

喀纳斯泰加林林下草本层地上碳密度对 林火烈度的火后时间响应

刘小菊¹, 潘存德², 褚江涛¹, 张越¹, 单奇¹

(1.新疆农业职业技术学院, 新疆 昌吉 831100; 2.新疆农业大学 林园学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为了探究林火烈度和火后时间对喀纳斯泰加林林下草本层碳密度的影响,在喀纳斯自然保护区设置火干扰样地,采用收获法进行了生物量调查。分莎草科、禾本科、豆科和其他草类4个功能群进行草本地上碳密度对林火烈度的火后时间响应研究。结果表明:喀纳斯林泰加林草本层地上碳密度的范围为 $0.096\sim 0.359\text{ t/hm}^2$ 。在3个演替阶段,莎草科和禾本科对草本层地上碳密度贡献率大;其他草类对草本层地上碳密度贡献率的范围为 $10.03\%\sim 40.97\%$;豆科对草本层地上碳密度贡献率最小,仅在针叶阔叶林阶段中低烈度火后 $51\sim 84\text{ a}$ 的林分中其贡献率较大。喀纳斯林生态系统大部分林分处于针叶阔叶和针叶混交林阶段,草本层地上碳密度在不同烈度的火干扰下总体趋势为:低烈度 $>$ 中烈度 $>$ 高烈度,表明低烈度火干扰有利于草本植物的生长。3个演替阶段草本功能群地上碳密度对林火烈度的火后时间响应并不相同,但草本层地上碳密度随着火后时间的增加总体呈减小趋势。高烈度火干扰对草本层地上碳密度的影响最大,且不利于保持或提高森林的生产力。通过清除林下调落物将林火烈度控制在中、低烈度范围内,有利于提高草本层的碳汇功能。

关键词:喀纳斯;草本;功能群;碳密度;林火烈度;火后时间

中图分类号:S762;X17

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0098-08

Response of Aboveground Carbon Density of Herbaceous Layer to Post-Fire Time of Fire Severity in Kanas, Xinjiang

LIU Xiaoju¹, PAN Cunde², CHU Jiangtao¹, ZHANG Yue¹, SHAN Qi¹

(1.Xinjiang Agriculture Vocational Technical Collage, Changji, Xinjiang 831100, China;

2.Collage of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to explore the effects of fire severity and post-fire time on carbon density of herbaceous layer in Taiga forest of Kanas, fire disturbance plots were set up in Kanas Nature Reserve, and herb biomass was investigated by harvest method. The response of herbaceous aboveground carbon density to fire severity was studied in four functional groups: Cyperaceae, Gramineae, Leguminosae and weeds. The results showed that the aboveground carbon density ranged from 0.096 t/hm^2 to 0.359 t/hm^2 . In the three successional stages, Cyperaceae and Gramineae contributed more to the aboveground carbon density of the herbaceous layer; weeds contributed $10.03\%\sim 40.97\%$ to the aboveground carbon density of the herbaceous layer; Leguminosae contributed the least to the aboveground carbon density of the herbaceous layer, and they contributed more only in the coniferous and broad-leaved forest stage after $51\sim 84$ years of low severity fire. Most of the stands in Kanas Taiga were in the stage of coniferous broad-leaved and coniferous mixed forest. The overall trend of aboveground carbon density in herbaceous layer under different fire severity decreased in the order: low severity $>$ moderate severity $>$ high severity, which indicated that low severity was conducive to the growth of herbs. The response of aboveground carbon density of herb functional groups to fire severity in

收稿日期:2021-04-14

修回日期:2021-05-04

资助项目:新疆自然科学基金面上项目“喀纳斯泰加林火烧迹地林下植被生物量动态及碳、氮、磷化学计量特征研究”(2019D01A67);新疆农业职业技术学院科研资助项目“阿尔泰山柳兰资源的调查、评价与引种”(XJNZYKJ202012)

第一作者:刘小菊(1979—),女,四川南部人,教授,博士,主要从事林草生态、园林植物栽培方面的教学和科研工作。E-mail:liuxiaoju317@163.com

three successional stages was not the same, but the overall trend of the aboveground carbon density of herbaceous layer decrease with increasement of the time after fire. High severity had the greatest impact on aboveground carbon density in herbaceous layer, and was not conducive to maintaining or improving forest productivity. By removing litter under the forest, the fire severity should be controlled in the range of moderate and low severity, which is conducive to improving the carbon sink function of herbaceous layer.

Keywords: Kanas; herb; functional group; carbon density; fire severity; post-fire time

北方森林受气候变化的影响剧烈,林火发生的频率和烈度显著增加^[1],有学者预测中国北方森林林火发生频率将增加 200%^[2]。林火是北方针叶林最主要的自然干扰,每年的过火面积约占该系统的 1%^[3]。泰加林是地球上最大的森林生态系统^[4],其对全球气候变化和碳平衡具有极为重要的作用^[5-6]。林火是影响森林生态系统演替发展的一个重要的干扰因子,深刻影响着生态系统的组成、结构、功能和火成演替的方向和过程^[7],减少森林生物量^[8],进而影响到森林生态系统的碳循环过程^[9]。火干扰发生频率低、烈度高的区域易发生序列演替,林火干扰发生频率高、林火烈度低更易形成异龄林分^[10]。

