北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

火干扰对寒温带草原土壤微生态环境及碳循环的影响

平晓帆 遇文婧 黄颖

Impact of fire disturbance on soil micro-ecological environment and carbon cycle in temperate grassland

Ping Xiaofan, Yu Wenjing, Huang Ying

引用本文:
平晓帆, 遇文婧, 黄颖. 火干扰对寒温带草原土壤微生态环境及碳循环的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):72–79. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250209
Ping Xiaofan, Yu Wenjing, Huang Ying. Impact of fire disturbance on soil micro–ecological environment and carbon cycle in temperate grassland[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):72–79. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250209

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250209

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

季节性氮添加对内蒙古温带典型草原土壤净氮矿化的影响

Effects of seasonal nitrogen addition on soil net nitrogen mineralization in typical temperate grasslands of Inner Mongolia, northern China

北京林业大学学报, 2024, 46(12): 63–70. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230018

黄土丘陵区典型人工林土壤有机碳储量的分布特征

Distribution characteristics of soil organic carbon stocks in typical plantations in loess hilly region of northwestern China

北京林业大学学报, 2023, 45(12): 100–107. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230097

树种多样性对森林死木微生物分解及碳循环的影响研究进展

Research progress of impacts of tree species diversity on microbial decomposition of forest deadwood and carbon cycling

北京林业大学学报, 2024, 46(11): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240233

寒温带典型森林类型生长季土壤活性有机碳动态特征及影响因素

Seasonal dynamics characteristics and influencing factors of soil labile organic carbon in typical boreal forest types during the growing season

北京林业大学学报, 2026, 48(2): 93–102. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250159

寒温带林区不同林型下冻融土壤活性有机碳的变化

Changes of active organic carbon in frozen thawed soil under different forest types in cold temperate forest region

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 65–72. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210030

林火对山西太岳山油松林土壤微生物酶活性的短期影响

Short–term effects of forest fire on soil microorganism and enzyme activities of *Pinus tabuliformis* forest in Taiyue Mountain, Shanxi Province of northern China

北京林业大学学报, 2022, 44(4): 76–85. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210042

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250209

火干扰对寒温带草原土壤微生态环境及碳循环的影响

平晓帆　遇文婧　黄　颖
（黑龙江省林业科学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】探讨火干扰对寒温带草原土壤微生态环境的影响，揭示火烧后土壤碳循环关键指标的变化规律，以期为草原火灾后生态系统恢复与碳库可持续管理提供科学依据。**【方法】**以黑龙江省富裕县草原火烧迹地为研究对象，选取火烧后 1 年(F1)、3 年(F3)、5 年(F5)的火烧迹地，以未火烧区为对照(CK)，测定土壤理化性质(pH、含水率、温度、有效磷、速效钾)、有机碳组分(可溶性有机碳 DOC、颗粒有机碳 POC、易氧化有机碳 ROC)、微生物生物量(微生物生物量碳 MBC、微生物生物量氮 MBN)及腐殖质组分含量，对比分析火干扰对土壤微生态环境及碳循环关键指标的影响。**【结果】**(1)火干扰显著改变了土壤理化性质，表现为土壤 pH 值降低，含水率和温度升高，速效养分(尤其是钾素)显著提升。(2)与未火烧区相比，火干扰对土壤有机碳组分也产生了显著影响，呈现出“活性组分(DOC)先降(F1、F3)后升(F5)，颗粒组分(POC)持续下降，易氧化组分(ROC)相对稳定”的差异化响应模式。(3)MBC、MBN 随恢复年限均呈现先上升后下降的变化趋势，二者含量在火烧 5 年后均趋于未火烧区，表明经过 5 年自然恢复，土壤微生物生物量碳、氮库已基本恢复至未火烧状态，反映出寒温带草原土壤微生物群落具有较强的自我恢复能力。(4)腐殖质总量、胡敏酸和富里酸含量随恢复年限呈“上升(F1)—下降(F3)—上升(F5)”的波动趋势，而胡敏素无显著变化，这表明火干扰主要影响腐殖质中活性较高的可溶性组分，而对稳定态有机碳库的扰动相对有限。**【结论】**火烧 5 年后，土壤速效养分显著提升，可溶性碳库恢复并超过未火烧水平，腐殖质总量显著增加，表明火干扰在长期尺度上对土壤碳汇功能具有正向促进效应，并驱动土壤微生态环境呈现“短期扰动—中期调整—长期恢复”的时序演替，该研究揭示了寒温带草原火烧迹地土壤碳库的动态转化机制，为草原生态修复、碳库评估及火预防治理提供了关键参数与科学依据。

关键词：火干扰；寒温带草原；土壤微生态；土壤碳循环；碳库修复
中图分类号：S762　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)04−0072−08
引文格式：平晓帆，遇文婧，黄颖. 火干扰对寒温带草原土壤微生态环境及碳循环的影响 [J]. 北京林业大学学报，2026, 48(4): 72−79. Ping Xiaofan, Yu Wenjing, Huang Ying. Impact of fire disturbance on soil micro-ecological environment and carbon cycle in temperate grassland[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 72−79.

