

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

贺万鹏, 周晓雷, 解婷婷, 赵安, 曹雪萍, 杨富强, 陆刚

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: 以青藏高原东北边缘云杉属—冷杉属林火烧迹地为研究对象, 基于典型抽样法于 2020 年 8 月和 2021 年 7—8 月在火烧迹地和未过火天然林采集枯落物样品, 采用室内浸泡法测定分析枯落的蓄积量、持水量、有效拦蓄量等指标, 探究林火干扰下不同坡位枯落物的水文效应, 为更好地促进森林水源涵养以及水土保持功能提供依据。结果表明: (1) 在植被恢复过程中, 枯落物的厚度和蓄积量随着恢复年限的增加而增加, 且厚度为 3.75~8.31 cm, 蓄积量为 6.16~8.13 t/hm²。恢复 5, 15 年火烧迹地上、中、下坡枯落物厚度和蓄积量与天然林差异显著。 (2) 枯落物的最大持水量为 20.94~26.22 t/hm², 恢复 5, 15 年火烧迹地枯落物最大持水量与天然林差异达显著水平。在枯落物持水达到饱和前, 不同恢复年限下各坡位枯落物持水量与浸水时间呈对数函数关系, 吸水速率与浸水时间呈幂函数关系。 (3) 枯落物的有效拦蓄量为 14.58~16.95 t/hm², 有效拦蓄深为 1.44~1.78 mm。恢复 5 年火烧迹地枯落物有效拦蓄量表现为中坡>上坡>下坡, 恢复 15 年火烧迹地和天然林有效拦蓄量均为下坡>中坡>上坡。综上所述, 在植被恢复过程中, 枯落物的厚度、蓄积量、持水性能都随着恢复年限的增加而提高, 呈现天然林>恢复 15 年>恢复 5 年; 火烧迹地枯落物的持水性能及持水过程呈现中、下坡大于上坡, 即枯落物的水文效应受坡位和火烧干扰的影响。

关键词: 枯落物; 持水特性; 火烧迹地; 坡位; 植被恢复

中图分类号: S714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)01-0204-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.027

Water Retention Characteristics of Litter in Fire-burned Land of Spruce and Abies Forests on the Northeastern Margin of Qinghai-Tibetan Plateau

HE Wanpeng, ZHOU Xiaolei, XIE Tingting, ZHAO An, CAO Xueping, YANG Fuqiang, LU Gang

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: Taking the spruce-fir forest fire sites on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau as the research object, the samples were collected from the burned sites. Ubed unburned natural forests in August 2020 and July-August 2021 based on the typical sampling method and indoor immersion method. Litter samples were measured and analyzed for indicators such as storage volume, water holding capacity, and effective storage capacity, to explore the hydrological effects of litter at different slope positions under the disturbance of forest fires, and to provide a basis for better-promoting forest water conservation and soil and water conservation functions. The results show that: (1) During the vegetation restoration process, the thickness and accumulation of litter increased, with the longer restoration years, and the thickness was 3.75~8.31 cm, and the accumulation iss 6.16~8.13 t/hm². The more thickness and volume of litter on the above-up-slope, mid-slope, and down-slope in the recovery 5 and 15 years fire sites were significantly different from those in the natural forest. (2) The maximum water-holding capacity of litter is 20.94~26.22 t/hm², and the difference between the maximum water-holding capacity of the litter in the 5 and 15 years of recovery and the natural forest reaches a significant level. Before the water-holding capacity of the litter reaches saturation, the water-holding capacity of the litter at each slope position has a logarithmic function relationship with the water immersion time, and the water absorption rate has a power function relationship with the water immersion time under different recovery years. (3) The effective storage capacity of litter is

收稿日期: 2022-06-01

资助项目: 甘肃省财政厅、甘肃省 GEF/OP12 项目(03619078)

第一作者: 贺万鹏(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: 1012549380@qq.com

通信作者: 周晓雷(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事森林生态、植被恢复生态研究。E-mail: zhouxl@gsau.edu.cn

解婷婷(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事气候变化与区域响应研究。E-mail: xieting1026@126.com

14.58~16.95 t/hm², and the effective storage depth is 1.44~1.78 mm. The effective interception of litter in the restored 5 years burned are shows the order of mid-slope > up-slope > down-slope, and the effective intercepted amount of the restored 15-year-burned area and the natural forest is down-slope > mid-slope > up-slope. To sum up, in the process of vegetation restoration, the thickness, volume and water-holding capacity of litter improved with the increase of the restoration period, showing that natural forest > restoration 15 years > restoration 5 years; The water performance and water holding process showed that the middle and lower slopes were larger than the upper slopes, that is, the hydrological effect of the litter was affected by the slope position and the disturbance of fire.

Keywords: litter; water-holding characteristics; fire-burned land; slope position; vegetation restoration

枯落物是由森林中植物地下部分器官或组织凋死、脱落后而形成的^[1],是森林生态系统的重要组成部分^[2]。枯落物具有良好的透水性和较强的持水能力^[3-4],不仅在降雨过程中具有减少雨水冲蚀、吸附地表水分、减少地表径流、增加土壤入渗等功效^[5],而且在调节森林生态系统的水文效应、减少水土流失、促进养分循环等方面也发挥着重要的生态功能^[6]。林火作为森林生态系统中重要的干扰因子之一^[7],随着全球气候的变暖,林火发生的频率也在逐渐增加^[8]。林火干扰使森林生态系统遭到严重破坏,枯落物层被烧为灰烬^[9]。杨新芳等^[10]认为,随着恢复时间的推移,生态系统物种在逐渐增加,林下灌草等植被在逐渐恢复,枯落物也在不断积累;韩雪成等^[11]认为,枯落物的厚度和蓄积量也随着恢复年限的增加而不断增加,而火烧后 20 年枯落物的最大持水量可达到火烧前水平。

