

DOI: 10.20103/j.stxb.202208022203

韩懂懂, 杨光, 邱雪颖, 李兆国. 兴安落叶松林火烧迹地土壤理化性质驱动因子. 生态学报, 2023, 43(21): 8727-8738.

Han D D, Yang G, Di X Y, Li Z G. Drivers of soil physicochemical properties in the burned Dahurian larch forest. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8727-8738.

兴安落叶松林火烧迹地土壤理化性质驱动因子

韩懂懂, 杨 光*, 邱雪颖, 李兆国

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:探索火烧迹地土壤理化性质的驱动因子是解释生态系统响应火干扰机制的重要组成部分。旨在分析兴安落叶松林火烧迹地土壤理化性质的决定因子, 深入认识火干扰在北方森林生态系统所扮演的角色, 为北方森林火烧迹地火后恢复、林业可持续发展提供科学支持和理论依据。以过火后 1 a 的兴安落叶松林火烧迹地为研究对象, 设置了不同火烈度和立地条件的火烧迹地及对照研究样地共计 35 块。在每个研究样地记录了树种、胸径、存活状态等乔木数据, 测量了坡向、坡位、坡度、海拔等地形数据, 利用植被变化情况量化了火烈度。分别采集了 0—5 cm 和 5—10 cm 的土壤样品并测定其 9 种理化指标, 对比了过火与未过火样地这些土壤理化指标的差异。然后, 分析了各土壤理化指标与火烈度量化结果的关联趋势, 比较了火烈度、地形和乔木因子对火烧迹地土壤理化性质的影响程度。与对照样地相比, 火干扰提升了土壤理化指标观测值的离散程度, 显著提高了 0—5 cm 土壤含水率 (MC) ($P < 0.05$) 和 5—10 cm 土壤 MC、总氮 (TN)、总有机碳 (TOC) 含量 ($P < 0.05$)。土壤理化性质与火烈度有明显关联趋势的并不多, 观察到 0—5 cm 土壤 MC 随火烈度指数的增加而减少, 0—5 cm 土壤无机氮与 5—10 cm 土层土壤 pH、速效钾 (AK)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 随火烈度指数的增大而增大。相关分析表明, 地形因子与火烧迹地土壤理化性质关联程度较高, 坡位、坡度、坡向与土壤吸湿含水率 (HMC)、MC、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 和 5—10 cm 土壤总氮 (TN)、总有机碳 (TOC) 均呈显著负相关 ($P < 0.05$), 而与土壤 AK、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和有效磷 (AP) 则以正相关为主, 其中坡度与 0—5 cm 土壤 AK、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 AP 均呈极显著的正相关 ($P < 0.01$)。方差分解分析结果表明, 对照样地土壤理化指标的变异主要由乔木因子和地形因子共同解释, 但在火烧迹地, 乔木因子总解释比例降低了, 而地形因子单独解释的比例增加了, 两者对于土壤理化指标变异的共同解释比例大幅降低了。火干扰能够提升地形对土壤理化性质的影响程度。地形是火烧迹地土壤理化性质差异的主导因子, 其影响较火烈度更为深刻, 因此, 当火烈度相同但地形不同时, 火干扰引发的生态系统响应可能不同。所以, 地形的主导作用可能是导致在不同区域研究火烈度与土壤理化性质的关系得出不同结果与结论的重要原因之一。

关键词: 火烈度; 兴安落叶松; 植被; 地形; 土壤理化性质

Drivers of soil physicochemical properties in the burned Dahurian larch forest

HAN Dongdong, YANG Guang*, DI Xueying, LI Zhaoguo

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

Abstract: Clarifying the driving factors of post-fire soil physicochemical properties is an important part of explaining ecosystem response to fire disturbance. This study aimed to analyze the determinants of post-fire soil physicochemical properties in Dahurian larch forests, to gain an in-depth understanding of the role of fire disturbance in boreal forest ecosystems, and to provide scientific support and theoretical basis for boreal forest post-fire recovery and sustainable development. The research object was one-year-post-fire Dahurian larch forest in the Greater Khingan Mountains. A total of 35 burned and unburned plots with different fire severity and site conditions were established. In each plot, species, diameter at breast height (DBH), survival status and other arbor data were recorded, and terrain data such as slope aspect,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31870644)

收稿日期: 2022-08-02; 网络出版日期: 2023-06-26

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

slope position, slope gradient, and altitude were measured, and the fire severity was quantified through vegetation changes. Nine physical and chemical indicators of the collected soil samples from two layers (0—5 and 5—10 cm) were measured, and the differences of these indicators were compared between the burned and unburned plots. Then, the correlation of quantitative results of fire severity and each index were analyzed, and the effects of fire severity, topography and arbor on the soil physicochemical properties in the burned area were compared. Compared with the unburned plots, fire disturbance enhanced the dispersion of soil physical and chemical indexes, significantly ($P < 0.05$) increased total nitrogen (TN), total organic carbon (TOC) content in 5—10 cm soil and both two layers' soil moisture content (MC). There were few soil physicochemical indexes obviously correlated with fire severity. The soil MC in 0—5 cm was observed to decrease with the increase of fire severity index. Available potassium (AK), pH and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) of 5—10 cm soil and inorganic nitrogen of 0—5 cm soil increased with the increase of fire severity index. Correlation analysis showed that topographic factors were highly correlated with soil physicochemical properties in the burned area. Slope position, slope gradient, and slope aspect were significantly negatively correlated with TN and TOC of 5—10 cm soil and hygroscopic water content (HMC), MC, nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ($P < 0.05$), while they were mainly positively correlated with AK, pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and available phosphorus (AP), among which the slope gradient were highly significant ($P < 0.01$) positively correlated with AK, pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and AP of 0—5 cm soil. The variance partitioning analysis (VPA) results showed that the variation of soil physical and chemical indicators in the unburned plots was mainly explained by the sharing of arbor and topographic factors. However, in the burned area, the explained proportion of arbor factors decreased, while the individually explained proportion of topographic factors increased, which resulted in the sharing proportion was greatly reduced. Fire disturbance could enhance the impact of topography on soil properties. Topography was a dominant factor for the differences in soil physicochemical properties in the burned areas, and its impact was more profound than fire severity, so the ecosystem response to fire disturbance depended not only on fire severity. Therefore, the dominant role of topography may be one of the important reasons for the different results and conclusions drawn from the studies on the relationship between fire severity and soil physicochemical properties in different regions.

