

文章编号:1001-1498(2016)02-0301-05

火烧对北亚热带杉木林土壤有机碳的影响

赵志霞¹, 李正才^{1*}, 周君刚², 程彩芳¹, 赵睿宇¹, 孙娇娇²

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 浙江省杭州市富阳区农林局, 浙江 杭州 311400)

关键词: 杉木; 火烧; 土壤有机碳储量; 土壤活性有机碳; 土壤养分

中图分类号: S791.27

文献标识码: A

Effects of Fire on Soil Organic Carbon of *Cunninghamia lanceolata* Stands in North Subtropical Area

ZHAO Zhi-xia¹, LI Zheng-cai¹, ZHOU Jun-gang², CHENG Cai-fang¹, ZHAO Rui-yu¹, SUN Jiao-jiao²

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;

2. Agriculture and Forestry Bureau of Fuyang District of Hangzhou City, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To study the effect of burning on soil organic carbon and to provide references for post-fire vegetation regeneration. [Method] The changes of organic carbon and nutrient contents in post-fire *Cunninghamia lanceolata* stand with the soil depth of 0~50 cm in north subtropical areas were analyzed. [Result] The contents of soil total organic carbon (TOC), easily-oxidized carbon (EOC) and light fraction organic carbon (LFOM) were higher than those of contrast sample area, which increased by 1.7%~38.0%、6.6%~33.2% and 3.1%~45.7%, respectively. Significant differences were found in the soil layer with depth of 0~10 cm and 10~20 cm ($P < 0.01$). Compared with the contrast sample area, the soil carbon storage in the layer with depth of 0~50 cm increased by 19.1% one year after burning. The TOC, EOC and LFOM were all significantly related to the soil nutrients (total N, hydrolyzable N and available K). After burning, the increase of TOC, EOC and LFOM were mainly concentrated on the surface of soil and the organic carbon contents increased by 9.22 g·kg⁻¹ in 0~10 cm layer. [Conclusion] Moderate intensity burning has a significant impact on organic carbon in the soil of *C. lanceolata* stand in the north subtropical area. Moderate burning can increase the soil organic carbon because the soil can mix the organic residues caused by incomplete combustion of vegetation layer. Replanting in the burned area could be adopted to promote the vegetation restoration.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; forest fire; soil carbon storage; soil organic carbon; soil nutrient

林火作为森林生态系统中最活跃的因子之一,通过直接燃烧损失、有机质高温变性、继发性侵蚀作用,以及改变碳的输入、输出过程而改变土壤碳库^[1],进而影响和改变整个系统的碳循环和碳分布格局^[2]。据统计,森林火灾每年向大气中释放的碳

量相当于化石燃料燃烧的70%^[3]。

林火对土壤的影响与土壤自身特性、林火的严重程度、可燃物类型等多种因素相关,不同学者研究结果差异较大^[4],且大多数集中在火灾对森林土壤理化性质的影响^[5-6]和土壤养分的影响^[7];此外也

收稿日期: 2015-08-24

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50030);浙江省自然科学基金项目(LY12C03012);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC13B02)

