#### DOI: 10.5846/stxb202205011205

杨光,李兆国,石炳东.兴安落叶松林火烧迹地土壤有效磷与土壤微生物生物量磷时空演变特征.生态学报,2023,43(12):5027-5037. Yang G, Li Z G, Shi B D.Spatial and temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and soil microbial biomass phosphorus in the burned area of *Larix gmelinii*. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12):5027-5037.

## 兴安落叶松林火烧迹地土壤有效磷与土壤微生物生物 量磷时空演变特征

### 杨 光\*,李兆国,石炳东

东北林业大学林学院,森林生态系统可持续经营教育部重点实验室,哈尔滨 150040

摘要:野火是大兴安岭活跃的生态干扰因子,显著影响火烧迹地土壤有效磷(AP, Available Phosphorus)和土壤微生物生物量磷(MBP, Microbial Biomass Phosphorus),本文旨在了解兴安落叶松林火烧迹地 AP、MBP 的时空演变特征,并在此基础上探究两者间的偶联机制。采用"以空间换时间"的研究方法,于大兴安岭塔河地区兴安落叶松林火烧迹地选取实验样地,于未过火兴安落叶松林选取对照样地,踏查每个样地的海拔、坡度、坡向、坡位信息,测定火烧迹地土壤 AP、MBP 含量,分析兴安落叶松林火烧迹地 AP 与 MBP 的时空演变特征。火干扰后,火烧迹地土壤 AP、MBP 含量均随恢复时间表现出先减少后增加的趋势,恢复初期火烧迹地 MBP 含量显著低于未过火样地,AP 含量显著高于未过火样地(P<0.05);不同海拔火烧迹地 AP、MBP 含量差异显著(P<0.05),不同海拔未过火样地 AP、MBP 含量均无显著差异(P>0.05)。火烧迹地土壤 MBP、AP 的随机森林回归模型的模型总解释度约为 84%,而未过火样地的模型总解释度约为 60%,两个模型均达到了极显著水平(P<0.001),在对照样地随机森林回归模型中,坡位达到了显著水平(P<0.05),坡向、坡度、海拔三个地形因子达到了极显著水平(P<0.01),在火烧迹地随机森林回归模型中,所有解释变量均达到了极显著水平(P<0.01)。火干扰对土壤微生物的影响是一个长期过程,相较于 AP, MBP 对火干扰的响应更为敏感。火干扰会显著加强地形因子对 AP、MBP 的影响力,并改变地形因子对 AP、MBP 影响力的相对重要性。

关键词:火烧迹地;地形因子;土壤微生物生物量磷;土壤有效磷;时空演变特征

# Spatial and temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and soil microbial biomass phosphorus in the burned area of *Larix gmelinii*

YANG Guang\*, LI Zhaoguo, SHI Bingdong

School of Forestry, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract**: Wildfire is a common natural disturbance agent in the Greater Khingan Range that significantly affects soil available phosphorus (AP) and soil microbial biomass phosphorus (MBP) in the burned area. This study aims to assess spatial and temporal changes of the AP and MBP in the burned area of *Larix gmelinii*. On this basis, the relationship between AP and MBP is further explored. Using the research method of "space-for-time substitution", we established a 28-year fire chronosequence with 80 sites over a small region of the Greater Khingan Range, selected three replicated plots in each burned area, and selected the nearby unburned area as the control plots. We measured the soil AP and MBP contents and topographic factors (altitude, slope position, slope aspect, slope gradient) for each plot. We analyzed the temporal and spatial evolution characteristics and the laws of AP and MBP in the burned area of *Larix gmelinii*. On this basis, the associated mechanisms of MBP and AP in the burned area of *Larix gmelinii* is further explored. After the fire disturbance,

基金项目:国家自然科学基金项目(31870644);黑龙江省自然科学基金(LH2021C011)

收稿日期:2022-05-01; 网络出版日期:2023-02-10

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lx\_yg@ 163.com

the contents of AP and MBP in the burned area initially decreased and then increased with the recovery time. In the initial stage of restoration, the MBP content of the burned area was significantly less than that of the unburned area, while the content of AP was significantly higher than that of the unburned area (P<0.05). The differences of AP and MBP contents in the burned area at different altitudes were significant (P<0.05), the differences of AP and MBP contents in the unburned area at different altitudes were not significant (P>0.05). The total explanatory power of the random forest regression model of soil MBP and AP in the burned area is about 84%, while that of the unburned area is about 60%, both models have reached an extremely significant level (P<0.05), the slope aspect, slope gradient, and altitude reached an extremely level (P<0.01). In the random forest regression model of the unburned area, the slope position reached a significant level (P<0.05), the slope aspect, slope gradient, and altitude reached an extremely level (P<0.01). The influence of fire disturbance on soil microorganisms is generally a long-term process and MBP is more sensitive than AP to fire disturbance. Fire disturbance will significantly strengthen the influence of terrain factors on AP and MBP.

