

火烧烈度对滇中云南松林灌木层植物多样性的影响

姜立镇¹, 李晓娜^{1*}, 王秋华¹, 徐远杰¹, 潘慧萍¹, 王 劲¹, 王儒龙²

(1. 西南林业大学, 云南 昆明 650224; 2. 玉溪市易门县林业和草原局, 云南 易门 651100)

摘要:调查火后1 a 滇中云南松林灌木层植物群落组成及其物种多样性的变化,采用多重比较LSD 检验分析了火烧烈度对云南松林灌木层植物群落特征影响的差异性,采用RDA 探讨了物种多样性指数与火烧烈度(综合火烧指数、土壤pH 值、碳氮化学计量特征的相关关系,量化了不同火烧烈度下滇中云南松林灌木层植物群落结构和物种多样性指数的变化。结果表明:(1)随火烧烈度增加,调查区灌木层植物种类呈线性减少趋势,由未过火样地的11种降低至重度火烧样地的6种;虽然未过火、轻度、中度和重度火烧样地中优势物种均是车桑子,但阴性树种的重要值和多度降低,而阳性树种重要值和多度增加,火烧样地多数灌木植物的高度有降低;(2)随火烧烈度增加,滇油杉幼苗的重要值和密度大幅降低,云南松幼苗重要值和密度呈非线性增加,中度火烧样地云南松幼苗的重要值和密度最大,各火烧样地2种乔木幼苗的高度均减小;(3)随火烧烈度增加,Shanon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数和Margalef 丰富度指数均有降低,但仅重度火烧样地各物种多样性指数显著降低,各指数均与综合火烧指数、土壤pH 值、土壤总碳(TC)和碳氮比有较大的相关性。

关键词:火干扰;物种组成;植物多样性;云南松林下木;滇中地区

中图分类号:Q16;Q948.15⁺7;S762.8;S791.257 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2022.06.004

Effects of fire intensities on plant diversity of shrub layers in *Pinus yunnanensis* forest

Jiang Lizhen¹, Li Xiaona^{1*}, Wang Qiuhua¹, Xu Yuanjie¹, Pan Huiping¹, Wang Jin¹, Wang Rulong²

(1. Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Forestry and Grassland Bureau in Yimen County, Yunnan Province, Yimen 651100, China)

Abstract: Changes of ligneous-plants in *Pinus yunnanensis* forests of post-fire after one year in Dianzhong region were surveyed, and multiple comparisons were used to analyze changes in ligneous-plant diversity of shrub layers in Yunnan pines forests with different fire intensities. The results showed that: (1) Responses of plants growth in shrub layers were depended on fire intensities and species characteristics, the amounts of ligneous-plant species in shrub layers after one year of post-fire were linearly reduced with increasing of fire intensity, heavy fires could stimulate the growth of several shrubs, only low fires stimulated the growth for most shrubs. (2) Impacts of fire intensities on tree seedling varied with species, *Keteleeria evelyniana* was dramatically decreased as fire intensities increased whereas *Pinus yunnanensis* was non-linearly increased, and the medium and heavy fire significantly stimulated germination of *Pinus yunnanensis*. (3) Effects of fire intensities on plant diversity index were non-linear, Margalef index of plants in shrub layers were negatively correlated with fire intensities (Composite Burn Index, CBI), whereas Shannon-Wiener index and Simpson index had positively correlations with CBI.

Key words: Fire disturbance; Species composition; Plant diversity; Understory of *Pinus yunnanensis* forest; Dianzhong region

收稿日期:2022-09-11;修回日期:2022-10-10

基金项目:国家自然科学基金青年项目“计划烧除对云南松林地表植物群落动态和生物量的影响”(31901322);云南省农业联合青年项目“火干扰对滇中森林植物多样性的影响”(2017FG001-075)

作者简介:姜立镇(1995-),男,山东临沂人,硕士研究生。主要从事干扰对森林结构和功能的影响相关研究。E-mail:1243315965@qq.com

*** 通信作者:**李晓娜(1985-),女,河南清丰人,讲师,博士。主要从事干扰对森林结构和功能的影响。E-mail:xiaonali_20060429@163.com

火干扰是影响森林植物多样性的关键驱动因素^[1-3],火干扰通过不同程度的火烧在景观中创造一系列的火烧斑块,由于火烧烈度和距上次火烧时间的不同,从而使得不同年龄组成和树种组成的植物群落斑块镶嵌在一起以达到维持生物多样性的目的。火后的物种类型和火烧烈度存在着极大的相关性^[4-6]。高强度林火干扰能够产生林窗,降低林冠层多度,提高光照与营养物质水平,促进演替初期林下植被生长和幼苗的建立^[4]。火烧烈度较低时,火后林下物种迅速以地下器官进行无性繁殖,使得火后植被倾向于向着类似火前的群落类型的方向演替^[5-6]。

