

DOI: 10.20103/j.stxb.202410162519

冷佳欣, 刘春红, 王轶浩, 薄纯悦, 张凤, 杨喻涵, 张雉昀. 重度火灾对缙云山林地持水力的影响研究. 生态学报, 2025, 45(17): - .
Leng J X, Liu C H, Wang Y H, Bo C Y, Zhang F, Yang Y H, Zhang Z Y. Research on the influence of severe fire on the water-holding capacity of forest land in Jinyun Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

重度火灾对缙云山林地持水力的影响研究

冷佳欣^{1,2}, 刘春红^{1,2,3,*}, 王轶浩^{1,2,3}, 薄纯悦^{1,2}, 张凤⁴, 杨喻涵¹, 张雉昀¹

1 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

2 重庆师范大学地理与旅游学院, 三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆 401331

3 重庆师范大学地理与旅游学院, 三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331

4 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

摘要:为阐明重度火灾对林地持水力的影响,揭示森林持水性能对林火的响应机制。以缙云山火烧迹地为研究对象,测定土壤理化性质和枯落物持水力等指标,量化各因素对林地持水力的重要性。研究表明:(1)缙云山重度火灾区林地有效持水量减少 44.3%,林地最大持水量提高 14.6%。枯落物蓄积量下降 36.9%,而枯落物有效拦蓄率提高 13.6%;土壤平均自然含水率、饱和含水率分别提高 68.0%、15.9%。(2)随土层深度的增加,土壤理化性质变化明显。重度火烧后土壤容重下降 15.3%,毛管孔隙度下降 44.3%,总孔隙度提高 14.7%,土壤有机质增加 48.2%。(3)冗余分析结果表明,土壤容重、土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度是影响土壤持水力的关键因子,三项所占解释量之和达 83.1%。火烧干扰、土壤有机质和土层深度对林地持水力也具有重要影响。土壤持水力在林地持水力中贡献最大,土壤容重、土壤毛管孔隙度是影响重度火烧后林地持水力的关键因素。研究结果量化了重度火灾对林地持水力的影响,可为后续制定林地恢复与管理策略提供科学依据,促进生态系统的可持续发展。

关键词:火烧迹地;枯落物;土壤理化性质;持水力;缙云山

Research on the influence of severe fire on the water-holding capacity of forest land in Jinyun Mountain

LENG Jiaxin^{1,2}, LIU Chunhong^{1,2,3,*}, WANG Yihao^{1,2,3}, BO Chunyue^{1,2}, ZHANG Feng⁴, YANG Yuhuan¹, ZHANG Zhiyun¹

1 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

2 Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area, College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

3 Chongqing Field Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area, College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

4 College of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In Jinyun Mountain of Chongqing, a comprehensive study was conducted on burned areas to analyze the water-holding capacity of forest land with measuring soil physicochemical properties and the water-holding capacity of litter. The research aimed to elucidate the effects of severe forest fire on the water-holding capacity of forest land and reveal the response mechanism of forest water-holding performance to forest fire. The findings revealed that: (1) In the severely burned area of Jinyun Mountain, the effective water holding capacity of the forest land decreased by 44.3%, while the maximum water holding rate of the forest land increased by 14.6%. The litter accumulation declined by 36.9%, yet the

基金项目:国家自然科学基金(42107355);重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0741);重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2024TIAD-LDX0001)

收稿日期:2024-10-16; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 20131490@cqu.edu.cn

effective interception rate of litter rose by 13.6%. The average natural water content and saturated water content of the soil increased by 68.0% and 15.9% respectively. (2) The physical and chemical properties of soil exhibited pronounced changes with increasing soil depth. After severe burning, the soil bulk density decreased by 15.3%, capillary porosity declined by 44.3%, total porosity increased by 14.7%, and soil organic matter rose by 48.2%. (3) The results of redundancy analysis indicated that soil bulk density, capillary porosity, and non-capillary porosity were the key factors affecting soil water-holding capacity, and the sum of the explanatory amounts accounted for by the three amounts to 83.1%. Fire disturbance, soil organic matter, and soil layer depth also exerted significant influences on the water-holding capacity of forest land. Soil water-holding capacity made the greatest contribution to the water-holding capacity of forest land. Soil bulk density and soil capillary porosity were the key factors affecting the water-holding capacity of forest land after severe fire. The research findings quantified the effects of severe fire on the water-holding capacity of forest land, which would offer a scientific basis for the subsequent formulation of forest land restoration and management strategies, and promote the sustainable development of the ecosystem.

Key Words: post-fire plot; litter; soil physicochemical properties; water-holding capacity; Jinyun Mountain

森林持水性是森林生态系统对水分的吸持能力,受枯落物与土壤水文学特征的综合影响。枯落物层是森林土壤特有的发生层,能有效拦蓄降水,减少土壤层水分蒸发,降低土壤侵蚀风险^[1]。枯落物层之下的土壤层是森林生态系统蓄水的主要载体^[2],其持水力是评价林分水源涵养的重要指标。森林土壤层与枯落物层作为森林生态系统中重要的水文层次,发挥着森林生态系统水源涵养、水土保持及早涝调节等功能^[3]。森林持水力对维持森林生态系统稳定、促进生物多样性以及调节气候至关重要^[4]。因此,深入研究森林持水力的变化机制及影响因素对揭示与量化森林生态系统的水文循环具有重要意义。

林火作为森林生态系统的关键干扰因素,不仅影响森林生态系统的演替进程与碳分配过程^[5],还通过改变林地土壤 pH、碳氮储量等土壤性质,引起土壤真菌群落的变化^[6]。不同火烧强度对林地土壤性质和物种组成等均有显著影响^[7],轻度火烧有助于优化土壤结构,中度火烧有利于维持较高的群落多样性^[8],重度火烧则会影响植被拦蓄降水,增加土壤流失退化的风险^[9]。林火后鼠季(*Ceanothus crassifolius*)林的土壤斥水性显著增强^[10];热带森林土壤持水量下降^[11];恢复 5、15 a 的云杉属-冷杉属林火烧迹地枯落物最大持水量低于天然林^[12];重度火烧后油松林枯落物持水力明显下降^[13]。可见,林火对林地持水力的研究多从立地条件^[14]、植被类型^[15]、恢复年限^[16]等单一要素分析。土壤与枯落物的相互作用对持水性也有显著影响,共同决定了森林生态系统的水文效应,但目前尚缺乏系统研究,亟需准确评估重度火烧后的林地持水力,以揭示火烧对森林水循环和生态功能的影响机制,并为灾后森林生态恢复工作提供指导。

重庆缙云山作为三峡库区尾部的重要生态屏障,是亚热带林区最易受火灾损害的森林类型^[17]。2022 年 8 月 21 至 26 日,极端高温干旱导致该保护区发生严重森林大火,尤其以北碚区虎头村的针阔混交林受损最为严重^[18]。因此,本研究以虎头村重度火烧迹地为研究对象,旨在评估森林火灾对林地持水力的影响,并探究其与土壤理化性质的关系。研究结果将为缙云山火灾后植被恢复和生态环境重建提供数据支持,同时为林地的科学管理提供理论基础。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处重庆市缙云山国家级自然保护区内(106°17'—106°24'E, 29°41'—29°52'N),海拔在 350—925.5 m,坡度为 21—44°。土壤以黄壤为主,水稻土和紫色土零星分布。缙云山属于亚热带季风性湿润气候,年平均气温在 13.6 °C 左右,最高温可达 36.2 °C,最低温为-4.6 °C,年平均相对湿度为 87%。缙云山植被类型主要为常绿阔叶林、暖性针叶林、竹林和阔叶灌木等,主要乔木树种有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松

