

DOI: 10.20103/j.stxb.202311162497

卢文雄, 薛卫星, 张瑞丰, 魏普杰, 陈霖, 黄英会, 俞琚慈, 赵帅, 赵泽尧, 晏召贵. 马尾松林下土壤理化性质对不同林火严重程度的响应. 生态学报, 2025, 45(1): 1-12.

Lu W X, Xue W X, Zhang R F, Wei P J, Chen L, Huang Y H, Yu J C, Zhao S, Zhao Z Y, Yan Z G. Response of soil physicochemical properties under *Masson pine* forests to different forest fire severities. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(1): 1-12.

马尾松林下土壤理化性质对不同林火严重程度的响应

卢文雄¹, 薛卫星¹, 张瑞丰¹, 魏普杰¹, 陈霖¹, 黄英会¹, 俞琚慈¹, 赵帅², 赵泽尧¹, 晏召贵^{1,*}

¹ 华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430000

² 平泉市国有大窝铺林场, 平泉 067500

摘要: 林火是中国亚热带森林生态系统的重要干扰之一, 可通过影响土壤理化性质从而影响火后植物以及微生物群落的物种组成和种群动态。研究不同严重程度的林火对马尾松林土壤理化性质时空动态的影响, 旨在为中国亚热带马尾松林火后森林恢复与管理提供理论依据。结果表明: (1) 林火对土壤理化性质的影响与林火严重程度呈正相关, 与恢复时间和土层深度呈负相关。(2) 随恢复时间增加, 土壤总孔隙度逐渐增大, 土壤容重、pH、速效氮、速效磷逐渐降低; 低林火严重程度下的土壤有机碳和全氮含量逐渐降低, 而中、高林火严重程度则与之相反。(3) 随土层深度增加, 土壤容重和孔隙度有所增加, 而土壤有机碳和全氮含量有所降低; 土壤含水率在不同土层深度间无显著性差异。(4) 低严重程度的林火显著增加了大部分土壤理化性质之间的相关性, 而中、高严重程度的林火导致土壤有机碳、全氮和其他土壤理化性质之间的相关性发生转变。亚热带马尾松林下土壤理化性质对低林火严重程度产生积极响应, 有利于促进林下植被更新, 增强生态系统稳定性。

关键词: 林火严重程度; 恢复时间; 土壤理化性质; 土层深度

Response of soil physicochemical properties under *Masson pine* forests to different forest fire severities

LU Wenxiong¹, XUE Weixing¹, ZHANG Ruifeng¹, WEI Pujie¹, CHEN Lin¹, HUANG Yinghui¹, YU Junci¹, ZHAO Shuai², ZHAO Zeyao¹, YAN Zhaogui^{1,*}

¹ College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430000, China

² Pingquan City state-owned big Wopu forest farm, Pingquan 067500, China

Abstract: Forest fire is one of the important disturbances in the forest ecosystem of subtropical China. Through its impact on soil physicochemical properties, forest fire can impact on the species composition and population dynamics of post-fire plant and microbial communities. However, there are few studies on forest fire severity and lack of corresponding theoretical mechanisms in subtropical China. Here, we combined forest fire severity (unburned, low-severity forest fires, moderate-severity forest fires and high-severity forest fires), post-fire recovery time (one month after the forest fire, six months after the forest fire and one year after the forest fire), and soil depth (0–10 cm and 10–20 cm). The analysis methods used one-way analyses of variance (ANOVA), multivariate analyses of variance (MANOVA), Pearson's correlation analysis, LSD post-test, and principal component analysis (PCA). Here we studied the impact of forest fires of different severities on the spatiotemporal dynamics of soil physical and chemical properties (soil temperature, soil humidity, soil moisture content, soil bulk density, soil total porosity, soil pH, soil organic carbon, soil total nitrogen, soil available nitrogen, soil

基金项目: 中央高校基金(2662020YLPY022)

收稿日期: 2023-11-16; 网络出版日期: 2024-09-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gyan@mail.hzau.edu.cn

total phosphorus and soil available phosphorus) of a *Masson pine* forest in Daye City, Hubei province. We aimed to provide a scientific theoretical basis for the post-fire forest restoration and management of the *Masson pine* forest in subtropical China. The results show that: (1) The impact of forest fire on soil physical and chemical properties was positively correlated to the severity of forest fire and negatively correlated to the recovery time and soil depth. (2) With the increase of recovery time, the total soil porosity gradually increased, while soil bulk density, pH, available nitrogen, and available phosphorus gradually decreased; under low-severity fires, organic carbon and total nitrogen decreased gradually but increased gradually under the moderate-severity and high-severity fires. (3) With the increase of soil depth, the soil bulk density and porosity increased under four fire severities, and soil organic carbon and total nitrogen decreased. There was no significant difference in soil moisture content between the different soil depths. (4) Low-severity forest fires significantly increased the correlation between most soil physical and chemical properties, while moderate to high-severity forest fires led to a shift in the correlation between soil organic carbon, total nitrogen, and other soil physicochemical properties. In the subtropical *Masson pine* forest, soil physicochemical properties respond positively to low-severity forest fires, and negatively to high-severity forest fires. Low to moderate-severity forest fires can promote regeneration of understory vegetation and enhances ecosystem stability.

Key Words: forest fire severity; recovery time; soil physicochemical properties; soil depth

林火是森林生态系统的重要干扰因素之一,亦是重要驱动力之一,对森林生态系统的结构与功能具有重要影响^[1]。随着全球气候变化与人类活动影响,全球林火发生的频率和规模逐年增加^[2]。虽然火灾在一定程度上可以促进森林生态系统的更新和演替^[3],但过度或频繁的火灾会对生态系统造成负面影响,如生物多样性丧失^[4]、森林生态系统退化^[5]、降低土壤的养分含量^[6]、破坏土壤结构并造成土壤侵蚀^[7]等。探究不同林火严重程度对森林生态系统的影响以及生态系统自然恢复对不同林火严重程度的响应机制,对提高森林管理能力具有至关重要的作用。

土壤由于其快速退化和缓慢形成的过程,在时间尺度上被认为是不可再生的自然资源^[8];且土壤作为生态系统中的重要组成部分,是生态系统结构与功能的主要载体之一,对植物生长和微生物多样性具有直接或间接的影响。林火可以改变土壤含水率、pH 等大部分土壤特性^[9],其影响机理复杂,主要受林火严重程度、火后恢复时间、土壤采样深度、气候条件、土壤类型等因素的影响而产生较大差异^[10];其中,林火严重程度是土壤特性最关键的影响因素^[11],不同林火严重程度对同一生态系统或不同生态系统的影响程度通常也是具有差异的^[12]。此外,土壤的生物地球化学特性往往需要几年或几十年才能恢复到火灾前的水平,自然恢复过程非常缓慢^[13],分析火后土壤理化性质的恢复可提高火后生态系统的恢复管理。

