

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2022.04.001

光照与氮添加对红皮云杉幼树生长与 叶形态功能的影响

邢鸿林, 刘天义, 扎史都吉, 程琳, 杨玲*

(林木遗传育种国家重点实验室(东北林业大学), 哈尔滨 150040)

摘要:筛选出有效促进红皮云杉幼树生长的土壤养分和光照条件,为建立促进红皮云杉幼树生长的管理技术提供科学依据,以黑龙江省佳木斯市孟家岗林场 8~10 a 生红皮云杉人工幼龄林木为研究对象,采用裂区设计试验方法,设置 3 种光照条件(全光、0.5 郁闭度、0.7 郁闭度)下氮添加(每株每年 100 g)样地和对照样地,分析光照与氮添加对红皮云杉幼树生长和叶形态功能的影响差异。结果表明,①不同光照条件之间,全光条件下树高年生长量最大,全光施肥条件下地径年生长量最大,其次为 0.5 郁闭度条件;氮添加对树高和地径年生长量影响较小;②不同光照条件下,随着郁闭度增加,比叶面积、叶绿素含量增加,叶干物质含量、叶绿素 a/b 降低,叶养分含量变化不显著;氮添加对叶形态、叶绿素含量和叶养分含量影响不显著。由此可知,相比氮添加,光照对红皮云杉幼树生长、叶形态和光合能力的影响更显著,全光、氮添加条件下幼树具有较大树高和地径年生长量,高径年生长量比最低,氮添加可促进光合效率提高。红皮云杉造林适宜选择全光条件或近似全光条件植苗,造林后可通过氮添加提高幼树光合能力以促进生长。

关键词:红皮云杉;人工林;郁闭度;氮添加;林木生长;叶形态;光合能力

中图分类号:S725.5;S725.7

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2022)04-0001-09

Effects of Light and Nitrogen Addition on the Tree Growth, Needle Morphological and Functions of *Picea koraiensis* Saplings

XING Honglin, LIU Tianyi, ZHASHIDUJI, CHENG Lin, YANG Ling*

(State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding(Northeast Forestry University), Harbin 150040, China)

Abstract:To screen soil nutrients and light conditions that effectively promote the growth of *Picea koraiensis* saplings and to provide a scientific basis for establishing growth promotion techniques for *P. koraiensis* saplings, a split-zone design experiment was conducted with *P. koraiensis* saplings plantations of 8-10 years old in Jiamusi City, Heilongjiang Province, using three light conditions (full light, 0.5 depression, 0.7 depression) with nitrogen addition (100 g/plant-yr) and control plots to analyze the effects of light and nitrogen addition on growth and leaf morphological function of *P. koraiensis* saplings. The results showed that: ①The annual growth of tree height was the highest under full light conditions, and the annual growth of ground diameter was the highest under full light fertilization conditions, followed by 0.5 degree of depression; the effect of N addition on the annual growth of tree height and ground diameter was small. ② Between different light conditions, with the increase of canopy density, the specific leaf area and chlorophyll content increased, leaf dry matter content and chlorophyll a/b decreased, and leaf nutrient content did not change significantly; the effect of N addition on leaf morphology, chlorophyll content and leaf nutrient content was not significant. The effect of light on the growth, leaf morphology and photosynthetic capacity of *P. koraiensis* saplings was more significant than that of N addition, and saplings under full light and N addition had larger annual growth of tree height and ground diameter, and the lowest annual growth ratio of high diameter. Nitrogen addition can promote the photosynthetic efficiency of saplings. The full light condition or nearly full light condition should be selected for the forestation of *P. koraiensis*, and the photosynthetic capacity of saplings can be improved by nitrogen addition after forestation to promote growth.

Keywords:*Picea koraiensis*; plantation; canopy closure; nitrogen addition; tree growth; leaf morphology; photosynthetic capacity

收稿日期:2022-01-23

基金项目:国家重点研发项目(2017YFD0600606)

第一作者简介:邢鸿林,博士研究生。研究方向为人工林高效培育理论与技术。E-mail: nefuxhl@163.com

* 通信作者:杨玲,博士,教授,博士生导师。研究方向为人工林高效培育理论与技术。E-mail: yangl-cf@nefu.edu.cn

引文格式:邢鸿林,刘天义,扎史都吉,等. 光照与氮添加对红皮云杉幼树生长与叶形态功能的影响[J]. 森林工程, 2022,38(4):1-9.

XING H L, LIU T Y, ZHASHIDUJI, et al. Effects of light and nitrogen addition on the tree growth, needle morphological and functions of *Picea koraiensis* saplings[J]. Forest Engineering, 2022,38(4):1-9.