森林群落在遭受火干扰时其草本层、灌木层、林冠层乃至凋落物会对干扰做出相应的响应,而草本层比灌木层和乔木层具有更高敏感度^[11]。林下草本层的物种数占了北方针叶林植被总数的 90%以上,是该生态系统植被物种多样性的主要组成部分^[12]。林下草本层的生物量虽小,但由于周转率高,在调节营养元素的生物地球化学循环、改善林内环境、启动森林的演替和发展等方面起着关键作用^[13],保护动物的生存环境和森林的可持续生态服务功能的发挥等^[14]。因此,有必要对喀纳斯火成演替泰加林林下草本层生物量进行研究,为林下植被与冠层结构关系和森林碳平衡研究提供理论基础。

火干扰影响着森林生态系统碳储量的空间分布格局,理解森林过火后地上生物量和地下碳储量的变化可以为森林恢复评价提供一个新的管理途径。本研究以喀纳斯泰加林火成演替的不同阶段草本层地上碳密度为研究对象,分析以下 3 个问题:不同草本功能群地上碳密度在不同火成演替阶段的动态特征是什么?不同草本功能群对草本层地上碳密度的贡献率是多少?林火烈度对草本层地上碳密度的影响如何?旨在为本区森林生态系统碳储量精确估计和为受火干扰影响下森林生态系统的恢复研究提供理论指导。

1 研究方法

1.1 研究区概况

喀纳斯国家级自然保护区位于新疆阿勒泰地区

布尔津县境内(E87°01'45"—87°33'50",N48°36'18"—48°38'56",面积 875 km²)。保护区地处欧亚大陆腹地,位于阿尔泰山的西段山区,属温带高寒山区气候,春秋温暖,冬季寒而不剧,全年无夏季。年均气温 -0.2℃,年均降水量 1 065 mm,年均蒸发量 1 097 mm,无霜期 80~108 d^[15]。该保护区属于寒温带地区,寒冷期长,无霜期短,8 月初开始降雪,一直到翌年 5 月下旬或 6 月初。森林群落建群种主要为西伯利亚落叶松(*Larix sibirica* Ldb.)、西伯利亚云杉(*Picea obovata* Ldb.)、西伯利亚红松(*Pinus sibirica* Ldb.)、疣枝桦(*Betula pendula* Roth.),伴生的物种主要有欧洲山杨(*Populus tremula* L.)、西伯利亚冷杉(*Abies sibirica* Ldb.)以及刺蔷薇(*Rosa acicularis* L.)和多刺蔷薇(*R. spinosissima* L.)等乔灌木^[16]。

1.2 样地设置与数据采集

1.2.1 火干扰因子调查 火干扰因子包括林火烈度(fire severity, Seve)和火后时间(post-fire time, PFT),调查参照文献^[17]进行,林火烈度分为高烈度(high severity, HS)、中烈度(moderate severity, MS)和低烈度(low severity, LS)(表 1)。森林群落演替类型参照文献将森林划分为阔叶针叶混交林,针叶阔叶混交林和针叶混交林 3 种类型^[18]。

1.2.2 生物量调查 2017 年 6—8 月和 2019 年 8 月,在喀纳斯泰加林中未受过人为干扰的可识别的历史火干扰不同林分中依据火疤木设置林冠层样方,样地小为 30 m×30 m,共调查 186 个林冠层样方。同时,在每个样方的中心及 4 个角嵌套设置 1 m×1 m 草本层样方。生物量研究以收获法为主,在草本层样方用剪刀齐地面刈割并按莎草科、禾本科、豆科和其他草类 4 个功能群进行收集^[19],将样品置于 105℃烘箱内烘干杀青半小时后再在 85℃下烘干至恒重,称取干重(精度 0.001 g),记录其干物质重量,计算各草本功能群和草本层的地上生物量。

1.2.3 数据处理分析 草本层的平均含碳率为 0.410^[20],地上生物量乘以含碳量得到各自地上碳密度(aboveground carbon density, AGCD)。所有数据的统计分析 with 处理均在 Excel 2010 办公软件和

SPSS 22.0 程序中进行,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)分析不同演替阶段不同烈度草本层和草本功能群 AGCD 的差异性,采用 Originpro 2018 作图。

表 1 样地数量统计

演替阶段	火后时间 PFT	125 a	94 a	84 a	73 a	62 a	51 a	41 a	33 a	23 a
阔叶针叶林	高烈度 HS	—	—	3	—	—	—	3	3	4
	中烈度 MS	—	—	3	—	—	4	4	3	3
	低烈度 LS	—	—	—	—	—	3	3	3	3
针叶阔叶林	高烈度 HS	—	5	4	5	4	4	4	5	4
	中烈度 MS	—	4	5	4	4	5	5	4	5
	低烈度 LS	—	—	3	—	3	—	3	5	5
针叶混交林	高烈度 HS	—	—	—	3	—	3	—	3	—
	中烈度 MS	5	3	5	4	3	—	3	3	—
	低烈度 LS	—	5	—	—	3	3	4	4	—

注:表内数字代表样地数量(个);“—”表示未调查到。

2 结果与分析

2.1 阔叶针叶混交林草本 AGCD 对林火烈度的火后时间响应

草本功能群和草本层 AGCD 对 3 个林火烈度的火后时间的响应见图 1。高烈度火干扰林分的不同火后时间之间莎草科和草本层 AGCD 存在显著差异($p<0.05$);而禾本科、豆科和其他草类的 AGCD 不存在显著差异($p>0.05$);中烈度和低烈度火干扰林分除其他草类外其他功能群和草本层 AGCD 在不同火后时间之间都存在显著差异($p<0.05$)。3 个林火烈度下莎草科的 AGCD 与草本层 AGCD 的变化趋势相同,表明在此演替阶段中莎草科对草本层的 AGCD 起决定性作用。在高烈度和中烈度火干扰林分,禾本科和豆科的 AGCD 未表现出明显的变化特征;其他草类的 AGCD 在高烈度火干扰林分中逐渐减小,在中烈度火干扰林分先增加后减小。豆科和其他草类的 AGCD 到了此阶段的中后期都呈现出逐渐减小的趋势,这是因为在此阶段的前期喜阳固氮的草本植物占据优势地位,到了中后期,针叶树逐渐占据优势地位,针叶树比阔叶树的透光率小,林分郁闭度增加,喜阴的草本代替阳性草本占据草本层的优势地位,喀纳斯泰加林阔叶针叶林阶段的中后期的草本层以莎草科和禾本科植物为主。当这两类草本占优势地位时,豆科和其他草类的数量就会减少,其 AGCD 也相应减小,导致豆科和其他草类对草本层 AGCD 的贡献小。