作者简介: 赵志霞(1990—),女,河南新乡人,硕士研究生,主要从事森林生态系统结构与功能研究。

* 通讯作者: 李正才,副研究员,博士,主要从事森林碳循环研究。E-mail: lizccaf@126.com

有学者研究不同火烧强度对土壤轻组和重组有机碳的影响^[2,8]。杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 是我国南方优势树种,关于突发性中强度地表火对杉木林土壤有机碳及土壤活性有机碳的影响研究报道较少。2013年8月,浙江富阳状元坞山发生突发性森林火灾,过火面积达198 hm²,属于中强度地表火。本文以该突发性火灾杉木林地作为研究对象,探讨过火1a后土壤有机碳储量、土壤活性有机碳以及土壤养分含量的变化情况,为杉木林火灾后的植被恢复和生态系统改造提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市富阳区鹿山街道汤家埠村状元坞山(30°01'14.26"N,119°54'52.75"E),该地区气候温和,年平均气温16.2℃,雨量充沛,年降水量1464 mm,年无霜期237 d,属北亚热带季风气候,土壤为石英、长石砂岩发育而来的微酸性红壤。杉木林过火后,火烧迹地未采取任何管理措施。试验样地杉木林来源于1975年秋人工造林并于1998年皆伐后萌芽更新形成的林分,造林初植密度为2 m×2 m,杉木平均胸径为14.98 cm,样地总盖度为0.9,火后草本层以蕨类为主。由于杉木林火烧迹地附近为民居和电厂,火后扑救及时,火灾时设置的隔离带使部分杉木林未遭受林火的干扰,因此选取毗邻未火烧杉木林地作为对照样地,所有调查样地处于同一气候背景之下,火烧样地基本情况如表1。

表1 杉木林火烧样地基本情况

林龄/a	平均胸径/cm	立木密度/(株·hm ⁻²)	总盖度/%	土层厚度/cm	坡位	海拔高度/m
15	14.9±5.48	1050	0.9	>50	下坡	121.7

注:数据为均值±标准差。表2、3同。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

2014年8月,即火灾发生1a后对火烧迹地进行野外调查。在杉木林火烧迹地上设立20 m×20 m的调查样地5个,同时选择临近未火烧杉木林为对照,同样设置20 m×20 m的5个调查样地。在各样地内以S形布设法,选定5个点进行土样采集。在采样点上除去地表枯枝落叶层后,用5 cm内径的土钻,分别采集0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 5个土层的土壤样品;将同一样地每个采样

点相同土层的土样进行均匀混合,按四分法装入自封袋带回实验室,自然风干后去杂并过2 mm筛。土壤密度测定用100 cm³环刀采集0~50 cm各土层土壤,去杂带回实验室,105℃烘干至恒质量。在每个样地内,分别以S形各布设5个小样方,用于测定灌木(2 m×2 m)、草本(1 m×1 m)和枯落物(1 m×1 m)生物量(表2)。

表2 火烧和对照样地灌木、草本及枯落物生物量

样地类型	t·hm ⁻²		
	灌木	草本	枯落物
火烧样地	3.50±1.00	11.00±1.37	3.40±1.19
对照样地	0.96±0.36	0.42±0.13	3.30±1.32

土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法测定^[9];易氧化碳采用333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化法^[10]测定;土壤轻组有机质采用碘化钠重液分离法^[11]测定;土壤养分测定采用常规方法:土壤全氮,凯氏定氮法;水解氮,碱解扩散法;速效钾,乙酸铵提取,原子吸收光谱法。

土壤有机碳储量计算公式如下:

$$S = \sum (B_i \times C_i \times D_i)$$

式中,S表示土壤有机碳储量,i表示土壤层次,B_i表示土壤密度,C_i表示土壤有机碳含量,D_i表示土层厚度。

2.2 统计分析方法

应用Excel 2003和SPSS18.0软件对试验数据进行分析,采用t检验分析火烧前后同一土壤层次土壤活性有机碳、土壤有机碳储量的差异显著性,用双变量Pearson相关系数(双尾检验)分析土壤有机碳与土壤各养分的相关性。

3 结果与分析

3.1 火烧对杉木林土壤活性有机碳含量的影响

杉木林过火后0~50 cm各土层中,土壤总有机碳含量均高于对照样地,增加幅度为1.7%~38.0%,且随着土层深度的增加,各土层土壤总有机碳含量增加幅度降低。其中,火烧样地0~10 cm和10~20 cm土层中土壤总有机碳含量分别比对照样地高出38.0%和25.7%,差异达到极显著水平(P<0.01)(表3)。土壤总有机碳含量增加最大值出现在0~10 cm土层中,相比于对照样地增加了9.22 g·kg⁻¹。

