

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190182

试验林火干扰下大兴安岭北部落叶松林 土壤含水率的时空变化

张 韞^{1,2} 于 悦¹ 崔晓阳^{1,2} 王海淇¹

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】跟踪量化轻、中、重度火干扰下兴安落叶松林土壤含水率, 定点分析其时空变化规律与火烧强度干扰差异, 深入探讨其形成机制; 旨在清楚地认识高寒区火干扰森林生态系统恢复初期土壤水分变化对植被恢复的影响力, 并为其调控提供参考。【方法】采用网格法确定固定点位并实施林火干扰试验, 根据火烧强度等级划分轻、中、重度火烧区, 烘干法跟踪监测火烧前、火烧后、翌年融雪季后、翌年生长季土壤含水率。【结果】林火干扰后: (1) 轻、中、重度火烧区土壤含水率立即下降, 春旱时段进一步大幅下降, 生长季迅速回升; (2) 生长季前重度火烧区土壤含水率显著低于轻、中度火烧区, 生长季火烧强度干扰差异消失; (3) 生长季前, 土壤含水率及其相对变化率的空间格局与火烧强度空间格局极显著负相关。【结论】寒温带针叶林火干扰生态系统恢复初期, 春旱时段重度火烧迹地土壤含水率可能限制植被更新和再生, 应加强集水保水技术调控。

关键词: 兴安落叶松林; 火烧强度; 土壤含水率; 时空变化

中图分类号: S791.222 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)08-0094-08

引文格式: 张韞, 于悦, 崔晓阳, 等. 试验林火干扰下大兴安岭北部落叶松林土壤含水率的时空变化 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 94-101. Zhang Yun, Yu Yue, Cui Xiaoyang, et al. Spatiotemporal variations of soil moisture content in the *Larix gmelinii* forest under interference of experimental forest fire in northern Great Xing'an Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 94-101.

Spatiotemporal variations of soil moisture content in the *Larix gmelinii* forest under interference of experimental forest fire in northern Great Xing'an Mountains of northeastern China

Zhang Yun^{1,2} Yu Yue¹ Cui Xiaoyang^{1,2} Wang Haiqi¹

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal changes of soil moisture content under different fire intensities were analyzed by sequentially monitoring at the fixed points in the mild-, moderate-, severe-burned area of the *Larix gmelinii* forest, and the forming mechanism was discussed in order to understand the effects of soil moisture variation on vegetation restoration and provide references for artificial regulation in the early years after forest fire. [Method] The fixed monitoring points were conducted by latticed co-coupled sampling method, then set fire. The burned sample plots were divided into the mild-, moderate-, severe-burned according to the fire intensity class, and soil moisture content was determined by the oven drying method

收稿日期: 2019-04-16 修回日期: 2019-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570597), 国家重点研发计划(2016YFA0600803), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572017PZ05)。

第一作者: 张韞, 博士, 副教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林土壤与林木营养。Email: rowena_zy@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路26号东北林业大学林学院。

责任作者: 崔晓阳, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林土壤。Email: C_xiaoyang@126.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

before the burning, after the burning, following the snowmelt season, and in the growing season, respectively. [Result] After the fire, (1) soil moisture content decreased immediately in the mild-, moderate-, severe-burned area following the burning, further decreased sharply in the next spring, and rose in the growing season. (2) Soil moisture content in the severe-burned area was significantly lower than those in the mild-, moderate-burned area before the growing season, and no difference was found among the three areas in the growing season. (3) There was significantly negative correlation between the spatial pattern of soil moisture content or its relative change and fire intensity before the growing season. [Conclusion] In the early years of post-fire coniferous forest restoration in the cold temperate zone, soil moisture content maybe limit vegetation restoration and regeneration in the severe-burned area in spring, and the regulation of rainwater harvesting and water conservation should be strengthened.

Key words: *Larix gmelinii* forest; fire intensity; soil moisture content; spatiotemporal variation