Key Words: fire severity; Dahurian larch; vegetation; topography; soil physicochemical property

北方森林是分布在陆地上最大的生物群落之一,约占世界森林总面积的 27%,它为从地方到全球社会范围的生态系统提供着重要的物质循环与能量交换服务^[1-3]。火是陆地生态系统中的重要干扰因子之一,也是北方森林生态系统功能与服务结构的主要驱动因子之一^[4-5]。近年来,受全球气候变暖的影响,北方森林火干扰发生的频率、范围、强度和烈度显著增加,使火干扰对森林生态系统的影响方式更加复杂^[6-8]。所以,理解该生态系统对火干扰的响应机制,有助于提高我们的森林管理能力以应对全球气候变化。

生态学家通常用火烈度描述火干扰对生态系统的破坏或改变程度^[9]。火干扰发生时,会释放大热量^[10],能够深刻影响到土壤养分循环和平衡^[11-12]。不同的火烈度能够直接或间接地导致土壤理化性质发生不同程度的变化^[13],进而对土壤环境和植物生长发育造成不同程度的影响^[14]。因此,揭示土壤对火烈度的响应机制是解释和预测火烧迹地生态系统恢复进程的重要基础^[12,15]。同时,地形、植被、微气候等生态因子与火烈度空间格局密切相关^[16-18],影响地上生物量的减少程度和燃烧剩余物的空间分布^[19-20],能够持续地影响土壤理化性质对地形和植物的响应^[21-22]。所以,在研究土壤对火干扰的响应机制时考虑地形和植被因子是至关重要的。

我国 80% (面积) 以上的北方森林分布于大兴安岭地区^[15],而毕拉河国家级自然保护区的主要树种为兴安落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), 在我国北方森林中极具代表性^[2,23]。因此,本研究决定依托内蒙古毕拉河林业局 2017 年 5·2 火场,全面地探究兴安落叶松林火烧迹地土壤理化性质驱动因子。假设火烈度是北方森林火烧迹地土壤性质差异的驱动因子,那么火烈度与土壤性质的相关性如何? 火烧迹地的土壤性质还

受到哪些生态因子的即时驱动?更全面地探究可能潜在的驱动因子能够为北方森林火后生态恢复提供更为详实可靠的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

毕拉河林业局作业区(122°40′36″—123°55′00″E, 49°00′37″—49°54′49″N)总面积约 $5.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 属大兴安岭南坡, 森林覆盖率 68.38%, 森林总蓄积量约 $3.62 \times 10^7 \text{ m}^3$ [24]。火灾发生一年后, 该研究区域内没有任何生态修复措施及其他人为活动的干扰。该地区属于寒温带大陆性季风气候区, 一年四季温差较大, 年平均气温 -1.1°C 左右, 年平均降雨量达 479.4 mm, 集中在 7、8 月, 无霜期 130 d 左右, 年平均风速为 1.9 m/s。地形主要以丘陵为主, 整体的平均坡度 10—12°, 地势起伏较小, 最高海拔为 1235 m, 最低海拔为 268 m, 土壤为棕色针叶林土、暗棕壤土、黑钙土 [25]。该地区属于西伯利亚北方森林的东南部延伸区(图 1), 区域内乔木物种多样性较低 [2], 其中针叶树种主要是兴安落叶松, 阔叶树种主要有白桦 (*Betula platyphylla* Sukaczew)、山杨 (*Populus davidiana* Dode)、蒙古栎 (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.)。兴安落叶松可以在该区域内形成大面积的纯林, 在乔木树种分布面积和数量上具有绝对优势。

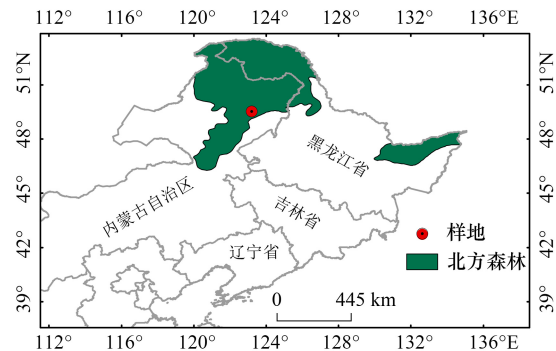


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

1.2 样地设置与调查方法

2018 年 5 月, 选取了内蒙古毕拉河林业局 2017 年 5·2 火场中具有代表性的兴安落叶松林火烧迹地并设置调查样地, 尽可能的使样地火烈度不同, 尽可能的使样地分布在多种地形。共设置 35 块离散的研究样地, 样地大小为 20 m×20 m。测量样地基本林分信息, 包括地理坐标、海拔、坡度、坡向、坡位; 调查所有单木(含死树)的树种和胸径。样地描述见表 1。

1.3 土壤样品采集与测定方法

在样地内随机选取距离树干 2 m 以外位置的 30 个土壤取样点, 间距大于 2 m, 移除矿质土壤表面的燃烧剩余物、凋落物、碎石等杂物。用标准环刀采集 0—5 cm 的土壤, 之后继续采集 5—10 cm 的土壤。每块样地内的十个同层土壤样品随机混合成一个待测样品, 共获得上、下两层各 105 个待测样品。所有待测样品都于采集当天进行过筛(10 目)处理, 冰上运输至实验室。

烘干法测定土壤含水率(MC)和吸湿含水率(HMC); 液土比为 2.5:1(1 mol/L KCl)测定 pH 值; 总氮(TN)和总有机碳(TOC)采用灼烧法(Vario EL III)测定; 有效磷(AP)采用双酸浸提—钼锑抗比色法; 速效钾(AK)用 1 mol/L 乙酸铵(NH_4Ac)浸提; 原子吸收光度计(novAA400P, Analytik Jena AG)测定; 铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^+\text{-N}$)用连续流动分析仪(BRAN and LUEBBE AA3)同时进行测定。

1.4 数据分析

坡位按如下方案定义: 0=平地, 1=下坡位, 2=中坡位, 3=上坡位, 4=山顶。将坡向以磁北顺时针方向(0—360°)的坡向表达式转换为了 0—1 的数值范围区间纳入分析 [26], 转化方法见公式(1)。其中 1 代表南偏西 30°, 0 代表北偏东 30°, 该数值越大, 说明坡向越向阳, 土壤和植物接收到的太阳辐射更多。

$$\text{坡向转化值} = \frac{1 - \cos\left(\left(\frac{\pi}{180}\right)(\text{北向顺时针数值} - 30)\right)}{2} \quad (1)$$

表 1 研究样地基本情况统计表
Table 1 General description of the sample plots in Dahurian larch forest

