

林火干扰对云南松林土壤养分和生态化学计量特征的影响

谢兴龙¹, 魏亚娟², 侯红蕊²

(1. 中共云南省委党校社会和生态文明教研部,

云南昆明 650111; 2. 包头师范学院生态环境学院, 内蒙古包头 014030)

摘要: [目的] 探究林火干扰对云南松(*Pinus yunnanensis*)林土壤养分和生态化学计量特征的影响, 为区域火烧迹地土壤养分管理和植被恢复提供数据支撑。[方法] 以云南省玉溪市红塔山自然保护区为研究区, 以云南松为研究对象, 利用野外试验和室内分析相结合的方法对不同火烧强度(未火烧、轻度火烧、中度火烧和重度火烧)0—40 cm 土壤的理化性质和碳氮磷生态化学计量比进行差异分析和相关分析。[结果] ①不同火烧强度0—40 cm 土壤容重、土壤含水量和土壤总孔隙度分别为 1.21~1.34 g/cm³, 3.82%~5.71% 和 50.60%~58.92%。土壤容重随着火烧强度增大逐渐增加, 而土壤含水量和土壤总孔隙度与之相反。②火烧干扰对云南松林地土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)和碱解氮(AN)影响显著($p < 0.05$), 对土壤 pH 值影响不显著($p > 0.05$)。与未火烧相比, 不同火烧强度平均土壤 SOC 和 TN 含量分别降低 6.22%~19.56% 和 17.86%~39.29%, TP 和 AN 分别增加 2.82%~40.85% 和 22.07%~173.28%。③火烧干扰对云南松土壤 C/N, C/P 和 N/P 影响显著($p < 0.05$)。不同火烧强度平均土壤 C/N 较未火烧增加 14.05%~31.24%, 平均土壤 C/P, N/P 较未火烧分别降低 48.70%~75.82% 和 57.81%~84.32%。④土壤 C/N 与 SOC 呈极显著正相关, 与土壤总孔隙度(STP)呈极显著或显著正相关; 土壤 N/P 与土壤 TP 呈极显著或显著负相关。[结论] 火烧干扰改变了土壤理化性质, 尤其是重度干扰更加显著。

关键词: 土壤理化性质; 生态化学计量比; 火烧迹地; 火烧强度; 云南松

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0067-09

中图分类号: Q792

文献参数: 谢兴龙, 魏亚娟, 侯红蕊. 林火干扰对云南松林土壤养分和生态化学计量特征的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 67-75. Xie Xinglong, Wei Yajuan, Hou Hongrui. Effects of fire disturbance on soil nutrients and ecological stoichiometric characteristics in *Pinus yunnanensis* forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 67-75.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.038

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.038

Effects of fire disturbance on soil nutrients and ecological stoichiometric characteristics in *Pinus yunnanensis* forest

Xie Xinglong¹, Wei Yajuan², Hou Hongrui²

(1. Department of Social and Ecological Civilization Teaching and Research,
Party School of Yunnan Committee of CPC, Kunming, Yunnan 650111, China;

2. College of Ecology and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou, Inner Mongolia 014030, China)

Abstract: [Objective] The impact of forest fire disturbance on soil nutrients and ecological stoichiometric characteristics of *Pinus yunnanensis* forest was investigated in order to provide data support for soil nutrient management and vegetation restoration in regional burned areas. [Methods] This study was conducted in the Hongtashan Nature Reserve, Yuxi City, Yunnan Province, with *P. yunnanensis* as the study species. A

收稿日期: 2025-08-26

修回日期: 2025-10-28

采用日期: 2025-10-29

资助项目: 云南省哲学社会科学规划习近平生态文明思想研究专项“‘双碳’目标下云南生物多样性保护与能源绿色转型协同效应研究”(ZX2024YB52); 中共云南省委党校(云南行政学院)重大课题“中国西南地区跨境生物多样性保护框架构建和实现路径研究”(2025YNDXXJ23)

第一作者: 谢兴龙(1989—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 副教授, 主要从事环境与生态统计研究。Email: xiexinglong14@163.com。

通信作者: 魏亚娟(1994—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 讲师, 主要从事荒漠化防治和旱区生态修复研究。Email: weiyajuan0305@163.com。

combination of field experiments and laboratory analysis was applied to examine physicochemical properties and ecological stoichiometric ratios of carbon, nitrogen, and phosphorus in the 0—40 cm soil layer under different fire intensities (unburned, light burning, medium burning, and severe burning). Difference and correlation analyses were performed. [Results] ① For different fire intensities, the soil bulk density, soil water content, and total soil porosity in the 0—40 cm layer were from 1.21 to 1.34 g/cm³, 3.82% to 5.71%, and 50.60% to 58.92%, respectively. Soil bulk density gradually increased with increasing fire intensity, while soil water content and soil total porosity decreased correspondingly. ② Fire disturbance significantly affected soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and available nitrogen (AN) in *P. yunnanensis* forest ($p < 0.05$), but did not significantly affect soil pH value ($p > 0.05$). Compared to unburned plots, average soil SOC and TN contents decreased by 6.22%—19.56% and 17.86%—39.29%, respectively, while TP and AN increased by 2.82%—40.85% and 22.07%—173.28%, respectively, under different fire intensities. ③ Fire disturbance significantly affected the C/N, C/P and N/P ratios in *P. yunnanensis* forest ($p < 0.05$). Compared to unburned plots, the average soil C/N ratio increased by 14.05%—31.24%, and the average soil C/P and N/P ratios decreased by 48.70%—75.82% and 57.81%—84.32%, respectively, under different fire intensities. ④ Soil C/N was extremely significantly positively correlated with SOC, and extremely significantly or significantly positively correlated with total soil porosity (STP). Soil N/P was extremely significantly or significantly negatively correlated with soil TP. [Conclusion] Fire disturbance alters soil physicochemical properties, with effects particularly significant under severe fire disturbance.

