

DOI: 10.5846/stxb201806051264

陈韵如, 杨 扬, 张喜亭, 杨艳波, 王慧梅, 王文杰. 大兴安岭森林火烧恢复年限对土壤磷及其有效性影响研究. 生态学报, 2019, 39(21): - .

Chen Y R, Yang Y, Zhang X T, Yang Y B, Wang H M, Wang W J. Effects of after-burning rehabilitation times on soil phosphorus and its availability in the Daxing'anling forests. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

大兴安岭森林火烧恢复年限对土壤磷及其有效性影响研究

陈韵如¹, 杨 扬¹, 张喜亭¹, 杨艳波¹, 王慧梅¹, 王文杰^{1,2,*}

1 东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

2 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

摘要: 林火是大兴安岭地区森林生态系统的重要影响因子, 对地下土壤养分, 特别是磷及其有效性变化长时间序列研究, 将有助于林火后植被恢复管理、模型模拟及科学评价。本文选择呼中、南瓮河、双河、图强、塔河、加格达奇、满归等地区火后恢复 2—50 年样地 48 块, 并以火烧区域周边相似地形地貌、未经火烧区域为配对对照样地, 野外调查记录地形地貌和地理位置数据, 室内分析土壤全磷和速效磷。配对 *t* 检验、冗余排序分析、趋势分析、离散性分析等处理相结合, 试图找出火烧后土壤磷及其有效性变化特征。研究结果表明: 1) 整体数据平均值及离散程度表明, 火后全磷及速效磷均值均稍低于对照, 火后二者的离散程度为 37—49%, 低于对照样地 6—22 个百分点; 区分不同恢复时间, 配对 *t* 检验未发现火烧样地土壤磷与对照间的显著差异。2) 以火烧对照比值及差值进行趋势分析发现, 相对于对照, 火烧后全磷呈现先增加后降低的变化趋势 ($R^2 = 0.89-0.95$, $p = 0.07-0.15$), 火后 20—30 年间开始低于对照样地。速效磷也呈类似变化趋势, 但是相关性较低 ($R^2 = 0.44-0.67$, $p = 0.44-0.66$); 速效磷占比年代变化趋势不明显 ($R^2 = 0.08-0.12$, $p > 0.95$)。3) RDA 排序分析表明, 火烧导致恢复年限成为影响磷变化的最主要因素 (15.3%), 其次是经度 (10.7%); 而在对照样地中, 纬度是土壤磷变化最关键影响因素, 能够解释其变化总量的 27.6%。我们的研究结果为森林火后土壤养分管理以及森林演替生态评价, 特别是土壤养分变化分析提供重要参数。

关键词: 大兴安岭; 火烧迹地; 土壤磷及其有效性; 空间与时间替代法; 排序分析

Effects of after-burning rehabilitation times on soil phosphorus and its availability in the Daxing'anling forests

CHEN Yunru¹, YANG Yang¹, ZHANG Xiting¹, YANG Yanbo¹, WANG Huimei¹, WANG Wenjie^{1,2}

1 Key Lab. of Forest Plant and Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040

2 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun 130102

Abstract: Forest fire is an important factor affecting the forest ecosystem in the Daxing'anling Mountains. A long-term comprehensive analysis of the changes of subsurface soil nutrients, especially phosphorus and its availability, will contribute to forest fire vegetation restoration management, model simulation and scientific evaluation. Based on historical fire data in Daxing'anling, this study selected 48 plots that were 2—50 years post-fire, at Huzhong, Nanwenghe, Shuanghe, Tuqiang, Tahe, Jiagedaqi, and Mangui, using the neighbouring unburned site, of similar terrain, as the control. Total phosphorus and available phosphorus were determined. A paired *t*-test, redundant ordination analysis, temporal trend analysis, data average and variation analysis were used to analyse the data. We found that (1) the pooled data mean value showed that total phosphorus and available phosphorus in fire sites were slightly lower than in the control site and the coefficient of

基金项目: 中央高校高层次人才持续发展专项 (2572017DG04); 十三五科技部重点研发专题 (2016YFA0600802)

收稿日期: 2018-06-05; **修订日期:** 2019-02-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wwj225@nefu.edu.cn

variation of the data in burned sites was 37%—49% for two phosphorus forms. This was 6%—22% lower than the non-burned control site. When classifying the data into different rehabilitation times, the paired t -test did not find significant differences, (2) the temporal trend analysis found that total phosphorus first increased and then decreased post-fire ($R^2=0.89-0.95$, $p=0.07-0.15$), and the threshold values were in 20–30 years. The available phosphorus showed a similar trend, with much lower correlation ($R^2=0.44-0.67$, $p=0.44-0.66$). However, it was not obvious in the available phosphorus fraction to total phosphorus at the tested period of time ($R^2=0.08-0.12$, $p>0.95$), (3) the RDA ordination showed that fire changed the controlling factor for soil phosphorus changes. At fire sites, soil phosphorus variations could be explained by rehabilitation times after fire (15.3%) and longitude (10.7%), while in the control plots, latitude was the most important contributing factor to soil phosphorus change, explaining 27.6% of the variation. Our findings provide important parameters for the management of soil nutrients after forest fires, as well as the ecological assessment of forest fire-induced succession, especially the analysis of soil nutrient changes.