马尾松林作为中国东南部亚热带地区分布最广泛的针叶林^[14],林火频率较高,而人为因素是导致该地区大多数林火的原因^[15],因此,林火管理在该地区的森林管理战略中发挥着重要作用。马尾松是一种易燃树种,有很多研究集中于它的燃烧性^[16],也有一些关于火对林下植被^[17]、土壤性质^[18]、土壤酶^[19]及土壤微生物^[20]影响的研究。然而,由于该地区林火整体上呈现低强度高频率的特点^[21],与林火严重程度相关的研究反而较少,缺乏相应的理论机制。2022 年发生的一场林火为本研究提供了机会,通过野外调查、样品检测及统计分析,我们将林火严重程度、火后恢复时间及土层深度相结合,基于未火烧(UB)、低(LS)、中(MS)、高(HS)4 种林火严重程度,分别于林火发生后 1 个月(1MAF)、6 个月(6MAF)和 1 年(1YAF)取样并读取土壤 0—10 cm 的温湿度,测定并分析该地区土壤 0—10 cm 和 10—20 cm 的含水率(SMC)、容重(BD)、总孔隙度(SP)、pH、有机碳(SOC)、全氮(TN)、速效氮(AN)、全磷(TP)和速效磷(AP)。通过分析探究以下问题:(1)不同林火严重程度对该地区马尾松林土壤物理化学性质的影响;(2)不同严重程度林火后土壤性质随恢复时间和土层深度的时空动态变化;(3)不同林火严重程度对土壤物理化学性质之间相互关系的影响。本研究的结果有助于为该地区火后土壤生态系统的恢复和经营管理提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国湖北省大冶市(114° 31' 33"—115° 10' 38" E, 29° 51' 16"—30° 19' 41" N), 地处幕阜山北麓的边缘丘陵地带, 地形分布为南山北丘东西湖, 南高北低东西平。该区域属于北亚热带湿润季风气候, 四季分明, 雨热同季, 无霜期约 261 d; 年平均气温及年平均日照时数分别为 17.5 °C 和 1 810.9 h; 全年降水量、多年平均蒸发量及多年平均风速分别为 1495.2 mm、1546 mm 和 17.0 m/s; 全市森林面积 47698.95 hm², 林木总蓄积量 2096700 m³, 森林覆盖率达 30.91%。研究区内乔木主要以马尾松(*Pinus massoniana*) 为主, 未火烧林下植被以白栎(*Quercus fabri* Hance)、黄檀(*Dalbergia hupeana* Hance) 和山莓(*Rubus corchorifolius* L. f.) 等灌木为主, 火灾后林下主要被蕨(*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum* (Desv.) Underw. ex Heller) 和白茅(*Imperata cylindrica* (L.) P. Beauv.) 等草本植物快速占据。

1.2 样地设置

2022 年 4 月, 研究区因人为祭祀引发火灾, 根据林火严重程度划分标准^[1] 及现场调查, 我们将其分为未火烧(UB)、低(LS)、中(MS)、高(HS) 严重程度火烧 4 个等级(表 1)。

表 1 不同林火严重程度的区别特征

Table 1 Distinguishing features of different forest fire severities

林火严重程度 Forest fire severity	特征 Features
未火烧 Unburned(UB)	从未被火烧影响
低严重程度 Low-severity(LS)	乔木熏黑高度 ≤2 m, 林下灌木部分被烧毁(≤50%), 凋落物部分被烧毁(≤50%)
中严重程度 Moderate-severity(MS)	乔木熏黑高度在 2—5 m, 林下灌木几乎被烧毁(>50%), 凋落物几乎被烧毁(>50%)
高严重程度 High-severity(HS)	乔木熏黑高度 ≥5 m, 林下灌木全部烧毁, 凋落物烧光

2022 年 5 月, 根据表 1 在研究区内的马尾松林火烧迹地和相邻未火烧马尾松林中按照 4 种林火严重程度分别设置 5 个 20 m×20 m 的标准样地, 共 20 个; 样地基本概况见表 2, 除林火严重程度外, 坡度、坡向、海拔等立地条件基本一致。此外, 在每个标准样地内根据对角线取样法布设 3 个 2 m×2 m 的样方, 在每个样方中设置 1 个 50 cm 深的土壤剖面。在每个样地的 0—10 cm 土层中随机埋放一个纽扣式温湿度气象仪(DS1923F5)。

1.3 样品采集

分别于 2022 年 5 月(火后 1 月, 1MAF)、2022 年 10 月(火后 6 月, 6MAF)、2023 年 4 月(火后 1 年, 1YAF) 进行土壤样品的采集。分别在 20 个标准样地中的 3 个土壤剖面的 0—10 cm 和 10—20 cm 处取样, 每层土样各采 2 份, 第一份使用土壤环刀(100 cm³) 取土, 带回室内直接测定土壤含水率、容重和总孔隙度; 第二份将同一样地同一土层的样品均匀混合, 带回实验室进行自然风干, 分别过 10 目筛和 100 目筛, 用于土壤化学性质指标的测定。

1.4 土壤理化性质的测定

土壤 0—10 cm 的温度(°C)、相对湿度(%) 使用纽扣式温湿度气象仪记录并读数, 用烘干法测定土壤含水率(SMC, %) , 用环刀法测定土壤容重(BD, g/cm³) 和总孔隙度(SP, %)。用电位法测定土壤 pH 值, 分别用凯氏定氮法、硫酸—高氯酸消煮法和重铬酸钾氧化法测定土壤全氮(TN, g/kg)、全磷(TP, g/kg) 和有机碳(SOC, g/kg) 含量; 分别用碱解扩散法和比色法测定土壤速效氮(AN, mg/kg) 和速效磷(AP, mg/kg)。

1.5 统计分析

采用多因素方差分析和单因素方差分析方法研究林火严重程度、恢复时间、土层深度及它们间的相互作用对土壤理化性质的影响; 采用 LSD 进行事后检验, 数据符合正态分布和方差齐性检验; 通过计算 Pearson 相关性

系数的方法对不同林火严重程度的土壤理化性质进行多元统计分析,得到一个相关矩阵,包含变量间相互关系的显著性和复杂程度。采用主成分分析(PCA)分别计算两层土壤理化性质对林火严重程度和恢复时间的多变量响应。以上统计分析均采用 SPSS 26.0 软件处理,显著性水平为 0.05。用 Excel 和 Origin 2021 绘制图表。