Keywords: soil physicochemical properties; ecological stoichiometric ratios; burned area; fire intensity; *Pinus yunnanensis*

作为自然界重要的生态因子,林火干扰通过改变森林生态系统的植物类型和凋落物中的营养物质^[1],进而改变土壤理化性质和生物学性质,从而调控养分元素在土壤中的重新分配^[2]。谷会岩等^[3]对大兴安岭偃松-兴安落叶松林土壤养分研究得出,林火干扰加速了土壤养分流失,且土壤养分元素流失速率与火烧强度呈正相关;李炳怡等^[4]对河北平泉油松林研究发现,火烧强度与土壤pH值呈极显著正相关,且重度火烧有利于土壤有机碳增加;但是,王毅雯等^[5]对滇中云南松林研究得出,土壤总孔隙度、土壤含水率、土壤全氮和土壤有机碳随着火烧强度增加而降低,而土壤容重和碱解氮随火烧强度的增加而增大。孙龙等^[6]对白桦落叶松混交林研究发现,中度火烧导致土壤孔隙度和含水率降低,却导致土壤密度增加;冉益倩等^[7]对西南亚热带林地土壤理化性质研究发现,火烧干扰降低了土壤全氮和碱解氮含量,但对土壤有机碳、全氮、全磷和pH值无显著影响。综上所述,由于森林生态系统的异质性和复杂性,林火干扰下的土壤理化性质变化存在较大差异^[8]。

生态化学计量是研究生物地球化学过程能量平衡和元素限制的重要科学^[9]。碳(C)、氮(N)和磷(P)是森林生态系统中物种演替、生产和可持续管理不可或缺的元素^[10]。土壤作为森林生态系统的重要组成部分和元素碳库,且土壤养分与外界环境之间相互作用具有复杂性,故其中C、N、P等营养元素的生态化

学计量比可以作为认识森林生态系统物质循环过程和反馈机制的有效预测指标^[11]。林阳^[12]得出火烧干扰有利于大兴安岭白桦林和落叶松林土壤C/P和N/P提高。Hu Mengjun等^[13]对亚热带针阔混交林研究发现,火烧干扰减轻了亚热带-暖温带生态林中植物生长的P限制。Wang Yuzhe等^[14]研究发现林火作用在短期内增加了TN矿化速率。由于研究区域、植被类型和火烧强度的异质性,揭示林火干扰对元素生物地球化学过程,尤其是主要生源要素(C、N、P)循环的内在调控规律,已成为生态系统物质循环研究领域的重点科学议题。

云南松(*Pinus yunnanensis*)是中国西南地区主要的树种类型,在云南省分布面积多达 5.00×10^6 hm²,占云南省林地总面积的52.00%,在水土保持和碳蓄积方面发挥着重要作用^[15]。云南省是中国森林火灾频发的重点区域之一,云南松作为林火干扰的主要影响对象,由于云南松富含大量的松脂松香,若发生林火,极易造成毁灭性影响^[16]。森林火灾不仅直接破坏林木,还会显著改变土壤理化性质,进而影响生态系统的恢复进程与养分循环^[17]。基于此,本研究以云南松为研究对象,分析不同火烧强度土壤理化性质及其化学计量特征。研究目的包括:①不同火烧强度土壤理化性质的变化规律;②不同火烧强度土壤C、N、P生态化学计量特征;③不同火烧强度土壤理化性质与碳氮磷生态化学计量比之间的相关关

系。以期为该区域植被恢复和养分循环提供数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市红塔山自然保护区内,地理位置为 $24^{\circ}09'—24^{\circ}34'N$, $102^{\circ}18'—102^{\circ}42'E$,海拔高度为1 600~2 400 m。研究区属于典型的亚热带半湿润冷冻高原季风气候,呈干湿季节分明的气候特征。多年平均降水量为800~1 000 mm,年平均气温为 $17^{\circ}C$,全年日照时数为2 395 h,年均无霜期为312 d,该区域属于云南森林火灾的高发区与重灾区。研究区内植被类型主要以乔木树种云南松(*P. yunnanensis*)为主,灌木树种包括:铁仔(*Myrsine africana*)、马缨杜鹃(*Rhododendron delavayi*)和余甘子(*Phyllanthus emblica*)等。土壤主要以山地红壤土为主,土壤土层瘠薄。2023年4月11日在江川区发生的森林火灾属于人为引起,过火面积达 56.50 hm^2 。

1.2 样地设置与样品采集

采用空间替代时间的方法进行样地设置。于火灾同年(2023年)11月中旬,在云南省玉溪市红塔山自然保护区,依据表1的火烧强度划分标准^[5],分别选取具有代表性的轻度火烧、中度火烧和重度火烧迹地各3个。各样地相距50~200 m,以相临近的未过火区域作为对照,共设置12个 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的样地。所有样地均设置在海拔、坡向与坡度等生境条件基本一致的云南松纯林内,以确保样地间的可比性。在每个样地内,利用五点法分别布设5个土壤采样方,去除表层燃烧残渣后,用环刀分别采集0—20 cm土层和20—40 cm土层的原状土用于土壤容重(BD)、土壤含水量(SM)和土壤总孔隙度(STP)的测定。然后,利用四分法将不同采样点同一土层深度均匀混合后放入塑封袋带回实验室,去除杂质后用于土壤pH值、有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)和碱解氮(AN)测定,具体测定方法参照《土壤农化分析》^[18]。

表1 林火强度划分

Table 1 Classification of forest fire intensity

火烧强度	火烧强度划分标准
轻度火烧	林下灌木部分和凋落物被烧毁 $\leq 50\%$,火灾烧死木 $\leq 30\%$,树干熏黑高度 $\leq 2\text{ m}$;树木顶端仍有绿叶;地表枯落物、苔藓和草本被烧焦或受较大影响;炭化深度仅为几毫米
中度火烧	林下灌木部分和凋落物被烧毁 $> 50\%$, $30\% < \text{火灾烧死木} \leq 70\%$,树干熏黑高度 $2\sim 3\text{ m}$,树木顶端仍有绿叶;地表枯落物、苔藓和草本被烧焦或受较大影响;炭化深度仅为几毫米
重度火烧	林下灌木和凋落物全部被烧毁,树干熏黑高度 $\geq 3\text{ m}$,火灾烧死木 $\geq 70\%$;树冠无绿叶覆盖;所有地表枯落物和土壤有机碳层受极大影响;灰分沉积和烧焦的有机物达几厘米厚

