

DOI: 10.5846/stxb201903040401

胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 吴泽鹏, 王振师, 李小川, 周宇飞. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展. 生态学报, 2020, 40(6): 1839-1850.

Hu H Q, Luo S S, Luo B Z, Wei S J, Wu Z P, Wang Z S, Li X C, Zhou Y F. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon in forest ecosystems: A review. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1839-1850.

林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展

胡海清¹, 罗斯生¹, 罗碧珍^{1,*}, 魏书精², 吴泽鹏², 王振师², 李小川², 周宇飞²

¹ 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

² 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广州 510520

摘要: 林火干扰是森林生态系统特殊而重要的生态因子, 可改变生态系统的养分循环与能量传递。研究林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响, 有助于理解森林生态系统中土壤碳固持和碳循环过程, 为制定科学合理的旨在减缓全球变化的林火管理策略具有重要意义。从 4 个方面阐述了林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响及内在机制: 分别从大尺度和小尺度两个方面阐述了林火干扰对土壤有机碳的影响及对森林生态系统碳循环与碳平衡的作用机制; 探讨了不同林火干扰类型和林火干扰强度下, 土壤活性有机碳对林火干扰的响应机制; 阐明了林火干扰对土壤惰性有机碳的影响及作用机制; 论述了林火干扰主要通过改变土壤有机碳的输入和输出过程进而影响土壤有机碳的稳定性及内在机制。最后提出了提高林火干扰对森林生态系统土壤有机碳影响定量化研究的 4 种路径选择: (1) 全面比较研究不同林火干扰类型对土壤有机碳循环及其碳素再分配过程的功能特征; (2) 进一步阐明林火干扰通过改变植被结构进而影响土壤生物群落结构, 剖析土壤碳库循环的内在机制; (3) 完善不同时空尺度下林火干扰对森林生态系统土壤碳库周过程的定量化研究; (4) 加强不同林火干扰类型土壤碳库稳定性差异的研究。

关键词: 林火干扰; 土壤有机碳; 有机碳组分; 活性有机碳; 碳稳定性

Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon in forest ecosystems: A review

HU Haiqing¹, LUO Sisheng¹, LUO Bizhen^{1,*}, WEI Shujing², WU Zepeng², WANG Zhenshi², LI Xiaochuan², ZHOU Yufei²

¹ College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

² Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

Abstract: Forest fire disturbance is a special and important ecological factor in forest ecosystems, and it changes nutrient circulation and energy transfer of the ecosystem. Studying the impacts of forest fire disturbance on soil organic carbon (C) in forest ecosystems improves the knowledge of soil C sequestration and C cycle processes in forest ecosystems, which facilitates strategies formulation for scientific and reasonable forest management aiming at slowing down global climate changes. The influencing mechanisms of forest fire disturbance on soil organic C in forest ecosystems has been reviewed in this paper. The mechanisms of forest fire disturbance affecting soil organic C along with C cycle and balance in the forest ecosystems at small or large scale has been analyzed. Response mechanisms of soil labile and inert organic C to different forest fire characteristics such as types and interference intensity were elucidated. In addition, it was elucidated that forest

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201404402); 中央高校基本科研业务费专项 (2572017PZ05); 国家自然科学基金面上项目 (41371109); 广西自然科学基金项目 (2014GXNSFBA118108)

收稿日期: 2019-03-04; **网络出版日期:** 2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luobizhen8@163.com

fire affected stability of soil organic C by changing its input and output processes. Based upon above, four ways to improve quantitative study of the impact of forest fire disturbance on soil organic C have been put forth. 1) It is needed to comprehensively compare functional characteristics of different forest fire disturbance types on soil organic C circulation and redistribution process; 2) The potential mechanism of forest fire disturbance changing vegetation structure and hence affecting soil biological community structure along with C circulation in soil should be clarified; 3) By means of quantitative study, the effect of forest fire disturbance on turnover process of soil C pool in forest ecosystem under different spatial and temporal scales could be improved; and 4) impacts of different forest fire disturbance types on stability of soil organic C pool should be intensively studied.

Key Words: forest fire disturbance; soil organic carbon; organic carbon fractions; labile organic carbon; carbon stability

林火干扰是森林生态系统特殊而重要的生态因子,对生态系统的养分循环与能量传递、物种组成、植物生长、土壤微生物群落、土壤淋溶和侵蚀等具有长期影响^[1]。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是土壤-植物生态系统的重要组成部分,是陆地生态系统中最大的碳储库,地球表层 1 m 土层深度的 SOC 储量(约 1400—1500 Gt)超过了植被碳库和大气碳库的总量^[2-3]。SOC 碳库在全球的碳循环与碳平衡中发挥重要作用。SOC 不仅影响土壤的物化性质和生物特征^[4],同时在土壤结构和土壤肥力中发挥重要作用,在陆地碳循环研究中有不可替代的作用。近年来,SOC 研究引起人们的广泛关注,早期主要关注 SOC 以及碳在土壤肥力中的功能,20 世纪末研究的热点主要为 SOC 在土壤污染物的缓冲和降解中的效应。近年来,随着全球气候变暖研究的深入,土壤碳固持与全球气候变暖的关系研究,已成为全球气候变化研究的三大热点之一^[5]。

土壤有机质是 SOC 储存库的主要存在形式,是联系成土过程中的生物要素与土壤发生、演化的纽带^[6],调节着土壤固相、液相和气相三相的量和结构,进而对土壤生态功能的过程产生重要影响^[7-9]。土壤有机质的分解、转化作为养分循环与能量传递的重要环节,对生态系统产生重要作用。而林火干扰作为特殊而重要的生态因子,对土壤有机质的分解、转化、淋溶、侵蚀等过程产生重要影响,其影响程度主要取决于火灾类型、林火强度、火烧季节、火烈度、火烧持续时间、火后降水时间等。研究表明林火干扰持续 30—60 min 的时间,温度可达 300—400℃ 高温,其土壤有机质损失达 35%—60%,因而由于燃烧条件的不同,导致所产生影响差异很大^[10-11],土壤有机质挥发的温度较低(100—200℃),而一般森林火灾火场的温度远超 200℃,200℃ 后开始炭化,300℃ 后容易改变土壤结构,促进土壤大分子比例增多。火场高温导致土壤中的大部分有机质在燃烧过程中消耗,只有部分 SOC 储存在地球碳库^[12-14],进而对全球碳平衡与碳循环产生较大的影响^[14]。近年来,国内外学者加强了林火干扰对土壤有机碳库构成、土壤有机碳稳定性、胶体组成、土壤有机质及腐殖质等方面的研究。土壤有机碳库根据有机碳周转速率和驻留时间的不同,不同学者根据研究的需要将其分为活性碳库、慢性碳库和惰性碳库^[15-16],而也有一些学者将其分为活性有机碳和惰性有机碳^[17-18]。作为土壤质量的重要指标,活性有机碳在生态系统中具有较高的活性,在土壤物理、化学和生物特性中起着重要作用,而林火干扰作为生态干扰因子对土壤活性有机碳亦产生较大的影响。惰性有机碳的多少是衡量 SOC 稳定性的重要指标。林火干扰作为生态系统中重要的干扰因子,通过林火干扰后土壤惰性有机碳变化的研究,可进一步量化土壤有机碳平衡的影响研究,进而增加森林生态系统碳平衡的理解及定量化研究。