表 2 研究样地基本概况

Table 2 Basic characteristics of the sampling plots

样地编号 Plots number	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Elevation/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)
UB1	114° 52' 42.6424"	29° 57' 53.1207"	130	阳坡	19.3
UB2	114° 52' 43.8499"	29° 57' 43.9079"	115	阳坡	20.8
UB3	114° 52' 43.9716"	29° 58' 03.0756"	168	阳坡	15.4
UB4	114° 52' 27.5592"	29° 56' 05.8092"	228	阳坡	26.7
UB5	114° 52' 31.4976"	29° 56' 05.6688"	233	阳坡	12.3
LS1	114° 52' 40.6327"	29° 58' 29.3849"	445	阳坡	35.4
LS2	114° 52' 39.0865"	29° 58' 28.2597"	435	阳坡	18.6
LS3	114° 52' 31.8540"	29° 55' 53.3136"	201	阳坡	17.6
LS4	114° 52' 35.4243"	29° 58' 04.4419"	157	阳坡	32.4
LS5	114° 52' 33.9609"	29° 58' 06.8953"	189	阳坡	34.6
MS1	114° 52' 38.8992"	29° 58' 09.6901"	264	阳坡	43.0
MS2	114° 52' 35.9562"	29° 58' 18.5558"	386	阳坡	32.7
MS3	114° 52' 34.2516"	29° 58' 05.8332"	183	阳坡	26.8
MS4	114° 52' 28.3404"	29° 58' 10.1208"	184	阳坡	27.3
MS5	114° 52' 33.2904"	29° 55' 54.5016"	213	阳坡	26.4
HS1	114° 52' 31.4364"	29° 58' 09.2172"	195	阳坡	40.0
HS2	114° 52' 28.1460"	29° 55' 52.5936"	177	阳坡	18.6
HS3	114° 52' 31.0620"	29° 55' 51.8556"	185	阳坡	37.3
HS4	114° 52' 27.4872"	29° 55' 51.5424"	187	阳坡	37.8
HS5	114° 52' 29.7084"	29° 55' 52.6044"	188	阳坡	23.5

2 结果

林火严重程度、恢复时间、土层深度的差异对土壤理化性质的影响均有所不同(表 3),其中林火严重程度对所有指标均有显著影响,林火严重程度与恢复时间的交互作用对除 SP 外的其余指标均有显著影响,而三者的交互作用仅对 SOC、TN 和 AN 有显著影响。

2.1 林火严重程度对土壤物理性质的影响及时空动态

林火使 0—10 cm 的土壤温度升高,且随林火严重程度增加而增加。与 UB 相比,LS 使 0—10 cm 的土壤湿度增加,MS、HS 则降低;随恢复时间增加,火烧区的土壤湿度显著高于未火烧区。不同林火严重程度对 SMC 的影响随恢复时间增加逐渐减小。林火使 BD 降低;随恢复时间增加,UB 和 LS 的 BD 逐渐减小,MS 和 HS 的 BD 先显著降低后逐渐恢复;随土层加深 BD 有所增加。SP 随林火严重程度、恢复时间及土层深度的增加而增加(图 1)。

2.2 林火严重程度对土壤化学性质的影响及时空动态

火烧区的 pH 均高于 UB,且随林火严重程度升高而升高,随恢复时间和土层深度增加而下降。与 UB 相比,LS 的 SOC 和 TN 含量增加,随恢复时间增加逐渐下降;MS、HS 的 SOC 和 TN 含量减少,随恢复时间增加逐渐向火烧前水平恢复;SOC 和 TN 含量随土层加深而减少。LS 和 MS 降低了 TP 含量,然后逐渐向火灾前水平恢复;HS 显著提高了 TP 含量,随着恢复时间的增加先显著下降后逐渐增加。与 UB 相比,火烧使 0—10 cm 的 AN 含量增加,LS 增加最显著;在 10—20 cm,LS 和 MS 使 AN 含量增加,HS 则降低;总体上 AN 随恢复时间和土层深度的增加而降低。与 UB 相比,火烧增加了 0—10 cm 的 AP 含量,且与林火严重程度成正比,与恢复时间成反比;LS 和 MS 降低了 10—20 cm 的 AP 含量,HS 与之相反;AP 随土层深度增加而降低(图 2)。

表 3 土壤理化性质的三因素方差分析结果
Table 3 Three-factor variance analysis results of soil physicochemical properties

土壤理化性质 Physicochemical property	因素相互作用 Factor interaction													
	林火严重程度 Forest fire severity	恢复时间 Recovery time	土层深度 Soil depth	林火严重程度× 恢复时间 Severity×Time	林火严重程度× 土层深度 Severity×Depth	恢复时间× 土层深度 Time×Depth	林火严重程度× 恢复时间× 土层深度 Severity×Time× Depth	F	P	F	P	F	P	
含水率/% Moisture content	**	**	n.s.	**	n.s.	n.s.	14.52	**	0.45	n.s.	0.20	n.s.	1.07	n.s.
容重/(g/cm ³) Bulk density	**	**	**	**	*	**	3.80	**	3.18	*	7.37	**	2.03	n.s.
总孔隙度/% Total porosity	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.93	n.s.	0.12	n.s.	0.40	n.s.	0.36	n.s.
pH	**	**	**	**	**	**	37.01	**	1.35	n.s.	2.62	n.s.	0.98	n.s.
有机碳/(g/kg) Organic carbon	**	n.s.	**	**	**	**	6.39	**	21.18	**	0.39	n.s.	4.31	**
全氮/(g/kg) Total nitrogen	**	n.s.	**	**	**	**	9.99	**	21.69	**	7.37	**	3.77	**
速效氮/(mg/kg) Available nitrogen	**	**	**	**	*	**	14.00	**	3.41	*	10.91	**	3.08	**
全磷/(g/kg) Total phosphorus	**	**	**	**	n.s.	n.s.	32.21	**	0.29	n.s.	0.58	n.s.	0.85	n.s.
速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	**	**	**	**	**	**	5.06	**	14.53	**	14.58	**	1.70	n.s.