(*Pinus massoniana*)、润楠(*Machilus nanmu*)和四川大头茶(*Gordonia acuminata*)等,草本植物主要有狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)和裂叶铁线莲(*Clematis parviloba*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

试验于2023年3月,在缙云山虎头村进行踏勘和样地调查,记录区域内植物种类、株数及林木熏黑高度。根据海拔高度在火烧迹地及未火烧林地内分别布设3条样线作为重复(图1)。坡位影响山火的发生和蔓延,火势变化也存在差异^[19]。因此,于样线上选取上坡、中坡和下坡3个坡位的重度火烧迹地,同时以未受火烧干扰林区的3个对应坡位作为对照,样地概况见表1。每个坡位设置3个10 m×10 m样方,共设样方18个。各样方内按照正方形对角取样法设置3个1 m×1 m的样地,并收集枯落物。

1.2.2 样品采集

采用分层取样法按照土壤发生层,在6个样方内采集土样。山地土层较薄,厚度为30—40 cm,因此仅采集腐殖质层(A层)和淀积层(B层),同一土层多点采集后混匀,采集土样、环刀样各36个。同时收集各样地的地表枯落物,装密封袋后带回实验室待测。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤持水力测定

土壤分析样品挑去植物残体和侵入体,在室内自然风干后过2 mm筛,保存用于测定土壤总有机碳和土壤理化性质。土壤有机碳含量采用元素分析仪(Thermo Fisher Scientific Flashsmart)测定。土壤有机质含量根据土壤有机碳含量计算得来,计算公式^[20]为:

$$\text{SOM} = 1.724\text{SOC} \quad (1)$$

式中:SOM为土壤有机质含量(g/kg);SOC为土壤有机碳含量(g/kg)。

表1 研究区样地概况

Table 1 General situation of sample site

火烧情况 Fire condition	坡位 Slope position	坡向 Aspect of slope	坡度/(°) slope gradient	植物种 Plant species	经纬度 Longitude and latitude
火烧迹地 Post-fire plot	上坡	西	23	马尾松	29°46'46"N、106°19'6"E
	中坡	西南	36	杉木、马尾松	29°46'16"N、106°19'58"E
	下坡	西北	33	杉木	29°46'13"N、106°19'54"E
对照样地 Control plot	上坡	西	39	狗脊蕨、芒萁	29°48'2"N、106°22'16"E
	中坡	西北	35	芒萁、裂叶铁线莲	29°48'2"N、106°22'16"E
	下坡	西北	34	杉木、马尾松	29°48'2"N、106°22'18"E

土壤理化性质分析参照《土壤农业化学分析方法》^[21];土壤容重、土壤自然含水率、毛管持水率、饱和含水率和土壤孔隙度用环刀法。土壤有效持水量、土壤饱和持水量^[22]计算如下:

$$S = 10000Ph \quad (2)$$

式中:S为土壤有效持水量(t/hm^2);P为土壤毛管孔隙度(%);h为土层厚度(m),为0.3 m。

$$S_{\max} = 10000 P_{\max} h \quad (3)$$

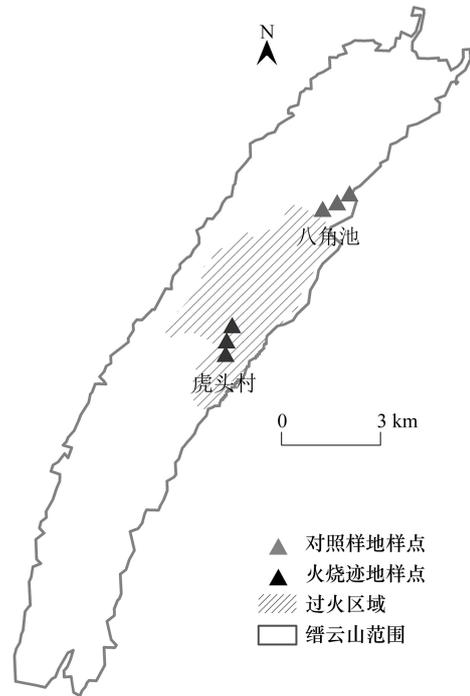


图1 研究区样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of sample points in the research area

式中: S 为土壤饱和持水量(t/hm^2); P_{\max} 为土壤总孔隙度(%)。

1.3.2 枯落物持水力测定

将收集的表层枯落物进行鲜重称样后放入 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中进行干燥,称取干重并计算单位面积林地上枯落物蓄积量(t/hm^2)。在室内采用浸泡法^[12]测定枯落物持水量和持水率,将枯落物装入尼龙网,在浸泡时间满 1、2、3、4、24 h 后,分别取出称重,用其浸泡 24 h 的重量计算枯落物最大持水量和持水率。枯落物的持水率、自然含水率及有效拦蓄量计算公式为^[12]:

$$m = m_t - m_1 \quad (3)$$

式中: m 为枯落物持水量(g); m_t 为浸泡 t 时刻时枯落物和尼龙网袋的总质量(g); m_1 为浸泡前枯落物和尼龙网袋的总质量(g)。

$$L = m/m_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中: L 为枯落物持水率(%); m_0 为枯落物干重(g)。以 24 h 时的持水率为最大持水率,记作 $L_{h\max}$ 。

$$R_0 = (G - G_d)/m_0 \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_0 为自然含水率(%); G 为枯落物鲜重(g); G_d 为枯落物干重(g)。

$$M_i = (0.85 L_{h\max} - R_0) \times M \quad (6)$$

式中: M_i 为枯落物有效拦蓄量(t/hm^2); M 为枯落物蓄积量(t/hm^2);0.85 为有效拦蓄系数,在一般情况下,枯落物的实际持水率约为最大持水率的 85%,因此取 0.85 作为有效拦蓄系数来估算枯落物层的有效拦蓄量^[12]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行统计分析;实验数据用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(One-way analysis of variance, ANOVA),通过 Duncan's 法进行多重比较($\alpha = 0.05$),并用 Origin 2022 软件进行制图,利用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 火灾后缙云山林地枯落物持水力变化

与未火烧地相比,火烧迹地枯落物蓄积量显著下降 36.9% ($P < 0.05$),火烧迹地、未火烧地的枯落物蓄积量分别为 0.19、0.31 t/hm^2 (表 2)。火烧迹地枯落物的蓄积量为中坡(0.14 t/hm^2) < 下坡(0.21 t/hm^2) < 上坡(0.23 t/hm^2)。火烧后不同坡位枯落物蓄积量表现出不同程度的下降,中坡枯落物蓄积量下降最多,下坡次之,上坡最少,分别下降 65.1%、40.8%、4.7%。中坡林地枯落物蓄积量显著降低($P < 0.05$),而上坡与下坡无显著差异($P > 0.05$)。