青藏高原东北边缘位于甘南高原、山地植被区域,是长江流域和黄河流域的重要分水岭,也是长江流域重要的水源地和生态屏障^[12],为我国提供着涵养水源、生物多样性保护等多种生态系统服务^[13]。历年来,该区域由于受人类活动和自然因素的综合影响,曾连续多年发生重度森林火灾(“3·02”“4·19”等森林重度火灾^[14],次数频繁,生态系统遭到破坏,生态安全受到威胁。目前,对于青藏高原东北边缘火烧迹地的研究主要围绕在群落的结构和特征^[15]以及种间关系^[16]等方面,而对该区域枯落物的持水性研究较少,结合不同恢复年限研究枯落物持水性能在青藏高原东北边缘更为少见。因此,本文通过分析对不同恢复年限火烧迹地和天然林枯落物的蓄积量、拦蓄量和持水特征,探讨火烧迹地植被恢复过程中枯落物水文功能的差异,为恢复火烧迹地枯落物的水源涵养和水土保持功能提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省甘南藏族自治州南部,地处南秦岭西延岷山、迭山系之间白龙江中游高山峡谷之中。位

于北纬 33°39′—34°20′和东经 102°55′—104°05′。青藏高原东北边缘处于大陆气候与海洋性气候的过渡带,属非典型性大陆性气候,年平均气温在 8~11℃,无霜期 147 天,年均降水量 634.6 mm,多在 5—9 月,冬季最大冻地层深度 66 cm,平均海拔 3 200 m,相对高差 1 000~2 900 m,平均坡度 30°~35°。目前重度火烧迹地主要有菰帽悬钩子(*Rubus pileatus*)、扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*)、黑水柳(*Salix heishuiensis*)、大刺茶藨子(*Ribes alpestre*)、总状橐吾(*Ligularia botryodes*)、野草莓(*Fragaria vesca*)、大耳风毛菊(*Saussurea macrota*)等物种。

1.2 样地布设

采用典型抽样法,分别于 2020 年 8 月和 2021 年 7—8 月在 2005 年和 2016 年发生重度森林火灾的火烧迹地上对天然更新的云、冷杉林进行调查取样,在不同海拔、坡向、坡位处设置面积大小为 20 m×20 m (闭合差<1/200)的样地^[17],再在样地内各设置 5 个 5 m×5 m 灌木样方和 1 m×1 m 草本样方,调查其坡度、坡向、坡位、海拔等自然因子以及枯落物的厚度。同样在未过火云杉属—冷杉属林地设置对照样地。沿样地对角线设置 3 个 0.5 m×0.5 m 的小样方,收集样方内枯落物,并将枯落物装自封袋,称重,然后带回实验室。样地基本情况见表 1。

1.3 测定指标

枯落物厚度(*d*)用直尺量测,3 次重复,精确到 0.1 cm;枯落物累积量(*M*)测定采用实验室烘干法^[18],并应用取样面积换算出单位面积的累积量(t/hm²)。采用室内浸水法^[19]对枯落物的持水量、持水率和吸水速率进行测定。将收集并称重的枯落物带回实验室后,在 85℃下烘至恒重,然后称其干重。采用室内浸泡法测定地被物的持水量和吸水动态。将烘干的地被物装入尼龙袋中称量干重后放入盛水的仪器中,水淹没尼龙袋。然后分别在 0.25,0.5,1,2,4,7,12,24 h 时取出,静置 5~8 min 至不滴水时测其质量,根据烘干质量换算研究不同浸泡时间段持水量和吸水速率,重复 3 次^[18]。

表 1 样地基本情况

样地	海拔/m	坡位	坡度/(°)	坡向	枯落物厚度/cm	纬度(N)	经度(E)
恢复 5 年	2814	上	40	西北 335°	1.0	33°56′40.32″	103°21′15.00″
恢复 5 年	2680	中	35	西北 300°	1.5	33°56′39.99″	103°21′15.04″
恢复 5 年	2581	中下	44	北 357°	2.1	33°55′37.14″	103°21′12.79″
恢复 5 年	2631	中	33	北 8°	6.0	33°55′32.88″	103°21′22.14″
恢复 5 年	2776	中上	37	西北 320°	6.7	33°55′30.32″	103°21′21.11″
恢复 5 年	2870	上	30	北 339°	5.3	33°55′18.57″	103°21′19.87″
恢复 15 年	3133	上	30	北 344°	5.0	34°10′40.66″	103°12′57.43″
恢复 15 年	3154	上	28	北 341°	6.1	34°10′39.57″	103°12′54.02″
恢复 15 年	3055	中	38	西北 325°	5.8	34°10′43.38″	103°12′53.67″
恢复 15 年	3061	中	41	西北 334°	5.4	34°10′41.33″	103°12′51.34″
恢复 15 年	2981	下	20	西北 331°	4.6	34°10′47.30″	103°12′54.46″
恢复 15 年	2996	下	25	北 344°	2.9	34°10′45.31″	103°12′51.34″
ck—1	3003	下	33.5	北 338°	10.0	34°10′45.33″	103°12′48.69″
ck—2	3057	中	26	西 249°	10.3	34°10′42.20″	103°12′50.70″
ck—3	3161	上	32	北 339°	9.3	34°10′38.38″	103°12′55.76″
ck—4	2825	下	32	西南 240°	12.1	33°52′50.20″	103°19′45.68″
ck—5	2900	上	37	西 249°	5.1	33°52′30.49″	103°18′48.70″
ck—6	3210	中	26	西北 294°	6.5	33°49′26.07″	103°16′12.74″
ck—7	3178	中	25	东北 61°	10.5	33°49′18.84″	103°15′58.95″
ck—8	3092	中	27	西 106°	13.1	33°50′32.14″	103°13′22.34″
ck—9	2942	下	37	北 358°	11.3	33°55′24.30″	103°13′03.27″
ck—10	3100	下	37	北 14°	10.2	33°49′54.31″	103°15′32.07″

