

DOI: 10.5846/stxb202008102079

孙龙, 孙奥博, 胡同欣. 火干扰对森林生态系统土壤呼吸组分的影响研究进展. 生态学报, 2021, 41(17): 7073-7083.

Sun L., Sun A. B., Hu T. X. Research progress on effects of fire disturbance on soil respiration components in forest ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 7073-7083.

火干扰对森林生态系统土壤呼吸组分的影响研究进展

孙 龙, 孙奥博, 胡同欣*

东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

摘要: 土壤呼吸是陆地生态系统与大气碳交换的主要方式, 主要分为自养呼吸和异养呼吸。土壤呼吸不仅是森林生态系统碳循环过程的关键环节, 也是森林生态系统能量流动和物质循环的重要生态过程。火作为森林生态系统中一个重要的生态因子, 可以在短时间内对土壤呼吸组分造成巨大的影响。火干扰对土壤呼吸组分的影响与火烧强度、火烧频率、火烧持续时间以及火后恢复等因子有关, 通过影响植被的根系与组成、微生物群落数量与结构、凋落物的数量以及生态系统的环境和小气候等, 进而对土壤呼吸产生影响。火干扰对土壤呼吸影响整体表现为火烧后土壤呼吸速率下降, 在几个月至几年内恢复到火烧前水平, 之后火继续对土壤呼吸产生影响长达数年甚至数十年。通过描述火烧强度、火烧频率以及火后恢复时间, 阐述火干扰对土壤呼吸组分的直接影响, 以及通过火后环境对土壤呼吸组分产生的间接影响, 来揭示火干扰对森林生态系统土壤呼吸组分的影响。同时针对火干扰对土壤呼吸组分的影响进行以下 3 个方面的研究展望: (1) 火后产生的黑碳对土壤呼吸组分的影响; (2) 火后植被恢复对土壤呼吸组分产生的影响; (3) 火后土壤呼吸组分的长期变化规律。

关键词: 火干扰; 区分方法; 异养呼吸; 自养呼吸

Research progress on effects of fire disturbance on soil respiration components in forest ecosystems

SUN Long, SUN Aobo, HU Tongxin*

School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Soil respiration is the main way of carbon exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere, which is mainly divided into autotrophic respiration and heterotrophic respiration. Soil respiration is not only a key link in the carbon cycle of forest ecosystems, but also an important ecological process of energy flow and material cycling in forest ecosystems. Fire, as an important ecological factor in the forest ecosystem, can have a huge impact on soil respiration components in a short time. The influence of fire disturbance on soil respiration components is related to factors such as fire intensity, fire frequency, fire duration, and post-fire recovery. By affecting the root system and composition of vegetation, the number and structure of microbial communities, the number of litters, and the environment and microclimate of the ecosystem, it then has an impact on soil respiration. The overall effect of fire disturbance on soil respiration is that the soil respiration rate decreases after a fire, and returns to the level before the fire within a few months to a few years. After that, the fire continued to affect soil respiration for several years to decades. This article mainly describes the intensity of fire, the frequency of fire, and the recovery time after fire, expounds the direct impact of fire disturbance on soil respiration components, and reveals the impact of fire disturbance on soil respiration components of forest ecosystem through the indirect impact of post fire environment on soil respiration components. At the same time, the following three research

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32001324, 32071777)

收稿日期: 2020-08-10; 网络出版日期: 2021-07-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: httxapple@sina.com

prospects are made regarding the influence of fire disturbance on soil respiration components: (1) the effects of black carbon produced after fire on soil respiration components; (2) the effects of vegetation restoration after fire on soil respiration components; and (3) the long-term change pattern of soil respiration components after fire.

Key Words: fire disturbance; distinguishing method; heterotrophic respiration; autotrophic respiration

土壤作为陆地生态系统主要的碳储库,有研究表明全球森林土壤有机碳储量为 1400—1500 Gt,其碳通量是陆地植被碳库的 2—3 倍,是大气碳库的 2 倍多^[1]。土壤呼吸每年 CO₂ 排放量为 50—76 Pg,占陆地生态系统与大气碳交换总量的 2/3,由此可见土壤碳库的微小改变都会引起大气 CO₂ 浓度的巨大变化。因此,土壤呼吸的研究是全球碳平衡变化研究的重要组成部分^[2]。土壤呼吸作为陆地生态系统向大气中排放 CO₂ 最大的碳源,在很早以前就引起人们的极大关注,并对其进行深入的研究^[3],现已成为长期监测网络重要的研究对象之一^[4]。

火干扰作为全球生物地球化学循环的关键驱动因子,可显著改变生态系统的结构和功能以及养分循环和能量传递^[5],进而引起森林碳库分配格局的变化,影响森林演替进程以及固碳能力^[6]。据统计,全球每年约 1% 的森林会受到火的干扰^[7],而火干扰是驱动森林景观结构和功能变化的主要因子之一,会对土壤有机碳循环过程产生深刻的影响^[8]。研究表明量化火干扰后的土壤呼吸组分变化对于了解火干扰后土壤呼吸的变化机理起着至关重要的作用^[9]。因此,要准确估算出陆地生态系统的碳收支,以及了解土壤呼吸对气候的反馈作用,就必须加强土壤呼吸组分及其影响因素的研究^[10],这不仅是准确评估全球碳收支的关键,亦是制定应对全球变化策略的关键。然而目前国内关于火后土壤呼吸组分变化的研究较少,火干扰对土壤呼吸组分的影响缺乏统一的研究结果,火干扰对土壤呼吸影响的具体机制还有待明确。因此本文通过对现有文献进行总结,分析火干扰对土壤呼吸组分产生的影响,为进一步探索火干扰对土壤呼吸的影响提供借鉴,以推动该领域的发展。

1 土壤呼吸组分的区分方法

土壤呼吸组分的区分(表 1)是进行土壤呼吸精确机理研究和精准量化的前提。土壤呼吸尺度(空间和时间)的讨论是土壤碳通量尺度深入研究的必要条件,只有满足这两点,才可能准确把握土壤呼吸的变化规律及其在全球气候变化背景下对环境因子和生物因子的响应,进而探索其机理,推理得出一个准确的、可预测的土壤呼吸通量,而不仅仅是一个估测值。由此可见,要想真正深入研究土壤呼吸的时空动态和机理^[11],不能将整个土体不加区分的作为研究对象,而应该分别研究土壤呼吸的各个组分,获得各个组分的真实时空动态和机理,从而进一步得到整个土壤呼吸的真实描述^[12]。