表 2 枯落物蓄积及持水特征

Table 2 Accumulation and water-holding characteristics of litter

指标 Index	对照样地 Control plot			火烧迹地 Post-fire plot		
	下坡	中坡	上坡	下坡	中坡	上坡
蓄积量 Stock volume of litter/ (t/hm^2)	0.33±0.10 Aa	0.34±0.06 Aa	0.24±0.08 Aa	0.21±0.07 Aa	0.14±0.02 Ab	0.23±0.12 Aa
自然含水率 Natural moisture content/%	16.44±3.76 Aa	24.14±5.08 Aa	19.51±5.87 Aa	31.03±11.16 Aa	10.81±1.43 Aa	28.99±12.43 Aa
最大持水率 Maximum water-holding rate/%	206.36±75.69 Aa	235.49±32.05 Aa	261.34±75.23 Aa	243.46±73.96 Aa	272.80±49.49 Aa	285.43±47.10 Aa
有效拦蓄量 Effective interception amount/ (t/hm^2)	0.48±0.05 Aa	0.61±0.14 Aa	0.46±0.05 Aa	0.34±0.03 Ab	0.31±0.01 Ab	0.45±0.18 Aa
有效拦蓄率 Effective interception rate/%	158.96±66.11 Aa	176.03±9.74 Aa	202.63±65.53 Aa	175.91±54.96 Aa	221.07±43.13 Aa	213.63±50.52 Aa

表中数据均为平均值±标准差($n = 3$);不同大写字母表示同样地不同坡位差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示同样地同一坡位差异显著($P < 0.05$)

火烧迹地枯落物的最大持水率为 267.2%, 相较于未火烧林地提高 14.0%。火烧迹地不同坡位枯落物最大持水率存在差异, 上坡、中坡、下坡的最大持水率依次为 285.4%、272.8%、243.5%。与未火烧林地相比, 枯落物最大持水率在上坡、中坡和下坡分别提高了 9.2%、15.9%、18.0%, 但与火烧前并无显著差异 ($P>0.05$)。未火烧地和火烧迹地的枯落物最大持水率分别是自身干重的 7.9 和 13.5 倍, 表明受林火干扰后枯落物吸持水分的能力有一定提升。

火烧迹地、未火烧地枯落物有效拦蓄量分别为 0.37 和 0.52 t/hm², 有效拦蓄率分别为 203.5% 和 179.2%。火烧后有效拦蓄量降低 28.7%, 而有效拦蓄率却提高 13.6%。未火烧地枯落物的有效拦蓄量表现为: 上坡<下坡<中坡, 而火烧迹地则表现为中坡<下坡<上坡; 未火烧地有效拦蓄率呈上坡高下坡低的规律, 而火烧迹地则表现为中坡最高、上坡次之、下坡最低。林火显著影响枯落物有效拦蓄量 ($P<0.05$), 而对有效拦蓄率影响不显著 ($P>0.05$)。

2.2 森林火灾对缙云山林地土壤持水力的影响

林火干扰后, 火烧迹地土壤自然含水率明显提高 (图 2)。未火烧地、火烧迹地土壤平均自然含水率分别为 5.8% 和 9.7%。与未火烧地相比, 火烧迹地土壤平均自然含水率提高 68.0%。重度火烧土壤枯落物层的减少, 导致水分入渗增加, 引起土壤自然含水率提高, 淀积层、腐殖质层土壤自然含水率分别提高 77.0%、60.1%, 淀积层土壤自然含水率平均增幅大于腐殖质层。坡位不同, 土壤自然含水率也存在差异。未火烧地土壤自然含水率大小依次为: 上坡(5.1%)<下坡(5.5%)<中坡(6.7%), 而火烧迹地则为中坡(7.0%)<下坡(10.5%)<上坡(11.6%)。火烧迹地下坡、中坡、上坡土壤自然含水率依次提高 88.9%、5.7%、126.1%, 中坡土壤自然含水率增幅最小。林火干扰前后土壤自然含水率呈极显著差异 ($P<0.01$), 这在不同土层间也有所体现。

火灾后火烧迹地土壤饱和含水率也明显增加。未火烧地、火烧迹地的土壤饱和含水率分别为 32.6%、

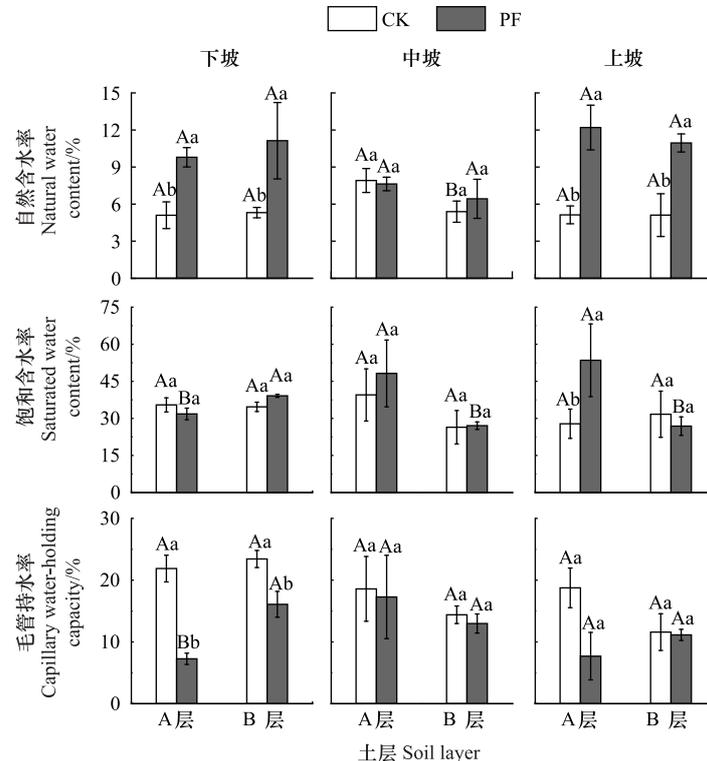


图 2 火烧迹地与对照样地土壤持水力对比

Fig.2 Comparison of soil water holding capacity in the post-fire plot and the control plot

不同大写字母表示同一样地同一坡位的不同土层深度差异显著 ($P<0.05, n=3$); 不同小写字母表示不同样地同一坡位的相同土层深度差异显著 ($P<0.05, n=3$); A层: 腐殖质层; B层: 淀积层; CK: 对照样地; PF: 火烧迹地

37.8%, 火烧迹地土壤饱和含水率提高 15.9%。不同土层饱和含水率增幅不同, 腐殖质层和淀积层的土壤饱和含水率分别增加 29.9%、0.3%。其次, 不同坡位的土壤饱和含水率也有较大差异。火烧迹地土壤饱和含水率表现为下坡(35.5%)<中坡(37.6%)<上坡(40.2%), 而未火烧地则表现为上坡(29.7%)<中坡(32.9%)<下坡(35.1%)。火烧后土壤饱和含水率从下坡到上坡依次增加了 0.4%、4.7%、10.4%, 说明下坡土壤饱和含水率受林火影响最小。经方差分析可知, 土壤饱和含水率受林火的影响并不显著($P>0.05$), 不同土层、坡位的土壤饱和含水率未表现出明显的规律性。

林火后不同土层、坡位土壤毛管持水率下降程度不同, 变化规律也有差异。未火烧地、火烧迹地土壤毛管持水率分别为 18.1% 和 12.1%, 林火导致土壤毛管持水率下降 33.3%。从土壤发生层看, 腐殖质层、淀积层土壤毛管持水率分别下降 45.5%、18.7%, 表明下层土壤受林火影响较小。不同坡位火烧迹地的土壤毛管持水率表现为上坡(9.4%)<下坡(11.7%)<中坡(15.1%), 而未火烧地表现为上坡(15.2%)<中坡(16.5%)<下坡(22.7%)。火烧干扰后下坡、上坡土壤毛管持水率下降 48.5%、38.0%, 而中坡受影响最小, 仅下降 8.3%。