林火干扰过程实质为碳元素在各个碳库再分配过程的生态效应,影响矿质 SOC 库及其组分的稳定性,进而对不同尺度生态系统生产力及系统恢复产生重要影响。深入研究林火干扰对森林生态系统 SOC 的影响,有助于理解森林生态系统中土壤碳固持和碳循环过程,为制定科学合理的旨在减缓全球变化的林火管理策略具有重要意义。本文综述了林火干扰对 SOC 及各组分及碳库稳定性的影响,以便人们更好地理解林火干扰对生态系统过程的生态学意义,主要从 4 个方面阐述了林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响及内在机制:分别从大尺度和小尺度两个方面阐述了林火干扰对土壤有机碳的影响及对森林生态系统碳循环与碳平衡的作用机制;探讨了不同林火干扰类型和林火干扰强度下,土壤活性有机碳对林火干扰的响应机制;阐明了林

火干扰对土壤惰性有机碳的影响及作用机制;论述了林火干扰主要通过改变土壤有机碳的输入和输出过程进而影响土壤有机碳的稳定性及内在机制。最后提出了林火干扰对森林生态系统土壤有机碳影响量化研究的 4 种路径选择。

1 林火干扰对土壤有机碳的影响

林火干扰对森林生态系统碳循环的影响可概括为碳元素在生态系统各个碳库的再分配过程^[16,19]。森林生态系统在森林火灾过程中消耗大量的植被碳库和凋落物碳库,植被碳库和凋落物碳库以各种含碳气体等形式进入大气碳库,而未完全燃烧的剩余物部分变成凋落物碳库。林火干扰减少了植被碳库,进而导致对大气碳库和凋落物碳库产生较大影响,从而影响土壤碳库的动态变化。SOC 来源于地表和地下生物残留物或凋落物的累积,这种累积变化过程中,SOC 的储量和质量都在持续地被改变。林火干扰对于 SOC 碳库而言,其影响可从小尺度和大尺度两方面进行研究,本文探讨的林火干扰对土壤碳库小尺度影响主要是指景观尺度及以下尺度(包括生态系统尺度和林分尺度)发生的森林火灾,大尺度指的是区域尺度(包括全球尺度)发生的森林火灾。通常在小尺度范围内,地形条件的变化可能是影响 SOC 储量呈现出垂直分布变化规律的主要原因。而在相对更大的区域尺度下,气候、土壤质地、地形、植被以及人类活动和管理水平等的交互作用均可能是影响 SOC 空间迁移和形态转化的重要因素,从而导致不同区域范围的 SOC 储量的分异^[20]。林火干扰对土壤碳库的储量和质量有着复杂的影响,这些影响包括减少或消除地表和表层土壤中的生物量,进而影响植被微生物种群的变化,以及土壤物理和化学性质的改变,从而影响森林生态系统碳循环与碳平衡。

1.1 小尺度上林火干扰对土壤有机碳的影响

许多研究表明,林火干扰后地表凋落物分解并产生大量的灰分等物质,增强了吸收太阳辐射的作用,使得地表温度升高的同时,也使表层 SOC 大量分解,进而影响森林生态系统的物质循环和能量流动^[21]。火灾严重程度(火烈度)对土壤有机质的影响主要包括轻微蒸馏(次要成分的挥发),炭化或完全氧化。在高强度林火干扰中,通常会发现 SOC 显著减少^[12,22]。而在轻度火烧中,由于低温导致有机质不完全燃烧,对表层 SOC 储量的影响不明显^[23-25]。此外,Bennett 等^[26]研究计划烧除对澳大利亚桉树林土壤碳库的影响,结果表明火后 SOC 增加。这表明林火干扰对 SOC 影响基于初始土壤值和植被类型,结合不同火强度(火烧时的温度和停留时间)呈现较大差异,在小尺度范围内,在同一研究区域之间这些因素的高度异质性,林火干扰对 SOC 的空间异质性影响也比较大。此外,火灾严重程度还受到坡向、坡位和坡度等非生物因素的影响^[27],在火后环境中,地形和气候等非生物因素也会促成生态系统产生响应机制,从而影响 SOC 的变化^[28]。SOC 变化的程度和持续时间将随着火灾严重程度而变化,同时也会随着气候和地形之间的火灾后交互作用而变化,在火烧迹地植被恢复过程中对土壤有机质的输入产生重要影响^[12]。林火干扰主要通过地表水热条件变化对凋落物的分解速率产生影响,进而影响 SOC 的储量和周转时间。Kirschbaum^[29]研究认为土壤温度的升高可加快 SOC 的周转速率,降低周转时间。总之,小尺度林火干扰对 SOC 的即时影响其储量是下降的,但长期影响来看,林火干扰改变了 SOC 在土壤剖面的构成并重新分配,继而形成稳定的 SOC,有利于土壤碳库的封存。

1.2 大尺度上林火干扰对土壤有机碳的影响

研究大尺度上林火干扰后的 SOC,对于更好地了解 SOC 碳储量在全球气候变化和环境问题中的作用非常重要,有助于揭示 SOC 动态变化规律。随着全球气候变暖,气温上升有利于形成森林火灾发生和发展的火环境,增加火灾发生的概率,特别是火险等级的提高,可导致森林火灾发生的频率增加和林火强度增强。在全球变暖背景下对火源分布的影响因子主要是气候条件、植被状况和人为因子等因素相互作用的结果,其中气温和降水对火源分布状况产生直接影响^[21]。SOC 的动态变化体现了陆地生态系统中碳平衡关系,林火干扰严重打破了大气-植被-地表凋落物-土壤之间的水热平衡,继而改变了土壤的水热微环境。林火干扰是陆地生态系统特殊的干扰形式,其改变了土壤的理化性质和微生物特性,影响土壤生态系统的养分循环和物质重新分配,从而对生态系统生产力以及系统恢复发生作用。Kirschbaum^[30]研究表明 SOC 具有更高的温度敏感性,