火烧是森林生态系统的内在过程与干扰形式,通过加热与氧化作用影响土壤理化性质和生物环境,产生木炭、蒸馏物及金属氧化物等,释放贮于生物体内的养分且促进其循环,改变微生物活动、通气状况、水分条件等土壤特性,影响森林生态系统的组成与结构^[1-2]。土壤水分是受大气降水、融雪水、地下水主导的性状。由于土壤水分物理形态受环境温度影响,其对火干扰的直接响应十分迅速;林火干扰后,森林植被破坏、林分郁闭度下降、太阳辐射吸收增加、地表温度升高、凋落物与土壤有机质等保水性物质减少等衍生因素^[3-8]导致土壤含水率持续变化。目前,多采用以“空间代替时间”的方法模拟火烧时间序列土壤含水率变化规律,或对比火烧迹地与毗邻未火烧林地土壤含水率差异,至今尚无共识性的研究结论^[2,8-11]。孔健健等^[3]研究发现火烧 1 年后,兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林重度火烧迹地土壤含水率显著下降,11 年后差异消失;张玉红等^[10]研究发现火烧 1 年后,兴安落叶松林中度火烧迹地土壤含水率显著下降,重度火烧迹地显著升高;孙龙等^[12]研究发现火烧 20 年后,白桦(*Betula platyphylla*)落叶松林中度火烧迹地土壤含水率仍低于对照水平。澳大利亚昆士兰东南部硬叶林,2 年制计划火烧迹地土壤含水率显著低于未火烧林地,而 4 年制火烧迹地变化不显著^[13]。火烧迹地森林植被类型、火烧强度、火烧频率、植被恢复以及火前土壤含水率空间异质性可能是导致不同研究结论的主要原因。

进入 21 世纪,气候变化背景下极端天气事件增加,全球森林火灾发生频率逐年上升^[14]。大兴安岭是全球气候变化敏感、森林火灾高发、难控性大的重点火险地区^[14-16]。目前,关于大兴安岭林火与土壤关系的研究多为火烧后土壤理化性质调查,其间与土壤含水率相关的研究结果并不一致^[3,10,15-20]。本文以大兴安岭北部寒温带针叶林为研究对象,在排除火前空间异质性的前提下,跟踪量化不同强度火干扰

下的土壤含水率,定点分析其时空变化规律,深入探讨其形成机制;旨在清楚地认识高寒区火干扰森林生态系统恢复初期土壤水分变化对植被恢复的影响,并为其调控提供参考。

1 研究地概况与研究方法

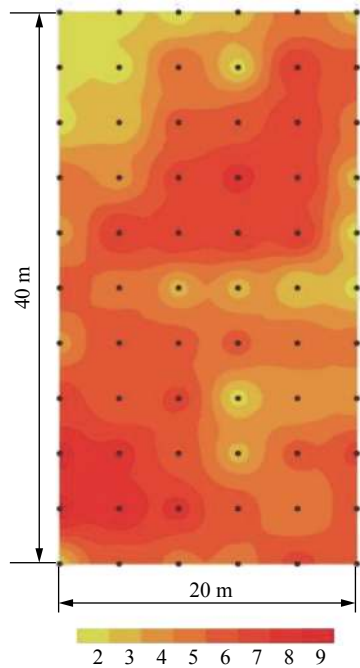
1.1 研究地概况

研究地行政区属黑龙江省大兴安岭地区塔河林业局,地理坐标 124°25'02"E、53°06'52"N。寒温带大陆性季风气候,四季分明,春季大风少雨、夏季暂短湿热、秋季霜冻早至、冬季漫长寒冷。该区年均气温约 -2.4℃,年均降水量约 460.3 mm,7—8 月占全年降水量 70%~90%,全年无霜期 98 d^[21-23]。

典型兴安落叶松林内布设固定样地,样地内主要乔木树种为兴安落叶松,并混有少量白桦;主要灌木为杜香(*Ledum palustre*)和杜鹃(*Rhododendron dauricum*)。林冠郁闭度约 0.7,林下灌木盖度 70%~90%,森林枯落物盖度 100%。样地所在区域属低山丘陵地貌,海拔 312 m,东坡(5°~10°),漂灰土(漂白暗瘠寒冻锥形土, CST),凋落物层(5~10 cm)具明显的半泥炭化特征,腐殖质层(8~12 cm)较厚且疏松,表层土壤有机质含量约 11.2%^[21-23]。矩形固定样地长边顺坡向延伸,面积 40 m×20 m,在固定样地内网格法布设固定监测点位(网格交点),间距 4 m,共 66 个监测点位(图 1)。

1.2 林火点烧试验

10 月下旬,进行野外林火试验。在森林消防的严密监控下,自然点烧固定样地地表可燃物(为了模拟不同强度林火干扰,在个别监测点位人为增添枝丫等森林可燃物),于各监测点位地表 0、10 cm、地下 5、10 cm 深度布设热电偶温度探头,自动采集温度数据。根据过火迹地地上植被(含乔木)、凋落物层以及腐殖质土层的实际损失情况,划分林火强度等级(表 1),并绘制林火强度格局图(图 1)。



数字 2~9 为火烧强度等级赋值。引自文献 [21–23]。Fire intensity classes are assigned by numbers from 2 to 9. This is cited from reference [21–23].