1.3 数据处理

采用Excel 2010, SPSS 22.0和Origin 2025等软件对数据进行分析 and 绘图。并采用单因素方差(one-way ANOVA)对不同火烧强度土壤理化性质和生态化学计量比进行显著性分析;利用Origin 2025对不同火烧强度土壤理化性质和生态化学计量比进行相关分析。图表中数据均采用“平均值±标准差”的形式。

2 结果与分析

2.1 云南松林土壤理化性质和生态化学计量比与火烧强度和土层深度的关系

由表2可知,火烧强度对土壤STP, SOC, TP, C/N, C/P和N/P影响显著($p < 0.05$),对土壤TN和AN影响极显著($p < 0.01$);土层深度对土壤SM, SOC, TP, C/N, C/P和N/P影响显著($p < 0.05$),对土壤AN影响极显著($p < 0.01$);两者的交互作用对

土壤C/N, C/P和N/P影响显著($p < 0.05$),对土壤AN影响极显著($p < 0.01$)。

2.2 不同火烧强度对土壤物理性质的影响

由图1可知,同一土层不同火烧强度,0—20 cm土层,重度火烧土壤容重与未火烧差异显著($p < 0.05$);20—40 cm土层,中度火烧和重度火烧土壤容重与未火烧差异显著($p < 0.05$)。0—20 cm土层,各火烧强度土壤含水率与未火烧差异显著($p < 0.05$);20—40 cm土层,重度火烧土壤含水率与未火烧差异显著($p < 0.05$)。0—20 cm和20—40 cm土层,各火烧强度土壤总孔隙度与未火烧差异显著($p < 0.05$);不同火烧强度土壤容重依次表现为:重度火烧(1.32 g/cm^3) $>$ 中度火烧(1.27 g/cm^3) $>$ 轻度火烧(1.24 g/cm^3) $>$ 未火烧(1.21 g/cm^3);而土壤总孔隙度和土壤含水量依次表现为:未火烧(57.52% , 4.87%) $>$ 轻度火烧(53.92% , 4.65%) $>$ 中度火烧(53.60% , 4.62%) $>$ 重度火烧(51.92% , 4.14%),说

明土壤容重随着火烧强度逐渐增加,而土壤含水量和土壤总孔隙度与之相反。不同火烧强度土壤容重

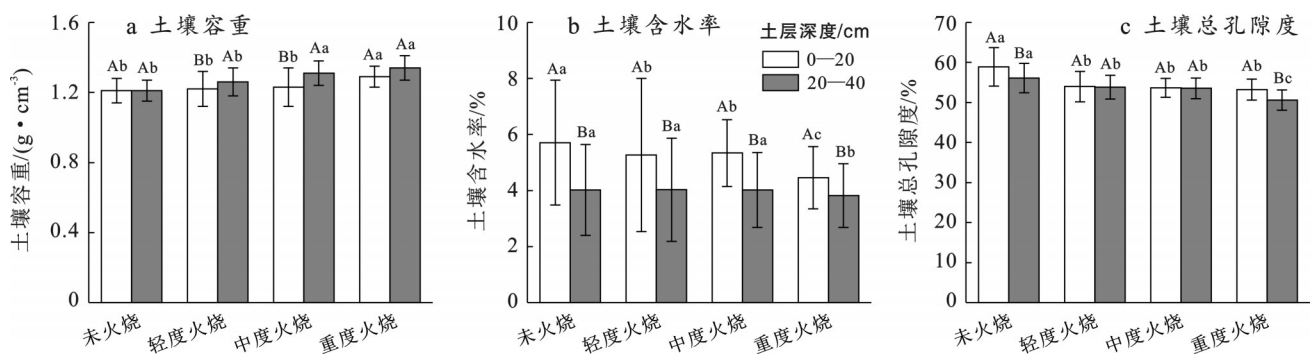
表现为 20—40 cm > 0—20 cm, 而土壤含水量和土壤总孔隙度与之相反。

表 2 土壤理化性质及化学计量比在火烧强度和土层间的差异显著性检验

Table 2 Significance test of differences in soil physicochemical and stoichiometric ratios across fire intensities and soil layers

自变量	BD	SM	STP	pH值	SOC	TN	TP	AN	C/N	C/P	N/P
火烧强度	1.949	0.192	3.134*	2.22	6.443*	76.941**	12.167*	353.448**	10.117*	12.413*	12.423*
土层深度	1.718	8.967*	1.146	1.064	6.952*	4.412	8.101*	100.019**	8.667*	6.877*	9.229*
火烧强度×土层深度	0.219	0.094	0.316	0.261	0.043	0.706	1.167	5.876**	10.179*	10.364*	10.106*

注:①*,**分别代表显著性水平小于0.05,0.01。②BD,SM,STP,SOC分别为土壤容重、土壤含水量、土壤总孔隙度和土壤有机碳。



注:不同大写字母表示同一火烧强度不同土层深度指标差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一土层深度不同火烧强度指标差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同火烧强度下的土壤物理性质

Fig.1 Soil physical properties under different fire intensities

2.3 不同火烧强度对土壤化学性质的影响

由图 2 可知,同一土层不同火烧强度,不同火烧强度土壤 pH 值差异不显著($p > 0.05$)。0—20 cm 土层,重度火烧土壤 SOC 显著低于未火烧;20—40 cm 土层,中度火烧和重度火烧土壤 SOC 显著低于未火烧($p < 0.05$)。0—20 cm 和 20—40 cm 土层,各火烧强度土壤 TN 显著低于未火烧($p < 0.05$),土壤 AN 显著高于未火烧($p < 0.05$)。0—20 cm 土层中度火烧和重度火烧土壤 TP 显著高于未火烧($p < 0.05$);20—40 cm 土层轻度火烧和重度火烧土壤 TP 显著高于未火烧($p < 0.05$)。土壤 pH 值随火烧强度呈先减后增的趋势,土壤 TP 与之相反;土壤 SOC, TN 随着火烧强度呈逐渐降低的趋势,土壤 AN 与之相反。同一火烧强度不同土层,土壤 pH 值差异不显著($p > 0.05$)。不同火烧强度下,0—20 cm 土壤 SOC 显著高于 20—40 cm ($p < 0.05$)。0—20 cm 土壤与 20—40 cm 土壤在不同火烧强度下的 TN 差异不显著($p > 0.05$)。除未火烧外,不同火烧强度下的 0—20 cm 与 20—40 cm 土层土壤 TP, AN 差异显著($p < 0.05$)。