表3 杉木林火烧前后土壤总有机碳含量

g · kg⁻¹

样地类型	土层/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
火烧样地	33.46 ± 1.93 ^A	18.96 ± 1.74 ^A	12.32 ± 0.40	10.67 ± 0.45	9.33 ± 0.39
对照样地	24.24 ± 1.89 ^B	15.08 ± 1.26 ^B	11.82 ± 0.88	10.23 ± 0.62	9.17 ± 0.35
增幅/%	38.0	25.7	4.2	4.3	1.7

注: 同列不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

易氧化碳是土壤有机碳中活性较高但稳定性相对较差的碳。从表4可以看出,在0~50 cm各土层中,杉木林火烧样地易氧化碳含量均高于对照样地。与对照样地相比,火烧样地土壤易氧化碳含量在0~10 cm土层中增加幅度为31.9%,差异达到极显

著水平 ($P < 0.01$); 在10~20 cm土层中易氧化碳含量增加幅度为33.2%,差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。过火后,在20~50 cm各土层中土壤易氧化碳含量与对照样地相比增加6.6%~14.4%,未达到显著水平。

表4 杉木林火烧前后土壤易氧化碳含量

g · kg⁻¹

样地类型	土层/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
火烧样地	7.74 ± 0.52 ^A	4.61 ± 0.89 ^a	2.62 ± 0.32	1.87 ± 0.17	1.45 ± 0.40
对照样地	5.87 ± 0.36 ^B	3.46 ± 0.45 ^b	2.29 ± 0.20	1.69 ± 0.25	1.36 ± 0.13
增幅/%	31.9	33.2	14.4	10.7	6.6

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

轻组有机质主要由不同分解程度的植物残体和一些微生物结构体所组成,一般聚集在土壤表层,其含量随着土层深度的增加而下降。由表3可以看出,杉木林过火后,土壤轻组有机质含量均有所增加,在0~10 cm和10~20 cm土层中增加幅度分别为

45.7%和32.6%,差异达到极显著水平 ($P < 0.01$) (表5); 在20~50 cm各土层中土壤轻组有机质含量增加幅度介于3.1%~14.8%之间,增加幅度较小,差异不显著。过火后,杉木林土壤轻组有机质含量的增加主要集中在0~10 cm和10~20 cm土层中。

表5 杉木林火烧前后土壤轻组有机质含量

g · kg⁻¹

样地类型	土层/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
火烧样地	22.67 ± 1.52 ^A	8.29 ± 0.67 ^A	5.73 ± 0.43 ^a	5.04 ± 0.18	4.64 ± 0.37
对照样地	15.56 ± 2.40 ^B	6.25 ± 0.90 ^B	4.99 ± 0.25 ^b	4.74 ± 0.24	4.50 ± 0.31
增幅/%	45.7	32.6	14.8	6.3	3.1

3.2 火烧对杉木林土壤有机碳储量的影响

火烧对杉木林土壤有机碳储量产生显著影响。由表6可以看出,过火后杉木林在0~50 cm土层中土壤有机碳储量增加了13.28 t · hm⁻²,增加幅度为19.1%,差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。其中0~10 cm和10~20 cm土层中土壤有机碳储量与对照

样地相比分别增加了8.6 t · hm⁻²和3.65 t · hm⁻²,增加幅度分别为38.0%和25.7%,差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。而20~50 cm各土层中土壤有机碳储量虽有所增加,但未达到显著水平。这表明火烧对杉木林土壤有机碳储量的影响主要集中在0~10 cm和10~20 cm土层中,占增加总量的92.2%。

表6 杉木林火烧前后土壤有机碳储量比较

t · hm⁻²

项目	土层/cm					合计
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	
火烧样地	31.22 ± 1.80 ^A	17.84 ± 1.64 ^A	12.15 ± 0.39	11.81 ± 0.62	10.14 ± 0.42	82.86 ^A
对照样地	22.62 ± 1.76 ^B	14.19 ± 1.20 ^B	11.66 ± 0.86	11.13 ± 0.64	9.98 ± 0.38	69.58 ^B
增幅/%	38.0	25.7	4.2	6.1	1.6	19.1

