

## 不同强度人工疏伐对侧柏光合特性的影响

周涧青<sup>1</sup>, 刘晓东<sup>2</sup>, 张思玉<sup>1\*</sup>, 李晨韵<sup>3</sup>

1. 南京森林警察学院林火研究中心/国家林业局森林防火工程技术研究中心, 江苏 南京 210023
2. 北京林业大学林学院/省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083
3. 国家林业局林产工业规划设计院城市规划三所, 北京 100010

**摘要:** 为分析不同强度人工疏伐对侧柏人工林光合特性的影响, 为选择合理的可燃物调控措施提供依据。本文选择山东泰山地区具有代表性的侧柏人工林确定调控强度梯度(对照、低等、中等、高等), 利用 Li-6400 便携式光合测定仪和 CCM-200 手持式叶绿素测定仪测定其光合生理指标和相对叶绿素含量。结果表明: 不同强度疏伐调控强度下的侧柏林的净光合速率日变化呈双峰曲线, 有明显的“午休”现象。疏伐调控后, 净光合速率( $P_n$ )日均值、最大净光合速率( $A_{max}$ )、光饱和点( $LSP$ )、暗呼吸( $R_d$ )、光补偿点( $LCP$ )均大于对照组(CK), 其中  $LSP$ 、 $A_{max}$ 、 $P_n$  在中等强度疏伐调控下最大,  $R_d$ 、 $LCP$  在中等强度调控下变化最小。相对叶绿素含量在不同疏伐调控强度下均小于 CK, 并且在中等强度调控下最大。

**关键词:** 侧柏; 光合特性; 疏伐调控

**中图分类号:** Q945.79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2015)05-0671-05

## Effects of the Different Strength of Artificial Thinning Treatment on Photosynthetic Characteristics of *Platycladus orientalis*

ZHOU Jian-qing<sup>1</sup>, LIU Xiao-dong<sup>2</sup>, ZHANG Si-yu<sup>1\*</sup>, LI Chen-yun<sup>3</sup>

1. Forest Fire Research Center/Engineering Research Center for Forest Fire Prevention and Control of State Forestry Administration, Nanjing Forestry Police College, Nanjing 210023, China
2. College of Forestry/The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
3. The Third Section of Urban Planning, Planning and Design Academy of Forest Products Industry, Beijing 100010, China

**Abstract:** To analyze the effects of different strength artificial thinning treatment on photosynthetic characteristics of *Platycladus orientalis* so as to provide references for selecting the suitable approaches of forest fuel. This paper selected the representative *P. orientalis* in Taishan Mountain area as a object to ensure gradients of treatment strength ( control group, low strength, medium strength, high strength ). The photosynthetic physiological indexes were tested by Li-6400 photosynthesis system and the relative content of chlorophyll was tested by CCM-200 portable chlorophyll meter. Diurnal variations of the net photosynthesis rate ( $P_n$ ) in leaves of *P. orientalis* under different strength artificial thinning treatment exhibited a bimodal curve with obvious “midday depression”. After thinning treatment, the mean value of net photosynthesis rate ( $P_n$ ), maximum net photosynthetic rate ( $A_{max}$ ), light saturation point ( $LSP$ ), dark respiration ( $R_d$ ), light compensation ( $LCP$ ) of the experimental group were greater than the control group, and under the medium level of thinning treatment, the daily means of the first three indices were maximum, but the change of  $LSP$  and  $R_d$  were minimum. Relative content of chlorophyll of the experimental group under different strength artificial thinning treatment were less affected than the control group, but the thinning treatment was the most obvious one under the medium level.