云南松(*Pinus yunnanensis*)林是我国西南地区特有林型,以滇中地区为中心,分布于云南省大部分地区,是云南省分布面积最广的森林类型^[7]。受树种特性和气候等因素影响,云南松林分布区历来是我国林火频发和森林火险等级较高的区域^[8-9]。研究表明,云南松林作为火依赖性森林生态系统,林火是云南松林群落维持稳定的重要因素^[10-11],火烧可以促进云南松种子萌发,影响云南松幼苗更新,从而维持云南松林群落的稳定性^[12-13]。火干扰影响云南松林乔木层植物生长的同时^[14],改变了林下灌木层植物多样性^[15-17]。杨道贵等^[15]通过调查计划烧除对云南松林林下植被的影响表明,高强度和低强度烧除样地灌木层植物的种群密度、盖度和高度均有下降;欧光龙等^[16]分析了昆明西山火后云南松林自然更新群落的物种组成及其演替特征,表明火后初始灌木和乔木树种较少,且多为阳性植物;戚书玮等^[17]研究表明反复计划烧除显著降低了云南松林灌木层植物丰富度。然而,不同火烧烈度对云南松林灌木层植物多样性的影响如何尚不明确。本文通过调查云南松林火烧迹地,分析了火烧烈度对云南松林灌木层木本植物群落组成和物种多样性的影响,量化了不同火烧烈度对云南松林灌木和乔木幼苗的影响,可以为制定不同火烧烈度火烧迹地植被恢复政策提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于滇中高原腹地云南省玉溪市易门县,属于亚热带季风气候,干湿季分明,年平均温度为16.3℃,年平均降雨量为856.9 mm。区域内海

拔1 500—2 300 m的山地云南松林分布普遍,林内乔木树种主要有云南松和滇油杉(*Keteleeria evelyniana*),林下灌木树种主要有老鸦泡(*Vaccinium fragile*),珍珠花(*Vaccinium bracteatum*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、易门小檗(*Berberis pruinosa*)、华西小石积(*Osteomeles schwerinae*)、碎米花杜鹃(*Rhododendron spiciferum*)等,草本植物主要有白健秆(*Eulalia pallens*)、四脉金茅(*Eulalia quadrinervis*)和刺芒野古草(*Arundinella setosa*)等^[18]。火烧迹地形成于2017年5月,火前植被为云南松林,林龄为30 a。

1.2 样地调查与数据测定

2018年8月对火烧迹地进行调查。采用综合火烧指数(Composite Burn Index, CBI)^[19]量化火烧烈度,综合研究区森林垂直结构特征和CBI评价火烧烈度指标,将调查样地森林分为乔木层、灌木层、草本层、地表可燃物及土壤共4层,分层记录林木死亡率、树冠变化、树干破毁程度和熏黑高度、叶片变化、植物存活率、定植状况、物种组成变化等8个指标,每个指标的取值范围为0—3,其中0代表没有火烧,3代表火烧强度最大,综合计算各层观测值,确定样地CBI值,公式如下:

$$X_i = \sum_{j=1}^n X_{ij}/n \quad (1)$$

$$CBI = \sum_{i=1}^k X_i/k \quad (2)$$

式中, X_i 为第*i*层的CBI值, X_{ij} 为第*i*层第*j*个调查因子的CBI得分值, n 为第*i*层中调查因子的总数, k 为样地分层数。

根据CBI值,火烧烈度分为轻度($0 < CBI \leq 1$)、中度($1 < CBI \leq 2$)和重度($2 < CBI \leq 3$)3种(见表1)。本研究区火烧迹地包括轻度、中度和重度3种,选择周围未过火区作为对照样地,根据火烧迹地面积,设置12块样地,未过火和轻度、中度、重度火烧各3个样地。所有样地均为云南松中龄林。每块样地设置为3个20 m×20 m样方,合计36个样方,每个样地记录地形、郁闭度等立地信息以及乔木种类、胸径、树高及是否存活;每个样方内沿对角线设置3个5 m×5 m的样方进行调查灌木层调查,记录灌木层植物(包括乔木幼苗)种类,测量每株的高度和冠幅将样地中所有木本植物带回实验室,请相关专家鉴定至种。每个20 m×20 m样地内沿对角线均匀布设5个土壤采样点,去除枯枝落叶层后,采集0—