对比阔叶针叶林森林草本 AGCD 对不同烈度不同火后时间火干扰的响应(表 2)。对阔叶针叶林的 3 个火烈度的 3 个火后时间各组分的 AGCD 进行方差

分析($p<0.05$)。草本功能群和草本层 AGCD 在不同林火烈度和不同火后时间之间均存在显著差异,表明林火烈度和火后时间对阔叶针叶混交林草本 AGCD 有显著的影响。

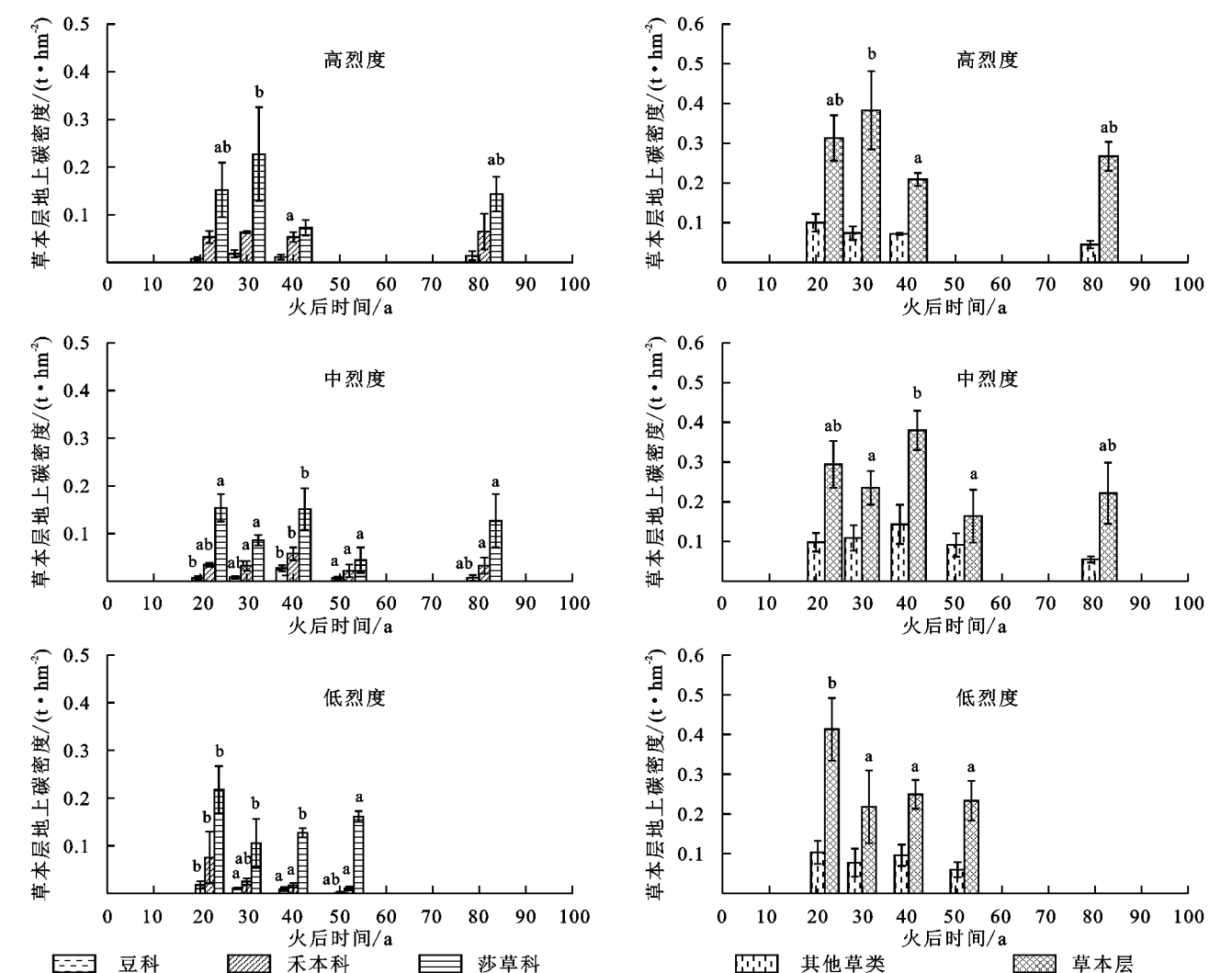
2.2 针叶阔叶林草本 AGCD 对林火烈度的火后时间响应

针叶阔叶混交林阶段草本功能群和草本层 AGCD 对 3 个林火烈度的火后时间的响应见图 2。三林火烈度的火干扰林分在不同火后时间的变化,除高烈度林分的豆科 AGCD 外,其他草本功能群及草本层 AGCD 都存在显著差异($p<0.05$)。与阔叶针叶林不同的是,莎草科和禾本科的 AGCD 共同占主导地位。禾本科和莎草科的 AGCD 随着火后时间的增加没有明显的变化趋势,在某些火后时间禾本科的 AGCD 会高于莎草科 AGCD。在高烈度和低烈度火干扰林分中豆科 AGCD 总趋势是增加后减小,而低烈度火干扰火后 84 a,豆科 AGCD 达到峰值(0.123 t/hm^2),这是因为在火后 51~84 a 的火干扰林分中耐阴的新疆山黧豆(*Lathyrus-gmelinii*)和狭叶山黧豆(*L.krylovii*)这类地上体量较大的豆科植物占优势地位,使得这个时间段内各功能群的碳密度大小排序为:豆科>禾本科>莎草科。其他草类 AGCD 在 3 个火烈度下呈波动变化。高烈度火干扰后 61~93 a 草本层 AGCD 变化不大,表明物种组成变化也不大。中烈度火干扰林分的草本层 AGCD 呈波动变化,低烈度火干扰林分中其表现为先增大后减小的趋势,火后 41 a 达到最大值,这也是由于新疆山黧豆和狭叶山黧豆的作用。

对比针叶阔叶林阶段草本 AGCD 对不同烈度的不同火后时间火干扰的响应(表 3)。对针叶阔叶林在 3 个火烈度的 3 个火后时间各组分的 AGCD 进行

方差分析 ($p < 0.05$)。草本功能群和草本层的 AGCD 在不同林火烈度和不同火后时间之间均存在

显著差异,表明林火烈度和火后时间对针叶阔叶混交林的草本 AGCD 有显著的影响。



注:不同小写字母表示存在显著差异($p < 0.05$),下同。

图 1 阔叶针叶混交林草本功能群及总草本层 AGCD 的动态变化

2.3 针叶混交林草本 AGCD 对林火烈度的火后时间响应

针叶混交林草本功能群和草本层 AGCD 对 3 个林火烈度的火后时间的响应见图 3。在中、低烈度火干扰林分中除豆科外,莎草科、禾本科、其他草类和草本层的 AGCD 均存在显著差异($p < 0.05$),表明高烈度和中烈度火干扰对草本层 AGCD 的影响强于低烈度火干扰。与针叶阔叶混交林相同,针叶混交林的草本层 AGCD 也是由莎草科和禾本科共同决定。豆科 AGCD 在 3 个林火烈度下随着火后时间增加未表现出明显的趋势。禾本科 AGCD 在高烈度火干扰林分先减小后增大,火后 93 a 达到峰值;在中烈度火干扰林分中有增有减,火后 84 a 达到峰值;在低烈度火干扰林分中先增加后减小。莎草科和禾本科 AGCD 变化趋势基本相同,但在中烈度火后 61 a 达到峰值。在中烈度火干扰林分中,其他草类和草本 AGCD 先减小后增加;在中烈度火干扰林分中有增有

