

DOI: 10.5846/stxb201412262579

朱敏, 刘晓东, 李璇皓, 韩 骁, 任云卯, 王奇峰. 北京西山油松林可燃物调控的影响评价. 生态学报, 2015, 35(13): 4483-4491.

Zhu M, Liu X D, Li X H, Han X, Ren Y M, Wang Q F. Assessment of the impact of fuel management in *Pinus tabulaeformis* forests in the Beijing West Mountain Area. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4483-4491.

北京西山油松林可燃物调控的影响评价

朱 敏¹, 刘晓东^{1,*}, 李璇皓¹, 韩 骁¹, 任云卯², 王奇峰²

¹ 北京林业大学, 北京 100083

² 北京市西山试验林场, 北京 100093

摘要: 森林可燃物调控及其影响评价研究是可燃物管理的基础, 对减少火灾的发生具有重要的意义。在北京西山实验林场, 选取华北地区典型针叶林-油松林 (*Pinus tabulaeformis*), 设立 4 块 20m×20m 样地, 通过对林分可燃物分布特征的调查和分析, 制定以修枝、割灌为主的调控措施, 对比研究调控与未调控林分林下植被多样性和优势灌木的光合生理特性。研究结果表明: (1) 不同油松林可燃物垂直分布特征表现为 0—3m 层可燃物负荷量最大 (平均为 1053.94 g/m²), 且可燃物种类最多, 随着高度的增加可燃物的负荷量均呈现减少的趋势。(2) 调控林分林下优势灌木 (主要为孩儿拳和黑枣) 最大净光合速率、光饱和点、光补偿点、暗呼吸速率均比对照增加; 而表观量子效率则减小。(3) 不同的可燃物调控措施改变了林下植被多样性; 不同调控措施的草本层物种丰富度、物种多样性、物种优势度以及物种均匀度均高于对照林分。由此可见, 森林可燃物调控措施对林下植被多样性和优势物种的光合生理特性均有影响。研究结果可为森林可燃物管理提供科学依据。

关键词: 油松; 可燃物负荷量; 可燃物调控; 光合特性; 生物多样性

Assessment of the impact of fuel management in *Pinus tabulaeformis* forests in the Beijing West Mountain Area

ZHU Min¹, LIU Xiaodong^{1,*}, LI Xuanhao¹, HAN Xiao¹, REN Yunmao², WANG Qifeng²

¹ College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Beijing Xishan Experimental Forest Farm, Beijing 100093, China

Abstract: The study of forest fuel adjustment and control, and assessment of its impact, form the basis of fuel management, which is important for reduction of forest fires. *Pinus tabulaeformis* is a typical coniferous species in North China, and four 20m × 20m sample plots were established in a *P. tabulaeformis* forest. Using field investigations and measurements, the distribution of forest fuel in the stand was analyzed, suitable fuel management activities, including pruning and cutting of shrubs, were conducted, and the effect of fuel management on the understory biodiversity and the photosynthetic attributes of the dominant shrub species were studied, comparing treated and untreated stands. Four different fuel treatments were used: CK, control; P1, Cutting shrubs; P2, Pruning (below 3 m) and cutting shrubs; P3, Pruning (below 3.5 m) and cutting shrubs. The results showed that: (1) The distribution of the *P. tabulaeformis* fuel load was highest in the 0—3 m layer (an average of 1053.94 g/m²), and included the most types of fuel. Fuel load decreased as height increased. (2) After the fuel treatments, the maximum net photosynthetic rate, light saturation point, light compensation point, and dark respiration rate of plants in the understory (the main species were *Grewia biloba* var. *parviflora* and *Diospyros lotus*) increased, while the apparent quantum efficiency was reduced. (3) The different fuel treatments altered the diversity of the understory community. Compared with the control stand, the species richness, species diversity, species dominance, and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31270696)

收稿日期: 2013-12-12; 修订日期: 2015-04-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xd_liu@bjfu.edu.cn

species evenness of the grass layer in the different fuel treatments increased. Thus, the diversity of the understory and physiological characteristics of the dominant species were affected by the forest fuel control measures. These findings provide a theoretical basis for the development of forest fuel treatments in the study area.

Key Words: *Pinus tabulaeformis*; fuel load; fuel management; photosynthetic characteristics; Species diversity

森林火灾具有突发性强,难于扑救的特点。20 世纪末,全球约有 640 万 hm^2 的森林因森林火灾的发生而遭受巨大的影响^[1],其中我国森林火灾受害的比率远高于世界平均水平。据统计,1950—2012 年,我国平均每年森林火灾 12670 次,受害森林面积 60.4 万 hm^2 ^[2-3]。因此,森林火灾的预防和扑救一直都是我国林业工作中的重点和难点。