样地 Site	纬度 N Latitude	经度 E Longitude	海拔 Altitude/m	坡度 Slope gradient	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	活树平 均胸径 Average DBH of alive trees/cm	死树平 均胸径 Average DBH of dead trees/cm	活树密度 Density of alive trees/ (株/hm ²)	死树密度 Density of dead trees/ (株/hm ²)	落叶松生 物量占比 Biomass proportion of larch/%
1	49°32'18.000"	123°12'01.000"	524	0°	0°	平地	14.45	7.18	1175	225	84.29
2	49°32'17.000"	123°11'51.000"	524	0°	0°	平地	19.74	6.85	725	250	99.89
3	49°32'16.562"	123°11'49.014"	524	0°	0°	平地	20.73	7.62	850	225	96.20
4	49°32'14.505"	123°11'00.716"	553	0°	0°	平地	18.14	8.96	375	1175	87.79
5	49°32'15.953"	123°11'01.834"	542	0°	0°	平地	19.87	10.69	550	750	94.37
6	49°32'14.806"	123°11'03.754"	529	0°	0°	平地	18.79	8.20	550	1200	98.31
7	49°32'37.234"	123°06'49.108"	552	9.5°	281°	下坡	25.94	11.82	250	575	97.22
8	49°32'38.785"	123°06'48.013"	561	7°	285°	中坡	24.20	10.14	150	1400	80.80
9	49°32'39.995"	123°06'44.651"	588	8°	282°	上坡	23.57	10.04	350	1275	86.50
10	49°32'06.342"	123°06'46.048"	616	15°	307°	上坡	12.15	5.09	1650	25	82.20
11	49°32'06.670"	123°06'49.835"	575	15.5°	302°	中坡	13.83	6.07	1600	300	83.87
12	49°32'07.800"	123°06'54.500"	566	7°	295°	下坡	19.56	6.75	775	200	97.05
13	49°31'34.698"	123°10'04.307"	519	5°	144°	平地	19.56	9.45	175	1225	85.85
14	49°32'12.343"	123°06'46.213"	562	5°	258°	下坡	25.35	14.43	450	225	100.00
15	49°32'28.856"	123°06'28.850"	587	6°	32°	下坡	16.06	6.45	1025	500	80.80
16	49°31'38.021"	123°07'40.663"	528	7°	125°	中坡	25.39	13.03	225	925	99.15
17	49°31'38.590"	123°07'42.845"	538	8°	135°	中坡	24.82	9.51	450	1100	81.96
18	49°31'36.462"	123°07'37.376"	533	10°	135°	中坡	25.06	9.63	450	575	83.68
19	49°31'41.563"	123°06'39.114"	512	8°	143°	下坡	22.31	11.22	725	175	94.98
20	49°31'23.714"	123°05'33.562"	530	8°	358°	山顶	22.56	10.17	600	575	84.39
21	49°30'54.641"	123°04'19.304"	542	19°	287°	上坡	21.12	9.97	450	550	89.31
22	49°30'53.183"	123°04'21.407"	553	19°	91°	上坡	20.78	12.18	100	1425	94.00
23	49°30'52.225"	123°04'23.095"	552	8°	72°	中坡	20.93	10.78	400	1025	85.20
24	49°32'13.861"	123°10'57.700"	544	0°	0°	平地	—	14.48	0	1025	89.94
25	49°32'14.879"	123°10'57.118"	555	0°	0°	平地	—	11.73	0	1825	97.64
26	49°32'14.830"	123°10'54.712"	536	0°	0°	平地	—	13.71	0	1225	91.56
27	49°31'28.891"	123°08'09.420"	550	18°	290°	中坡	—	10.94	0	1750	80.26
28	49°31'27.232"	123°08'11.166"	585	12.5°	313°	上坡	—	10.70	0	1725	80.88
29	49°31'28.769"	123°08'09.161"	540	11°	31°	下坡	—	12.10	0	1375	82.42
CK1	49°32'15.240"	123°12'19.406"	518	0°	0°	平地	12.25	10.38	1675	25	92.70
CK2	49°32'04.412"	123°12'52.095"	467	0°	0°	平地	11.11	8.40	1925	50	93.73
CK3	49°32'08.096"	123°12'54.208"	501	0°	0°	平地	14.09	8.20	1425	100	85.37
CK4	49°35'09.881"	123°07'32.297"	520	5°	125°	下坡	19.96	9.46	725	50	96.90
CK5	49°34'42.532"	123°07'10.981"	582	12°	318°	上坡	12.23	6.99	1850	50	87.29
CK6	49°34'42.859"	123°07'12.493"	580	10°	346°	中坡	11.96	6.65	1875	150	98.50

CK:对照 Control check;DBH:胸径 Diameter at breast height

每个样地的活、死亡立木生物量采用基于胸径的异速生长方程计算(公式 2),先依据树种分别计算每棵立木根、茎、枝、叶四个部位分别的生物量,然后求和得到每棵立木的生物量^[27—28]。将每棵立木生物量求和得到样地内的活、死亡立木总生物量,并转换为单位面积上的活、死亡立木生物量载量(t/hm²)进行分析(公式 3)。样地火烈度用火烈度指数(fire severity index,FSI)量化(公式 4),由兴安落叶松生物量损失率和最粗的三棵被烧死落叶松胸径平均值相乘得出^[9,29—31]。

$$W_i = e^{\ln a + b \times \ln D} \quad (2)$$

式中, W_i 为生物量(kg), a 、 b 为模型参数, e 为自然底数, $\ln$ 为自然对数, D 为乔木胸径(cm), 令: $\ln a = c$, 模型参数见表 2。

$$W = \sum W_i \times 0.025 \quad (3)$$

式中, W 为乔木总生物量载量(t/hm^2), W_i 为第 i 棵乔木的生物量(kg)。

$$FSI = k \times \frac{W_d}{W_d + W_l} \quad (4)$$

式中, W_d 为死落叶松生物量载量, W_l 为活落叶松生物量载量, k 为最大的三棵被烧死落叶松胸径平均值。

利用 Origin pro 2021 绘制了小提琴图;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验相同土层过火与未过火条件下土壤理化性质的差异显著性;采用配对样本 T 检验检验不同土层土壤理化性质的差异显著性。使用 R(v4.0.2)包 basicTrendline v2.0.3 对 FSI 与土壤理化指标进行线性回归拟合^[32]。借助 R 包 pheatmap v1.0, 基于 Pearson 相关系数和层次聚类方法, 分析了火烧迹地不同土层解释变量与响应变量的关系。通过 R 包 vegan v2.5—7 进行基于二项式距离(Binomial Distance)的 RDA 方差分解分析(Variance Partitioning Analysis, VPA), 评估地形因子、乔木因子、FSI 对土壤理化性质变化方面的贡献度^[33]。

表 2 各组分生物量模型参数估计值

Table 2 The estimates of component biomass of the model parameters

部位 Components	参数 Parameter	兴安落叶松 Dahurian larch	白桦 White birch	山杨 Dahurian poplar	蒙古栎 Mongolian oak
根 Root	c_r	-4.2973	-2.9527	-3.969	-3.0409
	b_r	2.761	2.2634	2.402	2.2943
茎 Stem	c_s	-2.8701	-2.3549	-2.2319	-2.5856
	b_s	2.5798	2.4096	2.345	2.4856
枝 Branch	c_b	-4.9082	-5.7625	-6.7768	-6.997
	b_b	2.5139	3.0656	3.2079	3.522
叶 Foliage	c_f	-4.2379	-5.9711	-6.4023	-5.146
	b_f	1.8784	2.5871	2.5459	2.3185

c_r 、 b_r 、 c_s 、 b_s 、 c_b 、 b_b 、 c_f 、 b_f 为乔木根、茎、枝、叶四个部位的生物量模型参数估计值

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤理化性质统计特征

如表 3 所示, 不同土层土壤理化指标数值波动幅度较大, 0—5 cm 土层土壤理化指标变异系数大小为 $NO_3^- - N > AK > AP > NH_4^+ - N > TOC > TN > HMC > MC > pH$, 土壤 $NO_3^- - N$ 、AK、AP 和 $NH_4^+ - N$ 为强变异, 土壤 TOC、TN、HMC 和 MC 为中变异, 土壤 pH 为弱变异。5—10 cm 土层土壤理化指标变异系数大小为 $NO_3^- - N > AP > AK > TOC > TN > HMC > MC > NH_4^+ - N > pH$, 土壤 $NO_3^- - N$ 、AP 和 AK 为强变异, 土壤 TOC、TN、HMC、MC 和 $NH_4^+ - N$ 为中变异, 土壤 pH 为弱变异。

2.2 火烧迹地土壤理化性质差异

如图 2 所示, 与对照样地相比, 火干扰后土壤理化指标观测值离散程度更大, 火干扰显著提高了 0—5 cm 土层土壤 MC ($P < 0.05$), 显著提高了 5—10 cm 土层土壤 MC、TN 和 TOC 含量 ($P < 0.05$)。对同一采样点不同土层进行配对样本 T 检验, 结果表明, 火烧迹地和对照样地 0—5 cm 和 5—10 cm 土层之间土壤理化指标大多表现出极显著差异(对照样地 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 除外) ($P < 0.01$)。对照样地 0—5 cm 和 5—10 cm 土层之间土壤 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 无显著差异 ($P > 0.05$), 而火干扰后 0—5 cm 和 5—10 cm 土层之间土壤 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 表现出极显著差异 ($P < 0.01$), 这很可能是因为森林火灾改变了兴安落叶松林土壤 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 的含量和垂直分别情况。整体来看, 在不考虑立地条件等其它因子的条件下, 未过火与过火 1a 后的兴安落叶松林之