注:部分数据来自赵安等^[17]。

1.4 指标计算与处理

枯落物持水性能指标的计算方法参考文献[20]。

(1)枯落物自然含水率计算公式为:

$$R_0=(G-G_d)/G_d\times100\%$$
 (1)

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

(2)枯落物持水量计算公式为:

$$m=m_t-m_1$$
 (2)

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)。以 24 h 时的持水量为最大持水量,记作 $m_{h\max}$ 。

(3)枯落物持水率计算公式为:

$$L=m/m_0\times100\%$$
 (3)

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

(4)枯落物有效拦蓄量计算公式为:

$$M_i=(0.85L_{h\max}-R_0)\times M$$
 (4)

式中: M_i 为枯落物有效拦蓄量(t/hm²); M 为枯落物现存量(t/hm²)。

(5)枯落物吸水速率计算公式为:

$$V=m_t/t$$
 (5)

式中: V 为枯落物吸水速率(g/h); m_t 为浸泡 t 时刻枯

落物和尼龙网袋的总质量(g); t 为枯落物浸水时间(h)。

1.5 统计分析

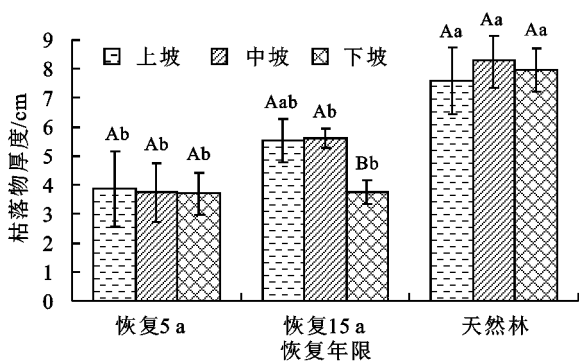
采用 Microsoft Excel 2019 软件对枯落物的持水量、吸水速率、厚度、蓄积量、有效拦蓄深等指标进行统计分析和计算;采用 Origin 2017 软件对枯落物持水量和吸水速率的变化规律进行分析并绘图,采用 SPSS 25 软件对枯落物的厚度、蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量、有效拦蓄深采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著法(LSD)检验不同恢复年限火烧迹地之间的差异性。

2 结果与分析

2.1 植被恢复过程中枯落物厚度和蓄积量的变化

由图 1 可知,在植被恢复过程中枯落物的厚度为 3.75~8.31 cm。随着植被的恢复,枯落物的厚度逐渐增加,表现为恢复 5 年<恢复 15 年<天然林,而恢复 5 年、恢复 15 年上、中坡的枯落物厚度均高于下坡。在恢复 5 年火烧迹地中,上、中、下坡枯落物厚度无差异;在恢复 15 年火烧迹地中,上坡和中坡无差异,下坡枯落物厚度显著低于上坡和中坡;天然林的上、中、下坡枯落物厚度无差异。在植被恢复过程中,恢复 5、15 年的上坡枯落物厚度无差异,且恢复 5 年和天然林差异显著;恢复 5、15 年中、下坡枯落物厚度

均与天然林枯落物厚度差异显著($p < 0.05$)。



注:图柱上方不同大写字母表示相同恢复年限上坡、中坡、下坡间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示不同恢复年限相同坡位差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 植被恢复过程中枯落物厚度变化

由图 2 可知,在植被的恢复过程中枯落物的蓄积量为 $6.16 \sim 8.31 \text{ t/hm}^2$ 。随着恢复年限的增加,枯落物的蓄积量逐渐增加,其中天然林枯落物蓄积量最大,恢复 5 年火烧迹地枯落物蓄积量最小。在恢复 5 年火烧迹地中,枯落物蓄积量表现为上坡 $>$ 中坡 $>$ 下坡,恢复 15 年火烧迹地和天然林枯落物蓄积量均为中坡 $>$ 下坡 $>$ 上坡,而坡位对枯落物蓄积量影响不显著。火烧后植被恢复过程中,恢复 5 年火烧迹地和天然林上坡枯落物蓄积量差异显著;恢复 5,15 年中、下坡枯落物蓄积量无明显差异,均与天然林中、下坡枯落物蓄积量有显著差异($p < 0.05$)。重度火烧后,火烧迹地经过植被恢复后枯落物的厚度和蓄积量逐年增加,地表枯落物因而得到很好的补充。