* : 0.01 < P ≤ 0.05; ** : P ≤ 0.01; n.s. : P > 0.05

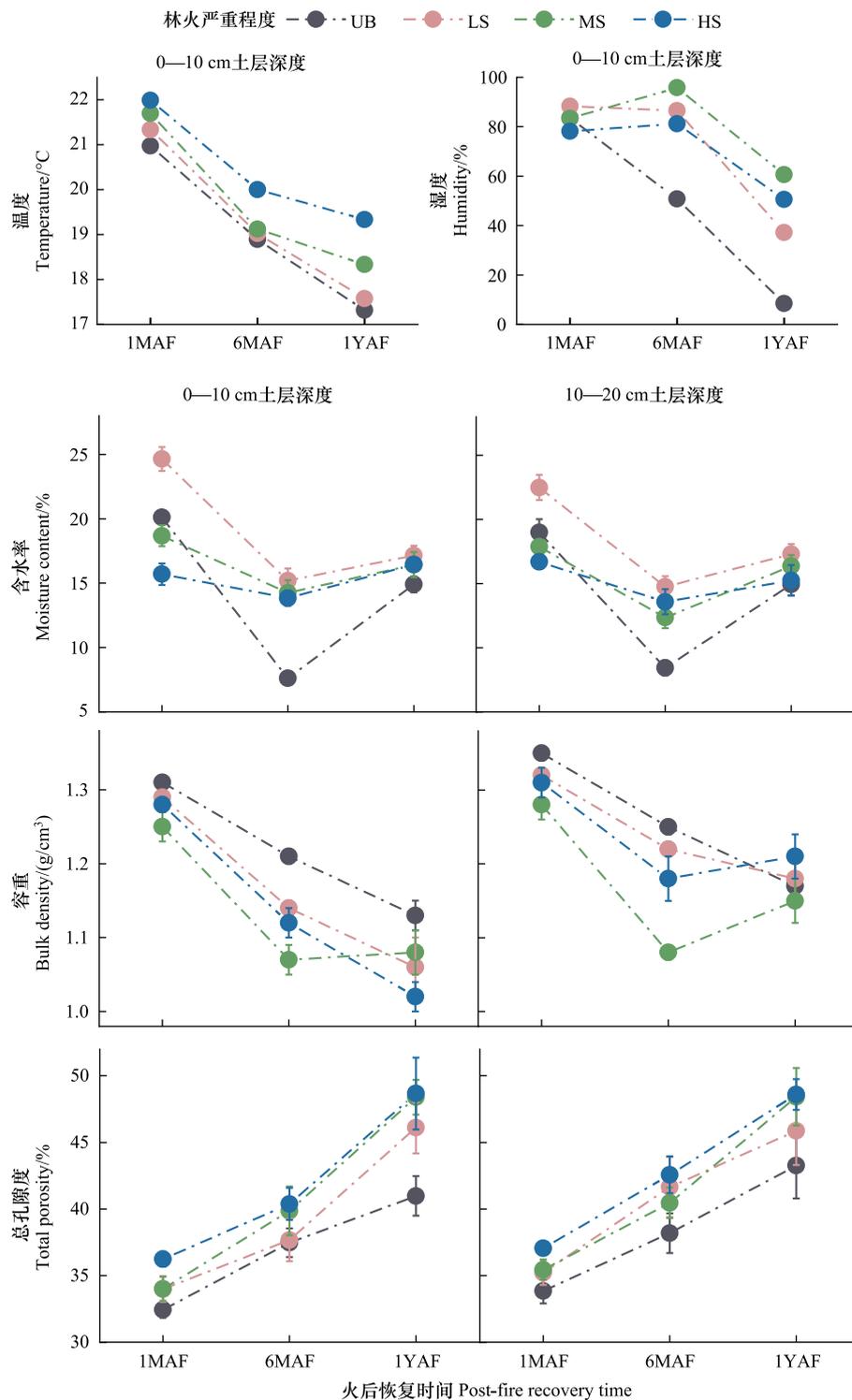


图1 土壤温度、湿度、SMC、BD和SP在不同林火严重程度、不同恢复时间及不同土层深度下的变化

Fig.1 Changes of soil temperature, humidity, SMC, BD and SP under different forest fire severity, recovery time and soil depth

UB: 未火烧; LS: 低严重程度林火; MS: 中严重程度林火; HS: 高严重程度林火; 1MAF: 火后一个月; 6MAF: 火后6个月; 1YAF: 火后1年

2.3 不同林火严重程度对不同恢复时间和不同土层深度土壤理化性质间相关关系的影响

由图3可知,无论林火严重程度如何,土层深度均与土壤化学性质呈负相关,与BD和SP呈正相关。与UB相比,LS使土层深度与BD、SOC、TN的负相关关系增强;MS和HS使土层深度与AN、AP的负相关性增

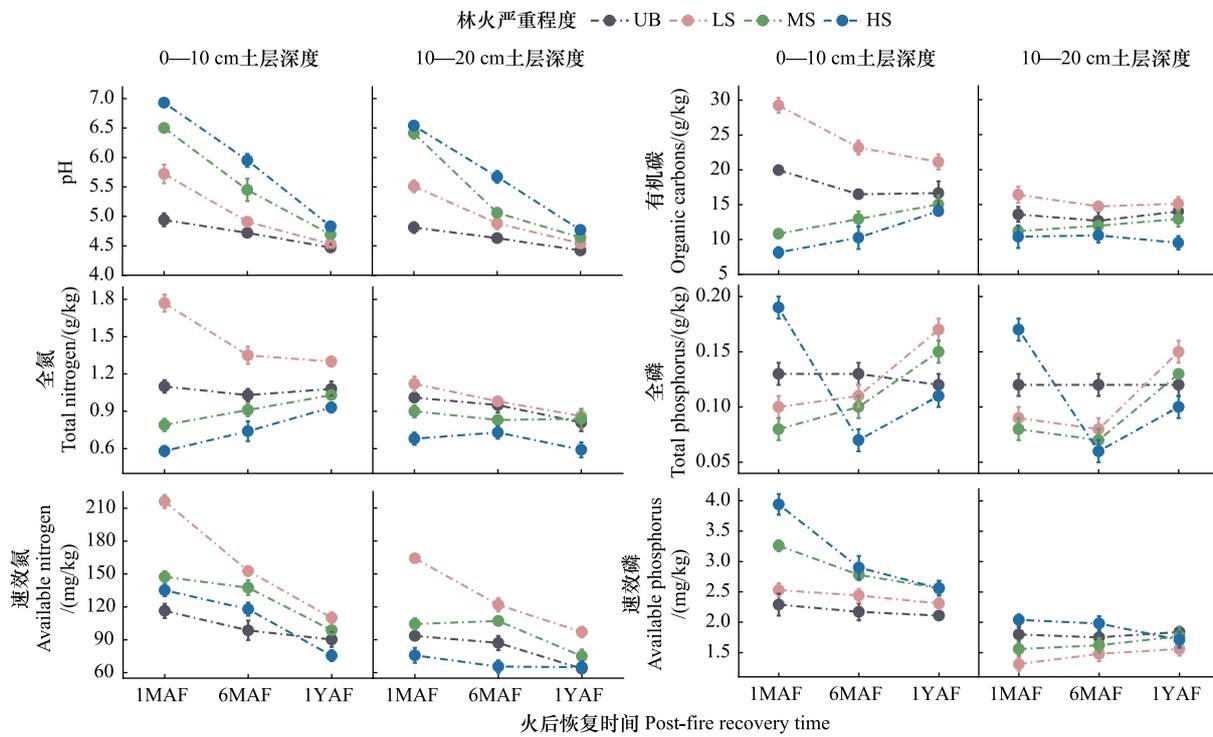


图2 pH、SOC、TN、TP、AN 和 AP 在不同林火严重程度、不同火后恢复时间及不同土层深度下的变化
 Fig.2 Changes of pH, SOC, TN, TP, AN and AP under different forest fire severity, recovery time and soil depth

强。林火轻微改变了 BD—SP、BD—pH、SP—pH、SP—AN 以及 SOC—TN 之间的相关性。与 UB 相比,LS 显著提高了绝大部分土壤理化性质间的相关性;而 MS 和 HS 导致 SOC、TN 与其他土壤理化性质之间的相关关系发生转变。此外,SMC 与其他土壤理化性质之间的相关性在不同林火严重程度中存在明显的差别;林火还显著改变了土壤磷元素与其他理化性质之间的相关性以及土壤速效养分之间的相关性。