2.4 不同火烧强度对土壤碳氮磷生态化学计量比的影响

由图 3 可知,同一土层不同火烧强度,0—20 cm

和 20—40 cm 土层,各火烧强度土壤 C/N 显著高于未火烧($p < 0.05$),土壤 C/P, N/P 显著低于未火烧($p < 0.05$);土壤 C/N 随着火烧强度整体呈现逐渐增加的趋势;而土壤 C/P 和 N/P 随着火烧强度增加整体呈先减后增的趋势。同一火烧强度不同土层,除轻度火烧外,其他火烧强度 0—20 cm 与 20—40 cm 土层土壤 C/N 差异显著($p < 0.05$)。不同火烧强度 0—20 cm 与 20—40 cm 土层土壤 C/P 和 N/P 差异显著($p < 0.05$)。

2.5 土壤理化性质与碳氮磷生态化学计量比之间的相关关系

由图 4 可知,在未火烧样地,土壤 C/N 与土壤 pH 值和 SOC 呈极显著正相关($p < 0.001$),与土壤 SM 和 STP 呈极显著正相关($p < 0.01$),与土壤 BD 和 TP 呈显著正相关($p < 0.05$);土壤 C/P 和 N/P 与土壤 BD, TN 和 TP 呈显著负相关($p < 0.05$)。①在轻度火烧样地,土壤 C/N 与 SOC 呈极显著正相关($p < 0.001$),与土壤 pH 值呈极显著正相关($p < 0.01$),与土壤 BD, SM, STP 和 TP 呈显著正相关($p < 0.05$);土壤 C/P 与 AN 呈显著负相关($p < 0.05$);土壤 N/P 与土壤 BD, TP 和 AN 呈显著负相关($p < 0.05$)。②在中度火烧样地,土壤 C/N 与 SM 和 SOC 呈极显著正相关($p < 0.001$),与 AN 呈极显著正相关($p < 0.01$),与

STP 和 pH 值呈显著正相关 ($p < 0.05$); 土壤 C/P 与 SM, AN 和 C/N 呈显著正相关 ($p < 0.05$); 土壤 N/P 与土壤 BD 和 TP 呈极显著负相关 ($p < 0.01$)。③在重度火烧样地, 土壤 C/N 与 SOC 呈极显著正相关

($p < 0.001$), 与 SM, pH 值和 TN 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与 BD 和 STP 呈显著正相关 ($p < 0.05$); 土壤 N/P 与 TP 和 AN 呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 与 STP, pH 值和 TN 呈显著负相关 ($p < 0.05$)。