**Keywords:** *Platycladus orientalis*; photosynthetic characteristics; thinning treatment

森林火灾是对生态环境造成极大危害的自然灾害, 在全球气候变化的背景下, 森林火灾发生的潜在风险持续上升<sup>[1]</sup>。森林火灾对自然环境的破坏表现为二重性, 森林火灾不仅破坏森林动植物资源, 森林还在燃烧中释放大量的有害烟尘和温室气体。森林可燃物是森林火灾发生的物质基础, 与管理火源和调节火环境相比, 森林可燃物更易于进行人为控制<sup>[2,3]</sup>。森林火灾中林火行为的发生发展与可燃物的负荷量、含水率、紧实度及理化性质等密切相关<sup>[4-6]</sup>。从林火研究初期到现在, 人类逐渐认识到控制火灾的能力是有限的。因此, 需要采取适当的可燃物调控措施降低森林可燃物负荷量, 控制森林火灾的潜在风险与强度, 增强森林生态系统对林火的抗性。疏伐是营林抚育中的重要手段,

**收稿日期:** 2014-07-03

**修回日期:** 2014-07-20

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金项目(LGYB201515); 大学生创新创业训练计划项目(201512213068XY)

**作者简介:** 周涧青(1988-),男,助教,主要从事森林防火研究。E-mail:jq\_zhou@yeah.net

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:siyu85878817@163.com

不仅可以改变林分结构,降低林冠火发生的可能性,并且对地表可燃物的增加并无显著影响<sup>[7-9]</sup>。近年来我国人工林面积逐年迅速增加,由于森林抚育工作的滞后使得许多地区的森林可燃物负荷量超过安全临界阈值。在满足特定条件时,极易发生重、特大森林火灾,严重威胁当地人民群众的生命财产安全,破坏森林动植物资源,危害生态环境<sup>[10]</sup>。森林可燃物调控不仅要强调提高林分的阻火抗火效能,还要考虑维持森林生态系统的稳定性<sup>[11]</sup>。植物的光合作用反映物种本身的生物学特性,对群落优势种而言决定了其在群落中的地位,因而研究森林可燃物调控对森林群落优势种光合作用特征的影响对了解植物群落演替内在机制和退化生态系统的恢复重建具有重要意义<sup>[12]</sup>。本研究以泰山景区具有代表性的侧柏人工林为研究对象,探讨不同强度疏伐调控对植物光合特性的影响,为今后该地区侧柏人工林的合理经营和火灾防控提供科学依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地区概况

研究区位于山东省泰山风景名胜区内,地处鲁中南丘陵地区,地势北高南低,西高东低,其地理坐标为 $36^{\circ}12' \sim 36^{\circ}22'N$ ,  $116^{\circ}58' \sim 117^{\circ}10'E$ ,属暖温带大陆性季风气候区,气候类型为亚高山湿润型。气候随海拔增加呈梯度变化,山下部年降水量725.6 mm,年平均温度为 $12.8^{\circ}C$ ,无霜期195 d;山顶年降水量1132 mm,年平均温度 $7.2^{\circ}C$ 。该区土壤类型主要为棕壤、褐土和山顶草甸土,土层厚度较大,占近总面积63.8%的土壤的土层厚度超过了40 cm。该区面积11931.8  $hm^2$ ,有林地面积9490  $hm^2$ ,森林覆盖率81.5%,主要树种有油松(*Pinus tabulaeforms*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)等。

### 1.2 样地设置

以山东泰山地区具有代表性的侧柏人工林为研究对象,在阳坡选择林相整齐密度一致的侧柏林,每个坡向随即设置4个标准样地(20 m $\times$ 20 m),将所选取的侧柏人工林标准样地按照林分疏伐调控的强度设置为对照(CK)、低等强度(疏伐20%)、中等强度(疏伐30%)、高等强度(疏伐40%)四个调控强度梯度,进行样地调查。确定标准木,每个样地选择3株标准木,选择标准木林冠上层、向阳侧枝上具有代表性的当年生活体小枝为测定对象。

### 1.3 光合日变化测定

于侧柏人工林生长季旺盛期的7~9月份选择晴朗无云的天气,用Li-6400便携式光合测定系统(LI-COR, Inc., USA)测定侧柏人工林的叶片的气体交换过程。从6:00~18:00,每隔2 h测定1次,每次连续测定2 h,每株选取3个样叶,每个样叶重复3次,结果取平均值。测定的参数有:叶片瞬时净光合速率值( $P_n$ ,  $\mu mol/m^2 \cdot s^{-1}$ )、气孔导度( $G_s$ ,  $mmol/m^2 \cdot s^{-1}$ )、胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ ,  $\mu mol/mol$ )、光合有效辐射( $PAR$ ,  $\mu mol/m^2 \cdot s^{-1}$ )蒸腾速率( $T_r$ ,  $mmol/m^2 \cdot s^{-1}$ )等。