表 3 土壤理化指标数据描述性统计

Table 3 Preliminary statistics on soil physicochemical indexes

指标 Index 土层 Soil Layer	最大值 Maximum		最小值 Minimum		均值 Average		标准差 Std Dev.		变异系数 C.V/%	
	0—5 cm	5—10 cm	0—5 cm	5—10 cm	0—5 cm	5—10 cm	0—5 cm	5—10 cm	0—5 cm	5—10 cm
MC	0.46	0.42	0.13	0.12	0.28	0.25	0.07	0.06	24.67	25.67
HMC	0.10	0.08	0.03	0.02	0.05	0.05	0.01	0.01	26.76	30.79
NO ₃ ⁻ -N	18.48	14.77	0.76	1.01	3.29	2.81	3.40	2.29	103.24	81.43
NH ₄ ⁺ -N	39.42	10.70	3.10	3.06	9.73	5.98	5.02	1.53	51.63	25.64
pH	5.79	5.72	3.42	3.60	4.66	4.49	0.44	0.43	9.50	9.52
TN	8.52	5.74	1.82	0.94	3.77	2.64	1.27	1.00	33.65	37.69
TOC	123.64	79.07	24.46	13.46	54.98	34.62	19.97	13.24	36.32	38.24
AK	2245.05	1752.32	132.52	103.59	391.33	291.57	288.28	186.82	73.67	64.07
AP	80.00	92.39	3.91	3.08	26.77	25.24	15.48	17.49	57.83	69.30

MC:含水率 Moisture content; HMC:吸湿含水率 Hygroscopic moisture content; NO₃⁻-N:硝态氮 Nitrate nitrogen; NH₄⁺-N:铵态氮 Amm-onium nitrogen; pH:氢离子浓度指数 Hydrogen ion concentration; TN:全氮 Total nitrogen; TOC:总有机碳 Total organic carbon; AK:速效钾 Ava-ilable potassium; AP:有效磷 Available phosphorus

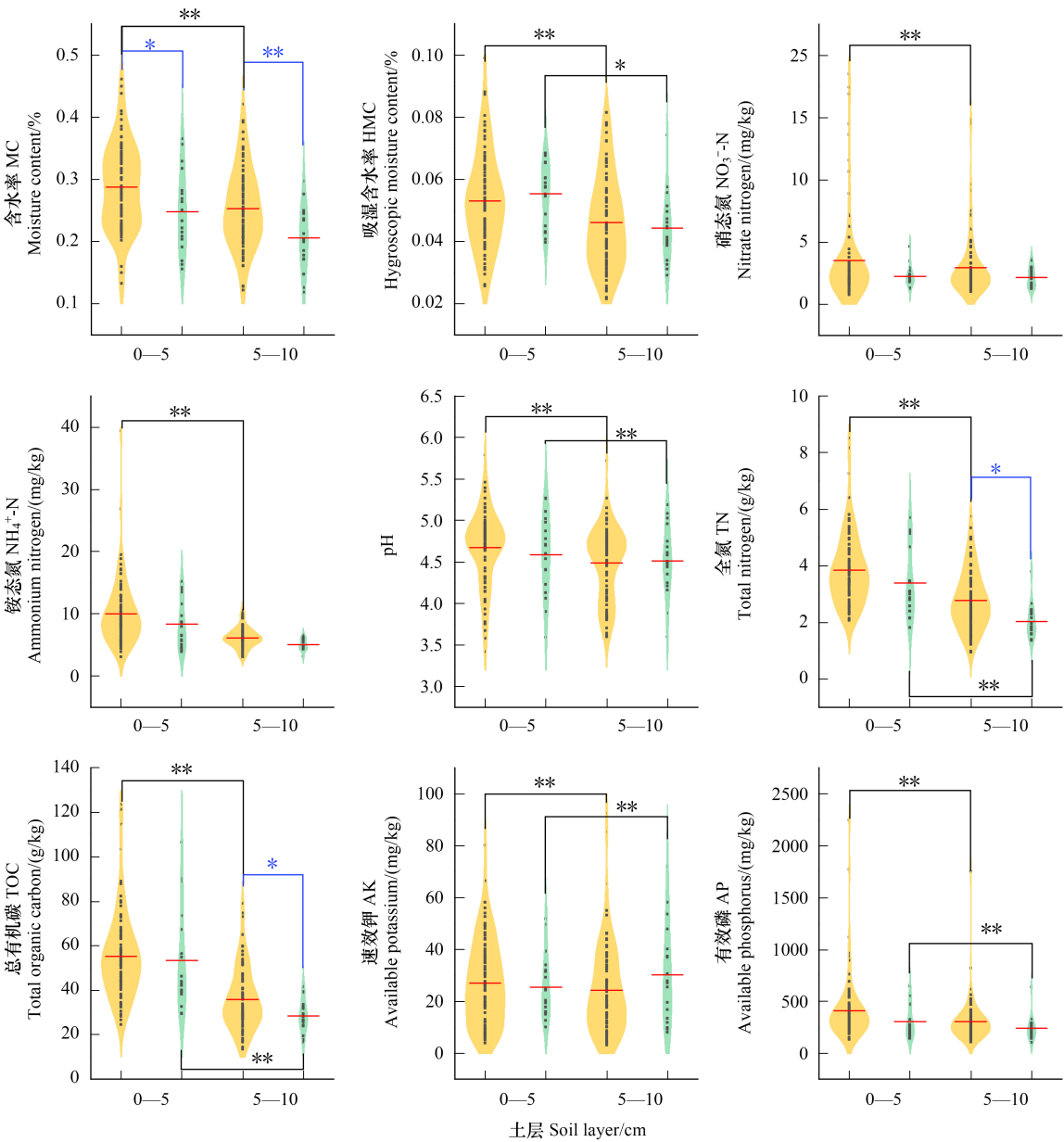


图 2 火烧迹地与对照样地土壤理化性质对比

Fig.2 The comparison of soil physicochemical properties between burned and unburned

黄色和绿色小提琴图分别表示火烧迹地和对照样地,黑点表示观测值,红线表示均值; * 表示差异显著性水平(*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$)

间只有个别土壤理化指标存在显著差异(例如 MC、TN、TOC),这说明仅用火干扰发生与否为依据,难以确定样地间大多数土壤理化化学性质是否存在差异。

2.3 不同火烈度对土壤理化性质的影响

如图 3 所示,0—5 cm 土层中,土壤 MC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 FSI 呈显著的线性相关($P<0.05$),其中土壤 MC 呈现为随 FSI 增高而减小的趋势,而土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量表现为随 FSI 增加而增加的趋势。在 5—10 cm 土层中,土壤 pH、AK 与火烈度呈显著的线性相关($P<0.05$),且均表现为随火烈度增高而增加的趋势。上述结果表明,对于火干扰 1 a 后兴安落叶松林土壤,火烈度无法准确预测其大部分理化性质。