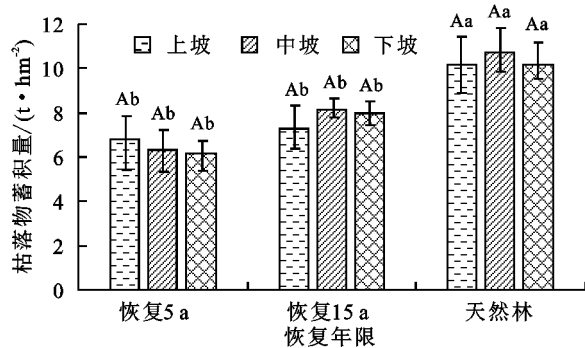


图 2 植被恢复过程中枯落物蓄积量变化

2.2 植被恢复过程中枯落物的持水能力

2.2.1 枯落物最大持水量 由图 3 可知,火烧迹地植被恢复过程中枯落物最大持水量为 $20.94 \sim 26.22 \text{ t/hm}^2$ 。天然林枯落物最大持水量显著高于恢复 5,15 年,且恢复 15 年火烧迹地枯落物最大持水量整体高于恢复 5 年枯落物最大持水量。其中,恢复 5 年、恢复 15 年、天然林各坡位之间枯落物的最大持水量无显著差异,上坡位枯落物的最大持水量恢复 5 年、恢复 15 年、天然林之间无显著差异,且恢复 5 年和恢复 15 年与天然林中坡、下坡枯落物最大持水量

差异达显著水平($p < 0.05$)。随着恢复年限的增加,枯落物层最大持水量也呈逐渐增大的趋势,说明枯落物涵养水源的能力也在逐渐增强。

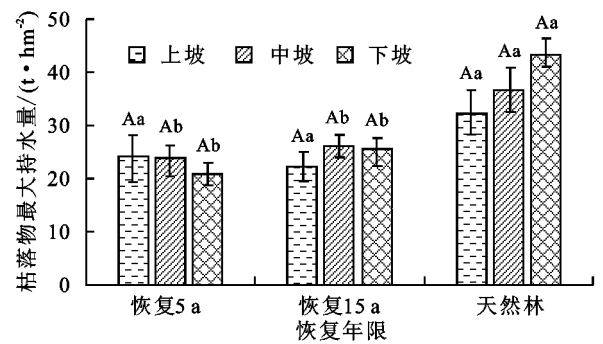


图 3 植被恢复过程中枯落物最大持水量变化

2.2.2 枯落物持水过程 在本研究枯落物持水性能指标的测定试验中,枯落物的质量均为 30.00 g ,因此,持水量仅在数值上有所差异,其变化规律和拟合曲线均一致。

应用浸水试验法测定不同恢复年限火烧迹地枯落物持水量,由图 4 可知,枯落物的持水量与浸水时间呈一定的正相关关系,枯落物持水量随着浸水时间的增加而增加,且恢复 5,15 年的火烧迹地和天然林的变化趋势基本一致,呈倒“J”形曲线。枯落物持水量增加最快的时间基本上在前 2 h 内,在 4 h 时可达其饱和持水量的 80% 左右,随着浸水时间的增加,持水量依旧在增加,但其上升的速度明显减慢,在 10 h 时基本上可达到其饱和持水量的 90% 以上,在 24 h 时达到饱和状态。火烧迹地不同恢复年限枯落物持水量大小依次为恢复 5 年 $>$ 恢复 15 年;其中恢复 5 年的枯落物持水量表现为中坡 $>$ 上坡 $>$ 下坡;恢复 15 年枯落物持水量为下坡 $>$ 中坡 $>$ 上坡。天然林的枯落物持水量显著低于恢复 5,15 年火烧迹地的持水量,且枯落物持水量呈下坡 $>$ 中坡 $>$ 上坡。

对所测定的不同恢复年限云、冷杉火烧迹地枯落物与浸水时间进行回归分析发现,枯落物持水量与浸水时间呈现较好的对数函数关系: $Q = k \ln t + P$ 。式中: Q 为枯落物持水量(g/kg); t 为枯落物浸水时间(h); k 为方程回归系数; P 为常数项。经拟合的方程相关系数(R^2)除恢复 15 年火烧迹地上坡的在 0.804 以上,其余均在 0.9 以上,说明持水量和浸水时间拟合方程的拟合程度较高,较好地反映枯落物持水的动态变化(表 2)。

2.2.3 枯落物吸水速率 由图 5 可知,枯落物的吸水速率与浸水时间呈一定负相关关系,枯落物吸水速率随着浸水时间的增加而减小,且恢复 5,15 年火烧迹地和对照样地的变化趋势基本一致,呈“L”形曲线。在浸水 0.25 h 时,枯落物的吸水速率处于最高

峰,随后处于下降阶段,在浸水 4 h 后逐渐减缓,最后吸水速率趋于平缓,说明枯落物此时属于饱和状态。在枯落物的植被恢复过程中,枯落物吸水速率大小为恢复 5 年>恢复 15 年;其中恢复 5 年的枯落物吸水

速率为中坡>上坡>下坡;恢复 15 年和天然林枯落物吸水速率为下坡>中坡>上坡。天然林的枯落物吸水速率明显低于恢复 5 年的火烧迹地吸水速率,却显著大于恢复 15 年火烧迹地的吸水速率。

