

DOI: 10.5846/stxb201306101646

郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 尹云锋, 谢锦升. 火烧对森林土壤有机碳的影响研究进展. 生态学报, 2015, 35(9): 2800-2809.

Guo J F, Yang Y S, Chen G S, Yin Y F, Xie J S. A review of effects of fire on soil organic carbon in forests. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2800-2809.

火烧对森林土壤有机碳的影响研究进展

郭剑芬^{1,2}, 杨玉盛^{1,2,*}, 陈光水^{1,2}, 尹云锋^{1,2}, 谢锦升^{1,2}

1 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

摘要: 对国内外火烧影响森林土壤有机碳动态的研究成果进行了综合述评。较多研究表明低强度火烧不会造成土壤有机碳贮量的明显变化, 但火烧非常强烈而彻底, 土壤有机碳明显减少。有限研究表明火烧对森林土壤呼吸的影响结果有增加、降低或无影响, 因火烧强度、火后观测时间、森林类型、火烧迹地上植被恢复进程和气候条件等而异。同时, 火烧对土壤有机碳组分(活性有机碳和黑碳)也具有不同程度的影响。随着全球变化研究的深入, 火烧作为森林主要管理措施对大气 CO₂ 浓度影响亦愈来愈受重视, 今后应着重开展以下几方面研究: (1) 扩大气候和经营管理的变化对森林土壤有机碳贮量时空动态影响研究; (2) 深入探讨火烧影响土壤 CO₂ 释放的过程及机理; (3) 加强火烧历史和频率对黑碳影响的研究; (4) 从广度和深度上加强火烧等经营措施对亚热带森林土壤碳动态影响的研究。

关键词: 火烧; 土壤有机碳; 土壤呼吸; 活性有机碳; 黑碳

A review of effects of fire on soil organic carbon in forests

GUO Jianfen^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2,*}, CHEN Guangshui^{1,2}, YIN Yunfeng^{1,2}, XIE Jinsheng^{1,2}

1 State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Soils have twice content the amount of carbon (C) present in the atmosphere and C in soils is about two to three times greater than that accumulated in living organisms in terrestrial ecosystems. Due to the large C pool in soils, small deviations in the different C forms may also have a significant effect on the global C balance and consequently on climate change. Fire is a major driver of ecosystem processes and the C cycle process in forests. The forest fires are widespread worldwide phenomenon. It is important to understand the effect of high intensity fires and prescribed fire on soils. This paper reviews the effect of forest fires on the quantity and quality of soil organic C (SOC) and C release. It is focused mainly on soil respiration and soil organic C fractions; i.e. microbial biomass C (MBC), light fraction organic carbon (LFOC), dissolved organic C (DOC) and black carbon. Generally, intense prescribed fire or wildfire can lead to complete destruction of the organic layer and SOC in the topsoil. On the other hand, the effect of moderate prescribed fire is often minor and sometimes organic C increases after fire due to increased input of partly charred material or litter from decaying trees. Low-intensity prescribed fire usually results in little change of soil C. Soil respiration, including autotrophic and heterotrophic respiration, is an integrated result of the belowground processes. It has been widely used to evaluate the effects of disturbance on soil carbon pools. Fire can change the rate of soil respiration by reducing soil moisture and organic matter, increasing surface temperature, and reducing soil microbial populations at varying degrees. Soil respiration rates have been shown to be an increase, decrease or no significant change with burning, depending primarily upon fire intensity,

基金项目: 国家自然科学基金(31370615); 福建省教育厅重点项目(JA13065); 福建省科技厅公益类重点项目(K3-295)

收稿日期: 2013-06-10; **网络出版日期:** 2014-05-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: geoyys@fjnu.edu.cn

observation time after fire, forest type, vegetation regrowth process, and climatic condition, etc. On the other hand, fire not only perturbs the level of SOC, but also redistributes different labile fractions of organic carbon. Changes in labile SOC induced by fire have been noted to be more complex. Overall, fire significantly increases the soil DOC, but decreases soil LFOC and MBC. Relative to labile fractions of SOC, black carbon, a byproduct of wildfires and prescribed fires, is more stable and contributes to the long-term C sequestration. Despite the importance of black carbon on forest soils, there is limited information about the influence of fire on soil black carbon. Some studies note an increase, and some other studies indicate no effect or little effect of fire. Forest frequency, fire intensity and soil sampling depth are important variables for assessing the impact of fire on soil black carbon. In the future, more researches would be required (1) to determine effects of climate and forest management on dynamics of forest soil organic C, (2) to elucidate the process and mechanisms of CO₂ release following fire, (3) to assess the influence of fire history and frequency on soil black carbon, and (4) to determine forest soil carbon dynamics affected by forest management such as fire under field conditions and especially in subtropical ecosystems.

Key Words: fire; soil organic carbon; soil respiration; labile fraction; black carbon

火烧,作为重要的营林措施,在温带和热带地区已得到大量研究^[1-3]。早期研究主要集中在火烧对 N、P 等森林生长限制元素的损失及其对森林长期生产力、水文状况、径流化学的影响上^[4-5];随着人们对全球温室效应的关注,火烧对生态系统碳影响研究在近十几年逐渐得到重视^[2-3, 6]。据估计全球每年因生物质燃烧向大气排放的 CO₂ 占到人为排放总量的 1/3^[7];我国每年因森林火灾直接向大气释放的 CO₂ 量占总排放量的 2.7%—3.9%^[8]。火烧已成为全球环境变化的一个驱动力。正确评估火烧在碳循环中的作用,将有力的推进全球碳循环研究的进程。有关火烧对碳循环的影响研究越来越多^[2, 6],然而目前系统研究火烧对森林土壤(特别是亚热带森林土壤)有机碳的影响较少。