10 cm 土层土壤样品,混匀后带回实验室风干,测定土壤有机碳(SOC)、总碳(TOC)、水解性氮(A-N)和总氮(TN)含量^[20],并计算碳氮比(C/N)。样地基本信息见表 1。

表 1 调查样地的基本信息

火烧烈度	综合火烧指数	海拔/m	郁闭度	平均胸径/cm	平均树高 /m	乔木死亡率/%
未过火	0	1850±16	0.55±0.10	6.21±3.18	8.5±1.0	1.65±0.25
轻度	0.49±0.08	1840±10	0.50±0.13	6.69±3.40	9.0±1.5	2.20±0.81
中度	1.84±0.13	1830±15	0.50±0.08	6.40±2.77	8.5±1.5	18.39±3.9
重度	2.81±0.81	1820±15	0.45±0.10	5.71±2.68	8.0±1.0	96.67±5.77

1.3 数据处理与分析

火烧迹地灌木层植物大多为灌木植物,有少量乔木幼苗。根据调查灌木层木本植物的高度、冠幅和频度等信息,计算灌木的重要值 IV、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)、Pielou 均匀度指数(E)和 Margalef 丰富度指数(R),多样性指标计算方法参考马克平等^[21]:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i$$
$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$
$$P_i = n_i / N$$
$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (n_i / N)^2 = 1 - \sum P_i^2$$
$$E = H / \ln S$$
$$R = (S - 1) / \ln N$$

式中, S 为样地内物种总数, N 为样地内所有物种的个体数, P_i 为第 i 种的个体数(n_i) 占有所有物种个体数(N) 的比例, $\ln S$ 为最大均匀性条件下的物种多样性值。

采用多重比较 LSD 检验分析不同火烧烈度下植物重要值、多度、高度和物种多样性指数显著性差异,采用 RDA 分析物种多样性指数与 CBI、土壤 pH 值、碳氮化学计量特征的相关关系,所有统计分析均采用 R 软件完成。

2 结果与分析

2.1 火烧烈度对林下灌木层植物组成的影响

2.1.1 火烧烈度对林下灌木树种组成的影响 如表 2 所示,样地内发现 12 种灌木,未过火样地有 11 种。各火烧烈度情景下灌木层植物种类均有减少。与对照相比,轻度火烧样地有 10 种灌木,未见云南含笑;中度火烧烈度样地未见易门小檗、沙针和云南含笑,增加了黄泡(*Rubus pectinellus*),共有 9 种灌

木;重度火烧烈度样地仅见车桑子、碎米花杜鹃、珍珠花、地果、白背枫和羊耳菊 6 种灌木。

火烧改变了样地内各树种的重要值(见表 2)。未过火样地中,各树种按相对重要值依次是车桑子(29.09)>碎米花杜鹃(14.02)>易门小檗(10.75)>铁仔(6.51)>华西小石积(3.71)>白背枫(3.23)>羊耳菊(2.83)>沙针(2.55)>珍珠花(1.73)>云南含笑(1.42)>地果(0.49)。与未火烧样地相比,轻度火烧样地车桑子、铁仔、珍珠花和白背枫的重要值显著增加,易门小檗显著降低,其他灌木均无显著变化;中度火烧样地中,珍珠花、碎米花杜鹃和白背枫显著增加,铁仔和华西小石积显著降低,其他灌木无显著变化;重度火烧样地中,珍珠花和白背枫显著增加,碎米花杜鹃明显降低,其余灌木无显著变化。

灌木的重要值对火烧烈度的响应因树种而异。随火烧烈度增加,白背枫和羊耳菊呈不同程度的增加趋势,华西小石积呈降低趋势,地果无显著变化,多数树种的重要值先增加后降低呈非线性变化。