0 引言

随着社会经济不断发展,经济建设规模逐渐壮大,对森林资源的需求与日俱增,然而因人类的破坏和对木材的利用,导致可采天然林枯竭,生态环境急剧恶化。为了保护天然林,改善日益严重的生态环境问题,国家已停止对天然林的商业性采伐,只能通过树木生长统一、出材整齐一致且短期速生的人工林获得森林资源,以满足工业和生活需要^[1]。我国人工林面积居世界第一,但人均森林蓄积量仅为世界人均水平的 1/7,且人工林质量不高,单位面积蓄积量显著低于天然林^[2],其主要原因在于纯林化、针叶化严重与抚育措施不到位导致的土壤肥力衰退^[3-4]。同时,我国潜在可造林地条件恶劣,造林成活难度大,单独依靠扩大种植面积获得更多木材显然不再可取。因此,探究环境因子对林木的影响,进而在有限的人工林地上对用材树种进行更加合理的抚育以获得优良径材成为森林培育研究的重要内容。

光照是影响植物生长发育的重要环境因子^[5],植物对光照的捕获和利用能力决定自身在自然界中的生存适应情况^[6-7]。光照不仅影响植物的光合能力,也影响固氮相关酶的活性,进而影响植物体内 C、N 含量^[8],导致长期生长在不同光环境下的同种植物,其叶片形态和生理生态特性存在差异,如随着郁闭度增加,叶面积减少,比叶面积、叶绿素含量和光合能力增加^[9-11]。光环境对幼苗幼树存活、生长发育的影响更为明显^[12-13],适宜的光环境有助于植物维持良好的生长状态、较高的光合速率,有利于发挥出其生态和经济效益;过高的光强不仅对植物生长产生抑制作用,而且在某些树种中会造成光合速率下降等情况^[14-15];较低的光强也会产生一系列不良反应,如生长减缓、叶片褪色等^[16]。

土壤养分对植物生长同样意义重大,不同树种对不同营养元素需求不同。人工林地持续种植一种林木,对某种或多种元素持续吸收,导致土壤中该元素含量不足,当一种或几种元素缺少时,林木会出现生长速度减慢的现象^[17-18]。土壤氮含量对植物生理生态功能具有重要影响,其与植物生长间的关系越来越受到生态学家关注^[19-20]。氮不仅是植物体内蛋白质、核酸和酶类等生命活性物质的组成成分,而且是根系从土壤中吸收最多的矿质元素之一,在生态系统中,氮往往是限制植物生长的重

要因子,与植物光合能力密切相关。对生长缓慢的人工林进行合理的施肥处理,可满足林木生长和繁殖期间对养分的需求,促进林木生长发育和结实^[21],而不合理的养分添加将对林木产生毒害作用,抑制其生长发育和结实^[22]。

红皮云杉(*Picea koraiensis*)为松科(Pinaceae)云杉属(*Picea*)常绿乔木,其木材通直,切削容易,无隐性缺陷。除广泛的经济用途,也因其外形优美具备良好的观赏价值。目前,国内对红皮云杉人工林培育研究主要集中在育苗、造林等方面^[23-26],关于光照与施肥对红皮云杉林木生长协同作用的影响研究较少。红皮云杉早期(造林后 10~15 a)生长缓慢,严重影响用材林的培育周期,通过施肥与合理的抚育措施处理,可有效增加林下土壤养分含量,改善林木营养状况,实现促进幼树高生长和地径增加的目的。鉴于此,本研究以黑龙江省佳木斯市孟家岗林场 8~10 a 生红皮云杉人工幼龄林木为研究对象,分析光照条件下氮添加对幼树生长和叶形态功能的影响,旨在筛选出有效促进红皮云杉幼树生长的土壤养分和光照条件,为建立促进红皮云杉幼树生长的管理技术提供科学依据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于黑龙江省佳木斯市孟家岗林场(130°32'42"~130°52'36"E,46°20'16"~46°30'50"N),海拔 170~575 m,土壤类型以暗棕壤为主。属中温带大陆性季风气候,年均气温 2.7℃,最高气温 35.6℃,最低气温-38.6℃,年均降雨量 550 mm,无霜期 120 d 左右,全年日照时数 1 955 h。

1.2 样地设置与调查

采用裂区设计试验方法,设置 2 种因素(光照和氮添加)6 种处理。光照根据林分郁闭度分为全光、林下 0.5 郁闭度和林下 0.7 郁闭度 3 种条件,设为主区;氮添加分为不添加和添加氮肥 2 种处理,设为副区。2019 年 7 月设置样地,每种处理和对照分别设置 3 块 10 m×10 m 样地,共 18 块样地。

1.2.1 光条件设置

全光样地设置在 90 林班,为全光下造林 8 a 红皮云杉幼树,种植密度 2 500 株/hm²。林下 0.5 郁闭度和 0.7 郁闭度样地均设置在 90 林班附近的 79 林班,面积 17 hm²,为 50 a 落叶松(*Larix gmelinii*)人工林下造林 10 a 红皮云杉幼树,种植密度 2 500 株/hm²。