全球约有 1400—1500 Gt 碳以有机态形式储存于土壤中,是陆地植被碳库(500—600 Gt)的 2—3 倍,是全球大气碳库(750 Gt)的 2 倍多^[9]。森林生态系统作为陆地生物圈的主体,不仅本身维持着大量的碳库(约占全球植被碳库的 86%以上),同时也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的 73%)^[10]。因而,森林生态系统土壤碳平衡是全球碳循环中极为重要的组分,在全球碳平衡中起着不可替代的作用。本文就森林火烧对土壤有机碳影响进行评述,旨在全球气候变化的背景下,探求如何科学地利用和保护有限的土壤资源,减缓土壤中温室气体的排放,增加土壤有机碳的吸存。

1 火烧对土壤有机碳贮量的影响

土壤是生态系统碳的重要贮库。土壤有机碳及其动态平衡不仅表明土壤有机质的水平,而且是影响土壤中养分的储存与供应、土壤结构的稳定性与坚实度、土壤持水能力以及土壤生物(如菌根和固氮菌等)生长的主要因子,是评价土壤肥力和土地持续利用的主要指标之一^[11]。近十几年来,土壤有机碳又被赋予了新的内容,即与全球变化紧密联系在一起,从而引起更为广泛的关注。森林生态系统土壤碳库约占全球土壤有机碳库的 73%,是森林生态系统地上部分有机碳库的 2—3 倍^[12]。土壤有机碳库特别是森林土壤有机碳库的微小变化可显著地引起大气中 CO₂ 浓度的变化,从而影响全球气候变化。因此,对森林土壤中有有机碳库的动态变化、调控机理及其影响因素的研究成为预测和控制全球气候变化的一项重要的基础性工作。当前土地利用变化和不同的生态系统经营措施,如森林采伐和火烧对土壤碳贮量及 CO₂ 排放的影响问题颇受重视。

森林采伐后对采伐剩余物进行焚烧会使 CO₂ 直接向大气排放。就林地生物质燃烧对土壤碳含量的影响而言,在不同情况下差别很大,这取决于火烧性质、火烧频率和强度以及森林类型(表 1)^[13-28]。火烧常分为预定(计划)火烧和野火。预定火烧一般强度较低,不会使生态系统发生不可逆的变化;而野火燃烧强烈而彻底,对土壤有负面影响^[18]。Wang 等^[29]总结了 200 多个火烧后土壤有机碳的变化结果,得出高强度野火可使

土壤有机碳减少 25.3%,而预定火烧对土壤有机碳没有显著影响。此外,Wang 等^[29] Meta 分析还表明针叶林发生野火后土壤有机碳明显降低(25.3%),而阔叶林土壤有机碳却增加(29.0%)。Johnson 和 Curtis^[30]通过 Meta 分析却认为火烧只是改变土壤有机碳在土壤剖面的分布,对矿质土壤碳含量变化的影响并不显著,火烧后恢复时间的长短对土壤碳的影响更大。比如 Liechty 等^[31]研究发现低强度火烧后 10a 土壤上层(5—10 cm)中的碳反而增加,这可能源于以下 3 个原因:(1)燃烧未尽的残余物留在矿质土壤中,难以被生物化学分

表 1 火烧对土壤碳的影响
Table 1 Effects of burning on soil C

地点 Location	森林类型 Forest type	处理 Treatments	土壤碳结果 Results of soil C	参考文献 Reference
澳大利亚 Australia	桉树林 Eucalyptus forest	预定火烧与对照(不火烧)	没有显著差异	[13]
澳大利亚 Australia	辐射松林 <i>Pinus radiata</i> forest	强烈的全面火烧	0—60 cm 土层: -40%—50%	[14]
澳洲塔斯马尼亚 Tasmania	桉树混交林 Mixed Eucalyptus forest	全面火烧	0—10cm 土壤: -50%	[15]
加拿大不列颠哥伦比亚 British Columbia	黑松林 <i>Pinus contorta</i> , 白云杉林 <i>Picea glauca</i>	全面火烧	火烧后 9 个月: -20%—30%, 火烧后 21 个月: +40%—70%	[16]
阿拉斯加 Alaska	白云杉林 <i>Picea glauca</i> , 黑云杉林 <i>Picea mariana</i> , 北美白桦林 <i>Betula papyrifera</i> , 美洲山杨林 <i>Populus tremuloides</i>	不同强度野火	有机质层: -15% 或矿质土层 变化不明显	[17]
佛罗里达州 Florida	海岸热带林 Tropical coastal forest	高强度野火	有机质层: -33%—50%	[18]
美国缅因州 Maine	阔叶与针叶混交林 Mixed hardwoods and conifers	野火 Wildfire	0 层损失大,但矿质土壤影响不大	[19]
美国南卡罗来纳州 South Carolina	长叶松林 <i>Pinus palustris</i> forest	每隔 1、2、3、4a 预定火烧 1 次	0 层碳损失,矿质土层影响不大	[20]
美国南卡罗来纳州 South Carolina	火炬松林 <i>Pinus taeda</i> forest	每年预定火烧	0 层损失,但表层矿质土壤: +30%	[21]
美国南卡罗来纳州 South Carolina	火炬松林 <i>Pinus taeda</i> forest	(1) 每年冬季火烧; (2) 每年 夏季火烧; (3) 每隔 7a 冬季预 定火烧 1 次; (4) 每隔 7a 夏季 预定火烧 1 次	火烧后 30a: (1) +11%; (2) + 28%; (3) -16%; (4) + 6%	[22]
美国俄勒冈州和华盛顿州 Oregon and Washington	针叶林 Coniferous forest	全面火烧	喀斯喀特山北部火烧地: + 26%, 喀斯喀特山南部火烧 地: -2%	[23]
美国布鲁顿 Brewerton, AL	长叶松林 <i>Pinus palustris</i> forest	冬季预定火烧	火烧后 5a: + 4%	[22]
美国奥拉斯蒂 Olustee, FL	湿地松林 <i>Pinus elliotii</i> forest	(1) 每隔 4a 冬季预定火烧 1 次, (2) 每年冬季预定火烧	火烧后 20a: (1) +17% ; (2) + 16%	[22]
美国罗彻斯特 Roberts, LA	长叶松林 <i>Pinus palustris</i> forest	每年冬季预定火烧	火烧后 65a: +7%	[22]
欧洲中部 Europe	温带落叶林 Temperate deciduous forest	皆伐火烧	火烧后 1a: -5%	[24]
地中海 Mediterranean	地中海白松林 <i>Pinus halepensis</i> forest	高强度野火	有机质层: -82%	[25]
黑龙江大兴安岭 Greater Hinggan Mountain, Heirongjiang	兴安落叶松林 <i>Larix gmelini</i> forest	不同强度(轻度、中度、重度) 野火	火烧后 20a 0—10 cm 土壤,轻 度: -7%, 中度: -38%, 重度: -60%	[26]
福建南平 Nanping, Fujian	杉木林 Chinese fir forest	皆伐火烧	火烧后 5a 0—10 cm 土壤: -15%	[27]
云南西双版纳 Xishuangbanna, Yunnan	次生林 Secondary forest	短期火烧	火烧后 7d 0—10 cm 土壤: +24.9%	[28]