森林火灾的发生要具备三要素:森林可燃物、助燃物(氧气)和一定的温度^[4]。其中森林可燃物是物质基础,同时也是森林火灾发生的首要条件^[5]。与火源、火环境相比,森林可燃物更易于进行人为管理^[6]。因此,对森林可燃物进行有效的调控对减少火灾发生和潜在危害均具有重要的意义^[7-9]。早在 20 世纪 20 年代,就有学者提出通过调控森林可燃物负荷量,可以有效地控制和减少森林火灾的发生^[10]。近年来,随着我国人工林面积的迅速增加,森林抚育工作的滞后,使得很多地区的森林可燃物负荷量超过临界阈值。一旦遇到火源,极易发生重、特大森林火灾,将会给林区人民的生命财产带来巨大损失,给自然资源及生态环境造成巨大破坏^[11]。因此,通过对可燃物的调查,采取相应的调控措施,对减少火灾的发生具有重要的意义^[12]。

可燃物调控的方法主要有机械处理和计划烧除等方法^[13-14],此外,还可以通过营林抚育、防火带营造等方法改变可燃物空间结构,从而减少火灾的发生^[15-16]。可燃物调控会改变林分郁闭度,改变林内环境^[17],从而对林下植被及环境产生影响。有研究表明,长期间断性的计划烧除会减少植物细根的长度、对地下生物量和土壤的养分循环都有一定程度的负面影响^[18-19]。因此,在可燃物调控过程中,不仅要达到减少可燃物载量、降低潜在火强度的目的,更需要考虑对林地环境的生态影响。目前,关于可燃物调控及其影响的研究多集中林火干扰对植被更新^[20]及对野生动物的影响方面^[21],而对可燃物调控措施对林下植被的多样性及光合特性影响方面研究较少。北京西山地区森林资源丰富,是首都主要的生态屏障。由于该地区春季干旱多风、可燃物干燥,游客较多,发生人为火的频率较高^[22]。油松(*Pinus tabulaeformis*)作为华北地区典型的针叶树种,北京的乡土树种,在该地区分布广泛。已有研究表明,油松林的地表可燃物负荷量约是侧柏林的两倍^[23],而且油松枝叶的油脂含量较高,属于易燃林分,因此,对油松林开展森林可燃物调控及其影响评价研究对研究地区的森林可燃物管理具有重要意义。本研究拟选取北京西山林场典型油松林分,通过设立处理样地及对照林分,基于样地野外调查和有关光合生理特性测定,比较研究以修枝和割灌为主的调控措施,对油松林可燃物载量,地表植被生物多样性以及优势种的光合生理响应的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点选在北京西山试验林场。北京西山地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,地理坐标为 39°54'N,116°28'E,总面积 5931 hm^2 ,森林覆盖率 92.32%。山区最高海拔 800 m,年平均气温 9—11℃,无霜期为 150—200 d,年平均降水量 660 mm。土壤类型为山地褐土,土层浅薄(约 30—60 cm)^[24-25]。

北京西山地区植被种类丰富,植物种类约 250 种,分属 73 科。乔木、灌木、草本种类基本涵盖了华北地区的所有常见类型,具有较好的代表性^[26]。主要乔木树种包括:油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等。灌木植被类型主要包括:孩儿拳头(*Grewia biloba* var. *parviflora*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、黑枣(*Diospyros lotus*)等^[27]。草本植被类型主要包括:荩草(*Arthraxon hispidus*)、隐子草(*Cleistogenes*

squarrosa)、紫花地丁(*Viola philippica*)、细叶苔草(*Carex stenophylla*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)等。

1.2 林分调查及调控措施制定

2012 年 3—4 月,在北京西山林场,挑选具有代表性的人工油松林,基于立地条件(如坡度、坡向和海拔等),选择林相齐整、人为干扰小的地段设置 4 块 20m×20m 的标准地,记录样地的地理位置、坡度、坡向、海拔等立地条件。通过野外调查,测定并记录乔木层树种类型、株数、郁闭度、树高、胸径、冠幅、冠长、第 1 死枝高、第 1 活枝高等因素。可燃物调查主要包括灌木(幼树)层和地被枯枝落叶层^[28]。在样地对角线上设置 3 块 1m×1m 的小样方,用纸袋对样方内的地表可燃物按照 1h 时滞(直径<0.64 cm)、10 h 时滞(0.64 cm≤直径≤2.54 cm)、100 h 时滞(2.54 cm<直径≤7.62 cm)的标准分级采集^[29]。在野外取样测其湿重,带回实验室烘干,并测定含水率,用于计算可燃物的负荷量。

依据 4 块油松林林分特征和可燃物垂直分布特征,并且结合西山林场防火季营林抚育的相关措施,制定了以下可燃物调控方法^[30]。分别采取 CK(对照)、P1(割灌)、P2(修枝 3m 以下和割灌)、P3(修枝 4m 以下和割灌)4 种不同的处理措施(表 1),为比较林下灌木的光合特性以及林下生物多样性的差异提供重要的依据。