2 火干扰对土壤呼吸组分的直接影响

在森林生态系统长期演替的过程中,火干扰作为生态系统中一个不可或缺的因子,强烈的影响着生态系统内的植被和环境。研究发现火干扰的发生会显著的减少土壤呼吸^[19-20]。而减少的程度主要取决于火强度和持续时间^[21-22]。同时也有研究发现火干扰对土壤呼吸影响不显著^[23],或者是增加^[24-26]。

与自然分解过程(可能需要数年,在某些情况下需要数十年)相比,火干扰的发生在短时间内释放大量养分,对植物和微生物生物量造成极大的影响,进而影响土壤的自养呼吸和异养呼吸。火干扰导致生态系统中的土壤碳以 CO₂ 的形式释放到大气中,对陆地生态系统的碳平衡和碳循环产生显著影响,并导致土壤呼吸速率发生改变,其中火烧强度^[27-28]、火烧频率^[29]以及火烧后恢复年限^[8,21]是主要的影响因子(图 1)。

表 1 土壤呼吸组分的区分方法

Table 1 Classification Method of soil respiration components

测定方法 Determination method	测定步骤 Determination steps	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
根去除法 Root excised method	土体分层取样后将根系移除,再把土壤按原层次放回原处,并采取阻隔措施 ^[13] 。	使用简单、成本低、不会有大量死根产生影响,适用于各类生态系统。	对土壤破坏较大,在森林生态系统中,很难将草本植物根系完全清除,同时要考虑植物幼苗再生情况 ^[11]
内生长法 In-growth core approach	土体分层取样后,将根系移除,再把土壤原样装入一定孔径的网袋放回原处,随着根系不断侵入,每隔一定时间间隔测定呼吸并取根系样品 ^[14] 。	可以原位得到较为真实的根系呼吸值、根系生物量和生长量。	前期设置处理的工作量较大,费工费时,而且不确定性较大
挖沟分离法 Trenching method	在选定的样地边缘开沟,壕沟深度达到根系分布层以下,用塑料薄膜将样点与周围环境隔开,3—5 个月后将样点内的根系死亡分解。	对土壤扰动较小,对土壤呼吸速率影响也较小,	短时间处理区内残留的根系不会死掉并分解,结果会导致根呼吸估计偏低,这种方法在降水较多时期会导致土壤湿度上升,在干旱时期会导致土壤温度更高 ^[15]
环剥法 Tree girdling	对树木韧皮部进行环剥以切断光合作用产物向根部的传输,然后观测土壤呼吸变化来估测根呼吸的方法。	可以将菌根呼吸从异养呼吸中区分出来。	环剥后刺激了根部对其储存淀粉的利用,该方法只能保守估计根呼吸的大小,并需要大量重复工作,破坏性大且难以重复 ^[16]
林隙法 Gap formation	利用或开辟林间空隙,将林间空隙与林内的土壤呼吸差作为根系呼吸的方法。	对土壤没有干扰。	要求林间空隙足够长,面积足够大,而且容易遭到草本或幼苗的侵入 ^[17]
同位素示踪法 Isotopic tracer method	利用碳的同位素在植物体内和土壤有机物中的差别对根系呼吸和土壤有机物进行区分的方法。	使根和土壤保持原状,避免对土壤的进行干扰和破坏土壤碳库的平衡。	实验设备和费用昂贵,实验周期长,分析难度大,而且该方法的测定结果受标记时间、示踪时间以及标记位置的影响较大
连续标记法 Continuous labeling of shoots	在植物生育期内对测定植物进行完全的辐射标记。	能对植物碳库进行均匀标记,保持比较稳定的状态,使计算简化。	不适合研究植物瞬时变化,仪器设备昂贵笨重,长时间辐射还会导致土壤有机物也具有同位素显示,不利于同根系呼吸的区分 ^[18]

2.1 火烧强度

森林火灾发生之后,大部分土壤呼吸随火强度的增加而显著降低(表 2)^[20,27,30-33],其中自养呼吸降低显著,而异养呼吸多数情况下保持不变,不同森林生态系统的土壤呼吸速率对火干扰的响应也存在差异^[29]。在北方寒温带林生态系统中^[27],低强度火烧后提供的不稳定碳比稳定碳多,植物和微生物可利用的养分增多,加速火后根系和微生物对土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)的吸收,导致土壤呼吸速率变化不显著。在亚热带林生态系统中,低强度火烧后总土壤呼吸速率增强^[8,26],虽然森林火灾的发生导致部分根系和土壤微生物死亡,使自养异养呼吸降低,但火后产生的灰分物质为土壤微生物提供基质,导致这一效应被火后异养呼吸的短期增加所掩盖,最终测得的总土壤呼吸速率增加。Hu 等人^[28]研究发现北方寒温带针叶林高强度火烧后土壤呼吸速率显著降低,但异养呼吸速率变化不显著。首先高强度的森林火灾在很大程度上改变了地貌与森林生态系统的小气候,其次林火产生的高温导致根部结构被破坏、根际微生物大量死亡,使得自养呼吸速率显著降低。而植被和凋落物被烧毁的同时大量可燃物被分解,火后产生的灰分物质增加了微生物的分解速率^[34],微生物在短时间内大量繁殖,最终使得异养呼吸速率变化不显著^[31]。

2.2 火烧频率

随着全球气候和人口的变化,森林火灾也发生改变,因此生态系统对火灾频率长期变化的反应至关重要^[35]。火灾频率的增加一方面可能会减少土壤有机质,因为反复燃烧会减少对土壤的有机输入,并导致土壤碳和营养物质含量下降^[29]。但另一方面,火灾频率的增加也可能通过促进更具生产力的植物物种建立以