“-”表示减少,“+”表示增加

解,(2)新鲜的有机质转变成更稳定的有机质,(3)火烧地固 N 物种的频繁进入显著提高土壤 C 吸存能力。不同的是,Sands^[14]观测到澳大利亚辐射松林地火烧后 24a,0—60 cm 土层土壤碳含量下降 40%—50%。方晰等^[32]比较了 22 年生杉木林采伐迹地在不同处理方式下土壤有机碳贮量的差异,结果表明,火烧地 0—45 cm 土壤层碳贮量比对照地(不火烧)低 20%。可见,火烧对土壤有机碳的影响是一个复杂的过程,既包括短期的直接燃烧损失,也通过改变碳的输入、输出过程而对土壤碳库产生长期的间接影响。从长时间尺度上来看,在分析某一地区某一时期是碳汇还是碳源时,必须考虑火烧引起的土壤碳收支变化。

亚热带森林在全球碳循环中的地位愈来愈受到人们的重视。这个生态系统到底是碳源还是碳汇至今仍未确定。由于受太平洋东南季风和印度洋西南季风影响,世界上亚热带森林主要分布在我国(全球同纬度地带多为荒漠、稀树草原)。我国亚热带森林面积大(占全国 45.56%),一直是我国商品林的重要生产基地之一,而且皆伐火烧是亚热带森林的一项重要营林措施,因而了解火烧对森林,特别是土壤有机碳的影响对于判断这个生态系统能否成为长期的碳汇至关重要。因此,加强火烧对亚热带森林土壤碳的影响研究,具有重要的理论意义。

2 火烧对土壤有机碳通量的影响

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)于 2007 年 2 月 2 日在巴黎发表了第四次气候变化评估报告指出,大气温室气体浓度的升高是引起全球变暖的最主要原因,而人为活动“很可能”是导致 CO₂浓度升高的直接原因,这种可能性由第 3 次报告中的 60%提高到 90%。在目前人类活动引起的温室气体排放当中,二氧化碳增温效应占 70%,因而减缓大气 CO₂持续上升则是减缓全球变暖的主要途径。

由于森林在缓解大气 CO₂浓度上升中起着十分重要的作用,因而气候变化与森林问题在国际气候变化谈判中一直倍受关注。随着全球变化研究的不断深入,火烧作为森林主要管理措施对大气 CO₂浓度影响亦愈来愈受重视,成为《京都议定书》中讨论的主要议题之一^[33]。据估算^[34],全球每年火烧损失的寒带和温带森林以及热带森林面积分别为 10×10^6 — 15×10^6 hm² 和 20×10^6 — 40×10^6 hm²;而火烧引起的 CO₂释放量可达 3.5 Pg/a(表 2)。火烧主要通过直接和间接渠道向大气排放 CO₂。一方面,火烧通过燃烧地表生物质直接向大气排放 CO₂,有关该方面报道较多^[1-3]。另一方面,火后土壤生境条件发生显著变化,土壤呼吸将做出怎样的响应已引起人们的极大关注^[35-36]。

表 2 全球每年生物质燃烧量及释放的 CO₂^[34]

Table 2 Global estimates of annual amount of biomass burning and the resulting release of CO₂ to the atmosphere^[34]

火烧来源 Source of burning	生物质燃烧量 Biomass burned (Tg/a)	CO ₂ 释放量 CO ₂ released (Tg C/a)
稀树草原 Savannas	3690	1494
农业废弃物 Agricultural waste	2020	819
薪材 Fuel wood	1430	576
热带森林 Tropical forest	1260	513
温带和寒带森林 Temperate and boreal forest	280	117
木炭 Charcoal	21	27
全球排放总和 Total	8700	3547

土壤呼吸(包括自养呼吸和异养呼吸)是土壤有机碳进入大气的主要途径,是陆地生态系统碳损失的主要方式^[33]。土壤呼吸年碳释放量高达 68—76.5 Pg,超过全球化石燃料燃烧年碳释放量(≈ 6 Pg)10 倍以上^[9],因此其微小变化不但会引起大气中 CO₂浓度的明显改变,更会影响森林土壤贮存碳的能力^[7]。火烧通常改变土壤的物理(温度、湿度)、化学以及生物性质,从而对土壤呼吸产生影响^[37]。现有森林火烧对土壤呼吸的影响结果差异较大,这与火烧强度、火后观测时间、森林类型、火烧迹地上植被恢复进程和气候条件等有关^[38]。一些研究报道火烧后微生物数量的减少以及根系死亡、可分解物质的减少,造成土壤呼吸下降。例