减;在低烈度火干扰林分中先增加后减少。同样,在此阶段的后期,北极千里光(*Senecio arcticus*)、互叶獐牙菜(*Swertia obtusa*)、下延叶古当归(*Archangelica decurrens*)和柳兰(*Chamerion angustifolium*)的数量较多,这些植物体量大,所以在高烈度和中烈度火干扰的后期其他草类的生物量呈上升趋势。火后 33 a 草本 AGCD 大小排序为:高烈度>低烈度>中烈度,这是因为高烈度火后蓝花老鹳草(*Geranium pseudosibiricum*)、直立老鹳草(*G. rectum*)、山地阿魏(*Ferula akitschkensis*)和异色薹本(*Ligusticum discolor*)等此类地上体量较大的阳性草本数量较多,引起草本层生物量的增加。

对针叶混交林 3 个火烈度同一火后时间森林草本 AGCD 的变化进行方差分析(表 4)($p < 0.05$)。豆科、莎草科、其他草类和草本层的 AGCD 在不同林火烈度的火后 33 a 之间均存在显著差异,表明林火烈度和火后时间对针叶混交林的草本层的 AGCD 有一定的影响。

表 2 阔叶针叶林不同烈度不同火后时间下草本 AGCD 的变化
t/hm²

变量	林火 烈度	火后时间		
		23 a	33 a	41 a
豆科地上	高	0.008±0.003a	0.018±0.008b	0.011±0.005a
	中	0.008±0.003a	0.008±0.003a	0.027±0.006b
碳密度	低	0.018±0.008b	0.011±0.001a	0.009±0.004a
	高	0.053±0.013b	0.064±0.002ab	0.053±0.010ab
禾本科地上	中	0.035±0.004a	0.033±0.010a	0.058±0.013ab
	低	0.075±0.054b	0.025±0.007a	0.017±0.005a
莎草科地上	高	0.152±0.047ab	0.227±0.078b	0.072±0.016a
	中	0.154±0.029ab	0.086±0.011a	0.151±0.043ab
碳密度	低	0.217±0.100b	0.105±0.051	0.127±0.010ab
	高	0.100±0.022ab	0.074±0.017b	0.072±0.003a
其他草类地上	中	0.154±0.029b	0.086±0.011b	0.151±0.043b
	低	0.103±0.029ab	0.077±0.035b	0.096±0.027ab
草本层地上	高	0.313±0.057a	0.383±0.098a	0.209±0.016b
	中	0.098±0.023a	0.109±0.032a	0.143±0.050a
碳密度	低	1.840±0.886b	1.116±0.574ab	2.308±0.031b