2.1.2 火烧烈度对林下灌木多度和高度的影响

火烧烈度对林下灌木多度的影响因树种而异(见表 3)。与未火烧样地相比,轻度火烧后,珍珠花、白背枫和沙针 3 种灌木显著增加($P<0.05$),碎米花杜鹃显著降低($P<0.05$),其他灌木均无明显变化($P>0.05$);中度火烧后,珍珠花、白背枫和羊耳菊显著增加,易门小檗和沙针未见,其他灌木无明显变化($P>0.05$);重度火烧后,易门小檗、铁仔、华西小石积和沙针未见,碎米花杜鹃显著降低($P<0.05$),白背枫明显增加($P<0.05$),车桑子、珍珠花、地果和羊耳菊无显著变化。云南含笑仅在未火烧样地中发现,黄泡仅在中度火烧样地中发现,而车桑子、碎米花杜鹃、珍珠花、地果、白背枫和羊耳菊 6 种灌木在各种火烧情形后均有发现。

表 2 不同火烧烈度灌木层的灌木植物重要值的变化

物种	未过火	轻度火烧	中度火烧	重度火烧
车桑子(<i>Dodonaea viscosa</i>)	29.09±3.84 b	44.76±10.11 a	35.88±5.08 ab	26.21±7.07 b
易门小檗(<i>Berberis pruinosa</i>)	10.75±3.77 a	2.42±0.05 b	—	—
碎米花杜鹃(<i>Rhododendron spiciferum</i>)	14.02±2.67 b	15.25±3.24 b	20.00±4.60 a	5.22±1.00 c
铁仔(<i>Myrsine Africana</i>)	6.51±1.64 b	19.67±3.11 a	0.32±0.05 c	—
珍珠花(<i>Lyonia ovalifolia</i>)	1.73±0.22 c	12.07±3.70 a	6.35±1.20 b	6.00±2.05 b
华西小石积(<i>Osteomeles schwerinae</i>)	3.71±0.54 a	2.47±0.59 ab	1.45±0.35 b	—
地果(<i>Ficus tikoua</i>)	0.49±0.10 a	0.55±0.10 a	0.45±0.15 a	0.59±0.15 a
白背枫(<i>Buddleja asiatica</i>)	3.23±0.20 c	4.39±0.30 b	9.24±2.38 a	10.69±2.62 a
黄泡(<i>Rubus pectinellus</i>)	—	—	2.06±2.47	—
羊耳菊(<i>Inula cappa</i>)	2.83±0.90 b	3.83±0.72 b	5.45±0.56 a	3.61±0.81 b
沙针(<i>Osyris wightiana</i>)	2.55±0.40 a	2.98±0.62 a	—	—
云南含笑(<i>Michelia yunnanensis</i>)	1.42±0.30	—	—	—

注:表中数值为平均值±标准差,“—”为样地内未发现此物种,同行内不同字母表示数据之间有显著性差异($P<0.05$),未标字母表示该物种仅在此类火烧样地存在。

如表 3 所示,灌木高度对火烧烈度的响应有较大差异。与未过火样地相比,轻度火烧样地中碎米花杜鹃和珍珠花显著增加($P<0.05$),华西小石积显著降低($P<0.05$),其他灌木均无显著差异($P>0.05$);中度火烧样地珍珠花显著增加($P<0.05$),地果和白背枫显著降低($P<0.05$),其他灌木无显著差异($P>0.05$);重度火烧样地车桑子、地果和白背枫显著降低($P<0.05$),珍珠花显著增加($P<0.05$),其他灌木无显著变化($P>0.05$)。火烧 1 a 后,随火烧烈度增加,仅珍珠花的高度经轻度、中度和重度火烧后均显著增加($P<0.05$)。