如:杨玉盛等^[39]发现火烧后 2—3a 杉木林土壤呼吸降低,认为主要因为根系呼吸降低。Reinke 等^[40]观察到控制火烧使长叶松(*Pinus palustris*)林土壤呼吸降低了 6%。O'Neill 等^[41]通过对阿拉斯加黑云杉、云杉和白杨林火烧后环境因素和土壤 CO₂通量的研究表明,火烧后土壤温度明显升高,地表平均湿度降低,土壤呼吸速率也降低。Sawamoto 等^[42]观察到火烧后森林土壤呼吸速率显著低于未火烧的。他们认为这主要由于火烧地土壤微生物活性较低。许多研究也发现类似现象。如 Ahlgren 等^[43]发现北美短叶松林火烧后第二年土壤微生物活性明显低于未火烧林地。芬兰北部挪威云杉林火烧降低了微生物生物量碳含量^[44]。

与这些结果相反,一些研究认为森林火烧后土壤温度升高,会刺激土壤微生物活性,从而导致土壤呼吸增强。Kobziar 等^[45]对美国黄松林火烧前后土壤呼吸动态研究表明,火烧后 2a 土壤呼吸速率(平均 3.83 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)比未火烧林地(3.41 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)的高 12%。Wüthrich 等^[46]发现欧洲板栗(*Castanea sativa* Mill.)林高强度火烧后 6 个月,产生大量可分解物质,使得异养呼吸速率增加约 40%。Tüfekçioğlu 等^[47]报道土耳其科西嘉松(*Pinus nigra*)林火烧后 2a 间平均土壤呼吸速率为 1.55 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$,高于对照林地(1.29 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。Tüfekçioğlu 等^[48]还比较了土耳其西北部不火烧的塞浦路斯松(*Pinus brutia*)林和火烧后 1—4 个月塞浦路斯松林的土壤呼吸速率,发现火烧后土壤呼吸速率较高。我国南方杉木林火烧后的前 3—4 个月,火烧地土壤呼吸速率高于对照地,这与火烧后新近死亡细根分解有关^[12]。

也有人报道火烧对土壤呼吸没有明显影响。Concilio 等^[36]未观测到位于加利福尼亚内华达山脉西面的针阔混交林火烧后土壤呼吸速率与未火烧林的有显著差异。Hubbard 等^[49]也发现,阿巴拉契亚山脉南部橡木-松树混交林火烧后 2 个月火烧地土壤呼吸速率与对照地(不火烧地)的差异不大。

从以上众多例子表明,各种生态系统内土壤呼吸将对火烧产生不同的响应,因而无法对火烧影响土壤呼吸这一过程做出定论。各种研究结果不一致的可能原因有:(1)各种生态系统内火烧影响土壤温湿度的程度不同;(2)各研究是在火烧后的不同时期(数月至数年)对土壤呼吸进行测定;(3)因火烧强度不同对生态系统造成的干扰程度不同。鉴于以上原因,在考虑火烧对土壤呼吸作用影响时,需综合考虑火烧所导致的各种环境要素的变化。

3 火烧对土壤有机碳组分的影响

3.1 火烧对土壤活性有机碳的影响

随着对土壤碳库研究逐渐深入,土壤碳库中的活性有机碳也成为了研究的热点。但到目前土壤活性有机碳还没有一个统一的、严格的、确切的定义。国内外众多学者根据自己的研究需要和测定的方法采用不同的组分表征土壤活性有机碳^[50-52]。本文着重涉及微生物生物量碳、轻组有机碳和可溶性有机碳。

土壤微生物生物量碳(MBC)是土壤活性有机碳中最活跃和最易变化的部分^[53-54]。土壤 MBC 对土壤环境因子的变化极为敏感,土壤的微小变动均会引起其活性变化,是土壤质量评价的重要指标^[55-56]。随着全球碳循环问题受到广泛关注,火烧对土壤 MBC 的影响研究迅速增加。如:Prieto-Fernández 等^[57]发现野火燃烧后松林(*Pinus* spp.)表层土壤(0—5 cm)微生物几乎完全损失,而 5—10 cm 土壤微生物减少了 50%。火烧 4a 后,0—5 cm 和 5—10 cm 层土壤的微生物碳/有机碳比率分别比火烧前减少 60%和 40%。Fritze 等^[58]研究表明,针叶林火烧后 12a 土壤微生物生物量才恢复到火烧前水平。Wang 等^[29]Meta 分析亦表明火烧(包括野火和预定火烧)使土壤微生物生物量碳含量平均降低 40.5%。当然,火烧对土壤 MBC 的影响程度除与火烧强度、火烧频率、火烧持续时间有关外,还与土壤类型、土壤湿度等状况有关。例如 Choromanska 和 DeLuca^[59]发现在西黄松-花旗松(*Pinus ponderosa*-*Pseudotsuga menziesii*)混交林中,火烧使三种不同湿度(-0.03、-1.0 和 -1.5 MPa)土壤的微生物量碳出现不同程度的减少。由于湿土比干土的热传导速度更快,故含水量最大的土壤,其微生物量碳减少得最多。此外,由于土壤 MBC 增加和功能的发挥依赖于系统中底物碳的输入,因而火烧后植被恢复状况也将影响土壤 MBC 的变化。根系作为相对有效的碳源,火烧后随着植被生长,林木根系在土壤中不断累积促进了 MBC 的增加^[60]。

由于轻组有机碳(LFOC)基本由部分分解的植物残体组成,碳含量高,周转时间短,代表着活性土壤有机碳的主要部分,在碳循环中具有显著的作用,被认为是土壤生物调节过程的重要基质和土壤肥力的指标,具有很强的生物学活性,是土壤质量的另一个重要属性,因此有关土壤轻组有机碳的研究倍受重视^[51,61-62]。已有研究表明,土壤 LFOC 对营林措施变化的响应非常敏感^[63-64]。营林措施(如火烧)通过改变土壤温度和湿度、微生物群落、根系生长状况等,最终影响 LFOC 动态。如杨玉盛等^[65]研究发现福建三明格氏栲天然林皆伐火烧营造格氏栲人工林和杉木人工林后土壤 LFOC 含量和贮量显著降低,这与土壤的干扰以及凋落物和枯死细根归还量减少等密切相关。火烧对土壤 LFOC 的影响程度与火烧强度(包括最高温度和持续时间)有关^[66]。由于土壤 LFOC 可作为土壤有机碳库变化的敏感指标,因此,研究不同林业经营措施对土壤 LFOC 的影响及作用机理,对促进土壤碳固定具有重要作用。