气候变暖可通过加快分解速率来减少 SOC,而这些分解后的碳以 CO_2 排放到大气中,影响大气的化学性质和辐射平衡,提高生态系统生产力,同时增加了 SOC 的储量。

林火干扰对 SOC 的影响具有复杂性和不确定性,许多学者在不同尺度下进行了 SOC 的空间变异性特征研究,为了定量评价林火干扰对 SOC 的影响,模型模拟有助于更好地理解大尺度范围内林火干扰-土壤-植被动态变化,同时增加对生态系统的生物地球化学循环之间的相互作用关系的了解,亦有利于揭示历史上林火干扰对 SOC 产生的影响以及预测未来的变化趋势,主要包括基于遥感数据,分析不同分辨率下的碳循环情景,根据林火干扰因子导致生态系统功能变化的生物地球化学模型,其中以生物地球化学模型为主^[31]。

2 林火干扰对土壤活性有机碳的影响

土壤活性有机碳(Labile organic carbon, LOC)是指土壤中移动快、稳定性差、易氧化、矿化,并对植物和土壤微生物活性较高的那部分土壤碳素^[21,32]。LOC 不仅为植物直接提供养分,亦在土壤碳循环中的作用非常重要,已成为土壤养分转化的驱动力和土壤微生物活动的能源^[33]。活性有机碳在有机碳中所占比例较小,但对土壤养分的驱动因子反应比有机碳更为敏感,可作为 SOC 变化的指示指标。根据分离及测定方法的不同,LOC 常用微生物量碳、可溶性碳、易氧化碳和可矿化碳等表征^[34-36]。林火是森林生态系统中重要的生态干扰因子之一,燃烧过程中通过热量传播,烧毁地表可燃物,进而对土壤理化性质、有机碳各组分产生相应的影响^[1,33]。林火干扰改变了森林生态系统土壤和大气之间碳素的交换,将具有生物活性的物质转变成无机的芳香族大分子。同时,不同 SOC 组分对林火的响应和敏感度也不同。因此为了揭示 LOC 的动态变化机制,进一步提高森林生态系统的可持续管理水平,应该更加关注林火干扰对森林生态系统土壤之间的交互关系^[21,37]。

2.1 土壤微生物生物量碳(MBC)

土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)是指土壤中体积 $< 5-10 \mu\text{m}^3$ 的活微生物体中所含的有机碳,是 LOC 中最活跃和最易变化的一部分^[18],主要以微生物量碳为主,通常占总有机碳比例不超过 10%,一般为 1%—5%^[38]。土壤 MBC 参与和调控土壤物质能量流动和养分循环过程,表征 SOC 的同化和矿化能力,与微生物个体数量指标比较,更能在土壤碳库变化之前较好地反映土壤质量的微小变化^[39]。土壤 MBC 的动态变化亦可直接或间接地反映土壤肥力和土壤利用方式的变化,土壤 MBC 与 SOC 的比值(微生物熵)高低可指示 SOC 的累积、平衡与矿化的重要过程,反映了土壤中输入的有机质向微生物量碳的转化效率,该值越高,土壤碳有效性越大^[40-41]。因此,研究土壤 MBC 对于了解土壤养分供应情况、转化过程及全球碳循环中的作用受到广泛关注,特别林火干扰对土壤 MBC 的影响研究迅速增加^[39,41-43]。

相关研究表明,土壤 MBC 含量与总有机碳含量间呈正相关。林火干扰对土壤总有机质含量影响的变化很大,主要取决于火灾类型(计划烧除和野火)、林火干扰强度等^[12]。林火干扰后不久,通过改变土壤环境条件和养分供应对森林生态系统的土壤微生物活动产生短期和长期影响,使有机质含量急剧下降^[44-47],然而有研究报道称林火干扰后有机质含量增加,主要原因是林火灼伤树冠层,加速上层有机物的枯落使得生物量输入增加^[48]。这些不一致的实验结果可能是由于研究区域的植被组分,土壤质地,火灾类型和取样方法等的差异造成的^[49]。一般而言,中、低强度的林火干扰烧毁地表可燃物以减少其积累,对地表有机层影响较大,而对 SOC 影响较小。此外,高强度林火干扰释放的高温,使表层土壤受热分解有机质,减少有机物质的输入,随着林火干扰后根系的死亡,菌根的消失,减少了土壤 MBC,使 SOC 以气态形式损耗^[50]。Raison 等^[51]发现火烧后桉树林土壤温度达到 120°C ,微生物量减少了 34%—80%;而当土壤温度达到 250°C 时,微生物量则减少了 85%—99%。刘发林^[52]研究发现模拟火干扰后短期内土壤碳浓度较高,但微生物生物量碳较低。

此外,林火干扰对土壤 MBC 的影响因土壤采样深度和土壤湿度不同而异^[53-55]。土壤有机质是影响土壤 MBC 的重要因素^[56],土壤中的活性碳源是土壤微生物。研究表明,土壤 MBC 与 SOC 的垂直分布特征一致,均呈现随土层深度增加而降低的分布特征,上层土壤具有更适合微生物活动的生境条件,同时密集植物的根系分泌物及脱落物,使得上层土壤微生物活性高于下层土壤^[39]。Prieto-Fernández 等^[53]研究发现土壤 MBC

在 0—5 cm 土层中比在 5—10 cm 土壤中降低了更多(50%),深度越大,SOC 驻留时间越长,有效性越低。李红运等^[39]研究大兴安岭火烧迹地不同恢复方式中发现土壤 MBC 随土层深度增加而降低,而不同植被组成、地形、气候等决定火烧迹地 SOC 的恢复速度^[12]。这些变化可归因于在燃烧过程产生的温度梯度变化,增温效应随着土壤深度的增加而减小^[53]。此外,在湿润土壤条件下,火灾发生时通过蒸发的水分进而影响土壤的水热特性,致使矿质土壤 5 cm 土层的温度很少超过 150℃,土层 20 cm 以下的温度变化较小^[12]。

2.2 土壤可溶性有机碳(DOC)

土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)是指可溶于水且能通过孔径为 0.45 μm 滤膜,具有不同分子量大小和结构有机物中的有机碳。主要由一些简单到复杂的胡敏酸和富里酸分子组成,其含量受各种因素影响一般不超过 200 mg/kg。虽然学者们对土壤 DOC 进行了广泛研究,但 DOM 的来源还存在着较多争论。有研究表明,土壤 DOC 可能来自于土壤内部和土壤外部。McDowell 等^[57]研究发现土壤 DOC 的主要形成途径是森林土壤中腐殖质的淋溶过程及微生物分解的生物化学过程。Kaiser 等^[58]对温带气候区 125 种森林土壤的 DOC 研究发现,从土壤中释放出来的 DOC 数量取决于土壤本身有机质含量的高低,此外还与 CH₄ 产生量显著相关。土壤 DOC 含量虽然只占 SOC 中很少一部分,但与土壤有机质其他组分之间可在一定条件下相互转化,始终处于动态平衡之中,与土壤 MBC 具有很高的相关性。此外,土壤 DOC 在森林土壤溶液中的运输是土壤中的 C、S、N、P 等元素从地表生物体到矿质土壤的载体因子,对土壤养分循环和土壤中重金属元素的迁移、转化起着重要作用,因此可作为微生物生长和生物分解速效养分资源的指标和能量来源^[32,41]。