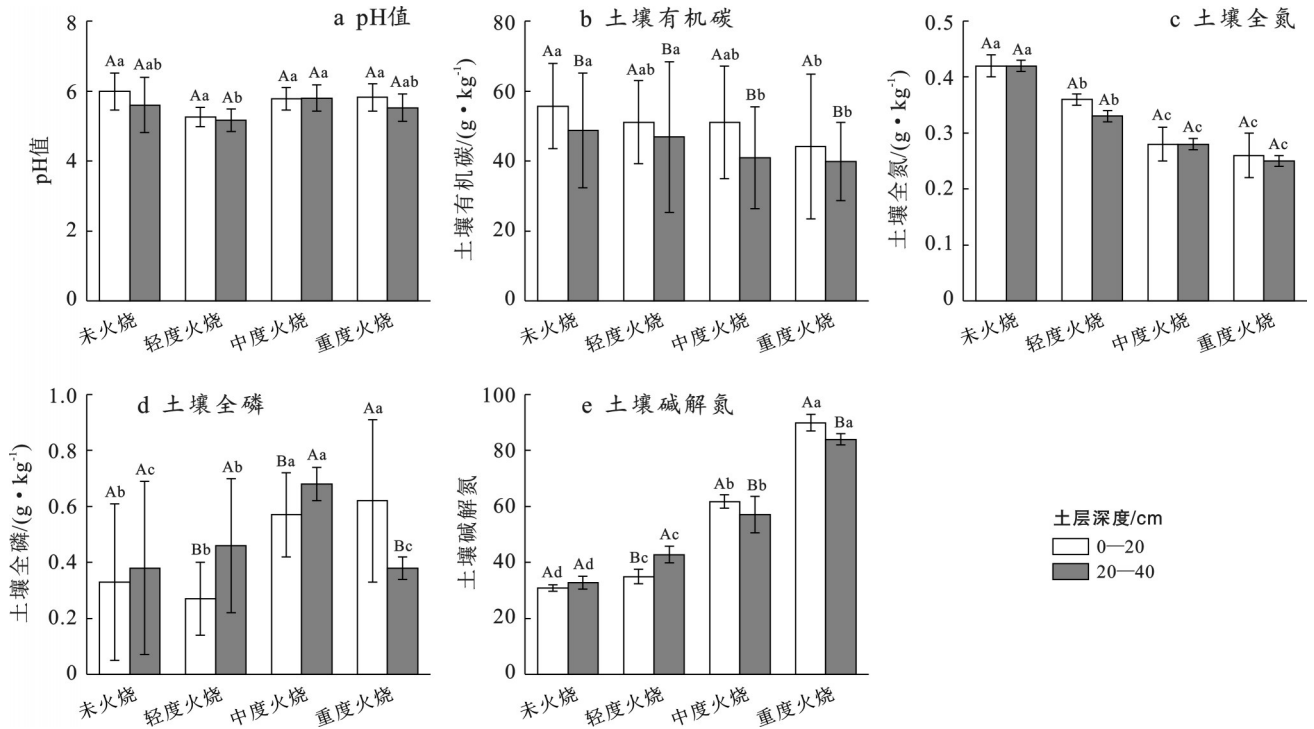


图 2 不同火烧强度下的土壤化学性质

Fig.2 Soil chemical properties under different fire intensities

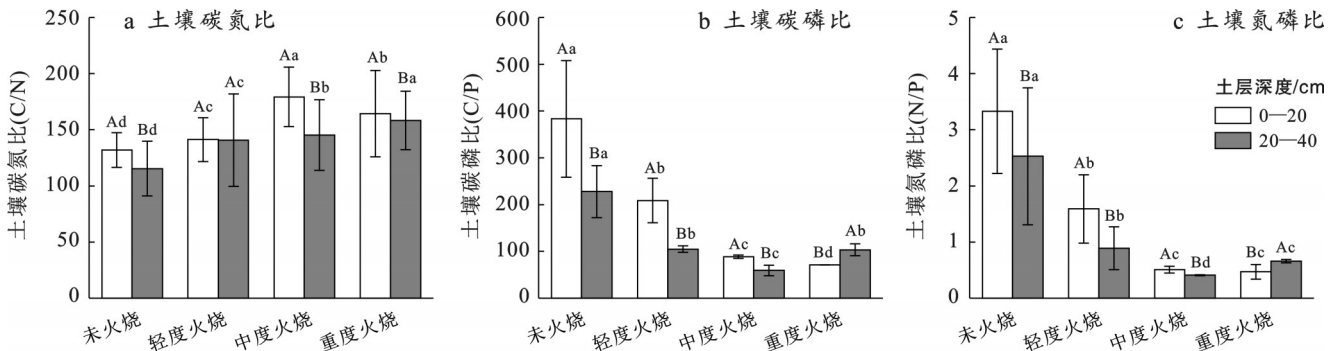


图 3 不同火烧强度下的土壤碳氮磷生态化学计量比特征

Fig.3 Characteristics of ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different fire intensities

3 讨论

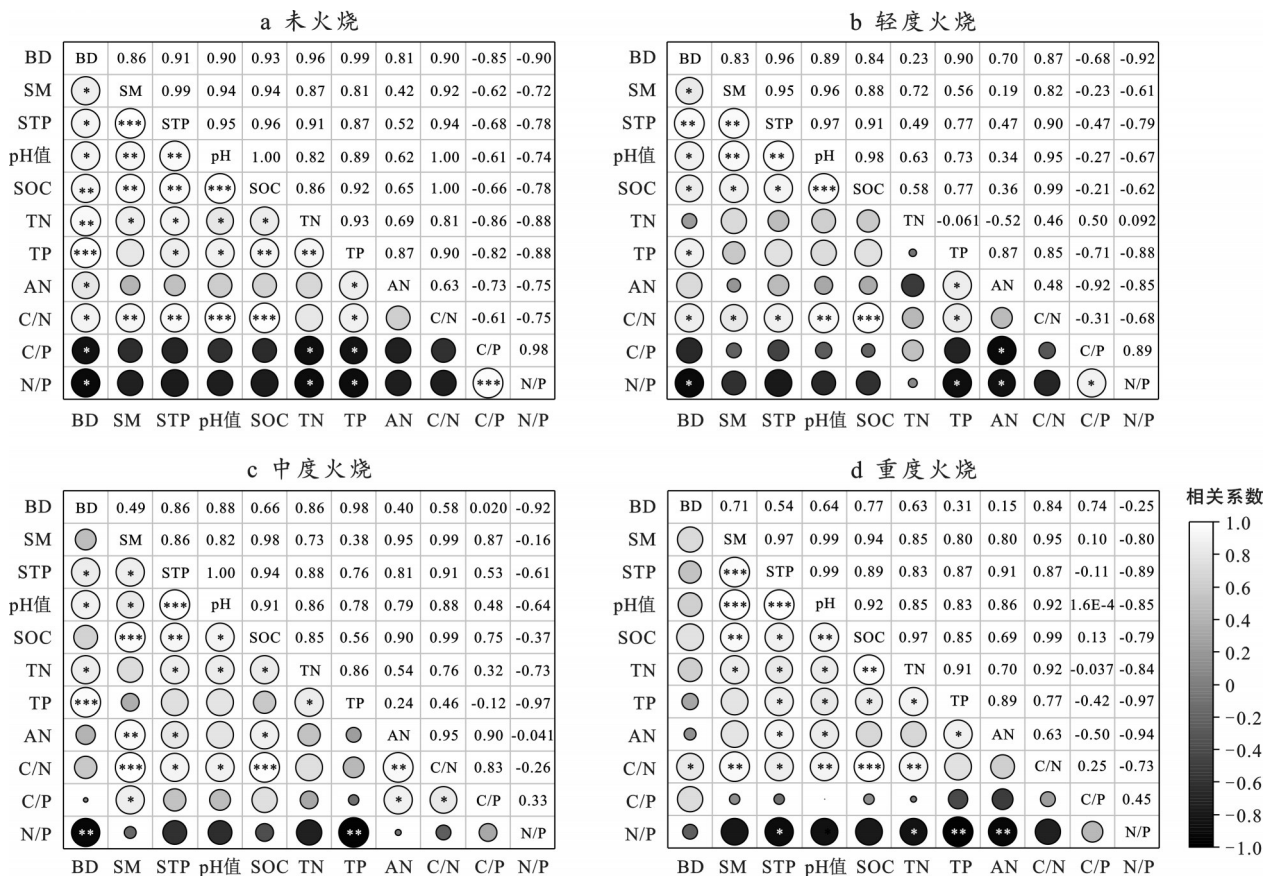
3.1 火烧干扰对土壤物理性质的影响

火烧干扰改变了森林生态系统的林分结构、光照条件、土壤温湿度和燃烧剩余物等因子,进而影响了土壤理化性质^[8]。本研究中,土壤容重随火烧强度逐渐增加且重度火烧与其他火烧强度差异显著,该研究结果与冉益倩等^[7]和胡同欣等^[19]分别对西南亚热带林和兴安落叶松林土壤理化性质的结果一致。此外,