通过主成分分析可知(表 4),以特征值大于 1 为原则提取前 3 个主成分。0—10 cm 的特征值分别为 3.11、2.94 和 1.06,方差比例分别为 34.55%、32.62%和 11.81%,累计 78.98%;10—20 cm 的特征值分别为 3.10、1.85 和 1.18,方差比例分别为 34.45%、20.53%和 13.06%,累计 68.03%。

表 4 主成分因子得分及综合排序
 Table 4 Principal component factor scores and comprehensive ranking

土壤理化性质 Soil physicochemical property	0—10 cm			10—20 cm		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
含水率 Moisture content/%	0.36	0.18	-0.06	0.30	0.19	0.26
容重 Bulk density/(g/cm ³)	0.45	-0.09	0.32	0.29	0.47	0.21
总孔隙度 Total porosity/%	-0.43	0.08	-0.11	-0.34	-0.34	0.14
pH	0.35	-0.42	-0.10	0.10	0.58	-0.35
有机碳 Organic carbon/(g/kg)	0.19	0.52	0.12	0.38	-0.36	0.25
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	0.18	0.52	0.05	0.46	-0.21	0.03
速效氮 Available nitrogen/(mg/kg)	0.50	0.10	-0.16	0.48	-0.08	-0.17
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	-0.11	-0.03	0.91	-0.06	0.19	0.80
速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	0.20	-0.47	0.06	-0.34	0.26	0.11
特征根 Eigenvalue	3.11	2.94	1.06	3.10	1.85	1.18
方差比例 Percentage of variance/%	34.55	32.62	11.81	34.45	20.53	13.06
累积方差比例 Cumulative/%	34.55	67.17	78.98	34.45	54.98	68.03

PC:主成分 Principal component

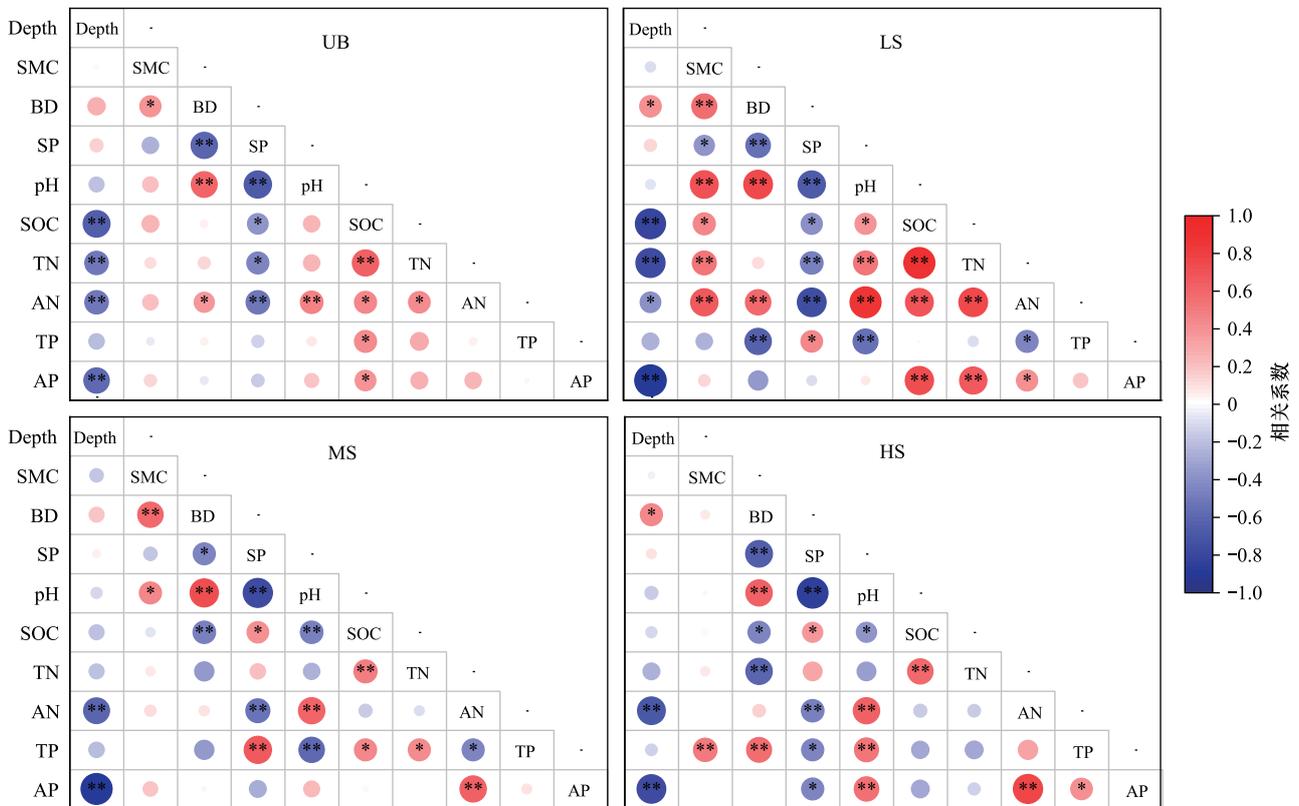


图3 不同林火严重程度对土壤理化性质间的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between different forest fire severity and soil physicochemical properties

Depth: 土壤深度; SMC: 土壤含水率; BD: 土壤容重; SP: 土壤总孔隙度; pH: 土壤 pH; SOC: 土壤有机碳; TN: 土壤全氮; AN: 土壤速效氮; TP: 土壤全磷; AP: 土壤速效磷; *: $0.01 < P \leq 0.05$; **: $P \leq 0.01$

由图4可知,解释能力最高的变量为pH,解释能力最低的变量为TP;此外,0—10 cm的SMC、BD、SP和AN显著影响PC1,pH、SOC、TN和AP显著影响PC2;10—20 cm的BD和pH显著影响PC2,TP与PC3与高度相关,其余变量均对PC1有显著影响。

3 讨论

3.1 林火严重程度对土壤物理性质的影响及时空动态

不同林火严重程度对亚热带马尾松林土壤理化性质的影响有所不同,且随恢复时间和土层深度的变化而变化。本研究证实了林火会升高土壤温度且与林火严重程度成正比这一普遍结果(图1)。然而,除1MAF的中、高严重程度的林火使土壤湿度、SMC降低外,1MAF的低严重程度林火、6MAF和1YAF的火烧区土壤湿度和SMC均高于对照区(图1);这一结果是意料之外的,因为许多研究都报道了林火后土壤湿度和水分含量下降且与林火严重程度成正比^[22],这是由于林火导致土壤温度升高,加快了水分蒸发^[23];相比之下,也有研究表明,随林火严重程度增加,SMC显著升高^[24],这可能是由于火后大量植物死亡减少了林冠截留和植物蒸腾作用,更多的雨水被土壤所吸收^[25]。随着火后生态系统恢复的进行,我们发现,火烧区的土壤温度、湿度和SMC的变化趋势相较于对照区更加稳定(图1),结合2022年的全球性干旱^[26]来看,我们猜测,一定程度的火烧会促进亚热带地区马尾松林土壤温度、湿度和含水率的改变来应对极端天气对森林的影响,也会增强土壤的稳定性和恢复力^[27]。然而,土壤温湿度与含水率极易因外界环境因素(如降雨、干旱、气候变暖等)而改变,加入气候因素的相关数据能够进一步完善研究结果,在未来需综合考虑。