图 1 样地监测点位(小黑点)布设及林火强度格局

Fig. 1 Distribution of monitoring points (small black dots) of sample plots and the pattern of forest fire intensity

1.3 土样采集

林火点烧试验前, 将已经编号的钢钎插入对应的监测点位, 标记凋落物层与土壤腐殖质层上界位置。以钢钎为中心, 30 cm 半径, 切取圆形凋落物层, 并原状保存; 用特制微型钢制土钻(直径 2 cm, 钻孔深度 0~10 cm), 在圆周内随机采集 3 个原状土样,

充分混合, 于 0~4 ℃ 保存; 用细河沙回填取样孔, 将切取的圆形凋落物层复位^[21–23]。

分别设置 T_0 (10 月下旬, 林火点烧试验前 1 天)、 T_1 (林火点烧试验后 1 天)、 T_2 (翌年 6 月中旬, 融雪季结束)、 T_3 (翌年 8 月底, 生长季), 共 4 个取样时间。采集方法同林火试验前采样, 且土样均分布于火烧前切取的圆形范围内^[21–23]。

1.4 土壤含水率测定

充分混匀新鲜土样, 立即剔除其中的杂质和植物根系, 采用烘干法测定土壤含水率^[24]。

1.5 数据统计及作图

数据统计采用 SPSS17.0 软件进行分析, 土壤含水率的常规统计分析采用单因素方差分析, 火烧后的定点跟踪比较采用成对数据 t 检验分析。采用 Arc GIS 软件, 根据反距离权重插值法绘制固定样地的空间格局图。

2 结果与分析

2.1 火烧时间序列土壤含水率常规分析与定点配对分析

经单因素方差统计分析, T_0 时段轻、中、重度火烧区土壤含水率没有显著差异, 均值为 37.49%(图 2)。据此排除林火点烧试验前各火烧强度区土壤含水率的空间异质性。

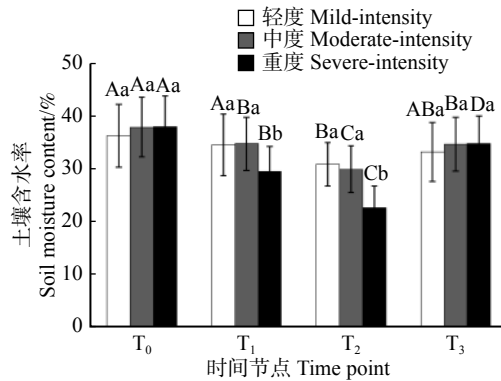
火烧后, T_1 、 T_2 时段重度火烧区土壤含水率较轻、中度火烧区显著下降($P < 0.01$), 轻、中度火烧区之间差异不显著; T_3 时段各火烧区之间土壤含水率差异不显著(图 2)。这说明因火烧强度导致的土壤

表 1 兴安落叶松林野外点烧试验火强度等级

Tab. 1 Fire intensity classes of burning experiment in the *Larix gmelinii* forest

火烧强度等级 Fire intensity class	火烧强度等级划分标准 Classification standard of fire intensity class	赋值 Assigned value
轻度(仅地上植被过火, 凋落物层完好) Mild-intensity (only the ground vegetation is scorched or burned out, and the soil organic litter layer was not disturbed)	地上植被过火 50% 以下, 凋落物层完好 Less than 50% ground vegetation is scorched, and the litter layer is intact	2
	地上植被过火 50% 以上, 凋落物层完好 More than 50% ground vegetation is scorched or burned out, and the litter layer is intact	3
中度(地上植被全部过火或烧焦, 凋落物层未完全烧尽) Moderate-intensity (all ground vegetation scorched or burned out, and the litter layer combusted incompletely)	凋落物层厚度损失 1/3 以下 Loss thickness of litter layer is less than 1/3	4
	凋落物层厚度损失 1/3 ~ 2/3 Loss thickness of litter layer is between 1/3 and 2/3	5
	凋落物层厚度损失 2/3 以上 Loss thickness of litter layer is more than 2/3	6
重度(地上植被全部过火或烤焦, 凋落物层烧尽, 土壤腐殖质表层不同程度燃烧或烧焦) Severe-intensity (all ground vegetation is scorched or burned out, litter layer is completely burned out, and the humus surface layer of soil is burned or scorched to a certain degree)	腐殖质层损失 0.5 cm 以下 Humus layer loss is less than 0.5 cm	7
	腐殖质层损失 0.5 ~ 1.0 cm Humus layer loss is 0.5–1.0 cm	8
	腐殖质层损失 1.0 cm 以上 Humus layer loss is more than 1.0 cm	9

注: 此表引自文献[21]。Note: this table is cited from reference [21].