Key Words: Daxing'anling Mountains; Burned land; Soil phosphorus and availability; Space-time substitution method; Ordination analysis

大兴安岭地区位于我国最北端,是寒温带针叶林的部分区域,该区域是我国森林天然火灾频发区域,森林火灾使大片森林毁灭,导致人类生存的环境受到极大威胁。森林作为重要碳库,在稳定全球温室气体平衡方面起到关键制约作用^[1]。森林火灾的发生会导致生态系统的平衡遭到破坏,如何快速恢复这些火烧迹地的森林,对火灾后植被恢复过程进行科学认识,已成为林业工作者面临的重要课题,其中对土壤相关变化的认识远远低于地上植被的认识。

磷是植物生存必不可少的元素,土壤磷素对植物生长和繁殖起着重要的作用。土壤的 pH 值,凋落物的种类及土壤的结构类型等都可能影响磷在土壤中的存在形态及其有效性。磷在自然界有若干种存在形态,不是每一种形态的磷都能被植物所吸收利用。土壤全磷大部分呈复杂无机矿物态,除极少量简单有机物中的磷可被植物直接吸收外,绝大部分有机磷在短时间内都是相对无效的磷。只有正磷酸盐对植物有效,其含量大约在 1—50 mg/kg 之间,被称为“速效磷”。由于森林土壤磷元素补给的单一性,森林生态系统土壤磷的有效性降低,再加上氮沉降增加的影响,加剧土壤速效磷供应的不足,磷可能成为森林生长发育的限制因子^[2]。磷对于火后森林的演替有着不可替代的重要性,但关于火后土壤磷含量长时间持续变化的研究却较少。基于长期年代序列样地,准确确定火烧后森林恢复迹地中土壤全磷、速效磷含量变化趋势及其主要限制因子分析,将有助于科学评价预测森林生态恢复过程,基于土壤养分准确确定森林恢复干预管理时间等。

以往针对火后短期内土壤磷的变化做了部分研究,但结论并不一致并且缺乏长期有效的研究。谷会岩等人研究表明针对不同强度火烧,兴安落叶松林土壤磷含量之间并没有显著的差别($p<0.05$)^[3],火烧后几年内的土壤磷含量会低于火烧前水平^[4]。孔健健等人则认为火后的早期阶段磷的含量会迅速增加,然后随着火灾后时间的增加而逐渐减少,火灾后土壤速效磷含量明显高于对照区,并且高强度和低强度火灾之间存在明显差异^[5]。国外 Romanyà J 等人将土壤分为未燃烧,燃烧和剧烈燃烧(灰分)三类,得出火对土壤磷的影响在表土层中最大并且依赖于火强度^[6]。基于这种状况,我认为需要开展这种长期的对于土壤全磷及速效磷的统计及趋势分析并对影响土壤磷变化的因素进行冗余排序分析,以填补长时间尺度下对土壤磷变化研究的缺乏及火后土壤磷变化影响因素的空缺。通过这样的研究可以了解影响土壤磷变化的主要因素及其变化规律,对大兴安岭地区的植被恢复和生态评价提供数据支持。

基于此,本文提出科学假设:火烧后恢复时间长短直接影响土壤磷及其有效性特征变化,可能表现在整体或者某一段时期均值、离散程度及整体年代变化趋势的某些方面或者全部。本试验拟近 50 年来大兴安岭地区火烧后的火烧迹地按距今的火烧后恢复年限排序,采样火烧迹地及配对未火烧对照土壤,测定其全磷和速效磷的含量变化,得出不同火烧后恢复年限对土壤全磷及速效磷的影响和规律,明确磷的消长,以期为基于土

壤养分动态的林火植被恢复管理、模型模拟研究及后续科学评价提供数据支持。

1 研究材料和方法

1.1 研究区概况

大兴安岭处于北纬 $50^{\circ}11'—53^{\circ}33'$ 、东经 $121^{\circ}12'—127^{\circ}00'$ 之间,是中国最北、纬度最高的边境地区。其年平均气温漠河县和呼中区北部零下 4°C ,其他地区零下 2°C 。其年平均降水量 $428.6—526.8\text{ mm}$,全年无霜期 $80—110$ 天,冰封期 $180—200$ 天。大兴安岭地区属于寒温带大陆性季风气候,冬季由蒙古冷高压控制,寒冷干燥,降水量是年降水量的 10% 。夏季由太平洋高压控制,更多东南季风通过,潮湿凉爽。

大兴安岭是我国重点国有林区,主要乔木树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphlla*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)等。主要灌木为兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre* var. *dilatatum*)、越橘(*Vaccinium vitisidaea*)等。主要草本为莎草科(*Cyperaceae*)、菊科(*Compositae*)、豆科(*Leguminosae*)、蔷薇科(*Rosaceae*)等植物^[7,8]。该地也是我国东北地区重要的生态屏障,在保护并维持呼伦贝尔草原及松嫩平原区域生态平衡方面具有重要作用^[9]。

1.2 野外土壤的采集及处理

本实验于 2016—2017 年在大兴安岭的呼中、南瓮河、双河、图强、塔河、加格达奇、满归七个地区的火烧迹地上设置 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的样地采取土样,在坡度、坡位、林型与海拔等立地条件基本一致的前提下,选择周围未过火区作为对照样地。在每个样地中分 $0—20\text{ cm}$ 深层土进行五点(四角及中心)混合取样,同一样地的土样混合成一个混合样。取出部分土壤自然风干,用粉碎机研磨后过 60 目筛,装瓶备用。

在样地选取方面,根据 1966 年以来历年火烧等级表(大兴安岭林区火警火灾登记表),选择 2—50 年发生火灾的具体位置,尽可能保持不同火烧恢复年限的样地数量均等原则下,在大兴安岭林区选择过火样地。共采集 87 个样地($50^{\circ}14'20''\text{N}—53^{\circ}04'16''\text{N}$, $122^{\circ}18'19''\text{E}—125^{\circ}30'30''\text{E}$),其中 48 个火烧样地,39 个对照样地,有一些火烧样地相距较近,与之相对的对照样地是同一个条件相同地区,这些火烧样地选取一个对照样地。

1.3 土壤磷测定方法

全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色-分光光度法定量测定^[10]。取 0.25 mm 孔径的土样 0.25 g 于镍坩埚中,用无水乙醇完全湿润后与 2 g 氢氧化钠混合,放入马弗炉内灼烧,于 400°C 暂停 15 min 后升温至 720°C 保持 15 min ,关闭马弗炉,待至稍冷取出,放在电热板上(约 100°C)。加入 10 mL 去离子水(约 80°C)搅拌至土壤与水混合均匀后倒入 50 mL 容量瓶中,并用 10 mL 硫酸溶液(0.2 mol/L)多次冲洗坩埚,一并倒入容量瓶中。加入 5 滴 $1:1\text{ HCl}$ 和 $5\text{ mL } 1:3\text{H}_2\text{SO}_4$,摇匀,定容,用无磷定量滤纸过滤到三角瓶中。吸取待测样品溶液 10 mL (含磷 $5—25\mu\text{g}$)于 50 mL 容量瓶中,用水稀释至约 30 mL 。加入二硝基酚指示剂 2—3 滴,并用 100 g/L 碳酸钠溶液调节溶液至微黄色。加入 5 mL 钼锑抗显色剂,摇匀、定容,在室温(25°C)下放置 30 min 后通过测量 700 nm 处分光光度来计算全磷含量。