3.3 土壤有机碳与土壤养分的相关性分析

火烧前后杉木林土壤总有机碳、易氧化碳、轻组有机质与土壤养分之间的相关性均达到极显著水平。这表明,土壤有机碳的含量对土壤养分的供应

状况起到了决定性作用。火烧样地中土壤总有机碳和轻组有机质与土壤各养分之间的相关系数均高于对照样地,而易氧化碳与全氮、水解氮的相关性系数则低于对照样地。

表7 杉木林火烧和对照样地土壤有机碳与土壤养分相关系数

样地类型	土壤养分	土壤总有机碳	易氧化碳	轻组有机质
火烧样地	全氮	0.978**	0.939**	0.961**
	水解氮	0.970**	0.926**	0.929**
	速效钾	0.884**	0.876**	0.825**
对照样地	全氮	0.969**	0.976**	0.904**
	水解氮	0.901**	0.947**	0.918**
	速效钾	0.730**	0.739**	0.779**

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

4 结论与讨论

4.1 火烧对杉木林土壤有机碳的影响

林火能在短时间内改变森林土壤的理化性质,影响生态系统的养分循环和再分配^[12-13]。研究表明,中强度火烧后杉木林 0~50 cm 各土层土壤总有机碳含量均显著升高。土壤有机质在火灾中被蒸发、氧化和焦化,损失的大部分有机碳被转变为 CO₂、CO 和 CH₄,释放到大气中,小部分转变为黑碳,进入稳定的土壤碳库^[14]。林火对土壤有机碳的影响很大程度上取决于火灾类型(树冠火、地表火、地下火)、火烧强度、过火时间及坡度等因素^[4,15],因此不同学者的研究结果有所差异。据 Johnson 等对北美不同林火影响的土壤有机碳变化进行分析,发现突发性火灾发生后土壤有机碳含量增加,而控制火烧却造成土壤有机碳含量下降^[16]。沙丽清等对西双版纳次生林火烧前后土壤养分变化的研究中发现,过火后 0~10 cm 土层中有机碳含量增加了 24.9%^[17]。本研究中,火烧后杉木林土壤总有机碳含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中分别增加了 38.0% 和 24.0%,达到极显著水平,与上述研究结论基本一致。

中强度火烧 1a 后,杉木林 0~50 cm 土层中,火烧样地土壤有机碳储量为 82.86 t·hm⁻²,对照样地土壤有机碳储量为 69.58 t·hm⁻²,过火后土壤有机碳储量明显增加。从土壤碳空间分布来看,土壤有机碳储量的增加主要集中在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中,分别占增加总量的 38.0% 和 25.7%。李纫兰等在对突发性火灾对南方湿地松人工林土壤碳储量影响的研究中发现,腐殖质层和 0~10 cm 土层碳储量增加,而 10 cm 以下土层碳储量减少^[18]。火灾中通过蒸发、氧化和焦化后转变为 CO₂、CO 和 CH₄ 所损失的有机碳从其它途径得到补充,造成过火后 0~50 cm 土层中土壤有机碳含量增加。过火后土壤有机碳的增加是由森林火烧后植被层未充分燃烧的有机残体、枯落物层有机颗粒和

其碳化颗粒的混入形成熏土效应引起,死亡植株半腐烂根系的混入也是造成土壤有机碳增加的原因之一^[18-19]。同时,杉木林过火 1a 后火烧迹地自然演替更新,对照样地灌木、草本生物量分别为 0.96 t·hm⁻² 和 0.42 t·hm⁻²,火烧样地灌木、草本生物量分别增加到 3.50 t·hm⁻² 和 11.0 t·hm⁻²。过火后冠层植被减少,林窗增大,林分郁闭度降低,林内光照增强^[20],灌木和以蕨类为主的草本得以大量生长,火烧样地灌木和草本生物量的增加也是土壤有机碳含量增加的原因之一。