大写字母表示某一火烧区各时间节点之间土壤含水率差异显著性 ($P < 0.05$), 小写字母表示某一时间节点各火烧区之间土壤含水率差异显著性 ($P < 0.05$)。T₀ 表示火烧试验前 1 d; T₁ 表示火烧试验后 1 d; T₂ 表示翌年融雪季后; T₃ 表示翌年生长季。下同。In the same fire intensity area, significant differences ($P < 0.05$) among soil moisture contents at different time points are marked with capital letters; at the same time point, significant differences ($P < 0.05$) in soil moisture content among varied fire areas are marked with lowercase letters. T₀, the day before the burning; T₁, the day after the burning; T₂, after the next snowmelt season; T₃, the next growing season. The same below.

图 2 土壤含水率在火烧时间序列上的变化

Fig. 2 Changes in soil moisture content on the fire time series

含水率差异迅速显现, 并持续至春旱阶段, 进入生长季差异消失。

大气降水是土壤含水率变化的主导性因素。因此, 随降水节律, 各火烧区土壤含水率总体上表现为火烧后持续下降(至 T₂)而后升高的变化模式(图 2)。各时间节点中, T₁ 时段土壤含水率受火干扰影响最为直接, 其中轻度火烧区土壤含水率较火烧前未发生明显变化, 中度火烧区土壤含水率显著下降 ($P < 0.05$), 重度火烧区极显著下降 ($P < 0.01$); 这说明轻度火烧未能对土壤含水率产生实质性作用。T₂ 与 T₃ 时段, 各火烧区土壤含水率则分别因春旱和降雨显著下降而后明显回升。

本研究依据固定监测点位建立的明确对应关系, 进行土壤含水率的定点跟踪监测, 并进行更为精确的成对样本 t 检验(表 2)。结果表明, 仅中度火烧区 T₁ 时段与 T₃ 时段差异不显著, 轻、中、重度火烧区其他时段比较结果均差异极显著 ($P < 0.01$)。

相比单因素方差分析, 成对样本 t 检验获得了更多土壤变化信息, 即分析结果中, 轻度火烧区 T₀ 与 T₁、T₀ 与 T₃、T₁ 与 T₃、T₂ 与 T₃ 的检验结果与常规统计结果不同, 其他分析结果一致。这说明 T₁ 时段轻度火烧区土壤含水率已经发生变化, 火烧即时效应显著, 这与常规统计分析所获结果迥异; 同时, 轻度火烧区土壤含水率对气候变化的响应也十分敏感。

表 2 火烧时间序列上土壤含水率成对样本 t 检验

Tab. 2 Soil moisture content on the fire time series by paired-samples t test

采样时间 Sampling time	火烧时间序列上土壤含水率成对样本 t 检验 P 值 P value of t test in paired samples of soil moisture content on the fire time series											
	轻度火烧区 Mild-intensity burned area				中度火烧区 Moderate-intensity burned area				重度火烧区 Severe-intensity burned area			
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
T ₀												
T ₁	0.000**				0.000**				0.000**			
T ₂	0.000**	0.000**			0.000**	0.000**			0.000**	0.000**		
T ₃	0.000**	0.005**	0.006**		0.000**	0.661	0.000**		0.000**	0.000**	0.000**	

注: **表示成对样本 t 检验结果极显著 ($P < 0.01$)。Note: ** means extremely significant differences ($P < 0.01$) in t test results of paired samples.

2.2 火烧时间序列土壤水分特征的空间格局

基于时间序列上明确的点位对应关系, 采用反距离权重法进行空间插值, 绘制火烧时间序列土壤含水率空间格局图。

火烧后, T₁ 时段, 土壤含水率集中分布在 25.01% ~ 37.00%, 约占样地面积 73%; T₂ 时段, 土壤含水率集中分布在 22.01% ~ 34.00%, 约占样地面积 63%; T₃ 时期, 土壤含水率集中分布在 25.01% ~ 40.00%, 约占样地面积 85%(图 3)。

生长季前, 火烧强度空间格局影响土壤含水率空间格局(图 1、3, 表 3)。双变量相关分析结果说

明: 火烧前, 土壤含水率空间格局与火烧强度空间格局无关; 火烧后, T₁、T₂ 时段二者均呈现极显著负相关 ($P < 0.01$) 且 T₂ 相关系数大于 T₁ 相关系数, T₃ 时段不相关。这说明, 火烧强度格局即时作用于土壤含水率空间格局, 春旱时段相关性增强, 生长季相关性消失。