表 3 不同火烧烈度下灌木多度和高度的变化

物种	多度(株数/m ²)				高度/m			
	未过火	轻度火烧	中度火烧	重度火烧	未过火	轻度火烧	中度火烧	重度火烧
车桑子	0.227±0.091 a	0.262±0.089 a	0.200±0.017 a	0.289±0.075 a	1.04±0.46 a	0.95±0.27 a	0.99±0.25 a	0.60±0.12 b
易门小檗	0.089±0.023 a	0.078±0.021 a	—	—	0.53±0.16 a	0.56±0.04 a	—	—
碎米花杜鹃	0.129±0.021 a	0.053±0.048 b	0.167±0.022 a	0.009±0.007 c	0.32±0.04 b	0.45±0.05 a	0.33±0.06 b	0.28±0.03 b
铁仔	0.013±0.003 b	0.164±0.015 a	0.009±0.006 b	—	0.86±0.07 a	0.55±0.19 a	0.81±0.13 a	—
珍珠花	0.009±0.008 c	0.092±0.053 a	0.027±0.009 b	0.007±0.001 c	0.28±0.04 c	0.64±0.15 b	1.40±0.50 a	0.75±0.10 b
华西小石积	0.013±0.003 a	0.023±0.013 a	0.019±0.012 a	—	1.14±0.12 a	0.75±0.09 b	1.13±0.10 a	—
地果	0.008±0.004 a	0.007±0.003 a	0.010±0.002 a	0.009±0.007 a	0.30±0.01 a	0.35±0.02 a	0.20±0.01 b	0.03±0.005 c
白背枫	0.008±0.004 c	0.047±0.002 b	0.094±0.067 a	0.057±0.005 a	1.95±0.12 a	2.10±0.20 a	1.13±0.28 b	0.77±0.21 b
黄泡	—	—	0.066±0.047	—	—	—	0.37±0.08	—
羊耳菊	0.009±0.004 b	0.010±0.003 b	0.325±0.026 a	0.013±0.007 b	0.75±0.14 a	0.70±0.18 a	0.85±0.10 a	0.67±0.15 a
沙针	0.013±0.007 b	0.087±0.009 a	—	—	1.10±0.10 a	0.98±0.07 a	—	—
云南含笑	0.013±0.005	—	—	—	0.75±0.10	—	—	—

注:表中数值为平均值±标准差;“—”为样地内未发现此物种;同一指标下同行不同字母表示数据之间有显著性差异($P<0.05$),未标字母表示该物种仅在此类火烧样地存在。

2.2 火烧烈度对乔木幼苗的影响

调查样地共出现云南松和滇油杉 2 种乔木幼苗,其对火烧烈度的响应有较大差异(见表 4)。云南松幼苗对火烧烈度的响应呈非线性变化,其重要值依次为中度火烧>重度火烧>轻度火烧>未火烧;火烧增加了云南松幼苗密度,中度和重度火烧显著高于未火烧($P<0.05$),仅轻度火烧无显著变化($P>0.05$);火烧降低了云南松幼苗的高度,轻度、中度和重度火烧显著低于未火烧($P<0.05$)。随火烧烈度增加,滇油杉重要值显著降低($P<$

0.05), 重度火烧后未见。各情景相比, 未火烧样地滇油杉幼苗的重要值、密度和高度均最大, 轻度火烧后滇油杉密度无显著变化, 高度显著降低 ($P < 0.05$), 中度火烧后密度和高度显著降低 ($P < 0.05$)。

表 4 不同火烧烈度后乔木幼苗的变化

树种	群落特征	未过火	轻度火烧	中度火烧	重度火烧
云南松	重要值	10.62±2.60 c	10.86±1.50 c	29.63±3.10 a	22.91±4.50 b
	密度/(株/m ²)	0.11±0.03 c	0.15±0.04 c	0.79±0.02 a	0.31±0.06 b
	高度/m	0.25±0.04 a	0.09±0.02 b	0.11±0.03 b	0.13±0.04 b
滇油杉	重要值	8.40±2.60 a	2.94±0.72 b	0.50±0.100 c	0.00
	密度(株/m ²)	0.03±0.010 a	0.03±0.010 a	0.01±0.005 b	0.00
	高度/m	1.20±0.10 a	0.51±0.05 b	0.50±0.02 b	0.00

注:表中数值为平均值±标准差;同一行数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.3 火烧烈度对灌木层植物多样性指数的影响

物种多样性指数对火烧烈度的响应较复杂。随火烧烈度增加, Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数呈降低趋势, Margalef 丰富度指数呈非线性变化, 但 4 种指数均是仅重度火烧样地显著低于未火烧 ($P < 0.05$) (见图 1)。

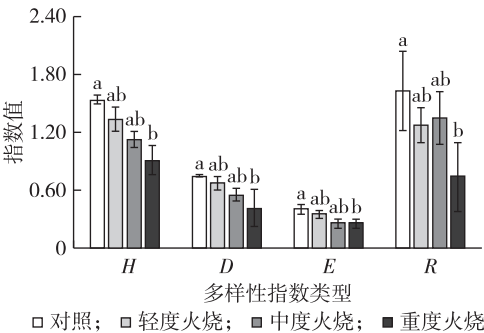


图 1 不同火烧烈度下植物多样性指数的变化

火烧烈度直接影响物种多样性指数的同时, 也通过改变土壤碳氮化学计量特征间接影响植物多样性。物种多样性指数与土壤因子、综合火烧指数 RDA 排序图 (见图 2) 表明, 前 2 轴的贡献率分别为 94.26% 和 4.33%, 变异解释度分别达到 35.59% 和 2.16%。因 RDA 分析基于多元线性分析, 本研究 Margalef 丰富度指数随火烧烈度增加呈非线性变化, 可能导致其模型整体不显著 ($P = 0.231$), 虽然第一轴的显著性也仅为 0.243, 但可以在一定程度上解释物种多样性与土壤因子和 CBI 的关系。