林火干扰是森林生态系统结构和功能的主要驱动因素之一,对土壤养分循环,植被结构和组成以及食草动物分布具有普遍影响^[1,59]。此外,随着以气候变暖为标志的全球气候变化研究的不断深入,林火干扰对土壤 DOC 动态影响亦愈来愈受重视。研究表明,林火干扰可引起土壤的 DOC 组成和输出量发生不同变化^[60]。Andersson 等^[61]研究表明,在埃塞俄比亚西南部林地林火干扰 12 d 后,土壤 DOC 浓度比未过火林地高出 85%,90 d 时亦高出 43%。Wang 等^[22]采用 Meta 分析亦表明野火明显增加土壤 DOC 浓度,但计划烧除对土壤 DOC 影响不大。Zhao 等^[62]研究了计划烧除后不同恢复时限对东北湿地 SOC 碳库的影响,结果表明火干扰 1 a 后土壤 DOC 含量仍然高于未过火林地土壤,火后第二年与未过火林地土壤之间没有显著差异。通常林火干扰后,表层土壤温度升高,生物活性增加,继而加快了土壤中有机质的分解速率,土壤表层 DOC 浓度随土壤温度空间分异和生物活性上升而增加。关于林火干扰与土壤 DOC 浓度、组成及输出作用机理仍有待进一步的研究。

2.3 土壤易氧化碳(EOC)

土壤易氧化碳(Easily oxidizable carbon, EOC)是利用化学氧化方法测定的活性有机碳,是 SOC 中最具活性的组分之一,其变化可指示土壤碳库早期变化的快慢,对土壤碳库平衡和土壤生物化学、土壤肥力维持具有重要的意义。常用的氧化剂有 K₂Cr₂O₇和 KMnO₄两种,测定方法分别是 K₂Cr₂O₇外加热法和 KMnO₄氧化法。研究表明,能被 0.333 mol/L 的 KMnO₄溶液氧化的 SOC 对种植作物变化最显著,因此将能被 0.333 mol/L 的 KMnO₄溶液氧化的 SOC 称为易氧化碳^[63-64]。一般采用高锰酸钾氧化-比色法测定,根据 KMnO₄的消耗量,进而可计算土壤 EOC 含量^[64]。

研究表明,土壤 EOC 与 SOC 存在显著的正相关关系,其含量多少取决于 SOC 含量。由于枯落物分解速率、归还量不同造成进入土壤的有机质含量不同,受到微生物、土壤酶等的影响而快速氧化分解,继而使土壤 EOC 含量不同。此外,土壤 EOC 含量高低与海拔相关,这种差异的结果与根系、土壤黏粒含量有关^[65]。土壤 EOC 含量虽只占 SOC 很小一部分,但其比值可反映土壤碳稳定性指标,比值越小,说明土壤碳的活性越小,碳库稳定性越好。研究土壤中易氧化、不稳定的有机质,是了解土壤有机质与土壤营养元素循环、土壤理化性状等关系的有效途径。张茂增等^[66]研究了轻度火烧对大兴安岭樟子松天然林 SOC 组分的影响,结果表明在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层的土壤 EOC 比对照样地分别降低了 1.36 g/kg 和 0.49 g/kg,而 10—20 cm 层未有明显变化。刘俊第等^[41]研究了炼山对中亚热带马尾松人工林采伐迹地 SOC 组分的影响,结果表明,火后 1 年

0—10 cm 土层土壤 EOC 含量比对照降低了 2.69%。赵志霞等^[67]研究了火烧对热带天然马尾松林土壤有机碳的影响,发现过火后在 0—50 cm 的土壤各层中,火烧样地易氧化碳含量均高于对照样地,变化幅度介于 4.5%—47.6%。

2.4 土壤颗粒有机碳(POC)

土壤颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)是指土壤中与砂粒(53—200 μm)结合的植物残体分解产物组成,其周转速度相对较快(约为 5—20 a),在有机质分解转化中相对较慢但生物活性较高的有机碳,可认为是土壤中有机碳变化的敏感指标和短期植物营养碳库^[57]。测定土壤 POC 一般采用六偏磷酸钠(NaPO_3)6 分散法进行分离,用 53 μm 筛分选在 60℃ 烘干后使用元素分析仪分析^[68]。

土壤 POC 含量与可燃物类型有关,同时土壤剖面亦对其产生影响,但影响程度因表层植被类型不同和根系分布而存在差异。研究表明,土壤 POC 与轻组有机碳有较高的相关性。Martí-Roura 等^[69]研究了火烧后地中海草地和灌木林土壤颗粒有机质组分在土壤中的稳定性。刘俊第等^[41]研究了炼山对中亚热带马尾松人工林采伐迹地 SOC 组分的影响,结果表明,火后一年 0—10 cm 土层土壤 POC 含量比对照降低了 30.9%。张茂增等^[66]研究了轻度火烧对大兴安岭樟子松天然林 SOC 组分的影响,结果表明在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层的土壤 POC 比对照样地分别降低了 5.85 g/kg 和 2.98 g/kg,而 10—20 cm 层未有明显变化。轻度火烧迹地和对对照样地 POC 含量随土层深度增加而降低,与土壤 EOC 变化规律一致。魏云敏^[70]研究了火干扰对兴安落叶松林颗粒有机碳含量影响。

2.5 土壤可矿化碳(MC)和轻组有机碳(LFOC)