及灰分在土壤中下渗的方式来丰富土壤中的碳和养分浓度^[36],从而对土壤呼吸造成巨大的影响。在寒温带森林中,高频率的火灾发生会导致生态系统上一次的火后演替轨迹改变^[29],植物的种子库被基本清除,林分始终处在不断更新的状态,使得火后植被更新演替的时间更长,这意味着与一次火烧相比,自养呼吸恢复需要更长的时间。同时高频率的火灾发生还会导致土壤在上一次燃烧过程中没有消耗的碳在下一次燃烧过程中被消耗^[37],森林中储存的土壤碳和养分大量减少,土壤微生物可利用的养分减少,异养呼吸降低。尽管目前的普遍共识是,土壤碳储量随着火灾频率的增加而减少,但也有极少数研究发现随着火灾频率的增加,凋落物和枯枝落叶层减少,但对土壤中碳的含量没有显著影响^[38-39]。Lasslop^[40]提出如果不受控制的森林火灾频率增加,或者更频繁地使用计划火烧作为预防灾难性野火的管理工具,可能会加速全球气候变暖,导致火灾发生的更频繁,从而产生了积极的反馈。尤其在北方森林生态系统中,如果火灾发生的频率继续增加,北方森林的永久冻土将退化^[30],森林生态系统也将从碳汇向碳源过渡^[31]。

2.3 火后恢复

火干扰对森林生态系统的影响具有长期性,并且不同时期土壤呼吸速率也不尽相同。火后初期,植物根系遭到破坏^[25],自养呼吸速率下降,而火后产生大量灰分物质,地表温度升高,使得异养呼吸速率迅速恢复。随着火后时间的延长,森林植被逐渐演替恢复,自养呼吸也逐渐向原生态系统的土壤呼吸速率靠拢^[41]。Amiro 等^[42]研究了加拿大西部计划火烧对北方森林生态系统恢复过程中土壤呼吸的影响,发现在火后 10—30 年内土壤呼吸速率才能恢复到火干扰前的水平。Bergner 等人^[20]发现野火烧毁后的北方针叶林,3 年后真菌才恢复到未火烧前水平,菌根真菌与植物共生从而促进植物生长,真菌的缺失影响了植物群落的组成和生长,进而影响土壤呼吸速率。Hicke 等人^[26]发现,在野火发生后初期,由于大量可燃物质的分解,产生的灰分物质为微生物活动提供了良好的物质基础,火干扰后土壤异养呼吸速率增加,而在火灾干扰两年后,异养呼吸速率开始下降,5 年后的异养呼吸速率降低到火灾干扰前的水平。这表明火干扰不只在火灾发生期间对森林生态系统有影响^[43],而且在火干扰后的数年至数十年内会一直产生影响。

3 火后环境对土壤呼吸组分的间接影响

3.1 火后环境对自养呼吸的影响

自养呼吸是土壤 CO_2 释放的一个主要贡献者,同时也是全球碳循环的一个重要组成部分^[44]。自养呼吸主要由植物根系以及菌根组成(图 2),而森林火灾会对植被以及植被根系造成巨大的损伤,导致根系的固碳能力下降,净初级生产力(Net primary productivity, NPP)降低,自养呼吸速率显著降低(图 1)。植物根系呼吸是由地上光合产物所驱动,因此任何影响植物生产力的因素均对根系呼吸速率产生影响^[45]。森林火灾的发生会对地上植物以及地下的根系造成严重损伤,植被生产力下降,而中、高强度火更会烧毁林冠,使得植物光合作用下降,总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)降低,生态系统的碳输入减少,进而对土壤呼吸组分产生显著的影响。Richter 等人^[46]发现在北方森林中,火烧后的土壤呼吸是未燃烧区域的一半,这主要是由于火烧强度大,对植物根系造成更严重的损害,使得自养呼吸减少。在火干扰后,森林植被盖度减少,郁闭度下降,火

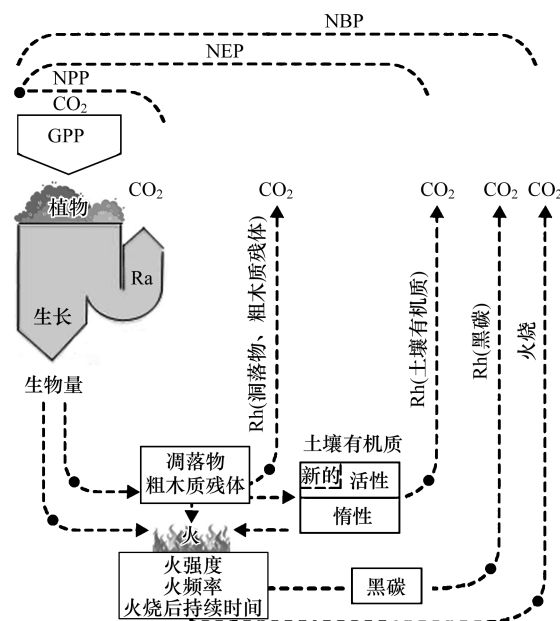


图 1 火对土壤呼吸组分的影响

Fig.1 Effects of fire on soil respiration components

GPP: 总初级生产力 gross primary productivity; NPP: 净初级生产力 net primary productivity; NEP: 净生态系统生产力 net ecosystem productivity; NBP: 净生物群落生产力 Net biome productivity; Ra: 自养呼吸 autotrophic respiration; Rh: 异养呼吸 heterotrophic respiration

后直接到达地表的太阳辐射增加,土壤温度显著升高。研究发现自养呼吸与土壤温度之间具有极显著的相关性^[4],土壤深度 5 cm 和 10 cm 的土壤自养呼吸具有较高的 Q_{10} (温度敏感性指数) 值,说明土壤自养呼吸对土壤温度的响应较为强烈,土壤温度的增加会导致自养呼吸增强。Song 等^[19] 研究发现火烧后的区域比未火烧区域土壤自养呼吸 Q_{10} 值显著下降,且自养呼吸的 Q_{10} 值小于异养呼吸。而 Gaumont 等^[47] 研究发现火后自养呼吸 Q_{10} 值更大。造成结果不同的原因可能是研究区域不同所导致的,而且土壤呼吸对温度的适应,在种间和种内差异较大^[1]。火干扰后地表草本层植物的破坏以及温度的升高还会造成土壤中水分的流失,土壤含水量的降低,使得植物向地下根系统分配的碳增多,促进植物根系代谢^[48],土壤水分含量降低的同时还会影响植物生产力与植物根系扩展,进而影响根源呼吸,对自养呼吸产生影响。