1.2.2 氮添加处理

于 3 种光条件下分别设置 3 块氮添加样地,样地土壤理化性质见表 1。参照尉建埔等^[27]的施肥方法,分别于 2019—2021 年生长季前、中、后(即 5、7、8 月的中旬)在试验样方内施肥。施肥前将幼树

半径 50 cm 以内的穴面杂草清除;施加氮肥为尿素,每株每年 100 g,根据季节温度变化调节施肥量,其中 5 月施 30%、7 月施 40%、8 月施 30%,肥料沿幼树两侧 10 cm 处沟施,沟深 7~10 cm,一次施入后覆土。

表 1 试验地点土壤基本信息
Tab. 1 Basic information of soil in test site

土层/cm Soil depth	pH	全碳/(mg·kg ⁻¹) Total carbon	全氮/(mg·kg ⁻¹) Total nitrogen	全磷/(mg·kg ⁻¹) Total phosphorus	全钾/(mg·kg ⁻¹) Total potassium	有效磷/(g·kg ⁻¹) Available phosphorus	速效钾/(g·kg ⁻¹) Available potassium
0~20	5.52	0.39	4.69	11.95	5.70	53.13	92.05
20~40	5.50	0.27	3.29	8.97	3.75	54.25	75.72

1.3 调查方法

1.3.1 生长量调查

分别于 2019—2021 年生长季末(9 月下旬)测量样地内红皮云杉幼树生长指标。每块样地红皮云杉幼树为 40~75 株。使用卷尺测量苗高和冠幅,精确到 0.1 cm,使用游标卡尺测量地径,精确到 0.1 mm。

1.3.2 叶形态与功能分析

于 2020 年 9 月(生长季末)、2021 年 5 月(生长季初)和 7 月(生长旺盛期)随机挑选每块样地内 10 株红皮云杉幼树,采集树冠中部东、西、南、北 4 个方位的 1 年生枝条各 1 枝,随机分为 2 份:一份 4℃冰箱保存,采用乙醇与丙酮体积比 1:1 混合液法测叶样品叶绿素含量;一份微波炉杀青,60℃烘箱烘干,球磨仪磨碎后过 100 目筛,使用硫酸-过氧化氢消煮法进行消煮,采用靛酚蓝比色法测叶全氮含量、钼锑抗比色法测叶全磷含量、火焰光度计法测叶全钾含量。每块样地针叶叶绿素含量与氮、磷、钾含量均重复测量 3 次。于 7 月随机挑选每块样地内 10 株红皮云杉幼树,采集树冠中部东、西、南、北 4 个方位的 1 年生枝条各 1 枝,从中随机挑选 160 根针叶,使用根系扫描仪得到叶长、叶表面积,并测定比叶面积和干物质含量。

1.4 统计方法

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理,使用 IBM SPSS Statistics 19 统计分析软件在 5%显著水平下进行单因素方差分析与双因素方差分析比较,当 $P<0.05$ 时,差异显著。数据结果以“平均值±标准误差”表示,并利用 Sigma Plot 14.0 软件(SYSTAT 公司)作图。

2 结果与分析

2.1 光照与氮添加对红皮云杉幼树形态和生长速度的影响

光条件对幼树树高年生长量影响不显著($P>0.05$),全光样地树高年生长量最大,0.5 郁闭度样地树高年生长量最小;光条件对幼树地径年生长量影响显著($P<0.05$),随着郁闭度增加,地径年生长量先增加后减少,0.7 郁闭度下地径年生长量显著低于全光和 0.5 郁闭度样地($P<0.05$,低于全光样地 44%,0.5 郁闭度样地 50%);光条件对幼树高径年生长量比影响显著($P<0.05$),随着郁闭度增加,高径比先减少后增加,0.7 郁闭度下高径比显著高于全光和 0.5 郁闭度样地($P<0.05$,高于全光样地 76%,0.5 郁闭度样地 91%);光条件对幼树冠幅影响不显著($P>0.05$),全光样地冠幅年生长量最大,0.7 郁闭度样地冠幅年生长量最小,见表 2。

氮添加对树高年生长量影响不显著($P>0.05$);氮添加对地径年生长量影响显著($P<0.05$),0.5 郁闭度下氮添加显著降低幼树地径年生长量($P<0.05$,降低 49%);氮添加对幼树高径年生长量比影响显著($P<0.05$),0.7 郁闭度下氮添加显著降低幼树高径年生长量比($P<0.05$,降低 30%);氮添加对幼树冠幅影响不显著($P>0.05$),见表 2。

