

引用格式: 龚俊伟, 陈思帆, 冯浩育, 等. 不同火烈度对油松林林下植被物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(2): 405-415. GONG Junwei, CHEN Sifan, FENG Haoyu, et al. Effects of different fire severities on understory vegetation species diversity and soil physicochemical properties in *Pinus tabuliformis* forests[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(2): 405-415.

不同火烈度对油松林林下植被物种多样性和土壤理化性质的影响

龚俊伟^{1,2}, 陈思帆^{1,2}, 冯浩育^{1,2}, 索奥丽^{1,2}, 童大龙^{1,2}, 陈 锋^{1,2}, 刘晓东^{1,2}

(1. 北京林业大学 森林草原火灾风险防控应急管理重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 森林资源生态过程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 【目的】探讨不同火烈度对林下植被物种多样性和土壤理化性质的影响, 对火烧迹地森林生态系统恢复及可持续经营具有重要意义。【方法】以山西太岳山油松 *Pinus tabuliformis* 林火烧后 4 a 的迹地为研究对象, 采用野外调查和室内分析相结合的方法, 研究不同火烈度(低烈度火烧、中烈度火烧、高烈度火烧和未过火)样地林下植被物种多样性和土壤理化性质的差异性和变化趋势, 以及火后物种多样性对土壤理化性质的短期响应。【结果】①共记录维管束植物 50 种, 分属于 20 科 43 属, 草本层低烈度火烧样地和灌木层中烈度火烧样地物种数高于未过火样地。②灌木层中, Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Margalef 指数从大到小依次均为中烈度火烧样地、高烈度火烧样地、未过火样地、低烈度火烧样地, Pielou 指数从大到小依次为高烈度火烧样地、中烈度火烧样地、未过火样地、低烈度火烧样地。草本层中, Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数在低烈度火烧样地较未过火样地分别显著增加了 21.38% 和 47.55% ($P < 0.05$), Simpson 指数和 Pielou 指数在高烈度火烧样地较未过火样地分别显著增加了 20.00% 和 19.40% ($P < 0.05$)。③不同火烈度极显著影响土壤理化性质 ($P < 0.01$), 土壤含水率、总孔隙度随着火烈度升高而下降, 全磷、全钾质量分数随着火烈度升高呈先下降再上升的变化趋势, 在中烈度火烧样地最低。土壤总孔隙度以及土壤有机碳、全氮、速效钾质量分数在不同火烈度样地均随土层的加深而降低。④冗余分析结果表明: 0~10 cm 土层中的土壤含水率、毛管孔隙度、全钾质量分数和 10~20 cm 土层中的速效磷质量分数、土壤总孔隙度、速效钾质量分数是显著影响灌木层、草本层物种多样性的土壤因子。【结论】低烈度火烧、中烈度火烧对油松林群落的植被更新具有一定促进作用, 土壤含水率和速效磷等理化性质是驱动火后物种多样性分异的关键因子。图 2 表 4 参 48

关键词: 火烈度; 油松林; 林下植被; 物种多样性; 土壤理化性质; 植被更新

中图分类号: S762.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)02-0405-11

Effects of different fire severities on understory vegetation species diversity and soil physicochemical properties in *Pinus tabuliformis* forests

GONG Junwei^{1,2}, CHEN Sifan^{1,2}, FENG Haoyu^{1,2}, SUO Aoli^{1,2}, TONG Dalong^{1,2}, CHEN Feng^{1,2}, LIU Xiaodong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Forest and Grassland Fire Risk Prevention of Ministry of Emergency Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Forest Resources and Ecosystem Processes, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The objective is to investigate the effects of different fire severities on understory vegetation species diversity and soil physicochemical properties, which is of great significance for the restoration and sustainable management of forest ecosystems in burnt areas. [Method] The study focused on the burnt area 4 years after the fire in *Pinus tabuliformis* forests in Taiyue Mountain of Shanxi Province. A

收稿日期: 2025-04-12; 修回日期: 2025-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32271890)

作者简介: 龚俊伟 (ORCID: 0009-0007-0309-6799), 从事森林防火研究。E-mail: gongjunwei@bjfu.edu.cn。通信作者: 刘晓东 (ORCID: 0009-0002-5520-9808), 教授, 博士, 从事森林防火研究。E-mail: xd_liu@bjfu.edu.cn

combination of field investigation and indoor analysis was used to examine the differences and trends in understory vegetation species diversity and soil physicochemical properties in plots with different fire severities (low severity fire, medium severity fire, high severity fire, and no fire), as well as the short-term response of post-fire species diversity to physicochemical properties. **[Result]** (1) A total of 50 vascular plant species were recorded, belonging to 20 families and 43 genera. After low-severity fire in the herb layer and medium severity fire in the shrub layer, the number of species was higher than that in unburnt areas. (2) In the shrub layer, the Shannon-Wiener index, Simpson index, and Margalef index ranging from large to small were as follows: medium-severity fire plots, high-severity fire plots, unburnt plots, and low-severity fire plots, while the Pielou index in descending order was high-severity fire plots, medium-severity fire plots, unburnt plots, and low-severity fire plots. In the herb layer, the Shannon-Wiener and Margalef indices significantly increased by 21.38% and 47.55% ($P < 0.05$) in the low-severity fire plots compared to unburnt plots, while the Simpson and Pielou indices significantly increased by 20.00% and 19.40% ($P < 0.05$) in the high-severity fire plots compared to unburnt plots. (3) Different fire severities significantly ($P < 0.01$) affected soil physicochemical properties. Soil moisture content and total porosity decreased with increasing fire severity. Mass fraction of total phosphorus and potassium showed a trend of first decreasing and then increasing with the increase of fire severity, reaching its lowest point in medium-severity fire plots. Soil total porosity, soil organic carbon, total nitrogen and available potassium decreased with deepening of soil layers in different fire severity plots. (4) The redundancy analysis revealed that soil moisture content, capillary porosity, and total potassium mass fraction in the 0–10 cm layer, along with available phosphorus mass fraction, total porosity, and available potassium mass fraction in the 10–20 cm layer, were significant soil factors affecting species diversity in the shrub and herb layers. **[Conclusion]** Low severity and medium severity fires promote vegetation regeneration in *P. tabuliformis* forests, and soil moisture content and available phosphorus are key factors driving post fire species diversity differentiation. [Ch, 2 fig. 4 tab. 48 ref.]