### 1.4 光响应和 $CO_2$ 响应及参数估算

光响应测定:以测定光合日变化的植株为测定对象,从9:00~11:00,用Li-6400便携式光合测定系统活体测定人工侧柏林叶片的气体交换过程。使用开放气路,空气流速为0.5 L/min,叶室温度控制为 $30^{\circ}C$ ,叶室内相对湿度70%~75%, $CO_2$ 浓度控制为400  $\mu mol/mol$ 。设定诱导光强约为2000  $\mu mol/m^2 \cdot s^{-1}$ ,诱导时间45 min。光合作用光响应曲线测定由强到弱设置光量子通量梯度为1800、1500、1200、1000、800、600、400、200、150、100、80、50、20、0  $\mu mol/mol$ 。

$CO_2$ 响应测定:设定光响应曲线计算的饱和光强为光照强度,用Li-6400配备的液化钢瓶控制参比叶室中的 $CO_2$ 浓度,由高到低依次设置浓度梯度为1500、1200、1000、800、600、400、200、150、120、100、80、50  $\mu mol/mol$ ,控制叶室温度为 $30^{\circ}C$ ,光照强度设置为1200  $\mu mol/m^2 \cdot s^{-1}$ 。

### 1.5 相对叶绿素含量的测定

以测定光合日变化的侧柏人工林植株叶片为测定对象,每株选择5片叶片,在各个叶片中脉两侧均匀选取3个点,用CCM-200手持式叶绿素测定仪(OPTI-SCIENCES, USA)测定其相对叶绿素含量,

测定结果取平均值。

### 1.6 数据处理

用 SPSS 22.0 (IBM,USA) 统计分析软件对实验数据进行处理, 文中图形采用 Origin 9.0 (Originlab,USA) 软件进行绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 侧柏人工林净光合速率日变化对不同强度人工疏伐调控的响应

如图1所示, 在树木生长旺季, 不同强度疏伐调控后的侧柏林人工的光合速率日变化 ( $P_n$ ) 均呈“双峰”曲线, 不同强度疏伐调控下的侧柏人工林在上午10:00左右出现第一次“峰值”, 中午不同强度疏伐调控下的 $P_n$ 值均出现不同程度降低, 出现短暂光合“午休”现象, 午后上升, 至下午14:00左右出现第二次“峰值”, 随后不同强度疏伐调控下的 $P_n$ 值逐渐下降, 且下降幅度较大, 到18:00左右下降至全天最低值。不同疏伐调控强度下的侧柏人工林的 $P_n$ 值均大于对照组, 且中等疏伐调控强度的平均 $P_n$ 值最大。中等强度疏伐调控处理的侧柏人工林的 $P_n$ 值有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 而其他各强度疏伐调控下的 $P_n$ 值均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

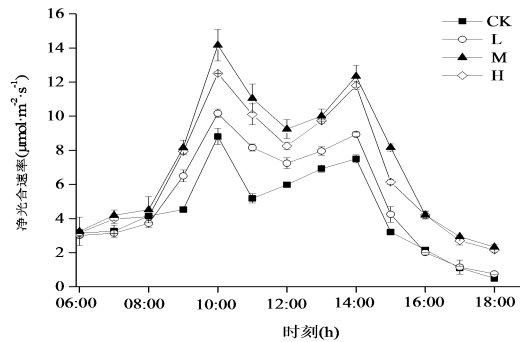


图 1 侧柏人工林净光合速率日变化 ( $P_n$ ) 对不同强度人工疏伐的响应

Fig.1 Reponse to different strength of artificial thinning treatment of diurnal dynamics of net photosynthetic rate ( $P_n$ ) in leaves of *Platycladus orientalis*

注:CK-对照组(the control group); L-低强度疏伐(low strength artificial thinning); M-中强度疏伐(media strength artificial thinning); H-高强度疏伐(high strength artificial thinning)