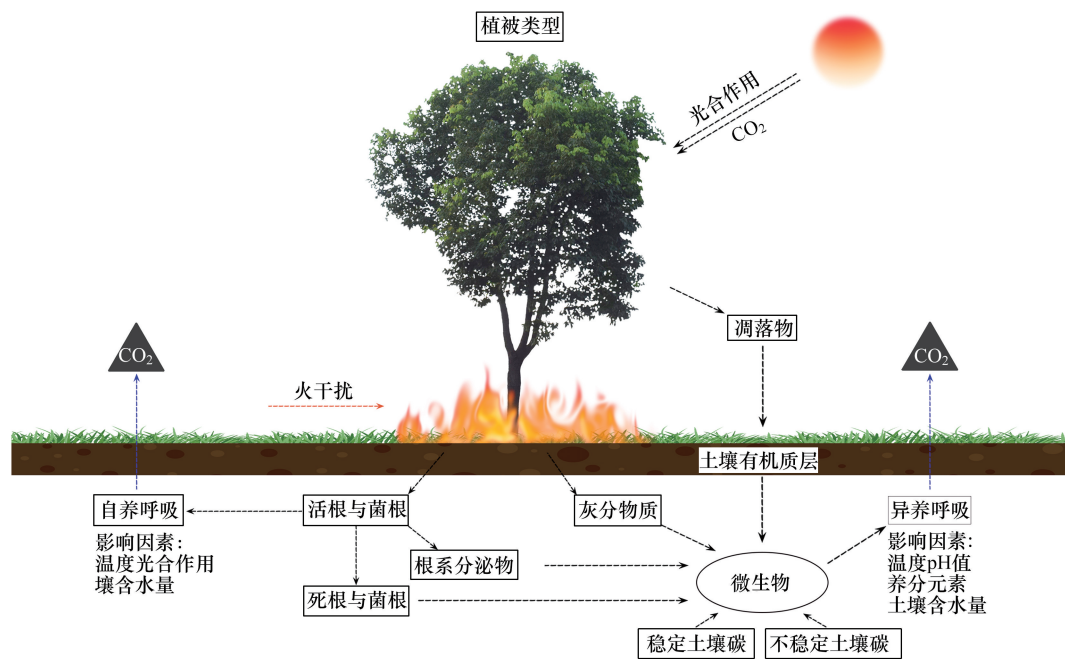


图 2 火后环境对土壤呼吸组分的影响

Fig.2 Effects of post fire environment on soil respiration components

3.2 火后环境对异养呼吸的影响

在发生火灾的林地内,土壤呼吸随火烧强度的增加而减少,说明火干扰消除了部分影响土壤呼吸速率因素,土壤呼吸对温度和湿度的响应更为显著。但是,大部分的研究中异养呼吸没有出现这种趋势(表 2),说明异养呼吸主要受其他因素的影响^[19]。异养呼吸主要是土壤微生物向大气释放 CO_2 的过程,而林火的发生对微生物产生直接和间接影响(图 2)。在森林火灾发生时,产生的高温会直接导致一部分微生物死亡^[49],同时火灾产生的有毒物质如 CO 气体等也会间接导致微生物死亡,使得火后微生物群落的结构和种类发生改变,从而导致异养呼吸发生变化^[50]。而且异养呼吸与凋落物层以及表层土壤中的有机碳也有关^[22],林火的发生造成大量植被和凋落物被烧毁,产生灰分物质,在短时间内使得土壤微生物迅速繁殖,异养呼吸速率升高。但植物根系及根系分泌物同样受到火的干扰^[51],向地下的碳输入减少,引起微生物群落和胞外酶活性的改变,同时由于火烧后地表裸露,缺少枯枝落叶及腐殖质层的保护,雨水直接作用于土壤,大量的灰分物质以地表径流的形式流失,使得呼吸底物与微生物的接触机会减少,异养呼吸下降^[52]。也有研究表明实验区域环境和气候不同,土壤微生物的活性也不同,导致异养呼吸对温度敏感性的结果不同^[47],火干扰后土壤异养呼吸 Q_{10} 值显著低于^[1,48],或高于未火烧区域^[31],或者是不显著^[19-20]。

表 2 火干扰对不同森林生态系统土壤呼吸的影响

Table 2 Effects of fire disturbance on soil respiration in different forest ecosystems											
气候类型 Climate type	植被类型 Vegetation types	经纬度 Dimension	土壤类型 Soil type	年均气温 Amal average temperature/℃	降水量 Precipitation /mm	火烧强度 Fire intensity	火烧后恢复年限 Years of fire/a	土壤呼吸 Soil respiration (Rs)/ (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	自养呼吸 Autotrophic respiration (Ra)/ (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	异养呼吸 Heterotrophic respiration (Rh)/ (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Ra/Rs 参考文献 References
寒温带 Cold temperate zone	兴安落叶松林-大兴安岭	51°05'07"N—51°39'24"N, 125°07'55"E—125°50'05"E	灰土	-3	350—500	对照		5.29±0.48a	1.36±0.24a	3.93±0.71a	27% [27]
	<i>Larix gmelinii</i> forest-					低	4	4.31±0.36a	1.26±0.48a	3.04±0.81a	29%
	Great Xing'an Mountains					高		3.79±0.25b	0.74±0.31b	3.05±0.26a	19%
	兴安落叶松林-雅库茨克	62°05'N, 129°45'E	沙土	-10	237	对照		4.16a	—	—	— [53]
	<i>Larix cajanderi</i> forest- Yakutsk					低	1	2.25ab	—	—	—
						高	5	1.5b	—	—	—
			壤土			对照		4.2a	—	—	—
						高	5	1.07b	—	—	—
	兴安落叶松林-大兴安岭	51°05'07"N—51°39'24"N, 125°07'55"E—125°50'05"E	灰土	-3	350—500	对照		4.06a	—	—	— [28]
	<i>Larix gmelinii</i> forest-					低	5	3.22b	—	—	—
寒温带 Cold temperate zone	Great Xing'an Mountains					高		2.92b	—	—	—
	落叶松林/白桦林-塔河	52°09'07"—52°23'24"N, 125°19'55"—125°48'E	棕色针 叶林土	-2.4	460.3	对照		4.21±1.25a	1.09±0.66a	3.13±0.73a	25% [31]
	<i>L.gmelinii</i> / <i>B.platyphylla</i> forest-Tahe					中	4	3.67±1.03b	0.39±0.18b	3.28±0.88a	17%
	兴安落叶松林-大兴安岭	51.89 °N, 121.91 °E	胶状土	-3.6	500	对照		8.16a	—	—	— [24]
	<i>Larix-Ledum</i> forest-Great Xing'anling Mountains					高	7	10.64b	—	—	—
	兴安落叶松杜鹃林-大兴安岭					对照		13.02a	—	—	—
	<i>Larix-Rhododendron</i> forest- Great Xing'anling Mountains					高	7	17.38b	—	—	—
	白桦林-小兴安岭	46°28'—49°21'N, 127°42'—130°14'E	棕色针 叶林土	0.6	609.6	对照		5.29±0.63a	1.35±0.48a	3.94±0.78a	24% [54]
	<i>B.platyphylla</i> forest-Xiaoxing'an Mountains					低	1	3.91±0.46b	0.45±0.17b	3.46±0.64a	12%
	落叶松林-小兴安岭					对照		4.18±0.39a	0.50±0.12a	3.67±0.66a	12%
亚热带 Subtropical	<i>L.gmelinii</i> forest-Xiaoxing'an Mountains					低	1	4.62±0.43a	0.76±0.20a	3.86±0.72a	16%
	黑云杉-阿拉斯加	63°55'N, 145°44'W				低	1	2.05a	—	—	— [20]
	<i>Picea mariana</i> -Alaska					高		1.71b	—	—	—
	赤松林-埃迪尔内		棕壤		570	对照	1	0.25a	—	—	— [25]
	<i>brutian pine</i> -Edirne					火烧		0.35b	—	—	—
	云南松-楚雄	25°07.492'N, 102°17.098'E	酸性红壤	15.6	1326	对照		1.68±0.47a	1.24±0.57a	0.89±0.13a	[19]