双因素方差分析结果表明,光条件是影响红皮云杉幼树地径生长的主要限制因子($P<0.05$),光照与氮添加的交互作用不显著($P>0.05$)。光条件与交互作用是影响幼树高径年生长量比的主要限制因子($P<0.05$)。全光、氮添加条件下幼树生长更粗壮(树高最小、地径最大),而 0.7 郁闭度条件下幼树生长细弱。

表 2 不同光条件和氮添加下红皮云杉幼树年平均生长量

Tab. 2 Average annual growth of *Picea koraiensis* saplings under different light conditions and N addition

处理 Treatments	树高年生长量/cm Annual growth of height	地径年生长量/mm Annual growth of DBH	高径比年生长量 Annual growth ratio of height to diameter	冠幅年生长量/cm Annual growth of crown
全光对照 Full exposure	16.53±5.60a	5.57±1.22a	28.24±3.71bc	14.25±1.78a
全光施肥 Full exposure+nitrogen addition	12.84±1.65a	6.40±0.74a	20.00±0.24c	13.22±0.80a
0.5 郁闭度对照 Canopy density 0.5	16.13±1.48a	6.19±0.51a	26.13±1.44bc	12.74±1.94a
0.5 郁闭度施肥 Canopy density 0.5+nitrogen addition	13.80±1.02a	3.17±0.54b	44.96±4.14ab	9.50±1.99a
0.7 郁闭度对照 Canopy density 0.7	16.41±4.37a	3.22±0.62b	49.81±4.09a	10.55±2.38a
0.7 郁闭度施肥 Canopy density 0.7+nitrogen addition	10.55±1.53a	3.07±0.38b	35.04±5.31b	17.84±6.70a

注:同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.2 光照与氮添加对红皮云杉幼树叶形态与功能的影响

2.2.1 光照与氮添加对红皮云杉幼树叶形态的影响

光条件对幼树叶长与叶面积影响不显著($P>0.05$),随着郁闭度增加,叶长与叶面积先增加后减少,全光条件下叶长、叶面积最低,0.5 郁闭度条件下叶长、叶面积最高;光条件对比叶面积影响显著($P<0.05$),全光样地下比叶面积显著低于林下(0.5 和 0.7 郁闭度)($P<0.05$,低于 0.5 郁闭度样地 16%,0.7 郁闭度样地 28%);光条件对叶干物质含量影响显著($P<0.05$),全光样地下叶干物质含量显著高于林下(0.5 和 0.7 郁闭度)($P<0.05$,高于

0.5 郁闭度样地 9%,0.7 郁闭度样地 15%),见表 3。

氮添加对叶长、叶面积、比叶面积与叶干物质含量影响均不显著($P>0.05$),全光与 0.7 郁闭度下氮添加可提高叶长,但未达到显著水平;氮添加均降低比叶面积,提高叶干物质含量,但未达到显著水平,见表 3。

双因素方差分析结果表明,光照与氮添加的交互作用是影响红皮云杉幼树叶比叶面积与干物质含量的主要限制因子($P<0.05$),光条件是影响幼树干物质含量的主要限制因子($P<0.05$)。随着郁闭度增加,幼树针叶比叶面积增加,干物质含量(质量分数,下同)降低。

表 3 不同光条件和氮添加下红皮云杉幼树叶形态变化

Tab. 3 Changes in leaf morphology of *Picea koraiensis* saplings under different light conditions and N addition

处理 Treatments	叶长/cm Leaf length	叶面积/cm ² Leaf area	比叶面积/(g·cm ⁻²) Specific leaf area	叶干物质含量/(g·g ⁻¹) Leaf dry matter content
全光对照 Full exposure	1.41±0.07a	0.46±0.02a	130.05±1.37c	0.34±0.0047a
全光施肥 Full exposure+nitrogen addition	1.44±0.08a	0.46±0.03a	129.23±0.63c	0.34±0.0073a
0.5 郁闭度对照 Canopy density 0.5	1.58±0.01a	0.55±0.03a	154.01±1.97b	0.31±0.0048bc
0.5 郁闭度施肥 Canopy density 0.5+nitrogen addition	1.45±0.17a	0.45±0.07a	150.22±10.83b	0.33±0.0086ab
0.7 郁闭度对照 Canopy density 0.7	1.54±0.13a	0.51±0.06a	180.60±12.27a	0.29±0.0030c
0.7 郁闭度施肥 Canopy density 0.7+nitrogen addition	1.62±0.07a	0.51±0.02a	173.24±1.53a	0.31±0.0043c