此外,林火使BD降低,SP增加(图1),且BD与SP呈显著负相关(图3),这可能是由于部分分解有机物

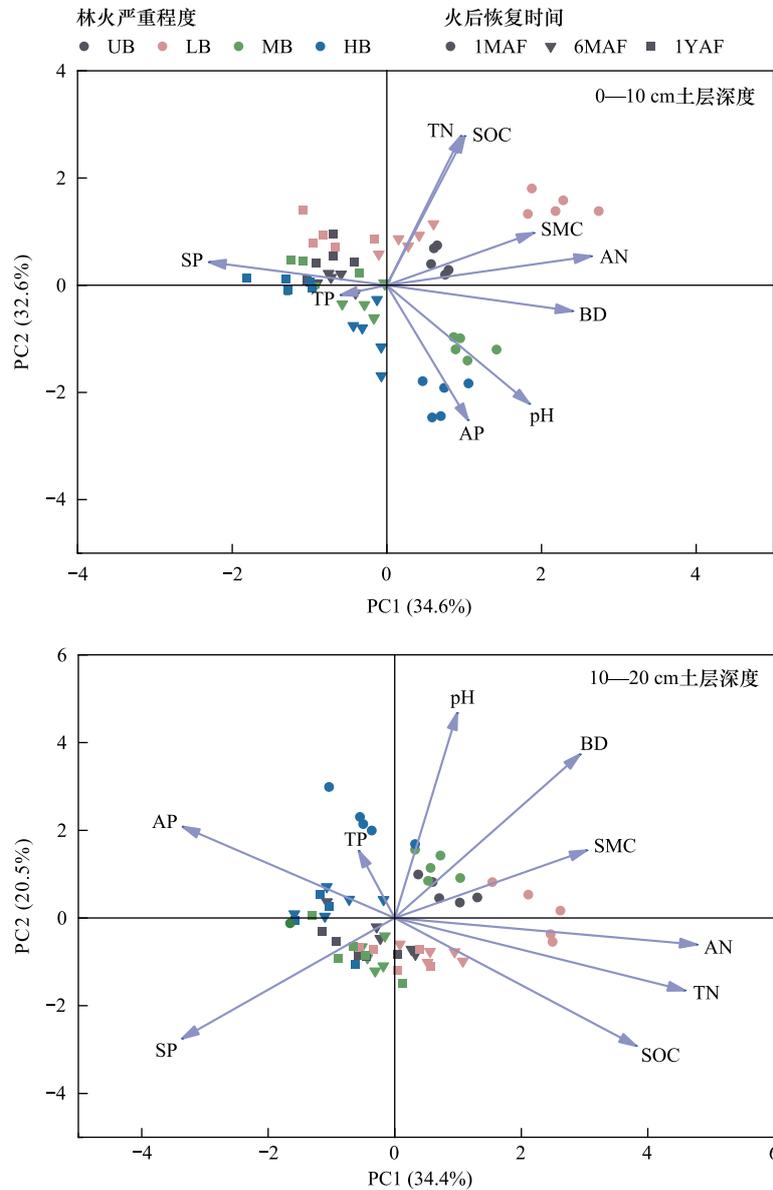


图 4 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤理化性质对不同林火严重程度和火后恢复时间的多变量响应

Fig.4 Multivariate response of soil physicochemical properties of 0—10 cm and 10—20 cm to different forest fire severity and post-fire recovery time

PC: 主成分

和大粒径团聚体增加使土壤紧实程度降低以及土壤蒸汽的膨胀导致的^[23],这与 Timothy 等人^[28]对热带高山生态系统火后土壤理化性质的研究结果相似。随着降雨增多以及植被恢复,SP 因水分渗透和根系持续生长逐渐增加^[29],BD 也因土壤结构的改变逐渐恢复。物理变量中的 BD 在土层深度中呈极显著变化(表 3),随土层深度增加而增加,这可能是因为火烧后的灰烬与未完全燃烧的植物残体混入土壤^[30],随水分渗透到深层土壤中,导致土壤密实度增加。

3.2 林火严重程度对土壤化学性质的影响及时空动态

发生林火后的森林生态系统中,地表有机物的燃烧使土壤中富营养的灰分含量增加、温度升高导致有机物质中有机基团的变性解体^[23]以及氢氧化物含量的增加^[31]都会导致土壤 pH 的升高;本研究中土壤 pH 随林火严重程度增加而增加(图 2),充分证明了林火对土壤 pH 的影响。在时空尺度上,这种影响在亚热带马尾

松林中随着火后恢复时间的增加和土层的加深而降低(图 2),可能是由于土壤中的矿质元素与土壤胶体表面吸附的氢离子发生交换后进入土壤溶液中^[32],随着植被生长和水分的渗透,土壤表层的部分酸性物质会转移到深处,导致 pH 的降低。而林火对土壤 pH 的影响也会因气候条件、土壤类型的不同而产生差异,例如对地中海森林火后土壤理化性质的研究中发现林火会降低土壤的 pH^[32],而在热带高山生态系统火后土壤理化性质的研究中发现 pH 在火烧后基本不变^[29]。低严重程度和中、高严重程度林火对 SOC 的影响不同(图 2),LS 使 SOC 增加是由于有机物的不完全燃烧^[33];MS 和 HS 后 SOC 下降可能是由于有机质的燃烧以及 pH 升高引起的 C 矿化、挥发和 C 增溶速率的增加^[34],相关研究^[35]证实了我们的结论。随着恢复的进行,LS 后存活的土壤生物和微生物开始重新活动,它们会分解土壤中的有机物质来获取能量和营养,导致 SOC 含量逐渐下降。而 MS 和 HS 的 SOC 逐渐升高可能是由于火后新的植被通过光合作用等生理过程将大气中的二氧化碳固定,最终以有机物的形式释放到土壤中,从而导致 SOC 随恢复时间增长而逐渐增加。我们还发现,土壤中的养分含量随土层深度的增加而降低,这是由于深层土壤中的根系活动受限、微生物生物量和活性降低以及土壤的侵蚀作用所导致,与 Jhariya M K 和 Singh L^[36]的研究结果相似。

一定强度的林火会促进土壤微生物的活性,加快地表可燃物的分解,提高土壤固氮能力^[37],使土壤全氮含量升高;当温度超过 200 °C 时,N 元素开始挥发,一旦温度超过 500 °C,N 元素将全部挥发^[38],而林火的温度一般可达 800—1000 °C,这可解释亚热带马尾松林中 LS 使 TN 含量升高,而 MS 和 HS 使 TN 含量降低的现象(图 2);与地中海森林不同严重程度火烧后土壤 TN 的研究结果相似^[7]。不同严重程度的林火均会使土壤表层的 AN 含量显著提高(图 2),因为火后土壤氮循环加快,大量 N 元素以无机态存在于土壤中;然而,火后植物的迅速生长和繁殖会快速消耗 N 元素^[39],因此,土壤 N 元素会随着火后森林演替的进行逐渐恢复到火烧前的水平。