Key words: fire severity; *Pinus tabuliformis* forest; understory vegetation; species diversity; soil physicochemical properties; vegetation regeneration

林火作为影响森林生态系统的关键干扰因子，直接或间接地影响生物群落的多样性、稳定性和动态变化以及非生物环境的结构和功能^[1-2]。火烈度 (fire severity) 可以用来衡量林火对森林生态系统的破坏程度，不同火烈度对森林生态系统中的植被演替、碳氮循环、土壤养分的动态变化等一系列生态过程的影响具有差异性，是森林景观异质性的重要驱动因素之一^[3-4]。近年来，受全球气候变暖和人类活动等因素的影响，森林火灾发生频率和强度增加，对生态环境与人类生命财产安全造成重大损失^[5]。

林下植被是森林生态系统的重要组成部分，其物种多样性反映了物种演化的空间范围和对特定环境的生态适应能力^[6]。物种多样性指数能有效表征群落在组成、结构、功能和动态等方面的异质性^[7]，是衡量火烧迹地森林群落恢复状况的有效指标^[8]。然而，不同火烈度对林下植被物种多样性的影响，目前尚未有统一的研究结论。部分研究表明：低、中烈度火烧有利于促进植物物种多样性的增加和森林结构的更新^[9-12]，但也有研究显示：不同烈度火烧样地的林下植被物种多样性均低于未过火样地^[13-14]，且植物群落稳定性随火烈度增加而降低^[15]。土壤是决定植物生长发育的关键环境因素，是森林生态系统中养分元素转移、转化和储存的场所，影响森林的生态恢复过程^[16]。现有研究指出：不同火烈度对土壤的影响主要体现在土壤结构、酸碱性、有机质、养分有效性和土壤生物活性等一系列物理、化学和生物特性的变化^[17-19]。此外，火后恢复年限^[20]及环境因子^[21]的差异也会影响植被群落物种多样性和土壤理化特征^[22]。“植被-土壤”具有复杂的协同变化作用机制，共同维持着生态系统的动态稳定^[23]。一方面，不同植物对土壤养分的利用情况不同，火后群落物种多样性的改变会驱动土壤性质的改变。另一方面，植物群落组成也会随着火后土壤养分种类及含量的变化而发生转变^[24]。因此，探究火后土壤因子与林下植

物多样性的关系，可为揭示森林生态系统结构与功能的变化机制提供重要依据。

油松 *Pinus tabulaeformis* 是中国特有树种，广泛分布于华北地区，其球果和枝叶富含油脂，极易引发大面积高强度森林火灾^[25]。近年来，华北地区发生的森林火灾主要过火林分就是油松林^[8, 26]。目前，不同火烈度对物种多样性和土壤理化性质变化的影响大多是针对兴安落叶松 *Larix gmelinii*、马尾松 *Pinus massoniana* 等林分的植物群落结构^[13, 27] 或土壤理化性质^[28-32] 等单一特征研究，关于油松林火烧迹地物种多样性和土壤理化性质变化及其相关关系的研究较少，响应机制尚不明确。本研究以山西太岳山不同火烈度油松林火烧迹地为研究对象，旨在探讨不同火烈度下林下植被群落物种组成及物种多样性特征，不同火烈度对油松林不同土层深度土壤理化性质的影响以及火后林下植被物种多样性对土壤理化性质的响应，以期对油松林火烧迹地森林生态系统恢复及可持续经营提供科学理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省沁源县太岳山北麓 (36°69'~36°84'N, 112°28'~112°37'E)，平均海拔为 1 296.0 m，属暖温带半湿润大陆性季风气候，年平均气温为 8.7 °C，年降水量为 463.3~656.7 mm，年平均无霜期为 90.0~170.0 d。土壤以淡褐土为主。2019 年 3 月 29 日，研究区发生森林火灾，过火面积达 667 hm²^[2, 25]。过火区是以油松和蒙古栎 *Quercus mongolica* 为优势种的天然次生林，灌木层优势种主要为绣线菊 *Spiraea salicifolia*、胡枝子 *Lespedeza bicolor*、山杨 *Populus davidiana*、虎榛子 *Ostryopsis davidiana* 等，草本层主要优势种为细叶薹草 *Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*、小红菊 *Chrysanthemum chanetii* 等^[8]。

1.2 样地设置

2023 年 6 月，在对太岳山火烧迹地进行全面踏查的基础上，依据典型性和代表性原则，选择林分和立地条件基本相似、人为干扰较少且具有代表性的地段，设置低烈度火烧样地 (L)、中烈度火烧样地 (M)、高烈度火烧样地 (H) 以及未过火样地 (U, 对照) 各 3 块，共 12 块，样地大小为 20 m×20 m。详细记录样地的基本信息 (表 1)，包括树高、树木熏黑高度、郁闭度、海拔、坡度、坡位、坡向等。同时根据调查样地内各存活树种整株高度以及树木的死亡数量，计算树木的死亡率。依据火烧后树木平均熏黑高度与树高的比值、树木死亡比例 (烧死木数量/树木总量)，参照陈思帆等^[33] 的划分标准划分火烈度。

表 1 研究样地基本情况

Table 1 Basic characteristics of the sampling plots

样地编号	平均树高/m	平均熏黑高度/m	树木死亡率/%	郁闭度	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	坡位
U1	8.93±1.86	—	—	0.70	1 240	30	NE 51	上坡
U2	9.10±2.59	—	—	0.65	1 250	30	NE 50	上坡
U3	9.35±3.18	—	—	0.63	1 250	37	NE 22	上坡
L1	8.64±1.86	0.76±0.48	0	0.55	1 241	25	NE 47	上坡
L2	8.74±1.55	1.43±0.59	8.70	0.60	1 239	32	NE 22	中坡
L3	8.62±1.42	0.90±0.50	0	0.55	1 258	30	NE 45	中坡
M1	9.13±2.88	3.11±1.46	30.95	0.30	1 349	25	NE 30	中坡
M2	8.82±2.80	3.74±1.56	30.00	0.30	1 380	32	NE 42	上坡
M3	8.15±1.07	2.84±0.78	31.48	0.35	1 384	30	NE 45	上坡
H1	7.22±1.26	5.22±0.75	81.48	0.10	1 324	36	NE 60	上坡
H2	8.10±1.30	5.10±0.70	100.00	0.10	1 322	36	NE 60	中坡
H3	8.93±1.38	4.90±0.35	88.00	0.15	1 314	35	E 75	中坡

说明：—表示无此项。平均树高和平均熏黑高度数据为平均值±标准差。U. 未过火样地；L. 低烈度火烧样地；M. 中烈度火烧样地；H. 高烈度火烧样地。1、2、3 表示重复数。NE. 东北；E. 东。

1.3 野外调查和样品采集

在 20 m×20 m 标准样地的中央和四角距边缘 1 m 处各设置 1 个大小为 2 m×2 m 的灌木样方，灌木样方对角设置 2 个 1 m×1 m 的草本样方，总计 60 个灌木样方和 120 个草本样方，详细记录样方内灌木和草本植物的种名、高度、盖度、株数 (丛数) 等指标^[34]。在每个样地内采用五点取样法进行土壤采样：去