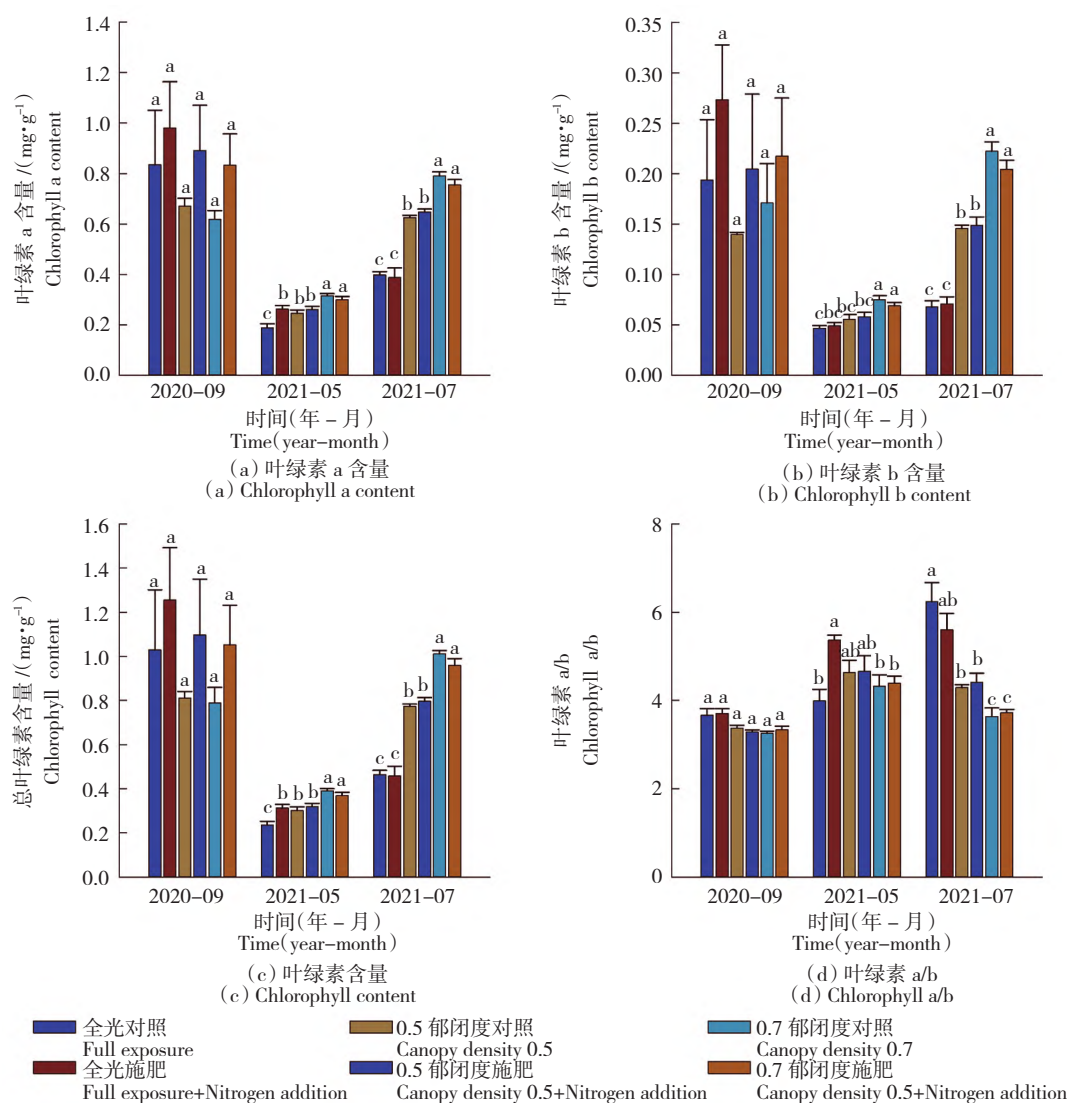
2.2.2 光照与氮添加对红皮云杉幼树叶绿素含量(质量分数,下同)的影响

光条件在9月对叶绿素含量影响不显著($P>0.05$);光条件在5和7月份对叶绿素a、b和总叶绿素含量影响显著($P<0.05$),随着郁闭度增加,叶绿素a、b和总叶绿素含量均呈增加趋势;光条件在5和9月对叶绿素a/b影响不显著($P>0.05$),在7月对叶绿素a/b影响显著,0.7郁闭度样地叶绿素a/b显著低于全光和0.5郁闭度样地($P<0.05$,低于全光样地42%,0.5郁闭度样地15%),随着郁闭度增加,叶绿素a/b降低9,如图1所示。

氮添加在7和9月对叶绿素含量和叶绿素a/b

影响不显著($P>0.05$);氮添加在5月全光条件下显著增加叶绿素a、总叶绿素含量和叶绿素a/b($P<0.05$,分别高于对照样地40%、33%和35%),在0.5郁闭度条件下氮添加增加叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量,但未达到显著水平,如图1所示。

双因素方差分析结果表明,光条件是影响红皮云杉幼树叶绿素a、b和总叶绿素含量及叶绿素a/b的主要限制因子($P<0.05$),在5月氮添加是叶绿素a含量和叶绿素a/b的主要限制因子($P<0.05$)。整体上随着郁闭度增加,叶绿素含量增加,叶绿素a/b逐渐降低,但氮添加影响较小。