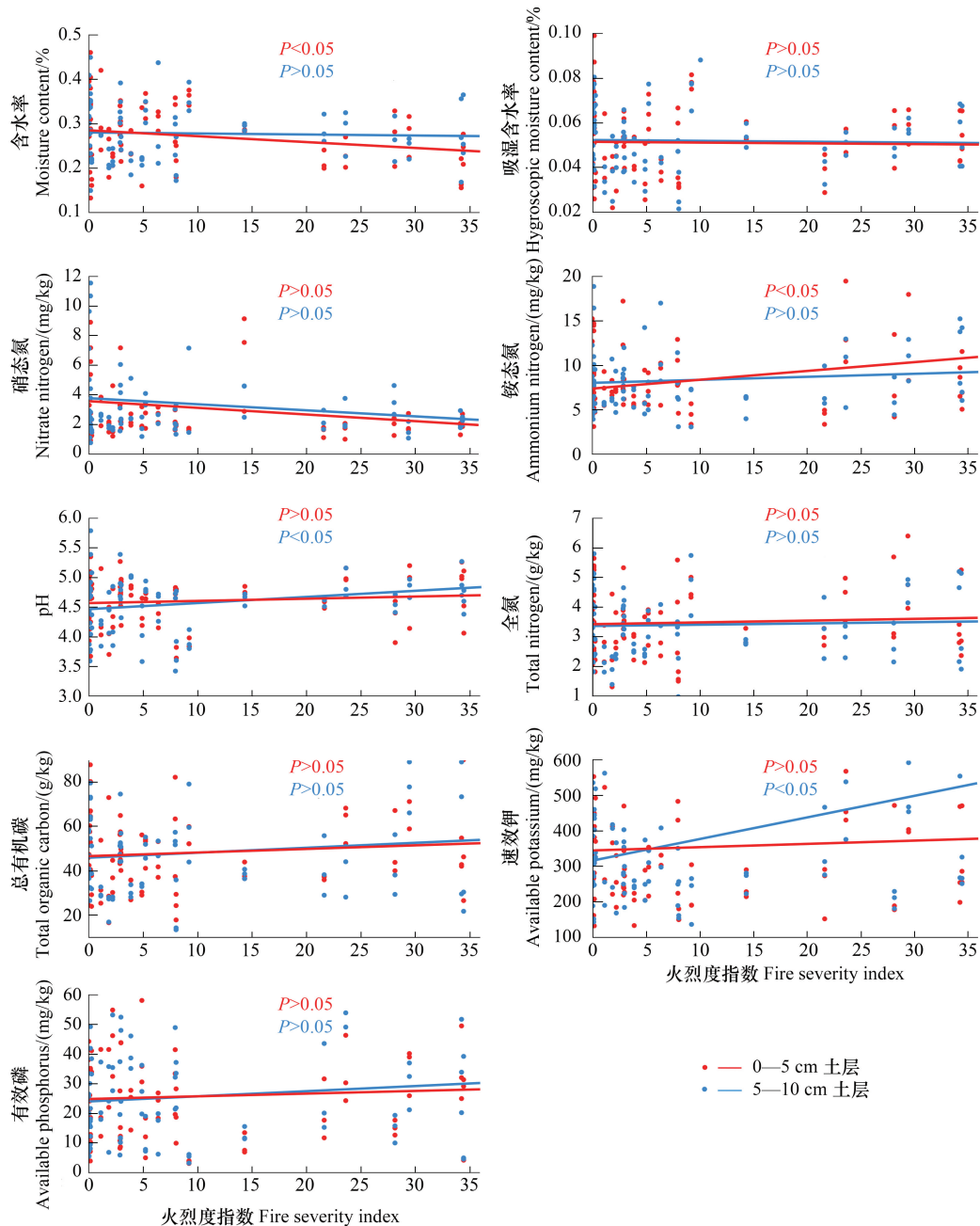


图 3 火烈度指数和土壤理化指标线性回归分析

Fig.3 Linear regressions of fire severity index and soil physicochemical indexes

2.4 火烧迹地土壤理化性质与解释变量相关性

多个解释变量与土壤理化指标均呈显著的相关性,且对不同土层土壤理化指标影响的模式较为相似

(图4)。解释变量和土壤理化指标均被大致分为两组,解释变量分为坡位、坡向、坡度(A组)和海拔、FSI、乔木密度、生物量载量、平均胸径(B组)两组;土壤理化指标分为MC、HMC、 NO_3^- -N、TOC、TN(a组)和AK、pH、 NH_4^+ -N、AP(b组)两组。A组呈显著相关性的频次较多于B组,与a组均呈负相关,在5—10 cm土层中均呈极显著的负相关($P<0.01$)。A组与b组以正相关为主,与AP均呈极显著的正相关($P<0.01$),在0—5 cm土层中坡向与b组均呈极显著的正相关($P<0.01$)。B组只与个别土壤理化指标呈显著相关,其中,海拔与b组中0—5 cm和5—10 cm土层中的AP均呈极显著的正相关($P<0.01$);在0—5 cm中,pH与海拔、FSI、乔木密度呈显著的正相关($P<0.05$),与生物量载量、平均胸径呈显著的负相关($P<0.05$);在5—10 cm中, NH_4^+ -N与海拔、FSI、乔木密度呈显著正相关($P<0.05$),与平均胸径呈显著的负相关。综合看来,在解释变量中,坡位、坡度、坡向与土壤理化性质关系非常密切,与其它解释变量和土壤理化性质呈现出的关系差异较大;此外,FSI仅与0—5 cm土层中的pH和 NO_3^- -N、5—10 cm土层中的 NH_4^+ -N呈显著相关性。

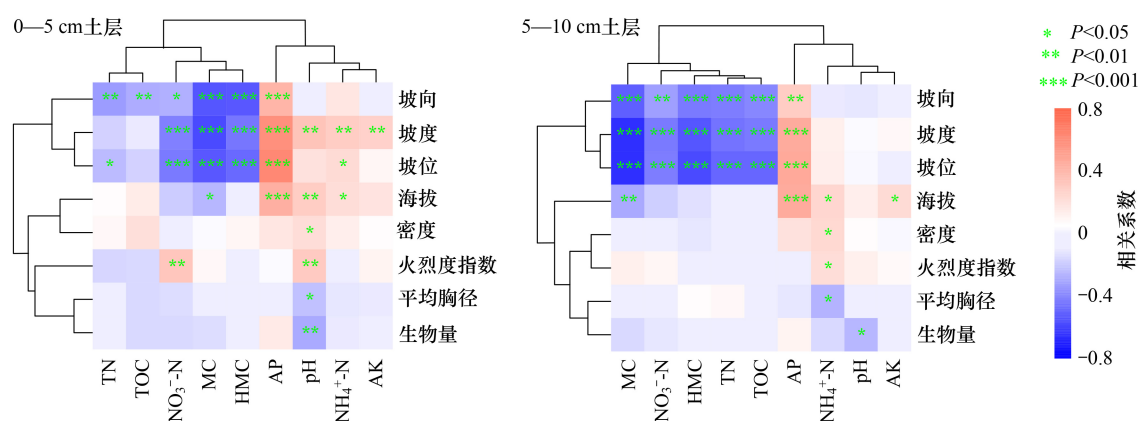


图4 火烧迹地解释变量与土壤理化指标的相关性

Fig.4 The correlations between explanatory variables and soil physicochemical indexes