速效磷采用碳酸氢钠溶液浸提-钼锑抗比色法定量测定^[10]。将 0.25 mm 孔径土样 $0.25 \pm 0.001\text{ g}$ 与 $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 碳酸氢钠浸提剂 50 mL 混合,在 $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 温度下于摇床(120 r/min)上震荡 $30 \pm 1\text{ min}$,过滤后加入显色剂 5

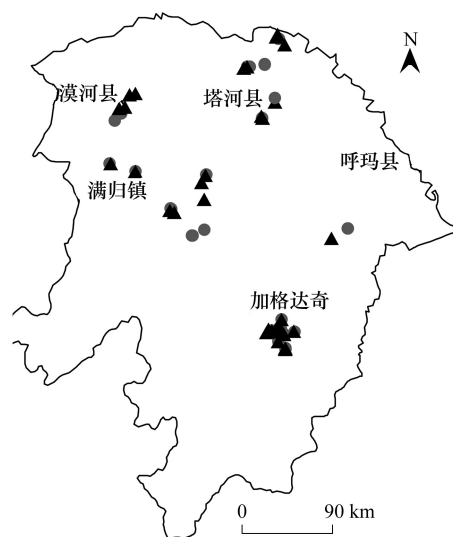


图 1 样地示意图

Fig.1 Map of study area

mL,慢慢摇晃排出二氧化碳后加入 25 mL 蒸馏水,充分摇匀。显色 30 min 后测量 700 nm 处分光光度(752N 型紫外可见分光光度计)来计算速效磷含量。

对磷的标准曲线进行定量。磷标准曲线设定的范围为 0.00–0.60 $\mu\text{g/mL}$,室温(25 $^{\circ}\text{C}$)显色 30 min 后以含磷量为 0 的标准溶液调节仪器零点测定 700 nm 处分光光度。以上分光光度测定均采用 752N 型紫外可见分光光度计进行测定(上海精科实业有限公司,上海)。计算方法为: $(P, \text{g/kg}) = (\rho \cdot V \cdot D \times 1000) / (m \times 10^6)$ (式中 ρ 为查校准曲线或求回归方程而得测定液中 P 的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$; V 为显色时溶液定容的体积, mL; 本试验为 50; D 为分取倍数, 全磷为 50/10; m 为风干试样质量, g)。速效磷采用相同的标准曲线进行计算。

1.4 过火特征信息收集

利用野外信息收集软件记录过火地区的经纬度、海拔、坡度、坡位、坡向等地形地貌及地理位置数据。野外数据收集测定地点的海拔高度、坡位(坡上、坡中、坡下和平地)、坡度和坡向,其中坡向是以正北方向为 0 度,顺时针方向 180 度为正值,表示往东北、东、东南和南方向;逆时针方向 180 度为负值,表示往西北、西、西南和南方向;同时使用自带 GPS 测定样地的地理位置坐标(经度和纬度)。野外信息收集软件为野外协同工作平台 V3.0,由中国科学院沈阳应用生态研究所开发。

过火地区林分主要由兴安落叶松与白桦组成。林火特征数据,包括过火面积和火烧年限,从大兴安岭林管局防火办查询 1966 年以来历年森林火灾登记表及历史文献查询获得。

1.5 数据处理与分析

为了判断整体数据是否存在差异及变异性,我们对所有数据进行平均值处理及方差分析,判断差异显著性;并求得变异系数(即标准偏差占平均值的百分比),判断火烧迹地与对照数据变化幅度大小是否存在差异。在此基础上,为了进一步判断在哪个恢复时间段发生了变化,我们将数据按照恢复时间分组为 1–5 年、5–10 年、10–20 年、20–30 年、3–40 年、40–50 年,对土壤磷指标进行配对 t 检验,找到差异最显著区域;同时,以火烧/对照比值、差值(火烧–对照)与恢复年限进行多项式拟合回归分析,达到统计学显著说明存在明显变化趋势;为了判断火烧恢复迹地与对照样地土壤磷变化受地形、地理位置和火灾特征影响的差异,以火烧恢复年限(year)、经度(longitude)、纬度(latitude)、坡度(slope)、坡位(slope position, sp)、坡向(aspect of slope, aos)、海拔(altitude)、过火面积(burned area, ba)为解释变量,以土壤磷相关指标全磷(TP)、速效磷(AP)及速效磷占比(AP/TP)作为响应变量(response data),进行 RDA(Redundancy analysis)分析,并以条件效应(conditional term effect)检验出具有显著解释功能的解释因子。

以上统计分析使用 SPSS 19.0 完成。RDA 分析使用 Canoco5 中 Standard Analysis 的 Constrained (species-environmental variables) 进行分析,并选择 Ordination linear method 并对 response data 进行 log 转化标准化处理。为说明火烧和对照样地之间地形特征差异,对海拔、坡度、坡位和坡向进行频率分布,箱线图 Box-plot 分布图使用 jmp10.0(SAS Institute Inc., USA)完成。箱线图包括 5 个统计量:最小值、下四分位数(Q1)、中位数(Q2)、上四分位数(Q3)与最大值;上四分位数与下四分位数的差距又称四分位间距(Inter Quartile Range, IQR)。箱线图的上下限(异常值截断点)分别在比 Q1 低 1.5 倍 IQR 和比 Q3 高 1.5 倍 IQR 的位置上,上下限以外的数据认为是异常值,以散点表示;图中红线所标示的是最小 50%测定数值的分布范围,反映了数据最集中分布区域^[11]。

