

气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响*

胡海清¹, 魏书精¹, 魏书威², 孙 龙¹

(1. 东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

摘 要: 人类活动所引起的温室效应及由此造成的气候变化和对全球生态环境的影响已受到国际社会的普遍关注。火干扰作为森林生态系统重要的干扰因子, 对森林生态系统碳循环产生重要影响以及对未来气候变化的响应更是人们关注的重点。正确理解气候变暖、火干扰与森林生态系统碳循环之间的因果循环关系, 了解气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响, 对制定科学合理的林火管理策略、充分发挥林火管理在森林生态系统碳循环和碳平衡以及缓解碳排放中的作用均有重要的意义。系统论述了气候变暖、火干扰与森林生态系统碳循环之间的逻辑循环关系, 并对相关的研究进展进行综述。重点剖析了气候变暖对火干扰的影响, 气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响, 并提出了全球变暖背景下科学有效的林火管理策略与措施, 以及今后需要加强的一些研究领域及方向。

关键词: 气候变暖; 火干扰; 森林生态系统; 碳循环; 林火管理策略

中图分类号: P467; Q143; S762.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2012)04-0037-05

全球气候变化尤其是气候变暖对人类生存环境的影响已受到国际社会的普遍关注^[1-3]。《联合国气候变化框架公约》以及《京都议定书》的签订使得政府决策层、科研工作者及社会公众越来越关注全球气候变化^[4]。工业革命以来, 由于人类大量使用煤炭、石油和天然气等化石燃料, 以及加速毁林等活动, 全球每年由化石燃料燃烧释放的 CO₂ 约 $2.70 \times 10^{10} \text{ t}$ ^[5], 造成大气层中 CO₂ 浓度每年以 $1.8 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的速度迅速增加^[6], 2009 年哥本哈根联合国气候变化大会的数据显示 CO₂ 浓度由工业化前的 $280 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到了现在的 $387 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同时, 气候学家预测 2100 年 CO₂ 浓度为 $540 \sim 1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[2], 受温室气体影响的全球气温将继续上升, CO₂ 浓度的不断上升, 导致温室效应加剧, 由此产生一系列的气候异常现象, 将对全球气候产生灾难性的影响。随着气候变化的加剧, 干旱、雷暴、风暴、高温等极端天气越来越频繁、越来越激烈, 与气象相关的灾害越来越多^[2,7]。火干扰作为森林生态系统的重要干扰因子, 作为世界上八大自然灾害之一^[8], 在生态系统碳循环和碳平衡中具有重要作用。各种预测模型显示, 未来气候变暖将使火干扰发生的频率和强度增加^[9-10]。为此加强气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响研究, 正确理解气候变暖、火干扰与森林生态系统碳循环之间的关系, 加深火干扰对碳循环影响的认识, 将会提高生态系统可持续管理的水平, 以更有效的方式干预生态系统的碳平衡。这将为政府部门在全球气候变暖背景下制定科学有效的林火管理策略提供科学依据。同时, 在全球气候变暖背景下, 实施科学合理的林火管理措施, 对优化森林的可

持续管理, 发挥碳汇效应, 减缓全球气候变暖的趋势均有重要意义。

1 气候变暖对火干扰的影响

森林燃烧理论认为任何森林燃烧现象的发生必须具备三个基本条件, 即森林可燃物、火源、气象条件, 其构成森林燃烧三要素^[11]。气候变暖不仅为火干扰的发生发展提供了直接的气象条件, 而且为其提供了间接的可燃物条件和火源条件。Clark^[12]研究美国明尼苏达西北部 750 年森林火灾, 发现高温干旱时期比湿冷时期森林火灾发生的频率高很多。Ali 等^[13]研究过去 8 000 年加拿大东部寒温带森林的火状况, 发现火干扰的频率与气候变化之间成函数关系。气候变暖背景下火险天气出现的频率加剧, 火源的增加, 可燃物的不断累积与易燃性增强, 对火干扰发生的频率和强度产生重要影响^[9-10]。气候变暖对火干扰的影响主要通过影响森林可燃物、火源和火环境与林火发生三个方面来体现。