### 2.2 侧柏人工林光响应曲线对不同强度人工疏伐调控的响应

不同强度疏伐调控下的侧柏人工林光响应曲线如图 2 所示, 不同强度疏伐调控后的侧柏人工林的  $P_n$  值大于对照组侧柏人工林的  $P_n$  值, 其中, 中等和低强度疏伐调控下的  $P_n$  值明显大于高强度疏伐调控下的  $P_n$  值。当光合有效辐射 ( $RPA$ )  $\leq 800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 低强度疏伐调控下的  $P_n$  值接近中等强度疏伐调控下的  $P_n$  值; 当  $RPA > 800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时中等强度疏伐调控下的  $P_n$  值大于低强度疏伐调控下的  $P_n$  值。其中最大  $P_n$  值在中等强度疏伐调控下最大 ( $12.50 \pm 0.91 \mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

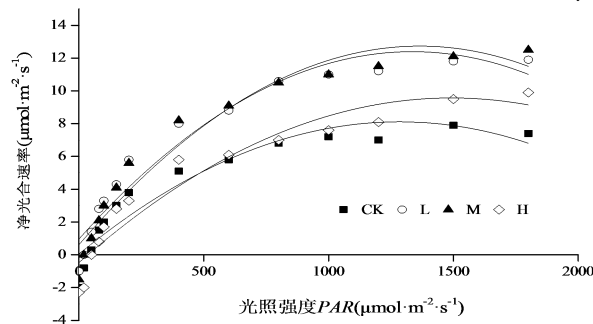


图 2 不同光照强度, 不同强度人工疏伐调控下侧柏人工林的净光合速率

Fig.2 Net photosynthetic rate ( $P_n$ ) in leaves of *Platycladus orientalis* under different strength artificial thinning treatment and different photosynthetically active radiations (注: CK、L、M、H 含义同图 1)

$y_{CK}=0.01257X-4.89682E-6X^2+0.04222(R^2=0.89844,p<0.05);y_L=0.01712X-6.40904E-6X^2+0.95981(R^2=0.93981,p<0.05);y_M=0.01777X-6.51213E-6X^2+0.61(R^2=0.94172,p<0.05);y_H=0.01346X-4.51062E-6X^2-0.47801(R^2=0.91344,p<0.05)$

### 2.3 侧柏人工林光合特性参数对不同强度人工疏伐调控的响应

由表 1 所示, 不同强度疏伐调控后的侧柏人工林的表现量子效率 ( $AQY$ ) 均小于对照组的  $AQY$ , 而光补偿点 ( $LCP$ ) 均大于对照组。在中等强度的疏伐调控下,  $AQY$  和  $LCP$  相对对照组变化最小。不同强度疏伐调控后的光饱和点 ( $LSP$ )、暗呼吸 ( $R_d$ )、最大净光合速率 ( $A_{max}$ ) 均大于对照组, 而中等强度疏伐调控下的  $LSP$  和  $A_{max}$  与其他处理之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 相对于对照组变化最大, 分别为 14.4%、68.7%。相对于对照组, 中等强度干扰下的  $R_d$  值变化最小, 为 11.7%, 与其他处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表 1 不同强度人工疏伐调控下的侧柏人工林的主要光合特性生理指标

Table 1 Photosynthetic physiological characteristics in leaves of *Platycladus orientalis* under different strength artificial thinning treatment

	光饱和点 Light saturation point $/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	光补偿点 Light compensation point $/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	暗呼吸速率 Dark respiration $/\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate $/\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	表观量子效率 Apparent quantum yield $/\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$
CK	765.1±18.6a	16.2±5.5a	0.605±0.275a	7.41±0.54a	0.0419±0.023a
L	885.2±86.4a	41.5±0.7a	1.481±0.153a	11.92±0.90a	0.0291±0.0038a
M	875.1±98.7b	21.0±4.3a	0.676±0.182a	12.50±0.91b	0.0386±0.0014a
H	770.2±60.5a	68.3±3.1a	2.130±0.358b	9.90±1.97a	0.0315±0.0026a

注:数据为平均值±标准误差, 不同小写字母表示同一列差异显著( $P < 0.05$ ); CK、L、M、H 含义同图 1

Note: Data in table were the average ±SE, the different little letter in a same column showed the significant difference. The meanings of CK, L, M, H were same as Fig.1 (the same as follows)