由于热量传递差异,使不同火烧强度下 0—20 cm 土壤含水量显著大于 20—40 cm,该研究结果与王毅雯等^[5]对滇中云南松林研究结果一致。火烧干扰通过直接热效应与间接生态效应共同导致土壤物理性质恶化。一方面,火烧的直接热力效应对土壤团聚体的破坏。实验室控制试验发现,当土壤被加热至 400 °C 以上时,作为关键胶结物质的土壤有机碳会剧烈燃烧,导致大团聚体崩解为细小颗粒^[19-20]。同时,土壤中的黏粒矿物会发生烧结现象,进一步堵塞土

壤孔隙^[21]。由于轻度火烧和重度火烧没有改变矿质土壤层的孔隙等物理结构,而重度火烧则会改变土壤层孔隙等物理结构,故随着火烧强度增加,土壤含水率和总孔隙度逐渐降低。另一方面,火烧降低了地表植物覆盖,增加林内光照强度和土壤水分蒸发速率,加之没有林冠层的截留作用,地表极易发生土

壤板结导致水分下渗受阻,进一步降低了土壤持水能力和土壤含水率,从而加剧了土壤侵蚀和流失^[22]。主要因为火烧干扰后灰烬覆盖在地表具有很好的持水能力,火烧后的土壤有机质高度碳化,形成疏水性化合物,导致土壤斥水性增强,阻碍水分向下渗透^[23]。



注:BD为土壤容重;SM为土壤含水率;STP为土壤总孔隙度;SOC为土壤有机碳。

图4 不同火烧强度土壤理化性质与碳氮磷生态化学计量比之间的相关关系

Fig.4 Correlation between soil physicochemical properties and ecological stoichiometric ratios of carbon, nitrogen and phosphorus under different fire intensities

3.2 火烧干扰对土壤化学性质的影响

本研究中,不同火烧强度下土壤pH值差异不显著($p>0.05$),说明火烧干扰没有改变土壤pH值大小。该研究结果与曾素平等^[23]对土壤pH值随着火烧强度增加而增大的研究结果相悖。但是,与王毅雯等^[5]对滇中云南松林研究结果一致。火烧干扰使土壤和凋落物中的有机酸分解,暂时性提高了土壤pH值,但是经过7个月的降水(939.80 mm)淋溶作用,灰烬输入的碱性物质已被淋溶迁出,从而导致研究区土壤pH值不变^[24]。本研究中,土壤SOC随着火烧强度呈逐渐降低的趋势,尤其是重度火烧与其他火烧强度差异显著,说明重度火烧严重影响了土壤有机碳的输入。该研究结果与曾素平等^[23]和王毅雯

等^[5]的研究结果一致,但是与冉益倩等^[7]得到的火烧强度对土壤SOC含量无显著影响的研究结果相悖。实验室研究明确表明,土壤有机质在300℃以上开始剧烈燃烧,并在500℃时几乎完全损失^[25]。因此,火烧干扰除了会破坏土壤团聚体外,还可通过直接燃烧活体植被、枯枝落叶和地表凋落物的方式,将其中的有机碳转化成二氧化碳,造成地表有机物质快速损失,加之碳输入减少和物理迁移等多途径导致SOC逐渐降低^[6]。本研究中,TN随着火烧强度增大呈逐渐降低的趋势,且不同火烧强度下的TN均显著低于未火烧。该研究结果与冉益倩等^[7]的研究结果一致,前人研究发现,氮素在超过100℃时即开始通过挥发途径流失,在400℃以上时损失极为严重^[22]。

本研究中的重度火烧,其温度很可能达到 500 °C 以上,这不仅完全焚毁地表凋落物,更对土壤本体的有机碳库和氮库造成了毁灭性打击,进而导致输入土壤中的氮含量进一步减少^[25]。0—20 cm 土层土壤 TP 呈逐渐增加的变化趋势,该研究结果与李炳怡等^[4]、冉益倩等^[7]和谷会岩等^[3]的研究结果相悖。与碳、氮不同,土壤 TP 在火烧后反而增加,这主要归因于高温对有机磷的矿化作用。研究表明,植物凋落物和土壤中的有机磷(如植酸盐)在经历 200~500 °C 的灼烧后,可被快速矿化为可被利用的无机磷酸盐,并富集于灰分中,导致土壤 TP 含量增加^[20]。另外,相关分析发现,未火烧和重度火烧下的土壤 TP 与 pH 值呈显著正相关关系,说明灰烬中的碱性物质短期内提升土壤 pH 值,促进磷酸盐与钙、镁等离子结合,形成稳定的磷酸盐矿物,提升了土壤 TP 含量^[26]。本研究中,AN 随着火烧强度增加而增大,该研究结果与李炳怡等^[4]和冉益倩等^[7]的研究结果相悖。一方面,火烧干扰将燃烧后的植被和凋落物经过高温矿化形成无机氮,灰烬沉降后直接增加表层土壤的速效氮含量^[27]。另一方面,火烧后地温升高、土壤 pH 值可能发生微小变化趋近于中性,促进了硝化细菌活性,加速了铵态氮向硝态氮方向转化,提高了 AN 的生物有效性。

3.3 火烧干扰对土壤生态化学计量比的影响

火烧干扰作为关键环境扰动因素,不仅显著改变植被群落结构,还可通过调节有机质矿化过程和灰分输入机制,深刻影响着土壤碳氮磷等关键元素的赋存形态及其生态化学计量比。这种双重调控作用,构成了生态系统物质循环的重要驱动力^[6]。本研究中,土壤 C/N 随着火烧强度增大整体呈现增加趋势,该研究结果与谷会岩等^[3]对大兴安岭偃松-兴安落叶松林土壤养分的结果相悖。这是因为在云南亚热带的云南松为常绿乔木,火烧强度增加时,氮的挥发损失量远超碳,同时木炭的生成与残留显著提高土壤碳的稳定性,加之微生物活动抑制和氮循环失衡,共同导致土壤 C/N 比增大^[28]。而在大兴安岭的寒温带的偃松-兴安落叶松为常绿-落叶混交林,具有丰厚腐殖质层,随着火烧强度增加,碳的净损失速率会超过氮的净损失速率导致 C/N 降低。另外,云南温度适中且降水较多,火烧干扰后,云南松林下灌草快速生长,通过凋落物和根系分泌物补充碳,但氮因缺乏固氮植物和微生物固氮恢复慢,难以补充,C/N 比持续维持高位。大兴安岭气温较低且极端干燥,植被恢复缓慢,凋落物输入少且土壤微生物固氮能力弱,氮几乎无法补充;同时,火烧后裸露的砂质土