1.1 气候变暖对森林可燃物的影响

1.1.1 影响可燃物的燃烧性

可燃物的燃烧性是由其理化性质决定的。气候变暖将对可燃物的理化性质产生重要影响, 增加可燃物的易燃性, 促成火灾发生发展可燃物条件的形成。气候变暖引起的气温上升, 降水格局的重新分配, 风速加快, 导致长期干旱、高温和大风等火险性天气出现的频率上升, 这亦直接影响可燃物的燃烧性^[11]。气候变暖还会通过影响可

* 收稿日期: 2012-02-12 修回日期: 2012-03-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD37B0104); 国家自然科学基金项目(31070544); 林业公益性行业科研专项(200804002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL12CA07)

作者简介: 胡海清(1961-), 男, 内蒙古敖汉人, 教授, 博士生导师, 主要从事林火生态与管理与森林生态学研究。

E-mail: huhq-cf@nefu.edu.cn

通讯作者: 孙龙(1976-), 男, 黑龙江五常人, 副教授, 博士, 主要从事林火生态与管理与森林生态学研究。

E-mail: weishujing2003@163.com

燃物的燃点、热值和挥发油含量来影响森林的燃烧性。干旱导致植物体内挥发油含量和油脂含量增加,增强可燃物的易燃性。Turtola 等^[14]对在干旱胁迫下的苏格兰松研究发现,其挥发油含量和油脂含量比正常分别增加了 39% 和 32%。同时,由于气候的变暖,许多火险较高的地区长期处于干旱高温之中,进一步改变森林可燃物的燃烧性。气候变暖将对物种组成和分布产生影响,在植被带迁移过程中,使得许多植被在适应新生境的过程中伤亡,且其燃烧性亦发生改变,增强可燃物的易燃性^[15]。

1.1.2 影响可燃物的积累

气候变暖对森林的物种组成、分布和 NPP 等产生重要影响^[16]。森林生态系统的生产力将随着气温及 CO₂ 浓度的升高而变化^[17],全球气候变化会促进 NPP 的提高^[18],从而影响森林生物量的累积速率,改变可燃物量的供给^[19]。随着全球性温度和湿度变化,可能造成气候带以及相应自然生态系统向两极移动。在植被带的迁移中,由于有些植被不能适应新的生境而死亡,将会导致大量可燃物的积累^[15]。同时,随着全球气候变暖,其他干扰形式发生的频率亦会相应提高^[20],如森林病虫害、干旱、大风和洪灾等灾害,亦会造成大量植被死亡,为火干扰提供了物质基础^[4]。气候变暖还导致极端气候事件发生的频率和强度增大,从而导致大量植被受损和死亡,为火干扰的发生提供大量可燃物积累。全球变暖可能引起大气 CO₂ 浓度增加,土壤水热动态和养分发生变化及其交互作用对凋落物分解产生重要作用^[18]。大气 CO₂ 浓度增加可通过对植物和土壤生物的直接和间接作用而对凋落物的分解产生显著影响^[21]。大气 CO₂ 浓度增加的施肥效应对森林凋落物产量和质量及根系分泌物具有不同程度的影响,对凋落物分解过程可能产生显著影响,从而增加森林可燃物的量^[22]。

1.2 气候变暖对火源的影响

火干扰历史表明气候是火干扰的主导因素,气候暖干化时期火干扰频发且强度大^[23]。随着人口数量的增加,人类活动对火干扰的影响日益增强^[19],但气候仍是火干扰的主导因素^[24]。全球变化导致了可燃物的空间分布与林分燃烧性变化,从而影响了自然火源与人为火源的分布,改变了由雷击或人为引起林火发生的可能,在时空上出现波动性,进而造成火干扰的动态变化。气候变暖导致地表气温上升,使得地气之间的对流增强,提高了发生雷击的几率,研究发现气候变暖可使闪电的频率增加 30%~40%^[25],随着雷击数量的上升,尤其是干雷暴的频发,雷击火发生频率加剧^[26]。Price 等^[25]模拟 CO₂ 倍增对美国闪电引起的火干扰的影响表明,由闪电引起的火将增加 44%,过火面积增加 78%。

气候变暖,防火期将延长,火险等级增高,极端火险天气增长,使得火源管理更加困难,会导致火干扰频繁爆发,森林大火不断。研究表明近 20 年加拿大火险期延长 30 d,在中、高纬度地