Key Words: burned area; terrain factor; soil microbial biomass phosphorus; soil available phosphorus; spatiotemporal evolution characteristics

磷作为关键的营养元素<sup>[1]</sup>,广泛参与生态系统元素循环、能量流动过程,同时是许多森林生态系统中重要的养分限制因子<sup>[2-5]</sup>。土壤有效磷是指土壤磷素中易被生物利用的部分<sup>[6]</sup>,显著影响植物、土壤微生物的生命过程,作为土壤有效磷最为活跃的部分<sup>[7]</sup>,土壤微生物生物量磷调节着土壤磷的矿化和固持过程<sup>[8-9]</sup>,是土壤养分元素中的活性养分库<sup>[10-11]</sup>。

火干扰作为活跃的生态干扰因子,显著影响陆地景观结构、森林草原生态系统演替过程。近年来,气候变 化导致野火规模更大、发生的更加频繁,其带来的生态环境问题也愈发突出,联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)更在最新前沿报告中将野火列为三大环境威胁之一,因此火烧迹地生 态过程已成为全球变化及环境影响研究的关键问题之一<sup>[12-14]</sup>。野火影响着火烧迹地土壤生态系统,而相较 于其他土壤理化性质,土壤有效磷和土壤微生物生物量磷对火干扰的响应更加敏感<sup>[15]</sup>。火干扰背景下,地形 因子会通过改变火烧迹地水热条件<sup>[12]</sup>影响土壤系统的恢复过程,此过程中,野火和地形因子对土壤有效磷和 土壤微生物生物量磷的影响是相互偶联的。因此探究土壤有效磷和土壤微生物生物量磷在林火、地形因子共 同作用下的时空动态特征,有助于进一步认识火烧迹地土壤生态系统的恢复过程。

目前关于火干扰背景下地形因子对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的研究,多于不同火强度火烧迹地展开<sup>[16-17]</sup>,在连续时间尺度下多个火烧迹地展开的研究较少<sup>[18]</sup>。大兴安岭地区是我国唯二的北方林林区,更是我国林火高发区,发生重特大火灾的次数同样高于我国其他林区,因此研究大兴安岭兴安落叶松林火烧迹地土壤有效磷、土壤微生物的动态特征和偶联机制,有助于了解北方林生态系统磷元素的流动机制,探究中长期火干扰背景下土壤微生物在地形因子作用下的恢复机制,并为科学制定火烧迹地营林措施提供理论支撑。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域概况

大兴安岭地区气候干旱,生长季短,属于寒温带大陆季风性气候区,是我国唯一的寒温带针叶林区<sup>[19]</sup>。 大兴安岭植被属于东西伯利亚植物区系,主要乔木树种包括兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris var. mongolica Litv*)、蒙古栎(*Quercus mongolica Fisch. ex Ledeb*)、白桦(*Betula platyphylla Suk.*)等。研究样地位于塔河县(50°07′02″N、121°10′53″E),年平均气温-2.4℃,年均风速 2.9m/s,年平均降水量 463.2 mm。

#### 1.2 样地调查与样品采集

于 2018 年在塔河县林业局作业区选取 1990 年、1994 年、1996 年、2000 年、2003 年、2006 年、2008 年、2010 年、2012 年、2015 年、2018 年的火烧迹地样地和未过火样地,同时记录样地的海拔、坡度、坡向、坡位信息。用随机取样法采集土壤表层 0—10cm 的土壤样品,每个样地面积为 20 m×20 m,每块样地内随机设置至少 30 个采样点,采样点间最小间距为 2m,将每个样地采集到的土壤样品随机均匀分成 3 组,每组混合成一个混合样品,共 240 份土壤样品。样品置于冷冻冰柜(-40℃),运回实验室进行分析。样地信息详见表 1。