2.3 森林火灾对林地持水量的影响

未火烧地的林地有效持水量为 1397.12 t/hm², 而火烧迹地降至 777.82 t/hm², 林地有效持水量下降了 44.3%。其中, 林地土壤有效持水量由 1396.50 t/hm²降至 777.37 t/hm², 枯落物有效持水量由 0.64 t/hm²降至 0.44 t/hm², 分别下降 44.3% 和 28.6% (图 3)。枯落物层的有效持水量仅占林地有效持水量的 0.03—0.08%,

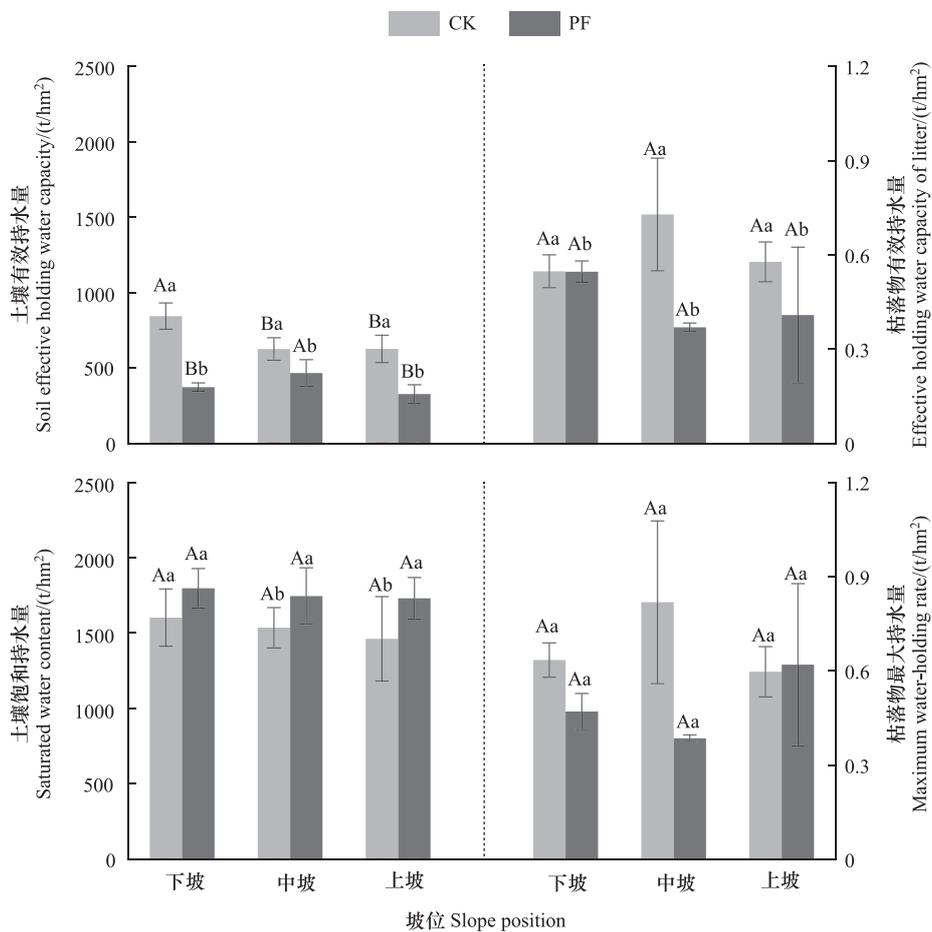


图 3 火烧迹地与对照样地的林地持水量对比

Fig.3 A comparative analysis of the water retention capacity of forest land in the post-fire plot and the control plot

不同大写字母表示相同样地不同坡位差异显著($P<0.05, n=3$); 不同小写字母表示不同样地同一坡位差异显著($P<0.05, n=3$); 土壤有效持水量、枯落物有效持水量、土壤饱和含水量以及枯落物最大持水量均为腐殖质层与淀积层之和; CK: 对照样地; PF: 火烧迹地

表明土壤在林地水源涵养中的主导作用。火烧后土壤毛管孔隙度下降,导致土壤有效持水量减少了 619.23 t/hm²。林火干扰导致不同坡位的土壤有效持水量显著下降,其中下坡下降最多(55.8%),上坡次之(47.7%),中坡下降最少(25.4%)。枯落物层的有效持水量呈现相反趋势,中坡下降最多(49.3%),上坡(29.3%)和下坡(0.3%)较低。林火极显著降低了林地土壤层的有效持水量($P < 0.01$),但对枯落物层的有效持水量影响不显著($P > 0.05$),进一步说明土壤在维持森林持水力上的关键作用。

火烧前后林地最大持水量分别为 1532.76 t/hm²、1757.21 t/hm²,林火发生后提高 14.6%。枯落物层占林地最大持水量的 0.02%—0.05%,土壤层占 99.95%—99.98%。其中,火烧迹地土壤饱和持水量与枯落物最大持水量为 1756.72 t/hm²和 0.49 t/hm²,未火烧林地分别为 1356.08 t/hm²和 0.68 t/hm²。火烧后土壤饱和持水量提高 14.7%,而枯落物最大持水率下降 28.0%。土壤饱和持水量和最大持水量在火烧前后的差异均呈极显著水平($P < 0.01$)。

2.4 火灾后影响林地持水力的因素变化

2.4.1 枯落物的吸水性变化

由表 3 可知,未火烧地、火烧迹地枯落物的吸水量均随浸水时间的延长而增加。在吸水初期(0—2 h),枯落物持水量迅速上升;随后(2—4 h)其持水量的增加幅度减缓;4 h 后,枯落物持水量的增长速度显著变缓,在 24 h 时趋于饱和。

表 3 单位质量枯落物的吸水量与浸水时间的关系

Table 3 The relationship between the water absorption capacity of litter per unit mass and the duration of immersion

浸水时间 Soaking time/h	吸水量 Water-holding capacity/(g/g)					
	对照样地 Control plot			火烧迹地 Post-fire plot		
	下坡	中坡	上坡	下坡	中坡	上坡
1	1.63±0.57	2.60±0.24	1.85±0.62	2.00±0.57	2.09±0.53	1.24±0.21
2	1.64±0.65	2.50±0.44	2.37±0.72	2.08±0.55	2.41±0.52	1.51±0.56
3	1.58±0.58	2.41±0.50	2.06±0.68	2.10±0.31	2.41±0.61	1.46±0.33
4	1.33±0.58	2.24±0.27	1.74±0.52	2.08±0.69	2.05±0.40	1.44±0.55
24	1.93±0.76	2.77±0.32	2.44±0.75	2.47±0.74	2.86±0.49	1.88±0.47

未火烧地、火烧迹地枯落物在 24 h 时的吸水量相近,分别为 2.59 g/g 和 2.40 g/g。火烧迹地不同坡位枯落物 24 h 的吸水量表现为上坡<下坡<中坡,而未火烧地为下坡<上坡<中坡。总体来看,中坡枯落物的吸水性最好,表明其短时截水效果最佳。

在吸水速度方面,火烧迹地与未火烧林地平均吸水速度差异较小,均为 0.10 g/h,火烧后仅提高 0.9%。火烧迹地与未火烧林地初期吸水速度分别为 0.46 g/h 与 0.44 g/h,后期吸水速度均为 0.03 g/h。

2.4.2 土壤物理性质变化

火烧迹地、未火烧地的土壤容重分别为 1.10 和 1.30 g/cm³,火烧后土壤容重降低了 15.3%(图 4)。林火干扰后,腐殖质层和淀积层土壤容重分别下降了 14.5%和 16.0%。土壤容重在不同坡位上受火烧影响的程度有所差异,上坡、中坡、下坡容重分别下降 17.5%、14.3%、13.9%,其中上坡减少最为显著。由方差分析可知火烧对土壤容重的影响并不显著($P > 0.05$)。