可溶性有机碳(DOC)虽然只占土壤有机碳的很少部分,含量一般不超过 200 mg/kg,但它却是土壤微生物可直接利用的有机碳源。土壤有机碳虽研究时间早且取得大量颇有成效成果,但土壤 DOC 却一直未受重视。直到 20 世纪 70 年代末,特别是 80 年代以后,土壤 DOC 特别是森林土壤 DOC 才逐渐引起人们的重视^[67]。在影响土壤 DOC 的各因素中,由于营林措施直接影响森林生态系统碳库,而 DOC 的淋失是其碳库损失的主要途径之一,因而探讨不同营林实践活动对 DOC 动态的影响,对深入评价不同营林活动对森林碳吸存能力的影响及森林在全球碳循环中的作用有重要价值。现有大部分文献报道了温带地区各土壤类型 DOC 对营林措施变化的响应,而不同营林措施对热带、亚热带土壤 DOC 的影响只有少数人涉及^[51, 68],目前还较少人比较在不同气候或土壤类型下采取类似的营林措施后 DOC 的状况。虽然大多研究发现营林措施改变后,DOC 发生明显波动,但有关这方面的机制仍不清楚。由于野外条件下温度、水分等环境因素和土壤因素可能对土壤 DOC 起交互作用的影响,因而采取营林措施后,森林土壤 DOC 的响应过程将更为复杂。

随着全球变化研究的不断深入,火烧作为森林主要管理措施对土壤 DOC 动态的影响亦愈来愈受重视。有研究表明火烧可引起森林土壤 DOC 组成和输出的变化^[69-70],但目前有关火烧对土壤可溶性无机态养分研究多,而对可溶性有机态养分动态的研究极少。少数研究表明森林皆伐后火烧的土壤 DOC 浓度和输出量均低于未采伐的和采伐后保留采伐剩余物的土壤^[69-70]。也有人报道火烧后土壤 DOC 浓度和输出量升高。Andersson 等^[71]研究发现,埃塞俄比亚西南部林地火烧后 12 d,土壤 DOC 浓度比不火烧地高 85%,90 d 时仍高 43%。Battle 等^[72]也观测到乔治亚州西南部退化的长叶松(*Pinus palustris*)湿地火烧后土壤 DOC 浓度高于不火烧地。在西班牙东北部的油橄榄林地,火烧后 6 个月土壤溶液 DOC 输出量可达火烧前的 4 倍^[73]。近年来 Wang 等^[29]汇总了 200 多个在全球主要地区阔叶林和针叶林火烧的研究结果表明,野火明显增加土壤 DOC,但预定火烧影响不大。关于火烧如何改变土壤 DOC 产量、组成及输出等目前仍缺少研究。

由于我国对营林干扰下土壤 DOC 的研究刚刚起步,目前未对火烧影响土壤 DOC 释放的过程及机制进行深入研究。根据杨玉盛等人的初步研究得出,位于福建南平安曹下的 40a 生杉木林皆伐和火烧后,表层土壤(0—10 cm)DOC 含量发生不同程度的下降(未刊资料)。但由于野外条件下,环境因素与火烧等人为干扰可能同时影响土壤 DOC,火烧的净效应仍不清楚。因此,今后在野外定位观测基础上配合室内模拟实验有助于进一步探讨土壤 DOC 对火烧的响应及机制。

3.2 火烧对土壤黑碳的影响

黑碳(Black carbon)是生物质或化石燃料不完全燃烧所形成的碳物质,普遍存在于土壤和沉积物中。它是土壤碳库中惰性部分的重要组成部分,在土壤碳循环中占有重要地位^[74-75]。研究表明,黑碳可占土壤有机碳含量的 5%—45%,有些土壤中黑碳甚至高达 60%以上^[76-77]。为了解不同地区、不同森林类型、不同经营方式下森林土壤中黑碳含量和控制因素,成为当前全球变化领域的一个热点问题^[78]。目前国外已对土壤黑碳开展了相关研究,而我国关于土壤黑碳的研究尚不多见^[79-81]。黑碳和火烧有着紧密的联系,据估算,每年约有 0.05—0.20 Pg 由生物质燃烧所形成的黑碳进入到土壤中^[74],而且不同频率、不同程度的火烧对土壤中黑碳贮量的影响不同。如 Ansley 等^[82]利用核磁共振技术研究火烧频率对亚热带草原土壤黑碳的影响,发现未

火烧处理的 0—10 cm 土壤黑碳含量为 1.6 g/kg, 而 6a 内进行 2—3 次火烧处理的黑碳含量仅为 1.4—1.7 g/kg, 表明火烧对土壤黑碳的影响不大。Eckmeier 等^[24]研究皆伐火烧对欧洲中部温带落叶林土壤黑碳的影响, 发现火烧后 1a 表层土壤(0—5 cm)黑碳含量基本没有变化, 但 0—1 m 剖面中黑碳含量增加。Czimeczik 等^[83]研究表明, 大部分黑碳储存在土壤有机质中, 随着火烧频率的增加, 黑碳在土壤有机质的贮量逐渐下降。较低火烧频率下, 黑碳占有有机质的 99.5%; 而火烧频率较高情况下, 黑碳占有有机质的 3.6%, 这可能是因为随着火烧频率的增加, 黑碳发生了氧化。Dai 等^[84]研究了美国南部温带稀树大草原中不同火烧处理(2 次夏季重复性火烧、4 次冬季重复性火烧、夏秋季交替性火烧和未火烧)对黑碳的影响, 结果表明, 不同的火烧处理对土壤黑碳含量影响较小, 而黑碳/土壤有机碳的比值有所增加, 他认为这是剖面中黏粒、粉粒和生物活动的潜在活动的结果。在我国森林土壤黑碳研究方面, 尹云锋等发现皆伐火烧短期内对杉木人工林土壤黑碳储量的影响并不大^[81]。刘兆云等^[85]采样分析浙江省典型林地土壤黑碳数量, 发现近 40a 发生过火灾的样区表土层(0—10 cm)黑碳比例明显高于近期没有发生过火灾的土壤。可见, 林地土壤黑碳累积亦受火烧历史的影响。此外, 由于黑碳测量的方法多种多样, 采用不同的方法测量结果会有较大的差异, 因而不同实验结果之间难以对比; 但大多研究者们认为短时间内, 土壤中黑碳含量变化很小, 火烧多年后, 土壤中黑碳同土壤矿物相互作用, 黑碳含量将会增加^[86]。由于全球森林生态系统多样性和森林火烧强度差异性, 还有待于对土壤黑碳开展进一步的研究工作。