注:表中数据为均值±标准误,不同小写字母表示不同烈度和不同火后时间之间存在显著差异($p<0.05$),下同。

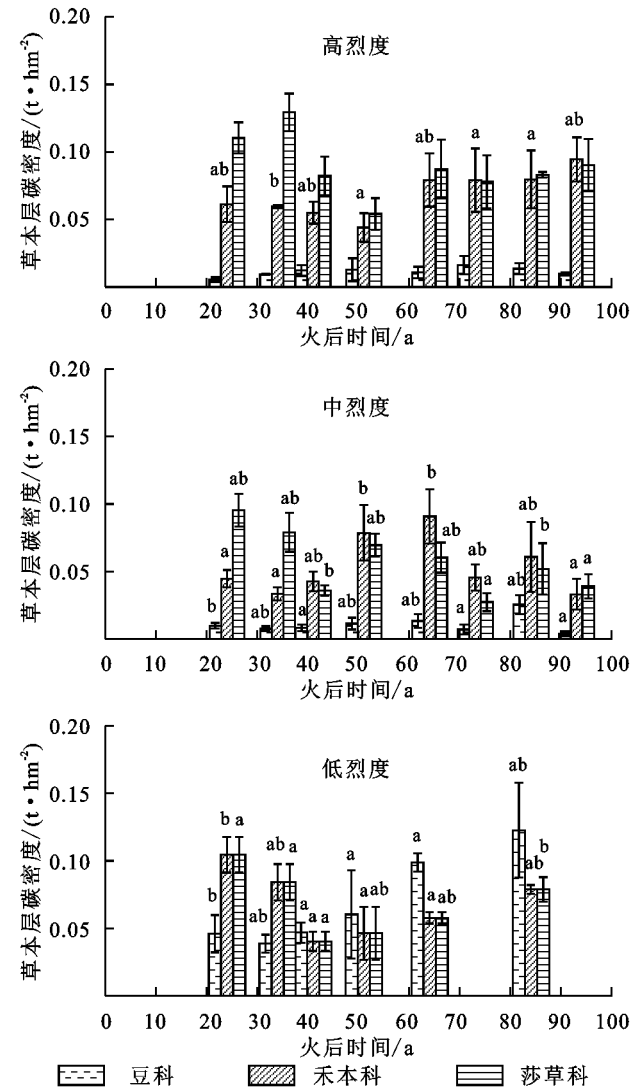
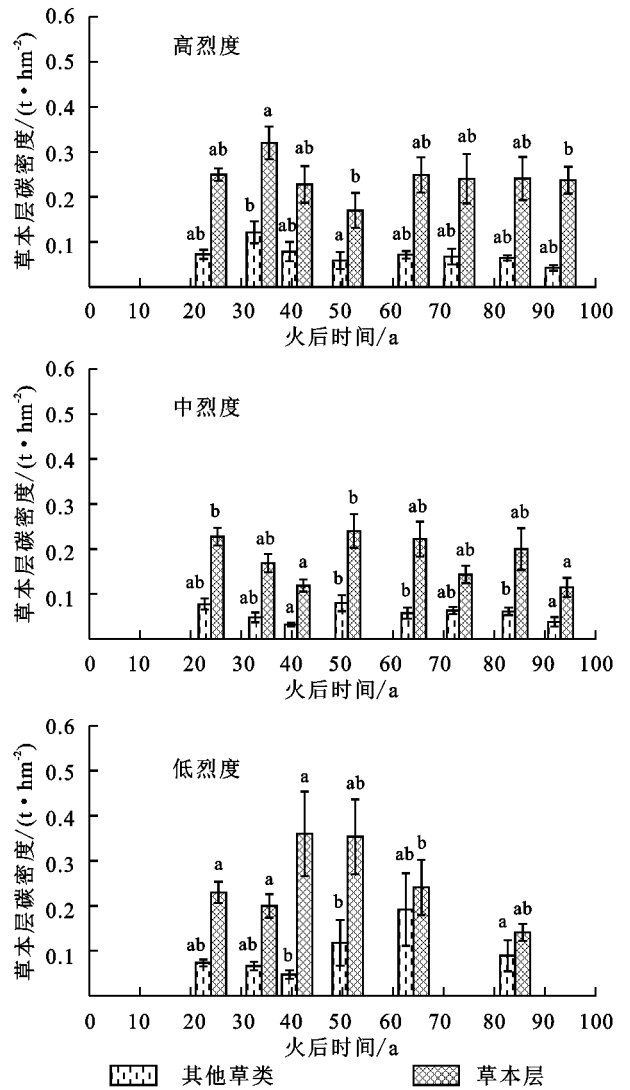


图 2 针叶阔叶混交林草本功能群及总草本层 AGCD 的动态变化

喀纳斯林泰加林草本层 AGCD 的范围为 0.096~0.359 t/hm²。在 3 个演替阶段,莎草科和禾本科对

3 讨论

由于气候变暖,北方针叶林林火发生的频率和烈度都会增加,而林火干扰严重影响森林群落的物种组成、年龄结构、分布、生物量、生物多样性格局和森林更新,对森林景观的形成十分重要^[21]。不同林火烈度下大兴安岭火干扰林分的森林演替轨迹不同,低烈度火干扰林分自我更新效果好于高烈度火干扰林分^[22]。林火烈度在北方森林碳循环和营养循环中起着关键作用^[21],预测林火对北方森林生物量的影响,确定区域尺度森林碳收支,为北方森林生态系统的结构和功能的动态变化研究提供量化指标,可为森林碳汇和碳平衡提供科学依据^[23-24]。喀纳斯是中国最为典型的北方“寒温带针叶林”分布区,对保护区域生态环境和维持区域碳平衡等都具有极其重要的作用。