Impact of fire disturbance on soil micro-ecological environment and carbon cycle in temperate grassland

Ping Xiaofan　Yu Wenjing　Huang Ying
(Heilongjiang Academy of Forestry, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [**Objective**] To investigate the impact of fire disturbance on the soil micro-ecological environment in temperate grassland, elucidate the variation patterns of key soil carbon cycle indicators post-fire, and provide a scientific basis for ecosystem restoration and sustainable carbon stock management following grassland fires. [**Method**] This study focused on grasslands in FuYu County, Heilongjiang Province, specifically selecting fire-affected sites 1 year (F1), 3 years (F3), and 5 years (F5) after the fire, with an unburned area serving as the control (CK). We measured soil physicochemical properties (pH,

收稿日期: 2025−06−12　**修回日期:** 2025−09−24
基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目青年项目(CZKYF2025-1-C037)，黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(LKSB2023-4)。
第一作者: 平晓帆，副研究员。主要研究方向：森林防火。Email: 438978279@qq.com　地址：150081 黑龙江省哈尔滨市南岗区哈平路 134 号黑龙江省林业科学院。
责任作者: 遇文婧，研究员。主要研究方向：森林保护。Email: ywjlinda2008@163.com　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

moisture content, temperature, available phosphorus, available potassium), organic carbon components (dissolved organic carbon DOC, particulate organic carbon POC, readily oxidizable organic carbon, ROC), microbial biomass (microbial biomass carbon, MBC; microbial biomass nitrogen, MBN), and humic substance content were measured.We then conducted a comparative analysis to assess the impact of fire disturbance on key indicators of the soil micro-ecosystem and carbon cycle. [**Result**] (1) Fire disturbance significantly altered soil physical and chemical properties, resulting in decreased soil pH, increased moisture and temperature, and a notable elevation in available nutrients, particularly potassium. (2) Compared with unburned plots, fire disturbance also exerted a significant influence on soil organic carbon fractions, demonstrating a differential response pattern characterized by an initial decrease (F1, F3) followed by an increase (F5) in active components (DOC), a continuous decline in particulate organic carbon (POC), and a relatively stable trend in readily oxidizable carbon (ROC). (3) Microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) both exhibited a trend of initial increase followed by a decrease with recovery years. After five years of fire suppression, MBC and MBN levels approached those of unburned areas, indicating that the soil microbial biomass carbon and nitrogen pools had largely recovered to pre-fire conditions, reflecting the robust self-restoration capacity of soil microbial communities in cold-temperate grasslands. (4) Total humus, humic acid, and fulvic acid content displayed a fluctuating trend of "crease (F1)—decrease (F3)—increase (F5)" with recovery years, while humin content showed no significant change. This suggests that fire disturbance primarily affected the more labile, soluble components of humus, with comparatively limited perturbation to the stable organic carbon pool. [**Conclusion**] Five years post-fire, soil labile nutrient pools significantly increased, soluble carbon stocks recovered and surpassed unburned levels, and total humus content notably rose. These findings indicate that fire disturbance positively enhances soil carbon sequestration function on a long-term scale and drives the soil microbial ecological environment through a temporal succession of "short-term perturbation—mid-term adjustment—long-term recovery". This research elucidates the dynamic transformation mechanisms of soil carbon pools in burned areas of temperate grasslands, providing critical parameters and scientific evidence for grassland ecological restoration, carbon stock assessment, and fire prevention and management.

Key words: fire disturbance; temperate grassland; soil microecology; soil carbon cycle; carbon pool restoration

火灾是调控陆地生态系统碳循环的关键驱动因子，全球每年约有 4×10^8 hm^2 的森林与草原受其影响，导致约 1.74 Pg 碳通量向大气层迁移[1]。作为非连续性生态驱动因素，火干扰通过重塑生态系统结构与功能，深刻改变着养分循环路径与能量传递网络。这种扰动不仅引发草原碳库动态与碳分配格局的重构，同时通过调控植被演替方向与固碳潜力，持续影响着生态系统的碳汇功能[2−3]。因此，理清火干扰后土壤微生态环境的响应规律，对于评估生态系统恢复能力与解析碳汇功能维持机制具有重要意义。

黑龙江省作为我国东北生态屏障的重要组成部分，其 207 万 hm^2 草原不仅是陆地生态系统碳平衡的关键调节者，更在全球气候变化敏感带中扮演着碳汇增强器和气候缓冲器的双重角色[4]。值得关注的是，随着退耕还草、禁牧等生态保育政策的持续推进，草原植被生物量呈现持续累积态势，地表可燃物载量显著增加，导致火险等级持续攀升。在此背景下，草原火的发生频率与强度呈现不确定性增长趋势，进而使碳循环过程面临更为复杂的扰动机制[5]。如何科学评估火干扰对草原土壤微生态环境的影响，已成为当前生态学与碳汇管理领域亟待解决的关键科学问题。

现有研究表明，火干扰通过燃烧作用改变地表凋落物输入、有机质矿化速率及土壤微环境条件，进而对土壤养分循环产生深远影响。White[6]研究发现，低强度的火烧没有引起土壤中氮含量发生变化，而高强度火烧则导致氮含量显著减少。Wright[7]的研究表明，火烧能够提升土壤氮矿化度，但影响程度因地表可燃物种类和火烧强度的不同而存在差异。在微生物响应方面，研究[8−9]指出不同频次和不同时间的草原火发生后，火烧迹地土壤微生物数量和生物量呈现先升高后降低的趋势，且这一效应主要集中于 0 ~ 30 cm 土层范围内。虽然目前针对草原火对