	Tabl	e 1 Basic information	of <i>Larix gmelinii</i> nat	ural forest		
样地代号 No.	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	坡度/(°) Slope gradient	坡向/(°) Slope aspect	
1990A—1990G	124°41.4454′E	52°23.0334′N	421—436	2.5—17.5	317—342	
1994A—1994G	124°28.6484'E	52°41.3156′N	643—665	2.5—5	10—342	
1996A—1996G	123°56.9236'E	52°40.4719'N	469—474	0	0	
2000A—2000G	123°27.9180'E	52°23.9668′N	775—809	5.1—17.3	76—112.5	
2003A—2003G	124°57.4584'E	52°30.4388'N	393—404	0—2	0—296	
2006A—2006G	124°30.9917'E	52°20.6538'N	498—518	2—4.5	37—307	
2008A—2008G	124°50.5210'E	52°19.5776'N	365—374	1—2	9.1—355	
2010A—2010E	123°27.6816'E	52°19.2269'N	829—872	5.42—17.2	59.5—98.5	
2012A—2012H	123°48.3691'E	52°42.0678′N	463—484	3.8—17	101—284.8	
2015A—2015G	123°50.2681'E	52°23.6936'N	481—655	4.2—11.2	115.2—243	
2018A—2018J	124°50.4904'E	52°29.1933′N	372—645	0—9.5	0—348	

	表1	样地信息		
le 1	Basic information	of Larix gmelinii	natural	for

大写字母表示不同样地,其中 2018 年为未过火对照样地

#### 1.3 样品分析

土壤样品经过冷冻干燥、过筛(10目)后,取7g土样用双酸法(0.05mol/L盐酸-0.0125mol/L硫酸)提取 土壤有效磷,用液氯熏蒸浸提—水浴法<sup>[20]</sup>提取土壤微生物生物量磷待测液,用全自动间断分析仪SmartChem 200测定土壤有效磷、土壤微生物生物量磷含量,MBP的转换系数取0.4<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 统计分析

本文根据火后恢复时长将实验样地划分为四组:对照样地(未过火)、恢复初期火烧迹地(火后恢复时长 小于等于 6a);恢复中期火烧迹地(火后恢复时长大于 6a 且小于等于 15a);恢复后期火烧迹地(火后恢复时 长大于 15a 且小于等于 30a)。根据实验样地海拔高度划分为两组:低海拔(低于 479.5m)、高海拔(高于 479.5m)。根据地理学会地貌调查与制图委员会提议的坡度划分方案将坡度划分为三组:平坡(0°—2°)、缓 坡(2°—5°)、斜坡(5°—15°)。坡向以磁北 30°为正北,分为北坡(345°—75°)、东坡(75°—165°)、南坡 (165°—255°)、西坡(255°—345°)四组;根据坡位将样地分为平地,下坡位,中坡位,上坡位四组。

使用 SPSS 26.0、R 4.1.1 软件进行数据分析,用 Origin Pro 2019B 作图,用独立样本 T 检验比较不同海拔 未过火样地和火烧迹地土壤 AP、MBP 的差异;用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著性差异法 (LSD)比较不同地形条件未过火样地、火烧迹地土壤 AP、MBP 的差异,显著性水平 α 为 0.05。本文通过构建 随机森林回归模型来探索每个地形因子的重要性,并基于最大似然估计方法建立了结构方程模型(Structural Equation Modeling,SEM),评估火烧迹地恢复时长、海拔、坡度、坡向、坡位与土壤 AP、MBP,土壤溶解性有机碳 (DOC, Dissolved Organic Carbon),土壤溶解性氮(DN, Dissolved Nitrogen)之间的直接效应和间接效应。

#### 2 结果与分析

2.1 火烧迹地土壤有效磷和土壤微生物生物量磷时间演变特征

对火烧迹地和未过火样地土壤有效磷和土壤微生物生物量磷含量进行单因素方差分析。如图1所示,火

烧迹地恢复过程中,土壤 AP 含量表现出先增加再降低再增加的趋势。相较于未过火样地,恢复初期火烧迹地 AP 的含量显著增加了 40%(P<0.05),恢复中期火烧迹地 AP 含量显著降低了 46%(P<0.05),恢复后期火烧迹地 AP 含量显著增加了 44%(P<0.05)。火烧迹地恢复过程中,MBP 含量表现出先降低再增加的变化趋势。相较于未过火样地,恢复初期火烧迹地 MBP 含量显著降低了 35%(P<0.05),恢复中期火烧迹地 MBP 含

量显著降低了 68% (P<0.05),恢复后期火烧迹地 MBP 含量显著降低了 27% (P<0.05)。火烧迹地恢复初期、 中期、后期, AP、MBP 含量均为先降低后增加的趋势,而在恢复初期火烧迹地, MBP 含量显著低于未过火样地 (P<0.05),而 AP 的含量则显著高于未过火样地(P<0.05)。