续表

气候类型 Climate type	植被类型 Vegetation types	经纬度 Dimension	土壤类型 Soil type	年均气温 Anmal average temperature/℃	降水量 Precipitation /mm	火烧强度 Fire intensity	火烧后恢复年限 Years of fire/a	土壤呼吸 Soil respiration (Rs)/ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	自养呼吸 Autotrophic respiration (Ra)/ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	异养呼吸 Heterotrophic respiration (Rh)/ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Ra/Rs	参考文献 References
热带 Tropical	<i>Pinus yunnanensis</i> -Chuxiong		与高原山 地黄壤			火烧 对照	1	0.70±0.12b 2.30±0.38a	0.18±0.11b 1.00±0.26a	0.66±0.15b 1.55±0.28a		
	桉树-皮尔巴拉 <i>Eucalyptus</i> -Pilbara	22°03′—23°19′S, 118°07′E—119°43′E	红色浅石 质土壤	19.4—33.2	250—400	火烧 对照	2 0.5	0.82±0.14b 0.50a	0.11±0.03b	0.79±0.17b		[6]
	潮湿林-马托格罗索 humid forests-Mato Grosso	13°04′35.39″S, 52°23′08.85″W	砂 质 氧 溶胶	27	1500	对照	0.5	4.56±0.23a	3.07±1.27a	1.49±1.17a	67%	[32]
	泥潭沼泽树-文莱达鲁萨兰国 peat swamp trees-Brunei Darussalam	4°28′40″N, 114°18′19″E	Peat 泥炭土	27.2	3000	低 对照	1	3.12± 0.15b 2.14±0.44a	1.22±0.65b	1.90±0.72a	39%	[55]
							1	2.69±0.53b				

表中不同小写字母分别表示差异达到显著水平 ($P<0.05$)

5 研究展望

尽管现在关于火干扰对土壤呼吸组分影响的研究在国内已经取得一定成果,但由于森林生态系统的复杂性和影响因素的多样性,对火干扰、影响因子和土壤呼吸组分三者之间的关系仍需进行大量的研究,从多角度不同影响因子方面来研究三者之间的关系。一方面国内缺少火后产生的黑碳和火后植被恢复等影响因子对土壤呼吸组分的影响;另一方面关于火后土壤呼吸组分长期变化规律的研究不足。因此,火干扰对土壤呼吸组分的影响还应从以下三个方面进行研究:

1) 加强火后产生的黑碳对土壤呼吸组分影响的研究

森林火灾发生后,在火的高温作用下会产生黑碳,由于黑碳通常被认为是一种高度稳定的 SOC^[56],因此黑碳循环过程比其它碳循环过程慢得多^[57]。研究表明全球约 80% 的黑碳沉积在土壤中,由于其难降解的性质,可以在土壤中保留长达千年,黑碳也因此受到广泛关注^[58]。黑碳在森林生态系统中具有重要的作用,其不仅可以被用来指示历史火事件,同时也是全球碳循环重要的组成部分,在全球碳库中占有重要的地位^[59]。尽管黑碳被认为是一个重要的碳汇,并可能在缓解气候变化方面发挥重要作用,但在目前森林生态系统碳循环和碳收支的研究中,黑碳仍是被忽视的^[60]。虽然已经进行了一些有关黑碳的研究,但由于方法上的困难以及空间异质性和潜在机制复杂性等原因,黑碳的施用对森林生态系统,特别是森林中土壤呼吸及其组分(自养和异养呼吸)的影响尚不完全清楚^[61]。这些不确定性的产生是因为目前的研究没有将黑碳对森林的影响与其他陆地生态系统的影响区分开来,而且大多数研究主要强调黑碳添加下相关碳池的中心趋势^[62-63]。估算火后黑碳的产量以及确定其影响因素,对于了解未来气候变化条件下森林生态系统的土壤呼吸组分至关重要^[64],因此迫切需要深入开展有关黑碳的研究,为土壤呼吸组分的变化提供数据基础。

2) 探究火后植被恢复对土壤呼吸组分的影响

火烧迹地是一类特殊的退化生态系统,植被恢复被认为是在不同气候和土地利用类型下修复退化土壤和改善生态系统服务最有效的方法^[65]。尤其在当前全球变暖的背景下,火后植被恢复受到了全球的广泛关注,其中土壤特性是评价生态系统状况的重要指标,能够定量反映植被恢复与土壤环境的响应规律^[66],因此了解火后植被恢复对土壤呼吸组分的影响是十分必要的。在植被恢复过程中火后早期植被的恢复尤为重要,它是生态系统功能恢复的前提和基础^[67],随着植被的恢复,群落组成结构趋于复杂,植被恢复通过改变植被因子(如生物量输入和凋落物性质)和土壤因子(如土壤理化性质)促进 SOC 的积累和稳定^[68-69]。其中细根生物量是植被恢复过程中控制土壤有机碳库的主要驱动力,植物根系可以改变土壤性质,影响土壤微环境,从而改变土壤有机碳的分解和稳定^[67]。目前火后植被恢复情况研究多集中于火后植被恢复对营养元素循环、土壤理化性质的影响以及火后植物群落特征变化和植被演替过程等,但缺少火后植被恢复对土壤呼吸组分变化的系统性研究^[70]。因此,今后可以从火强度、火频率、火后恢复年限等因子变化研究火后植被恢复对土壤呼吸组分产生的影响。