表 1 油松林可燃物调控方案
Table 1 Fuel management plan in *Pinustabulaeformis* forest

样地号 Plot No.	调控方案 Fuel control technology plan	林分特征 Stand characteristics	可燃物 分布特征 Fuel distribution characteristics	潜在林火类型 Potential forest fire type	主要调措施 The main control measures	辅助调控措施 Secondary control measures
I	CK	树高中等 密度中等	枯落物和灌木 负荷量高	地表火 可能性高	对照 (不调控)	对照 (不调控)
II	P1	树高和枝下高 都高	乔木活枝 负荷量较大	易由地表火衍生 树冠火	割灌	适当清理地表枯 落物
III	P2	树高低 密度适中	灌木乔木 活枝负荷量大	易发生 树冠火	修枝(3m 以下) 割灌	适当清理地表枯 落物
IV	P3	树高低,密度大	枯落物和 乔木活枝大	易发生 树冠火	修枝(4m 以下) 割灌	清理地表 枯落物

1.3 生物多样性指标计算

选取常用的 α-多样性特征方法对调控林分及对照林分的灌木层和草本层进行测定。主要指标包括:物种丰富度指标、多样性指标、优势度指标、均匀度指标等。在分析中,多样性指数用 Shannon-Wiener 多样性指数(H)计算,优势度用 Simpson 指数(D)计算,均匀度用 Pielou 均匀度指数(J)计算^[31],并将上述指标的计算结果在 SPSS 软件中采用单因素方差分析进行差异性检验($P<0.05$)。

群落中不同生长型对群落的结构、功能、生产力、动态和稳定性等方面的贡献是不同的,简单地将不同生长型的多样性指数累加缺乏说服力,因而本实验对不同生长型的多样性指数进行加权计算^[32]。

$$W_i = (C_i/C + H_i/H)/2 \tag{1}$$

式中, C 为群落的总盖度($C = \sum C_i$)($i=1$ 灌木层; $i=2$ 草本层), H 为群落各生长型的平均高度($H = \sum H_i$),($i=1$ 灌木层; $i=2$ 草本层), C_i 为第 i 个生长型的盖度; H_i 为第 i 个生长型的平均高度,利用群落中灌、草本层结合加权参数对群落总体多样性进行计算^[33]。

$$D = \sum W_i D_i \tag{2}$$

式中, W_i 为群落第 i 个生长型多样性指数的加权参数; D_i 为第 i 个生长型多样性($i=1$ 灌木层; $i=2$ 草本层)

1.4 光合特性的测定和计算

在可燃物调控实施后,本研究选择长势差异不大的孩儿拳头(*Grewiabiloba* var. *parviflora*)和黑枣(*Piospyros lotus*)两种植被作为优势灌木来做相应的光合测定研究。于当年植物生长旺季(8 月中旬),对林分林下植物进行光合生理特性的测定。2012 年 8 月 18—22 日每天 9:00—11:00 进行光响应曲线的测定,测定

时选择晴天,因为此时孩儿拳头和黑枣处于生长旺盛时期,每一种灌木选取 3—4 个叶片,并且进行 3 次重复测定。为减少实验误差,两灌木采用平行测定。

光响应曲线测定:仪器采用 Li-6400 型便携式光合作用测定系统,开放式气路,设定温度为 25℃,CO₂浓度控制为 400μmol/mol,光响应曲线设定光合有效辐射(PAR)梯度为 1600、1400、1200、1000、800、600、300、150、100、50、20、0μmol m⁻² s⁻¹,共 12 个梯度值,进行林下优势灌木光响应曲线的测定^[34]。利用 LED 红蓝光源测定梯度光照强度下,不同遮荫处理和全光照的净光合速率,绘制 P_n-PAR(光合-光响应)曲线。根据光合-光响应曲线拟合的对数方程求得光补偿点(LCP),光饱和点(LSP)、暗呼吸速率(DR)及最大净光合速率(P_{max})。比较不同光环境下光补偿点、光饱和点、暗呼吸速率及最大净光合速率的差异。将光合光响应曲线在低光量子通量密度下的净光合速率做直线回归,求得各遮荫程度的表观量子效率(AQY)^[35]。

1.5 数据分析

- (1)可燃物负荷量及垂直分布特征 Excel 统计计算,并绘制可燃物垂直分布图。
- (2)生物多样性指标 Excel 进行基础数据的整理,再采用 SPSS 数理统计软件进行各项指标的计算,并采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行差异性检验。
- (3)光合特性指标 Excel 进行基础数据的整理,并用 SPSS 软件进行相关指标的计算。