除地表覆盖物后挖取土壤剖面,用环刀和铝盒(100 cm³)取0~10、10~20 cm土层的样品,用于测定土壤含水率、毛管孔隙度和总孔隙度。对2个土层的土壤分别取土、混匀、装袋,带回实验室后清除碎石、根系等杂物,自然风干后研磨、过筛,测定土壤养分指标^[26]。

1.4 重要值与物种多样性指数计算

计算不同火烈度样地内灌木和草本层各物种的重要值,反映火后群落中各植物的重要性及适应能力。计算公式为^[35]:重要值=(相对多度+相对频度+相对盖度)/3。

计算不同火烈度样地内灌木和草本层的物种多样性指数,其中,Shannon-Wiener指数能够综合反映物种的丰富度和均匀度,Simpson指数侧重于反映群落物种的优势度,Pielou指数能够衡量物种分布的均匀程度,Margalef指数能够反映物种丰富度,适用于比较不同群落的物种数目差异。本研究采用上述指标综合评估火烧后群落水平物种多样性。具体计算公式详见参考文献[8]。

1.5 土壤理化性质测定

采用烘干法测定土壤含水率(soil water content, SWC),环刀法和浸水法测定土壤毛管孔隙度(capillary porosity, CP)和土壤总孔隙度(soil total porosity, STP)^[29];采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)质量分数,凯氏定氮法测定土壤全氮(total nitrogen, TN)质量分数,钼锑抗比色法测定土壤全磷(total phosphorus, TP)质量分数,碳酸氢钠浸提法测土壤有效磷(available phosphorus, AP)质量分数,火焰光度计法测定土壤全钾(total potassium, TK)质量分数和土壤速效钾(available potassium, AK)质量分数^[36]。

1.6 数据处理分析

使用Excel 2016对数据进行整理,采用R4.2.3中的“vegan”包计算4种多样性指数。使用SPSS 26进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和Waller-Duncan检验,表征不同火烈度间物种多样性指数、土壤理化性质的差异显著性,使用双因素方差分析(two-way ANOVA)研究火烈度、土层深度及其交互作用对土壤理化性质的影响。图表绘制在Excel 2016和Origin 2022中完成。采用Canoco 5.0中的去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)确定适宜的排序模型,其Axis lengths的最大值为 $0.26 < 3$,因此选择基于线性模型的冗余分析(redundancy analysis, RDA)研究灌木层、草本层物种多样性对土壤理化性质的响应^[7,37]。

2 结果与分析

2.1 不同火烈度林下植被群落物种组成及重要值

调查统计出灌木层、草本层中维管束植物共50种,分属于20科43属,其中以菊科Asteraceae、蔷薇科Rosaceae、豆科Fabaceae为主,占植物总种数的52%。比较不同火烈度油松林林下主要物种组成及重要值(表2)可知:不同火烈度下物种数均表现为草本层大于灌木层,草本层低烈度火烧样地和灌木层中烈度火烧样地物种数明显高于未过火样地。草本层的4个样地中,细叶薹草*Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*和小红菊*Chrysanthemum chanetii*的重要值均列前2位,低烈度火烧样地物种数量高于其他样地。灌木层中,在未过火样地和中烈度火烧样地中虎榛子*Ostryopsis davidiana*的重要值较大,分别为0.46、0.32,低烈度火烧样地中绣线菊*Spiraea salicifolia*的重要值最大,为0.62,而高烈度火烧样地中山杨*Populus davidiana*的重要值最大,为0.35,中烈度火烧样地中物种数量高于其他样地。

2.2 不同火烈度林下的物种多样性特征

不同火烈度对林下植被物种多样性指数的影响不同(图1)。在灌木层中,Shannon-Wiener指数、Simpson指数、Margalef指数从大到小依次均为中烈度火烧样地、高烈度火烧样地、未过火样地、低烈度火烧样地;高烈度火烧样地的Pielou指数比低烈度火烧样地增加了53.50%。在草本层中,低烈度火烧样地和高烈度火烧样地的Shannon-Wiener指数比未过火样地分别显著增加了21.64%和20.72% ($P < 0.05$),高烈度火烧样地的Simpson指数显著高于未过火样地和中烈度火烧样地 ($P < 0.05$)。低烈度火烧样地的Margalef指数和高烈度火烧样地的Pielou指数显著高于其他样地 ($P < 0.05$)。

2.3 不同火烈度下土壤理化性质特征

由表3和表4可知:油松林土壤理化性质在不同火烈度下均呈极显著差异 ($P < 0.01$)。土壤含水率、

表 2 不同火烈度林下植被主要植物种类及重要值

Table 2 Main plant species and important values of understory vegetation under different fire severity

层次	火烈度	主要植物种类及重要值	物种数
草本层	未过火样地	细叶薹草(0.56)、小红菊(0.10)、双花堇菜(0.06)、苍术(0.05)	11
	低烈度火烧样地	细叶薹草(0.38)、小红菊(0.20)、香青(0.09)、艾(0.07)	18
	中烈度火烧样地	细叶薹草(0.60)、小红菊(0.08)、一年蓬(0.05)、白茅(0.05)	13
	高烈度火烧样地	细叶薹草(0.42)、小红菊(0.21)、斜茎黄芪(0.06)、香青(0.06)	14
灌木层	未过火样地	虎榛子(0.46)、绣线菊(0.38)、胡枝子(0.09)、黄刺玫(0.06)	4
	低烈度火烧样地	绣线菊(0.62)、虎榛子(0.31)、胡枝子(0.04)、黄刺玫(0.02)	4
	中烈度火烧样地	虎榛子(0.32)、胡枝子(0.18)、绣线菊(0.10)、蒙古栎(0.10)	12
	高烈度火烧样地	山杨(0.35)、虎榛子(0.32)、绣线菊(0.18)、覆盆子(0.05)	7

说明：括号中的数据为重要值。细叶薹草 *Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*；小红菊 *Chrysanthemum chanetii*；双花堇菜 *Viola biflora*；苍术 *Atractylodes lancea*；香青 *Anaphalis sinica*；艾 *Artemisia argyi*；一年蓬 *Erigeron annuus*；白茅 *Imperata cylindrica*；斜茎黄芪 *Astragalus laxmannii*；虎榛子 *Ostryopsis davidiana*；绣线菊 *Spiraea salicifolia*；胡枝子 *Lespedeza bicolor*；黄刺玫 *Rosa xanthina*；蒙古栎 *Quercus mongolica*；山杨 *Populus davidiana*；覆盆子 *Rubus idaeus*。