4.2 火烧对杉木林土壤活性有机碳的影响

土壤易氧化碳是土壤养分的潜在来源,为微生物活动提供重要能源,稳定性相对较差。火烧后杉木林 0~50 cm 各土层中土壤易氧化碳含量均高于对照样地,这是因为土壤易氧化碳含量在很大程度上取决于土壤总有机碳含量^[21]。植被层未充分燃烧的有机残体和凋落物经微生物分解后,转化成为易氧化碳,火烧 1a 后易氧化碳含量显著增加,这与火烧样地凋落物分解加快有关。虽然火烧样地与对照样地凋落物生物量差异不显著,但由于易氧化碳含量的主要影响因子土壤温度和降水^[22],火烧后地表温度升高,微生物活动加剧,凋落物分解速度增加,火烧后混入土壤未充分燃烧的有机残体、枯落物经微生物的分解、迁移和转化成为易氧化碳。

土壤轻组有机质主要来源于地上凋落物和地下根系^[23],其含量与土壤有机碳储存及其短期动态有关^[24]。火烧 1a 后,0~50 cm 各土层土壤轻组有机质含量均高于对照样地,且在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中差异极显著。土壤轻组有机质对林火干扰反应很敏感,过火后土壤中混入的大量未完全燃烧的有机残体、碎屑及有机物颗粒造成土壤有机碳含量的增加^[18],使火烧样地轻组有机质来源增加,同时植被层遭到破坏,林窗增大,林内光照增强^[20],地表温度升高,微生物活动增强,分解速度增加,并随雨水向下层土壤迁移进而引起轻组有机质的增加^[8]。

林火是引起土壤养分变化的重要因子之一^[25-26]。土壤有机碳与土壤养分的相关性分析表明,土壤养分的供给很大程度上取决于有机碳含量。火烧样地中土壤总有机碳、轻组有机质与土壤各养分之间的相关性系数均高于对照样地。火烧 1a 后,土壤全氮及水解氮含量增加,这是由于土层表层碳化、无机物和植被有机残体的堆积引起的^[6],与孔健健^[27]、赵彬^[28]等研究结果一致;另外,过火后固氮

植被的大量生长也是造成土壤含碳量增加的原因之一^[29]。但耿玉清等发现在土壤有机质层,轻度火烧对土壤全氮量的影响不明显,而中强度火烧后0—10 cm 土层中全氮量显著降低^[30]。这与火灾类型、过火时间、火烧强度以及坡度等因素有很大关系^[4]。而速效钾含量的增加则主要是因为过火后灰分增加^[31],还有研究发现过火后速效钾的变化与火烧温度有关,火烧后表土的速效钾浓度有明显升高^[32]。

中强度火烧对北亚热带杉木林土壤有机碳产生显著影响。过火1a后,杉木林火烧样地0—50 cm 各土层中土壤总有机碳、易氧化碳、轻组有机质含量均有所增加,增加幅度随着土层深度的增加而减小。土壤有机碳储量增加 $13.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,土壤活性有机碳与土壤养分的相关系数高于对照样地。林火作为森林生态系统中突发性的因子之一,中强度火烧能够促进森林土壤有机碳的循环。火烧1a后,火烧迹地天然更新以灌木和草本为主,建议采用人工补植造林措施,短时期内促进植被的恢复。

参考文献:

[1] 郑焕能. 中国东北林火[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,2000.

[2] 魏云敏,胡海清,孙家宝,等. 不同强度火烧对轻组和重组有机碳的影响[J]. 安徽农业科学,2014,42(18):5840—5843.

[3] 赵凤君,舒立福,姚树人. 森林火灾碳排放估算方法与研究进展[J]. 森林防火,2012,(1):25—29.

[4] González-Pérez J A, González-Vila F J, Almendros G, *et al.* The effect of fire on soil organic matter—a review[J]. *Environment International*,2004,30(6):855—870.