土壤养分的影响有一些研究基础，但是缺乏对火干扰后土壤理化性质、有机碳组分、微生物生物量及腐殖质等多维指标的系统整合分析，尤其在不同火烧年限下土壤有机碳活性组分（如可溶性有机碳、颗粒有机碳）与稳定组分（腐殖质）之间的动态转化机制尚不明确，制约了火烧迹地碳汇功能恢复机制的科学认知。

为全面评估不同年限火烧对寒温带草原土壤碳组分与微生态的影响，本研究以黑龙江省富裕县寒温带典型草原为研究对象，选取火烧后 1 年（F1）、3 年（F3）、5 年（F5）的典型火烧迹地，以未火烧区为对照（CK），从土壤理化性质（pH、含水率、温度和速效磷、钾）、有机碳组分（可溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳）、微生物生物量（微生物生物量碳、微生物生物量氮）及腐殖质含量 4 个维度对比分析火干扰对寒温带草原土壤微生态环境及碳循环关键指标的影响，以揭示火干扰对土壤碳组分转化与微生物代谢调控的作用机制。研究结果将为寒温带草原火烧迹地碳库动态评估提供关键参数支撑，为草原火后生态修复与可持续管理提供科学依据，同时也为森林草原管理部门开展草原火的预防治理与碳汇功能维护提供理论参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国黑龙江省松嫩平原西北部的富裕县县种畜场草原（47°36′44″N，124°19′41″E），海拔 157.7 m。该区域属温性草甸草原类生态系统，地表基质为盐渍化草甸土，优势种为羊草（*Leymus chinensis*）和三棱草（*Bolboschoenus maritimus*）。气候系统呈现典型中温带大陆性季风特征，四季气候特征鲜明：春季以西北风为主，风速均值 3.0 m/s，伴随低降水量；夏季集中全年 68.6% 降水，同步出现 23.1 ℃ 高温峰值；秋季经历剧烈温度波动，日均温变幅 > 10 ℃；冬季极端低温达−19.3 ℃。光热资源特征显示：该区域年日照时数 2 559.1 h，年均相对湿度 63%，水热同期指数 0.82。作为典型的天然放牧场，该样地是探究松嫩平原草畜系统可持续利用机制的关键载体，具有重要的研究价值。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与样品采集

分别选择 1 年（F1）、3 年（F3）、5 年（F5）的火烧迹地，在每块火烧迹地上分设 3 块 30 m × 30 m 标准样地，选择未火烧区设置 3 块相同面积的标准样地作为对照（CK），共计 12 块标准地。2023 年 5 月，在每个标准地内按 S 形采样法布设 5 个采集点，清除地表枯枝落叶和异质物后，用内径 5 cm × 长度 20 cm 的不锈钢环刀获取 0 ~ 20 cm 土层原状土柱，置于无菌袋中，4 ℃ 低温保鲜运输箱带回实验室，去除可见植物残体，过 2 mm 筛后，同一个标准地的采集土样等比例混合制成复合样备用。

1.2.2 土壤理化性质测定

为分析火后不同恢复时期土壤理化性质变化，利用电位法测定土壤 pH 值，采用烘干法测定土壤含水率，现场测定土壤温度，通过硫酸−高氯酸−钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量（available phosphorus，AP），火焰光度计法测定速效钾含量（available potassium，AK）[10−11]，对火烧迹地（F1、F3、F5）与未火烧对照区（CK）的土壤微环境进行深入探讨。

1.2.3 土壤有机碳、微生物生物量碳和氮的测定

为研究火干扰对草原土壤微生物生物量碳和生物量氮含量的影响，测定了可溶性有机碳（dissolved organic carbon，DOC）、颗粒有机碳（particulate organic carbon，POC）、易氧化有机碳（readily oxidizable organic carbon，ROC）含量，所有数据由上海金贝生物公司测定，此外采用氯仿熏蒸浸提法[12]测定土壤微生物生物量碳和氮含量，对火烧迹地（F1、F3、F5）与未火烧对照区（CK）的土壤有机碳、微生物生物量碳（microbial biomass carbon，MBC）和生物量氮（microbial biomass nitrogen，MBN）进行系统分析。

1.2.4 土壤腐殖质测定

为了探究火干扰对草原土壤腐殖质的影响，采用焦磷酸钠−氢氧化钠提取重铬酸钾氧化容量法[13]测定土壤腐殖质含量，其中包括可溶性腐殖质（胡敏酸和富里酸）及不溶性腐殖质（胡敏素）的含量，并计算腐殖质总量，通过对比不同腐殖质含量差异，对火烧迹地与未火烧对照区的土壤腐殖质组分进行深入分析。

1.3 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据整理与初步计算，SPSS Statistics 23.0 软件进行统计分析。各处理间差异显著性采用单因素方差分析（One-way ANOVA），并采用最小显著差异法（LSD）进行多重比较（$P < 0.05$）。

2 结果与分析

2.1 火后不同恢复时期土壤理化性质变化

本研究对比了每块火烧迹地（F1、F3、F5）与未火烧对照区（CK）的土壤理化性质差异，结果（表 1）显示，与 CK 相比，3 个样地的火烧迹地土壤 pH 值整体呈下降趋势，均显著低于对应对照区 CK（$P < 0.05$）。土壤含水率在火烧迹地中显著高于对照区