土壤孔隙度是衡量土壤结构和功能的关键指标,它不仅关系到土壤的紧实度和导热性,也是评估土壤通气 and 透水能力的重要参数^[23]。火烧迹地的土壤孔隙度为 58.6%,未火烧地为 51.1%,林火后土壤总孔隙度增加了 14.7%(表 4)。其中,腐殖质层的孔隙度提高 12.1%,淀积层则提高了 17.6%。土壤孔隙度在火烧前后均表现为上坡低下坡高的分布规律。尤其是火烧后上坡土壤孔隙度增加最显著,达到 18.5%,而下坡增加幅度最小,为 12.1%。总体而言,火烧前后淀积层差异极显著($P < 0.01$),而腐殖质层变化则不显著($P > 0.05$)。

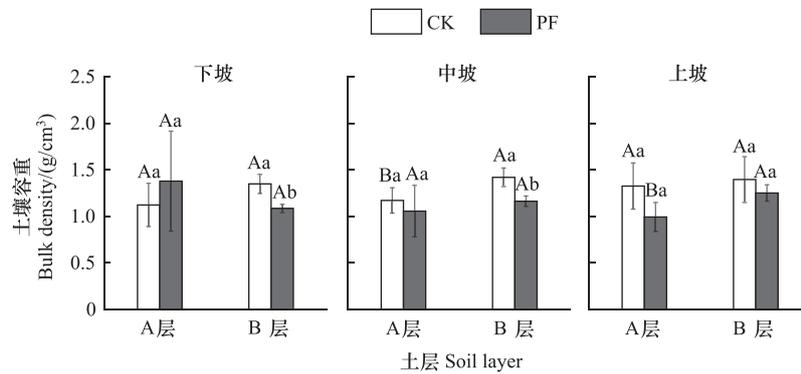


图4 火烧迹地与对照样地土壤容重对比

Fig.4 Comparison of soil bulk density between the post-fire plot and control plot

不同大写字母表示相同样地同一坡位的不同土层深度差异显著 ($P < 0.05, n = 3$); 不同小写字母表示不同样地同一坡位的相同土层深度差异显著 ($P < 0.05, n = 3$); A层: 腐殖质层; B层: 淀积层; CK: 对照样地; PF: 火烧迹地

表4 火烧迹地与对照样地土壤孔隙度对比

Table 4 Comparison of soil porosity between the post-fire plot and control plot

样地情况 Plot condition	坡位 Slope position	土层 Soil layer	总孔隙度 Soil total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%
对照样地 Control plot	下坡	A层	57.65±8.79 Aa	24.71±3.60 Ba	32.94±11.78 Ab
		B层	49.12±3.87 Ab	31.53±2.17 Aa	17.59±5.61 Ab
火烧迹地 Post-fire plot	中坡	A层	55.83±5.14 Aa	21.35±3.96 Aa	34.48±4.40 Aa
		B层	46.45±3.76 Bb	20.34±1.01 Aa	26.11±3.42 Bb
	上坡	A层	50.00±9.37 Aa	24.30±0.82 Aa	25.70±10.16 Ab
		B层	47.36±9.29 Aa	17.42±5.25 Aa	29.94±14.54 Aa
火烧迹地 Post-fire plot	下坡	A层	60.64±7.04 Aa	7.46±0.33 Ba	53.18±7.37 Aa
		B层	59.08±1.69 Aa	17.38±1.55 Ab	41.7±0.78 Ba
	中坡	A层	60.15±10.43 Aa	15.98±3.56 Aa	47.17±9.90 Aa
		B层	56.14±2.1 Aa	15.11±2.31 Ab	41.03±4.15 Aa
上坡	A层	62.54±5.87 Aa	7.94±3.55 Bb	54.60±2.46 Aa	
	B层	52.80±3.32 Ba	13.87±0.53 Aa	38.93±3.40 Ba	

表中数据均为平均值±标准差 ($n = 3$)。不同大写字母表示相同样地同一坡位的不同土层深度差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示不同样地同一坡位的相同土层深度差异显著 ($P < 0.05$)。A层, 腐殖质层; B层, 淀积层

火烧迹地毛管孔隙度为 13.0%, 较未火烧地降低 44.3%。火烧后腐殖质层和淀积层的毛管孔隙度分别下降 55.4% 和 33.1%。不同坡位的毛管孔隙度表现不同: 火烧迹地为上坡 < 下坡 < 中坡, 未火烧林地为中坡 < 上坡 < 下坡; 下坡和上坡分别下降 47.7% 和 55.8%, 中坡下降幅度最小, 为 25.4%。

林火干扰后, 火烧迹地的非毛管孔隙度增至 45.6%, 较未火烧林地的 27.8% 显著提高了 64.1%。土壤非毛管孔隙度随土层深度的增加而降低, 与毛管孔隙度变化规律相反。受林火干扰后, 下坡土壤的非毛管孔隙度增加最明显, 达到 87.8%, 中坡土壤的增幅较小, 为 40.6%。火烧迹地与未火烧林地的土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度差异均呈极显著 ($P < 0.01$), 表明林火显著影响了土壤孔隙度。

2.4.3 土壤有机质含量变化

土壤有机质通过改善土壤结构、降低土壤容重、增加土壤毛管孔隙度等土壤物理特性对土壤的持水力产生作用^[24]。火烧迹地与未火烧林地的土壤有机质含量分别为 80.97 g/kg 和 54.63 g/kg, 火烧迹地土壤有机质含量提高 48.2% (图 5)。土壤有机质随土层深度的增加而减少, 火烧后腐殖质层和淀积层土壤有机质分别增加了 40.1% 和 69.8%。未火烧林地的有机质含量在不同坡位上差异较小, 而火烧迹地差异明显, 表现为上坡

(66.96 g/kg) < 中坡 (73.36 g/kg) < 下坡 (102.60 g/kg), 下坡增幅最大, 高达 96.8%, 中坡和上坡增幅较小, 分别为 31.9% 和 19.2%。火烧前后有机质含量差异显著 ($P < 0.05$)。分层来看, 腐殖质层有机质极显著增加 ($P < 0.01$), 淀积层也显著增加 ($P < 0.05$)。

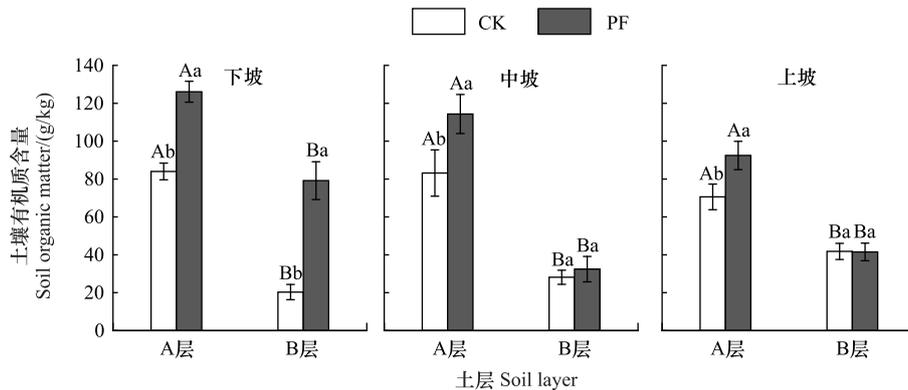


图 5 火烧迹地与对照样地土壤有机质含量对比

Fig.5 Comparison of soil organic matter content between the post-fire plot and control plot