[5] 张玉红,孙铭隆,刘彤. 林火对大兴安岭典型植被土壤理化性质的影响[J]. 东北林业大学学报,2012,40(6):41—43.

[6] 张喜,朱军,崔迎春,等. 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响[J]. 生态学报,2011,31(19):5809—5817.

[7] 孙毓鑫,吴建平,周丽霞,等. 广东鹤山火烧迹地植被恢复后土壤养分含量变化[J]. 应用生态学报,2009,20(3):513—517.

[8] 陆昕,胡海清,孙龙. 火干扰对兴安落叶松土壤轻组有机碳的影响[J]. 安徽农业科学,2013,41(29):11709—11713.

[9] LY/T 1237-1999. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S].

[10] 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[J]. 土壤学报,2000,37(2):166—173.

[11] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799—1806.

[12] Wan S Q, Hui D F, Luo Y Q. Fire effects on nitrogen pools and dynamics in terrestrial ecosystems: a meta-analysis[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(5):1349—1365.

[13] 吕爱锋,田汉勤. 气候变化、火干扰与生态系统生产力[J]. 植物生态学报,2007,31(2):242—251.

[14] Czimezik 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[J]. *Europe Journal of Soil Science*, 2005, 56(3):417—428.

[15] French N H F, Goovaerts P, Kasischke E S. Uncertainty in estimating carbon emissions from boreal forest fire[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: 114—128.

[16] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis[J]. *Forest Ecology Management*, 2001,140(2):227—238.

[17] 沙丽清,邓继武,谢克金,等. 西双版纳次生林火烧前后土壤养分变化的研究[J]. 植物生态学报,1998,22(6):513—517.

[18] 李纫兰,缪启龙,王绍强,等. 突发性火灾对南方湿地松人工林土壤碳储量的影响[J]. 资源科学,2009,31(4):674—680.

[19] 崔晓阳,郝敬梅,赵山山,等. 大兴安岭北部试验林火影响下土壤有机碳含量的时空变化[J]. 水土保持学报,2012,26(5):196—200.

[20] 丛燕,魏荣华,袁强. 黑河地区阔叶林和白桦落叶松林火烧迹地生物量动态变化的研究[J]. 林业科技,2011,36(2):17—19.

[21] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, 21(4):471—479.

[22] 徐侠,王丰,栾以玲,等. 武夷山不同海拔植被易氧化碳[J]. 生态学杂志,2008,27(7):1115—1121.

[23] Boone R D. Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11):1459—1468.

[24] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3):317—327.

[25] Boby L A, Schuur E A G, Mack M C, *et al.* Quantifying fire severity, carbon, and nitrogen emissions in Alaska's boreal forest[J]. *Ecological Applications*, 2010,20(6):1633—1647.

[26] Gertini G. Effects of fire on properties of forest soils A review[J]. *Oecologia*, 2005,143(1):1—10.

[27] 孔健健,杨健. 火烧对中国东北部兴安落叶松土壤性质和营养元素有效性的影响[J]. 生态学杂志,2013,32(11):2837—2843.

[28] 赵彬,孙龙,胡海清,等. 兴安落叶松林火后对土壤养分和土壤微生物生物量的影响[J]. 自然资源学报,2011,26(3):450—459.

[29] 傅民杰,王传宽,王颖,等. 4种温带森林土壤氮矿化与硝化时空格局[J]. 生态学报,2009,29(7):3747—3758.

[30] 耿玉清,周荣伍,李涛,等. 北京西山地区林火对土壤性质的影响[J]. 中国水土保持科学,2007,5(5):66—70.

[31] 王丽,王兆锋,张懿锂,等. 火烧对拉萨地区湿草甸湿地土壤养分特征的影响[J]. 环境科学研究,2013,26(5):549—554.

[32] 姜勇,诸葛玉平,梁超,等. 火烧对土壤性质的影响[J]. 土壤通报,2003,34(1):65—69.