区,特别是北方林区对气候变暖尤为敏感^[19]。由于气候变暖,我国大兴安岭林区雷击火增多,防火期延长,且火灾发生在非防火期的几率增大。2000 年和 2002 年大兴安岭都发生了严重的夏季火灾,特别是 2002 年的雷击火更加严重^[27]。赵凤君等^[15]对内蒙古大兴安岭林区的火干扰进行研究,发现该林区受气候变暖的影响,可燃物干燥度增强,夏季雷击火增加。在气候变暖背景下加拿大和阿拉斯加雷击火明显增加^[26]。

1.3 气候变暖对火环境及林火发生的影响

气候变暖为火干扰的发生发展提供适宜的火险天气,创造火环境,为森林燃烧提供气象条件。气候变暖的火环境包括火灾天气、火险期、火灾季节、引燃条件、林内小气候和氧气供应等,是森林火灾发生的重要影响因子。研究表明,火干扰的动态变化是对气候变化的响应,火干扰频发均出现在气温高、降水少的暖干化时期,而气候冷湿时期火干扰频率极低^[28]。随着全球气候变暖,高温干旱的天数增多,降水减少,相对湿度下降,风速加大,林内微气候干燥,火险期延长,有利于火灾的发生和蔓延,导致火灾发生的频率增加,特别是强度增强。美国西部火干扰研究表明,气候变化影响火环境是林火发生的重要因素^[29]。Mouillot 等^[30]对地中海的气候与火干扰关系进行研究,发现气候变化导致两次连续火灾之间的间隔期缩短。在气候变暖背景下,除了气温升高外,其他天气变量(降水、风和云)亦将发生改变^[19],这些均有利于火险天气的形成。

森林火灾的发生与蔓延虽然受气象条件、植被类型、人为干扰和扑救水平等诸多因素影响而表现出时空规律性,但气象条件对林火的发生具有重要影响。太阳黑子、厄尔尼诺、南方涛动和拉尼娜均对火干扰产生重要影响^[31],其影响方式是改变可燃物湿度和火险天气,直接或间接影响可燃物和林火环境的改变,进而对火干扰产生影响。田晓瑞等^[27]对 20 世纪所发生的 13 起特大森林火灾气候背景进行研究,发现有 10 起发生在厄尔尼诺年,即世界历史上 78% 的森林大火发生在厄尔尼诺年。

2 气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响

2.1 火干扰对大气碳循环的影响

森林生态系统是陆地生态系统最大的植被碳库和土壤碳库^[32],其碳通量对全球碳收支具有重要影响,在全球碳循环和碳平衡中起着重要作用^[33]。火干扰过程中可燃物燃烧所排放的大量含碳温室气体^[34-35],破坏大气碳平衡^[35],对区域乃至全球碳循环和碳平衡产生重要影响。全球平均每年大约有 1% 的森林遭受火干扰的影响^[34],从而导致每年大约 4 Pg 的碳排放到大气中,这相当于每年化石燃料燃烧排放量的 70%^[36]。火干扰过程中排放大量含碳气体是对碳循环最直接的影响,亦是森林生态系统中碳的净损失过程^[37]。火

干扰中生物质燃烧是大气中痕量气体的主要来源^[34], 其排放的含碳气体包括 CO_2 、 CO 、 CH_4 、非甲烷烃等, 其中 CO_2 、 CO 、 CH_4 为其主要成分。全球森林火灾排放 CO_2 、 CO 、 CH_4 的总量分别为 $3\ 135\ \text{Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $228\ \text{Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $167\ \text{Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别为全球所有排放量^[38] 的 45%、21% 和 44%^[39]。

森林生态系统受到火干扰后其储存的碳都会释放出来, 1 t 可燃物燃烧能产生 1 755 kg 的 CO_2 , 火灾向大气中释放出大量的 CO_2 、 CO 、 CH_4 等气体, 这些气体可在大气中存在很长时间, 火灾增加大气中含碳温室气体浓度, 而且 CH_4 、 CO 到达大气的平流层后会影响到臭氧的浓度。因此, 火灾对全球气候变化的影响亦是长期的。其中最主要的是进一步促进全球变暖, 从而产生一系列的负面效应。火干扰将改变大气成分数量 (CO_2 、 CH_4 等排放的增加) 和空气质量改变 (O_3 、 SO_2 和 NO_x 等浓度变化), 对森林生态系统生产力的形成过程亦有着直接和间接的影响^[40]。火干扰中的排放物直接影响生态系统的生物地球化学循环过程^[30,41], 对森林生态系统碳循环产生影响。1990 年代国际岩石圈—生物圈项目的生物燃烧试验、国际全球大气化学等项目的大量研究, 对火烧释放物进行了取样, 确定了其成分^[42], 可燃物在燃烧过程中不但释放出大量的 CO_2 , 还有 CH_4 、 N_2O 等温室气体, 其产生的烟雾亦是空气污染的来源之一, 烟雾中的含碳气体包括 CO_2 、 CO 、 CH_4 和非甲烷烃等, 这些均对大气碳循环产生重要影响。