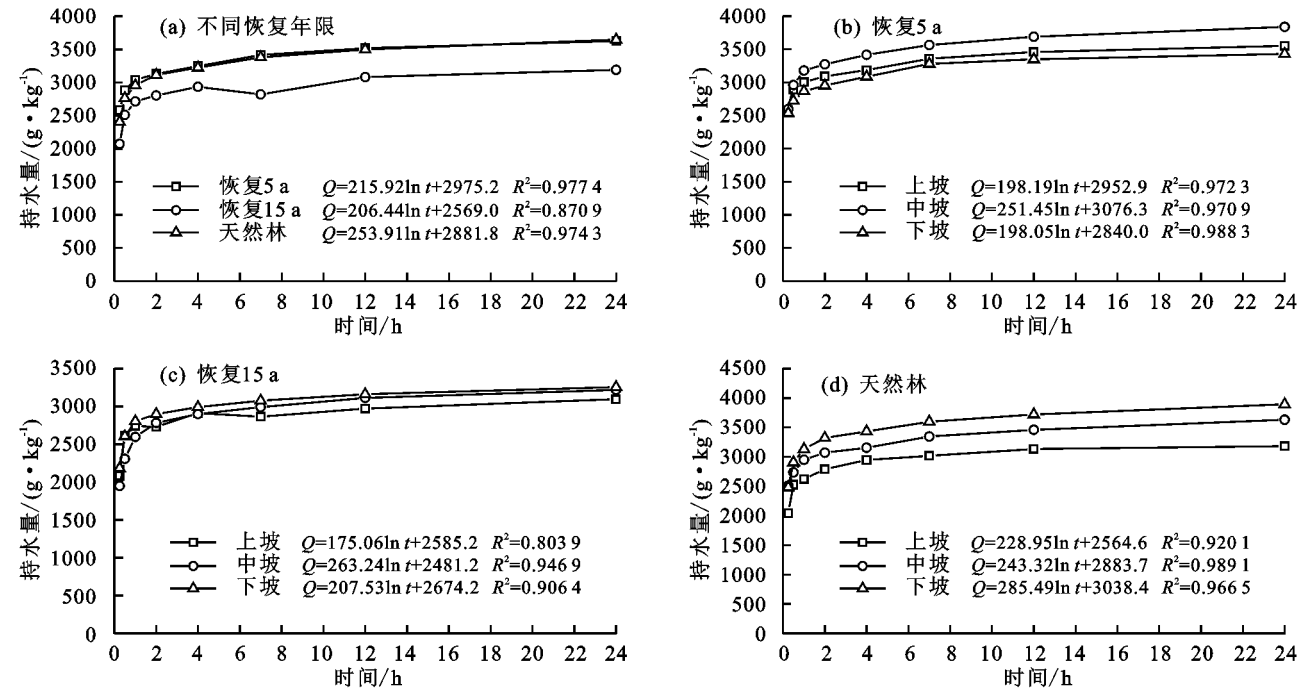


图 4 枯落物持水量与浸水时间的关系

表 2 植被恢复过程枯落物持水量与浸水时间的关系			
恢复 年限/a	坡位	持水量与 浸水时间	R ²
5	上坡	$y=5.9539\ln x+88.705$	0.9723
	中坡	$y=7.5540\ln x+92.429$	0.9709
	下坡	$y=5.9506\ln x+85.330$	0.9883
15	上坡	$y=5.2553\ln x+77.606$	0.8040
	中坡	$y=7.9058\ln x+74.517$	0.9469
	下坡	$y=6.2298\ln x+80.273$	0.9064
天然林	上坡	$y=6.8746\ln x+76.999$	0.9200
	中坡	$y=7.0413\ln x+86.655$	0.9891
	下坡	$y=8.5745\ln x+91.258$	0.9665

对所测定的不同恢复年限云、冷杉火烧迹地枯落物与浸水时间进行回归分析发现,枯落物持水量与浸水时间呈现较好的指数函数关系: $V=kt^n$ 。式中: V 为枯落物吸水速率[g/(kg·h)]; t 为枯落物浸水时间(h); k 为方程回归系数; n 为指数。经拟合的方程相关系数(R^2)均在 0.998 4 以上,整体上拟合效果较好,这表明吸水率随时间变化的实测值和理论值相近(表 3)。

2.3 植被恢复过程中枯落物有效拦蓄量变化

枯落物层的最大持水量只反映其潜在持水能力,用它评价枯落物层拦蓄降水实际能力时常偏高,因此用有效拦蓄量来表示对降水的拦蓄能力。由表 4 可知,植被恢复过程中枯落物的有效拦蓄率为 188.39%~271.35%。恢复 5 年火烧迹地枯落物层以灌木和草

本的凋落物为主,有效拦蓄量为 14.58~16.95 t/hm²,且中、上坡显著大于下坡。而恢复 15 年的有效拦蓄量显著高于 5,15 年的有效拦蓄量中、下坡显著高于上坡。有效拦蓄深随着恢复年限的增加整体表现出逐渐增加趋势,其中恢复 15 年的有效拦蓄深高于恢复 5,15 年的有效拦蓄深呈中坡最大,下坡次之,上坡最小;而恢复 5 年有效拦蓄深为中坡最大,上坡次之,下坡最小。

天然林的有效拦蓄量最高,为 19.17~27.20 t/hm²,显著高于恢复 5,15 年的有效拦蓄量,且天然林枯落物的有效拦蓄量下坡最大,中坡次之,下坡最小。天然林的有效拦蓄深显著高于恢复 5,15 年的火烧迹地,呈下坡>中坡>上坡的趋势。

3 讨论

3.1 枯落物厚度和蓄积量

枯落物现存量主要受森林类型、立地条件以及人为活动等因素的综合作用,反映枯落物生产量与消耗量之间的关系^[21]。本研究云杉属—冷杉属林火烧迹地经过植被恢复枯落物的厚度和蓄积量增加,枯落物的厚度和蓄积量表现为恢复 5 年<恢复 15 年<天然林,这是由于火烧烧毁林冠、林下植被及枯落物层,随着植被的恢复,枯落物大多由烧死木和天然更新的灌木、草本组成^[22]。其中枯落物厚度为 3.75~8.31 cm,蓄积量为 6.16~8.13 t/hm²,这与王飞等^[23]的研究结