3) 了解火后土壤呼吸组分长期变化规律

土壤呼吸是土壤有机碳的主要输出途径,是土壤和大气之间一个主要的碳交换过程,其作为陆地生态系统碳循环的第二大通量,在调节陆地生态系统土壤碳库和净碳平衡上起着至关重要的作用^[71]。火干扰可以在短时间内强烈的影响着植被和凋落物,向大气中释放大量 CO₂,从长期影响来看,森林火灾极大地影响了土壤系统,改变了大多数土壤的物理、化学和生物特性^[72]。Ribeiro 等^[73]预计随着全球变暖,未来几十年世界范围内的森林火灾将增多,因此了解火后土壤呼吸组分长期变化规律,揭示森林生态系统火干扰后碳循环的变化规律具有重要生态学意义。目前大多数有关土壤呼吸组分的研究是在火干扰后短期内进行的,具有短期性、局限性,而火干扰对森林的影响是长期的、大范围的、且具有时滞性^[74],因此短期研究不足以表示火对土壤呼吸影响的全过程^[75]。火对土壤呼吸的长期研究重要性在于,它们能阐明土壤对不同程度干扰的反应能力^[76],如果只进行短期实验,反馈的信号无法确定,调节反馈的复杂机制也将无法量化^[77]。因此为了能够更

好地量化火干扰对土壤呼吸组分的影响,急需进行更长时间火干扰对土壤呼吸组分的研究^[78]。

参考文献 (References):

- [1] 孙龙, 李远, 赵彬, 清李飞, 胡同欣. 中度火干扰对帽儿山次生林土壤呼吸组分及土壤微生物生物量的影响. 东北林业大学学报, 2019, 47(7): 90-98.
- [2] Hu H Q, Hu T X, Sun L. Spatial heterogeneity of soil respiration in a *Larix gmelinii* forest and the response to prescribed fire in the Greater Xing'an Mountains, China. Journal of Forestry Research, 2016, 27(5): 1153-1162.
- [3] 胡海清, 张富山, 魏书精, 孙龙, 王明玉. 火干扰对土壤呼吸的影响及测定方法研究进展. 森林工程, 2013, 29(1): 1-8.
- [4] Hu T X, Hu H Q, Li F, Zhao B Q, Wu S, Zhu G Y, Sun L. Long-term effects of post-fire restoration types on nitrogen mineralisation in a Dahurian larch (*Larix gmelinii*) forest in boreal China. Science of the Total Environment, 2019, 679: 237-247.
- [5] 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.
- [6] Muñoz-Rojas M, Lewandowski W, Erickson T E, Dixon K W, Merritt D J. Soil respiration dynamics in fire affected semi-arid ecosystems: effects of vegetation type and environmental factors. Science of the Total Environment, 2016, 572: 1385-1394.
- [7] Kirdyanov A V, Saurer M, Siegwolf R, Knorre A A, Prokushkin A S, Churakova (Sidorova) O V, Fonti M V, Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia. Environmental Research Letters, 2020, 15(3): 034061.
- [8] López-Martín M, González-Vila F J, Knicker H. Distribution of black carbon and black nitrogen in physical soil fractions from soils seven years after an intense forest fire and their role as C sink. Science of the Total Environment, 2018, 637-638: 1187-1196.
- [9] Tang J W, Baldocchi D D. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 183-207.
- [10] Pumpanen J, Kulmala L, Linden A, Kolari P, Nikinmaa E, Hari P. Seasonal dynamics of autotrophic respiration in boreal forest soil estimated by continuous chamber measurements. Boreal Environment Research, 2015, 20(5): 637-650.
- [11] Phillips C L, Bond-Lamberty B, Desai A R, Lavoie M, Risk D, Tang J W, Todd-Brown K, Vargas R. The value of soil respiration measurements for interpreting and modeling terrestrial carbon cycling. Plant and Soil, 2017, 413(1/2): 1-25.
- [12] Lalonde R G, Prescott C E. Partitioning heterotrophic and rhizospheric soil respiration in a mature Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) forest. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37(8): 1287-1297.
- [13] 宋文琛, 同小娟, 李俊, 张劲松. 三源区分土壤呼吸组分研究. 生态学报, 2017, 37(22): 7387-7396.
- [14] 魏书精, 罗碧珍, 魏书威, 孙龙, 正敏, 胡海清. 森林生态系统土壤呼吸测定方法研究进展. 生态环境学报, 2014, 23(3): 504-514.
- [15] 陈敏鹏, 夏旭, 李银坤, 梅旭荣. 土壤呼吸组分分离技术研究进展. 生态学报, 2013, 33(22): 7067-7077.
- [16] Dannenmann M, Simon J, Gasche R, Holst J, Naumann P S, Kögel-Knabner I, Knicker H, Mayer H, Schlöter M, Pena R, Polle A, Rennenberg H, Papen H. Tree girdling provides insight on the role of labile carbon in nitrogen partitioning between soil microorganisms and adult European beech. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(8): 1622-1631.
- [17] Acosta M, Darenova E, Krupková L, Pavelka M. Seasonal and inter-annual variability of soil CO₂ efflux in a Norway spruce forest over an eight-year study. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256-257: 93-103.
- [18] Mildner M, Bader M K F, Leuzinger S, Siegwolf R T W, Körner C. Long-term ¹³C labeling provides evidence for temporal and spatial carbon allocation patterns in mature Picea abies. Oecologia, 2014, 175(3): 747-762.
- [19] Song J, Liu Z, Zhang Y, Yan T, Shen Z H, Piao S L. Effects of wildfire on soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components in a montane coniferous forest. Journal of Plant Ecology, 2019, 12(2): 336-345.
- [20] Bergner B, Johnstone J, Treseder K K. Experimental warming and burn severity alter soil CO₂ flux and soil functional groups in a recently burned boreal forest. Global Change Biology, 2004, 10(12): 1996-2004.
- [21] Tan W W, Sun L, Hu H Q, Chen X W. Effect of fire disturbances on soil respiration of *Larix gmelinii* Rupr. forest in the Da Xing'an Mountain during growing season. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(21): 4833-4840.
- [22] Chen J, Zhang Y F, Luo Y Q, Zhou X H, Jiang Y, Zhao J, Chen Y Z, Wang C, Guo L, Cao J J. Contrasting responses after fires of the source components of soil respiration and ecosystem respiration. European Journal of Soil Science, 2019, 70(3): 616-629.
- [23] Conant R T, Ryan M G, Ågren G I, Birge H E, Davidson E A, Eliasson P E, Evans S E, Frey S D, Giardina C P, Hopkins F M, Hyvönen R, Kirschbaum M U F, Lavelle J M, Leifeld J, Parton W J, Steinweg J M, Wallenstein M D, Wetterstedt J A M, Bradford M A. Temperature and soil organic matter decomposition rates- synthesis of current knowledge and a way forward. 2011, 17(11): 3392-3404.
- [24] Song X Y, Wang G X, Ran F, Chang R Y, Song C L, Xiao Y. Effects of topography and fire on soil CO₂ and CH₄ flux in boreal forest underlain by permafrost in northeast China. Ecological Engineering, 2017, 106: 35-43.
- [25] 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: S195.
- [26] Hicke J A, Asner G P, Kasischke E S, French N H F, Randerson J T, James C G, Stocks B J, Tucker C J, Los S O, Field C B. Postfire response of North American boreal forest net primary productivity analyzed with satellite observations. Global Change Biology, 2003, 9(8): 1145-1157.