2.2 火干扰对土壤碳库及周转的影响

火干扰不仅能影响土壤碳库的储量, 还通过影响土壤呼吸速率来改变土壤碳库的周转时间。火干扰向土壤中施加了热量、灰烬, 改变了土壤环境和微气候, 土壤性质亦因植被和生物活性的改变而发生相应的变化, 进而对土壤有机碳含量、组分、分布及转化有很大影响^[43]。火烧对土壤有机碳的影响依赖于火烧的强度、持续时间和频率, 高强度火, 土壤有机碳几乎破坏, 中、低强度火使土壤有机碳发生了重新分配, 而不仅仅是减少^[11]。从短期看, 火烧后土壤有机质含量会大幅度下降, 原因是火烧致使表土层有机碳大量分解^[44]。从长期看, 生物体燃烧后的残体形成土壤黑碳, 有助于形成稳定的土壤有机碳库^[45]。总之, 从短期看, 火烧之后土壤有机质含量下降, 但从长期看, 火烧改变了土壤有机质的组成, 易形成稳定的有机碳, 对于形成土壤中稳定的有机碳库贡献较大。

作为森林生态系统重要干扰因子的火干扰对土壤呼吸速率有重要影响。火干扰最直接的影响就是改变土壤的水分状况, 影响土壤呼吸速率^[46]。许多学者研究发现, 火灾会降低土壤呼吸, 降低的多少取决于火烧的强度、持续时间和频率, 但不同的林型土壤呼吸速率在火后亦有所差异^[47]。尽管火后土壤显著变暖, 但由于植被、凋落物和土壤表层有机质的丧失使得火烧区的土壤 CO_2 通量显著降低^[48]。Sawamoto^[48] 研究发现火烧区土壤

呼吸显著低于未烧区, 且重度火烧区土壤呼吸比轻度火烧区降低的更多, 土壤呼吸速率在火烧频率较低的林地相对较高。

2.3 火干扰对凋落物碳库及周转的影响

火干扰改变了凋落物的微气候和微环境, 对森林凋落物碳库产生直接和间接影响。直接影响指火干扰后地上植被烧死, 地表的凋落物被燃烧, 烧毁了凋落物碳库并减少凋落物碳库的来源, 使得凋落物碳库减少^[43]。间接影响指火干扰后林分郁闭度降低, 林内光照和通风条件增加, 同时火烧迹地留下灰烬等物质, 增强吸收太阳辐射的作用, 使得地表气温上升, 可燃物更容易干燥, 从而制约凋落物分解速率改变, 影响凋落物动态, 影响生态系统物质循环和能量流动。在中、低强度火灾后, 短期内由于林分条件变化, 可能增加森林凋落物的积累, 进而提高森林火险等级, 使得森林火灾后再次发生火灾的几率提高, 影响凋落物碳库。

火干扰对凋落物的增减取决于火烧强度, 不同强度的火烧对凋落物碳库产生不同的影响^[48]。火烧对迹地的地表温度和水热条件产生影响, 进而对凋落物的分解速率产生影响, 从而调节森林凋落物碳库及其周转速率^[43]。如温度升高对各种反应过程均有不同程度的促进作用, 可提高森林土壤和凋落物的微生物活性, 加速凋落物的分解。林地水热条件直接影响凋落物分解过程中的淋溶作用和微生物活性, 从而对凋落物分解产生显著影响。Liski 等^[49] 开发了一个基于温度和积温的简单模型, 用来描述凋落物的分解速率, 发现温度增加可显著提高凋落物的分解速率, 加速凋落物碳库的周转, 且这一作用在所有生态系统中表现一致。Moore 等^[50] 研究表明, 气温升高可使凋落物分解率增加 4% ~ 7%。Pausas 等^[29] 对地表和不同土层凋落物分解速率的研究表明, 相对较高的地表温度更有利于凋落物的分解。