2 结果

2.1 全磷

整体数据分析显示,火烧样地全磷含量的变异系数明显低于对照样地,说明火烧降低了土壤全磷离散变化程度(图 2a);降低程度为 22%。把数据按火烧恢复年限分为 6 个时间段的结果,显示火烧前 20 年土壤全磷稍高于对照,之后则稍低于对照,配对 t 检验没有发现火烧与对照样地间存在显著差异(图 2b)。使用火烧与对照样地中全磷的比值和差值进行时间变化趋势分析显示,全磷的变化趋势相似:即火灾后全磷含量火烧

样地略高于对照样地,呈现上升趋势,5–10 年最高,之后,随着植被的恢复,全磷有下降趋势,在 20–30 年间,火烧样地的全磷含量减少到低于未过火样地(图 2c,d)。

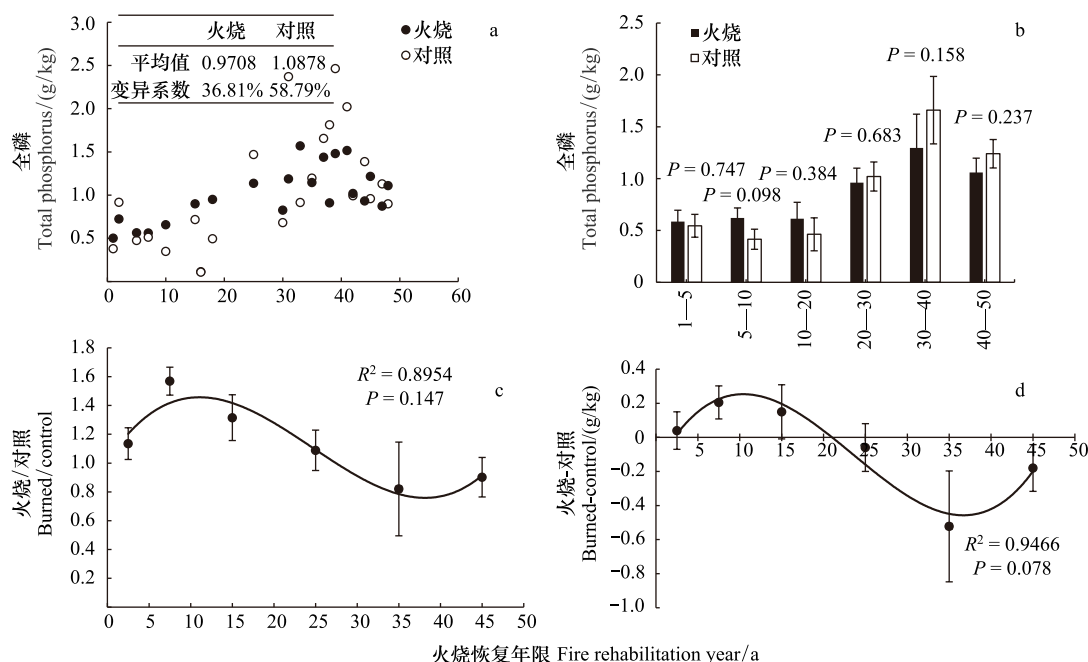


图 2 火烧样地与对照样地的全磷含量比较

Fig.2 Comparison of total phosphorus in fired and control soils

2.2 速效磷

整体数据分析显示,火烧样地速效磷含量的变异系数略低于对照样地,说明火烧降低了土壤速效磷的离散变化程度(图 3a);降低程度为 6%。把数据按火烧恢复年限分为 6 个时间段的结果,显示火烧前 5 年土壤速效磷稍低于对照,5—20 年时则稍高于对照,20 年后又低于对照,配对 t 检验没有发现火烧与对照样地间存在显著差异(图 2b)。使用火烧与对照样地中速效磷的比值和差值进行时间变化趋势分析显示:速效磷含量火灾后火烧样地略低于对照样地,后呈现上升趋势,10—20 年最高,之后,随着植物的利用,速效磷有下降趋势,在 20—30 年间,火烧样地的速效磷含量减少到低于未过火样地(图 3c,d)。

2.3 速效磷占全磷比例

整体数据分析显示,火烧样地速效磷占比的变异系数明显高于对照样地(图 4a),说明火烧样地的速效磷和全磷在火后发生了明显变化:升高程度为:38%。把数据按火烧恢复年限分为 6 个时间段的结果,显示只有 10—20 年及 30—40 年火烧样地的速效磷占比高于对照样地,且没有发现火烧与对照样地间存在差异(图 4b)。使用火烧与对照样地中速效磷占比的比值和差值进行时间变化趋势分析,未发现明显规律(图 4c,d)。

2.4 火烧和配对样地地形差异分析

图 5 为火烧后恢复样地与对照样地间的地形分布对比图。由图中明显看出火灾和对照样地之间的海拔、坡度、坡位及坡向存在高度相似性。火烧与对照样地海拔高度多处于 400–600 米处(大于 50%),坡度多数小于 10 度(大于 60%),且朝向西南及西北方向坡地较少(小于 5%),以平地居多。

2.5 冗余排序分析(RDA 分析)

RDA 排序图中,实心箭头代表响应变量,为全磷、速效磷及其比值,空心箭头代表解释变量。一般来讲,箭头越长,而夹角的余弦值越小,说明两个变量越具有紧密相关关系,也就是解释变量对响应标量变化的解释能力越强。