2 结果与分析

2.1 样地调查结果和可燃物垂直分布特征

对选定的 4 个油松林样地的林分特征进行调查,并对调查结果进行计算分析(表 2)。

表 2 样地的地型、林分因子基本情况

Table 2 Basic information of topography and stand factors in plots										
林型 Forest types	样地号 Plot No.	林龄/a Stand age	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope percent	郁闭度 Canopy coverage	密度/ (株/hm ²) Density	胸径/cm DBH	树高/m Mean total height	死枝高/m Dead branches height	活枝高/m Live branches height
油松 <i>Pinustabulaeformis</i>	I	25	307	25	0.74	1050	15.7	8.5	3.1	3.5
	II	25	322	28	0.80	1125	13.6	8.1	2.5	3.2
	III	25	309	20	0.80	1075	12.3	7.5	2.7	2.9
	IV	25	302	26	0.82	925	14.2	8.2	2.3	3.3

计算油松林样地 I、II 各层可燃物负荷量,得到可燃物负荷量垂直分布特征(图 1)。

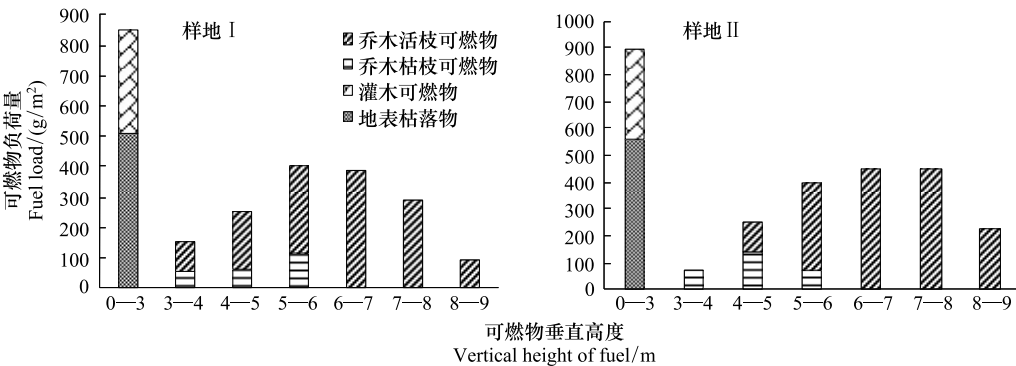


图 1 油松样地 I、II 可燃物垂直分布特征

Fig.1 Vertical distribution characteristics of flammable fuel in *Pinus tabulaeformis* plot I and plot II

油松样地 I 垂直高度 0—3m 层的可燃物(地表可燃物和灌木可燃物)负荷量最大(851.70g/m²),占总体可燃物负荷量的 37.43%。3—4m 层(乔木枯枝和乔木活枝)与 8—9m 层(乔木活枝)的可燃物负荷量最小,分

别为 58.43、96.04 g/m²。3—4、4—5m 和 5—6m 层可燃物主要由乔木活枝和乔木枯枝组成,而高度 6m 以上均为乔木活枝可燃物。样地Ⅱ与样地Ⅰ表现出相同的格局。0—3m 层的可燃物负荷量最大,3—4m 和 9—10m 层的负荷量最小,而 3—4m 层可燃物则为乔木枯枝(图 1)。

计算油松林样地Ⅲ、Ⅳ各层可燃物负荷量,得到可燃物负荷量垂直分布特征(图 2)。

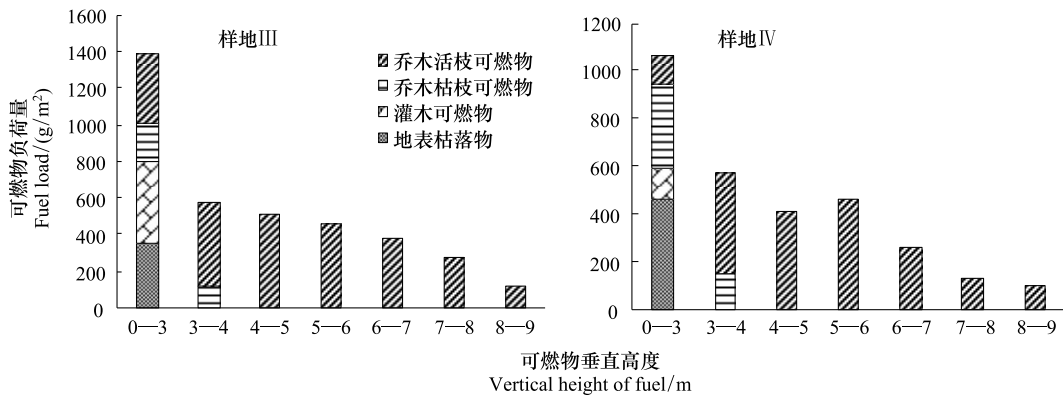


图 2 油松样地Ⅲ、Ⅳ可燃物垂直分布特征
Fig.2 Vertical distribution characteristics of flammable fuel in *Pinus tabulaeformis* plot III and plot IV