同一月不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Different lowercase letters in the same month indicate significant difference ($P<0.05$). The same below

图1 不同光条件和氮添加下红皮云杉幼树针叶叶绿素含量变化

Fig. 1 Changes in chlorophyll content of *Picea koraiensis* saplings needles under different light conditions and N addition

2.2.3 光照与氮添加对红皮云杉幼树针叶氮、磷、钾化学计量的影响

光条件在 2020 年 9、2021 年 5 和 2021 年 7 月对红皮云杉幼树叶全氮含量影响显著 ($P < 0.05$), 随着郁闭度增加, 在 5 月叶全氮含量先增加后降低, 7 和 9 月则增加; 光条件在 5 和 7 月对叶全磷含量影响不显著 ($P > 0.05$), 在 9 月对叶全磷含量影响显著 ($P < 0.05$), 随着郁闭度增加, 在 5 月叶全磷含量升高, 7 和 9 月则降低; 光条件在 9 月对叶全钾含量影响不显著 ($P > 0.05$), 在 5 和 7 月对叶全钾含量影响显著 ($P < 0.05$), 随着郁闭度增加, 在 5 月叶全钾含量升高, 7 和 9 月则降低; 光条件在 5 和 7 月对叶全氮/全磷影响不显著 ($P > 0.05$), 在 9 月对叶全氮/全磷影响显著 ($P < 0.05$), 随着郁闭度增加, 在 5 月叶全

氮/全磷先增加后降低, 7 和 9 月则增加, 如图 2 所示。

氮添加在 9 月 0.5 郁闭度下显著提高叶全氮含量 ($P < 0.05$), 0.7 郁闭度下显著降低叶全磷含量 ($P < 0.05$, 低于对照样地 55%), 其他条件下对叶全磷含量影响不显著; 氮添加对叶全钾含量影响显著 ($P < 0.05$), 降低叶全钾含量; 氮添加对叶全氮/全磷影响不显著, 如图 2 所示。

双因素方差分析结果表明, 光条件是影响红皮云杉幼树叶全氮、全磷、全钾含量与叶全氮/全磷的主要限制因子 ($P < 0.05$), 氮添加是叶全氮/全磷的主要限制因子 ($P < 0.05$)。叶氮、磷、钾养分含量在不同月份之间没有较为一致的变化规律, 其中氮含量以 0.5 郁闭度条件下较高, 磷含量以全光条件下较高, 钾含量在各处理间较为一致, 氮磷之比为 0.7 郁闭度条件下较高。