基于点位对应关系, 分别计算各监测点位火烧后各时间节点相对于火烧前土壤含水率的相对变化率, 即某点位 T_n 时含水率变化 (%) = (T_n 含水率 - T₀ 含水率) / T₀ 含水率 × 100%, 绘制火烧时间序列上土壤含水率变化的空间格局图。

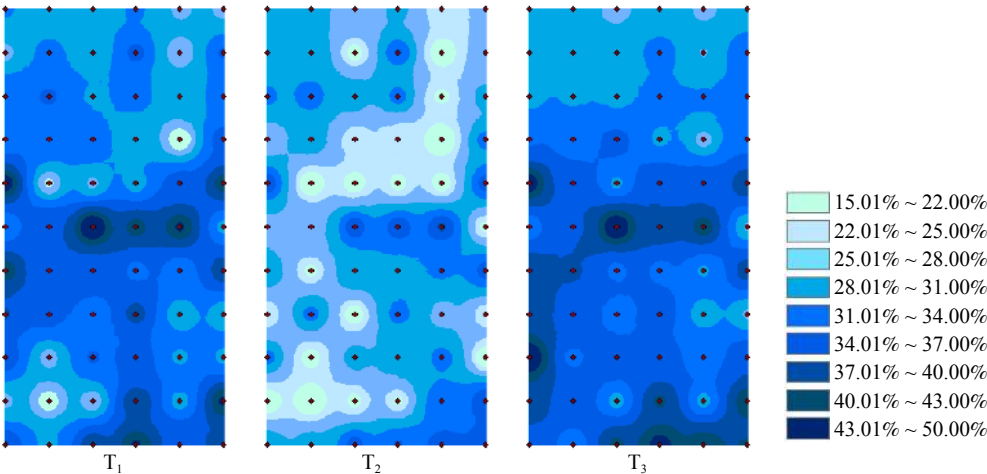


图 3 火烧后土壤含水率的空间格局

Fig. 3 Spatial patterns of soil moisture content after the fire

表 3 时间序列上土壤水分特征与火烧强度相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between soil moisture characteristics and fire intensity on the time series

时间序列 Time series	土壤含水率与火烧强度相关性 Correlation between soil moisture content and fire intensity		土壤含水率变化与火烧强度相关性 Correlation between soil moisture content change and fire intensity	
	相关系数 Correlation coefficient (<i>r</i>)	<i>P</i>	相关系数 Correlation coefficient (<i>r</i>)	<i>P</i>
T ₀	0.122	0.328		
T ₁	− 0.359	0.003**	− 0.759	0.000**
T ₂	− 0.552	0.000**	− 0.695	0.000**
T ₃	0.126	0.314	0.083	0.509

注: **表示土壤含水率及其相对变化率与火烧强度显著相关($P < 0.01$)。Note: ** means significant correlations between soil moisture content or its relative changing rate and fire intensity at $P < 0.01$ level.

火烧后, T₁ 时段, 土壤含水率变化范围集中在 − 21.00% ~ − 0.01%, 约占样地面积 83%; T₂ 时段, 土壤含水率变化范围集中在 − 42.00% ~ − 14.01%, 约占样地面积 63%; T₃ 时期, 样地内所有点位土壤含水率变化均分布在 − 14.00% ~ − 7.01% (图 4)。

经双变量相关分析(图 1、4, 表 3), 火烧后, T₁、

T₂ 时段火烧强度空间格局与土壤含水率变化格局极显著负相关($P < 0.01$)且其相关系数均大于火烧强度格局与土壤含水率格局的相关系数, T₃ 时段不相关。这说明, 相对于土壤含水率, 土壤含水率变化格局对火烧强度格局的响应更为敏感; 同时, 火烧强度对土壤含水率变化的影响因充沛的降雨基本消失。