土壤可矿化碳(Mineralizable carbon, MC)又称生物可降解碳,是 SOC 组分之一,主要利用微生物和酶的作用分解土壤有机物质,是衡量微生物分解土壤有机物质含量的指标^[15]。通常采用土壤培养法进行测定。许多学者将 SOC 碳库分解后向大气释放 CO_2 的反馈过程称为碳矿化^[71-72],是维持土壤养分供应和土壤质量的重要途径,在全球碳循环中起着重要的作用。因此,研究土壤可矿化碳就是研究土壤 CO_2 释放量或专性呼吸率($q\text{CO}_2$)(每单位微生物量产生的 CO_2 量)^[32],是土壤中重要的生物化学过程,释放养分供植物吸收利用,同时也为腐殖化过程提供了原料。 $q\text{CO}_2$ 高值和低值分别反映了发酵性微生物区系和稳态土著性微生物区系的活性,因此被广泛用于评价土壤中微生物的活性^[32,73]。土壤可矿化碳反映了土壤被矿化那部分的碳量, SOC 和 N 作为 SOC 矿化的底物,影响土壤碳矿化过程。研究表明, SOC 矿化速率与不同类型凋落物现存量及其不同分解质量损失率分别呈负相关和正相关^[74],其矿化速率对土壤中养分元素的释放产生重要影响,同时对温室气体的产生、土壤质量的维护等起到重要作用,尤其在 SOC 向大气的排放量中发挥重要作用,进而影响全球气候变化。因此,土壤可矿化碳可用来联系环境胁迫、土壤肥力高低的纽带,亦是估测土壤碳素有效性的指标^[72]。研究表明,土壤可矿化碳与 SOC 分解密切相关,通常土壤温湿度和通气性的提高,将加速土壤的矿质化过程。Zhao 等^[62]研究了计划烧除对东北湿地土壤有机碳矿化的影响,火后加快了碳矿化速率。Hatten 等^[75]在实验室模拟了不同强度的林火干扰,高强度林火干扰导致矿质土壤最初具有较高的碳矿化速率。Guerrero 等^[76]研究表明矿质土壤被加热至 500℃ 时,碳矿化速率增加,但在 500℃ 以上时因总碳的减少和难分解物质的增加,致使矿化速率降低。矿质化过程虽然为植物生长提供了矿质养分,但因有机质分解过快而造成养分浪费,难以形成腐殖质,进而破坏土壤物理性质,使土壤肥力水平下降,甚至使土壤退化^[77]。

根据土壤在一定比重(1.6—2.0 g/mL)溶液中的沉降,将土壤中相对密度较低的游离态有机物质和相对密度较高的有机无机复合体分散,通过离心将土壤分成液体和固体两部分,其中悬浮液为轻组有机碳(Light fraction organic carbon, LFOC),沉降到下部的固体部分为重组有机碳(Heavy fraction organic carbon, HFOC)。LFOC 介于植物残体和腐殖化有机质之间的游离态有机质,主要由不同分解程度的微动植物残体、生物遗留残骸、菌丝体、孢子及一些吸附在碎屑上的矿质颗粒等组成, LFOC 在土壤中具有分解速度快、周转期短、C:N 比高、易受环境因素影响等特点,常作为衡量土壤肥力短期变化的指标^[78]。HFOC 主要成分是有机矿质复合的腐殖质,分解及转化速度较慢。研究表明, LFOC 和 HFOC 在 SOC 中所占比例不相同^[79]。徐广平等^[43]研究

喀斯特湿地不同植物群落 SOC 组分特征,结果表明各群落 LFOC 占 SOC 范围为 7.79%—13.56%,HFOC 占 SOC 比例在 86.44%—92.21%,比值随土层变化无明显规律,而 LFOC 和 HFOC 含量在土壤垂直方向上呈一定规律分布,随土层的加深而逐渐减少。Muqaddas 等^[80]研究表明,林火干扰(计划烧除)对密度小于 1.6 g/cm³ 的 LFOC 影响显著,且 LFOC 含量低于未过火样地。这可能与细根生物量减少有关^[81]。陆昕等^[82]研究了火干扰对兴安落叶松林土壤轻组有机碳的影响,发现火干扰 3 a 后土壤轻组有机碳增加。赵志霞等^[67]研究发现马尾松林火后各层土壤轻组有机碳含量均高于对照样地。

3 林火干扰对土壤惰性有机碳的影响

SOC 是由各种有机碳组成的复杂系统,其中活性有机碳是土壤较为敏感的组分,是土壤早期有机碳变化的指示物,能够指示土壤环境及性质的敏感变化^[15],而土壤中活性较差的惰性有机碳(Recalcitrant organic carbon, ROC)则可指示土壤碳库储存的能力,是最具有固碳潜力的一种有机碳形态,主要包括木质素、腐殖质、多酚及被保护的多糖等^[15,35]。通过物理分组、化学分组、生物技术分组等方法把 SOC 分成不同的组分^[83]。通过分组方法分离出的活性有机碳和惰性有机碳对土壤的固碳产生不同的效应,进而增进对土壤碳固持能力的了解,促进温室气体减排研究的定量化研究,从而理解各组分在土壤碳循环中的作用。活性有机碳占的百分比越大,说明有机碳质量也就越高,越易被微生物分解,有机碳的稳定性也就越差。ROC 由于其物理和化学性质更为稳定,分解速率慢、周转期长达 50 年及至几千年^[84]。Fernández 等^[77]使用双指数模型评估高强度野火对西班牙西北部樟子松(*Pinus sylvestris*)和海岸松(*Pinus pinaster*)的活性和惰性有机碳及其相关动力学参数的影响,惰性有机碳的矿化速率始终低于未过火样地。Adkins 等^[85]研究不同林火干扰对内华达山脉混交针叶林土壤各碳库的影响,结果表明,惰性有机碳库的平均驻留时间在重度林火干扰中最大。目前的研究主要集中在林火干扰对 SOC 的影响,而林火干扰对 ROC 的研究相对较少。有关 ROC 研究多集中在施肥、土地利用变化、气候变化等因子对 ROC 的干扰所产生的影响。

4 林火干扰对土壤有机碳稳定性的影响

土壤有机质的含量和稳定性是生态系统的一种特性。在森林生态系统中,土壤有机质的输入和输出影响土壤碳库的累积水平和稳定状态,其一般依赖于土壤中有机质的矿化与腐殖化之间的平衡^[86]。地表及地下凋落物的输入是矿质土壤碳库的主要输入过程,土壤有机质主要通过铁铝氧化物、铁铝离子等)结合的物理化学(无机-有机结合)方式或物理保护方式(形成团聚体)降低其生物有效性,从而提高其稳定性^[87]。地表及地下凋落物的输入增加土壤新有机碳的形成,同时能够加快土壤原有机碳矿化,即“激发效应”^[88]。林火干扰对森林生态系统土壤碳稳定性的影响有着复杂的过程。这些影响包括添加或去除地上和表土新鲜或生物碳等物质,通过改变现有土壤物理和化学性质,基于生物改变和烧焦的植物残留物的不同化学组成,最终土壤中的碳输入会导致土壤有机质中芳香族碳的显著增加^[75,89]。这种增加将导致林火干扰后土壤极性降低和防水性增强,继而影响矿质土壤碳库的稳定过程。此外,由于土壤碳库比例很大,SOC 及其组分的大小和周转时间决定了林火干扰后植被恢复中生态系统碳库的稳定性^[90]。