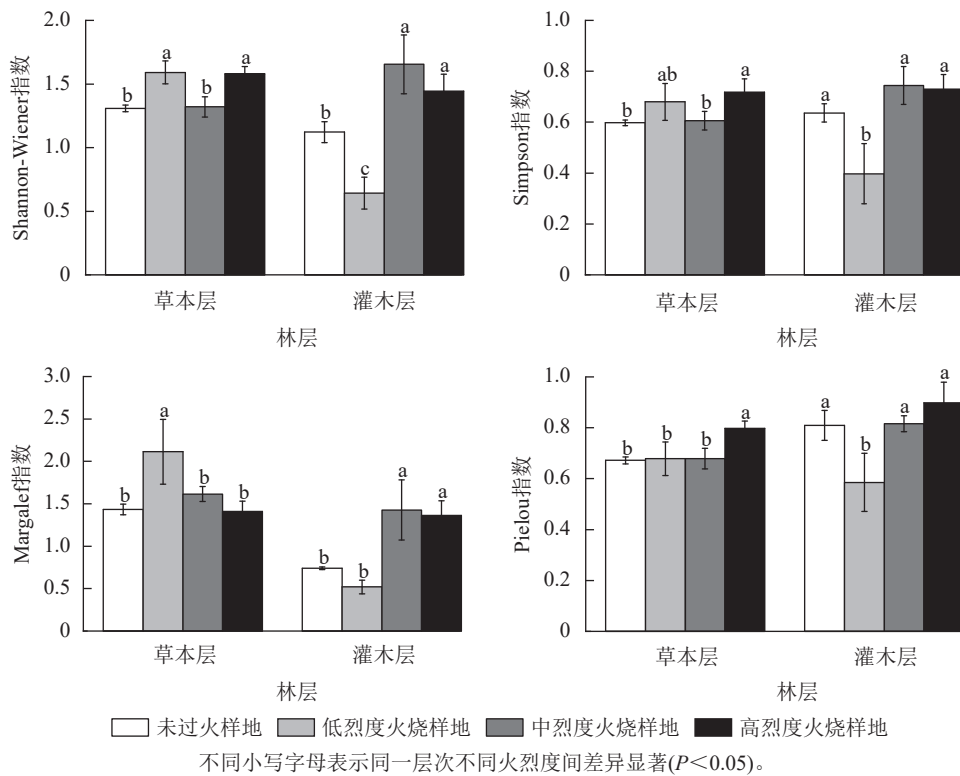


图 1 火烈度对林下植被物种多样性指数的影响

Figure 1 Effects of fire severity on species diversity index of understory vegetation

总孔隙度随着火烈度的升高而递减。与未过火样地相比，高烈度火烧样地显著降低了土壤含水率、毛管孔隙度和总孔隙度 ($P < 0.05$)。土壤全磷、全钾质量分数随着火烈度升高而呈现先下降再上升的变化趋势，在中烈度火烧样地达到最低。在 0~10 cm 土层，土壤有机碳、全氮、有效磷质量分数随着火烈度升高而呈现先上升再下降的变化趋势，土壤有机碳、全氮质量分数在中烈度火烧样地最高，土壤有效磷质量分数在低烈度火烧样地最高。中烈度火烧样地不同土层的速效钾质量分数相比未过火样地显著增加了 74.56%，62.62% ($P < 0.05$)。土层深度对土壤有机碳、全氮、速效钾质量分数具有极显著影响 ($P < 0.01$)，土壤总孔隙度、土壤有机碳、全氮、速效钾质量分数在不同火烈度影响下均随土层的加深而降低。土层深度与火烈度的交互作用，仅对全钾和土壤有机碳有显著影响 ($P < 0.05$)。

表3 不同火烈度对油松林土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of fire severity on soil physicochemical properties in *P. tabulaeformis* forests

样地	土壤含水率/%		土壤毛管孔隙度/%		土壤总孔隙度/%	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
未过火样地	14.27±1.89 Aa	12.13±0.70 Aa	42.33±3.21 Aa	40.33±1.15 Aa	50.80±2.71 Aa	48.43±0.15 Aa
低烈度火烧样地	10.63±0.93 Ab	9.13±0.32 Bb	38.00±3.61 Aab	35.00±4.00 Aab	48.82±5.32 Aa	46.73±2.27 Aab
中烈度火烧样地	6.93±0.45 Ac	7.77±0.38 Ab	38.00±4.00 Aab	39.33±3.51 Aa	46.47±1.40 Aab	45.70±1.06 Ab
高烈度火烧样地	4.23±1.27 Ad	4.33±1.38 Ac	34.33±2.08 Ab	33.67±1.15 Ab	41.60±1.51 Ab	40.93±1.10 Ac
样地	土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)		土壤全氮/(g·kg ⁻¹)		土壤全磷/(g·kg ⁻¹)	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
未过火样地	10.34±1.23 Ab	9.74±2.47 Aa	0.79±0.08 Ab	0.72±0.20 Aa	0.72±0.02 Aa	0.69±0.01 Aa
低烈度火烧样地	10.78±2.30 Ab	7.75±1.97 Aa	0.81±0.13 Ab	0.58±0.17 Aa	0.64±0.04 Ab	0.68±0.07 Aa
中烈度火烧样地	20.41±2.02 Aa	11.50±1.78 Ba	1.23±0.23 Aa	0.72±0.06 Ba	0.26±0.04 Ac	0.22±0.01 Ab
高烈度火烧样地	9.85±0.52 Ab	7.11±1.45 Ba	0.62±0.07 Ab	0.45±0.03 Ba	0.65±0.04 Ab	0.61±0.07 Aa
样地	土壤全钾/(g·kg ⁻¹)		土壤有效磷/(mg·kg ⁻¹)		土壤速效钾/(mg·kg ⁻¹)	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
未过火样地	22.69±0.09 Aa	22.11±0.46 Aa	4.55±0.88 Aab	4.00±1.14 Ab	63.40±6.95 Ab	52.06±5.31 Ab
低烈度火烧样地	18.95±0.50 Ac	19.46±0.38 Ac	5.14±1.69 Aa	7.65±1.00 Aa	56.31±5.80 Abc	39.30±10.60 Ab
中烈度火烧样地	16.11±0.53 Ad	15.24±0.48 Ad	4.13±0.77 Aab	3.26±2.20 Ab	110.67±10.50 Aa	84.66±17.19 Aa
高烈度火烧样地	20.78±0.36 Ab	20.81±0.40 Ab	2.89±1.23 Ab	3.90±0.89 Ab	47.80±1.23 Ac	39.30±3.17 Bb