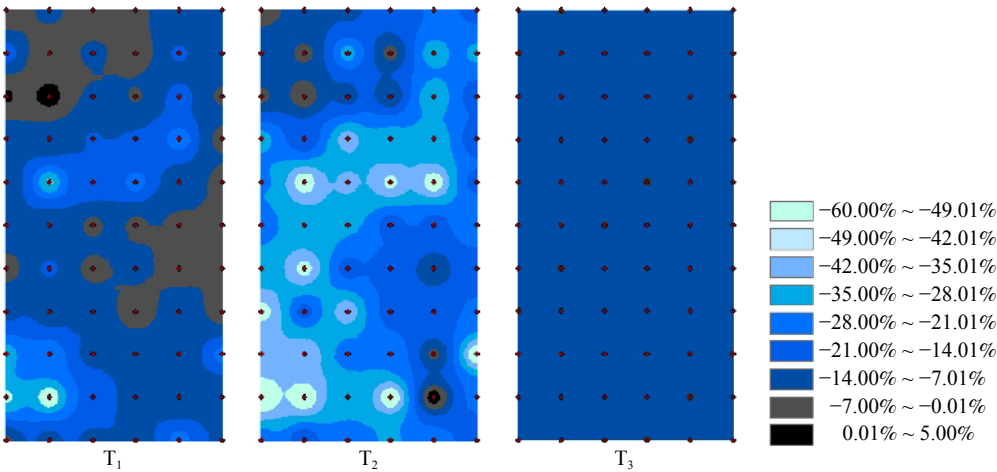


图 4 火烧后土壤含水率变化空间格局

Fig. 4 Spatial patterns of soil moisture content change after the fire

3 结论与讨论

土壤水分是受大气降水、融雪水、地下水主导的性状,其含量直接取决于土壤生态系统水分输入与输出的消长关系^[25]。本研究 40 m × 20 m 固定样地中监测点位均匀分布,因此认为轻、中、重度火烧区水分输入背景(降雨、融雪等)与水分输出相关因素(气温、太阳辐射等)一致,故而推测火烧强度是导致各火烧区土壤含水率差异的直接原因。

3.1 土壤含水率时间变化分析

T₀ 时段,晚秋大气干旱,且采样前多日未有降雨,但由于植物蒸腾作用弱,土壤相对湿润。

T₁ 时段,各火烧区土壤含水率下降是燃烧过程中强烈的加热导致土壤水分蒸发的直接结果。此外,地表温度升高使土壤层位之间的温度梯度增大,导致表层土壤水汽向下层扩散^[26]。相对于轻、中度火烧区,重度火烧区地面温度高、地表凋落物层尽毁、土层保水性有机质含量下降^[7]、土壤结构破坏^[7]、土层温度梯度增大,可能是导致该区土壤含水率下降更为显著的原因。

T₂ 时段,轻、中、重度火烧区土壤含水率进一步下降($P < 0.01$)。5—6 月,大兴安岭地区水面蒸发量最大^[27-28],故此时干旱的气候是导致火烧区所有监测点位土壤含水率极显著下降的主要原因;同时,尚不旺盛的植物蒸腾也产生一定程度影响。此外,火干扰的即时效应与火后衍生效应(如:林冠郁闭度下降、碳屑辐射热吸收增加、林地气温升高^[7-8]等)在此时段仍然显著影响土壤含水率,这也是导致重度火烧区土壤含水率显著低于轻、中度火烧区的主要原因。

T₃ 时段,轻、中、重度火烧区土壤含水率均显著升高($P < 0.01$),且差异消失。集中的大气降雨、较强的土面蒸发与强烈的植物蒸腾共同协调土壤含水率,其中输入性降雨因素主导了土壤含水率的变化,不同火烧强度导致的含水率差异在此时段消失。

3.2 土壤含水率空间变化分析

火烧后,即时含水率(或含水率变化)的空间分布与火烧强度空间分布立即呈显著负相关($P < 0.01$),此时火烧强度是导致土壤含水率分布空间格局变化的直接原因。

融雪季结束后,正值大兴安岭地区春旱时段,强烈的地表蒸发是导致土壤含水率分布变化的主要原因;此时土壤含水率(或含水率变化)的空间分布仍与火烧强度分布显著负相关($P < 0.01$)且相关系数增大,说明火烧即时效应与衍生效应对土壤含水率格局产生叠加作用。值得关注的是:这种叠加作用可

能影响火烧迹地植被更新或再生格局。此时段,轻、中度火烧区土壤含水率约为 T₀ 时段含水率的 85% 和 79%,重度火烧区不足 T₀ 时段土壤含水率 60%,重度火烧区土壤含水率已经降至植物生长阻等)对土壤含水率格局产生叠加作用。值得关注的是:这种叠加作用可能影响火烧迹地植被更新或再生格局。此时段,轻、中度火烧区土壤含水率约为 T₀ 时段含水率的 85% 和 79%,重度火烧区不足 T₀ 时段土壤含水率 60%,重度火烧区土壤含水率已经降至植物生长阻滞含水率(约为田间持水量的 65% ~ 70%)以下^[29-30],且经土壤水分特征曲线拟合其中约 1/3 点位的含水率接近或突破凋萎系数。由此推测:春旱时段,重度林火干扰导致的土壤含水率响应反映在景观尺度上将呈现大面积马赛克分布,影响重度火烧迹地植被更新与再生格局。