2.2 火烧迹地土壤有效磷和土壤微生物生物量磷空间 分布特征

2.2.1 不同海拔火烧迹地土壤有效磷和土壤微生物生物量磷

对同一恢复时期火烧迹地和未过火样地土壤有效 磷和土壤微生物生物量磷含量进行独立样本 T 检验分 析。如图 2 所示,火后恢复初期,低海拔火烧迹地 AP 含量显著高于高海拔火烧迹地(P<0.05);火后恢复中 期,高海拔火烧迹地 AP 含量显著高于低海拔火烧迹地 (P<0.05),高海拔火烧迹地 MBP 含量显著高于低海拔 火烧迹地(P<0.05);火后恢复后期,高海拔火烧迹地 MBP 含量显著低于低海拔火烧迹地(P<0.05)。不同海 拔未过火样地 AP、MBP 含量均无显著差异(P>0.05), 不同海拔恢复初期火烧迹地 AP 含量差异显著(P< 0.05),不同海拔恢复中期火烧迹地 AP 含量差异显著(P< 0.05),不同海拔恢复同期火烧迹地 MBP 含量差异 均显著(P<0.05),不同海拔恢复后期火烧迹地 MBP 含 量差异均显著(P<0.05),这表明海拔对火烧迹地 AP、 MBP 含量产生了显著影响。

2.2.2 不同坡度火烧迹地土壤有效磷和土壤微生物生物量磷

如图 3 可知,相较于平坡未过火样地,火后恢复初



相较于平坡未过火样地,火后恢复中期平坡火烧迹地 MBP 含量显著降低了 75%(P<0.05),其他时期无显著差异(P>0.05)。相较于缓坡未过火样地,火后恢复初期、中期、后期缓坡火烧迹地 MBP 含量分别显著降低了 42%、70%、35%(P<0.05)。斜坡火烧迹地与未过火样地 MBP 含量在火后恢复各时期无显著差异(P>0.05)。

2.2.3 不同坡向火烧迹地土壤有效磷和土壤微生物生物量磷

如图 4 所示,各个坡向未过火样地 AP 含量无显著差异(P>0.05);火后恢复初期火烧迹地,西坡、东坡 AP 含量均显著高于南坡(P<0.05);各个坡向火后恢复中期火烧迹地 AP 含量无显著差异(P>0.05);各个坡向火 后恢复后期火烧迹地 AP 含量差异显著,且南坡>北坡>西坡>东坡(P<0.05)。

北坡未过火样地 MBP 含量显著高于南坡(P<0.05);火后恢复初期,南坡火烧迹地 MBP 含量显著高于东



一句叶长山松流地上镇大敌张 上海坐开船开船

	~				_							
含量												
<b>図</b> Ⅰ	1,101	恢复	H) K /	、元迎	地工場	きわれ	义的中,	<u>, т</u> ,	表100	土100.	土彻	里咿

Fig.1 Soil Available Phosphorus and Soil Microbial Biomass Phosphorus content in burned area at different recovery time 不同字母表示不同恢复时期各指标含量差异性显著(P<0.05),计 算标 准 差 的 样 本 量 为 240 个; AP: 土 壤 有 效 磷 Available phosphorus; MBP: 土 壤 微 生 物 生 物 量 磷 Microbial biomass phosphorus



图 2 不同海拔火烧迹地土壤有效磷、土壤微生物生物量磷含量 Fig.2 Soil Available Phosphorus and Soil Microbial Biomass Phosphorus content in burned area at different altitudes 误差线为标准差、P<0.05表示不同海拔实验样地 AP、MBP 含量的差异具有统计学意义

坡和西坡(P<0.05);火后恢复中期,东坡火烧迹地 MBP 含量显著高于西坡(P<0.05);火后恢复后期,西坡火 烧迹地 MBP 含量显著高于各个坡向(P<0.05),且北坡火烧迹地 MBP 含量显著高于东坡(P<0.05)。

综上所述,火后恢复初期火烧迹地 AP、MBP 含量表现出不同的空间分布趋势,东坡、西坡 AP 含量显著高 于南坡,而东坡和西坡 MBP 含量则显著低于南坡;各个坡向火后恢复中期火烧迹地 AP 含量无显著差异,东 坡、西坡火烧迹地 MBP 含量差异显著,这表明 MBP 比 AP 更容易受到火干扰的影响。