4 研究展望

尽管众多学者在土壤有机碳动态研究方面取得了很大的进展, 得到了一些重要的结论, 然而由于土壤有机碳库构成的复杂性及影响因素的多样性, 目前国内外对土壤有机碳库的各种形态、动态过程及其调控机理等研究仍十分薄弱。鉴于森林土壤碳库在全球碳循环中具有极为重要的地位(占陆地土壤碳库的 73%), 应加强在全球变暖背景下, 森林土壤碳动态对火烧这一重要人类活动的反馈影响的研究。

(1) 扩大气候和经营管理的变化对森林土壤有机碳贮量时空动态影响研究。由于生态系统和火烧强度等因素的差异, 土壤有机碳贮量变化的大小很难量化。未来的研究应进行多途径的探索, 如进行长期的定位观测, 积累时间序列的数据; 在室内进行模拟实验; 采用相对统一的研究方法, 获得可比性强的数据进行综合, 建立土壤有机碳贮量对气候和经营措施变化的响应模型。

(2) 深入探讨火烧影响土壤 CO₂ 释放的过程及机理。森林火烧后林木根系逐渐死亡, 根系呼吸(自养呼吸)逐渐减弱, 枯枝落叶(含采伐剩余物)则由于遭焚烧损失殆尽, 枯枝落叶层呼吸几近于零, 严重火烧后土壤呼吸主要以矿质土壤呼吸为主。随着火后植被的逐渐恢复, 根系呼吸和枯枝落叶层呼吸将逐渐增强, 矿质土壤呼吸占土壤呼吸比重逐步降低。但火后土壤呼吸各分室对生境变化如何响应? 持续时间多长? 什么因素直接导致自养呼吸和异养呼吸发生变化? 目前, 这一系列重要科学问题仍未得到很好的解决。

(3) 加强火烧历史和频率对黑碳影响的研究。火烧历史对土壤中黑碳的贮量有重要影响, 目前对于史前火烧情况知之甚少, 需要将野外实验和考古学、古植物学结合起来, 进一步研究时间和空间维度上的史前火烧对土壤中黑碳贮量的影响。另外, 正确评价不同火烧频率和季节性火烧对于土壤黑碳的影响程度, 对于估计全球生态系统响应机制(地下生物量和全球土壤剖面的碳、氮循环和黑碳贮量)有重要作用。

(4) 从广度和深度上加强火烧等经营措施对亚热带森林土壤碳动态影响的研究。目前就研究地域而言, 大部分森林土壤碳动态对火烧响应研究主要集中在北方森林和温带森林, 亚热带森林研究则较少。特别是作为重要用材林(杉木)和商品林基地的我国亚热带地区, 把大面积成熟杉木林皆伐后进行全面火烧, 是我国南方林区栽杉的主要营林技术环节之一。但如何减少温室气体排放, 增强森林碳汇功能已成为森林经营者面临的亟待解决的新问题。因此, 未来应关注亚热带山区如何采取合理的碳经营措施。

参考文献(References):

- [1] Sorensen C D, Finkral A J, Kolb T E, Huang C H. Short- and long-term effects of thinning and prescribed fire on carbon stocks in ponderosa pine