表 1　不同火烧迹地土壤理化性质

Tab. 1　Physical and chemical properties of soil in different burned areas

处理	pH	鲜质量/g	干质量/g	土壤含水率/%	土壤温度/℃	有效磷含量/(mg·kg^{-1})	速效钾含量/(mg·kg^{-1})
CK	8.05 ± 0.33a	189.17 ± 1.05a	115.21 ± 0.55a	64.20 ± 1.67a	18.13 ± 0.54a	45.17 ± 1.35a	413.50 ± 1.24a
F1	7.55 ± 0.52b	254.50 ± 2.55b	140.72 ± 0.46b	75.49 ± 0.58b	22.60 ± 1.22b	36.50 ± 0.66a	529.50 ± 1.38b
F3	7.53 ± 0.87b	275.70 ± 1.33c	144.79 ± 0.67b	90.41 ± 0.24c	25.50 ± 1.53b	40.80 ± 1.67a	602.50 ± 0.55c
F5	7.21 ± 1.25b	247.70 ± 0.56b	140.78 ± 0.88a	75.95 ± 1.65b	27.40 ± 0.86c	59.20 ± 0.45b	622.60 ± 0.67c

注：CK为未火烧样地，F1为火烧1年后样地，F3为火烧3年后样地，F5为火烧5年后样地。不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

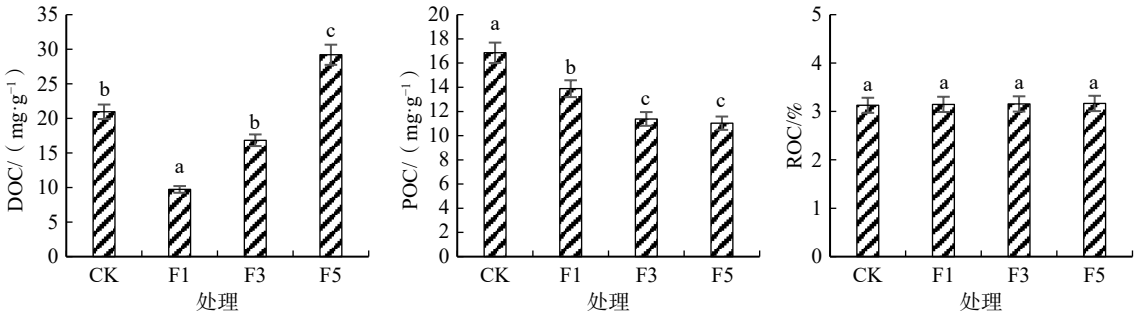
（$P < 0.05$），这可能与火烧后地表凋落物减少、土壤结构改变及植被覆盖度降低导致的水分蒸发差异相关。此外，火烧迹地土壤温度普遍显著升高，且呈逐年上升趋势。从养分含量看，相较于未火烧对照区，F1 和 F3 样地的有效磷含量变化不显著（$P > 0.05$），但 F5 样地显著升高；速效钾含量在 F1、F3 和 F5 样地中均显著升高。结果表明，火烧干扰显著改变了土壤理化性质，表现为土壤 pH 降低、土壤含水率和温度升高、速效养分（尤其是钾素）显著提升，这些变化为火烧迹地植被恢复创造了差异化的土壤微环境。

2.2　火干扰对草原土壤有机碳含量的影响

火烧迹地（F1、F3、F5）与未火烧对照区的土壤可溶性有机碳（DOC）、颗粒有机碳（POC）和易氧化有机碳（ROC）含量测定结果如图 1 所示。结果显示，与 CK 相比，F1 样地的 DOC 含量显著降低（$P < 0.05$），随恢复年限增加，DOC 含量逐渐呈递增趋势，F5 样地的 DOC 含量显著高于 CK；而 POC 含量在火烧区呈逐年降低趋势，与 CK 相比，F1、F3 和 F5 样地的 POC 含量分别显著降低 17.61%、32.45% 和 34.54%（$P < 0.05$），且在 F3 和 F5 之间差异不显著（$P > 0.05$），呈现“快速下降—趋于平稳”的变化特征；ROC 含量受火干扰影响最小，与 CK 相比，F1、F3 和 F5 样地 ROC 含量无显著差异（$P > 0.05$）。综合来看，火干扰对土壤有机碳组分的影响表现为“活性组分先降后升，颗粒组分持续下降，易氧化组分相对稳定”的差异化响应模式。DOC 在火烧后期的显著回升，反映出土壤可溶性碳库的恢复能力；而 POC 的持续低位则揭示了火烧对粗质有机碳库的长期损耗。火干扰可能促进了有机碳从颗粒态向溶解态的转化，或加速了颗粒态碳的矿化释放，这对揭示火烧迹地土壤碳库的动态转化机制具有重要意义。