RDA 结果表明, 火烧迹地灌木层植物物种多样性指数受 CBI、土壤 pH 值、总碳 (TC) 和碳氮比 (C/N) 的影响较大, 受土壤有机碳 (SOC)、总氮 (TN) 和

水解性氮 (A-N) 影响较小, 各指数与各因子的相关性有较大差异 (见图 2)。Margelf 指数与土壤 pH 值、TC、C/N、SOC 和 TN 呈正相关, 与 A-N 和 CBI 呈负相关; Pielou 指数与 A-N 和 CBI 呈正相关关系, 与 pH 和 TC 呈负相关; Shanon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数均与 CBI 呈正相关, 与 SOC 和 C/N、TC 和 TN 呈负相关。

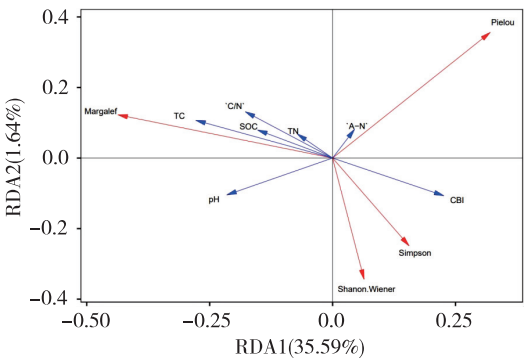


图 2 物种多样性指数与影响因子 RDA 排序图

3 讨论与结论

林火改变了研究区云南松林灌木层植物的物种组成。轻度火烧后仅云南含笑未见, 随着火烧烈度的增加, 仅车桑子、碎米花杜鹃、珍珠花、地果、白背枫和羊耳菊 6 种灌木在各样地均有发现, 云南含笑、易门小檗、铁仔、华西小石积、沙针等灌木层植物趋于消失, 重度火烧样地内灌木种类最少, 灌木层植物种类呈线性减少趋势, 这与大多数针叶林火后林下灌木层植物变化相似^[6, 15-17, 22]。重度火烧后仅白背枫的重要值和密度显著增加, 再次证明了重度火烧后植被演替从喜光、耐旱的草本或灌木等先

锋物种开始^[15, 23]。中度和重度火烧样地大多灌木的多度和高度降低,这与杨道贵等^[15]高强度烧除下云南松林灌木层植物种类和密度均显著减少的结果相似。研究区轻度、中度和重度火烧下,云南松林灌木层植物组成均有改变,轻度火烧和中度火烧对灌木组成的影响不明显,仅重度火烧显著减少了研究区灌木种类。本结果与孙家宝等^[22]认为重度火烧对兴安落叶松林物种组成影响较大的结论相似,但与杨一等研究得出的中度火烧对次生灌丛灌木组成影响显著的结论^[23]有所不同。各火烧烈度样地,研究区云南松林其灌木层植物组成均有变化,但灌木层优势树种均是车桑子,这可能与车桑子喜光、耐干旱、耐瘠薄、根系发达、萌生能力强等有关^[24]。

乔木幼苗对火烧烈度的响应因树种而异。火后1 a,滇油杉幼苗出现在未火烧、轻度和中度火烧样地,而重度火烧后未见,其重要值、多度和高度随火烧烈度增加均呈线性降低趋势。这说明滇油杉对火干扰具有一定的适应能力^[25],在轻度和中度火烧后有一定的存活能力,重度火烧后无法生存。火烧样地均有发现云南松幼苗,火烧促进了云南松幼苗数量的增加,各情景相比,云南松幼苗的重要值和密度均是中度火烧样地最大,其次是中度火烧样地,高度在未火烧样地最高^[12-13, 26],这说明火前云南松林若有产生种子的能力,其经过火烧后在很大程度上能够完成自然更新。