3 气候变暖背景下的林火管理策略

正确理解和处理气候变暖背景下火干扰与森林生态系统碳循环之间的相互关系, 对政府部门在全球气候变暖背景下制定科学有效的林火管理策略与措施, 维护森林生态系统碳平衡, 减缓大气 CO_2 浓度上升, 缓解气候变暖均有重要意义。目前, 林火管理策略主要有 4 种, 即森林防火、计划烧除、生物防火和林火阻隔。森林防火指严格防止森林火灾的发生, 使火灾的发生发展控制在一定的范围之内。防火是政府部门实施的最高效缓解火干扰的行动, 其直接效益就是保护了现有森林、人民的生命和财产安全, 但大量研究及事实证明, 严格防火政策的长期实施, 改变了火灾轮回期^[51], 会导致一系列生态后果^[52], 主要表现为火灾轮回期变长, 火烧频率减小, 森林物种组成及年龄结构发生改变, 造成森林结构功能的变化。因而改变严格防火措施负面效应的首要工作是加强森林可燃物的可持续管理, 因为可燃物是

影响林火发生要素中人类能控制的因子^[52]。森林可燃物可持续管理是指为了某种目的对可燃物进行处理和调节的所有过程和方法,主要目的是降低火险、清除易燃可燃物、维持生态系统平衡与稳定^[11]。森林可燃物的可持续管理主要包括计划烧除和生物防火两种重要措施。

计划烧除是指人们为了减少可燃物的积累,降低森林燃烧性或开设防火线而进行的计划火烧,亦可称为以火防火^[53],包括火烧防火线、火烧沟塘草甸、清理采伐或抚育的剩余物、林内计划火烧等。定期进行计划烧除:一是可将地表枯枝落叶等易燃可燃物清除,减少可燃物的过分积累,调节森林可燃物结构,具有良好的防火功能;二是可使易燃可燃物燃烧后转化为林木生长所需的养分,同时还可加速凋落物的分解,增加土壤养分,有利于森林的生长发育、健康成长,对维护森林生态系统的平衡与稳定均有重要的生态意义。生物防火是指利用生物(乔、灌、草等)燃烧性的差异,通过营林、造林、补植、引进等措施来减少林内可燃物的积累,改善火环境,增强林分自身的难燃性和抗火性,构建绿色防火林带,同时能阻隔或抑制林火的蔓延和发展^[53]。主要是利用植被燃烧性的差异,选择难燃、耐火、抗火的树种营造防火生物圈或耐火植物带,以阻隔林火的蔓延或选择抗火性能强的树种营造针阔混交林,以增强林分抗火性,减少森林火灾发生频率,降低火强度,使森林火灾的损失降到最低水平。

4 结论与展望

气候变暖、火干扰与森林生态系统碳循环之间存在着逻辑循环关系。气候变暖为火干扰的发生发展提供可燃物、火险天气和火源条件,影响火干扰发生的频率和强度。气候变化和火干扰两者之间的相互作用关系影响生态系统的碳循环过程,改变生态系统对大气中 CO₂ 的排放与吸收,影响原有的碳平衡,对生态系统的碳循环产生重要影响。随着全球气候变暖,火干扰的频率和强度将进一步加剧^[9],呼吁人们重视林火管理在协调气候变暖、火干扰与森林生态系统碳循环中的重要作用。如何协调三者之间的因果循环关系,对学者们既是机遇又是挑战,今后需从以下一些领域加强研究:

(1)集成实地观测、模型模拟与遥感观测的跨尺度火干扰研究,注重研究的尺度转换问题,并构建丰富翔实的林火数据库。

(2)气候变暖背景下人类活动对火干扰次数和面积的作用及其对碳循环的影响。

(3)加强火干扰对森林生态系统碳循环的间接影响研究。

(4)采用高度集成的火干扰模型方法研究在未来气候变暖情景下林火发生趋势。

参考文献:

- [1] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 39-44.
- [2] 李艳丽. 全球气候变化研究初探[J]. 灾害学, 2004, 19(2): 87-91.
- [3] 王顺兵,郑景云. 全球气候变化情景下的河北省区域减灾建设[J]. 灾害学, 2005, 20(4): 97-100.
- [4] 吕爱锋,田汉勤. 气候变化、火干扰与生态系统生产力[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 242-251.
- [5] 贾庆宇,王宇,李丽光. 城市生态系统-大气间的碳通量研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1569-1574.
- [6] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2007: the Science of Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [7] 欧阳丽,戴慎志,包存宽,等. 气候变化背景下城市综合防灾减灾规划自适应研究[J]. 灾害学, 2010, 25(S0): 58-62.
- [8] 姚树人,文定元. 森林消防管理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 2-55.
- [9] Clark J S. Effect of climate change on fire regimes in northwestern Minnesota[J]. Nature, 1988, 334: 233-235.
- [10] Neary D G, Klopatek C C, DeBano, et al. Fire effects on below-ground sustainability: a review and synthesis[J]. Forest Ecology and Management, 1999, 122: 51-71.
- [11] 胡海清. 林火生态与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005, 15-44.
- [12] Clark J S. Fire and climate change during the last 750yr in northwestern Minnesota[J]. Ecological Monographs, 1990, 60: 135-169.
- [13] Ali A, Carcaillet C, Bergeron Y. Long-term fire frequency variability in the eastern Canadian boreal forest: the influences of climate vs. local factors[J]. Global Change Biology, 2009, 15: 1230-1241.
- [14] Turtola S, Manninen A M, Rikala R, et al. Drought stress alters the concentration of wood terpenoids in scots pine and Norway spruce seedlings[J]. Journal of Chemical Ecology, 2003, 29(9): 1981-1995.
- [15] 赵凤君,舒立福,田晓瑞,等. 气候变暖背景下内蒙古大兴安岭林区森林可燃物干燥状况的变化[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1914-1920.
- [16] Knowlton J L, Graham C H. Using behavioral landscape ecology to predict species responses to land-use and climate change[J]. Biological Conservation, 2010, 143(6): 1342-1354.
- [17] Curtis P S, Drake B G, Leadley P W, et al. Growth and senescence in plant communities exposed to elevated CO₂ concentrations on an estuarine marsh[J]. Oecologia, 1989, 78: 20-26.
- [18] DeLucia E H, Hamilton J G, Naidu S L, et al. Net primary production of forest ecosystem with experimental CO₂ enrichment[J]. Science, 1999, 284: 1177-1179.
- [19] Li C, Flannigan M D, Corns I G W. Influence of potential climate change on forest landscape dynamics of west central Alberta[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30: 1905-1912.
- [20] Dale V H, Joyce L A, McNulty S, et al. Climate change and forest disturbance[J]. BioScience, 2001, 51: 723-734.
- [21] Cotrufo M F, Ineson P, Rowland A P. Decomposition of tree leaf litters grown under elevated CO₂: Effect of litter quality[J]. Plant and Soil, 1994, 163: 121-130.
- [22] 彭少麟,刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [23] Hallett D J, Hills L V. Holocene vegetation dynamics, fire history, lake level and climate change in the Kootenay valley, south-eastern British Columbia[J]. Canada Journal of Paleolimnology, 2006, 35(2): 351-371.
- [24] Mollicone D, Eva H D, Achard F. Ecology: human role in Russian wild fires[J]. Nature, 2006, 440: 436-437.
- [25] Price C, Rind D. Possible implications of global warming change on global lightning distributions and frequencies[J]. Journal of