草本层 AGCD 贡献率大,表明多叶苔草(*Carex atrata*)和老芒麦(*Elymus sibiricus*)是喀纳斯泰加林的

优势草种,适应性非常强;其他草类对草本层 AGCD 贡献率的范围为 10.03%~40.97%。火烧后,随着时间的演替,林下光照条件变差,寄奴花(*Cerastium pauciflorum*)、小斑叶兰(*Goodyerarepens*)和异燕麦(*Helictotrichon hookeri*)等耐阴草本植物得重要值逐渐增大,而中生的直立老鹳草、野火球(*Trifolium lupinaster*)和白花砧草(*Galium boreale*)等草本植物代替阳性草本占据优势地位,使得其他草类的贡献率增大;豆科对草本层 AGCD 贡献率最小,仅在针叶阔叶林阶段中低烈度火后 51~84 a 的林分中其贡献率较大,这是因为喜阴的新疆山黧豆和狭叶山黧豆这类地上体量较大的豆科植物占优势地位。随着火后时间的增加,郁闭度增大,林下环境对草本层产生了很大的影响,同时喀纳斯泰加林的土壤逐渐酸化,也加剧了草本层生物量的衰退,从而降低了草本层的碳密度,与邹梦玲等^[25]人研究结论一致。

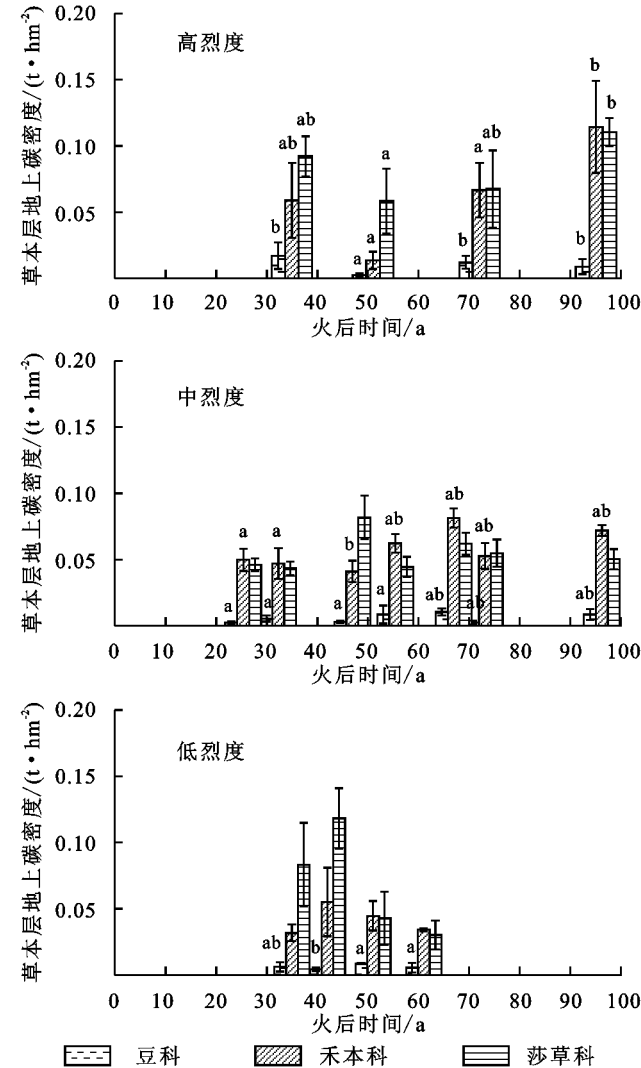
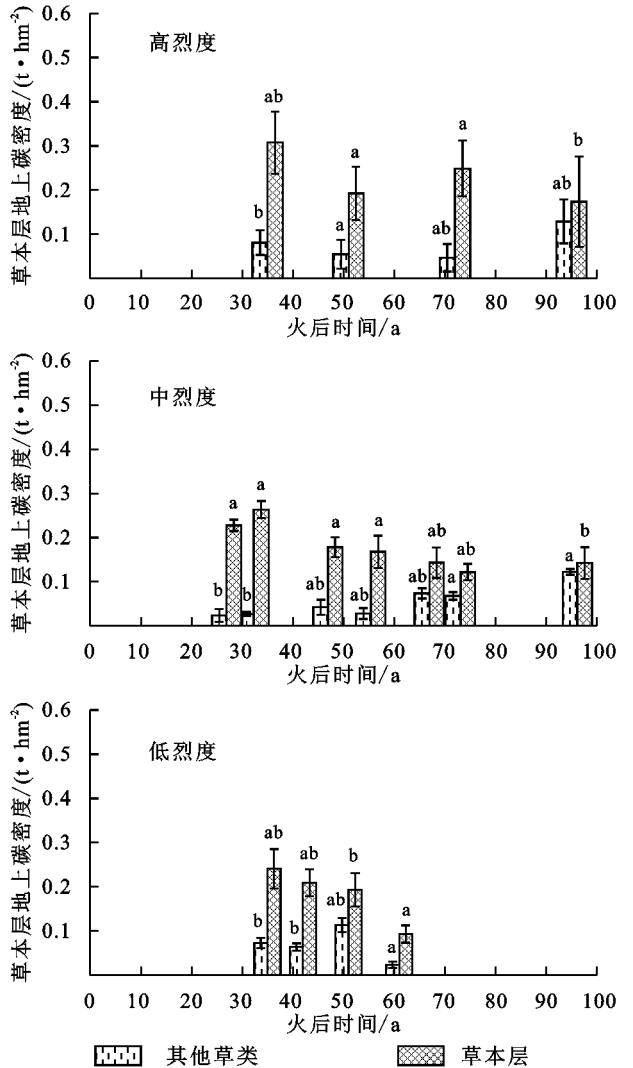