2.3　火干扰对草原土壤微生物生物量碳和生物量氮含量的影响

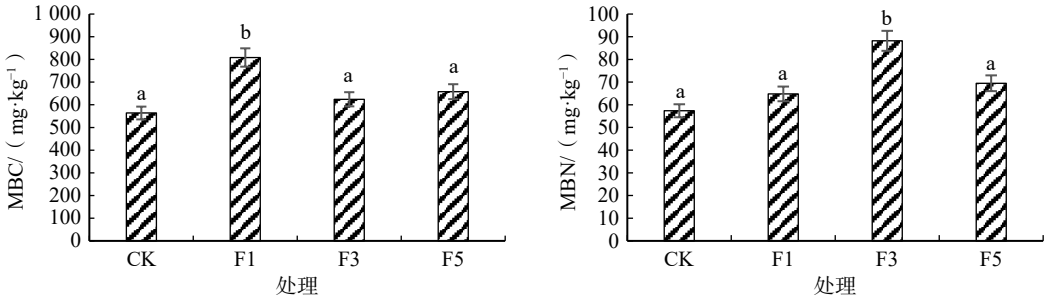
本研究对火烧迹地（F1、F3、F5）与未火烧对照区的微生物生物量碳（MBC）和生物量氮（MBN）进行了分析，结果（图 2）显示，相较于 CK，F1 样地的 MBC 含量显著升高（$P < 0.05$），增加部分占对照的 43.40%，而 F3 和 F5 样地的 MBC 含量差异不显著（$P > 0.05$）；相较于 CK，不同火烧年限的 MBN 含量也存在差异，F3 样地显著升高（$P < 0.05$），增加部分占对照的 53.75%，而 F1 和 F5 样地的 MBC 含量差异不显著（$P > 0.05$）。结果表明，不同火烧年限处理对微生物生物量的影响存在差异性，MBC 的短期激增反映了微生物对碳源输入的快速响应能力，而 MBC 和 MBN 在火烧 5 年均趋于对照水平，表明经过 5 年自然恢复，土壤微生物生物量碳、氮库已基本恢复至未火烧状态，反映出寒温带草原土壤微生物群落具有较强的自我恢复能力。这一结果为评估火烧迹地土壤生态功能恢复进程提供了重要的微生物学指标。



DOC. 土壤可溶性有机碳含量；POC. 颗粒有机碳含量；ROC. 易氧化有机碳含量。不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

图 1　不同火烧年限土壤有机碳的变化

Fig. 1　Changes in soil organic carbon over different fire intervals



MBC为微生物生物量碳，MBN为微生物生物量氮。

图 2 不同火烧年限微生物生物量碳和生物量氮的变化

Fig. 2 Changes in microbial biomass carbon and nitrogen across fire return intervals

2.4 火干扰对草原土壤腐殖质的影响

本研究对火烧迹地与未火烧对照区的土壤腐殖质组分进行了分析，结果（表 2）显示，F1、F3 和 F5 样地的腐殖质总量均显著高于 CK（$P<0.05$），整体上呈现出“升高—回落—再升高”的波动变化趋势。其中，F1 样地腐殖质总量较 CK 显著增加 29.42%，F3 样地增幅收窄至 10.57%，F5 样地达到最高值（28.90 ± 1.33）g/kg，较 CK 显著增加 43.34%。胡敏酸和富里酸作为可溶性腐殖质的主要组分，其含量变化与腐殖质总量“升高—回落—再升高”的波动变化趋势基本一致，推测二者共同驱动了腐殖质总量的波动。其中，与 CK 相比，F1 样地和 F5 样地中富里酸的增加幅度均远高于胡敏酸。胡敏素含量在不同火烧年限处理间均未表现出显著差异（$P > 0.05$），表明作为腐殖质中最稳定、最难分解的组分，胡敏素对火干扰的响应具有较强惰性，短期内难以发生明显变化。这一结果进一步印证了火干扰主要影响腐殖质中活性较高的可溶性组分（胡敏酸和富里酸），在长期尺度上阶段性地调控有机质的分解与合成过程，而对稳定态有机碳库（如不溶性腐殖质胡敏素）的扰动相对有限。火烧 5 年后腐殖质总量显著高于未火烧水平，反映出火干扰可能对土壤有机质稳定性产生正向效应。

3 讨 论

火干扰作为陆地生态系统碳循环的重要调控因子，通过改变地表植被覆盖、凋落物输入及土壤微环境，影响着土壤碳库的动态平衡与生态系统的恢复能力[6]。黑龙江省寒温带草原作为我国东北生态屏障的重要组成部分，近年来随着退耕还草、禁牧等生态保育政策的持续推进，草原植被生物量持续累积，火险等级不断攀升，火干扰对土壤碳循环过程的影响存在不确定性[4]。土壤作为草原生态系统碳库的主要储存库，其对火干扰的响应机制直接决定着火烧迹地的恢复方向与恢复速率[14]。然而，现有研究多聚焦于单一指标或短期效应，缺乏对火干扰后土壤理化性质、有机碳组分、微生物生物量及腐殖质等多维指标的系统整合分析，尤其在不同火烧年限下土壤有机碳活性组分与稳定组分之间的动态转化机制尚不明确。为此，本研究对黑龙江省富裕县寒温带典型草原火烧后 1 年、3 年、5 年的典型火烧迹地的土壤微生态环境的时序响应特征进行系统分析。

研究发现，火干扰显著改变了土壤理化性质，表现为土壤 pH 值降低、含水率和温度升高、速效养分（尤其是钾素）显著提升。火烧后土壤 pH 值显著降低，这与卢文雄等[15]的研究结果一致，可能源于火烧过程中碱性盐基离子（如 Ca^{2+}、Mg^{2+}）的挥发流失与酸性有机物累积的双重作用。值得注意的是，本研究中火烧迹地土壤含水率较对照显著提高（75.49% ~ 90.41%），这与多数研究中[8,16–17]火烧后土壤含水率降低的结论相反。推测可能与火烧后植被覆盖率降低，减少了植物蒸腾耗水有关；同时火烧引起土壤结构改变，在局部区域形成水分汇集区，从而导致含水率升高。在养分循环方面，速效钾含量随恢复年限显著递增，与绝大多数研究结果[18–20]一致，这主要归因于火烧使植被体内钾素以灰分形式直接归还土壤，