热图顶部和左侧的树状图显示了集群之间的相似性。每个图的颜色表示所有成对比较的相关程度,红色表示高度正相关,白色表示不相关,蓝色表示高度负相关;每个图中的*是显著性水平(*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$)

2.5 火烧迹地土壤理化性质与解释变量 VPA 分析

在0—5 cm土层,所有解释变量共同解释的火烧迹地和对照样地土壤理化指标变化的百分比分别达到了41.6%和66.8%;在5—10 cm土层,解释变量百分比分别达到了43.9%和70.7%(图5)。可见,兴安落叶松林在火干扰1 a后,本研究所考虑的变量对土壤理化指标变化的解释能力减弱了。在0—5 cm土层,FSI仅独立解释0.4%的土壤理化指标变化,和乔木因子共同解释2.3%的变化;在5—10 cm土层,FSI不能独立解释土壤理化指标变化,仅能和乔木因子共同解释1.0%的变化。可见,火干扰对于0—5 cm土壤理化性质的影响更为明显,但其影响程度均远低于地形因子。在0—5 cm土层,对照样地地形因子仅能独立解释2.1%土壤理化指标的变化,乔木因子仅能独立解释6.2%的变化,而两者能够共同解释58.5%的变化;火烧迹地地形因子能够独立解释38.6%的变化,而火前乔木因子仅能和地形因子共同解释4.4%的变化。在5—10 cm土层,对照样地地形因子仅能独立解释4.4%的变化,乔木因子仅能独立解释8.8%的变化,而共同解释57.5%的变化;火烧迹地地形因子能够独立解释42.5%的变化,而火前乔木因子仅能和地形因子共同解释3.1%的变化。图5表明火干扰导致火前乔木因子不能独立解释土壤理化指标变化,其解释能力被减弱的程度远大于地形因子,导致地形因子的相对重要性得以提升。

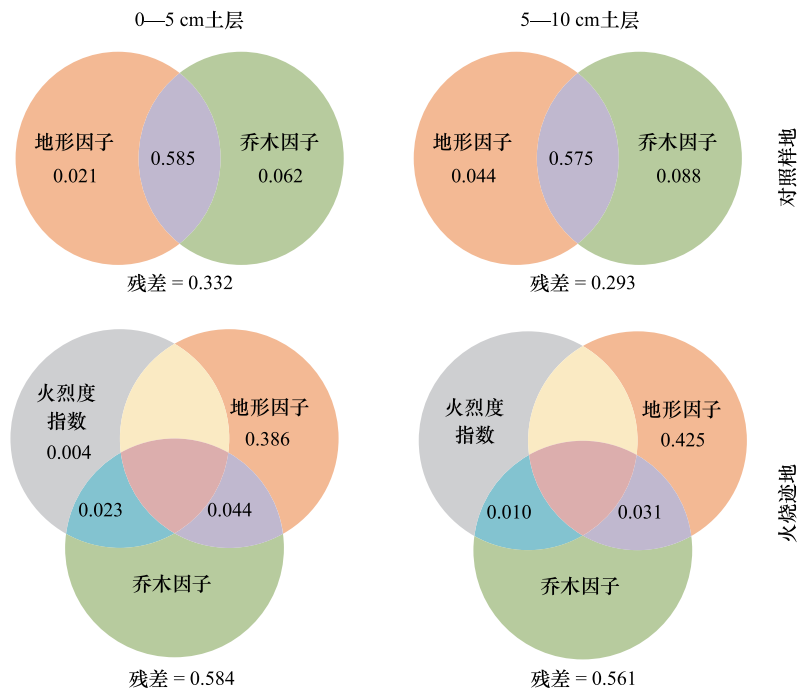


图5 对照样地与火烧迹地方差分解分析结果的维恩图

Fig.5 Venn diagram of variance partitioning analysis results of burned and unburned areas

各阴影部分分别表示各因子对土壤理化指标变化的单独贡献,圆圈重叠部分表示共同效应,方差分数 ≤ 0 无标注;解释的方差分数基于校正后的 R^2 值

3 讨论

3.1 土壤理化性质对火烈度的响应

火干扰时土壤温度的变化^[34-36]、火干扰后植被的变化和燃烧剩余物对土壤的覆盖,均能够导致土壤理化性质发生变化^[37],而火烈度与过火时土壤温度、植被、燃烧剩余物属性均有密切的联系^[22,36],因此,火烈度能够通过多种途径影响土壤理化性质。与对照样地相比,火干扰显著提高了土壤 MC(图 2),这与一些报道研究结果不一致^[38],可能是因为火干扰能够移除大量的地被物,削弱地被物对降水的截流作用,使更多的水分直接渗入了土壤中^[37]。此外,不同火烈度对土壤 MC 的影响可能不同。为了进一步了解火干扰对北方森林土壤 MC 变化的影响,本研究将 FSI 与土壤 MC 指标进行线性回归拟合,发现在 0—5 cm 土层,土壤 MC 有随火烈度增高而减小的趋势(图 3),这与 Kong 和 MacDonald 的结果相同^[12,39],可能是因为地被物能够降低土壤水分的蒸散作用,而 FSI 的增加意味着更多的地被物被消耗,同时会产生更多更能吸收热量的黑色灰烬堆积在土壤表面,以至于土壤水分的蒸散被进一步加剧^[35,39-40];而且,灰烬释放的物质能够破坏有机矿物团聚体,堵塞土壤孔隙,降低降水的入渗速率,使得土壤 MC 含量更低^[38,41-43]。

火干扰能够导致土壤水热条件发生剧变,而火干扰和水热条件均可以使土壤性质产生一定的变化^[34,40]。本研究观察到,土壤 pH 随 FSI 增高而显著升高(图 3、4),这与之前的研究结果一致^[12,41,44]。Lombao 等人认为这是由于火烈度升高导致更多的土壤有机物被矿化,土壤中阳离子的利用率提高,且随着火烈度增加使土壤有机物氧化时消耗的有机酸增加^[45],导致土壤 pH 值与火烈度呈显著的正相关。与对照样地相比,火干扰显著提高了 5—10 cm 土壤 TN 和 TOC 含量(图 2)。土壤 TN 的增加可能是因为火干扰改变了土壤生境因子,使土壤固氮的能力得以提升^[43,46],而土壤 TOC 的增加可归因于燃烧不完全的碳化生物质颗粒的输入^[19,47]。在 0—5 cm 土层,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 FSI 呈显著的正相关,在 5—10 cm 土层,土壤 AK、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 FSI 呈显

著正相关(图 3、4)。一方面,火烈度越高,森林可燃物燃烧越充分,能够释放更多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{AK}^{[48]}$,而土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的升高又能增强硝化作用,导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在火干扰发生一段时间后逐步提高^[46,48]。硝化作用是耗氧过程,这可能是 FSI 与上层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈显著正相关,而与下层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 无显著相关性的重要原因(图 3、4)。另一方面,火烈度越高,森林生态系统就会有更大比例的生物个体死亡^[22],这可能会减少土壤微生物和植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 AK 的吸收,使火烈度与土壤 AK 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的关联更加密切。