P 元素的挥发温度在 774 °C 以上^[40],火后 C、N 元素大量或全部挥发会导致 TP 的相对升高^[22];当温度逐渐升高到 P 元素的挥发温度时,TP 含量开始减少,此外,高严重程度林火还会引起地表径流的显著增加,导致磷的大量淋溶损失^[40];一定程度的林火还会增加亚热带马尾松林的生产力,林下植被和土壤微生物的生长对 P 元素的需求增多,会加剧磷限制^[41];这与我们对火后 P 元素的研究结果一致,也与不同林火严重程度对地中海森林土壤 P 元素的研究结果相似^[7]。随着植被恢复,林下凋落物和根系周转增大^[42]以及土壤微生物活动增强会促进磷灰石的形成,使 TP 逐渐向火烧前水平恢复(图 2)。我们还发现,土壤表层的 AP 含量随林火严重程度升高而升高(图 2),可能是高温使 P 元素挥发的过程中,土壤中部分有机结合态的磷转化为可溶性磷导致的^[35],然而,由于 AP 可以被植物直接迅速利用,随着植被的快速更新和根系的大量吸收,AP 含量随着恢复时间和土层深度的增加而减少(图 2),与 Fernández-García 等人^[43]的研究结果类似。

3.3 不同林火严重程度对不同恢复时间和不同土层深度土壤理化性质间相关关系的影响

土壤理化性质之间不是孤立存在的,而是具有一定的相关性^[44]。林火可直接影响土壤温度和有机质的分解^[45],土壤温度与土壤含水率、有机质与有机碳密切相关,因此,林火显著改变了 SMC、SOC 与其他理化性质之间的相关性,且随林火严重程度而变化(图 3)。LS 显著提高了绝大部分土壤理化性质间的相关性,对生态系统产生着积极影响,而 MS 和 HS 对生态系统的负面影响导致一些土壤理化性质之间原有的相关关系发生转变。此外,林火使土壤磷元素与其他理化性质之间的相关性以及土壤速效养分之间的相关性发生改变,我们认为这是火后植被的快速更新和演替对养分的大量吸收导致的。

林火对森林生态系统的影响具有长期性,如果林火严重程度超过土壤抗性,需要的恢复时间更长^[46]。在不同林火严重程度对地中海森林生态系统中土壤性质的影响研究中发现,大部分土壤性质在火灾后较长时间(21 年)内恢复^[11];在不同林火严重程度对中国西南部横断山脉的土壤性质研究中发现,受火灾影响的土壤性质可以在 10 年内恢复正常^[1]。而我们的研究发现,到 1YAF 时只有 HS 的土壤理化性质与 UB 存在显著差异,LS 和 MS 与 UB 的差异很小(图 4),这可能是由于中国亚热带地区林火频率较高,使该地区的森林生态系统演化出适应火的生存策略,大大缩短了火后恢复时间。另外,除 0—10 cm 的 SP 外,不同林火严重程度的马

尾松林土壤物理性质在 1YAF 时已无显著差异,而化学性质之间仍存在显著差异,说明自然条件下火后森林生态系统土壤化学性质需要更多的时间才能恢复到原来的水平。不同严重程度林火后土壤理化性质之间的相关关系均随土层深度的增加而减小(图 4),这是因为林火提高了土壤表层的团聚体稳定性和抗侵蚀能力^[47],在外界环境的影响下,土壤表层的结构和养分含量更稳定。我们还发现,无论是火烧区还是未火烧区,1MAF 与 6MAF、1YAF 的土壤理化性质均存在显著差异(图 4),可能是由于 2022 年的高温干旱及研究区内部分马尾松被松材线虫侵染而被砍伐而导致。

4 结论

综上所述,林火对中国亚热带马尾松林土壤理化性质的影响与林火严重程度成正比,且随火后恢复时间和土层深度的增加逐渐减弱。低至中严重程度的林火可改变土壤温湿度和含水率,增加地表光照,提高土壤养分含量(如碳和氮),促进林下植被的自然更新和生长,从而提高森林生态系统的物质循环与能量流动,对马尾松林生态系统的健康发展有一定的积极作用。

参考文献(References):

- [1] Yang Y, Hu X W, Han M, He K, Liu B, Jin T, Cao X C, Wang Y, Huang J. Post-fire temporal trends in soil properties and revegetation: Insights from different wildfire severities in the Hengduan Mountains, Southwestern China. *Catena*, 2022, 213: 106160.
- [2] Pellegrini A F A, Ahlström A, Hobbie S E, Reich P B, Nieradzki 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: 194-198.
- [3] K Chandra K, Atul K B. Incidence of Forest Fire in India and Its Effect on Terrestrial Ecosystem Dynamics, Nutrient and Microbial Status of Soil. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 2015, 5(2): 10.
- [4] Stavi I. Wildfires in Grasslands and Shrublands: A Review of Impacts on Vegetation, Soil, Hydrology, and Geomorphology. *Water*, 2019, 11(5): 1042.
- [5] Moreira F, Viedma O, Arianoutsou M, Curt T, Koutsias N, Rigolot E, Barbati A, Corona P, Vaz P, Xanthopoulos G, Mouillot F, Bilgili E. Landscape-wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10): 2389-2402.
- [6] Marfella L, Marzaioli R, Paziienza G, Mairota P, Glanville H C, Rutigliano F A. Medium-term effects of wildfire severity on soil physical, chemical and biological properties in *Pinus halepensis* Mill. woodland (Southern Italy): an opportunity for invasive *Acacia saligna* colonization? *Forest Ecology and Management*, 2023, 542: 121010.
- [7] Lucas-Borja M E, de Las Heras J, Moya Navarro D, González-Romero J, Peña-Molina E, Navidi M, Fajardo-Cantos Á, Miralles Mellado I, Plaza-Alvarez P A, Gianmarco Carrù B, Wagenbrenner J W, Zema D A. Short-term effects of prescribed fires with different severity on rainsplash erosion and physico-chemical properties of surface soil in Mediterranean forests. *Journal of Environmental Management*, 2022, 322: 116143.
- [8] Lal R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability*, 2015, 7(5): 5875-5895.
- [9] Sulwiński M, Mętrak M, Wilk M, Suska-Malawska M. Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: Long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen. *The Science of The Total Environment*, 2020, 746: 141142.
- [10] 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.
- [11] Moya D, González-De Vega S, García-Orenes F, Morugán-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.
- [12] Bodí M B, Cerdà A, Mataix-Solera J, Doerr S H. Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 2012, 58(58): 33-35.
- [13] Muqaddas B, Zhou X Q, Lewis T, Wild C, Chen C R. Long-term frequent prescribed fire decreases surface soil carbon and nitrogen pools in a wet sclerophyll forest of Southeast Queensland, Australia. *The Science of The Total Environment*, 2015, 536: 39-47.
- [14] Wang B, Chen J H, Huang G, Zhao S, Dong F W, Zhang Y Y, He W, Wang P C, Yan Z G. Growth and nutrient stoichiometry responses to N and P fertilization of 8-year old Masson pines (*Pinus massoniana*) in subtropical China. *Plant and Soil*, 2022, 477(1): 343-356.
- [15] Qi X H, Wei M, Wang Z L, Jiang T Y, Wang P C, Teng M J, Yan Z G. Effects of the COVID-19 lockdown in Hubei, China: cessation of incense burning reduces regional landscape fire. *Ecology and Society*, 2022, 27(3): art5.
- [16] Yang W X, Abu Bakar B H, Mamat H, Gong L, Nursyamsi N. A Laboratory-Scale Study of Selected Chinese Typical Flammable Wildland Timbers Ignition Formation Mechanism. *Fire*, 2023, 6(1): 20.
- [17] Abbas S, Nichol J, Irteza S M, Usman M. Impact of Fire on Secondary Forest Succession in a Sub-Tropical Landscape. *Forests*, 2023, 14