不同大写字母表示相同样地同一坡位的不同土层深度差异显著 ($P < 0.05, n = 3$); 不同小写字母表示不同样地同一坡位的相同土层深度差异显著 ($P < 0.05, n = 3$); A 层: 腐殖质层; B 层: 淀积层; CK: 对照样地; PF: 火烧迹地

2.5 林地土壤持水力与影响因子的关系

为明确林火干扰后引起林地持水力显著变化的主要因子, 并阐明其与林地持水力的关系。首先计算样地条件和土壤理化性质的方差膨胀因子。结果显示土壤总孔隙度、枯落物蓄积量与枯落物有效拦蓄率等指标的方差膨胀因子均大于 20, 具有较强的多重共线性, 故将其去除。结果显示, 前两轴的累计解释量达 86.3%, RDA1 (71.8%) 代表了土壤饱和含水率 SC; RDA2 (14.5%) 主要代表了土壤毛管持水率 CC (图 6)。SC 与 RDA1 轴存在较强的相关性, 其中起主导作用的是土壤毛管孔隙度 CP 和非毛管孔隙度 NCP, 其解释率分别为 29.7% 和 27.5%。CC 与 RDA2 轴存在较强的相关性, 土壤容重 BD 是对 CC 产生影响的主导因子, 其解释率为 25.9%。同时, RDA1 与 RDA2 对于响应因子与环境因子的累计解释量达到 86.1%, 表明排序结果较好。其中, SC 与 FI、土壤非毛管孔隙度 NCP、土壤有机质 SOM、坡位 LOCA 成正相关, 与 BD 和枯落物有效拦蓄量 WSV 等呈负相关关系; CC 与 CP、WSV 等指标呈正相关关系, 与 BD、SOM、FI 呈负相关关系。如表 5 所示, BD、CP、NCP 与 FI 等指标的重要性依次降低, 各因子所占解释量为 1.1%—25.9%, BD、CP 与 NCP 重要性显著 ($P < 0.05$), 而 SOM、SD 等指标不显著 ($P > 0.05$)。

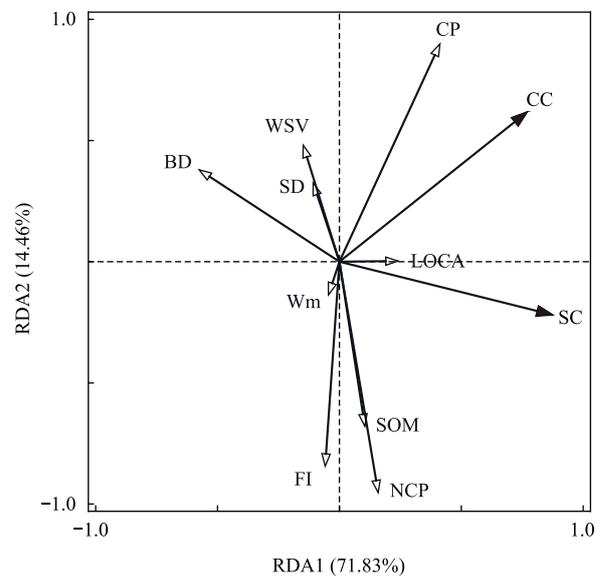


图 6 火烧迹地与对照样地土壤持水力与影响因子的冗余分析

Fig.6 Redundant analysis of soil water retention properties and influencing factors in the post-fire plot and control plot

CC: 土壤毛管持水率 Capillary water capacity; SC: 土壤饱和含水率 Saturated water content; BD: 土壤容重 Bulk density; CP: 土壤毛管孔隙度 Capillary porosity; NCP: 土壤非毛管孔隙度 Non-capillary porosity; FI: 火烧干扰 Fire interference; SOM: 土壤有机质含量 Soil organic matter; SD: 土层 Soil depth; LOCA: 坡位 Location; Wm: 枯落物最大持水率 Litter maximum water-holding rate; WSV: 枯落物有效拦蓄量 Efficiency of litterfall retention rate

表 5 持水力影响因子重要性排序表

Table 5 Ranking table of importance of influencing factors to water retention performance

影响因子 Influence factor	所占解释量 Explains rate/%	<i>F</i>	<i>P</i>	影响因子 Influence factor	所占解释量 Explains rate/%	<i>F</i>	<i>P</i>
土壤容重 BD	25.9	11.9	0.004	土层 SD	1	2.1	0.150
土壤毛管孔隙度 CP	29.7	10.8	0.002	坡位 LOCA	0.2	0.4	0.532
土壤非毛管孔隙度 NCP	27.5	52	0.002	枯落物最大持水率 Wm	<0.1	0.1	0.758
火烧干扰 FI	1.1	2.2	0.150	枯落物有效拦蓄量 WSV	<0.1	<0.1	0.822
土壤有机质含量 SOM	0.7	1.5	0.282				

BD: 土壤容重 Bulk density; CP: 土壤毛管孔隙度 Capillary porosity; NCP: 土壤非毛管孔隙度 Non-capillary porosity; FI: 火烧干扰 Fire interference; SOM: 土壤有机质含量 Soil organic matter; SD: 土层 Soil depth; LOCA: 坡位 Location; Wm: 枯落物最大持水率 Litter maximum water-holding rate; WSV: 枯落物有效拦蓄量 Efficiency of litterfall retention rate

3 讨论

3.1 森林火灾对林地持水力的影响

缙云山重度火烧后的林地有效持水量下降 44.3%, 最大持水量提高 14.6%, 土壤层持水量占林地持水量的 99.95% 以上, 该结果与吴雪铭等^[25]、张静等人^[26]的研究一致, 说明土壤层是影响林地持水力的主导因子。土壤饱和含水率和毛管持水率均能直观反映土壤的持水力, 同时还受枯落物密度、坡位和土壤类型等因素的影响^[1]。重度火烧迹地土壤平均自然含水率高于未火烧地, 主要为上坡的自然含水率升高, 是因火烧迹地上坡的坡度较缓, 有利于水分在土壤中保持。火烧迹地土壤毛管持水率显著下降, 尤其是腐殖质层明显降低。一是由于火后土壤表面形成连续疏水层, 导致表层土的渗透能力下降^[27]; 二是土体中的有机质被燃烧, 造成土壤孔隙结构塌陷以及可燃物灰烬的堵塞, 土壤毛管孔隙减少^[28], 可容纳水量下降, 造成林地土壤有效持水力降低。

火灾烧毁了大量枯落物, 导致其蓄积量、有效拦蓄量、最大持水量及有效持水量减少, 且组分发生改变^[29]。残余枯落物的有效拦蓄率、最大持水率及有效持水率得到改善。枯落物蓄积量也是造成枯落物有效持水量下降的重要原因, 但火灾后枯落物的有效持水量下降是短暂的, 随着时间的推移该指标将逐渐升高^[30]。此外, 植物与土壤是相互作用、相互影响的有机整体^[31], 枯落物与土壤对林地持水力的影响也相互关联。枯落物不仅能通过覆盖地表、蓄积降水和改善土壤结构等方式提高土壤持水力, 还能有效减缓土壤水分波动; 研究表明枯落物密度越大, 土壤持水力越好^[1]。土壤则通过其自身的理化特性以及生物过程来维持水分储存能力。