壤易受风蚀,导致表层残留的碳进一步流失,C/N 持续降低^[7,29]。相关分析发现,未火烧、轻度火烧和重度火烧 SOC 与 C/N 呈极显著正相关($p < 0.001$),与 TN 无极显著相关关系,而重度火烧 SOC 和 TN 与 C/N 呈极显著正相关关系,说明未火烧或低强度火烧时,地表凋落物部分燃烧后形成木炭等稳定有机碳,增加土壤碳库。而温度较低导致氮的挥发相对较少,TN 变化较小。此时,SOC 的增加主导 C/N 比的上升,导致二者呈极显著正相关。重度火烧条件下,高温导致易分解有机质燃烧,但部分木炭残留使 SOC 得到部分保留,而 TN 在高温条件下铵态氮和硝态氮大量挥发,导致残留的 SOC 和 TN 具有同步性增强,但由于 SOC 在高温下生成气体挥发的速度较慢导致 C/N 比值仍较高^[30]。本研究中,土壤 C/P 和 N/P 随着火烧强度增加整体呈现先减后增的趋势,且在重度火烧达到最低点。低强度火烧促进表层有机质部分分解,将部分有机磷转化为无机磷,短期内提高土壤有效磷含量。然而,SOC 和 TN 的损失较少,导致碳和氮的保留比例高于 P 的释放量,C/P 和 N/P 比值上升。而高强度火烧导致 SOC 和 TN 的损失增多,而磷的挥发需更高温度,损失相对较少。这也体现了火烧强度对土壤养分循环的“阈值效应”^[8]。

本研究主要讨论林火发生 7 个月后研究区土壤理化性质和生态化学计量比的变化,揭示土壤性质和生态化学计量短期内对林火干扰和植被恢复的响应。但是,林火干扰对土壤性质的影响是长期的,长期观测更有利于分析和解释土壤理化性质及生态化学计量的变化机制。

4 结论

(1) 火烧强度增加加剧了云南松林土壤结构破坏与板结。火烧干扰增加了土壤容重,降低了土壤含水量和总孔隙度,且强度愈大效应愈显著。

(2) 土壤 SOC 和 TN 随火烧强度增强逐渐降低,AN 则相反;土壤 pH 值未发生显著变化。

(3) 土壤 C/N 与 SOC、总孔隙度呈正相关,N/P 与 TP 负相关,表明火烧通过影响有机碳稳定性、孔隙结构及磷形态调控元素循环。

(4) 随火烧强度增加,土壤 C/N 升高,C/P 和 N/P 先降后升。重度火烧下,C/P 和 N/P 分别降低 54.60% 和 73.91%,C/N 上升 37.12%,表明高强度火烧导致碳氮失衡与磷相对富集。

(5) 因此,在森林防灭火管理实践中,既要考虑森林火灾对土壤理化性质的影响,又要考虑不同火烧强度和恢复时间对土壤生态化学计量的影响。

参考文献 (References)

- [1] 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[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 1-9.
Sun Long, Dou Xu, Hutong Xin. Research progress on the effects of forest fire on forest ecosystem C-N-P ecological stoichiometry characteristics [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(2): 1-9.
- [2] 赵生龙, 曾凡江, 张波, 等. 火烧和砍伐对疏叶骆驼刺叶片生态化学计量特征的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 84-89.
Zhao Shenglong, Zeng Fanjiang, Zhang Bo, et al. Effects of burning and cutting on leaf ecological stoichiometry characteristics of *Alhagi sparsifolia* [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 84-89.
- [3] 谷会岩, 金屿崧, 张芸慧, 等. 林火对大兴安岭偃松-兴安落叶松林土壤养分的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(7): 48-54.
Gu Huiyan, Jin Yusong, Zhang Yunhui, et al. Effects of forest fire on soil nutrients of Ass. *Pinus pumila-Larix gmelinii* forest in Great Xing'an Mountains [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(7): 48-54.
- [4] 李炳怡, 刘冠宏, 李伟克, 等. 不同火强度对河北平泉油松林土壤有机碳及土壤养分影响[J]. 生态科学, 2018, 37(4): 35-44.
Li Bingyi, Liu Guanhong, Li Weike, et al. Effects of different wildfire intensities on soil organic carbon and soil nutrients in *Pinus tabulaeformis* forests in Pingquan County, Hebei Province [J]. Ecological Science, 2018, 37(4): 35-44.
- [5] 王毅雯, 李小英, 朱腾达, 等. 不同火烧强度对滇中云南松林土壤有机碳组分的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(6): 89-97.
Wang Yiwen, Li Xiaoying, Zhu Tengda, et al. Effects of fire intensity on soil organic carbon fraction of *Pinus yunnanensis* forest in central Yunnan Province [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(6): 89-97.
- [6] 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[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 103-110.
Sun Long, Zhao Jun, Hu Haiqing. Effect of moderate fire disturbance on soil physical and chemical properties of *Betula platyphylla-Larix gmelinii* mixed forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(2): 103-110.
- [7] 冉益倩, 周俊, 张茜彧, 等. 火烧强度对西南亚热带林地土壤理化性质的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(9): 2796-2804.
Ran Yiqian, Zhou Jun, Zhang Qiyu, et al. Effects of burning intensity on soil chemical and physical properties in southwest subtropical forests [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(9): 2796-2804.
- [8] 孙龙, 包满意, 胡同欣, 等. 火烧强度对白桦枝叶生态化学计量特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(3): 64-69.
Sun Long, Bao Manyi, Hutong Xin, et al. Effects of fire intensity on ecological stoichiometric characteristics of twigs and leaves of *Betula platyphylla* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(3): 64-69.
- [9] 刘俊雁, 董廷发. 云南松形态和叶片碳氮磷化学计量及其海拔变化特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 139-145.
Liu Junyan, Dong Tingfa. Morphology and leaf C, N and P stoichiometry of *Pinus yunnanensis* and their elevational variations [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 139-145.
- [10] 张佳鑫, 李一萱, 曹建生, 等. 太行山区不同林龄油松叶片-枝条-土壤生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2024, 35(11): 2966-2974.
Zhang Jiaxin, Li Yixuan, Cao Jiansheng, et al. Ecological stoichiometry in leaves, branches, and soils of *Pinus tabulaeformis* at different stand ages in the Taihang Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(11): 2966-2974.
- [11] Li Hailiang, Xu Fuli, et al. Seasonal variations in carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and C:N:P stoichiometry in the leaves of differently aged *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantations [J]. Forests, 2017, 8(10): 373.
- [12] 林阳. 火后恢复时间对大兴安岭植物-土壤-酶化学计量特征的影响[D]. 黑龙江哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
Lin Yang. Time since fire affect ecological stoichiometry of plant-soil-enzymes stoichiometric characteristics in the Da Xing'anling Mountains [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2024.
- [13] Hu Mengjun, Wan Shiqiang. Effects of burning and nitrogen addition on foliar stoichiometry and nutrient resorption in a subtropical-temperate ecotonal forest [J]. Forest Ecology and Management, 2024, 572: 122284.
- [14] Wang Yuzhe, Xu Zhihong, Zhou Qixing. Impact of fire on soil gross nitrogen transformations in forest ecosystems [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(6): 1030-1040.
- [15] 张文文, 闫想想, 王秋华, 等. 计划烧除对云南松林地表可燃物火行为的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(5): 69-76.
Zhang Wenwen, Yan Xiangxiang, Wang Qiuhua, et al. Effects of prescribed burning on fire behavior of surface fuel in *Pinus yunnanensis* forest land [J]. Journal of