- (5): 865.
- [18] 赵志霞, 李正才, 周君刚, 程彩芳, 赵睿宇, 孙娇娇. 火烧对中国北亚热带天然马尾松林土壤有机碳的影响. 生态学杂志, 2016, 35(1): 135-140.
- [19] 刘俊第, 林威, 王玉哲, 姜婧, 方熊, 易志刚. 火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响. 生态学报, 2018, 38(15): 5374-5382.
- [20] Guo Y X, Liao H L, Boughton E H, Martens-Habbena W, Qiu J X. Effects of land-use intensity, grazing and fire disturbances on soil bacterial and fungal communities in subtropical wetlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 345: 108314.
- [21] Wu Z W, He H S, Keane R E, Zhu Z L, Wang Y Q, Shan Y L. Current and future patterns of forest fire occurrence in China. *International Journal of Wildland Fire*, 2020, 29(2): 104.
- [22] 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.
- [23] Alcañiz M, Outeiro L, Francos M, Úbeda X. Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *The Science of The Total Environment*, 2018, 613/614: 944-957.
- [24] Cheng Z C, Wu S, Du J, Liu Y Z, Sui X, Yang L B. Reduced Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) Diversity in Light and Moderate Fire Sites in Taiga Forests, Northeast China. *Microorganisms*, 2023, 11(7): 1836.
- [25] White D A, Balocchi-Contreras F, Silberstein R P, Ramírez de Arellano P. The effect of wildfire on the structure and water balance of a high conservation value Hualo (*Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser.) forest in central Chile. *Forest Ecology and Management*, 2020, 472: 118219.
- [26] 孙博, 王会军, 黄艳艳, 尹志聪, 周波涛, 段明铿. 2022 年夏季中国高温干旱气候特征及成因探讨. 大气科学学报, 2023, 46(1): 1-8.
- [27] Nave L E, DeLyser K, Domke G M, Janowiak M K, Ontl T A, Sprague E, Walters B F, Swanston C W. Land use and management effects on soil carbon in U.S. Lake States, with emphasis on forestry, fire, and reforestation. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2021, 31(6): e02356.
- [28] Downing T A, Imo M, Kimanzi J, Otinga A N. Effects of wildland fire on the tropical alpine moorlands of Mount Kenya. *CATENA*, 2017, 149: 300-308.
- [29] Wang L, Zhang J, Zhao Y, Fu Q, Li T. Vegetation restoration and plant roots improve soil infiltration capacity after a severe forest fire in Daxing'anling, northeast China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 77(2): 135-143.
- [30] 赵蔓, 张晓曼, 杨明洁. 林火干扰对油松针叶林物种多样性与土壤理化性质的影响. 生态学报, 2023, 43(18): 7412-7421.
- [31] Pereira P, Francos M, Brevik E C, Ubeda X, Bogunovic I. Post-fire soil management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 5: 26-32.
- [32] Alcañiz M, Outeiro L, Francos M, Farguell J, Úbeda X. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *The Science of The Total Environment*, 2016, 572: 1329-1335.
- [33] Santín C, Otero X L, Doerr S H, Chafer C J. Impact of a moderate/high-severity prescribed eucalypt forest fire on soil phosphorous stocks and partitioning. *The Science of The Total Environment*, 2018, 621: 1103-1114.
- [34] Rodríguez-Cardona B M, Coble A A, Wymore A S, Kolosov R, Podgorski D C, Zito P, Spencer R G M, Prokushkin A S, McDowell W H. Wildfires lead to decreased carbon and increased nitrogen concentrations in upland arctic streams. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8722.
- [35] Moya D, González-De Vega S, Lozano E, García-Orenes F, Mataix-Solera J, Lucas-Borja M E, de Las Heras J. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and mid-terms after wildfire. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235: 250-256.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 朱光艳, 胡同欣, 李飞, 赵彬清, 孙龙. 火后不同年限兴安落叶松林土壤氮的矿化速率及其影响因素. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(3): 88-96.
- [39] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 刘乐中. 采伐和火烧对森林氮动态的影响. 生态学报, 2008, 28(9): 4460-4468.
- [40] 孙龙, 窦旭, 胡同欣. 林火对森林生态系统碳氮磷生态化学计量特征影响研究进展. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2021, 45(2): 1-9.
- [41] 黄钰淇, 胡慧蓉, 韩钊龙, 李姗姗, 王鸿泉. 林火对昆明人工林凋落物和表层土壤碳氮的影响. 四川农业大学学报, 2014, 32(1): 18-22.
- [42] Gundale M J, Deluca T H, Nordin A. Bryophytes attenuate anthropogenic nitrogen inputs in boreal forests. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2743-2753.
- [43] Fernández-García V, Marcos E, Fernández-Guisuraga J M, Taboada A, Suárez-Seoane S, Calvo L. Impact of burn severity on soil properties in a *Pinus pinaster* ecosystem immediately after fire. *International Journal of Wildland Fire*, 2019, 28(5): 354.
- [44] Babur E, Dindaroglu T, Danish S, Häggblom M M, Ozlu E, Gozukara G, Uslu O S. Spatial responses of soil carbon stocks, total nitrogen, and microbial indices to post-wildfire in the Mediterranean red pine forest. *Journal of Environmental Management*, 2022, 320: 115939.
- [45] Zavala L M, De Celis R, Jordán A. How wildfires affect soil properties. A brief review. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 2014, 40(2): 311-332.
- [46] Eivazi F, Bayan M R. Effects of long-term prescribed burning on the activity of select soil enzymes in an oak - hickory forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(10): 1799-1804.
- [47] 王琳涛, 王云琦, 王玉杰, 张建聪, 尹乐, 张洪珊. 火干扰对缙云山土壤团聚体稳定性的影响. 中国水土保持科学: 中英文, 2023, 21(3): 25-33.