图 3 针叶混交林草本功能群及草本层 AGCD 的动态变化

喀纳斯泰加林大部分林分处于针叶阔叶和针叶混交林阶段,草本层 AGCD 在不同烈度的火干扰下

表 3 针叶阔叶混交林不同烈度不同火后时间下森林 AGCD 的变化 t/hm ²				
变量	林火烈度	火后时间		
		23 a	33 a	41 a
豆科地上碳密度	高	0.008±0.003a	0.018±0.008ab	0.011±0.005ab
	中	0.008±0.003a	0.008±0.003a	0.027±0.006b
	低	0.018±0.008b	0.011±0.001ab	0.009±0.004a
禾本科地上碳密度	高	0.053±0.013ab	0.064±0.002b	0.053±0.010ab
	中	0.035±0.004ab	0.033±0.010a	0.058±0.013ab
	低	0.075±0.054b	0.025±0.007a	0.017±0.005a
莎草科地上碳密度	高	0.152±0.047ab	0.227±0.078b	0.072±0.016a
	中	0.154±0.029ab	0.086±0.011a	0.151±0.043ab
	低	0.217±0.100ab	0.105±0.051a	0.127±0.010a
其他草类地上碳密度	高	0.100±0.022ab	0.074±0.017a	0.072±0.003a
	中	0.098±0.023a	0.109±0.032ab	0.143±0.050b
	低	0.103±0.029ab	0.077±0.035a	0.096±0.027a
草本层地上碳密度	高	0.313±0.057ab	0.383±0.098b	0.209±0.016a
	中	0.294±0.059a	0.235±0.042a	0.380±0.049b
	低	0.419±0.079b	0.218±0.092a	0.249±0.036ab



总体趋势为:低烈度>中烈度>高烈度,表明低烈度火干扰有利于草本植物的生长,这可能是因为火干扰

后土壤表层 SOM 物质增加,给草本植物的生长提供更加充足的养分^[26-27]。发生低烈度火烧时,林分间产生林窗/林隙,使得林下光照增加,环境水平和空间异质性的增加,导致大量物种的入侵^[28-29]。而未被烧死的草本植物通常有较强的适应性,尤其是地下具有繁殖体的种类,随着时间的演替,它们的体量变大、数量增多,使得草本层的碳密度增大。采用 0.410 作为森林各组分的含碳率计算碳密度均在一定的误差,掩盖了不同植物和植物各器官间含碳率的差异,提高碳密度的估算精度,分器官测算含碳率是非常必要的^[30-31]。

变量	林火烈度		
	高	中	低
豆科地上碳密度	0.017±0.010b	0.003±0.000a	0.006±0.004a
禾本科地上碳密度	0.059±0.028	0.050±0.008	0.032±0.006
莎草科地上碳密度	0.092±0.015b	0.046±0.005a	0.083±0.032ab
其他草类地上碳密度	0.081±0.028b	0.023±0.015a	0.072±0.012b
草本层地上碳密度	0.249±0.063b	0.122±0.019a	0.193±0.038ab

4 结 论

对喀纳斯泰加林火成演替群落中草本层的地上碳密度对林火烈度的火后时间相应进行了分析。在 3 个演替阶段,莎草科和禾本科对草本层 AGCD 贡献率大,其他草类的贡献率呈波动变化,豆科植物在喀纳斯泰加林林分中不多,但当林中有狭叶山黧豆和新疆山黧豆时,豆科的贡献率可以达到 60% 以上。3 个演替阶段草本功能群 AGCD 对林火烈度的火后时间响应并不相同,但草本层 AGCD 随着火后时间的增加总体趋势是减小。在火成演替群落中,禾本科和莎草科对草本层的 AGCD 贡献最大。高烈度火干扰对草本层地上碳密度的影响最大,且不利于保持或提高森林的生产力。通过清除林下调落物将林火烈度控制在中、低烈度范围内,有利于提高草本层的碳汇功能。此次调查的最晚的火后时间为 22 a,因此,无法分析林火烈对草本层生物量的短期和直接影响。为了提高碳密度估算的准确率,分器官确定含碳量非常必要。

参考文献:

[1] 史作民,刘世荣,程瑞梅.宝天曼地区栓皮栎林恢复过程中高等植物物种多样性变化[J].植物生态学报,1998,22(5):32-38.

[2] Wani A, Joshi P, Singh O. Estimating biomass and carbon mitigation of temperate coniferous forests using spectral modeling and field inventory data[J]. Ecological Informatics, 2015,25(1):63-70.

[3] Running S W. Climate change. Is global warming cau-

sing more, larger wildfires [J]. Science, 2006, 313(5789):927-8.

[4] 杨健,孔健健,刘波.林火干扰对北方针叶林林下植被的影响[J].植物生态学报,2013,37(5):474-480.

[5] Vancleve K, Oliver L K, Schlentner R E, et al. Productivity and nutrient cycling in taiga forest ecosystems[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1983,13(5):747-766.

[6] Ciais P, Tans P P, Trolier M, et al. A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the 13C/12C ratio of stmospheric CO₂ [J]. Science, 1995,269(9):1098-1102.

[7] Hari P, Kulmala L. Boreal forest and climate change [J]. Advances in Global Change Research, 2008,34(1):93-101.

[8] Devineau J L, Fournier A, Nignan S. Savanna fire regimes assessment with MODIS fire data:Their relationship to land cover and plant species distribution in western Burkina Faso(West Africa)[J]. Journal of Arid Environments, 2010,74(9):1092-1101.

[9] Rowe J S, Scotter G W. Fire in the boreal forest[J]. Quaternary Research, 1973,3(3):444-464.