图 6(a)是对火烧样地土壤磷与地形、地理坐标及过火特征的 RDA 排序图。速效磷和经度具有明显的负

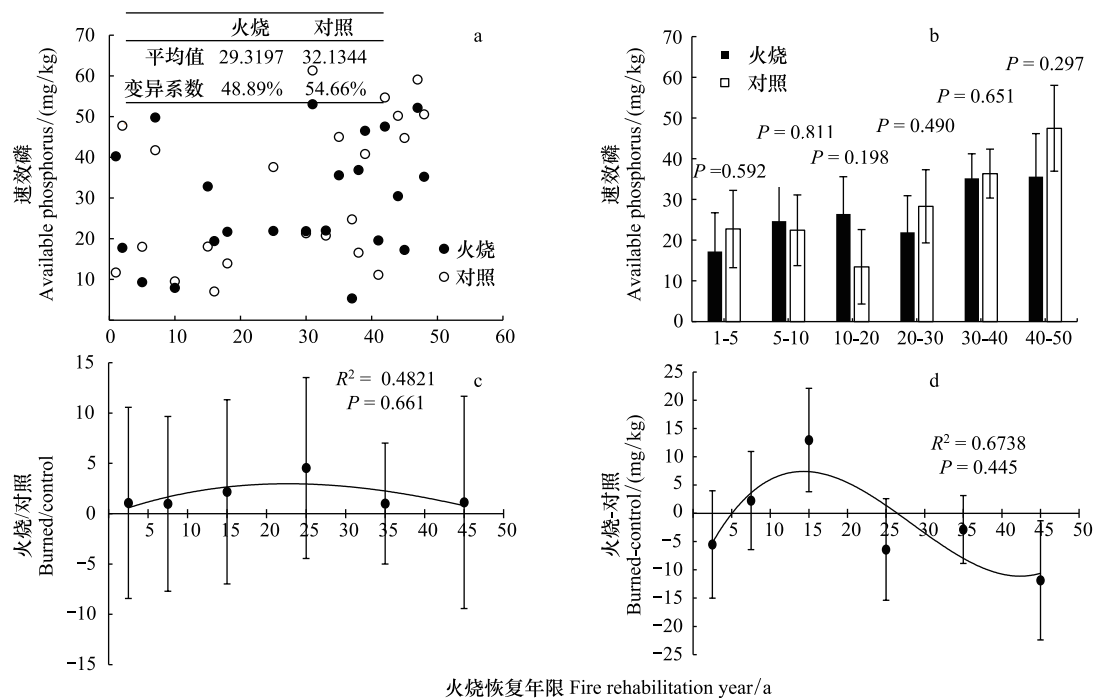


图3 火烧样地与对照样地的速效磷含量比较

Fig.3 Comparison of available phosphorus in fired and control soils

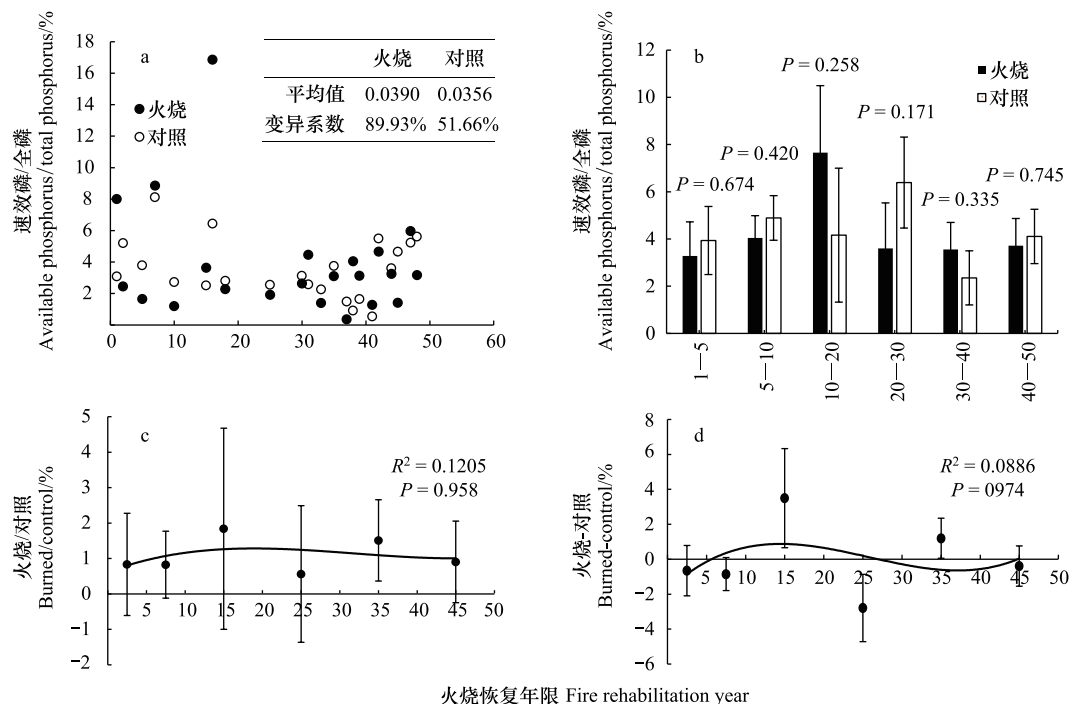


图4 火烧样地与对照样地的速效磷与全磷的比值比较

Fig.4 Comparison of the ratio of available phosphorus in total phosphorus in fired and control soils

相关关系,与火烧后恢复年限和坡度具有正相关关系。全磷与火烧后恢复年限的夹角很小,呈现明显的正相关,而与纬度负相关。将全磷、速效磷及速效磷占比当成一个整体,当不考虑因子间相互影响,确定单因素分