在油松样地Ⅲ中,随着高度的增加,可燃物负荷量表现出减少的趋势。垂直高度 0—3m 层的可燃物(地标枯落物、灌木可燃物、少量乔木枯枝可燃物以及乔木活枝可燃物)负荷量最大(1381.77 g/m²),占总体可燃物的 42.25%。3—4m 层(乔木枯枝和乔木活枝),4—5m,5—6m,6—7m 层(乔木活枝)可燃物负荷量逐渐减少,分别为 545.28、511.18、454.47、382.34 g/m²。样地Ⅳ与样地Ⅲ呈现相同的格局。0—3m 层可燃物负荷量最大,3m 以上逐层递减(图 2)。

依据上述油松林可燃物负荷量垂直分布的相关图形和参数,由此可知:①油松样地在 0—3m 层可燃物负荷量分布最大,其中地表枯枝落叶层占较大的比例,这表明此类型林分内发生地表火的可能性较大;分布在 4—7m 层的可燃物主要包括乔木枯枝、乔木活枝,所以在此区域内地表火容易衍生为树冠火,导致乔木层遭到较大的损毁。②乔木枯枝可燃物主要集中于 3—6m 层,并且负荷量不高。③大部分油松样地,3—9m 之间的可燃物分布呈单峰值的表现形式,在乔木层中间高度的位置达到最大值。因此,在乔木的中下层采取相应的调控措施,能够有效的隔断地表火向树冠火蔓延。

2.2 油松林可燃物调控效果评价研究

2.2.1 林下植被生物多样性研究

(1) 油松林下灌木层和草本层多样性特征

通过调查分析和计算,得到不同调控程度油松林林下灌木层和草本层生物多样性(表 3)。

表 3 不同调控方案下灌木层和草本层生物多样性测定结果
Table 3 Biodiversity of shrub layer and grass layer under the different control

林型 Forest types	指标 Index	CK		P1		P2		P3	
		A	B	A	B	A	B	A	B
油松林	S	14	7	12	10	13	16	16	13
<i>Pinus tabulaeformis</i>	D	0.684 (±0.033)	0.086 (±0.054)	0.74 (±0.024)	0.518 * (±0.039)	0.756 * (±0.002)	0.73 * (±0.031)	0.802 * (±0.025)	0.626 * (±0.061)
	H	1.362 (±0.085)	0.192 (±0.117)	1.482 (±0.08)	0.998 * (±0.072)	1.56 (±0.025)	1.482 * (±0.126)	1.856 * (±0.127)	1.264 * (±0.124)
	J	0.262 (±0.01)	0.052 (±0.024)	0.276 (±0.012)	0.224 * (±0.004)	0.262 (±0.009)	0.266 * (±0.023)	0.22 * (±0.009)	0.246 * (±0.025)

* 代表与参照林相比存在显著性差异($P<0.05$); A:灌木层 Shrub layer; B:草本层 Herb layer; S:丰富度指数; D: Simpson 指数; H:物种多样性指数; J:均匀度指数

调控林分 P1、P2、P3 的灌木层物种多样性和物种优势度均高于对照林分,并且呈现出增加的趋势。其中 P2、P3 灌木层物种优势度与对照林分均差异显著 ($P<0.05$),P3 林分的物种多样性最高,与对照相比差异显著 ($P<0.05$)。而 4 种不同调控程度下林分的物种丰富度差异不大,只有 1—2 个物种类型的增加或减少。P1、P2 与对照林分均匀度指数相似,而 P3 与对照林分差异显著 ($P<0.05$,表 3)。

调控林分 P1、P2、P3 的草本层物种丰富度、物种多样性、物种优势度以及物种均匀度均高于对照林分。除物种丰富度外,与对照林分相比,均差异显著 ($P<0.05$)。油松林下可燃物调控后林下物种丰富度表现出显著的变化,调控程度的差异导致物种丰富度增加的幅度不同。其中调控方案 P1、P2 呈现上升趋势,P3 则表现为相反的趋势。

(2)油松林下群落总体的多样性特征

通过对加权参数的计算,得出 4 种不同调控下林型下灌木层与草本层的加权参数(表 4)。

表 4 不同调控下林型下灌木层与草本层的加权参数
Table 4 The weight parameters of different control in Shrub layer and Herb layer

加权参数 Weighting parameter	CK	P1	P2	P3
W_1	0.564366	0.629214	0.523019	0.62593
W_2	0.435634	0.370786	0.476981	0.37407