果差异较大,这是由于林火干扰,林内生境较差,物种多样性较低,枯落物分解慢,枯落物积累的量较小。枯落物厚度呈下坡>中坡>下坡的趋势,因为在火烧迹地由于乔木较少,由于风力等因素的影响,下坡的枯落物积累的相对较多。且恢复 15 年和天然林中坡

的枯落物蓄积量最高,上坡最小,这与涂立辉^[24]的研究结果一致,且恢复 5 年火烧迹地枯落物蓄积量呈上坡>中坡>下坡,是因为上坡有大量的烧死木,林内郁闭度较高,而上坡的坡度缓于中下坡,微生物活动较弱,从而使枯落物不易分解。

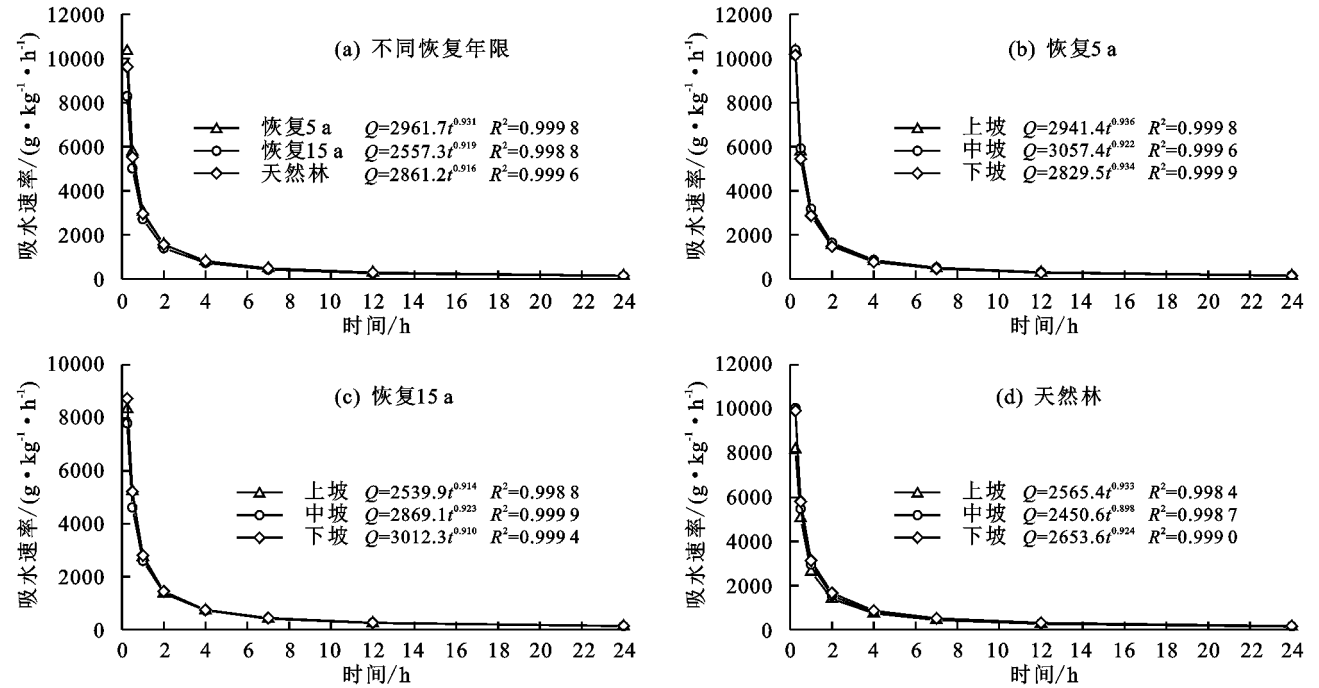


图 5 枯落物持水量与浸水时间的关系

表 3 植被恢复过程中枯落物吸水速率与浸水时间的关系			
恢复年限/a	坡位	持水量与浸水时间	R^2
5	上坡	$y=88.359x^{-0.936}$	0.9998
	中坡	$y=91.858x^{-0.922}$	0.9996
	下坡	$y=85.016x^{-0.934}$	0.9999
15	上坡	$y=77.013x^{-0.933}$	0.9984
	中坡	$y=73.598x^{-0.898}$	0.9987
	下坡	$y=79.658x^{-0.924}$	0.9990
天然林	上坡	$y=76.259x^{-0.914}$	0.9988
	中坡	$y=86.217x^{-0.923}$	0.9999
	下坡	$y=90.475x^{-0.910}$	0.9994

表 4 植被恢复过程中枯落物持水能力的变化				
恢复年限/a	坡位	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)	有效拦蓄深/mm
5	上坡	254.73±10.37ABa	16.85±6.99Aa	1.68±0.70Aa
	中坡	271.35±8.13Aa	16.95±4.58Aa	1.69±0.46Aa
	下坡	237.16±9.83Ba	14.58±2.12Ab	1.46±0.21Ab
15	上坡	200.86±7.92Ab	14.39±2.60Aa	1.44±0.26Aa
	中坡	217.88±12.27Ab	17.78±3.54Aa	1.78±0.35Aa
	下坡	222.97±9.19Aa	17.43±2.60Ab	1.74±0.26Ab
天然林	上坡	188.39±16.97Ab	19.17±5.87Ba	1.92±0.59Ba
	中坡	209.62±19.17Ab	22.45±6.75ABa	2.24±0.68ABa
	下坡	222.07±9.99Aa	27.2±4.94Aa	2.72±0.49Aa

注:同列不同大写字母表示相同恢复年限不同坡位间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示不同恢复年限相同坡位差异显著($p<0.05$)。