2.2.4 不同坡位火烧迹地土壤有效磷和土壤微生物生物量磷

如图 5 所示,除恢复初期火烧迹地外,不同坡位火烧迹地、未过火样地土壤 AP 含量差异并不显著(P> 0.05);相较于未过火样地,恢复初期火烧迹地土壤 AP 含量明显增加,恢复中期火烧迹地土壤 AP 含量明显降 低,恢复后期火烧迹地土壤 AP 含量明显增加。除恢复后期火烧迹地外,不同坡位火烧迹地、未过火样地土壤 MBP 含量差异并不显著(P>0.05);相较于未过火样地,恢复初期、中期火烧迹地土壤 MBP 含量明显降低,恢 复后期火烧迹地土壤 MBP 含量明显增加。综合来看,火干扰背景下,坡位对未过火样地,火烧迹地土壤 AP 含量、MBP 含量的影响较小。

2.3 火干扰背景下地形因子对土壤有效磷和土壤微生物生物量磷的影响

为了进一步了解火烧迹地和对照样地的兴安落叶松林土壤 MBP、AP 含量变化的潜在主要驱动因素,本研究在不考虑解释变量相互作用的情况下,通过随机森林回归来探索每个地形因子的重要性。

图 6 分别展示了对照样地和火烧迹地所有解释变量的均方根误差。通过均方根误差,可以发现在火烧迹 地土壤 MBP、AP 含量随机森林回归模型中,重要性最高的地形因子是海拔(均方误差的增加百分比为 83.02%), 其次是坡位(均方误差的增加百分比为 68.23%),再次是坡向(均方误差的增加百分比为 64.76%),重要性最低 的是坡度(均方误差的增加百分比为 62.32%),火后恢复时间则是模型中仅次于海拔的影响因子(均方误差的增 加百分比为 71.20%)。在对照样地中,重要性最高的地形因子是坡向(均方误差的增加百分比为 47.82%),其次



图 3 不同坡度火烧迹地土壤有效磷、土壤微生物生物量磷含量

**Fig.3** Soil Available Phosphorus and Soil Microbial Biomass Phosphorus content in burned area at different slope gradients 小写字母表示各个时期不同坡度 AP 含量差异显著(*P*<0.05),大写字母表示各个时期不同坡度 MBP 含量差异显著(*P*<0.05)

是坡度(均方误差的增加百分比为40.88%),再次是海拔(均方误差的增加百分比为32.46%),重要性最低的是坡位(均方误差的增加百分比为22.44%)。对模型中的解释变量进行了显著性验证,结果表明在对照样地随机森林回归模型中,坡位达到了显著水平(P<0.05),坡向、坡度、海拔三个地形因子达到了极显著水平(P<0.01);在火烧迹地随机森林回归模型中,所有解释变量均达到了极显著水平(P<0.01)。

整体来看,火烧迹地和对照样地的土壤生境因子随机森林回归模型均达到了极显著水平(P<0.001)。对比两个拟合模型,火烧迹地土壤 MBP、AP 含量的随机森林回归模型的模型总解释度约为 84%,而未过火样地的模型总解释度仅约为 60%,这表明火干扰显著改变了各个地形因子对土壤 MBP、AP 含量的影响程度。

构建结构方程模型评估火烧迹地恢复时长、海拔、坡度、坡向、坡位与土壤 DOC、DN、AP、MBP 之间的直接 效应和间接效应,模型解释变量如表 2 所示。根据图 6 展示的 SEM 分析结果,非显著卡方(non-significant Chi-square, $\chi^2$ )检验表明 SEM 可接受虚无假设(P>0.05),SEM 拟合优度指数(goodness-of-fit index,GFI)和比 较拟合指数(comparative fit indexes,CFI)说明适配数据的检验指标能够接受(数值大于 0.9),SEM 标准化根



图 4 不同坡向火烧迹地土壤有效磷、土壤微生物生物量磷含量

**Fig.4** Soil Available Phosphorus and Soil Microbial Biomass Phosphorus content in the burned area of different slope directions 小写字母表示各个时期不同坡向 AP 含量差异显著(*P*<0.05),大写字母表示各个时期不同坡向 MBP 含量差异显著(*P*<0.05)

均方残差(standardized root mean square residual, SRMR)和近似均方根误差(root-mean-square error of approximation, RMSEA))说明假设模型与观测数据适配性较好(数值小于 0.05)。

Table 2 Soil Dissolved Organic Carbon,	Dissolved Nitrogen,	Soil Available Phosphor	rus and Soil Microbial I	Biomass Phosphorus
样地组别	溶解性有机碳	溶解性氮	有效磷	微生物生物量磷
Plot groups	DOC/(mg/kg)	DN/(mg/kg)	AP/(mg/kg)	MBP/(mg/kg)
恢复初期火烧迹地 Initial burned area	23.8±8.19	3.1±1.14	8.0±4.74	14.42±7.26
恢复中期火烧迹地 Mid-term burned area	24.4±9.05	4.2±1.37	2.6±2.14	6.99±6.18
恢复后期火烧迹地 Later burned area	31.1±16.58	4.2±1.69	$6.9 \pm 5.64$	$16.10 \pm 12.54$
对照样地 Control plots	27.4±9.89	$4.4 \pm 1.90$	4.8±3.21	21.98±11.71