- stands in northern Arizona. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(3): 460-472.
- [2] Conard S G, Sukhinin A I, Stocks B J, Cahoon D R, Davidenko E P, Ivanova G A. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Climatic Change*, 2002, 55(1/2): 197-211.
- [3] Johnson D W, Susfalk R B, Caldwell T G, Murphy J D, Miller W W, Walker R F. Fire effects on carbon and nitrogen budgets in forests. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 2004, 4(2/3): 263-275.
- [4] Castaldi S, Aragosa D. Factors influencing nitrification and denitrification variability in a natural and fire-disturbed Mediterranean shrubland. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(6): 418-425.
- [5] Oros D R, Mazurek M A, Baham J E, Simoneit B R T. Organic Tracers from wild fire residues in soils and rain/river wash-out. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 137(1/4): 203-233.
- [6] Galdos M V, Cerri C C, Cerri C E P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, 2009, 153(3/4): 347-352.
- [7] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [8] 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): 6-11.
- [9] Schlesinger W H, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 2001, 411(6836): 466-469.
- [10] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [11] Arai H, Tokuchi N. Factors contributing to greater soil organic carbon accumulation after afforestation in a Japanese coniferous plantation as determined by stable and radioactive isotopes. *Geoderma*, 2010, 157(3/4): 243-251.
- [12] 杨玉盛, 陈光水, 王义祥, 谢锦升, 杨少红, 钟羨芳. 格氏栲人工林和杉木人工林碳吸存与碳平衡. *林业科学*, 2007, 43(3): 113-117.
- [13] O'Connell A M. Litter decomposition, soil respiration and soil chemical and biochemical properties at three contrasting sites in kari (*Eucalyptus diversicolor* F. Muell.) forests of south-western Australia. *Australian Journal of Forest Research*, 1987, 12(1): 31-40.
- [14] Sands R. Physical changes to sandy soils planted to radiata pine // Ballard R, Gessel S P, eds. *IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity*. Portland, Oregon, 1983: 146-152.
- [15] Ellis R C, Graley A M. Gains and losses in soil nutrients associated with harvesting and burning eucalypt rainforest. *Plant and Soil*, 1983, 74(3): 437-450.
- [16] Macadam A M. Effects of broadcast slash burning on fuels and soil chemical properties in the Sub-boreal spruce Zone of central British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(12): 1577-1584.
- [17] Dyrness C T, Van Cleve K, Levison J D. The effect of wildfire on soil chemistry in four forest types in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19(11): 1389-1396.
- [18] Kimmins J P. *Forest Ecology*. New York: Macmillan Publishing Company, 1987: 112-136.
- [19] Fernandez I J, Logan J, Spencer C J. *The Effects of Site Disturbance on the Mobilization and Distribution of Nutrients and Trace Metals in Forest Soils*. Orono, ME: Environmental Studies Center, University of Maine, 1989.
- [20] Binkley D, Richter D, Davis M B, Caldwell B. Soil chemistry in a loblolly/longleaf pine forest with interval burning. *Ecological Applications*, 1992, 2(2): 157-164.
- [21] Wells C G. Effects of prescribed burning on soil chemical properties and nutrient availability // *Prescribed Burning Symposium, Proceedings*. Asheville, NC: USDA Forest Service Southeastern Forest Experiment Station, 1971: 86-99.
- [22] McKee W H. *Changes in Soil Fertility Following Prescribed Burning on Coastal Plain Pine Sites*. Southeastern Forest Experiment Station, USDA Forest Service Res. Paper SE-234, 1982.
- [23] Kraemer J F, Hermann R K. Broadcast burning: 25-year effects on forest soils in the western flanks of the Cascade Mountains. *Forest Science*, 1979, 25(3): 427-439.
- [24] Eckmeier E, Gerlach R, Skjemstad J O, Ehrmann O, Schmidt M W I. Minor changes in soil organic carbon and charcoal concentrations detected in a temperate deciduous forest a year after an experimental slash-and-burn. *Biogeosciences*, 2007, 4(3): 377-383.
- [25] Tinoco P, Almendros G, Sanz J, González-Vázquez R, González-Vila F J. Molecular descriptors of the effect of fire on soils under pine forest in two continental Mediterranean soils. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(12): 1995-2018.
- [26] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 王恩垣, 周一杨, 柴亚凡. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1114-1121.
- [27] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, Xie J S, Lin P. Soil C and N pools in Chinese fir and evergreen broadleaf forests and their changes with slash burning in mid-subtropical China. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 56-63.
- [28] 沙丽清, 邓继武, 谢克金, 孟盈. 西双版纳次生林火烧前后土壤养分变化的研究. *植物生态学报*, 1998, 22(6): 513-517.
- [29] Wang Q K, Zhong M C, Wang S L. A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2012, 271: 91-97.
- [30] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(2/3): 227-238.
- [31] Liechty H O, Luckow K R, Guldin J M. Soil chemistry and nutrient regimes following 17-21 years of shortleaf pine-bluestem restoration in the

- Ouachita Mountains of Arkansas. Forest Ecology and Management, 2005, 204(2/3): 345-357.
- [32] 方晰, 田大伦, 项文化. 不同经营方式对杉木林采伐迹地土壤 C 储量的影响. 中南林业学院学报, 2004, 24(1): 1-5.
- [33] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 3-27.
- [34] Levine J S. Biomass burning and the production of greenhouse gases // Zepp R G, ed. Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and the Environmental Effects of Climate Change. New York, USA: John Wiley & Sons, 1994: 139-159.
- [35] Michelsen A, Andersson M, Jensen M, Kjeller A, Gashew M. Carbon stocks, soil respiration and microbial biomass in fire-prone tropical grassland, woodland and forest ecosystems. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(11): 1707-1717.
- [36] Concilio A, Ma S Y, Ryu S R, North M, Chen J Q. Soil respiration response to experimental disturbances over 3 years. Forest Ecology and Management, 2006, 228(1/3): 82-90.
- [37] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, Xie J S, Gao R, Qian W. Effects of clear-cutting and slash burning on soil respiration in Chinese fir and evergreen broadleaved forests in mid-subtropical China. Plant and Soil, 2010, 333(1/2): 249-261.
- [38] Kobziar L N. The role of environmental factors and tree injuries in soil carbon respiration response to fire and fuels treatments in pine plantations. Biogeochemistry, 2007, 84(2): 191-206.
- [39] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 陈光水, 高人, 李灵, 王小国, 郭剑芬. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应. 生态学报, 2004, 24(3): 583-591.
- [40] Reinke J J, Adriano D C, Mcleod K W. Effects of litter alteration on carbon dioxide evolution from a south Carolina Pine forest floor. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(3): 620-623.
- [41] O'Neill K P, Kasischke E S, Richter D D. Environmental controls on soil CO₂ flux following fire in black spruce, white spruce, and aspen stands of interior Alaska. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(9): 1525-1541.
- [42] Sawamoto T, Hatano R, Yajima T, Takahashi K, Isaev A P. Soil respiration in Siberian taiga ecosystems with different histories of forest fire. Soil Science and Plant Nutrition, 2000, 46(1): 31-42.
- [43] Ahlgren I F, Ahlgren C E. Effects of prescribed burning on soil microorganisms in a Minnesota jack pine forest. Ecology, 1965, 46(3): 304-310.
- [44] Pietikäinen J, Fritze H. Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration activity and nitrification. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(1): 101-109.
- [45] Kobziar L N, Stephens S L. The effects of fuels treatments on soil carbon respiration in a Sierra Nevada pine plantation. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 141(2/4): 161-178.
- [46] Wüthrich C, Schaub D, Weber M, Marxer P, Conedera M. Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland. Catena, 2002, 48(3): 201-215.
- [47] Tüfekçioğlu A, Küçük M, Sağlam B, Bilgili E, Altun L, Küçük Ö. Influence of fire on root biomass dynamics and soil respiration rates in young corsican pine (*Pinus nigra*) stands in Turkey. Forest Ecology and Management, 2006, 234(Supplement): S195-S195.
- [48] Tüfekçioğlu A, Bilmis T, Sağlam B, Küçük M, Altun L, Yılmaz M, Bilgili E. Influence of fire on belowground root biomass and soil respiration dynamics in young brutian pine (*Pinus brutia*) stands in north-western Turkey. Forest Ecology and Management, 2006b, 234(Supplement): S167-S167.
- [49] Hubbard R M, Vose J M, Clinton B D, Elliott K J, Knoepf J D. Stand restoration burning in oak-pine forests in the southern Appalachians: effects on aboveground biomass and carbon and nitrogen cycling. Forest Ecology and Management, 2004, 190(2/3): 311-321.
- [50] Dilly O, Blume H P, Sehy U, Jimenez M, Munch J C. Variation of stabilised, microbial and biologically active carbon and nitrogen in soil under contrasting land use and agricultural management practices. Chemosphere, 2003, 52(3): 557-569.
- [51] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Yin Y F, Gao R, Lin C F. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. Plant and Soil, 2009, 323(1/2): 153-162.
- [52] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
- [53] Li X F, Han S J, Guo Z L, Shao D K, Xin L H. Changes in soil microbial biomass carbon and enzyme activities under elevated CO₂ affect fine root decomposition processes in a Mongolian oak ecosystem. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(7): 1101-1107.
- [54] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应. 南京农业大学学报, 1996, 19(4): 45-51.
- [55] Kaschuk G, Alberton O, Hungria M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(1): 1-13.
- [56] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. 土壤学报, 2000, 37(2): 166-173.
- [57] Prieto-Fernández A, Acea M J, Carballas T. Soil microbial and extractable C and N after wildfire. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27(2): 132-142.
- [58] Fritze H, Pennanen T, Pietikäinen J. Recovery of soil microbial biomass and activity from prescribed burning. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23(7): 1286-1290.
- [59] Choromanska U, DeLuca T H. Microbial activity and nitrogen mineralization in forest mineral soils following heating: evaluation of post-fire effects. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(2): 263-271.
- [60] Thibodeau L, Raymond P, Camiré C, Munson A D. Impact of precommercial thinning in balsam fir stands on soil nitrogen dynamics, microbial biomass, decomposition, and foliar nutrition. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(2): 229-238.
- [61] He Y, Xu Z H, Chen C R, Burton J, Ma Q, Ge Y, Xu J M. Using light fraction and macroaggregate associated organic matters as early indicators