表 2 不同火烧迹地土壤腐殖质含量

Tab. 2 Content of humus in soil of different burned areas

处理	腐殖质总量/(g·kg⁻¹)	胡敏酸/(g·kg⁻¹)	富里酸/(g·kg⁻¹)	胡敏酸和富里酸/(g·kg⁻¹)	胡敏素/(g·kg⁻¹)
CK	20.16 ± 0.54a	12.88 ± 0.67a	3.73 ± 0.65a	16.61 ± 1.20a	3.55 ± 0.35a
F1	26.09 ± 0.22c	14.82 ± 0.48b	6.81 ± 1.04b	21.63 ± 1.54b	4.46 ± 0.57a
F3	22.29 ± 0.12b	13.98 ± 1.25a	4.75 ± 1.32a	18.73 ± 1.66a	3.57 ± 2.50a
F5	28.90 ± 1.33d	16.39 ± 2.22c	7.32 ± 2.63b	23.71 ± 0.59c	5.19 ± 1.33a

且钾素在土壤中移动性强、不易被固定，因而能够在土壤溶液中持续累积。而有效磷仅在火烧 5 年时才显著升高，这与王毅雯[18]的研究结果一致。这是因为土壤对磷元素的吸附作用较强，燃烧过程中磷不易挥发，随径流流失的量也较小，随着地表植被恢复和微生物活性增强，有机磷的矿化释放逐渐显现。

火干扰对土壤有机碳组分也产生了显著影响，呈现出“活性组分先降后升、颗粒组分持续下降、易氧化组分相对稳定”的差异化响应模式。DOC 作为土壤中具有溶解特性的重要中间态碳组分，既是碳库损失的主要通道，也是养分迁移的重要载体[21]。本研究中 DOC 含量在火烧 1 年显著降低，与大多数研究结果[22−24]一致，表明火烧初期地表枯落物和腐殖质层燃烧分解，导致表层土壤可溶性碳大量损失；随恢复年限延长，植被恢复后凋落物输入增加，DOC 含量在火烧 3 年恢复并持续升高，火烧 5 年时较对照增加了 39.37%，这反映出土壤可溶性碳库具有较强的恢复能力。POC 主要由植物残渣和微生物团聚体构成，对土壤结构稳定性和水分保持能力具有重要影响[25]。本研究中 POC 含量呈逐年降低趋势，火烧 1 年、3 年、5 年分别较对照降低 17.61%、32.45% 和 34.54%，与周怡志[26]的研究结果一致，表明高强度火烧后有机物质可能以木炭等惰性形态存在，而非以颗粒碳形式留存，导致 POC 库长期难以恢复。ROC 是土壤中活性较高、易被微生物分解利用的有机碳组分，其稳定性与土壤碳库稳定性密切相关[27]。本研究中 ROC 含量在各火烧年限均无显著差异，可能由于火后恢复期土壤中积累了大量速效钾和磷，促进了植被生长和碳的再固定，从而增强了土壤碳库的稳定性，这与本研究中速效钾显著增加的结果相印证。

重要的是，土壤微生物作为物质循环与能量流动的核心驱动因子，其生物量变化对火干扰具有高度敏感性[28]。本研究发现，MBC 在火烧 1 年显著升高，呈现短期激增响应；MBN 在火烧 3 年显著升高，呈现滞后响应特征；火烧 5 年时两者均恢复至对照水平。这一“碳氮响应异步性”与孙龙[29]和韩易伦[30]等的研究结果相吻合，可能反映了火干扰后微生物群落结构的演替规律：火烧初期，以快速利用碳源为特征的微生物类群（如细菌）占优势，表现为 MBC 快速响应；随恢复年限延长，以氮素矿化为主导功能的微生物类群（如部分真菌、放线菌）逐渐占据生态位，表现为 MBN 的滞后性升高；至火烧 5 年，随着植被恢复和生态系统趋于稳定，微生物群落进入动态平衡状态。

腐殖质作为土壤有机质中最稳定的组分，其形成过程与微生物代谢活性密切相关[8]。本研究中，腐殖质总量、胡敏酸和富里酸含量随恢复年限呈“上升—下降—上升”的波动变化趋势，火烧 5 年时腐殖质总量较对照显著增加 43.34%。值得注意的是，富里酸在火烧初期响应更为敏感（F1 较 CK 增加 82.57%），而胡敏酸在火烧后期积累更为突出（F5 较 CK 增加 27.25%）。这一变化规律揭示了火干扰后腐殖质演替的阶段性特征：火烧初期，有机质快速分解转化，小分子、活性较高的富里酸大量形成；火烧中期，微生物活性增强，有机质矿化速率加快，腐殖质总量有所回落；火烧后期，植被的恢复促进了凋落物输入的增加，腐殖质形成速率超过分解速率，且向更高分子量、更高稳定性的胡敏酸方向演化。胡敏素含量在各处理间无显著差异，进一步印证了火干扰主要影响腐殖质中活性较高的可溶性组分，而对稳定态有机碳库的扰动相对有限。