土壤团聚体是有机质积累和转化的关键场所,其形成与稳定是土壤碳库稳定的重要物理保护机制之一,主要通过将微生物和土壤酶与底物之间进行空间隔离的物理方式降低土壤有机质的周转速率,同时减少氧气进入微团聚体内,避免有机底物的分解,从而提高土壤碳库的稳定性^[87,91-92]。土壤聚集过程和聚集体稳定性受土地管理和干扰的影响^[93]。林火干扰如何影响森林土壤团聚体稳定性的研究尚无定论,需进一步研究火后团聚体的变化对土壤系统功能的影响^[94-95]。团聚体的物理保护作用的大小取决于团聚体的粒径,根据火场温度及其持续时间,可增强或破坏土壤的斥水性^[96]。林火干扰影响土壤有机质含量和质量以及改变土壤化学和生物学特性,从而改变主要的团聚体结合剂^[97]。Mataix-Solera 等^[95]研究表明林火干扰对土壤团聚的影响依赖于火强度及其对团聚过程相关特性的影响。中度林火干扰强度在土壤团粒外表面中形成疏水膜,可

增加土壤结构的稳定性^[98-99]。Arcenegui 等^[100]研究表明在地中海地区的石灰质土壤中,野火发生区域增加了土壤团聚体的稳定性。此外,炼山管理可降低热带落叶林的土壤团聚体稳定性^[101],但可提高地中海土壤中团聚体的稳定性^[99]。计划烧除会导致中亚北部森林中的团聚体开裂^[102],但对矿质土壤聚集及其在我国森林生态系统稳定性的影响研究仍然较少。

5 研究展望

森林生态系统是全球碳循环的重要组成部分。林火干扰是森林生态系统自然生态过程,是生态系统结构和功能的主要驱动因素之一,对其养分循环、可燃物类型的组成具有长期影响^[1,59]。了解林火干扰对森林生态系统 SOC 的影响,有助于理解森林生态系统中土壤碳固持、碳封存和碳循环过程。了解林火干扰与气候变化的复杂关系及相互作用机制,从不同尺度探讨林火干扰对森林生态系统 SOC 循环的贡献,剖析林火干扰在森林生态系统 SOC 循环的作用,重新认识林火干扰引起其他生态因子的再分配过程的生态效应,这为制定科学合理旨在减缓全球变化的林火管理策略有重要意义。由于林火干扰对土壤有机碳的影响机理复杂,主要受林火干扰类型、土壤采样深度、火后不同植被恢复时间等因素的影响而产生较大差异^[53,55],因此全面认识林火干扰(计划烧除和野火)对景观尺度和区域甚至全球尺度土壤碳循环与碳平衡中的各种影响,可深化生物地球化学循环过程中地上和地下碳的输入输出关系的理解。该领域亟待深入研究的方面主要有以下几点:

(1)全面比较研究不同林火干扰类型对 SOC 循环及其碳素再分配过程的功能特征,以保护森林资源和森林生态系统养分库的土壤养分和土壤肥力的持续性。全面比较研究不同林火干扰类型对 SOC 循环及其碳素再分配过程的功能特征,进一步量化不同林火周期造成的土壤养分流失,改进火后侵蚀对土壤肥力影响的评估。计划烧除可减少可燃物的积累,减少野火发生的风险,需进一步探讨采用重复火烧措施的合理间隔期,研究林火干扰严重程度(火烈度)与土壤生态系统结构、功能之间的定性和定量关系,以保护森林资源和森林生态系统养分库的土壤养分和土壤肥力的持续性,为提高森林生态系统生产力及发挥生态系统服务功能提供理论基础。

(2)进一步阐明林火干扰通过改变植被结构进而影响土壤生物群落结构,剖析土壤碳库循环的内在机制。加强林火干扰如何通过改变植被结构进而影响土壤生物群落结构,以进一步阐明在不同林火干扰条件下的各种森林生态系统中,植被结构影响土壤微生物群落结构进而改变土壤碳库循环的内在机制。研究表明由林火干扰引起的土壤微生物生物量的变化更加复杂,但较少考虑从微生物底物利用效率角度关注地表凋落物和根系中的菌根输入过程的影响。尽管已有研究关注林火干扰和微生物活性的相互作用对土壤碳库的影响,但对其影响的效应方向与强度差别较大,有待深入探讨 LOC 的内循环(如活性有机碳的根际效应)的影响机制。

(3)完善不同时空尺度下林火干扰对森林生态系统土壤碳库周转过程的定量化研究。充分利用“3S”集成技术,考虑时空尺度效应,完善不同时空尺度下林火干扰对森林生态系统土壤碳库周转过程的定量化研究。充分利用“3S”现代研究手段,与模型模拟相结合时充分考虑时空尺度效应,在预测大尺度森林生态系统碳库储量时可用小尺度的研究成果进行合理解释转换问题。此外,随着稳定同位素探测技术、核磁共振、光谱分析技术等土壤非破坏性分析技术的应用,能够更为有效地完善不同时空尺度下阐明林火干扰对森林生态系统土壤碳库周转过程,从而揭示土壤碳库周转规律。

(4)加强不同林火干扰类型土壤碳库稳定性差异的研究,准确评价林火干扰下森林生态系统服务功能对全球气候变化下的响应,实现不同林火干扰类型 SOC 碳库稳定性的定量化研究。在全球变化进程中,加强不同林火干扰类型土壤碳库稳定性差异的研究。更加全面地探索 SOC 变化的过程与机制,系统开展“植物-土壤-水-微生物-气候”的系统研究,探究林火干扰后各环节在不同时期对 SOC 的作用机制,以及在林火干扰后同一时期不同环节对 SOC 迁移转化的综合作用,准确评价林火干扰下森林生态系统服务功能对全球气候变化下的响应,实现不同林火干扰类型 SOC 碳库稳定性的定量化研究。

参考文献 (References):