- for management-induced changes in soil chemical and biological properties in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. *Geoderma*, 2008, 147(3/4): 116-125.
- [62] Xu Z H, Ward S, Chen C R, Blumfield T, Prasolova N, Liu J X. Soil carbon and nutrient pools, microbial properties and gross nitrogen transformations in adjacent natural forest and hoop pine plantations of subtropical Australia. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8(2): 99-105.
- [63] Balesdent J. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 485-493.
- [64] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [65] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 李灵, 谢锦升, 林鹏. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配. *生态学报*, 2004, 24(1): 1-8.
- [66] DeBano L F, Neary D G, Ffolliott P F. *Fire Effects on Ecosystems*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [67] Meyer J L, Tate C M. The effects of watershed disturbance on dissolved organic carbon dynamics of a stream. *Ecology*, 1983, 64(1): 33-44.
- [68] Chen C R, Xu Z H, Mathers N J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(1): 282-291.
- [69] Goodale C L, Aber J D, McDowell W H. The long-term effects of disturbance on organic and inorganic nitrogen export in the White Mountains, New Hampshire. *Ecosystems*, 2000, 3(5): 433-450.
- [70] Hood W, Williams M W. Landscape controls on organic and inorganic nitrogen leaching across an Alpine/Subalpine ecotone, Green Lakes Valley, Colorado Front Range. *Ecosystems*, 2003, 6(1): 31-45.
- [71] Andersson M, Michelsen A, Jensen M, Kjeller A. Tropical savannah woodland: effects of experimental fire on soil microorganisms and soil emissions of carbon dioxide. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(5): 849-858.
- [72] Battle J, Golladay S W. Prescribed fire's impact on water quality of depressional wetlands in southwestern Georgia. *The American Midland Naturalist*, 2003, 150(1): 15-25.
- [73] Pardini G, Gisbert M, Dunjó G. Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Science of the Total Environment*, 2004, 328(1/3): 237-246.
- [74] Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle. *Science*, 1998, 280(5371): 1903-1904.
- [75] Schmidt M W I. Biogeochemistry: carbon budget in the black. *Nature*, 2004, 427(6972): 305-307.
- [76] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-793.
- [77] 张旭东, 梁超, 诸葛玉平, 姜勇, 解宏图, 何红波, 王晶. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用. *土壤通报*, 2003, 34(4): 349-355.
- [78] Lehmann J, Sohi S. Comment on "fire-derived charcoal causes loss of forest humus". *Science*, 2008, 321(5894): 1295-1295.
- [79] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析. *土壤学报*, 2006, 43(2): 177-182.
- [80] 张履勤, 章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响. *土壤通报*, 2006, 37(4): 662-665.
- [81] 尹云锋, 杨玉盛, 高人, 陈光水, 谢锦升, 钱伟, 赵月彩. 皆伐火烧对杉木人工林土壤有机碳和黑碳的影响. *土壤学报*, 2009, 46(2): 352-355.
- [82] Ansley R J, Boutton T W, Skjemstad J O. Soil organic carbon and black carbon storage and dynamics under different fire regimes in temperate mixed-grass savanna. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): GB3006.
- [83] Czimczik C I, Schmidt M W I, Schulze E D. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in podzols of Siberian Scots pine forests. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(3): 417-428.
- [84] Dai X, Boutton T W, Glaser B, Ansley R J, Zech W. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1879-1881.
- [85] 刘兆云, 章明奎. 林地土壤中黑碳的出现及分布特点. *浙江林学院学报*, 2009, 26(3): 341-345.
- [86] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, Zech W. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. *Geoderma*, 2007, 139(1/2): 220-228.