说明：不同大写字母表示相同火烈度不同土层深度间差异显著 ($P<0.05$)；不同小写字母表示相同土层深度不同火烈度间差异显著 ($P<0.05$)。

表4 土层深度和火烈度对土壤理化性质的双因素方差分析

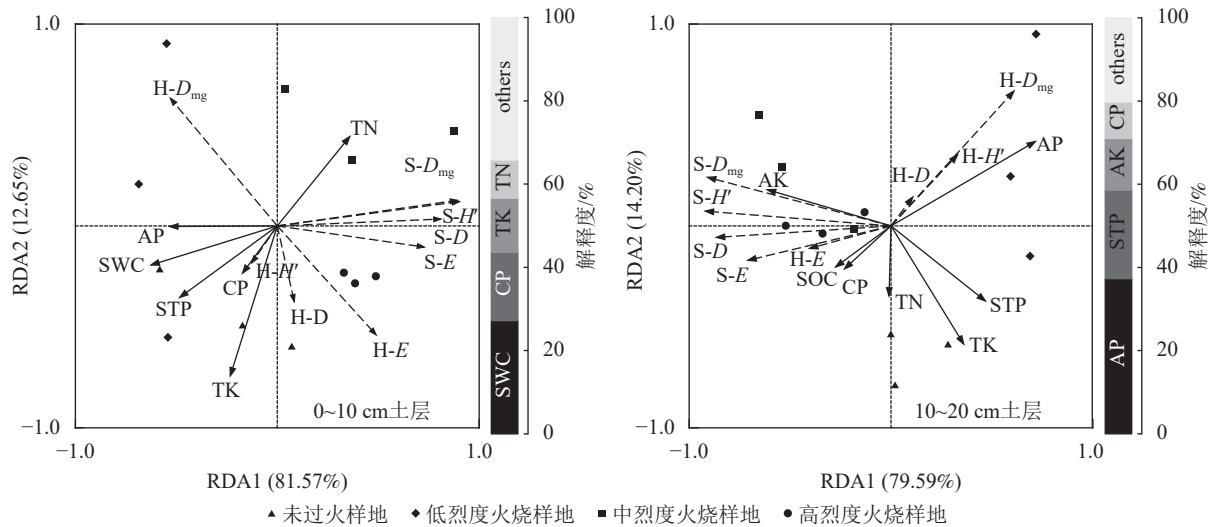
Table 4 Two-way ANOVA of soil depth and fire severity on soil physicochemical properties

土壤理化性质	土层深度		火烈度		土层深度×火烈度	
	F	P	F	P	F	P
土壤含水率	2.455	0.137	77.206	<0.001**	2.552	0.092
土壤毛管孔隙度	0.754	0.398	6.266	0.005**	0.564	0.647
土壤总孔隙度	2.224	0.155	13.129	<0.001**	0.199	0.895
土壤有机碳	26.583	<0.001**	21.154	<0.001**	5.783	0.007**
土壤全氮	18.785	<0.001**	10.281	<0.001**	2.909	0.067
土壤全磷	1.162	0.268	151.922	<0.001**	1.252	0.324
土壤全钾	1.781	0.201	282.082	<0.001**	3.247	0.050*
土壤有效磷	0.970	0.341	6.420	0.005**	2.140	0.135
土壤速效钾	18.530	0.001**	45.810	<0.001**	0.371	1.700

说明：*表示差异显著 ($P<0.05$)；**表示差异极显著 ($P<0.01$)。

2.4 土壤理化特征与物种多样性指数的 RDA 分析

由于 0~10 cm 土层的土壤有机碳、全磷、速效钾与 10~20 cm 土层的土壤含水率、全磷的方差膨胀因子 (VIF) 均大于 10，具有多重共线性，因此将其剔除后再进行 RDA 分析。从图 2 可见：在 0~10 cm 土层中，RDA 前 2 轴对物种多样性和土壤理化性质关系的累计解释量分别为 81.57% 和 12.65%。土壤含水率、毛管孔隙度、全钾能够更好地解释灌木层、草本层物种多样性差异。第 1 轴主要反映了土壤含水率的变化，第 2 轴主要反映了土壤全钾的变化。在 10~20 cm 土层中，第 1 轴和第 2 轴分别解释了 79.59% 和 14.20% 的累计方差，土壤有效磷、总孔隙度、速效钾能够更好地解释灌木层、草本层物种多样性差异。第 1 轴主要反映了土壤有效磷的变化，第 2 轴主要反映了全钾的变化。



▲ 未过火样地 ◆ 低烈度火烧样地 ■ 中烈度火烧样地 ● 高烈度火烧样地
 H-H'. 草本层Shannon-Wiener指数; H-D. 草本层Simpson指数; H-E. 草本层Pielou指数; H-D_{mg}. 草本层Margalef指数; S-H'. 灌木层Shannon-Wiener指数; S-D. 灌木层Simpson指数; S-E. 灌木层Pielou指数; S-D_{mg}. 灌木层Margalef指数. SWC. 土壤含水率; CP. 土壤毛管孔隙度; STP. 土壤总孔隙度; SOC. 土壤有机碳; TN. 土壤全氮; TP. 土壤全磷; AP. 土壤有效磷; TK. 土壤全钾; AK. 土壤速效钾; others, 其他。虚线箭头表示物种多样性指数, 实线箭头表示土壤理化因子。右侧颜色标尺区分了解释度排名前4的土壤因子与其余因子。右侧纵轴表示各土壤理化因子对物种多样性指数的解释度贡献比例(%)。

图 2 物种多样性指数对 0~10 和 10~20 cm 土层土壤理化性质的多变量响应

Figure 2 Multivariate response of species diversity index to soil physicochemical properties at 0-10 and 10-20 cm depths

3 讨论

3.1 不同火烈度对油松林林下植被群落物种组成及物种多样性的影响

本研究发现：不同火烈度的油松林灌木层、草本层物种组成和数量分布特征不同，林下植被组成易受火灾的生态干扰，这与武秀娟等^[38]和王绪高等^[20]的研究结果相似。本研究中，低烈度火烧后，灌木层物种多样性指数均低于未过火样地，而草本层相反，这可能是低烈度火烧多表现为地表火，对林地危害较小，乔木冠层的郁闭度变化不大，火烧破坏了草本层原有优势物种的优势地位，为其他 1 年生草本植物的生长发育创造了有利条件^[11,37]。草本植物的生长速率与恢复能力较灌木植物快，因此低烈度火烧后初期灌木层植物的物种多样性降低，草本层植物的物种多样性增加^[27]。中烈度火烧样地的灌木层 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数与 Margalef 指数均高于其他火烈度样地，表明中度火干扰有利于灌木层植物更新。草本层经中烈度火烧后的物种多样性指数仅略高于未过火样地，且无显著差异。可能是中烈度火烧后，乔木层郁闭度减小，林内环境的异质性增加，植被生长空间释放，部分裸露地表有利于种子的萌发以及外来物种的入侵，灌木层植物还通过其枝芽萌生新植株^[32]。同时，灌木层植物相比草本层植物具有一定的高度优势，光照更强，生长更快，最先占据生长空间，抑制草本层植物生长^[39]。因此，中烈度火烧使得灌木层物种多样性指数显著增加，而草本层物种多样性的增加不明显。高烈度火烧样地的灌木层、草本层物种多样性指数与未过火样地相比显著增加，这是由于高烈度火烧会显著改变原有群落组成，破坏灌木层、草本层结构的稳定性，为外来物种定居和扩散提供了机会，从而提高了恢复初期整个植被层的物种多样性^[40]。