3.2 枯落物的持水能力

枯落物的最大持水量是表征其持水性能的重要指标。本研究表明,在植被恢复过程中枯落物的最大持水量为 20.94~26.22 t/hm²,且随着植被的恢复枯落物的最大持水量也逐渐增大。枯落物的最大持水量具体为随着恢复年限的增加也表现出一定的差异,为恢复 5 年<恢复 15 年<天然林,这是由于随着植被的恢复,林内多因素共同影响下,林内物种多样性增加,且持水量不但与蓄积量有关,而且与枯落物的类型、厚度等有关^[25]。其中在恢复 5 年火烧迹地中,枯落物的最大持水量为上坡>中坡>下坡,这是因为火烧后林内郁闭度较小,林内植被主要由灌草组成,且上坡的坡度最缓,枯落物累积较多。而恢复 15 年火烧迹地枯落物最大持水量为中坡>下坡>上坡,这与涂立辉^[24]研究结果一致,因为随着植被的恢复,枯落物类型发生改变,中坡枯落物累积多,林内郁闭度大,微生物活动较弱,枯落物分解较缓。天然林枯落物下坡枯落物最大持水量显著高于上、中坡枯落物的最大持水量,这与王卓敏^[26]研究的结果一致。

在枯落物持水达到饱和前,不同坡位枯落物的持水量与浸水时间呈对数函数关系,吸水速率与浸水时间呈幂函数关系,与已有研究^[27]结果一致。在浸泡初期阶段,受水势差的影响,枯落物的吸水速率较高,

持水量也逐渐增加。本研究中,浸水时间在前 0.5 h 吸水速率达到最大值,而在 4 h 时,枯落物持水量可达其饱和持水量的 80%,而随着浸水时间的增加,枯落物表面与水势差的减小,导致枯落物吸水速率不断下降,持水量增加缓慢,最终导致吸水速率在 24 h 趋于 0,即达到饱和状态而停止吸水^[28]。

3.3 枯落物的拦蓄能力

枯落物的有效拦蓄量反映枯落物对降水的拦蓄能力^[29]。本研究中枯落物的有效拦蓄量表现为恢复 5 年<恢复 15 年<天然林,有效拦蓄量随着恢复年限的增加而增加,这与已有研究^[10]结果基本一致,且随着植被的恢复,火烧迹地枯落物有效拦蓄量为 14.58~16.95 t/hm²,有效拦蓄深为 1.44~1.78 mm,这明显小于王飞等^[23]的研究,主要因为林火干扰后,林下植被稀疏,枯落物积累量少。恢复 15 年和天然林枯落物有效拦蓄量均为下坡>中坡>上坡,而恢复 5 年的有效拦蓄量为中坡>上坡>下坡,这与涂立辉^[24]研究结果不一致,一方面是由于有效拦蓄量除与枯落物自身和自然含水率有关外,还与降雨类型,持续时间密切相关;另一方面,由于火烧后随着恢复年限的增加,枯落物的组成成分也发生变化,且恢复 5 年中坡所积累的枯落物较多,枯落物分解较慢,故中坡的拦蓄能力较强。

4 结论

(1)在植被恢复过程中,枯落物的厚度和蓄积量随着恢复年限的增加而增加,且厚度为 3.75~8.31 cm,蓄积量为 6.16~8.13 t/hm²。恢复 5,15 年火烧迹地上、中、下坡枯落物厚度和蓄积量与天然林差异显著。

(2)枯落物的最大持水量为 20.94~26.22 t/hm²,恢复 5,15 年火烧迹地枯落物最大持水量与天然林差异达显著水平。在枯落物持水达到饱和前,不同恢复年限下各坡位枯落物持水量与浸水时间呈对数函数关系,吸水速率与浸水时间呈幂函数关系。

(3)枯落物的有效拦蓄量为 14.58~16.95 t/hm²,有效拦蓄深为 1.44~1.78 mm。有效拦蓄量随着恢复年限的增加也相应增加,其中恢复 5 年火烧迹地枯落物有效拦蓄量表现为中坡>上坡>下坡,恢复 15 年火烧迹地和天然林有效拦蓄量均为下坡>中坡>上坡。

参考文献:

[1] 王正安,邸利,王彦辉,等.白桦纯林和华北落叶松纯林枯落物层的水文效应:以六盘山叠叠沟小流域为例[J].甘肃农业大学学报,2019,54(3):93-98,107.

[2] 杜杰,袁莉芹,蔡天培,等.亚热带北缘湿地松脂材兼用林凋落物持水特性[J].安徽农业大学学报,2022,49(1):41-47.

[3] Wang C, Zhao C Y, Xu Z L, et al. Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine

forest catchment[J].Journal of Arid Land,2013,5(2):207-219.

[4] 赵雨森,韩春华,张宏光,等.阿什河上游小流域主要林分类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2012,26(2):203-208.

[5] 吴晓光,刘龙,张宏飞,等.砭砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质[J].水土保持学报,2020,34(4):137-144.

[6] 耿琦.云冷杉针阔混交林枯落物持水特性研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[7] Stephens S L, Agee J K, Ful P Z, et al. Managing forests and fire in changing climates[J].Science,2013,342(6154):41-42.

[8] 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.

[9] Butler O M, Elser J J, Lewis T, et al. The multi-element stoichiometry of wet eucalypt forest is transformed by recent,frequent fire[J].Plant and Soil,2020,447(1):447-461.

[10] 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.

[11] 韩雪成,赵雨森,辛颖,等.大兴安岭北部火烧迹地兴安落叶松人工林土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(4):183-188.