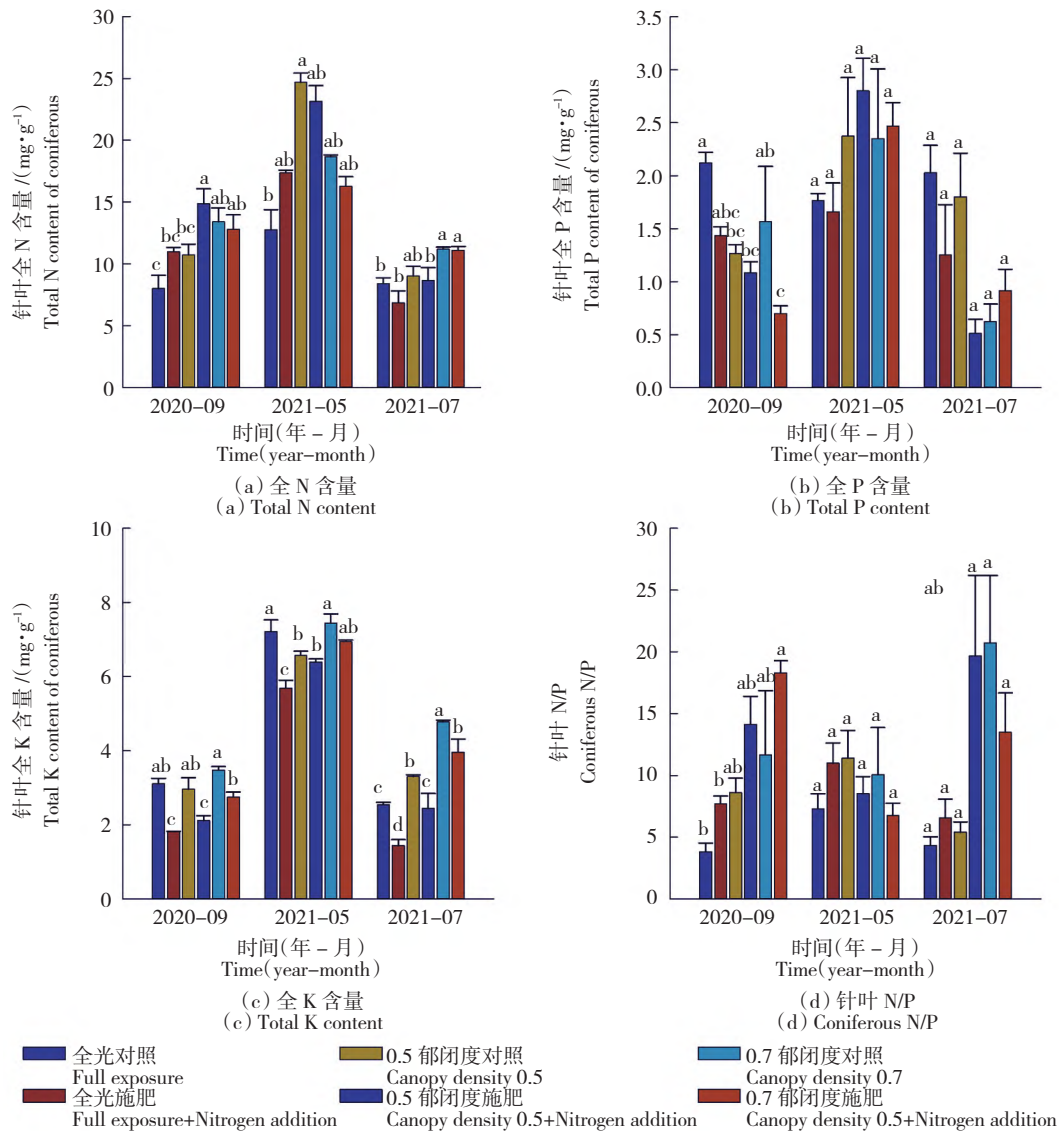


图 2 不同光条件和氮添加下红皮云杉幼树氮、磷、钾含量变化

Fig. 2 Changes in N, P and K contents of *Picea koraiensis* saplings under different light conditions and N addition

3 结论与讨论

3.1 光照与氮添加对红皮云杉幼树形态和生长速度的影响

光条件与营养元素含量是植物生长发育至关重要的因子。本研究探讨光条件与氮添加二者对红皮云杉生长的协同作用,发现光条件是影响红皮云杉幼树径生长的主要限制性因子($P < 0.05$),二者交互作用是影响红皮云杉高径比的主要限制性因子($P < 0.05$)。以往研究发现,全光条件下云杉生长最好,随着光强度降低,生长减缓^[28-29],氮添加对云杉苗木的高生长与径生长具有促进作用^[30-31],与本研究结论相似。落叶松林下红皮云杉幼树有着较好的生长势头,0.4~0.6郁闭度下树高年生长量与造林保存率高于全光下^[25,32],与本研究结论不同,可能是因为本研究红皮云杉幼树已达到生长旺盛期,对光需求增大。全光下红皮云杉树高、地径年均生长量高于0.7郁闭度样地,生长量高径比低于0.7样地,证实了光条件对红皮云杉幼树生长具有重要影响。出现全光、氮添加条件下高径年生长量比最小的原因可能为全光条件下幼树对于光的竞争减弱,转而提高了径生长^[33]。在低光强下红皮云杉生长得更高,冠幅更大,目的为增强对光的捕获能力^[34]。

3.2 光照与氮添加对红皮云杉幼树叶形态与功能的影响

本研究中,光条件与氮添加是影响红皮云杉幼树叶比叶面积和干物质含量的主要限制性因子($P < 0.05$),叶是植物进化过程中对环境变化比较敏感且可塑性较大的器官,环境变化常导致叶的长、宽、厚以及叶绿素含量与养分含量的变化与适应^[35]。在光照条件对叶形态的研究中发现,当光条件减弱时,植物为了保证自身生长,需要增强光的捕获能力,进行必需的光合作用,叶长度、面积、体积增加则可增强叶片细胞对光的捕获能力,有利于提高光合能力^[36-37],而氮添加对叶形态的影响不显著^[38]。本研究结果表明,光条件与氮添加对红皮云杉幼树叶长、叶面积影响不显著,但对比叶面积和叶干物质含量影响显著,具体体现为光照越强,比叶面积越小,叶干物质含量越大,与潘月等^[39]、岳泽伟等^[40]的研究结果相似。

叶绿素与光合作用密切相关,是光合作用的光敏催化剂,其含量和比例也是植物适应光照环境的重要指标^[41]。郁闭度条件对叶绿素含量影响显著,

随着光照条件降低,植物为保证基础的光合作用,选择提高叶绿素a、b与总叶绿素含量,同时叶绿素a/b降低也说明红皮云杉幼树提高了对弱光的捕获能力,而氮添加对红皮云杉幼龄林木叶的叶绿素含量无显著影响,与潘月等^[39]、岳泽伟等^[40]、陈昕^[42]的研究结果相似。