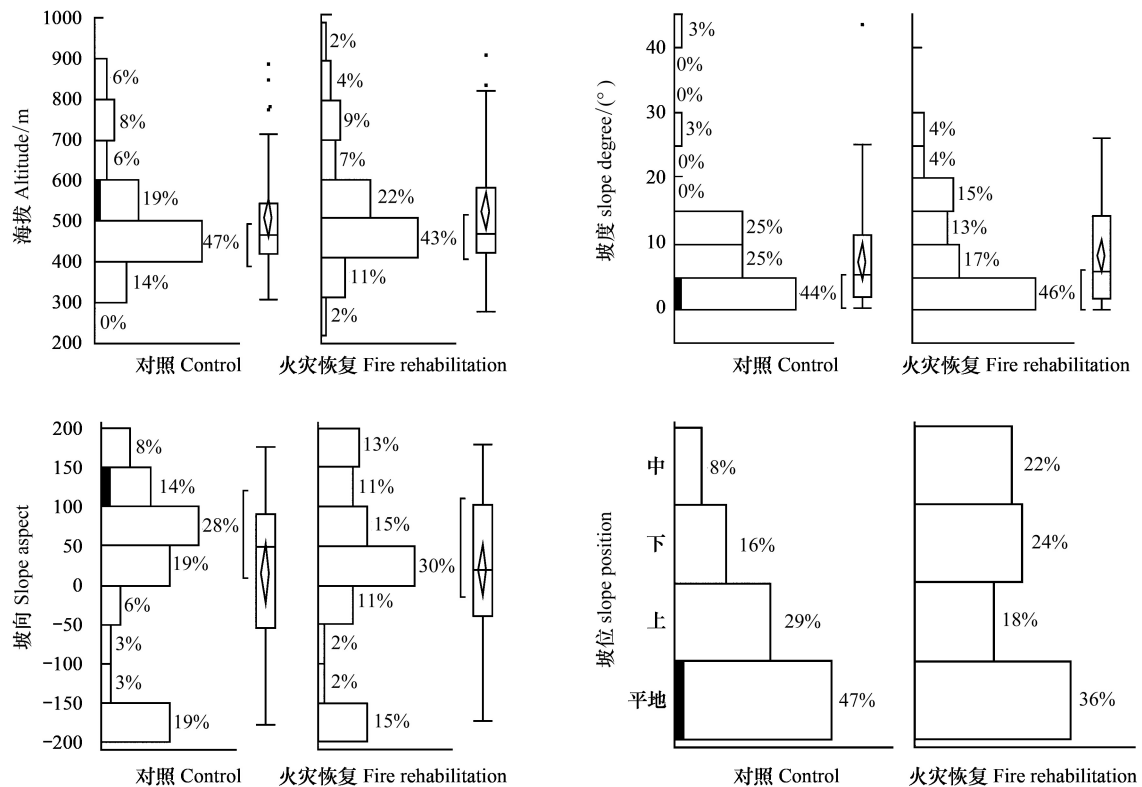


图5 火灾恢复样地及配对对照样地海拔、坡度、坡向和坡位比较频率图

Fig.5 Frequency distribution of altitude, slope degree, slope aspect, slope position of the fire rehabilitation sites and control sites

析 (Simple Term Effects, 表 1) 发现, 火烧样地内火烧恢复年限和经度对于土壤磷解释贡献都达到了 10% 以上, 并且达到统计学显著。综合所有因素进行条件限制分析 (Conditional Term Effects, 表 2), 也确认火烧迹地上土壤磷主要受火烧年限和经度的影响。二者均发现, 其他考虑的因素如海拔、过火面积等对本研究中发现的土壤磷变化解释能力不大, 没有统计学显著贡献。

图 6(b) 是对照样地中全磷、速效磷与其相关因素的 RDA 分析。根据箭头的长度以及与全磷及速效磷之间的夹角判断在对照样地中影响最大是火烧后恢复年限和纬度这两个因素。全磷及速效磷于火烧后恢复年限呈正相关, 与纬度呈负相关。单因素和综合分析结果均发现, 纬度是未过火对照样地土壤磷变化的最主要影响因子, 其次是火烧恢复年限及过火面积。可能随着纬度的增加, 气温和降水发生改变, 土壤中微生物活性降低, 导致土壤 pH 值, 腐殖酸浓度发生改变而使土壤磷的含量发生变化, 具体变化趋势有待进一步讨论。

表 1 火烧地区单因素分析

Table 1 Simple Term Effects in burned area

影响因素 Name	解释度 Explains/%	F 值 pseudo-F	置信度 P
火烧后恢复年限 year	15.3	7.0	0.016
纬度 latitude	7.4	3.1	0.09
坡度 slope	5.6	2.3	0.13
海拔 altitude	1.1	0.4	0.552
坡向 aos	1.0	0.4	0.568
过火面积 ba	0.8	0.3	0.638
坡位 sp	0.4	0.1	0.8

表 2 火烧地区条件限制分析

Table 2 Conditional Term Effects in burned area

影响因素 Name	解释度 Explains/%	F 值 pseudo-F	置信度 P
火烧后恢复年限 year	15.3	7.0	0.016
经度 longitude	10.7	5.5	0.026
海拔 altitude	9.9	5.7	0.02
过火面积 ba	4.2	2.5	0.114
坡度 slope	3.2	2.0	0.156
坡向 aos	1.6	1.0	0.35
坡位 sp	0.7	0.4	0.586
纬度 latitude	0.8	0.5	0.53

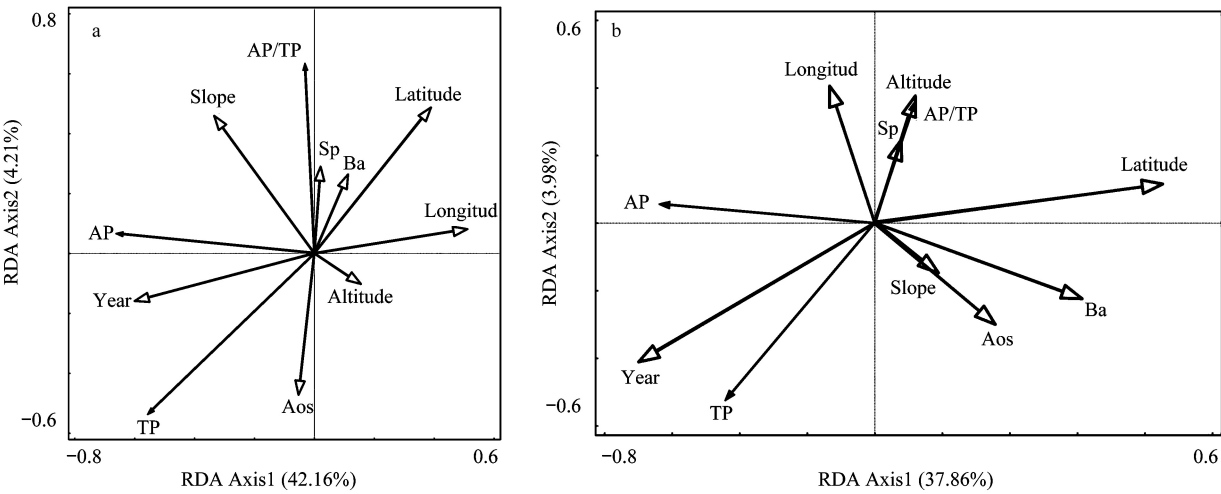


图 6 火烧样地 (a) 和配对对照样地 (b) 土壤磷变化与环境因子 RDA 排序分析

Fig.6 Redundancy Analysis of Soil Phosphorus in Fired and Control Soils

TP, 全磷 Total phosphorus; AP, 速效磷 Available phosphorus; AP/TP, 速效磷占比 available phosphorus/total phosphorus; year 火烧后恢复年限 fire rehabilitation year; longitude, 经度 longitude; latitude, 纬度 latitude; slope, 坡度 slope; sp, 坡位 slope position; aos, 坡向 aspect of slope; altitude, 海拔 altitude; ba, 过火面积 burned area