W_1 :灌木层加权参数; W_2 :草本层加权参数

由此计算出林下群落总体多样性指数测定结果(图 3)。

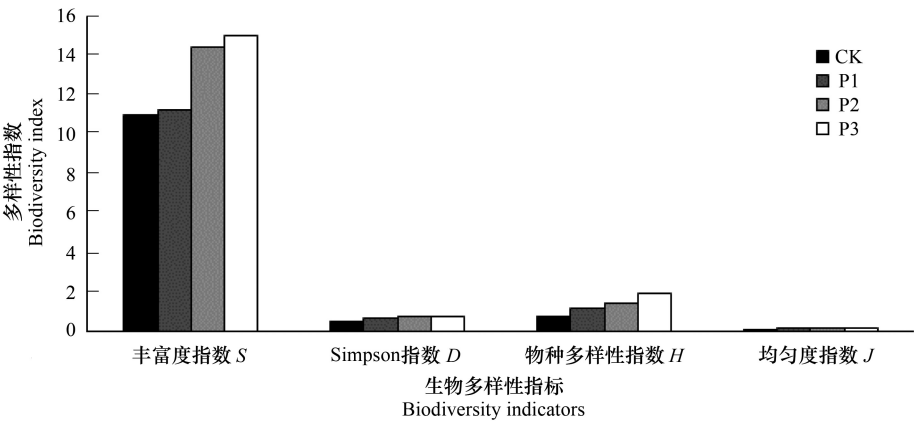


图 3 不同调控下群落总体多样性比较

Fig.3 Comparison of species diversity under the different control

3 个不同调控后的林分的群落多样性与对照林分相比, S 、 H 均增加,且随着调控的变化,多样性指数呈现增加的趋势。而所有调控措施的 J 、 D 与对照的差异不显著。可能原因:对乔木的修枝措施改变了林分郁闭度,增加了林下的光照强度和光照面积,促进阳生植被的迁入和它的生长;同时,修枝割灌的实施有助于改变林下植被的种间竞争和种类竞争,使阳生植物的种间优势度增加,从而导致了林下群落多样性指数发生改变。林下环境的温度、植被含水率、土壤湿度、温度的改变都可能影响着林下植被生物多样性的改变。

2.2.2 优势灌木光合特性参数对不同调控的响应

对油松林林下孩儿拳和黑枣进行光合作用的测定,得出主要光合生理特性指标(表 5)。

与对照林相比,不同调控措施后林分下的孩儿拳和黑枣表观量子效率均较低,而光补偿点、光饱和点、暗呼吸和最大净光合速率则较高。表明采取一定的调控措施可促进林下两种植物的生长。

对两种植物进行光响应曲线的测定,得出光响应拟合曲线(图 4)。

表 5 不同调控下孩儿拳头和黑枣主要光合生理特征指标

光合指标 Photosynthesis Indicators	CK		P1		P2		P3	
	1	2	1	2	1	2	1	2
表观量子效率(AQY)	0.0234	0.0511	0.0174	0.0367	0.0217	0.0376	0.0115	0.0415
光补偿点(PFD)/(mol m ⁻² s ⁻¹)	4.37	3.1351	7.3534	7.8501	6.2397	11.9601	12.272	16.44
光饱和点(LSP)/(mol m ⁻² s ⁻¹)	204.59	314.2952	260.1962	333.0233	328.7294	360.5139	188.5759	370.1412
暗呼吸速率(R _d)/(mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	0.0586	0.1602	0.1515	0.2884	0.1097	0.4497	0.6318	0.6824
最大净光合速率(P _{max})/(μmol m ⁻² s ⁻¹)	6.4993	6.8666	10.5682	8.9258	11.9616	9.5268	7.6348	11.7731

1:孩儿拳头;2:黑枣

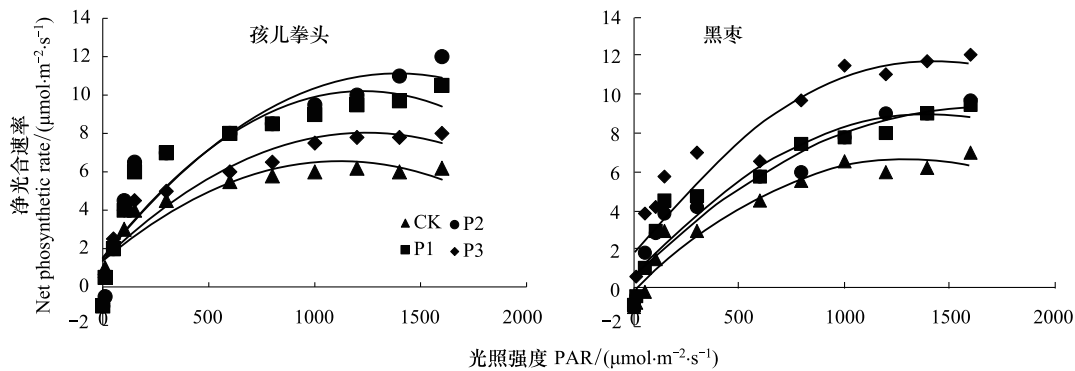


图 4 不同光照强度下孩儿拳头和黑枣的净光合速率

Fig.4 Net photosynthetic rate of *Grewiabiloba* and *Piospyros lotus* under differentphoto synthetically active radiations (PAR)