- [1] Alcañiz M, Outeiro L, Francos M, Úbeda X. Effects of prescribed fires on soil properties: a review. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 944-957.
- [2] Yang X, Wang D, Lan Y, Meng J, Jiang L L, Sun Q, Cao D Y, Sun Y Y, Chen W F. Labile organic carbon fractions and carbon pool management index in a 3-year field study with biochar amendment. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4): 1569-1578.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [4] Luo Z K, Feng W T, Luo Y Q, Baldock J, Wang E L. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4430-4439.
- [5] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 杨利民. 陆地生态系统类型转变与碳循环. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 250-254.
- [6] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 139.
- [7] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, Vogel H J. Soil structure as an indicator of soil functions: a review. *Geoderma*, 2018, 314: 122-137.
- [8] Jackson R B, Lajtha K, Crow S E, Hugelius G, Kramer M G, Piñeiro G. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2017, 48: 419-445.
- [9] Chertov O G, Komarov A S, Bykhovets S S, Kobak K I. Simulated soil organic matter dynamics in forests of the Leningrad administrative area, northwestern Russia. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 29-44.
- [10] Tatton F, Felici F, Mangani F. Lab-scale treatability tests for the thermal desorption of hydrocarbon-contaminated soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2013, 22(4): 433-456.
- [11] Ma F J, Zhang Q, Xu D P, Hou D Y, Li F S, Gu Q B. Mercury removal from contaminated soil by thermal treatment with FeCl₃ at reduced temperature. *Chemosphere*, 2014, 117: 388-393.
- [12] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1-10.
- [13] O'Brien P L, DeSutter T M, Casey F X M, Khan E, Wick A F. Thermal remediation alters soil properties: a review. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 826-835.
- [14] 田娜, 王义祥, 翁伯琦. 土壤碳储量估算研究进展. *亚热带农业研究*, 2010, 6(3): 193-198.
- [15] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [16] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, Fisher V A, Coe M T, Lenters J D, Young-Molling C, Ramankutty N, Norman J M, Gower S T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.
- [17] Dalal R C, Chan K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39(3): 435-464.
- [18] 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.
- [19] Hume A, Chen H Y H, Taylor A R, Kayahara G J, Man R Z. Soil C:N:P dynamics during secondary succession following fire in the boreal forest of central Canada. *Forest Ecology and Management*, 2016, 369: 1-9.
- [20] O'rourke S M, Angers D A, Holden N M, McBratney A B. Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3561-3574.
- [21] 胡海清, 魏书精, 孙龙, 王明玉. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 57-75.
- [22] 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.
- [23] Neill C, Patterson III W A, Crary Jr D W. Responses of soil carbon, nitrogen and cations to the frequency and seasonality of prescribed burning in a Cape Cod oak-pine forest. *Forest Ecology and Management*, 2007, 250(3): 234-243.
- [24] Switzer J M, Hope G D, Grayston S J, Prescott C E. Changes in soil chemical and biological properties after thinning and prescribed fire for ecosystem restoration in a Rocky Mountain Douglas-fir forest. *Forest ecology and Management*, 2012, 275: 1-13.
- [25] Roaldson L M, Johnson D W, Miller W W, Murphy J D, Walker R F, Stein C M, Glass D W, Blank R R. Prescribed fire and timber harvesting effects on soil carbon and nitrogen in a pine forest. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(S1): S48-S57.
- [26] Bennett L T, Aponte C, Baker T G, Tolhurst K G. Evaluating long-term effects of prescribed fire regimes on carbon stocks in a temperate eucalypt forest. *Forest Ecology and Management*, 2014, 328: 219-228.
- [27] Keeley J E, Pfaff A H, Safford H D. Fire suppression impacts on postfire recovery of Sierra Nevada chaparral shrublands. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, 14(3): 255-265.

- [28] Keeley J E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(1): 116-126.
- [29] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 753-760.
- [30] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 21-51.
- [31] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 175-188.
- [32] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- [33] 赵鑫, 宇万太, 李建东, 姜子绍. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2203-2209.
- [34] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究. *林业科学*, 2005, 41(1): 10-13.
- [35] 余健, 房莉, 卞正富, 汪青, 俞元春. 土壤碳库构成研究进展. *生态学报*, 2014, 34(17): 4829-4838.
- [36] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [37] 胡海清, 魏书精, 魏书威, 孙龙. 气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响. *灾害学*, 2012, 27(4): 37-41.
- [38] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 钱佩源, 张树清, Malhi S S, 王方. 土壤有机质概念和分组技术研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 717-722.
- [39] 李红运, 辛颖, 赵雨森. 火烧迹地不同恢复方式土壤有机碳分布特征. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2747-2753.
- [40] Wolters V, Joergensen R G. Microbial carbon turnover in beech forest soils at different stages of acidification. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(9): 897-902.
- [41] 刘俊第, 林威, 王玉哲, 姜婧, 方熊, 易志刚. 火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5374-5382.
- [42] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 刘敏英. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征. *生态学报*, 2014, 34(21): 6326-6336.
- [43] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征. *环境科学*, 2019, 40(3): 1491-1503.
- [44] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, Peters S E. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1130-1139.
- [45] Hart S C, Deluca T H, Newman G S, MacKenzie M D, Boyle S I. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/3): 166-184.
- [46] Granged A J P, Zavala L M, Jordán A, Bárcenas-Moreno G. Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: a 3-year study. *Geoderma*, 2011, 164(1/2): 85-94.
- [47] Sun Y X, Wu J P, Shao Y H, Zhou L X, Mai B X, Lin Y B, Fu S L. Responses of soil microbial communities to prescribed burning in two paired vegetation sites in southern China. *Ecological Research*, 2011, 26(3): 669-677.
- [48] Boerner R E J, Brinkman J A, Sutherland E K. Effects of fire at two frequencies on nitrogen transformations and soil chemistry in a nitrogen-enriched forest landscape. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(3): 609-618.
- [49] Knoepp J D, Vose J M, Swank W T. Long-term soil responses to site preparation burning in the southern Appalachians. *Forest Science*, 2004, 50(4): 540-550.
- [50] Neary D G, Klopatek C C, DeBano L F, Ffolliott P F. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 1999, 122(1/2): 51-71.
- [51] Raison R J, Khanna P K, Woods P V. Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 1985, 15(1): 132-140.
- [52] 刘发林. 模拟火干扰对森林土壤微生物活性及氮矿化的影响. *生态学报*, 2017, 37(7): 2188-2196.
- [53] 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.
- [54] Liu W X, Xu W H, Han Y, Wang C H, Wan S Q. Responses of microbial biomass and respiration of soil to topography, burning, and nitrogen fertilization in a temperate steppe. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(2): 259-268.
- [55] Ilstedt U, Giesler R, Nordgren A, Malmer A. Changes in soil chemical and microbial properties after a wildfire in a tropical rainforest in Sabah, Malaysia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(8): 1071-1078.
- [56] 方丽娜, 杨效东, 杜杰. 土地利用方式对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 837-844.
- [57] McDowell W H, Likens G E. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley. *Ecological Monographs*, 1988, 58(3): 177-195.
- [58] Kaiser K, Guggenberger G, Zech W. Sorption of DOM and DOM fractions to forest soils. *Geoderma*, 1996, 74(3/4): 281-303.