- Geophysical Research, 1994, 99: 10823–10831.
- [26] Lynch J A, Hollis J L, Hu F S. Climatic and landscape controls of the boreal forest fire regime; Holocene records from Alaska [J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92: 477–489.
- [27] 田晓瑞, 舒立福. 林火与可持续发展[J]. *世界林业研究*, 2003, 16(2): 38–41.
- [28] Carcaillet C, Bergeron Y, Richard P J H, et al. Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forests during the Holocene: does vegetation composition or climate trigger the fire regime? [J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89(6): 930–946.
- [29] Pausas J G. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin) [J]. *Climatic Change*, 2004, 63: 337–350.
- [30] Mouillot F, Rambal S, Joffer R. Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 423–437.
- [31] Pjerknes J. A possible response of atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature [J]. *Tellus*, 1966(18): 820–829.
- [32] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263: 185–190.
- [33] Lü A, Tian H, Liu M, et al. Spatial and temporal patterns of carbon emissions from forest fires in China from 1950 to 2000 [J]. *Journal of Geophysics Research*, 2006, 111: doi: 10.1029/2005JD006198.
- [34] Crutzen P J, Heidt L E, Krasnec J P, et al. Biomass burning as a source of the atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl, and COS [J]. *Nature*, 1979, 282: 253–256.
- [35] Wong C S. Carbon input to the atmosphere from forest fires [J]. *Science*, 1979, 204: 209–210.
- [36] Pickett S T A, White P S. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics* [M]. London: Academic Press, 1985.
- [37] 吕爱锋, 田汉勤, 刘永强. 火干扰与生态系统碳循环 [J]. *生态学报*, 2005, 25(10): 2734–2743.
- [38] Levine J S, Cofer W R III, Cahoon D R Jr, et al. Biomass burning: a driver for global change [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 120: 120–125.
- [39] 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 [J]. *环境科学进展*, 1998, 6(4): 1–15.
- [40] Akimoto H. Global air quality and pollution [J]. *Science*, 2003, 302: 1716–1719.
- [41] Kasischke E S, Stocks B J. Fire, Climate change, and carbon cycling in the boreal forest [M]. New York: Springer Verlag, 2000: 377–389.
- [42] Hank A M, Michael G R. A physiological basis for biosphere-atmosphere interactions in the boreal forest: an overview [J]. *Tree Physiology*, 1997, 17: 491–499.
- [43] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: A review [J]. *Oecologia*, 2005, 143: 1–10.
- [44] 周瑞莲, 张普金, 徐长林. 高寒山区火烧土壤对其养分含量和酶活性的影响及灰色关联分析 [J]. *土壤学报*, 1997, 34(1): 89–96.
- [45] 姜勇, 诸葛玉平, 梁超, 等. 火烧对土壤性质的影响 [J]. *土壤通报*, 2003, 34(1): 65–69.
- [46] O'Neill K P, Kasischke E S, Richter D D. Environmental controls on soils CO₂ flux following fire in black spruce and aspen stands of interior Alaska [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32: 1525–1541.
- [47] Concilio A, Ma S, Li Q, et al. Soil respiration response to prescribed burning and thinning in mixed-conifer and hardwood forests [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35: 1581–1592.
- [48] Sawamoto T, Hatano R, Yajima R, et al. Soil respiration in Siberian taiga ecosystems with different histories of forest fire [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(1): 31–42.
- [49] Liski J, Nissinen A, Erhard M, et al. Climatic effects on litter decomposition from Arctic tundra to tropical rainforest [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 575–584.
- [50] Moore T R, Trofymow J A, Taylor B, et al. Litter decomposition rates in Canadian forests [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(1): 75–82.
- [51] Grissino-Mayer H D. Modeling fire interval data from the American Southwest with the Weibull distribution [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 1999, 9: 37–50.
- [52] 贺红土, 常禹, 胡远满, 等. 森林可燃物及其管理的研究与展望 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34: 741–752.
- [53] 魏书精, 胡海清, 孙龙, 等. 气候变化背景下我国森林防火工作的形势与对策 [J]. *森林防火*, 2011(2): 1–4.

Effect of Fire Disturbance on Forest Ecosystem Carbon Cycle under the Background of Climate Warming

Hu Haiqing¹, Wei Shujing¹, Wei Shuwei² and Sun Long¹

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Greenhouse effect caused by human activities and its consequences as climatic change and influences on ecological environment are increasingly concerned internationally. Forest fire, the main disturbance factor for forest ecosystem, draws attention greatly to its important effect on the forest ecosystem carbon cycle and response to the future climatic change. It is significantly important for formulating scientific and reasonable forest fire management strategy, displaying the forest fire management function fully in forest ecosystem carbon cycle, carbon balance and carbon discharge remission to correctly understand causal-recurrent relationship among climate warming, fire disturbance and the forest ecosystem carbon cycle, as well as the effect of fire disturbance on forest ecosystem carbon cycle under the background of climate warming. The logical circle relation among climate warming, fire disturbance and forest ecosystem carbon cycle is systematically discussed, and the related research progress is summarized. Impact of climate warming on fire disturbance, and effect of fire disturbance on forest ecosystem carbon cycle under the background of climate warming are analyzed, and scientific and effective forest fire management strategy and measurement as well as some research area and direction need to be strengthened under the background of climate warming are proposed.

Key words: climatic change; fire disturbance; forest ecosystem; carbon cycle; forest fire management strategy