3 种不同调控后的油松林下孩儿拳头的 P_n (净光合速率) 值均大于对照林分的 P_n 值,最大净光合速率在 P2 调控下最大(图 4)。3 种调控后的油松林下黑枣的 P_n 值的变化趋势为:P3>P2>P2>CK,其中在 P3 调控下,植物的净光合速率变化最明显(图 4)。

3 结论与讨论

本研究采用的主要调控技术是修枝和割灌,辅助调控技术是人工清理地表枯落物。其中修枝高度的选择一方面是根据调查林分树种的平均高度、乔木活枝高度、乔木死枝高度来确立;另一方面结合林场防火规程的可燃物处理要求来确立,西山林场在防火调控处理时,主要以 3m 和 4m 作为常用的修枝高度^[36]。

3 种不同调控后的林分的群落多样性与对照林分相比, S 、 H 均增加,且随着调控的变化,多样性指数呈现增加的趋势。主要由于调控措施的实施改变了林分郁闭度,增加了林下的光照强度和光照面积,使阳生植物的种间优势度增加,进而改变林下群落多样性指数^[37-38]。然而,林下植被生物多样性的改变与林下环境的温度、植被含水率、土壤湿度、温度等因素有着直接的关系^[39]。因此,今后的研究应更多的将影响林下植被生物多样性的因子联系起来去比较森林可燃物调控措施的影响。

本研究中,通过采取不同的调控措施(修枝和割灌),改变了光照的条件,不同调控措施条件后的林分与对照林分相比,林下优势灌木(孩儿拳头和黑枣)表观量子效率均较低,而光补偿点、光饱和点、暗呼吸和最大净光合速率则较高。Walter 和 Field 对生长在开阔空间内的胡椒叶(*Piper auritum*)和遮阴环境下的胡椒叶(*Piper hispidum*)光适应性的研究表明,生长的在强光环境下的植株,其叶片通常具有较高的光饱和点和最大光合速率,同时也具有较高的呼吸消耗^[40];霍常富也在水曲柳苗木光合特性的研究中发现同样的结果^[41]。而 Sims 等的研究发现,在弱光环境中的生长植株,一般具有较高的表观量子效率,而具有较低的光补偿点和最大光合速率低^[42]。因此,可燃物调控改变了林内环境,增加了光照条件,从而促进了林下植被的更新。