表 3 对照地区单因素分析

Table 3 Simple Term Effects in control area

影响因素 Name	解释度 Explains/%	F 值 pseudo-F	置信度 P
纬度 latitude	27.6	11.4	0.004
火烧后恢复年限 year	19.2	7.1	0.008
过火面积 ba	14.5	5.1	0.022
坡向 aos	5.2	1.6	0.22
坡度 slope	1.4	0.4	0.574
经度 longitude	1.3	0.4	0.596
海拔 altitude	1.1	0.3	0.634
坡位 sp	0.5	0.1	0.814

表 4 对照地区条件限制分析

Table 4 Conditional Term Effects in control area

影响因素 Name	解释度 Explains/%	F 值 pseudo-F	置信度 P
纬度 latitude	27.6	11.4	0.002
过火面积 ba	3.6	1.5	0.222
火烧后恢复年限 year	4.5	2.0	0.18
坡度 slope	1.0	0.4	0.604
坡向 aos	2.4	1.0	0.36
经度 longitude	1.0	0.4	0.58
海拔 altitude	1.2	0.5	0.57
坡位 sp	0.6	0.2	0.746

3 讨论

3.1 与已有结果的比较:支持火烧后土壤磷呈现先增后减趋势,但是具体大小有差异

前人的研究基本可以归纳为三种观点:(1)土壤磷在火后立即增加后随时间增加而减少,并且与不同火强度之间存在差异^[2,5,12-14]。(2)火烧并不一定导致土壤磷的增加,不同火强度之间差异并不显著^[3,15-17]。(3)火后土壤磷的含量是会显著增加的,并且这种增加在不同火烧强度之间差异不显著^[18]。

本次试验的结果与第三种即赵彬,孙龙,胡海清等学者的研究结果相似。其研究认为火后土壤全磷含量显著提高,但在不同强度间没有显著性差异,与未火烧区相比,二者的含量均有增大的趋势,这与本次研究结果是相同的。但值得注意的是赵彬等人研究还发现土壤速效磷含量在轻度火烧区最高,与未火烧区相比差异显著($p<0.05$),而本试验显示全无显著差异。这可能由于研究的方法的差异加上取样样地的设立及取样时间的长短也不完全相同,且本文是忽略了火烧强度进行了长时间尺度的研究分析,所以结果存在了一定差异。并且试验是用空间代替了时间,用年代序列特征研究长时间土壤磷的变化,结果有趋势变化但是差异不显著,也可能是因为样本数据不足导致的,假设有足够多的样本,可能得出不同的结论。

3.2 未来的展望:科学评价与林分管理

合理发挥林火的生态效益,对生物的稳定性和多样性、森林更新、群落演替过程都起着重要作用^[19]。从科学评价的角度来看,长时间的尺度是评价林火后森林土壤养分变化动态和森林结构必须要考虑的因素。从 RDA 分析结果来看,火烧后恢复年限是对火后土壤磷的变化影响最大因素,因此在评价火后土壤养分变化时可着重时间对土壤养分的影响。Jin W 等人在对北美地区燃烧和收获对松栎林地的有效恢复的影响时也提到短期、立体尺度研究对长期的景观尺度的结果提供的帮助很少。其评估对未来物种组成和森林结构的替代性恢复处理的结果时,模拟规定的燃烧和采伐对恢复短叶松栎林地组成和结构的影响也采取了相对较长的 100 年来作为研究时期^[20]。Kai Liu 等人利用森林景观模型 LANDIS PRO 7.0 调查中国东北地区温带森林无商业收获(NCH)政策对生态系统服务和生物多样性时也强调了长期影响这一点^[21]。关于森林地区地上部分的研究已经有很多了,但对于土壤的研究还待补充。森林土壤养分是如何变化的,什么因素会对其变化产生影响这些还需要探索。本文对土壤磷的研究发现,在火后地区时间是必须考虑的因素,火后的时间长短对土壤磷的影响很关键。除此之外,在未过火地区纬度是影响土壤磷含量的重要因素,若建立森林土壤养分变化模型,这两点是需要考虑进去的。

从林分管理的方面来讲,无论林火对森林生态环境产生的是正面还是负面影响,火烧后的植被恢复都是人们面临的一个重要问题^[22]。根据土壤磷的特性及火后的发展趋势,火后 15 年以内是决定火后植被结构与功能恢复的关键时期^[2]。因为大兴安岭土壤呈酸性,在酸性土壤中磷的含量极低,火烧后增加了土壤的 pH 值^[19],使磷含量有所增加,但随着时间推移,增加的磷不断淋失^[12],时间的长短取决于土壤中铝和铁氧化物等众多因素^[15],所以在磷含量水平高的时候要尽快利用起来,火后速效磷供给速率的增加将使种子的萌发率、幼苗的成活与定植几率增大^[23]。

3.3 不确定性分析

用空间代替时间是研究森林长期变化的重要手段^[22]。本研究使用这一方法,研究了火烧后 50 年恢复土壤磷的变化特征,前人在大兴安岭地区没有进行这么长时间尺度的研究^[2,3,5,12-17]。我们研究结果发现,无论是整体数据、分阶段分析还是基于火烧对照差值和比值的变化趋势分析,区分和鉴别土壤磷显著变化的能力较弱。针对火灾研究,很难在同一个地区发现大量的不同年代火烧迹地。而当大面积寻找样地时,将会出现这种数据误差较大的问题,这使得相关研究结果存在较大的不确定性。弥补这种不确定最好的方法是开展固定样地长期定位研究^[24]。