3.2 火烧迹地土壤理化性质对地形因子的响应

地形因子控制着土壤和植物对太阳辐射、热量和降水的接收,不断影响着土壤水热条件和各种生态进程,是重要的生态因子之一^[49]。本研究纳入分析的坡位、坡度、坡向和海拔均是典型的地形因子,能够影响火行为、森林微气候、区域水热条件,进而影响火烈度空间格局和土壤理化性质^[12,18,22]。对于这些地形因子,本研究量化后的值越大,表明地被物越干燥、土壤养分越易流失、温度越低,在火灾发生时可燃物燃烧的更充分,更易造成水土流失^[50]。这或许能够在一定程度上解释为什么坡位、坡度和坡向与土壤 HMC 、 MC 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 TOC 、 TN 大多呈显著负相关(图 4)。地形变化引起的土壤水分差异可能是引发北方森林火烧迹地土壤理化性质差异的关键^[12,15]。坡位、坡度和坡向与土壤 AK 、 pH 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 AP 以正相关为主,其中,坡度与上层土壤 AK 、 pH 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 AP (b 组)呈极显著的正相关(图 4),可能是因为这三个地形因子关乎到燃烧效率^[18],影响 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 AK 、 AP 和阳离子的释放^[48]。在本研究中,与坡度、坡位和坡向相比较,海拔对火烧迹地土壤理化性质的影响较小(图 4),造成这一现象可能是因为本研究选定的样地海拔差异不大,使得海拔体现出来的影响有限。

3.3 火烧迹地土壤理化性质与乔木因子的关系

植被是火干扰发生的物质基础,能够显著影响火行为和火强度^[51],进而影响植被群落特征和燃烧剩余物分布^[25]。燃烧剩余物中养分元素释放、淋溶通常会引起土壤养分含量和生态学过程发生变化^[52-53],这些可能是乔木因子影响火烧迹地土壤性质的重要途径。在此过程中,表层土壤能够直接承接到燃烧产物,这或许是其对火干扰更为敏感的原因之一。植被变化特征和燃烧剩余物颜色是量化火烈度的重要方法^[54],乔木因子也可以很好地表征立地质量,将乔木因子纳入分析可以更好地探明火烧迹地土壤理化性质的驱动因子。但是,本研究发现乔木因子与火烧迹地土壤理化性质的关联偏弱(图 4、5),所设立的理论假设并不成立。进一步地研究结果表明,火干扰大幅降低了兴安落叶松林乔木因子对土壤理化指标变异的解释能力(图 5),这可能是因为乔木因子对于火后恢复时间为 1 a 的火烧迹地土壤水热条件和生态学过程的影响有限。Weng 等人的研究表明虽然火干扰会降低乔木因子对北方森林土壤性质的重要性,但随着火后恢复时间的推移,乔木因子的驱动能力会越来越大^[15]。

3.4 火烧迹地土壤理化性质决定因子

植被和地形被普遍认为是土壤理化性质的驱动者,但它们对土壤生态学过程的影响机制可能会被火干扰所改变^[55]。研究发现,火烈度对兴安落叶松林土壤理化性质的影响较小,但火干扰能够降低乔木重要性,增加地形因子单独解释的比例,降低两者对土壤理化指标变异的共同解释比例(图 5)。火干扰后,地形成为控制土壤理化性质主要因子,驱动作用远大于火烈度。这一结果也与多位学者的研究相印证。Kong 等人研究了火烈度和地形对大兴安岭火烧迹地土壤理化性质的影响,发现地形的影响力高于火烈度,是重要驱动因子^[12]。Weng 等人研究了地形和乔木变量对兴安落叶松林火烧迹地土壤理化性质的影响,发现火干扰能够增强地形的重要性,远高于乔木因子的影响^[15]。

4 结论

本文探索了火干扰发生 1 a 后北方森林火烧迹地土壤理化性质与地形、植被、火干扰的潜在关系。地形对土壤理化性质演变的驱动能力因火干扰得到了较大提升,而植被的驱动能力大幅降低。地形是火烧迹地土壤理化性质演变的重要驱动因子,其影响较火烈度更为深刻。且地形能够持续地驱动土壤演变,当火烈度相

同而地形不同时,火干扰引发的生态系统响应可能不同。火烈度对上层土壤的影响较下层更为明显,其影响结果可能会被其他更强驱动因子遮盖或叠加,这或许可以在一定程度上解释为什么在不同区域研究火烈度与土壤的关系会得出不同结果与结论。

参考文献 (References):

- [1] Nesha M K, Herold M, De Sy V, Duchelle A E, Martius C, Branthomme A, Garzuglia M, Jonsson O, Pekkarinen A. An assessment of data sources, data quality and changes in national forest monitoring capacities in the Global Forest Resources Assessment 2005—2020. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(5): 054029.
- [2] Gauthier S, Bernier P, Kuuluvainen T, Shvidenko A, Schepaschenko D. Boreal forest health and global change. *Science*, 2015, 349: 819-822.
- [3] F A O. Global Forest Resources Assessment 2020. FAO (Food and Agriculture Organization), 2020.
- [4] Mack M C, Walker X J, Johnstone J F, Alexander H D, Melvin A M, Jean M, Miller S N. Carbon loss from boreal forest wildfires offset by increased dominance of deciduous trees. *Science*, 2021, 372(6539): 280-283.
- [5] Thom D, Seidl R. Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2016, 91(3): 760-781.
- [6] Balshi M S, David McGuire A, Duffy P, Flannigan M, Walsh J, Melillo J. Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) approach. *Global Change Biology*, 2009, 15(3): 578-600.
- [7] Oris F, Asselin H, Ali A A, Finsinger W, Bergeron Y. Effect of increased fire activity on global warming in the boreal forest. *Environmental Reviews*, 2014, 22(3): 206-219.
- [8] McDowell N G, Allen C D, Anderson-Teixeira K, Aukema B H, Bond-Lamberty B, Chini L, Clark J S, Dietze M, Grossiord C, Hanbury-Brown A, Hurr G C, Jackson R B, Johnson D J, Kueppers L, Lichstein J W, Ogle K, Poulter B, Pugh T A M, Seidl R, Turner M G, Uriarte M, Walker A P, Xu C G. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 2020, 368(6494): eaaz9463.
- [9] Han D D, Di X Y, Yang G, Sun L, Weng Y T. Quantifying fire severity: a brief review and recommendations for improvement. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2021, 7(1): 1973346.
- [10] Madrigal J, Hernando C, Guijarro M, Díez C, Marino E, De Castro A J. Evaluation of forest fuel flammability and combustion properties with an adapted mass loss calorimeter device. *Journal of Fire Sciences*, 2009, 27(4): 323-342.
- [11] Wanthongchai K, Bauhus J, Goldammer J G. Nutrient losses through prescribed burning of aboveground litter and understorey in dry dipterocarp forests of different fire history. *CATENA*, 2008, 74(3): 321-332.
- [12] Kong J, Yang J, Cai W. Topography controls post-fire changes in soil properties in a Chinese boreal forest. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2662-2670.
- [13] 秦倩倩, 刘艳红. 重度火烧干扰下的森林土壤功能. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(2): 503-512.
- [14] Jhariya M K, Singh L. Effect of fire severity on soil properties in a seasonally dry forest ecosystem of Central India. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 18(12): 3967-3978.
- [15] Weng Y T, Li Z G, Luo S S, Su Z W, Di X Y, Yang G, Yu H Z, Han D D. Drivers of changes in soil properties during post-fire succession on Dahurian larch forest. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(11): 3556-3571.
- [16] Viedma O, Quesada J, Torres I, De Santis A, Moreno J M. Fire severity in a large fire in a *Pinus pinaster* forest is highly predictable from burning conditions, stand structure, and topography. *Ecosystems*, 2015, 18(2): 237-250.
- [17] 杨玉萍, 潘存德, 余戈壁, 李贵华, 刘景, 崔倩, 刘博. 喀纳斯泰加林群落与环境火干扰因子的关系. *林业科学*, 2019, 55(5): 114-124.
- [18] 付婧婧, 吴志伟, 闫赛佳, 张宇婧, 顾先丽, 杜林翰. 气候、植被和地形对大兴安岭林火烈度空间格局的影响. *生态学报*, 2020, 40(5): 1672-1682.
- [19] 李兆国, 瓮岳太, 徐建楠, 耿道通, 宁吉彬, 于宏洲, 邸雪颖, 杨光. 模拟地表火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮的影响. *生态学报*, 2022, 42(4): 1500-1511.
- [20] 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.
- [21] Moya D, González-De Vega S, García-Orenes F, Morugón-Coronado A, Arcenegui V, Mataix-Solera J, Lucas-Borja M E, De Las Heras J. Temporal characterisation of soil-plant natural recovery related to fire severity in burned *Pinus halepensis* Mill. forests. *The Science of the Total Environment*, 2018, 640/641: 42-51.
- [22] 杨健, 孔健健, 刘波. 林火干扰对北方针叶林下植被的影响. *植物生态学报*, 2013, 37(5): 474-480.
- [23] Brandt J, Flannigan M, Maynard D, Thompson I, Volney W. An introduction to Canada's boreal zone: ecosystem processes, health, sustainability, and environmental issues. *Environmental Reviews*, 2013, 21: 207-226.
- [24] 张霖. 内蒙古毕拉河森林火灾受害程度遥感评价及其早期植被恢复研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [25] Han A R, Qing S, Bao Y B, Na L, Bao Y H, Liu X P, Zhang J Q, Wang C Y. Short-term effects of fire severity on vegetation based on sentinel-2 satellite data. *Sustainability*, 2021, 13(1): 432.
- [26] Ferguson D E, Johnson F D, Morgan P, Station (Ogden Utah) I R. Proceedings, land classifications based on vegetation: applications for resource