表 2	土壤溶解性有	机碳、溶解性	生氮、有效磷、	、微生物生物量

表中数值为"平均值±标准差";DOC:土壤溶解性有机碳 Dissolved organic carbon;DN:土壤溶解性氮 Dissolved nitrogen;AP:土壤有效磷 Available phosphorus;MBP:土壤微生物量磷 Microbial biomass phosphorus

SEM 的分析结果表明,火后恢复时间、坡位对 MBP 有着直接显著正影响,其中火后恢复时间的影响力较大,海拔可通过影响 DOC 从而间接影响 MBP,坡位能通过影响 AP 从而间接影响 MBP。DOC 对 MBP 有着显著负影响,AP 显著正影响了 MBP,DN 对 MBP 无显著直接或间接影响。

#### 3 讨论

3.1 火干扰对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响

火干扰背景下,土壤有效磷和土壤微生物生物量磷的动态恢复过程是相互偶联的,这是因为土壤有效磷



图 5 不同坡位火烧迹地土壤有效磷、土壤微生物生物量磷含量

**Fig.5** Soil Available Phosphorus and Soil Microbial Biomass Phosphorus content in burned area at different slope positions 小写字母表示各个时期不同坡位 AP 含量差异显著(*P*<0.05),大写字母表示各个时期不同坡位 MBP 含量差异显著(*P*<0.05)





Fig.6 Ranking of importance of explanatory variables for changes in Soil Available Phosphorus and Soil Microbial Biomass Phosphorus in unburned and burned areas

变量均方根误差(MSE)的增加百分比用于估计这些非生物和生物预测因子的重要性,并且更高的 MSE(%)值意味着更重要的预测因子。统计显著性水平如下:\*=P<0.05 和 \*\*=P<0.01

含量的增加会在一定程度上促进土壤微生物的生长繁殖<sup>[22]</sup>,而结构方程模型的分析结果也表明土壤有效磷 会显著影响土壤微生物生物量磷。研究结果表明,相较于未过火样地,火烧迹地土壤微生物生物量磷含量表 现出先降低再增加的规律,这表明火干扰带来的高温会直接杀死土壤微生物,降低土壤微生物生物量,从而导



#### 图 7 结构方程模型分析图 Fig.7 SEM analysis graph

红线表示正相关,蓝线表示负相关;箭头宽度显示了标准化路径系数的强度;不显著的路径在图中显示为灰色;X2=4.769; df=7.000; P= 0.688; CFI=0.971; CFI=1.000; SRMR=0.029; RMSEA=0.000

致土壤微生物生物量磷含量降低<sup>[23]</sup>;其后,土壤微生物生物量磷含量会随着火烧迹地的生态恢复过程而缓慢恢复至火烧前水平。多数研究<sup>[28-29]</sup>表明火烧迹地土壤微生物的恢复是一个较为缓慢的过程,而我们的研究结果同样佐证了这一观点,恢复28a火烧迹地土壤微生物生物量磷含量仍低于未过火对照样地,原因可能是长时间尺度下,火干扰导致进入土壤生态系统的碳源减少<sup>[30]</sup>,从而减缓了土壤微生物的恢复速度。

相较于未过火样地,火烧迹地土壤有效磷含量表现出先增加后降低再增加的规律。野火发生后火烧迹地 土壤有效磷会迅速增加,恢复初期火烧迹地的土壤有效磷含量显著高于未过火样地。这是由于野火会烧毁植 物体并通过燃烧剩余物释放大量的磷元素,燃烧剩余物中的磷元素会在一系列成土过程的作用下释放至土壤 生态系统<sup>[24]</sup>,因此火干扰后短期内火烧迹地土壤全磷、无机磷、有效磷含量均迅速增加<sup>[25-26]</sup>。在中长期时间 尺度下,火烧迹地有效磷含量会先降低后增加。火烧迹地有效磷含量降低有两方面的原因。其一,火干扰的 高温会改变土壤磷形态,导致火烧迹地土壤磷更易在降水过程、淋溶过程的作用下迁移流失<sup>[26]</sup>,因此火烧迹 地土壤有效磷含量在火干扰初期迅速增加之后会随火烧迹地恢复过程逐步降低。其二,磷元素作为植物生长 和生产次级代谢物的关键营养素,对植物关键器官的形成(根系、花、种子等)的形成有重要的影响<sup>[27]</sup>,因此, 随着火烧迹地植物的恢复过程,火烧迹地土壤有效磷会被植物和土壤微生物大量吸收利用,这同样是火烧迹 地土壤有效磷含量在火干扰初期迅速增加之后随火烧迹地恢复过程逐步降低的原因之一。长时间尺度下,火 烧迹地土壤有效磷含量会恢复至火干扰发生前的水平,这是由于在火烧迹地植物恢复与演替的过程中,植物 的生理过程会释放磷元素(如植物根系分泌物释放磷元素、凋落物分解释放磷元素),因此土壤有效磷含量会 随着火烧迹地的恢复过程增加。