3.2 火烈度对油松林土壤理化性质的影响

本研究表明：土壤含水率、毛管孔隙度、总孔隙度均随着火烈度的增加而显著降低。林火能够通过燃烧有机质和改变黏土矿物来影响土壤结构^[41]，导致土壤颗粒间黏结力增强，形成更紧密的土壤结构，大孔隙减少，土壤持水能力下降。高烈度火烧产生的更高温度对土壤结构的破坏性更为严重^[42-43]。本研究中，低烈度、中烈度火烧后 0~10 cm 土层的土壤有机碳质量分数显著增加，可能是因为有机物未完全燃烧、燃烧不完全的生物质分解以及灰分增加导致土壤表层的热解碳增加。高烈度火烧后有机物充分燃烧，碳矿化速率加快挥发等造成土壤有机碳质量分数降低^[17]。土壤全氮的变化趋势表现出与土壤有机碳相似的规律。氮的挥发温度低，高烈度火烧会将凋落物及有机质全部烧毁，导致大部分氮与碳元素彻底流失到大气中，无法归还土壤^[28]。本研究表明：火烧显著降低了土壤全磷质量分数，在中烈度火烧后达

到最低。这可能是因为土壤中的磷大部分是以有机态积累并储藏,由于植被的覆盖降低,火烧后土壤中的磷极易发生流失^[1]。曾素平等^[31]、刘发林等^[32]研究表明:土壤全钾质量分数随火烈度增加而升高。然而,本研究发现火烧显著降低了土壤全钾质量分数,特别是中烈度火烧。这一现象可能与火后温度升高加速钾的释放有关,高温可能会使部分钾转化为难以溶解的矿物形态固定在土壤中,减少了其流失^[44]。土壤全磷质量分数随火烈度增加呈先升高后降低的趋势,仅低烈度火烧样地高于未过火样地。低烈度火烧促进有机磷的矿化作用,使土壤中速效磷增加。中烈度火烧、高烈度火烧的高温可能导致部分磷转化为钙磷、铁磷等难溶矿物,加之火后灰分因径流和侵蚀流失,导致有效磷减少^[45]。中烈度火烧后释放了更多水溶性钾,高烈度火烧产生的高温不仅加速了钾的释放,还可能导致部分钾转化为不溶性矿物或挥发,导致速效钾显著减少。因此,中烈度火烧样地速效钾高于其他火烧烈度样地,这与孙明学等^[46]结果一致。此外,在本研究中,土层深度对土壤有机碳、全氮、速效钾具有极显著影响,且土壤总孔隙度、有机碳、全氮、速效钾在不同火烈度火烧影响下均随土层的加深而降低。这是因为随着土层深度的增加,土壤中根系活动受限、微生物活性降低以及土壤的侵蚀作用不断加强^[47]。

3.3 林下植被物种多样性对土壤理化性质的响应

火后植被恢复影响着土壤的发育,土壤物理结构及化学性质的变化又一定程度影响群落物种多样性^[10]。本研究冗余分析表明:0~10 cm 土层的土壤含水率、毛管孔隙度、全钾和 10~20 cm 土层的土壤有效磷、总孔隙度、速效钾能够更好地解释灌木层、草本层物种多样性差异。在灌木层、草本层,适宜的土壤含水率有助于植物的生长和物种多样性的维持。此外,土壤的通气性和排水性对于植物根系的生长至关重要,良好的土壤结构能够促进根系的扩展并提高根系氧气的供应水平,进而影响植物的生长和物种多样性。钾和磷在植物的生长过程中起着至关重要的作用^[48]。钾是植物生长的必需元素,土壤钾质量分数增长可促进植物的生长发育,使物种多样性提升^[11],磷则是植物能量传递和根系发育的重要元素。灌木和草本植物对土壤的需求有所不同,草本植物往往更依赖表层土壤中的水分和速效养分,灌木植物具有更深的根系,能够从较深的土层中获取养分。

4 结论

研究表明:不同火烈度显著影响山西油松林林下植被物种多样性及土壤理化性质。草本层低烈度火烧样地和灌木层中烈度火烧样地物种数显著高于未过火样地,灌木层的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Margalef 指数均在中烈度火烧样地达到最高,草本层的 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数低烈度火烧样地较未过火样地分别显著增加了 21.38% 和 47.55%。土壤含水率、总孔隙度随着火烈度升高而下降,土壤全磷、全钾质量分数在中烈度火烧样地达到最低。土壤总孔隙度以及土壤有机碳、全氮、速效钾质量分数在不同火烈度下均随土层的加深而降低(降幅达 1.61%~43.66%)。土壤水分与速效养分供给是驱动火后植被恢复的关键因子,且其影响存在垂直分异规律。

5 参考文献

- [1] GONZÁLES H, OCAÑA C L, CUBAS J A, *et al.* Impact of forest fire severity on soil physical and chemical properties in pine and scrub forests in high Andean zones of Peru[J]. *Trees, Forests and People*, 2024, **18**: 100659. DOI: 10.1016/j.tfp.2024.100659.
- [2] 金山, 武帅楷. 太岳山油松林火烧迹地恢复初期植物群落结构特征[J]. *生态学报*, 2021, **41**(10): 4182–4193. JIN Shan, WU Shuaikai. The plant community structure of burned *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain in the early ecological restoration stage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(10): 4182–4193. DOI: 10.5846/stxb202001230170.
- [3] 常禹, 陈宏伟, 胡远满, 等. 林火烈度评价及其空间异质性研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2012, **21**(2): 28–34. CHANG Yu, CHEN Hongwei, HU Yuanman, *et al.* Advances in the assessment of forest fire severity and its spatial heterogeneity[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, **21**(2): 28–34. DOI: 10.13577/j.jnd.2012.0204.
- [4] KEELEY J E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, **18**(1): 116. DOI: 10.1071/wf07049.
- [5] 刘晓东, 王博. 森林燃烧主要排放物研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2017, **39**(12): 118–124. LIU Xiaodong, WANG Bo. Review on the main emission products released by forest combustion[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017,