综上所述，本研究首次系统整合了寒温带草原不同火烧年限下土壤理化性质、有机碳组分、微生物生物量及腐殖质含量的时序变化特征，揭示了火干扰驱动土壤碳库从“活性组分（DOC）向稳定组分（腐殖质）迁移”的动态转化机制。研究结果为寒温带草原火烧迹地碳库动态评估提供了关键参数支撑，为草原火后生态修复与可持续管理提供了科学依据，同时也为森林草原管理部门开展草原火的预防治理与碳汇功能维护提供了理论参考。但是，本研究仅选取了火烧后 1、3、5 年 3 个时间点，未能涵盖更长恢复年限（如 10、20 年）的碳库演变规律，未来研究应结合高通量测序、稳定同位素示踪等技术，通过长期定位观测，进一步揭示火干扰下土壤碳转化的微生物驱动机制，构建火烧迹地碳库动态预测模型，为草原火生态管理与碳汇功能提升提供更坚实的科学支撑。

4　结　　论

本研究以黑龙江省富裕县寒温带典型草原为研究对象，通过对比不同火烧年限（1、3、5 年）火烧迹地与未火烧对照区的土壤理化性质、有机碳组分、微生物生物量及腐殖质含量，系统揭示了火干扰对草原土壤微生态环境的影响规律。研究得到以下结论。

（1）火干扰显著改变土壤理化性质。火烧后土壤 pH 值显著降低，含水率和温度显著升高；速效钾含量在火烧后各年限均显著增加，且随恢复年限呈递增趋势，有效磷含量在火烧 5 年后显著升高，这些变化为火烧迹地植被恢复创造了差异化的土壤微环境。

（2）火干扰对土壤有机碳组分产生差异化影响，呈现“活性组分先降后升，颗粒组分持续下降，易氧

化组分相对稳定”的响应模式。可溶性有机碳在火烧初期显著降低，火烧 3 年后恢复并持续升高，反映出土壤可溶性碳库的恢复能力；颗粒有机碳呈逐年降低趋势，表明火烧对粗质有机碳库造成长期损耗；易氧化有机碳在各火烧年限均无显著变化，稳定性较强。

（3）火干扰对微生物生物量的影响存在时序差异性，微生物群落具有较强的自我恢复能力。微生物生物量碳在火烧 1 年显著升高，呈现短期激增响应；微生物生物量氮在火烧 3 年显著升高，呈现滞后响应特征；火烧 5 年时微生物生物量碳与微生物生物量氮均恢复至对照水平，表明经过 5 年自然恢复，土壤微生物生物量碳氮库已基本恢复至未火烧状态。

（4）火干扰促进腐殖质总量及可溶性组分积累，驱动土壤有机质向稳定化方向演化。腐殖质总量、胡敏酸和富里酸含量随恢复年限呈“上升—下降—上升”的波动变化趋势。富里酸在火烧初期响应更为敏感，胡敏酸在火烧后期积累更为突出，反映出腐殖质结构从“活性组分快速积累”向“稳定结构逐步形成”的演化过程。胡敏素含量在各处理间无显著差异，表现出较强惰性。

总之，火干扰通过阶段性调控土壤理化性质、有机碳组分转化、微生物代谢活性及腐殖质形成过程，驱动土壤微生态环境按照“短期扰动—中期调整—长期恢复”的时序演替。火烧 5 年后，土壤速效养分显著提升，可溶性碳库恢复并超过未火烧水平，腐殖质总量显著增加，表明火干扰在长期尺度上对土壤碳汇功能具有正向促进效应。本研究揭示了寒温带草原火烧迹地土壤碳库的动态转化机制，为草原火灾后生态修复、碳库动态评估及可持续管理提供了关键参数支撑，也为草原火预防治理与碳汇功能维护提供了科学依据。

参 考 文 献

[1] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Measurement methods of soil microbial biomass and their applications[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.

[2] Encinas L H, White S H, Rey A M D, et al. Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata [J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(6): 1213−1227.

[3] 魏书精. 黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算 [J]. 生态学报, 2014, 34(11): 3048−3066.
Wei S J. Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 3048−3066.

[4] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究 [D]. 南京: 南京大学, 2010.
Lai L. Carbon emission effects of land use in China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010.

[5] 胡海清, 刘洋, 孙龙, 等. 火烧对不同林型下森林土壤水分物理性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2008(2): 162−165.
Hu H Q, Liu Y, Sun L, et al. Effects of fire on soil hydro-physical properties in different forest types [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008(2): 162−165.

[6] White W M. Heat effect on nutrient release from soils under ponderous pine [J]. Range Manage, 1973, 26(1): 22−24.

[7] Wright H A, Bailey A W. Fire ecology [M]. New York: Wiley Inter-Science, 1982: 8−41.

[8] 杨新芳, 鲍雪莲, 胡国庆, 等. 大兴安岭不同火烧年限森林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1359−1367.
Yang X F, Bao X L, Hu G Q, et al. C: N: P stoichiometric characteristics of litter and soil of forest in Greater Xing’an Mountains with different fire years [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1359−1367.