3.2 火干扰背景下地形因子对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响

土壤有效磷和土壤微生物生物量磷会受到火干扰和地形因子的显著影响,火干扰显著改变了地形因子对

土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响力,而地形因子对二者的影响可能是一个缓慢的控制过程<sup>[31]</sup>。随机森林回归模型的分析结果表明,火干扰显著加强了所有地形因子对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响力,这表明野火干扰了森林生态系统原有的生态过程<sup>[32]</sup>;相对来看,火干扰加强了海拔对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响力,这是可能是由于火干扰改变了不同海拔火烧迹地磷元素的生化循环速率<sup>[33]</sup>;火干扰改变了坡位、坡度对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响力,这可能是由于不同坡位、坡度条件下不同的水文过程导致的,这也表明火干扰显著改变了森林生态系统原有的生态水文过程<sup>[34-35]</sup>;火干扰削弱了坡向对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响力,但坡向对二者的影响不论在火烧迹地还是未过火样地都是显著的,这可能是因为不同坡向的光照条件、水热条件造成的不同土壤环境显著影响了火烧迹地土壤有效磷和土壤微生物生物量磷的恢复过程。根据结构方程模型的分析结果发现,火干扰和地形因子可直接影响土壤微生物生物量磷的研究应尽可能考虑更多的生物变量及非生物变量。

#### 4 结论

(1)火干扰对土壤微生物的影响是一个长期过程,火烧 28a 后火烧迹地土壤微生物生物量磷仍然未能恢 复至火烧前水平;火烧后火烧迹地土壤有效磷会立即增长,在一段时间内会促进土壤微生物的生长繁殖,相较 于土壤有效磷,土壤微生物生物量磷对火干扰的响应更为敏感。

(2)火干扰、地形因子对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响是一个复杂的过程,不仅存在直接影 响,还存在间接影响;火干扰会显著加强地形因子对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷的影响力,并改变地形 因子对土壤有效磷、土壤微生物生物量磷影响力的相对重要性。

#### 参考文献(References):

- [1] 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的影响.生态学报,2019,39(21): 7977-7986.
- [2] 陈建会, 邹晓明, 杨效东. 热带亚热带常绿阔叶林维持酸性土壤有效磷水平的磷转化过程. 生态学报, 2006, 26(7): 2294-2300.
- [3] 赵少华, 宇万太, 张璐, 沈善敏, 马强. 土壤有机磷研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2189-2194.
- [4] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? Biogeochemistry, 1991, 13(2): 87-115.
- [5] Lajtha K, Schlesinger W H. The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence. Ecology, 1988, 69(1): 24-39.
- [6] 曾昭阳,范跃新,林慰敏,黄鑫毅. 氮沉降对中亚热带米槠天然林土壤有效磷的影响.亚热带资源与环境学报, 2019, 14(3): 23-28.
- [7] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. 土壤, 1997, (2): 61-69.
- [8] Gyaneshwar P, Naresh Kumar G, Parekh L J, Poole P S. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. Plant and Soil, 2002, 245 (1): 83-93.
- [9] 王华,牛德奎,胡冬南,郭晓敏.不同肥料对油茶林土壤及叶片磷素状况的影响.经济林研究,2014,32(4):52-57.
- [10] 贾国梅,何立,程虎,王世形,向翰宇,张雪飞,席颖.三峡库区不同植被土壤微生物量碳氮磷生态化学计量特征.水土保持研究,2016, 23(4):23-27.
- [11] Mazzarino M J, Szott L, Jimenez M. Dynamics of soil total C and N, microbial biomass, and water-soluble C in tropical agroecosystems. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(2): 205-214.
- [12] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. Oecologia, 2005, 143(1): 1-10.
- [13] Caon L, Vallejo V R, Ritsema C J, Geissen V. Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. Earth-Science Reviews, 2014, 139: 47-58.
- [14] Costa M R, Calvão A R, Aranha J. Linking wildfire effects on soil and water chemistry of the Marão River watershed, Portugal, and biomass changes detected from Landsat imagery. Applied Geochemistry, 2014, 44: 93-102.
- [15] 张韫, 于悦, 崔晓阳. 试验林火干扰下兴安落叶松林土壤有效磷的时空变化. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 12-18.
- [16] 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.
- [17] Potthast K, Meyer S, Crecelius A C, Schubert U S, Tischer A, Michalzik B. Land-use and fire drive temporal patterns of soil solution chemistry