3.2 影响林地持水力的因素

土壤持水力主要与土壤容重、孔隙度等物理性质及土层厚度有关^[32], 本研究中土壤理化指标重要性排序为: 土壤容重 > 土壤毛管孔隙度 > 土壤非毛管孔隙度 > 土壤有机质含量。土壤容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度是影响土壤持水力变化的关键因子, 三项指标占总解释率的 83.1%。这是因为土壤容重和孔隙度反映了土壤的透水性和通气性, 是决定森林土壤水源涵养和水土保持能力的重要因素^[33]。火烧后土壤容重降低了 15.3%, 与闫相君等人^[7]的研究结果一致。一是由于火后植被大量枯死, 根系分解导致土壤孔隙增加; 二是研究区土壤由砂岩发育而成, 砂粒(黏粒含量为 7.0%—7.2%, 粉粒含量为 53.0%—68.4%, 砂粒含量为 24.6%—39.8%) 为粉砂质壤土, 黏粒含量低导致土壤黏结性较差。火烧过程中部分有机质燃烧、蒸汽膨胀, 土壤孔隙增加, 导致土壤更加疏松。以往的研究中, 火烧后林地土壤有机质含量的变化结果并不一致, 本研究中土壤有机质含量升高, 与赵蔓等人^[34]研究结果一致。可能是因为火烧造成土壤中部分有机质燃烧使得土壤原有的有机质减少^[35], 而枯落物层大量烧毁的可燃物、炭化颗粒等经淋溶作用又由孔隙进入土壤层^[36]。这一结果也由土壤团聚体的变化得到了论证。即重度火烧后土壤 A、B 层水稳性微团聚体 (<0.25 mm) 含量分别升高 6.6% 和 70.5%, 而大团聚体 (>0.25 mm) 质量分别降低 4.0%、25.2% (图 7), 与 Lu 等人^[37]认为火灾后大团聚

体数量减少而小团聚体增加的结果相吻合。说明原有土壤有机质减少后,新补充的土壤有机质还未充分与土壤颗粒胶结形成稳定的大团聚体。土壤有机质作为影响土壤持水力的重要因素之一^[38],是通过增加土壤孔隙度间接发挥提高持水力的作用^[39],因此解释率相对较低。样地环境对土壤持水影响力的大小排序为:火烧干扰>土层深度>坡位。重度火烧改变了土壤的结构和理化性质,而土层厚度决定了土壤存储水分的空间大小,坡位影响土壤水分入渗和坡面水分再分配,调节局地水资源分布^[40],但相对火烧干扰和土层深度,对土壤持水力的影响总体较小。

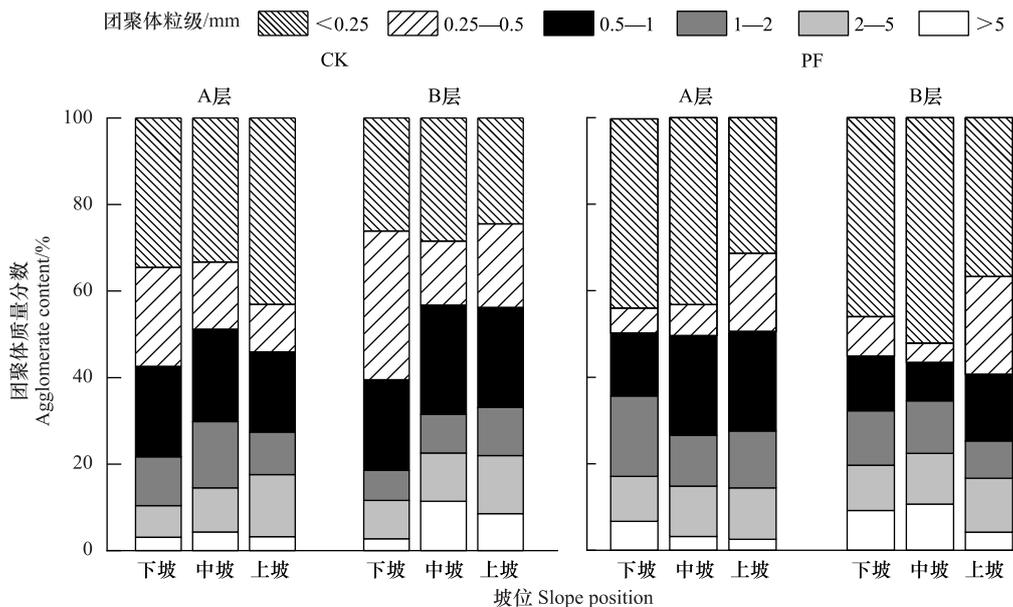


图7 火烧迹地与对照样地土壤团聚体质量分数对比

Fig.7 Comparison of soil aggregate quality fraction between the post-fire plot and control plot

A层:腐殖质层;B层:淀积层;CK:对照样地;PF:火烧迹地

综上,土壤理化性质、土层深度及坡位等因素均会影响缙云山火烧迹地的持水力。火烧迹地与未火烧林地的土壤自然含水率、饱和含水率均随土层深度增加而降低,表明浅层土壤的水分状况优于深层土壤。火烧导致土壤容重降低,总孔隙度增加(其中非毛管孔隙度显著提高了64.1%),进而使得土壤饱和含水率增加。从不同坡位来看,上坡的土壤容重、总孔隙度和非毛管孔隙受火灾影响最为显著,而下坡土壤有机质含量增加最多,高达96.8%。枯落物蓄积量减少和土壤表层疏水层的出现,使地表在重力和坡度的双重作用下形成更多的侧向径流,淋洗作用加强,有机质从上坡、中坡迁移至下坡汇集,下坡的堆积作用也随之突显^[41]。

缙云山作为我国森林火灾频发的亚热带林区,其受火烧干扰的影响涉及到长短期效应。本文仅对重度火灾区林地持水力的短期变化进行了探究,今后将从时空尺度并结合实地调研,围绕缙云山火烧迹地植被的恢复状况开展定期研究,进一步揭示林火对林地生态环境的影响机制。在缙云山火灾受损林地的植被重建和生态恢复中,建议提高植被覆盖率,增加枯落层蓄积量,减少对枯落物层的破坏,以增强森林持水力。火灾后林地土壤松散,需加强监管促进植被恢复,确保土层稳定,减少灾害风险。

4 结论

(1) 重度火烧后缙云山林地有效持水量显著下降,而最大持水量上升。土壤有效持水量因毛管孔隙堵塞、水稳性大团聚体(>0.25 mm)破坏而降低。

(2) 火烧迹地土壤受到上层枯落物可燃物、炭颗粒的影响,土壤有机质高于未火烧地,在腐殖质层表现尤为显著。土壤有机质多汇聚于下坡,增幅高达96.8%。

(3)土壤容重、土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度是影响土壤持水力变化的关键因子,土壤有机质含量、土层深度、枯落物有效拦蓄量、坡位等因子对土壤持水力影响较小。

参考文献(References):