[9] 宫大鹏, 康峰峰, 刘晓东. 新巴尔虎草原火时空分布特征及对气象因子响应 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 82−89.
Gong D P, Kang F F, Liu X D. Spatial and temporal distribution patterns of grassland fire and its response to meteorological factors in XinBarag Prairie of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 82−89.

[10] 周道玮, 张正祥, 靳英华, 等. 东北植被区划及其分布格局 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(12): 1359−1368.
Zou D W, Zhang Z X, Jin Y H, et al. Regionalization and distribution pattern of vegetation of Northeast China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(12): 1359−1368.

[11] 孙龙, 武广源, 胡同欣. 大兴安岭火后不同恢复时期土壤微生物生物量动态变化 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3094−3101.
Sun L, Wu G Y, Hu T X. Dynamic changes of soil microbial biomass in different restoration periods of Daxing’an ling after fire disturbance [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(11): 3094−3101.

[12] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 高寒草原生态系统表层土壤活性有机碳分布特征及其影响因素——以贡嘎南山−拉轨岗日山为例 [J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3501−3508.
Wang J L, Ouyang H, Wang Z H, et al. Influential factors and distribution characteristics of topsoil labile organic carbon in alpine grassland ecosystem at the south slope of Gongga south mountain-Laguigangri Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3501−3508.

[13] 杜森, 李秀英, 李花粉, 等. 土壤腐殖质组成的测定焦磷酸钠−氢氧化钠提取重络酸钾氧化容量法: NY/T 1867—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Du S, Li X Y, Li H F, et al. Determination of humus content in soil. NY/T 1867—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[14] 赵凌平, 魏楠, 谭世图, 等. 冬季火烧对黄土高原典型草原群落特征及土壤特征的影响 [J]. 草地学报, 2018, 26(3): 576−583.

Zhao L P, Wei N, Tan S T, et al. Effects of winter fire on vegetation community characteristics and soil properties of a typical steppe on the Loss Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(3): 576−583.

[15] 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 W X, Xue W X, Zhang R F, et al. Respones of soil physicochemical properties under masson pine forests to different forest fire severities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 1−12.

[16] 王鼎, 周梅, 赵鹏武, 等. 重度火干扰对不同林型落叶松林土壤化学性质的影响 [J]. 北方园艺, 2019(5): 84−89.
Wang D, Zhou M, Zhao P W, et al. Responses of soil chemical properties in *Larix gmelinii* forest under different forest types after fire [J]. Northern Horticulture, 2019(5): 84−89.

[17] Neary D G, Klopatek C C, Debano L F, et al. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis [J]. Forest Ecology and Management, 1999, 122: 51−71.

[18] 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 Y W, Li X Y, Zhu T D, 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.

[19] 陈莉莉, 王得祥, 于飞, 等. 林分密度对土壤水分理化性质的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(8): 61−64.
Chen L L, Wang D X, Yu F, et al. Effects of stand density on physical and chemical properties of soil moisture [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(8): 61−64.

[20] Alcaniz M, Outeiro L, Francos M, et al. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain) [J]. Science of the Total Environment, 2016, 572: 1329−1335.

[21] 宋利臣, 何平平. 重度林火对大兴安岭土壤生境因子的影响 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1809−1814.
Song L C, He P P. Effects of severe forest fire on soil habitat factors in Greater Xing'an Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1809−1814.

[22] 韩懂懂. 火干扰对兴安落叶松林土壤生态系统多功能性的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
Han D D. Research on the effects of fire disturbance on soil ecosystem multifunctionality of Dahurian larch forests[D]. Harbin: Northeast Forest University, 2023.

[23] 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 Y, Suo A L, Gao M, 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.

[24] 魏云敏. 火干扰对兴安落叶松林土壤理化性质和有机碳组分的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
Wei Y M. Effects of fire disturbance on soil properies and soil organic carbon components in a *Larix gmelinii* forest[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.

[25] 陈晓慧, 黎艳, 等. 土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对气候变化响应的 Meta 分析 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 272−282.
Chen X H, Li Y, et al. Meta-analysis on responses of soil particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon to climate change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 272−282.

[26] 周怡志, 李希来, 姚文治, 等. 自然野火对高寒沼泽湿地土壤有机碳组分的影响 [J]. 草地学报, 2025, 33(6): 1771−1781.
Zhou Y Z, Li X L, Yao W Z, et al. Effects of natural wildfires on soil organic carbon components in alpine marsh wetland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6): 1771−1781.

[27] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 108−118.
Hu H Q, Luo S S, Luo B Z, et al. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon and its components of *Cunninghamia lanceolata* forest in Guangdong Province, southern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 108−118.

[28] James J A, Kern C C, Miesel J R. Legacy effects of prescribed fire season and frequency on soil properties in a *Pinus resinosa* forest in northern Minnesota [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 415: 47−57.

[29] 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 L, Ren Y X, Dou X, et al. Effects of fire disturbance on soil carbon, nitrogen and driving factors of *Pinus tabuliformis* forests in Qipan Mountain [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(7): 120−128.

[30] 韩易伦, 李晓英, 蔡慧颖, 等. 林火对大兴安岭多年冻土土壤碳氮储量的影响 [J]. 冰川冻土, 2024, 46(4): 1341−1355.
Han Y L, Li X Y, Cai H Y, et al. Effects of forest fires on soil carbon and nitrogen storages in the permafrost region in the Da Xing' anling Mountains, NE China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(4): 1341−1355.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　臧润国）