- 39(12): 118–124. DOI: [10.13332/j.1000-1522.20170307](https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20170307).
- [6] WANG Wei, XING Zhen, LI Wenbo, *et al.* Study on diversity of undergrowth plant community in Cibagou nature reserve[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2017, **8**(9): 2149–2158. DOI: [10.4236/ajps.2017.89144](https://doi.org/10.4236/ajps.2017.89144).
- [7] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 等. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2021, **41**(3): 1168–1177. LI Tingting, TANG Yongbin, ZHOU Runhui, *et al.* Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in Yunding Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(3): 1168–1177. DOI: [10.5846/stxb202002270350](https://doi.org/10.5846/stxb202002270350).
- [8] 冯浩育, 陈思帆, 索奥丽, 等. 不同火烈度下山西太岳山油松林灌木层物种多样性和叶功能性状[J]. *北京林业大学学报*, 2024, **46**(6): 38–47. FENG Haoyu, CHEN Sifan, SUO Aoli, *et al.* Species diversity and leaf functional traits of shrub layer in *Pinus tabuliformis* forest under different fire intensities in Taiyue Mountain, Shanxi Province of northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, **46**(6): 38–47. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20230324](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230324).
- [9] 栗马玲, 宋沼鹏, 刘艳红, 等. 火烧强度对兴安落叶松群落叶片功能性状及功能多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(12): 4021–4030. LI Maling, SONG Zhaopeng, LIU Yanhong, *et al.* Effects of fire intensity on leaf functional traits and functional diversity of *Larix gmelinii* community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(12): 4021–4030. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201912.006](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201912.006).
- [10] 陈小雪, 李红丽, 董智, 等. 不同火烧强度迹地林下灌草层物种多样性及其与土壤因子的关系[J]. *西北植物学报*, 2020, **40**(1): 130–140. CHEN Xiaoxue, LI Hongli, DONG Zhi, *et al.* Relationship of shrubs and herbs species diversity under different fire intensities with soil factors[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(1): 130–140. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2020.01.0130](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2020.01.0130).
- [11] 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[J]. *生态学报*, 2023, **43**(18): 7412–7421. ZHAO Man, ZHANG Xiaoman, YANG Mingjie. Effects of forest fire disturbance on species diversity and soil physicochemical properties in *Pinus tabuliformis* coniferous forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(18): 7412–7421. DOI: [10.20103/j.stxb.202111113168](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202111113168).
- [12] AZEVEDO J C, POSSACOS A, AGUIAR C F, *et al.* The role of holm oak edges in the control of disturbance and conservation of plant diversity in fire-prone landscapes[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, **297**: 37–48. DOI: [10.1016/j.foreco.2013.02.007](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.007).
- [13] 石亮, 周梅, 王鼎, 等. 林火干扰对兴安落叶松林下植被多样性和生物量的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2016, **44**(1): 44–47. SHI Liang, ZHOU Mei, WANG Ding, *et al.* Effects of forest fire on understory vegetation diversity and biomass of *Larix gmelini* forest[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, **44**(1): 44–47. DOI: [10.3969/j.issn.1000-5382.2016.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5382.2016.01.008).
- [14] 张玉红, 覃炳醒, 孙铭隆, 等. 林火对大兴安岭典型林型林下植被与土壤的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2012, **34**(2): 7–13. ZHANG Yuhong, QIN Bingxing, SUN Minglong, *et al.* Impact of forest fire on understory vegetation and soil in typical forest types of Daxing'an Mountains, northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, **34**(2): 7–13. DOI: [10.13332/j.1000-1522.2012.02.009](https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2012.02.009).
- [15] 李威, 周梅, 赵鹏武, 等. 大兴安岭东麓火烧迹地恢复初期植被特征[J]. *东北林业大学学报*, 2020, **48**(1): 51–55. LI Wei, ZHOU Mei, ZHAO Pengwu, *et al.* Vegetation characteristics in the early stage of restoration of burned area in eastern Daxing'an Mountains[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, **48**(1): 51–55. DOI: [10.3969/j.issn.1000-5382.2020.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5382.2020.01.009).
- [16] 潘慧萍, 金建华, 张山云, 等. 计划烧除对滇中云南松林土壤养分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(2): 379–386. PAN Huiping, JIN Jianhua, ZHANG Shanyun, *et al.* Effect of prescribed burning on soil nutrient content of *Pinus yunnanensis* forest in central Yunnan Province[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(2): 379–386. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20230417](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20230417).
- [17] 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. DOI: [10.1007/s11676-022-01475-4](https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4).
- [18] CAVARD X, BERGERON Y, PARÉ D, *et al.* Disentangling effects of time since fire, overstory composition and organic layer thickness on nutrient availability in Canadian boreal forest[J]. *Ecosystems*, 2019, **22**(1): 33–48. DOI: [10.1007/s10021-018-0251-3](https://doi.org/10.1007/s10021-018-0251-3).
- [19] BADÍA D, MARTÍ C, AGUIRRE A J, *et al.* Wildfire effects on nutrients and organic carbon of a Rendzic Phaeozem in NE