[12] 陆刚,黄海霞,周晓雷,等.迭部林区云冷杉林火烧迹地土壤有机碳及酶活性变化特征[J].草地学报,2022,30(4):943-949.

[13] 兰翔宇,叶冲冲,王毅,等.1995—2014 年青藏高原水源涵养功能时空演变特征及其驱动力分析[J].草地学报,2021,29(增刊 1):80-92.

[14] 王岩,王高潮,王胜男.军民协力 地空配合 打赢火场攻坚战:甘肃省迭部县达拉林场“3·02”森林火灾扑救纪实[J].中国应急管理,2016(3):59-61.

[15] 赵安,周晓雷,田青,等.迭山北坡云冷杉林火烧迹地灌木群落特征和物种多样性研究[J].西部林业科学,2021,50(5):90-100.

[16] 周晓雷,闫月娥,张婧,等.青藏高原东北边缘云杉—冷杉林火烧迹地不同坡向植物群落结构与多样性研究[J].草业学报,2022,31(5):144-155.

[17] 赵安,田青,周晓雷,等.迭山北坡云冷杉林火烧迹地灌木树种种间关联性[J].林业科学研究,2022,35(2):163-170.

[18] 金雅琴,李冬林,孙丽娟,等.南京近郊人工林地表枯落物的累积量及持水性[J].中国水土保持科学,2018,16(5):95-104.

[19] 李素丽,徐佳文,丁翔东,等.赣江中游水源涵养林乔木和蕨类植物凋落物持水和失水特征[J].水土保持学报,2021,35(3):170-176.

[17] Kirchner J W, Feng X H, Neal C, et al. The fine structure of water-quality dynamics: The (high-frequency) wave of the future[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(7): 1353-1359.

[18] 宁朋,程小毛,杨晓锋,等.贡嘎山不同海拔峨眉冷杉根际土壤化学性质及胞外酶活性[J].*应用与环境生物学报*, 2021, 27(5): 1138-1146.

[19] 杜流姗,陆琦,梁紫嫣,等.贡嘎山海螺沟冰川退缩区原生演替不同阶段优势植物光合生理特征[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2356-2363.

[20] 牛健植,余新晓,赵玉涛,等.贡嘎山暗针叶林土壤优先流形成因素的初步研究[J].*植物生态学报*, 2006, (5): 732-742.

[21] 徐庆,刘世荣,安树青,等.四川卧龙亚高山暗针叶林土壤水的氢稳定同位素特征[J].*林业科学*, 2007(1): 8-14.

[22] 韩婷婷,张明军,王圣杰,等.兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源[J].*环境科学*, 2020, 41(9): 3993-4002.

[23] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J].*农业工程学报*, 2006, 22(3): 188-190.

[24] 王佩佩,苏雪萌,周正朝,等.黄土丘陵区典型植被群落坡面土壤优先流特征及其影响因素[J].*水土保持学报*, 2021, 35(5): 16-23.

[25] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响[J].*生态学报*, 2008, 28(10): 4929-4939.

[26] Novák V, Kňava K. The influence of stoniness and canopy properties on soil water content distribution: simulation of water movement in forest stony soil[J]. *European Journal of Forest Research*, 2012, 131(6): 1727-1735.

[27] Nimmo J R. Preferential flow occurs in unsaturated conditions[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(5): 786-789.

[28] 李卓,刘永红,杨勤.土壤水分入渗影响机制研究综述[J].*灌溉排水学报*, 2011, 30(5): 124-130.

[29] Yao J J, Cheng J H, Sun L, et al. Effect of antecedent soil water on preferential flow in four soybean plots in south-western China[J].*Soil Science*, 2017, 182(3): 83-93.

[30] Xu Q, Liu S R, Wan X C, et al. Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China[J].*Hydrological Processes*, 2012, 26(25): 3800-3809.

[31] Jarvis N. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(3): 279-302.

[32] Alaoui A, Helbling A. Evaluation of soil compaction using hydrodynamic water content variation: Comparison between compacted and non-compacted soil[J]. *Geoderma*, 2006, 134(1): 97-108.

(上接第 210 页)

[20] 刘一霖,温娅檬,李巧玉,等.川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性[J].*水土保持学报*, 2019, 33(5): 151-156, 162.

[21] 邱聪,秦倩倩,郑大桢,等.油松人工林重度火烧后凋落物分解及水文效应[J].*水土保持学报*, 2022, 36(1): 196-204.

[22] 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): 116-126.

[23] 王飞,陈国鹏,齐瑞,等.甘南白龙江上游小流域主要林分地被物层的持水特性分异[J].*水土保持研究*, 2016, 23(6): 242-247.

[24] 涂立辉.六盘山叠叠沟小流域四种典型植物群落的多功能评价[D].北京:中国林业科学研究院, 2020.

[25] 凌继华,崔立奇,张章.冀北山地不同坡位油松林枯落物水文效应[J].*河北林果研究*, 2015, 30(2): 117-121.

[26] 王卓敏.不同坡位乡土阔叶树种的林分改造生态效益评价[D].广州:华南农业大学, 2018.

[27] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].*生态学杂志*, 2019, 38(9): 2662-2670.

[28] 郑森.华北土石山区不同林分类型枯落物及土壤水文生态效应[J].*中国水土保持科学*, 2020, 18(2): 84-91.

[29] 张建利,王加国,李苇洁,等.贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃林枯落物储量及持水功能[J].*水土保持学报*, 2018, 32(3): 167-173.

[30] 王丽红,辛颖,邹梦玲,等.大兴安岭重度火烧迹地植被恢复过程中枯落物持水特征[J].*水土保持学报*, 2014, 28(6): 262-267.