作为一种数据处理方法,通过 RDA 等数学排序方法,也能够甄别出更为细致的因素,比如本研究发现的火烧改变了影响土壤磷的主要控制因素。具体地理位置对于土壤磷变化影响最大,这为后期在大范围开展类似研究提供了新的思路。比如,根据 RDA 分析的结果将采集的数据根据影响的高低排序,按照具有显著性影响的因素进行细分,建立一个综合性的函数来分析不同影响因素下的全磷及速效磷变化。目前这些分析没有考虑到经纬度等自然因子在土壤磷的变化的重要作用,也使得在统计分析中,过多的已知误差并入组内误差,降低了火烧和对照处理间的组间差异,这使得可靠分析火烧影响变得困难。未来在开展定位研究的同时,也应该加强数据的统计方法学研究,提升空间代替时间研究方法的可靠性。

此外,一般来看火烧强度往往对于土壤物质循环(如碳氮)具有最重要的影响,我们研究发现其在解释有关磷变化中的作用远小于火烧恢复年限与地理位置。其原因可能与磷元素的特征有关,比如,磷是生态系统中比较稳定的元素,不像碳氮易随着火烧转化或挥发到空气中。但是磷可以通过火烧改变其形态,如从有机磷转换为无机磷,甚至储存在黑炭中。未来的研究重点将探讨磷形态的变化,比如无机磷、有机磷以及与土壤结合状态的变化,这可能更有助于深入分析发现规律。

4 结论

大兴安岭地区发生森林火烧影响了土壤中磷含量的变化,主要表现在:1)土壤全磷含量在火后呈现先增

加后降低的趋势。土壤速效磷含量在刚过火的林地上是减少的,后随时间增加也呈现先升高后下降的变化趋势。二者开始低于对照的时间多在恢复 20—30 年。2) 整体数据分析和分时间段分析均未发现火烧样地相对于配对样地存在显著的全磷及速效磷含量的差异,但是火烧使得土壤磷离散程度变小。3) 火烧改变了影响土壤磷含量变化的主导因子,即火烧后恢复年限是影响火烧恢复迹地上土壤磷含量的最主要因素,而对照样地中则是纬度。上述研究结果为大兴安岭森林火灾恢复土壤磷变化研究和评价提供了基础数据支撑。

参考文献 (References):

- [1] 孔健健, 杨健. 火干扰对北方针叶林土壤环境的影响. 土壤通报, 2014, 45(2): 291-296.
- [2] 孔健健, 张亨宇, 荆爽. 大兴安岭火后演替初期森林土壤磷的动态变化特征. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1515-1523.
- [3] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 王恩姮, 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.
- [4] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1-10.
- [5] 孔健健, 杨健. 火烧对中国东北部兴安落叶松林土壤性质和营养元素有效性的影响. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2837-2843.
- [6] Romanyà J, Khanna P K, Raison R J. Effects of slash burning on soil phosphorus fractions and sorption and desorption of phosphorus. *Forest Ecology and Management*, 1994, 65(2/3): 89-103.
- [7] 王丽红. 大兴安岭火烧迹地落叶松人工林生态效应研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [8] 张建宇, 王文杰, 杜红居, 仲召亮, 肖路, 周伟, 张波, 王洪元. 大兴安岭呼中地区 3 种林分的群落特征、物种多样性差异及其耦合关系. 生态学报, 2018, 38(13): 4684-4693.
- [9] 王鼎. 大兴安岭兴安落叶松林火烧迹地植被群落特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 15-17.
- [11] 张波, 王文杰, 周伟, 肖路, 吕海亮, 魏晨辉. 哈尔滨城市森林树木生长状况及各生长指标的相关性分析. 安徽农业科学, 2016, 44(26): 127-128, 154-154.
- [12] 田昆. 火烧迹地土壤磷含量变化的研究. 西南林学院学报, 1997, 17(1): 21-25.
- [13] 宋利臣, 何平平, 崔晓阳. 大兴安岭重度火烧林地土壤生境质量综合评价. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2353-2361.
- [14] 彭瑶, 曹凤艳, 曲来叶. 兴安落叶松林不同强度火烧迹地土壤微生物群落特性研究. 植物研究, 2017, 37(4): 549-555.
- [15] 秦可珍, 贺婷, 包翔, 陈翔, 周梅, 赵鹏武. 不同火烧强度对兴安落叶松林土壤化学性质的影响. 林业资源管理, 2014, (6): 110-114.
- [16] 韩钊龙, 胡慧蓉, 黄钰淇. 林火干扰对土壤理化性质的影响. 西南林业大学学报, 2014, 34(3): 46-50.
- [17] 谷会岩, 金屿淞, 张芸慧, 陈祥伟. 林火对大兴安岭偃松-兴安落叶松林土壤养分的影响. 北京林业大学学报, 2016, 38(7): 48-54.
- [18] 赵彬, 孙龙, 胡海清, 孙志虎. 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. 自然资源学报, 2011, 26(3): 450-459.
- [19] 郑焕能. 森林防火. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1992.
- [20] Jin W C, He H S, Shifley S R, Wang W J, Kabrick J M, Davidson B K. How can prescribed burning and harvesting restore shortleaf pine-oak woodland at the landscape scale in central United States? Modeling joint effects of harvest and fire regimes. *Forest Ecology and Management*, 2018, 410: 201-210.
- [21] Liu K, Liang Y, He H S, Wang W J, Huang C, Zong S W, Wang L, Xiao J T, Du H B. Long-term impacts of china's new commercial harvest exclusion policy on ecosystem services and biodiversity in the temperate forests of northeast China. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1071.
- [22] 王原, 夏鹏云, 李冲, 李兴思. 火烧迹地土壤养分与植被恢复关系研究. 现代园艺, 2016, (22): 9/10.
- [23] Vadigi S, Ward D. Fire and nutrient gradient effects on the sapling ecology of four *Acacia* species in the presence of grass competition. *Plant Ecology*, 2012, 213(11): 1793-1802.
- [24] Wang W J, Qiu L, Zu Y G, Su D X, An J, Wang H Y, Zheng G Y, Sun W, Chen X Q. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2657-2676.