southern Sweden: implications for conservation strategies in the hemiboreal zone. *Biological Conservation*, 101, 63 – 71.
- O'Neill KP, Kasischke ES, Richter DD (2003). Seasonal and decadal patterns of soil carbon uptake and emission along an age sequence of burned black spruce stands in interior Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8155 – 8170.
- Ogee J, Brunet YA (2002). Forest floor model for heat and moisture including a litter layer. *Journal of Hydrology*, 255, 212 – 233.
- Oucalt KW, Wade DD (1999). The value of fuel management in reducing wildfire damage. In: *Proceedings of the Conference on Crossing the Millennium: Integrating 23 Spatial Technologies and Ecological Principles for a New Age in Fire Management*, Vol. II. University of Idaho, Moscow, 271 – 274.
- Overpeck JT, Rind D, Goldberg R (1990). Climate-induced changes in forest disturbance and vegetation. *Nature*, 343, 51 – 53.
- Page SE, Siegert F, Rieley JO, Boehm HD, Jaya A, Limin S (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420, 61 – 65.
- Pardini G, Gispert M, Dunjo G (2004). Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Science of the Total Environment*, 328, 237 – 246.
- Price C, Rind D (1994a). Possible implications of global warming change on global lightning distributions and frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 99, 10823.
- Price C, Rind D (1994b). The impact of a 2 × CO₂ climate on lightning-caused fires. *Journal of Climate*, 7, 1484 – 1494.

- Ramanathan V, Cicerone RJ, Singh HB, Kiehl JT (1985). Trace gas trends and their potential role in climate change. *Journal of Geophysical Research*, 90, 5547–5566.
- Ren W (任巍), Tian HQ (田汉勤) (2007). Effects of ozone pollution on terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version) (植物生态学报)*, 31, 219–230. (in Chinese with English abstract)
- Robock A (1988). Enhancement of surface cooling due to forest fire smoke. *Science*, 242, 911–913.
- Sandermann H, Wellburn AR, Heath RL (1997). *Forest Decline and Ozone: a Comparison of Controlled Chamber and Field Experiments*. Springer, Berlin, 400.
- Schimel D, Baker D (2002). The wildfire factor. *Nature*, 420, 29–30.
- Shvidenko A, Nilsson S (1994). What do we know about the Siberian forests? *Ambio*, 23, 396–404.
- Song C, Woodcock EC (2003). A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and landuse history. *Ecological Modelling*, 164, 33–47.
- Stocks BJ (1991). The extent and impact of forest fires in northern circumpolar countries. In: Levine JS ed. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*. The MIT Press, Cambridge, UK, 197–202.
- Stocks BJ, Fosberg MA, Lynham TJ, Mearns L, Wotton BM, Yang Q, Jin JZ, Lawrence K, Hartley GR, Mason JA, McKenney DW (1998). Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forest. *Climatic Change*, 38, 1–13.
- Swetnam TW, Betancourt JL (1998). Mesoscale disturbance and ecological response to decadal climatic variability in the American Southwest. *Journal of Climate*, 11, 3128–3147.
- Thomas AD, Walsh RPD, Shakesby RA (1999). Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal. *Catena*, 36, 283–302.
- Thompson AM, Witte JC, Hudson RD, Guo H, Herman JR, Fujiwara M (2001). Tropical tropospheric ozone and biomass burning. *Science*, 291, 2128–2132.
- Tian H, Melillo JM, Kicklighter DW, McGuire AD, Helfrich III JVK (1999). The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO₂ in the United States. *Tellus*, 51B, 414–452.
- Tian HQ, Melillo JM, Kicklighter DW, Pan SF, Liu SY, McGuire AD, Moore B (2003). Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle. *Global and Planetary Change*, 37, 201–217.
- Tilman D, Reich P, Phillips H, Menton M, Patel A, Vos E, Peterson D, Knops J (2000). Fire suppression and ecosystem carbon storage. *Ecology*, 81, 2680–2685.
- Tinner W, Hubschmid P, Wehrli M, Ammann B, Conedera M (1999). Long-term forest fire ecology and dynamics in southern Switzerland. *Journal of Ecology*, 87, 273–289.
- van der Werf GR, Randerson JT, Collatz GJ, Giglio L, Kasibhatla PS, Arellano AF Jr, Olsen SC, Kasischke ES (2004). Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. *Science*, 303, 73–76.
- Ward PC, Mawdsley W (2000). Fire management in the boreal forests of Canada. In: Kasischke ES, Stocks BJ eds. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series*. Springer, New York, 66–84.
- Wondzell SM, King JG (2003). Post-fire erosional processes in the Pacific Northwest and Rocky Mountain region. *Forest Ecology and Management*, 178, 75–87.
- Wotawa G, Trainer M (2000). The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. *Science*, 228, 324–328.
- Wotton BM, Flannigan MD (1993). Length of the fire season in a changing climate. *Forestry Chronicle*, 69, 187–192.
- Xu HC (徐化成), Li ZD (李湛东), Qiu Y (邱扬) (1997). Fire disturbance history in virgin forest in northern region of Daxinganling Mountains. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 17, 327–343. (in Chinese with English abstract)
- Zhuang QL, McGuire AD, O'Neill KP, Harden JW, Romanovsky VE, Yarie J (2003). Modeling soil thermal and carbon dynamics of a fire chronosequence in interior Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 107, 8147, doi: 10.1029/2001JD001244.
- Zimov SA, Davidov SP, Zimova GM, Davidova AI, Chapin FS III, Chapin MC, Reynolds JF (1999). Contribution of disturbance to increasing seasonal amplitude of atmospheric CO₂. *Science*, 284, 1973–1976.