- [59] Augustine D J, Brewer P, Blumenthal D M, Derner J D, Von Fischer J C. Prescribed fire, soil inorganic nitrogen dynamics, and plant responses in a semiarid grassland. *Journal of Arid Environments*, 2014, 104: 59-66.
- [60] 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.
- [61] Andersson M, Michelsen A, Jensen M, Kj  ller 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.
- [62] Zhao H M, Tong D Q, Lin Q X, Lu X G, Wang G P. Effect of fires on soil organic carbon pool and mineralization in a Northeastern China wetland. *Geoderma*, 2012, 189-190: 532-539.
- [63] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, 155(1): 399-402.
- [64] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [65] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 李金海, 张国桢, 刘松. 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究. *北京林业大学学报*, 2009, 31(5): 19-24.
- [66] 张茂增, 辛颖, 赵雨森. 火烧对大兴安岭樟子松天然林土壤有机碳组分的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 322-326.
- [67] 赵志霞, 李正才, 周君刚, 程彩芳, 赵睿宇, 孙娇娇. 火烧对中国北亚热带天然马尾松林土壤有机碳的影响. *生态学杂志*. 2016, 35(1): 135-140.
- [68] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [69] Martí-Roura M, Rovira P, Casals P, Romany   J. Post-fire mineral N allocation and stabilisation in soil particle size fractions in Mediterranean grassland and shrubland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 124-132.
- [70] 魏云敏. 火干扰对兴安落叶松林土壤理化性质和有机碳组分的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [71] Marumoto T, Anderson J P E, Domsch K H. Mineralization of nutrients from soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(5): 469-475.
- [72] Sikora L J, McCoy J L. Attempts to determine available carbon in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9(1): 19-24.
- [73] Insam H, Domsch K H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology*, 1988, 15(2): 177-188.
- [74] 黄宗胜, 喻理飞, 符裕红. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤可矿化碳库特征. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2165-2170.
- [75] Hatten J A, Zabowski D. Changes in soil organic matter pools and carbon mineralization as influenced by fire severity. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 262-273.
- [76] Guerrero C, Mataix-Solera J, G  mez I, García-Orenes F, Jordán M M. Microbial recolonization and chemical changes in a soil heated at different temperatures. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, 14(4): 385-400.
- [77] Fernández I, Cabaneiro A, Carballas T. Carbon mineralization dynamics in soils after wildfires in two Galician forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(13): 1853-1865.
- [78] Gregorich E G, Carter M R, Angers D A, Monreal C M, Ellert B. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(4): 367-385.
- [79] Heckman K, Campbell J, Powers H, Law B, Swanston C. The influence of fire on the radiocarbon signature and character of soil organic matter in the Siskiyou National Forest, Oregon, USA. *Fire Ecology*, 2013, 9(2): 40-56.
- [80] Muqaddas B, Lewis T, Esfandbod M, Chen C R. Responses of labile soil organic carbon and nitrogen pools to long-term prescribed burning regimes in a wet sclerophyll forest of southeast Queensland, Australia. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 110-120.
- [81] Rau B M, Johnson D W, Chambers J C, Blank R R, Lucchesi A. Estimating root biomass and distribution after fire in a Great Basin woodland using cores and pits. *Western North American Naturalist*, 2009, 69(4): 459-468.
- [82] 陆昕, 胡海清, 孙龙, 魏书精. 火干扰对兴安落叶松林土壤轻组有机碳的影响. *安徽农业科学*, 2013, 41(29): 11709-11713.
- [83] Silveira M L, Comerford N B, Reddy K R, Cooper W T, El-Rifai H. Characterization of soil organic carbon pools by acid hydrolysis. *Geoderma*, 2008, 144(1/2): 405-414.
- [84] Paul E A, Morris S J, Conant R T, Plante A F. Does the acid hydrolysis - incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(3): 1023-1035.
- [85] Adkins J, Sanderman J, Miesel J. Soil carbon pools and fluxes vary across a burn severity gradient three years after wildfire in Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Geoderma*, 2019, 333: 10-22.

- [86] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, Campbell E E, Haddix M L, Wall D H, Parton W J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776-779.
- [87] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. *生态学报*, 2007, 27(6): 2642-2650.
- [88] Sayer E J, Heard M S, Grant H K, Marthews T R, Tanner E V J. Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litterfall. *Nature Climate Change*, 2011, 1(6): 304-307.
- [89] Golchin A, Clarke P, Baldock J A, Higashi T, Skjemstad J O, Oades J M. The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter in a volcanic ash soil as shown by ^{13}C NMR spectroscopy. I. Whole soil and humic acid fraction. *Geoderma*, 1997, 76(3/4): 155-174.
- [90] Luo Y Q, Weng E S. Dynamic disequilibrium of the terrestrial carbon cycle under global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(2): 96-104.
- [91] Lützow M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Matzner E, Guggenberger G, Marschner B, Flessa H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 426-445.
- [92] 王薪琪, 王传宽, 张泰东. 森林土壤碳氮循环过程的新视角: 丛枝与外生菌根树种的作用. *植物生态学报*, 2017, 41(10): 1113-1125.
- [93] Shrestha B M, Singh B R, Sitaula B K, Lal R, Bajracharya R M. Soil aggregate- and particle-associated organic carbon under different land uses in Nepal. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(4): 1194-1203.
- [94] Varela M E, Benito E, Keizer J J. Effects of wildfire and laboratory heating on soil aggregate stability of pine forests in Galicia: The role of lithology, soil organic matter content and water repellency. *Catena*, 2010, 83(2/3): 127-134.
- [95] Mataix-Solera J, Cerdà A, Arcenegui V, Jordán A, Zavala L M. Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews*, 2011, 109(1/2): 44-60.
- [96] Shakesby R A, Doerr S H. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 2006, 74(3/4): 269-307.
- [97] Campo J, Gimeno-García E, Andreu V, González-Pelayo O, Rubio J L. Aggregation of under canopy and bare soils in a Mediterranean environment affected by different fire intensities. *Catena*, 2008, 74(3): 212-218.
- [98] DeBano L F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232: 195-206.
- [99] Mataix-Solera J, Doerr S H. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma*, 2004, 118(1/2): 77-88.
- [100] Arcenegui V, Mataix-Solera J, Guerrero C, Zornoza R, Mataix-Beneyto J, García-Orenes F. Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena*, 2008, 74(3): 219-226.
- [101] Garcia-Oliva F, Sanford Jr R L, Kelly E. Effects of slash-and-burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest. *Geoderma*, 1999, 88(1/2): 1-12.
- [102] Arocena J M, Opio C. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma*, 2003, 113(1/2): 1-16.