本区云南松林下木植物物种多样性指数对火烧烈度的响应较复杂。随火烧烈度增加,Shanon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度均呈线性减小趋势,仅 Margalef 丰富度指数均呈非线性变化,这与兴安落叶松林物种多样性指数对火烧的响应相一致^[23],孙家宝等^[22]表明兴安落叶松林物种多样性指数和均匀度呈现线性下降趋势,优势度呈现乘幂性上升趋势。研究区物种多样性指数与综合火烧指数(CBI)、土壤 pH 值、土壤总碳(TC)和碳氮比(C/N)有较大的相关性,这与陈小雪等^[27]研究表明土壤 pH 和 C/N 是影响火后物种多样性主要因子的结果相似。

本文分析了火烧1 a后不同火烧烈度下云南松林下灌木和乔木幼苗的变化,表明云南松中龄林在各火烧烈度下均有较好的更新能力,若火前云南松已达到结实期,火后采取封山育林的方式能够较好地恢复。

参考文献:

- [1] BOND-LAMBERTY B, PECKHAM S D, AHL D E, et al. Fire as the dominant driver of central Canadian boreal forest carbon balance[J]. *Nature*, 2007, 450(7166): 89-92.
- [2] KEELY J E, PAUSAS J G, RUNDEL P W, et al. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits [J]. *Trends in Plant Science*, 2011, 16(8): 406-411.
- [3] PAUSAS J G, SCHWILK D. Fire and plant evolution[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(2): 301-303.
- [4] WANG G G, KEMBALL K J. Effects of fire severity on early development of understory vegetation[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(2): 254-262.
- [5] FRANCOS M, ÚBEDA X, TORT J, et al. The role of forest fire severity on vegetation recovery after 18 years. Implications for forest management of *Quercus suber* L. in Iberian Peninsula[J]. *Global & Planetary Change*, 2016, 145: 11-16.
- [6] STEVENS J T, MILLER J E D, FORNWALT P J. Fire severity and changing composition of forest understory plant communities [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2019, 30(6): 1099-1109.
- [7] 邓喜庆, 皇宝林, 温庆忠, 等. 云南松林在云南的分布研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(6): 843-848.
- [8] WANG M, TIAN X, ZHAO F, et al. Distribution characteristics and the influence factors of forest fires in China[J]. *Forest Ecology & Management*, 2013, 310(1): 460-467.
- [9] 田晓瑞, 舒立福, 赵凤君, 等. 气候变化对中国森林火险的影响[J]. *林业科学*, 2017, 53(7): 159-169.
- [10] SU W H, SHI Z, ZHOU R, et al. The role of fire in the Central Yunnan Plateau ecosystem, southwestern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 356: 22-30.
- [11] 王金锡, 马志贵. 云南松森林计划烧除试验研究(之一)[J]. *森林防火*, 1993(1): 9-13.
- [12] 苏文华, 崔凤涛, 赵元蛟. 云南松球果延迟开放及其植冠种子库[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 541-548.
- [13] 常云霞, 苏文华, 杨 锐, 等. 短时高温处理对云南松种子萌发的影响[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2014(2): 19-24.
- [14] 杨道贵, 王金锡, 马志贵, 等. 计划火烧对云南松生长的影响[J]. *森林防火*, 1992(1): 9-11.
- [15] 杨道贵, 马志贵, 王金锡, 等. 云南松森林计划烧除对林下植被的影响[J]. *四川林业科技*, 1997, 18(1): 18-28.
- [16] 欧光龙, 陈金龙, 陈 洁, 等. 昆明西山林场火烧迹地自然更新植物群落物种组成及多样性[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(5): 336-340.
- [17] 戚玮玮, 陈奇伯, 杨 波, 等. 计划烧除对云南松林群落结构和物种多样性的影响研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4): 81-89.
- [18] 金振洲. 滇川干热河谷种子植物区系成分研究[J]. *广西植物*, 1999, 19(1): 1-14.