- [1] 何娇, 马岚, 孙旭, 张金阁. 次降雨条件下枯落物和土壤持水特性及其影响因素. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3169-3176.
- [2] 王涛, 蒙仲举, 党晓宏, 李浩年, 付东升, 赵飞燕, 杨圃畅. 库布齐沙漠人工防护林林下枯落物及土壤水文效应研究. 生态环境学报, 2021, 30(4): 700-707.
- [3] 刘效东, 张卫强, 冯英杰, 赵新宇, 甘先华, 周庆. 森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望. 生态学杂志, 2022, 41(4): 784-791.
- [4] 朱家晟, 秦富仓, 李龙, 杨振奇, 张若曦. 内蒙古清水河县公益林区不同林地类型枯落物层水文效应. 水土保持通报, 2022, 42(1): 114-121.
- [5] 罗碧珍, 魏书精, 罗斯生, 胡海清, 王振师. 林火干扰对广东木荷林生态系统碳库的影响. 生态学报, 2023, 43(8): 3359-3369.
- [6] Orumaa A, Agan A, Anslan S, Drenkhan T, Drenkhan R, Kauer K, Köster K, Tedersoo L, Metslaid M. Long-term effects of forest fires on fungal community and soil properties along a hemiboreal Scots pine forest fire chronosequence. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158173.
- [7] 闫相君, 王云琦, 祁子寒, 何相昌, 李克文, 骆丕昭. 火烧迹地根系分布对浅层含根土水特征及渗透特性的影响. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(3): 42-51.
- [8] 李炳怡, 刘冠宏, 顾泽, 刘晓东, 舒立福. 火干扰对油松林土壤细菌群落的影响. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1355-1364.
- [9] Certini G, Moya D, Lucas-Borja M E, Mastrodonato G. The impact of fire on soil-dwelling biota: a review. *Forest Ecology and Management*, 2021, 488: 118989.
- [10] Hubbert K R, Preisler H K, Wohlgenuth P M, Graham R C, Narog M G. Prescribed burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA. *Geoderma*, 2006, 130(3/4): 284-298.
- [11] Verma S, Singh D, Singh A K, Jayakumar S. Post-fire soil nutrient dynamics in a tropical dry deciduous forest of Western Ghats, India. *Forest Ecosystems*, 2019, 6(1): 6.
- [12] 贺万鹏, 周晓雷, 解婷婷, 赵安, 曹雪萍, 杨富强, 陆刚. 青藏高原东北边缘云杉属-冷杉属林火烧迹地枯落物持水特征. 水土保持学报, 2023, 37(1): 204-210, 219.
- [13] 邱聪, 秦倩倩, 郑大桢, 刘艳红. 油松人工林重度火烧后凋落物分解及水文效应. 水土保持学报, 2022, 36(1): 196-204.
- [14] 王忆文, 索奥丽, 高钰, 王博, 陈锋, 刘晓东. 四川西昌云南松林地表可燃物载量及影响因素研究. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 100-108.
- [15] Stirling E, MacDonald L M, Smernik R J, Cavagnaro T R. Post fire litters are richer in water soluble carbon and lead to increased microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 2019, 136: 101-105.
- [16] Köster K, Köster E, Orumaa A, Parro K, Jögiste K, Berninger F, Pumpanen J, Metslaid M. How time since forest fire affects stand structure, soil physical-chemical properties and soil CO₂ efflux in hemiboreal Scots pine forest fire chronosequence? *Forests*, 2016, 7(9): 201.
- [17] 兰越, 王云琦, 王玉杰, 崔蕊蕊, 郑永林, 申航, 姚璐, 司洪涛, 李满意. 林火对重庆缙云山典型林分土壤细菌群落及酶活性的短期影响. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(3): 60-68.
- [18] 李通, 王云琦, 祁子寒, 何相昌, 李克文. 重庆缙云山森林火灾干扰边坡的滑坡易发期预测. 农业工程学报, 2023, 39(9): 131-141.
- [19] 巫清芸, 吴志伟, 林世滔, 李顺, 谢谷艾. 赣南地区森林可燃物分类及其火行为预测. 生态学杂志, 2024, 43(2): 314-324.
- [20] 李键, 薛澄, 杨扬, 谢梦姣, 彭正萍, 王洋. 黄淮海平原不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异预测. 水土保持研究, 2024, 31(2): 101-109, 121.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [22] 房园, 梁中, 张毓涛, 师庆东, 孙雪娇, 李吉玫, 李翔, 董振涛. 天山云杉森林生态系统的水源涵养能力海拔梯度变化特征. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1574-1584.
- [23] 赵维俊, 雷蕾, 刘贤德, 金铭, 张学龙, 敬文茂. 祁连山东段青海云杉林土壤理化特性研究. 水土保持通报, 2011, 31(6): 72-75.
- [24] 祁凯斌, 黄俊胜, 杨婷惠, 包维楷, 庞学勇. 亚高山森林自然与人工恢复对土壤涵水能力的影响. 生态学报, 2018, 38(22): 8118-8128.
- [25] 吴雪铭, 余新晓, 陈丽华, 贾国栋, 邱云霄, 彭修文. 间伐强度对坝上樟子松林下持水能力的影响. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2347-2354.
- [26] 张静, 贾洪文, 李远航, 左亚凡, 林莎, 王帅军, 王作泉, 贺康宁. 青海大通县典型林分的枯落物和土壤蓄水能力评价. 中国水土保持科学, 2022, 20(2): 106-114.
- [27] Imeson A C, Verstraten J M, van Mulligen E J, Sevink J. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena*, 1992, 19(3/4): 345-361.

- [28] Alcañiz M, Outeiro L, Francos M, X Ú. Effects of prescribed fires on soil properties: a review. *Science of the Total Environment*, 2018, 613: 944-957.
- [29] 赵雨田, 陈奇伯, 黎建强, 杨建光. 计划烧除对云南松林枯落物蓄积特征及持水性能的影响. *水土保持通报*, 2021, 41(2): 99-104.
- [30] 王玲, 赵广亮, 周红娟, 杨英, 耿玉清. 八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应. *生态环境学报*, 2019, 28(9): 1767-1775.
- [31] 段成伟, 李希来, 柴瑜, 徐文印, 苏乐乐, 马盼盼, 杨鑫光. 不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响. *生态学报*, 2022, 42(18): 7652-7662.
- [32] 罗秀龙, 舒英格, 龙慧, 李雪梅. 喀斯特地区不同年限退耕草地的持水性能. *水土保持通报*, 2023, 43(5): 7-17.
- [33] 富丽, 赵锦梅, 李永宁, 李亚红, 戴煜亮, 张伟飞. 陇东黄土高原不同林龄苹果林地枯落物及土壤的水文效应. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 40-45.
- [34] 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.
- [35] 舒洋, 陈金平, 丁兆华, 李航, 赵鹏武, 周梅, 贾文杰, 张轶超, 张国臣, 魏江生. 林火强度对兴安落叶松林土壤氮循环功能基因的影响. *草地学报*, 2024, 32(3): 726-735.
- [36] 许鹏波, 屈明, 薛立. 火对森林土壤的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1596-1606.
- [37] Lu X, Hu H Q, Sun L. Effect of fire disturbance on active organic carbon of *Larix gmelinii* forest soil in Northeastern China. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(4): 763-774.
- [38] Yang H, Yoo H, Lim H, Kim J, Choi H T. Impacts of soil properties, topography, and environmental features on soil water holding capacities (SWHCs) and their interrelationships. *Land*, 2021, 10(12): 1290.
- [39] 陈广磊, 田昆, 王行, 张贇, 孙梅, 刘振亚, 张晓宁, 肖德荣. 高原湿地纳帕海土壤持水力对不同放牧的响应. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 123-129, 141.
- [40] 柳华清, 王博, 贾妍妍, 解欣然, 张维. 新疆西天山峡谷不同坡位野核桃冻害特征. *干旱区研究*, 2024, 41(6): 1079-1088.
- [41] 沙晓玮, 武昱鑫, 贾国栋, 余新晓. 冀北山地植被恢复对不同坡位土壤可蚀性与养分的影响. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 11-19, 28.