[10] Auclair A, Carter T. Forest wildfires as a recent source of CO₂ at northern latitudes[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011,23(8):1528-1536.

[11] Angelstam P K. Maintaining and restoring biodiversity in European boreal forests by developing natural disturbance regimes [J]. Journal of Vegetation Science, 2010,9(4):593-602.

[12] 陈丝露,赵敏,李贤伟,等.柏木低效林不同改造模式优势草本植物多样性及其生态位[J].生态学报,2018,38(1):143-155.

[13] Van Bellen S, Garneau M, Bergeron Y. Impact of climate change on forest fire severity and consequences for carbon stocks in boreal forest stands of Quebec, Canada: A synthesis[J]. Fire Ecology, 2010,6(6):16-44.

[14] Nilsson M C, Wardle D. Understory vegetation as a forest ecosystem driver evidence from the Northern Swedish boreal forest[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2005,3(8):421-428.

[15] Hart S. Understory vegetation dynamics of north American boreal forests [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2006,25(4):381-397.

[16] 李园园,王蕾,刘琪璟,等.新疆喀纳斯自然保护区森林碳储量及碳密度变化[J].干旱区研究,2019,36(5):1136-1145.

[17] 刘小菊,李园园,单奇.喀纳斯泰加林 35 年火烧迹地不同林火烈度 11 种灌木生物量特征及估测模型[J].干旱区资源与环境,2020,34(10):132-138.

[18] 郭珂,潘存德,李贵华,等.基于 MRT 的喀纳斯泰加林

- 火成演替群落数量分类[J].生态学杂志,2019,38(6):1926-1936.
- [19] 刘凤娇.长白落叶松人工林林下植被生物量与多样性研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- [20] 郑拴丽,许文强,杨辽,等.新疆阿尔泰山森林生态系统碳密度与碳储量估算[J].自然资源学报,2016,31(9):1553-1563.
- [21] Liu X J, Pan C D. Effects of recovery time after fire and fire severity on stand structure and soil of Larch forest in the Kanas National Nature Reserve, north-west China [J]. Journal of Arid Land, 2019,11(6):811-823.
- [22] 蔡文华,杨健,刘志华,等.黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子[J].生态学报,2012,32(11):3303-3312.
- [23] Wang W, He H, Spetich M, et al. A large-scale forest landscape model incorporating multi-scale processes and utilizing forest inventory data [J]. Ecosphere, 2013,4(9):1-23.
- [24] 赵敏,周广胜.中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析[J].地理科学,2004,24(1):50-54.
- [25] 邹梦玲.大兴安岭火烧迹地植被恢复对碳储量的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [26] Vega J A, Fernández C, Pérez-Gorostiaga P, et al. Response of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) recruitment to fire severity and post-fire management in a coastal burned area in Galicia (NW Spain)[J]. Plant ecology, 2010,206(2):297-308.
- [27] New T. Insects, Fire and Conservation[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2014:1-20.
- [28] Zhu J J, Lu D L, Zhang W D. Effects of gaps on regeneration of woody plants: A meta-analysis[J]. Journal of Forestry Research, 2014,25(3):501-510.
- [29] Muscolo A, Sidari M, Mercurio R. Influence of gap size on organic matter decomposition, microbial biomass and nutrient cycle in Calabrian pine(*Pinus laricio*, Poir.) stands[J]. Forest Ecology and Management, 2007,242(2):412-418.
- [30] 岳军伟,关晋宏,邓磊,等.甘肃亚高山云杉人工林生态系统碳、氮储量动态和分配格局[J].生态学报,2018,38(21):7790-7800.
- [31] 刘冰燕,陈云明,曹扬,等.秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局[J].应用生态学报,2015,26(3):643-652.

~~~~~

(上接第97页)

- [99] Fiener P, Wilken F, Auerswald K. Filling the gap between plot and landscape scale-eight years of soil erosion monitoring in 14 adjacent watersheds under soil conservation at Scheyern, Southern Germany[J]. Advances in Geosciences, 2019,48:31-48.
- [100] Alexander R B, Boyer E W, Smith R A, et al. The role of headwater streams in downstream water quality[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007,43(1):41-59.
- [101] Nadeau T, Rains M. Hydrological connectivity between headwater streams and downstream waters: How science can inform policy1[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007,43(1):118-133.
- [102] Creed I F, Lane C R, Serran J N, et al. Enhancing protection for vulnerable waters[J]. Nature Geoscience, 2017,10(11):809-815.
- [103] Mutema M, Jewitt G, Chivenge P, et al. Spatial scale impact on daily surface water and sediment fluxes in Thukela river, South Africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2016,92:34-43.
- [104] Kinzel P J, Legleiter C J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric lidar[J]. Remote Sensing, 2019,11(19):doi. org/10.3390/rs11192317.
- [105] Fulton J W, Anderson I E, Chiu C L, et al. QCam: SUAS-based Doppler radar for measuring river discharge[J]. Remote Sensing, 2020,12(20):doi. org/10.3390/rs12203317.
- [106] Wagener T, Sivapalan M, Troch P A, et al. The future of hydrology: An evolving science for a changing world[J]. Water Resources Research, 2010,46(5):doi. org/10.1029/2009 WR008906.
- [107] 张光辉.植被恢复背景下土壤侵蚀研究需要加强的内容[J].中国水土保持,2020,41(9):76-79.
- [108] Golden H E, Hoghooghi N. Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2018,5(1):e1254.
- [109] Ichiba A, Gires A, Tchiguirinskaia I, et al. Scale effect challenges in urban hydrology highlighted with a distributed hydrological model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018,22(1):331-350.