and nutrient fluxes. Science of the Total Environment, 2017, 605-606: 514-526.

- [18] Kong J J, Yang J, Liu B, Qi L. Wildfire alters spatial patterns of available soil nitrogen and understory environments in a valley boreal larch forest. Forests, 2019, 10(2): 95.
- [19] 白爱芹,傅伯杰,曲来叶,黄元元,王丽华.大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征.生态学报,2012,32(15):4762-4771.
- [20] 陈果,刘岳燕,姚槐应,黄昌勇.一种测定淹水土壤中微生物生物量碳的方法:液氯熏蒸浸提-水浴法.土壤学报,2006,43(6): 981-988.
- [21] Roberts W M, Matthews R A, Blackwell M S A, Peukert S, Collins A L, Stutter M I, Haygarth P M. Microbial biomass phosphorus contributions to phosphorus solubility in riparian vegetated buffer strip soils. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(8): 1237-1241.
- [22] 程伟. 土壤有效磷含量对土壤微生物量及代谢活性的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
- [23] 姜睿. 兴安落叶松林火后不同年限的土壤微生物量的月季动态变化[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [24] 李兆国, 瓮岳太, 石炳东, 邸雪颖, 杨光. 森林燃烧剩余物研究进展. 世界林业研究, 2021, 34(2): 33-38.
- [25] 柴捷,严超龙,陶建平.火干扰对重庆针阔混交林土壤理化性质的影响.西南师范大学学报:自然科学版, 2014, 39(11): 163-168.
- [26] 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): 22-26.
- [27] 王娟娟. 磷供应变化下胞外 ATP 的生理学功能以及 NO 对胞外 ATP 调节作用的研究[D]. 兰州:西北师范大学, 2021.
- [28] Mabuhay J A, Isagi Y, Nakagoshi N. Microbial biomass, abundance and community diversity determined by terminal restriction fragment length polymorphism analysis in soil at varying periods after occurrence of forest fire. Microbes and Environments, 2004, 19(2): 154-162.
- [29] 孔健健,杨健.林火对大兴安岭落叶松林土壤性质的短期与长期影响.生态学杂志,2014,33(6):1445-1450.
- [30] Maksimova E, Abakumov E. Wildfire effects on ash composition and biological properties of soils in forest steppe ecosystems of Russia. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5): 4395-4405.
- [31] Kong J J, Yang J, Chu H Y, Xiang X J. Effects of wildfire and topography on soil nitrogen availability in a boreal larch forest of northeastern China. International Journal of Wildland Fire, 2015, 24(3): 433-442.
- [32] McLauchlan K K, Higuera P E, Miesel J, Rogers B M, Schweitzer J, Shuman J K, Tepley A J, Varner J M, Veblen T T, Adalsteinsson S A, Balch J K, Baker P, Batllori E, Bigio E, Brando P, Cattau M, Chipman M L, Coen J, Crandall R, Daniels L, Enright N, Gross W S, Harvey B J, Hatten J A, Hermann S, Hewitt R E, Kobziar L N, Landesmann J B, Loranty M M, Maezumi S Y, Mearns L, Moritz M, Myers J A, Pausas J G, Pellegrini A F A, Platt W J, Roozeboom J, Safford H, Santos F, Scheller R M, Sherriff R L, Smith K G, Smith M D, Watts A C. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. Journal of Ecology, 2020, 108(5): 2047-2069.
- [33] 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.
- [34] Fernández C, Fontúrbel T, Vega J A. Wildfire burned soil organic horizon contribution to runoff and infiltration in a *Pinus pinaster* forest soil. Journal of Forest Research, 2019, 24(2): 86-92.
- [35] Kinoshita A M, Chin A, Simon G L, Briles C, Hogue T S, O'Dowd A P, Gerlak A K, Albornoz A U. Wildfire, water, and society: toward integrative research in the "Anthropocene". ANTHROPOCENE, 2016, 16: 16-27.