- [27] Hu T X, Sun L, Hu H Q, Weise D R, Guo F T. Soil respiration of the Dahurian larch (*Larix gmelinii*) forest and the response to fire disturbance in Da Xing'an Mountains, China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2967.
- [28] Hu T X, Sun L, Hu H Q, Guo F T. Effects of fire disturbance on soil respiration in the non-growing season in a *Larix gmelinii* forest in the Daxing'an Mountains, China. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0180214.
- [29] Pellegrini A F A, Ahlström A, Hobbie S E, Reich P B, Nieradzik L P, Staver A C, Scharenbroch B C, Jumpponen A, Anderegg W R L, Randerson J T, Jackson R B. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*, 2018, 553(7687): 194-198.
- [30] Brown D R N, Jorgenson M T, Douglas T A, Romanovsky V E, Kielland K, Hiemstra C, Euskirchen E S, Ruess R W. Interactive effects of wildfire and climate on permafrost degradation in Alaskan lowland forests. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(8): 1619-1637.
- [31] 胡同欣, 胡海清, 孙龙. 中度火干扰对兴安落叶松林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2018, 38(8): 2915-2924.
- [32] Metcalfe D B, Rocha W, Balch J K, Brando P M, Doughty C E, Malhi Y. Impacts of fire on sources of soil CO₂ efflux in a dry Amazon rain forest. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3629-3641.
- [33] Conant R T, Ryan M G, Ågren G I, Birge H E, Davidson E A, Eliasson P E, Evans S E, Frey S D, Giardina C P, Hopkins F M, Hyvönen R, Kirschbaum M U F, Lavalley J M, Leifeld J, Parton W J, Steinweg J M, Wallenstein M D, Wetterstedt J Å M, Bradford M A. Temperature and soil organic matter decomposition rates-synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3392-3404.
- [34] Muñoz-Rojas M, Erickson T E, Martini D, Dixon K W, Merritt D J. Soil physicochemical and microbiological indicators of short, medium and long term post-fire recovery in semi-arid ecosystems. *Ecological Indicators*, 2016, 63: 14-22.
- [35] Pellegrini A F A, Hoffmann W A, Franco A C. Carbon accumulation and nitrogen pool recovery during transitions from savanna to forest in central Brazil. *Ecology*, 2014, 95: 342-352.
- [36] Johnstone J F, Hollingsworth T N, Chapin III F S, Mack M C. Changes in fire regime break the legacy lock on successional trajectories in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1281-1295.
- [37] Nave L E, Vance E D, Swanston C W, Curtis P S. Fire effects on temperate forest soil C and N storage. *Ecological Applications*, 2011, 21(4): 1189-1201.
- [38] 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.
- [39] Bizzari L E, Collins C D, Brudvig L A, Damschen E I. Historical agriculture and contemporary fire frequency alter soil properties in longleaf pine woodlands. *Forest Ecology and Management*, 2015, 349: 45-54.
- [40] Lasslop G, Coppola A I, Voulgarakis A, Yue C, Veraverbeke S. Influence of fire on the carbon cycle and climate. *Current Climate Change Reports*, 2019, 5(2): 112-123.
- [41] Dooley S R, Treseder K K. The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies. *Biogeochemistry*, 2012, 109(1/3): 49-61.
- [42] Amiro B D, MacPherson J I, Desjardins R L, Chen J M, Liu J. Post-fire carbon dioxide fluxes in the western Canadian boreal forest: evidence from towers, aircraft and remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 115(1/2): 91-107.
- [43] Kuzyakov Y, Blagodatskaya E. Microbial hotspots and hot moments in soil: concept and review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 83: 184-199.
- [44] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 141-154.
- [45] Czimczik C I, Trumbore S E, Carbone M S, Winston G C. Changing sources of soil respiration with time since fire in a boreal forest. *Global Change Biology*, 2006, 12(6): 957-971.
- [46] Richter D D, O'Neill K P, Kasichke E S. Postfire stimulation of microbial decomposition in black spruce (*Picea mariana* L.) forest soils: a hypothesis//Kasichke E S, Stocks B J, eds. *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. New York: Springer, 2000: 197-213.
- [47] Gaumont-Guay D, Black T A, Barr A G, Jassal R S, Nesic Z. Biophysical controls on rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in a boreal black spruce stand. *Tree Physiology*, 2008, 28(2): 161-171.
- [48] Osanai Y, Janes J K, Newton P C D, Hovenden M J. Warming and elevated CO₂ combine to increase microbial mineralisation of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85: 110-118.
- [49] Sun L, Hu T X, Kim J H, Guo F T, Song H, Lv X S, Hu H Q. The effect of fire disturbance on short-term soil respiration in typical forest of Greater Xing'an Range, China. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(3): 613-620.
- [50] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 2008, 14(5): 1156-1168.
- [51] Chen J, Luo Y Q, Xia J Y, Wilcox K R, Cao J J, Zhou X H, Jiang L F, Niu S L, Estera K Y, Huang R J, Wu F, Hu T F, Liang J Y, Shi Z, Guo J F, Wang R W. Warming effects on ecosystem carbon fluxes are modulated by plant functional types. *Ecosystems*, 2017, 20(3): 515-526.
- [52] 马志良, 赵文强, 刘美, 朱攀, 刘庆. 土壤呼吸组分对气候变暖的响应研究进展. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3477-3486.
- [53] 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.