- management; Moscow, ID, November 17- 19, 1987/. Ogden, Utah; U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 1989.
- [27] Dong L, Zhang L, Li F. A compatible system of biomass equations for three conifer species in Northeast, China. *Forest Ecology and Management*, 2014, 329: 306-317.
- [28] Dong L H, Zhang L J, Li F R. Developing additive systems of biomass equations for nine hardwood species in Northeast China. *Trees*, 2015, 29 (4): 1149-1163.
- [29] Harris L B, Drury S A, Taylor A H. Strong legacy effects of prior burn severity on forest resilience to a high-severity fire. *Ecosystems*, 2021, 24 (4): 774-787.
- [30] Bryukhanov A V, Panov A V, Ponomarev E I, Sidenko N V. Wildfire impact on the main tree species of the near-yenisei *Siberia*. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, 54(11): 1525-1533.
- [31] 杨达, 吴志伟, 梁宇, 贺红土. 林火烈度的量化指标构建. *林业资源管理*, 2014(6): 140-145.
- [32] Wolda H. Similarity indices, sample size and diversity. *Oecologia*, 1981, 50(3): 296-302.
- [33] Dixon P. VEGAN, a package of R functions for community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(6): 927-930.
- [34] Glass D W, Johnson D W, Blank R R, Miller W W. Factors affecting mineral nitrogen transformations by soil heating. *Soil Science*, 2008, 173 (6): 387-400.
- [35] Grau-Andres R, Davies G M, Gray A, Scott E M, Waldron S. Fire severity is more sensitive to low fuel moisture content on *Calluna* heathlands than on peat bogs. *Science of the Total Environment*, 2018, 616/617: 1261-1269.
- [36] Hayes J J, Robeson S M. Relationships between fire severity and post-fire landscape pattern following a large mixed-severity fire in the *Valle Vidal*, New Mexico, USA. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(8): 1392-1400.
- [37] 王梓璇, 周梅, 赵鹏武, 王鼎, 石亮, 赵威, 刘喜才. 火干扰恢复初期土壤呼吸及其组分与土壤温湿度关系. *东北林业大学学报*, 2021, 49(8): 78-83, 89.
- [38] 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 胡海清, 吴泽鹏, 王振师, 周宇飞, 李小川, 钟映霞, 宋红. 森林火灾对马尾松次生林土壤理化性质的影响. *生态环境学报*, 2020, 29(11): 2141-2152.
- [39] MacDonald L H, Huffman E L. Post-fire soil water repellency. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1729-1734.
- [40] Poulos H M, Barton A M, Koch G W, Kolb T E, Thode A E. Wildfire severity and vegetation recovery drive post-fire evapotranspiration in a southwestern pine-oak forest, *Arizona*, USA. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2021, 7(4): 579-591.
- [41] Lukenbach M C, Devito K J, Kettridge N, Petrone R M, Waddington J M. Burn severity alters peatland moss water availability: implications for post-fire recovery. *Ecohydrology*, 2016, 9(2): 341-353.
- [42] 秦倩倩, 邱聪, 郑大桢, 刘艳红. 油松人工林火烧迹地早期土壤入渗动态. *植物生态学报*, 2021, 45(8): 903-917.
- [43] 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.
- [44] 刘发林, 陈小伟, 曾素平. 不同火干扰强度对枫香次生林土壤理化性质的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 132-138.
- [45] Lombao A, Barreiro A, Carballas T, Fontúrbel M T, Martín A, Vega J, Fernández C, Di\0301az-Ravin\0303a M. Changes in soil properties after a wildfire in Fragas do Eume Natural Park (Galicia, NW Spain). *Catena*, 2015, 135: 409-418.
- [46] Houseman B, Ruess R, Hollingsworth T, Verbyla D. Can Siberian alder N-fixation offset N-loss after severe fire? Quantifying post-fire Siberian alder distribution, growth, and N-fixation in boreal Alaska. *PLoS One*, 2020, 15(9): e0238004.
- [47] 胡海清, 罗碧珍, 罗斯生, 魏书精, 王振师, 李小川, 刘菲. 林火干扰对森林生态系统碳库的影响研究进展. *林业科学*, 2020, 56(4): 160-169.
- [48] Yusiarni E, Gilkes R. Minerals in the ash of Australian native plants. *Geoderma*, 2012, 189/190: 369-380.
- [49] 刘羽霞, 许嘉巍, 靳英华, 朱瑞帅, 牛莉平, 王媛林, 张英洁. 基于地形因子的长白山高山苔原土壤理化性质空间差异. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 640-648.
- [50] Kong J J, Yang J, Chu H, Xiang X. 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.
- [51] 李连强, 牛树奎, 陶长森, 陈羚, 陈锋. 妙峰山油松林分结构与地表潜在火行为相关性分析. *北京林业大学学报*, 2019, 41(1): 73-81.
- [52] Dijkstra F A, Wrage K, Hobbie S E, Reich P B. Tree patches show greater N losses but maintain higher soil N availability than grassland patches in a frequently burned oak savanna. *Ecosystems*, 2006, 9(3): 441-452.
- [53] 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.
- [54] Pereira P, Ubéda X, Martín D A. Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements. *Geoderma*, 2012, 191: 105-114.
- [55] 瓮岳太. 兴安落叶松林火烧迹地土壤微生物群落演变特征与形成机制[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.