可燃物调控作为林火管理的重要内容,已经从定性研究向定量研究的方向过渡。本研究在可燃物调控以及调控后影响评价方面进行了初步探讨,为研究地区森林可燃物的科学调控及管理提供一定理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 舒立福,田晓瑞. 国外森林防火工作现状及展望. 世界林业研究, 1997, (2): 28-36.
- [2] 田晓瑞,舒立福,牛树奎,刘晓东,胡海清,王明玉. 森林防火学发展 // 2008-2009 林业科学学科发展报告. 北京: 中国林学会, 2009: 136-146.
- [3] 田晓瑞,赵凤君,舒立福,苗庆林,王明玉. 1961-2010 年中国植被区的气候与林火动态变化. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3279-3286.
- [4] 胡荣伟,朱欢腾. 森林火灾发生要素及预防技术措施. 安徽农学通报, 2013, 19(18): 113-114.
- [5] 贺红士,常禹,胡远满,刘志华. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望. 植物生态学报, 2010, 34(6): 741-752.
- [6] 高国平,周志权,王忠友. 森林可燃物研究综述. 辽宁林业科技, 1998, (4): 34-37.
- [7] 刘志华,杨健,贺红士,常禹. 黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素. 生态学报, 2011, 31(6): 1669-1677.
- [8] Knapp E E, Keeley J E, Ballenger E A, Brennan T J. Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early season and late season prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest. Forest Ecology and Management, 2005, 208(1/3): 383-397.
- [9] Schmidt D A, Taylor A H, Skinner A H. The influence of fuels treatment and landscape arrangement on simulated fire behavior, Southern Cascade range, California. Forest Ecology and Management, 2008, 255(8/9): 3170-3184.
- [10] Shaw S B, Kotok E I. Cover type and fire control in the national forests of northern California. US Department of Agriculture, Washington, D C, Department Bulletin No. 1495, 1929.
- [11] 胡海清. 利用林分特征因子预测森林地被可燃物载量的研究. 林业科学, 2005, 41(5): 96-100.
- [12] 周润青,刘晓东,郭怀文. 大兴安岭南部主要林分地表可燃物负荷量及其影响因子研究. 西北农林科技大学学报, 2014, 42(6): 131-137.
- [13] Potts J B, Stephens S L. Invasive and native plant responses to shrubland fuel reduction: comparing prescribed fire, mastication, and treatment season. Biological Conservation, 2009, 142(8): 1657-1664.
- [14] Shepherd C, Grimsrud K, Berrens R P. Determinants of national fire plan fuels treatment expenditure: a revealed preference analysis for northern new Mexico. Environmental Management, 2009, 44(4): 776-788.
- [15] 田晓瑞,宋光辉. 我国天然林的火管理对策. 林业资源管理, 2000, (3): 14-17.
- [16] Lezberg A L, Battaglia M A, Shepperd W D, Schoettleb A W. 2008. Decades-old silvicultural treatments influence surface wildfire severity and post-fire nitrogen availability in a ponderosa pine forest. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 49-61.
- [17] 金琳,刘晓东,张永福. 森林可燃物调控技术方法研究进展. 林业科学, 2012, 48(2): 155-161.
- [18] Hart S C, Classen A T, Wright R J. Long-term interval burning alters fine root and mycorrhizal dynamics in a ponderosa pine forest. Journal of Applied Ecology, 2005, 42(4): 752-761.
- [19] Moghaddas J J, York R A, Stephens S L. Initial response of conifer and California black oak seedlings, following fuel reduction activities in a Sierra Nevada mixed conifer forest. Forest Ecology and Management, 2008, 255(8/9): 3141-3150.
- [20] 杨健,孔健健,刘波. 林火干扰对北方针叶林林下植被的影响. 植物生态学报, 2013, 37(5): 474-480.
- [21] 杨鸿培,宋军平,王巧燕. 西双版纳保护区计划烧除林下可燃物对大型食草哺乳动物群落结构及动态的影响. 林业调查规划, 2013, 38(1): 9-13.
- [22] 陈鹏飞,吕林昭,李继磊,王铁柱,赵建华,任云卯. 北京西山地区火烧迹地植被恢复研究. 林业资源管理, 2007, (1): 12-15.
- [23] 田晓瑞,舒立福,阎海平,王铁柱. 北京地区森林燃烧性研究. 森林防火, 2004, (1): 23-24.
- [24] 张川红,郑勇奇,李继磊,阎海平,王玲. 北京地区火炬树的萌蘖繁殖扩散. 生态学报, 2005, 25(5): 978-985.
- [25] 卢欣艳. 北京西山森林火险影响因素时空规律研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [26] 王明玉,周荣伍,赵凤君,安玉涛,舒立福,田晓瑞,李涛. 北京西山森林潜在火行为及防火林带有效宽度分布研究. 火灾科学, 2008, 17(4): 209-215.
- [27] 唐伟. 北京西山林场生物防火隔离带规划与布局[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [28] 韩恩贤,薄颖生,韩刚. 陕西针叶林下可燃物分布状况调查研究. 陕西林业科技, 2003, (2): 38-39.
- [29] Burrows N D, Mccaw W L. Fuel characteristics and bushfire control in Banksia low woodlands in Western Australia. Environmental Management, 1990, 31(3): 229-236.
- [30] 王明玉,舒立福,姚树人. 北京地区森林可燃物人工调控技术. 森林防火, 2012, (3): 46-48.
- [31] 师生波,李慧梅,王学英,岳向国,徐文华,陈桂琛. 青藏高原几种典型高山植物的光合特性比较. 植物生态学报, 2006, 30(1): 40-46.

- [32] 高贤明, 黄建辉, 万师强, 陈灵芝. 秦岭太白山弃耕地植物群落演替的生态学研究. 生态学报, 1997, 17(6): 619-625.
- [33] 王梦君, 李俊清. 四川省王朗自然保护区地震干扰后大熊猫栖息地的恢复. 生态学报, 2008, 28(12): 5848-5855.
- [34] 张弥, 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 陈鹏狮, 纪瑞鹏. 长白山阔叶红松林主要树种光合作用的光响应曲线. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1575-1578.
- [35] 孙飞翔. 秦岭南坡森林抚育对锐齿栎林和油松林光合特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [36] 毛斌, 徐程扬, 李翠翠, 黄广远. 不同修枝强度对侧柏、油松人工林林内景观美景度的影响. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 123-125.
- [37] 刘延文. 修枝对樟子松人工林生长的影响. 安徽农学通报, 2014, 20(5): 101-102.
- [38] 杨爱芳, 韩有志, 杨秀清, 刘泽明, 杨莎, 王官. 不同密度云杉林下草本植物多样性. 浙江农林大学学报, 2014, 31(5): 676-682.
- [39] 么旭阳, 胡耀升, 刘艳红. 长白山阔叶红松林典型森林群落功能多样性及其与地形因子的关系. 西北农林科技大学学报, 2014, 42(10): 95-102.
- [40] Walters M B, Field C B. Photosynthetic light acclimation in two rainforest Piper species with different ecological amplitudes. *Oecologia*, 1987, 72(3): 449-456.
- [41] 霍常富, 孙海龙, 王政权, 范志强, 赵晓敏. 光照和氮营养对水曲柳苗木光合特性的影响. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1255-1261.
- [42] Sims D A, Seemann J R, Luo Y. The significance of differences in the mechanisms of photosynthetic acclimation to light, nitrogen and CO₂ for return on investment in leaves. *Functional Ecology*, 1998, 12(2): 185-194.