- Spain: changes at cm-scale topsoil[J]. *CATENA*, 2014, **113**: 267–275. DOI: [10.1016/j.catena.2013.08.002](https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.002).
- [20] 王绪高, 李秀珍, 贺红士, 等. 大兴安岭北坡落叶松林火后植被演替过程研究[J]. *生态学杂志*, 2004, **23**(5): 35–41. WANG Xugao, LI Xiuzhen, HE Hongshi, *et al.* Postfire succession of larch forest in the northern slope of Daxinganling[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(5): 35–41. DOI: [10.3321/j.issn:1000-4890.2004.05.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-4890.2004.05.007).
- [21] 褚燕琴, 牛树奎, 陈锋, 等. 火干扰及环境因子对油松林林下植被的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, **34**(1): 96–103. CHU Yanqin, NIU Shukui, CHEN Feng, *et al.* Fire disturbance and environmental factors for the undergrowth in a *Pinus tabulaeformis* forest[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, **34**(1): 96–103. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2017.01.014](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2017.01.014).
- [22] WEISER F, SAUER A, GETTUEVA D, *et al.* Impacts of forest fire on understory species diversity in canary pine ecosystems on the island of La Palma[J]. *Forests*, 2021, **12**(12): 1638. DOI: [10.3390/f12121638](https://doi.org/10.3390/f12121638).
- [23] 王邵军. “植物-土壤”相互反馈的关键生态学问题: 格局、过程与机制[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, **44**(2): 1–9. WANG Shaojun. Key ecological issues in plant-soil feedback: pattern, process and mechanism[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, **44**(2): 1–9. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2006.202001013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2006.202001013).
- [24] CRAWFORD K M, BAUER J T, COMITA L S, *et al.* When and where plant-soil feedback may promote plant coexistence: a meta-analysis[J]. *Ecology Letters*, 2019, **22**(8): 1274–1284. DOI: [10.1111/ele.13278](https://doi.org/10.1111/ele.13278).
- [25] 顾泽, 王博, 陈思帆, 等. 不同火烈度火烧迹地内油松叶功能性状的变化[J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(6): 1497–1504. GU Ze, WANG Bo, CHEN Sifan, *et al.* Changes of leaf functional traits of *Pinus tabulaeformis* in burned areas with different fire severities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(6): 1497–1504. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202206.001](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202206.001).
- [26] QIN Qianqian, ZHANG Yujian, QIU Cong, *et al.* Can litterfall input mitigate the adverse effects of high-severity wildfires on soil functions in temperate forest ecosystems?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, **184**: 109119. DOI: [10.1016/j.soilbio.2023.109119](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109119).
- [27] 孙家宝, 张海林, 胡海清. 火干扰强度对兴安落叶松林物种组成及多样性的影响[J]. *森林工程*, 2009, **25**(6): 1–5. SUN Jiabao, ZHANG Hailin, HU Haiqing. Effect of fire disturbance intensity on species composition and species diversity of *Larix gmelinii* forest in Daxing'anling Mountain[J]. *Forest Engineering*, 2009, **25**(6): 1–5. DOI: [10.3969/j.issn.1001-005X.2009.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-005X.2009.06.001).
- [28] 卢文雄, 薛卫星, 张瑞丰, 等. 马尾松林下土壤理化性质对不同林火严重程度的响应[J]. *生态学报*, 2025, **45**(1): 1–12. LU Wenxiong, XUE Weixing, ZHANG Ruifeng, *et al.* Response of soil physicochemical properties under Masson pine forests to different forest fire severities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(1): 1–12. DOI: [10.20103/j.stxb.202311162497](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202311162497).
- [29] 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. DOI: [10.20103/j.stxb.202209292778](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202209292778).
- [30] 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 Xiyu, *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. DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2023.09.024](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2023.09.024).
- [31] 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. DOI: [10.5846/stxb201812052665](https://doi.org/10.5846/stxb201812052665).
- [32] 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[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(5): 132–138. LIU Falin, CHEN Xiaowei, ZENG Suping. Effects of fire disturbance on soil physicochemical properties in *Liquidambar formosana* secondary forest[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(5): 132–138. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2019.05.020](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2019.05.020).
- [33] 陈思帆, 陈锋, 索奥丽, 等. 不同烈度林火对油松林土壤微生物群落组成的影响[J]. *生态学报*, 2025, **45**(9): 4223–4236. CHEN Sifan, CHEN Feng, SUO Aoli, *et al.* Investigation of soil microbial community composition in *Pinus tabulaeformis* forests after different fire severities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(9): 4223–4236. DOI: [10.20103/j.stxb.202408201960](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202408201960).
- [34] 金锁, 毕浩杰, 刘佳, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2020,

- 42(1): 10–17. JIN Suo, BI Haojie, LIU Jia, *et al.* Effects of stand density on community structure and species diversity of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain, southwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(1): 10–17. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20190202](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190202).
- [35] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533–548. FANG Jingyun, WANG Xiangping, SHEN Zehao, *et al.* Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533–548. DOI: [10.3724/SP.J.1003.2009.09253](https://doi.org/10.3724/SP.J.1003.2009.09253).
- [36] 王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 981–988. WANG Meizhen, BI Haojie, JIN Suo, *et al.* Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 981–988. DOI: [10.5846/stxb201803170528](https://doi.org/10.5846/stxb201803170528).
- [37] 陈思帆, 高健, 高敏, 等. 火烧强度对山西太岳山油松林地表可燃物的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(10): 68–77. CHEN Sifan, GAO Jian, GAO Min, *et al.* Effects of fire intensity on surface fuel of *Pinus tabulaeformis* in Taiyue Mountain, Shanxi Province[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(10): 68–77. DOI: [10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.10.007](https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.10.007).
- [38] 武秀娟, 奥小平. 油松林火烧迹地恢复初期林下植被特征[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(5): 155–161. WU Xiujuan, AO Xiaoping. The characteristics of understory vegetation in the early stage of restoration of burned *Pinus tabulaeformis* forests[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(5): 155–161. DOI: [10.3969/j.issn.1001-7461.2022.05.22](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7461.2022.05.22).
- [39] 邢玮, 葛之葳, 李俊清. 大兴安岭北部林区林火干扰强度对兴安落叶松群落影响研究[J]. *科学技术与工程*, 2006, 6(14): 2042–2046. XING Wei, GE Zhiwei, LI Junqing. The effect of fire severity on the *Larix gmelinii* community in north Great Xing'an Mountains[J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(14): 2042–2046. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2006.14.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2006.14.012).
- [40] 赵蔓, 张晓曼, 杨明洁. 林火干扰对栓皮栎-辽东栎混交林植物多样性与土壤理化性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(10): 1732–1740. ZHAO Man, ZHANG Xiaoman, YANG Mingjie. Effects of forest fire disturbance on species diversity and soil physicochemical properties of *Quercus variabilis* and *Quercus wutaishansea* mixed forests[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(10): 1732–1740. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2023.10.002](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2023.10.002).
- [41] 许鹏波, 屈明, 薛立. 火对森林土壤的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1596–1606. XU Pengbo, QU Ming, XUE Li. Effects of forest fire on forest soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1596–1606. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2013.0256](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2013.0256).
- [42] 孙明学. 塔河林区林火对土壤性质与植被恢复的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2011. SUN Mingxue. *The Impacts on Soil Properties and Revegetation from Forest Fire in Tahe Forest Region*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [43] 杨馥羽, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林土壤抗蚀和抗冲性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(1): 188–197. YANG Fuyu, CHEN Qibo, LI Jianqiang, *et al.* Effect of prescribed burning on soil anti-erodibility and anti-scourability of *Pinus yunnanensis* forest[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, 40(1): 188–197. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20220321](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20220321).
- [44] CAON L, VALLEJO V R, RITSEMA C J, *et al.* Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 47–58. DOI: [10.1016/j.earscirev.2014.09.001](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.001).
- [45] 贺婷. 火烧对大兴安岭地区森林土壤理化性状的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015. HE Ting. *The Impact of Forest Soil Physical and Chemical Properties on Fire in the Daxing'an Mountains Region*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015.
- [46] 孙明学, 贾炜玮, 吴瑶. 大兴安岭北部地区林火对土壤化学性质的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(5): 33–35. SUN Mingxue, JIA Weiwei, WU Yao. Effect of forest fire on soil chemical properties in northern Daxing'an mountains[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(5): 33–35. DOI: [10.3969/j.issn.1000-5382.2009.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5382.2009.05.012).
- [47] JHARIYA M K, SINGH L. Effect of fire severity on soil properties in a seasonally dry forest ecosystem of Central India[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 18(12): 3967–3978. DOI: [10.1007/s13762-020-03062-8](https://doi.org/10.1007/s13762-020-03062-8).
- [48] HAN Wenjuan, CHANG Jie, JIANG Hang, *et al.* Plant species diversity affects plant nutrient pools by affecting plant biomass and nutrient concentrations in high-nitrogen ecosystems[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2021, 56: 213–225. DOI: [10.1016/j.baec.2021.08.002](https://doi.org/10.1016/j.baec.2021.08.002).