- [54] 胡海清, 吴畏, 岳彩玲, 陈婉婷, 张冉, 李莹, 孙龙. 火干扰后短期白桦林和落叶松林土壤呼吸及其组分的影响. 植物研究, 2015, 35(2): 279-288.
- [55] Lupascu M, Akhtar H, Smith T E L, Sukri R S. Post-fire carbon dynamics in the tropical peat swamp forests of Brunei reveal long-term elevated CH₄ flux. *Global Change Biology*, 2020, 26(9): 5125-5145.
- [56] Pei J M, Zhuang S, Cui J, Li J Q, Li B, Wu J H, Fang C M. Biochar decreased the temperature sensitivity of soil carbon decomposition in a paddy field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 249: 156-164.
- [57] 王曦, 杨靖宇, 俞元春, 侯文军, 侯也, 余健, 王如海. 不同功能区城市林业土壤黑碳含量及来源——以南京市为例. 生态学报, 2016, 36(3): 837-843.
- [58] Roebuck Jr J A, Podgorski D C, Wagner S, Jaffé R. Photodissolution of charcoal and fire-impacted soil as a potential source of dissolved black carbon in aquatic environments. *Organic Geochemistry*, 2017, 112: 16-21.
- [59] 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.
- [60] Huang W T, Hu Y M, Chang Y, Liu M, Li Y H, Ren B H, Shi S X. Effects of fire severity and topography on soil black carbon accumulation in boreal forest of northeast China. *Forests*, 2018, 9(7): 408.
- [61] Sackett T E, Basiliko N, Noyce G L, Winsborough C, Schurman J, Ikeda C, Thomas S C. Soil and greenhouse gas responses to biochar additions in a temperate hardwood forest. *GCB Bioenergy*, 2015, 7(5): 1062-1074.
- [62] Liu S W, Zhang Y J, Zong Y J, Hu Z Q, Wu S, Zhou J, Jin Y G, Zou J W. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(2): 392-406.
- [63] He Y H, Zhou X H, Jiang L L, Li M, Du Z G, Zhou G Y, Shao J J, Wang X H, Xu Z H, Bai S H, Wallace H, Xu C Y. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 2017, 9(4): 743-755.
- [64] Wang Z L, Li Y F, Chang S X, Zhang J J, Jiang P K, Zhou G M, Shen Z M. Contrasting effects of bamboo leaf and its biochar on soil CO₂ efflux and labile organic carbon in an intensively managed Chinese chestnut plantation. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(7): 1109-1119.
- [65] 区晓琳, 陈志彪, 陈志强, 姜超, 梁美霞, 陈海滨. 中亚热带植被恢复过程中崩岗土壤性质分异特征. 生态学报, 2019, 39(6): 2180-2190.
- [66] 赵凤君, 王立中, 舒立福, 陈鹏宇, 陈立光. 寒温带湿地火后植被恢复的影响因子. 应用生态学报, 2013, 24(3): 853-860.
- [67] Asao S, Bedoya-Arrieta R, Ryan M G. Variation in foliar respiration and wood CO₂ efflux rates among species and canopy layers in a wet tropical forest. *Tree Physiology*, 2015, 35(2): 148-159.
- [68] López-Serrano F R, Martínez-García E, Dadi T, Rubio E, García-Morote F A, Lucas-Borja M E, Andrés-Abellán M. Biomass growth simulations in a natural mixed forest stand under different thinning intensities by 3-PG process-based model. *European Journal of Forest Research*, 2015, 134: 167-185.
- [69] Gu X, Fang X, Xiang W H, Zeng Y L, Zhang S J, Lei P F, Peng C H, Kuzyakov Y. Vegetation restoration stimulates soil carbon sequestration and stabilization in a subtropical area of southern China. *Catena*, 2019, 181: 104098.
- [70] Way D A, Holly C, Bruhn D, Ball M J, Atkin O K. Diurnal and seasonal variation in light and dark respiration in field-grown *Eucalyptus pauciflora*. *Tree Physiology*, 2015, 35(8): 840-849.
- [71] 段北星, 蔡体久, 宋浩, 肖瑞晗. 寒温带兴安落叶松林凋落物层对土壤呼吸的影响. 生态学报, 2020, 40(4): 1357-1366.
- [72] Mora J L, Armas-Herrera C M, Guerra J A, Arbelo C D, Rodríguez-Rodríguez A, Del Pino J S N. A comparative study of long-term effects on fire-affected volcanic soils in two different ecosystems in the canary islands. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(5): 1489-1500.
- [73] Ribeiro-Kumara C, Pumpanen J, Heinonsalo J, Metslaid M, Orumaa A, Jöggiste K, Berninger F, Köster K. Long-term effects of forest fires on soil greenhouse gas emissions and extracellular enzyme activities in a hemiboreal forest. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 135291.
- [74] Francos M, Úbeda X, Pereira P. Long-term forest management after wildfire (Catalonia, NE Iberian Peninsula). *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(1): 269-278.
- [75] 孙龙, 赵俊, 胡海清. 中度火干扰对白桦落叶松混交林土壤理化性质的影响. 林业科学, 2011, 47(2): 103-110.
- [76] Turco M, Levin N, Tessler N, Saaroni H. Recent changes and relations among drought, vegetation and wildfires in the Eastern Mediterranean: the case of Israel. *Global and Planetary Change*, 2017, 151: 28-35.
- [77] Melillo J M, Frey S D, DeAngelis K M, Werner W J, Bernard M J, Bowles F B, Pold G, Knorr M A, Grandy A S. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*, 2017, 358(6359): 101-105.
- [78] Francos M, Úbeda X, Pereira P, Alcañiz M. Long-term impact of wildfire on soils exposed to different fire severities. A case study in Cadiretes Massif (NE Iberian Peninsula). *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 664-671.