(下转第47页)

键时期。在精准监测的基础上,及时采用针对性的防治措施科学防控,早发现早处置,可以防止疫情进一步扩散,力保重点区域无疫情,为当地的花木产业发展赢得时间和空间。否则将有可能丧失初始期的防控窗口期。此前江苏、安徽等省自首次发布美国白蛾疫情之后的2—3 a内,县级疫区数量和发生面积急剧增加,很多县区是直接调查到了明显的幼虫网幕或实际危害,说明在发现的当时,美国白蛾虫口基数已经处于相对高位,跨过了没有被发现的初始期进入快速扩散期^[1],从美国白蛾在我国以及本省最早入侵地区的发生历程及防治经验来看,美国白蛾一旦成功建立种群并引起危害就很难根除,故防控难度大,易扩散成灾。

3.2 美国白蛾在苏南地区的发生期

美国白蛾在苏南地区1 a发生3代,越冬代历期约255.3 d,成虫高峰期在5月1日前后;第1代历期约66 d,成虫高峰期在7月6日前后;第2代历期约43.7 d,成虫高峰期在8月19日前后。这与山东地区1 a出现2—3代有显著区别,与苏北地区1 a出现3代的成虫高峰期也有一定差异。该情况主要是由于美国白蛾入侵苏南地区,受到温湿度、光照、寄主植物种类等因素的影响,其生活史、发育进度等也因此而有所变化^[9-11]。后续需持续开展美国白蛾在新入侵地的生活史和生物学特性的研究,进一步明确寄主植物、天敌资源和极端气候条件等因素对美国白蛾发育和发生规律的影响机理、机制,为精准防控提供可靠的理论支撑。研究区域目前虽然尚未调查到美国白蛾的完整发育世代数据,但

不排除自然存在其他虫态的可能性。通过严密监测成虫、准确掌握成虫发生数量和趋势动态,可以科学预测幼虫等其他虫态的发生时间,适时开展虫情和危害程度调查,做好防控预案,抓住防控关键时机主动应对,有效控制或延缓美国白蛾在苏南地区的发生和扩散蔓延速度。

参考文献:

- [1] 宋玉双.美国白蛾的综合管理[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,2015:1-2,9-10.
- [2] 国家林业和草原局.国家林业和草原局公告(2022年第5号)(2022年美国白蛾疫区).
- [3] 徐明,张利华,徐福元,等.美国白蛾在江苏北部的发生规律及防治适期初步研究[J].江苏林业科技,2013,40(3):15-17.
- [4] 闫家河,刘芹,王文亮,等.美国白蛾发生与防治研究综述[J].山东林业科技,2015,45(2):93-106.
- [5] 杨忠岐,张永安.重大外来入侵害虫美国白蛾生物防治技术研究[J].昆虫知识,2007,4(4):465-471.
- [6] 国家林业局森林病虫害防治总站.美国白蛾防治技术规程(LY/T 2111-2013)[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [7] 李东军,张秋梅,王连东,等.美国白蛾预测预报技术研究[J].山东林业科技,2011(1):27-32.
- [8] 王迎春,李兰英,尧渝,等.茶园黑刺粉虱越冬代羽化始盛期预测模型[J].天津农业科学,2022,28(5):71-74.
- [9] 郑华英,徐丽丽,刘云鹏,等.长江以南美国白蛾发生现状分析——以芜湖为例[J].江苏林业科技,2018,45(2):17-20.
- [10] 孔雪华.极端温度对美国白蛾生长发育和存活的影响[D].泰安:山东农业大学,2010.
- [11] 陈景芸,蔡平,张国辉,等.美国白蛾发生规律与防治技术研究进展[J].江苏农业科学,2012,40(12):149-151.
- [12] 火烈度空间异质性的响应[J].生态学报,2016,36(14):4438-4446.
- [13] 罗蔚,李秀兰,靳灵江.车桑子在石漠化治理中的优势及推广[J].种子,2006,25(4):109-110.
- [14] 李世友,马长乐,袁俊杰,等.昆明地区18种乡土树种对火的生态适应对策[J].林业调查规划,2008,33(5):84-87.
- [15] 司宏敏,余娇娥,吴雪涛,等.两种过火类型对云南松林损伤及火后自然更新的研究[J].西部林业科学,2019,48(1):7-11,17.
- [16] 陈小雪,李红丽,董智,等.不同火烧强度迹地林下灌草层物种多样性及其与土壤因子的关系[J].西北植物学报,2020,40(1):130-140.
- [17] KEY C H, BENSON N C. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio[M]. Strata and Factors are defined in FIREMON Landscape Assessment, 2006, Chapter2, LA: 9-11.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2013:3-35.
- [19] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下)[J].生物多样性,1994,2(4):211-239.
- [20] 孙家宝,张海林,胡海清.火干扰强度对兴安落叶松林物种组成及多样性的影响[J].森林工程,2009,25(6):1-5.
- [21] 杨一,王懿祥,白尚斌,等.临安市次生灌丛植物多样性对林

(上接第25页)