- Beijing Forestry University, 2022, 44(5):69-76.
- [16] 朱腾达, 李小英, 王毅雯, 等. 云南松林火烧迹地初期植被更新特征及环境解释[J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(10):69-76.
Zhu Tengda, Li Xiaoying, Wang Yiwen, et al. Characteristics of early vegetation regeneration and environmental interpretation in burned *Pinus yunnanensis* forest [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(10):69-76.
- [17] 高钰, 索奥丽, 高敏, 等. 不同火烈度对四川泸山林场云南松林土壤有机碳组分的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(22):9281-9293.
Gao Yu, Suo Aoli, Gao Min, et al. Effects of different fire severities on soil organic carbon components of *Pinus yunnanensis* forest in Lushan forest farm, Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22):9281-9293.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 胡同欣, 耿庆焯, 李光新, 等. 不同火灾强度下兴安落叶松林土壤抗剪强度变化及影响因素[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(10):36-45.
Hutong Xin, Geng Qingye, Li Guangxin, et al. Variation of soil shear strength in *Larix gmelinii* forests under different fire severities and its effecting factors [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(10):36-45.
- [20] Giovannini G, Lucchesi S. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities [J]. Soil Science, 1997, 162(7):479-486.
- [21] Agbeshie A A, Abugre S, Atta-Darkwa T, et al. A review of the effects of forest fire on soil properties [J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(5):1419-1441.
- [22] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: A review [J]. Oecologia, 2005, 143(1):1-10.
- [23] 曾素平, 刘发林, 赵梅芳, 等. 火干扰强度对亚热带四种森林类型土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(1):233-246.
Zeng Suping, Liu Falin, Zhao Meifang, et al. Effects of fire disturbance intensities on soil physicochemical properties of four subtropical forest types [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1):233-246.
- [24] 赵彬, 孙龙, 胡海清, 等. 兴安落叶松林火后对土壤养分和土壤微生物生物量的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3):450-459.
Zhao Bin, Sun Long, Hu Haiqing, et al. Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of *Larix gmelinii* forest in Autumn [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3):450-459.
- [25] 朱光艳, 胡同欣, 李飞, 等. 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[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(3):88-96.
Zhu Guangyan, Hutong Xin, Li Fei, et al. Soil nitrogen mineralization rate and its impact factors in *Larix gmelinii* forest after different years fire disturbance [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(3):88-96.
- [26] 索奥丽, 杜建华, 高钰, 等. 林火对云南松林地表可燃物负荷量及区域碳排放量的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(2):325-332.
Suo Aoli, Du Jianhua, Gao Yu, et al. Effects of forest fire on surface fuel loading and regional carbon emission of *Pinus yunnanensis* forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(2):325-332.
- [27] 韦自强, 郑磊, 贺怀宇, 等. 大兴安岭重度火烧迹地不同林龄落叶松人工林土壤团聚体养分特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1):347-356.
Wei Ziqiang, Zheng Lei, He Huaiyu, et al. Nutrient characteristics of soil aggregates in *Larix gmelinii* plantations of different forest ages from seriously burned area in Great Khingan Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):347-356.
- [28] 孙龙, 任玥霄, 窦旭, 等. 火干扰对棋盘山油松林土壤碳氮及驱动因子的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(7):120-128.
Sun Long, Ren Yuexiao, Dou Xu, et al. Effects of fire disturbance on soil carbon, nitrogen and driving factors of *Pinus tabulaeformis* forests in Qipan Mountain [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(7):120-128.
- [29] Zhou Xuan, Sun Hui, Pumpanen J, et al. The impact of wildfire on microbial C:N:P stoichiometry and the fungal-to-bacterial ratio in permafrost soil [J]. Biogeochemistry, 2019, 142(1):1-17.
- [30] 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 等. 森林火灾对马尾松次生林土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11):2141-2152.
Luo Sisheng, Luo Bizhen, Wei Shujing, et al. Effects of forest fires on soil physical and chemical properties in secondary forest of *Pinus massoniana* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(11):2141-2152.