生长季,土壤含水率(或含水率变化)的空间格局与火烧强度格局无关。此时充沛的降雨主导了土壤含水率的变化,从空间图像上观察,轻、中、重度火烧区土壤含水率变化的差异基本消失,各火烧区土壤含水率数据统计分析的差异也不显著。然而,并不能据此判断火烧继发效应就此结束,随着主导性降水因素逐步退出,火干扰导致的土壤含水率变化可能在数年或更长时间尺度上持续作用^[11-12]。

综上分析,秋季林火点烧试验后,兴安落叶松林重度火烧区土壤含水率显著低于轻、中度区,并在春旱时段可能成为影响植物更新与再生的重要因素,而后随集中降水各火烧区土壤含水率差异消失。因此,在大兴安岭北部寒温带针叶林火烧迹地植被恢复初期,应充分考虑春旱时段重度火烧迹地土壤含水率对植被更新和再生的影响,加强迹地集水保水技术调控。

参 考 文 献

- [1] 吕爱锋,田汉勤,刘永强. 火干扰与生态系统的碳循环[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2734-2743.
Lü A F, Tian H Q, Liu Y Q. State-of-the-art in quantifying fire disturbance and ecosystem carbon cycle[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2734-2743.
- [2] 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 P B, Qu M, Xue L. Effects of forest fire on forest soils[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(6): 1596-1606.
- [3] 孔健健,杨健. 林火对大兴安岭落叶松林土壤性质的短期与长期影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1445-1450.
Kong J J, Yang J. Short- and long-term effects of fire on soil properties in a Dahurian larch forest in Great Xing'an Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1445-1450.

- [4] Turner M G. Disturbance and landscape dynamics in a changing world[J]. *Ecology*, 2010, 91(10): 2833–2849.
- [5] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review[J]. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1–10.
- [6] Robichaud P R. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231–232: 220–229.
- [7] González-Pérez J A, González-Vila F J, Almendros G, et al. The effect of fire on soil organic matter: a review[J]. *Environment International*, 2004, 30(6): 855–870.
- [8] 胡海清. 林火生态与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 93–103.
- Hu H Q. Forest ecology and management[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 93–103.
- [9] 孙铭隆. 呼中和南翁河保护区火烧迹地土壤性质及细根生物量研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011: 14.
- Sun M L. The reserch of the soil physic-chemical properties and fine root in burned areas of Huzhong and Nanwenghe Conservation[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011: 14.
- [10] 张玉红, 孙铭隆, 刘彤. 林火对大兴安岭典型植被土壤理化性质的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(6): 41–43.
- Zhang Y H, Sun M L, Liu T. Effect of forest fire on soil physical and chemical properties of typical forests in Daxing'an Mountains[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(6): 41–43.
- [11] 宋利臣, 何平平, 崔晓阳. 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, Cui X Y. Effects of severe forest fire on soil habitat factors in Greater Xing'an Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(7): 1809–1814.
- [12] 孙龙, 赵俊, 胡海清. 中度火干扰对白桦落叶松混交林土壤理化性质的影响[J]. *林业科学*, 2011, 47(2): 103–110.
- Sun L, Zhao J, Hu H Q. Prediction on the changes of forest fire danger rating in Great Xing'an Mountain region of Northeast China in the 21st century under effects of climate change[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(2): 103–110.
- [13] Muqaddas B, Chen C, Lewis T. Temporal dynamics of carbon and nitrogen in the surface soil and forest floor under different prescribed burning regimes[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 382: 110–119.
- [14] 杨光, 舒立福, 邸雪颖. 气候变化影响下大兴安岭地区 21 世纪森林火险等级变化预测[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 3236–3242.
- Yang G, Shu L F, Di X Y. Prediction on the changes of forest fire danger rating in Great Xing'an Mountain region of Northeast China in the 21st century under effects of climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 3236–3242.
- [15] 李飞, 胡同欣, 赵彬清, 等. 大兴安岭火烧迹地凋落物分解动态变化研究[J]. *森林工程*, 2018, 34(5): 31–20.
- Li F, Hu T X, Zhao B Q, et al. The influence on forest soil's nature and tree's regeneration for forest fire in the big Xingan Maient[J]. *Forest Engineering*, 2018, 34(5): 31–20.
- [16] 宋雨, 胡海清, 孙龙, 等. 大兴安岭不同坡位地表可燃物含水率的动态变化与建模[J]. *森林工程*, 2017, 33(5): 1–7.
- Song Y, Hu H Q, Sun L, et al. Dynamic change and modeling of moisture content of surface fuel in different slope positions of Daxing'anling[J]. *Forest Engineering*, 2017, 33(5): 1–7.
- [17] 项凤武. 大兴安岭北部林火对森林土壤的性质及林木更新的影响[J]. *吉林林学院学报*, 1990, 6(1): 1–20.
- Xiang F W. The influence on forest soil's nature and tree's regeneration for forest fire in the Big Xingan Maient[J]. *Journal of Jilin Forestry Institute*, 1990, 6(1): 1–20.
- [18] 王海淇, 郭爱雪, 邸雪颖. 大兴安岭林火点烧对土壤有机碳和微生物量碳的即时影响[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(2): 72–76.
- Wang H Q, Guo A X, Di X Y. Immediate changes in soil organic carbon and microbial biomass carbon after an experimental fire in Great Xing'an Mountains[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(2): 72–76.
- [19] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 等. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1114–1121.
- Gu H Y, Jin J B, Chen X W, et al. The long-term impacts on chemical properties of *Larix gmelinii* forest on the northern slope of Greater Hinggan Mountains from a forest fire of varying fire intensity[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 25(7): 1114–1121.
- [20] 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 M X, Jia W W, Wu Y. Effect of forest fire on soil chemical properties in northern Daxing'an Mountains[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(5): 33–35.
- [21] Cui X Y, Gao F, Song J F, et al. Changes in soil total organic carbon after an experimental fire in a cold temperate coniferous forest: a sequenced monitoring approach[J]. *Geoderma*, 2014, 226–227: 260–269.
- [22] 张焜, 李传波, 崔晓阳. 大兴安岭北部试验林火干扰下土壤密度的时空变化[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(6): 48–54.
- Zhang Y, Li C B, Cui X Y. Temporal and spatial variations of soil bulk density by experimental forest fire in Daxing'an Mountains[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(6): 48–54.
- [23] 张焜, 于悦, 崔晓阳. 试验林火干扰下兴安落叶松林土壤有效磷的时空变化[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(2): 12–18.
- Zhang Y, Yu Y, Cui X Y. Temporal and spatial change patterns on soil available phosphorus by an experimental forest fire in *Larix gmelinii* forests[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(2): 12–18.
- [24] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. 中华人民共和国林业行业标准: 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 13–15.
- Zhang W R, Yang G Y, Tu X N, et al. The forestry industry standard of China-forest soil analysis method[S]. Beijing:

- Standards Press of China, 1999: 13–15.
- [25] 张韡, 李响, 张帆, 等. CO₂ 升高对红松幼苗水分生理特征与土壤含水率变化的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(1): 37–41.
- Zhang Y, Li X, Zhang F, et al. Effects of elevated CO₂ on physiological characteristics of water in *Pinus koraiensis* seedlings and soil moisture in a controlled environment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(1): 37–41.
- [26] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 159.
- Sun X Y. Soil science[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 159.
- [27] 司国佐, 毛正国, 杨文娟. 大兴安岭地区水文特征分析[J]. 黑龙江水利科技, 2006, 34(6): 78–79.
- Si G Z, Mao Z G, Yang W J. Hydrology characteristic analysis in the Great Xing'an Mountains[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2006, 34(6): 78–79.
- [28] 张可扬, 李天权, 曲延浩, 等. 大兴安岭地区降水量和气温变化趋势分析[J]. 森林工程, 2018, 34(5): 8–14.
- Zhang K Y, Li T Q, Qu Y H, et al. Analysis of precipitation and temperature change in the Daxing'anling area[J]. Forest Engineering, 2018, 34(5): 8–14.
- [29] 中国农业百科全书总编辑委员会农业气象卷编辑委员会. 中国农业百科全书·农业气象卷[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 257.
- Editorial Board of the Agro-Meteorology Volume in Encyclopedia of Chinese Agriculture. The agro-meteorology volume of encyclopedia of Chinese agriculture[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 257.
- [30] 赵秀兰, 邹立尧. 黑龙江省农田土壤蓄水量盈亏值时空变化规律研究[J]. 中国农业气象, 2003, 24(3): 44–47.
- Zhao X L, Zou L Y. Study on the temporal and spatial changes of surplus-deficit status of soil water storage capacity in farmland in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(3): 44–47.
- (责任编辑 范 娟
责任编辑 孙向阳 舒立福)