### 2.4 侧柏人工林其他光合相关参数对不同强度人工疏伐调控的响应

如表 2 所示, 对照组的蒸腾速率 ( $T_r$ ) 和气孔导度 ( $G_s$ ) 均小于不同强度疏伐调控后的  $G_s$  和  $T_r$ 。其中, 中等强度疏伐调控下的侧柏人工林的  $G_s$  和  $T_r$  均大于低强度和高强度疏伐调控下的值, 而不同疏伐调控强度下侧柏人工林的胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 值均低于对照组。就  $T_r$  和  $G_s$  而言, 中等强度疏伐调控处理与其他处理存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同强度人工疏伐调控下的侧柏人工林的其他光合相关参数

Table 2 Other related photosynthetic parameters in leaves of *Platycladus orientalis* under different strength artificial thinning treatment

	蒸腾速率 Transpiration Rate $/\mu\text{molH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	气孔导度 Stomatal conductance $/\mu\text{molH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 Intercellular $\text{CO}_2$ concentration $/\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	净光合速率 Net photosynthetic rate $/\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
CK	2.31±0.25a	0.117±0.001a	271.3±10.0a	8.27±0.83a
L	2.42±0.18ab	0.120±0.025a	241.2±17.8a	9.95±0.92a
M	2.64±0.28b	0.146±0.027b	259.6±18.2a	10.59±1.63a
H	2.51±0.24a	0.128±0.021a	251.3±11.5a	10.18±0.73a

### 2.5 侧柏人工林相对叶绿素含量对不同强度人工疏伐调控的响应

如图 3 所示, 不同疏伐调控强度下的侧柏人工林叶片的相对叶绿素含量均小于对照组且不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

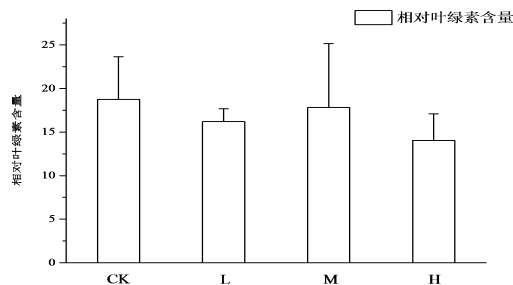


图 3 不同强度人工疏伐调控下侧柏人工林的相对叶绿素含量

Fig.3 Relative content of chlorophyll in leaves of *Platycladus orientalis* under different strength artificial thinning treatment

## 3 结论与讨论

疏伐是营林抚育工作中重要且常见的一种措施, 通过疏伐可以优化林分结构, 改变林内光照、湿度、温度等条件来进而影响森林火灾的剧烈程度和生态效应<sup>[13,14]</sup>。因此人工疏伐不仅是森林可燃物调控的常用方法, 而且是维持森林生态系统稳定的重要手段。本研究是在控制环境条件(如温度、光照强度、 $\text{CO}_2$ 浓度等)使之保持一致的情况下进行的, 保证了实验数据间的相互可比性和参考性。

光合作用是植物生长的物质基础并与外界环境不断地进行能量和物质交换,因此植物光合速率的大小是由树种自的特性和环境条件共同决定的,也呈现出相应的变化规律<sup>[15]</sup>。本研究结果显示,不同强度疏伐调控强度下的侧柏人工林的 $P_n$ 值在测定时间内呈现规律性变化,呈“双峰”曲线,在正午10:00~12:00,所有处理的侧柏林的 $P_n$ 值均出现光合“午休”现象。引起这种现象的主要原因是该时间段气温和光照强度较高,叶片蒸腾作用旺盛,为减少水分丧失,气孔导度逐渐下降,阻断了与外界气体交换的正常进行,导致侧柏进行光合作用的原料—CO<sub>2</sub>供应不足从而使得 $P_n$ 值降低。不同疏伐调控强度下的侧柏林的 $P_n$ 值均大于对照组且在中等疏伐调控强度水平下最大,说明不同强度的人工疏伐调控措施促进了侧柏人工林的光合作用,而适当强度的抚育措施对林分的促进作用体现得更为明显。

人工疏伐调控对侧柏人工林的影响还可以通过光合特性参数比较呈现出来,三种不同强度疏伐调控后侧柏林的 $LSP$ 、 $LCP$ 、 $R_d$ 均高于对照组,这说明疏伐调控后侧柏林对强光的利用能力有所增强,而对弱光的利用能力有所下降,调控后的侧柏林加速了对光合产物的消耗。但 $A_{max}$ 相对 $R_d$ 增加的幅度更大,因此相对消耗量光合产物的积累量有所增加,说明疏伐调控后更利于侧柏林的生长。相比低强度和高强度疏伐调控,中等强度疏伐调控后的侧柏林具有较高的 $LSP$ 、 $A_{max}$ ,而具有较低的 $R_d$ 和 $LCP$ ,说明中等强度疏伐调控下侧柏林具有较高的利用强光和弱光的能力,同时光合产物消耗较低,拥有较高的光合潜力。不同强度人工疏伐调控后下侧柏林叶片相对叶绿素含量相比对照组均有所减少,说明疏伐后侧柏林对光能的捕获能力有所下降,这与前人的研究的结果相一致<sup>[16,17]</sup>。相比低强度和高强度疏伐调控,中等强度疏伐调控后的侧柏林的相对叶绿素含量依然较高。

以营林技术为主要手段,综合考虑对生态环境的影响,提高林分自身抗火性、实现森林可持续经营是进行可燃物调控的最终目标。在今天我国林业工作的重心转移到以生态建设为主的新形势下,对森林的经营管理不仅要考虑森林火灾防控的短期效果,更要兼顾对森林生态系统的长期影响<sup>[11]</sup>。因此,在进行可燃物调控时必须因地制宜,根据当地的林分状况和立地条件慎重选择调控措施,确定科学合理的调控强度,既降低森林发生火灾的潜在风险,同时保持森林生态系统的稳定,对维护我国的国土生态安全具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] 田晓瑞,舒立福,王明玉,等. 林火与气候变化研究进展[J]. 世界林业研究, 2006, 5: 34-36
- [2] 高国平,周志权,王忠友. 森林可燃物研究综述[J]. 辽宁林业科技, 1998, 4: 34-37
- [3] 贺红土,常禹,胡远满,等. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 741-752
- [4] Knapp EE, Keeley JE, Ballenger EA, et al. Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early season and late season prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 208: 383-397
- [5] Pausas JG, Gasals P, Romanya J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soil: effects of N content and the moss layer[J]. Soil Biochemistry, 2004, 36(6): 989-997
- [6] Schmidt DA, Taylor AH, Skinner AH. The influence of fuels treatment and landscape arrangement on simulated fire behavior, Southern Cascade range, California [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255: 3170-3184
- [7] 郭文霞. 北京地区油松林抗火性综合分析及调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009
- [8] Brown RT, Agee JK. Forest restoration and fire: Principles in the context of place[J]. Conservation Biology, 2004, 18(4): 903-912
- [9] Agee JK, Skinner CN. Basic principles of forest fuel reduction treatments[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 211: 83-96
- [10] 胡海清. 林火生态与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 31-32
- [11] 金琳, 刘晓东, 张永福. 森林可燃物调控技术方法研究进展[J]. 林业科学, 2012, 48(2): 155-161
- [12] 管铭, 金则新, 李月灵, 等. 千岛湖次生林优势种植物光合生理生态特性[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2057-2066
- [13] 屈宇, 于汝元, 张延达, 等. 营林防火的理论与实践[J]. 林业资源管理, 2002(4): 13-16
- [14] Lezberg AL, Battaglia MA, Shepperd WD, et al. Decades-old silvicultural treatments influence surface wildfire severity and postfire nitrogen availability in a ponderosa pine forest[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 49-61
- [15] 许大全, 徐宝基, 沈允刚. C3植物光合效率的日变化[J]. 植物生理学报, 1990, 16(1): 1-5
- [16] Dai YJ, Shen ZG, Liu Y, et al. Effects of shade treatments on the photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and chlorophyll content of Tetra stigm a hemsleyanum Diels et Gilg[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65: 177-182
- [17] 王云贺, 韩出明, 韩梅, 等. 遮阴处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6762-6770