氮、磷、钾养分对植物的生长必不可少,光条件与氮添加一定程度上能够改变红皮云杉幼树叶全氮、全磷、全钾含量。多数研究表明,植物光合速率随着叶全氮含量增加而提高^[43],同时在一定程度上解释了叶绿素含量增加的原因。但本研究氮添加并未显著提高全氮含量,降低全磷含量,与周一平等^[44]的研究结果相反。有研究指出植物全氮和全磷比值对于植物的受限程度具有指示性^[45],红皮云杉幼树叶生长初期具有比较稳定的N:P,到生长旺盛期和生长末期N:P差异较大,说明光条件与氮添加能够改变红皮云杉幼树内部化学平衡。因此认为,红皮云杉幼树可通过自身的调节机制改变叶形态和功能去适应光照与养分环境的不同。虽然光照条件减弱,但红皮云杉能够通过调节叶片比叶面积、干物质含量与叶绿素含量来加强对光的捕获,维持光合能力,保证自身生长发育。

综上所述,红皮云杉幼树具有一定耐荫性,相比氮添加,光条件对红皮云杉幼树生长、叶形态和光合能力的影响更显著,全光氮添加条件下幼树具有较高的树高和地径年生长量,且高径年生长量比最低,可以获得良好生长,氮添加可以促进其光合效率提高。因此,红皮云杉造林时宜选择全光条件或林间开敞度较大、近似全光条件苗木,造林后可通过氮添加提高幼树光合能力以促进生长。

【参考文献】

- [1] 徐化成. 人工林和天然林的比较评价[J]. 世界林业研究, 1991, 4(3): 50-56.
XU H C. A comparative evaluation of the man-made forest and natural forest[J]. World Forestry Research, 1991, 4(3): 50-56.
- [2] 梅梦媛, 雷一东. 我国人工林新时代发展形势分析[J]. 世界林业研究, 2019, 32(3): 73-77.
MEI M Y, LEI Y D. Analysis on development trend of China's plantation in new era[J]. World Forestry Research, 2019, 32(3): 73-77.
- [3] 盛炜彤. 关于我国人工林长期生产力的保持[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 1-14.
SHENG W T. On the maintenance of long-term productivity of plantation in China[J]. Forest Research, 2018, 31(1): 1-14.
- [4] 童冉, 周本智, 姜丽娜, 等. 我国杉木人工林可持续经营面临的问题及发展策略: 基于全国分布区的调查[J]. 世界林业研究,

- 2019, 32(2): 90-96.
- TONG R, ZHOU B Z, JIANG L N, et al. Problems and development strategy for sustainable management of Chinese fir plantation: based on the investigation of its national distribution[J]. World Forestry Research, 2019, 32(2): 90-96.
- [5] 祁鲁玉, 吴峰, 吴瑞雪, 等. 遮阴和不同形态氮素施肥对红松幼苗生长的影响[J]. 森林工程, 2019, 35(4): 1-5.
- QI L Y, WU F, WU R X, et al. Effects of shading and different forms of nitrogen fertilization on the growth of *Pinus koraiensis* seedlings[J]. Forest Engineering, 2019, 35(4): 1-5.
- [6] AMUNDSON R G, ALI A R, BELSKY A J. Stomatal responsiveness to changing light intensity increases rain-use efficiency of below-crown vegetation in tropical savannas[J]. Journal of Arid Environments, 1995, 29(2): 139-153.
- [7] 罗光宇, 陈超, 李月灵, 等. 光照强度对濒危植物长序榆光合特性的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 980-988.
- LUO G Y, CHEN C, LI Y L, et al. Effects of light intensity on the photosynthetic characteristics of *Ulmus elongata*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 980-988.
- [8] 陈璐, 王庆贵, 闫国永, 等. 不同施氮水平对兴安落叶松化学计量特征的影响[J]. 森林工程, 2019, 35(2): 1-10.
- CHEN L, WANG Q G, YAN G Y, et al. Effect of long-term nitrogen deposition on the stoichiometric characteristics of *Larix gmelinii*[J]. Forest Engineering, 2019, 35(2): 1-10.
- [9] PARELLE J, ROUDAUT J P, DUCREY M. Light acclimation and photosynthetic response of beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings under artificial shading or natural Mediterranean conditions[J]. Annals of Forest Science, 2006, 63(3): 257-266.
- [10] SEVILLANO I, SHORT I, CAMPION J, et al. Comparison of photosynthetic performance of *Fagus sylvatica* seedlings under natural and artificial shading[J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 152: 90-96.
- [11] 张宇阳, 于涛, 马文宝, 等. 不同郁闭度对野外回归的梓叶槭幼树形态和生理特征的影响[J]. 生物多样性, 2020, 28(3): 323-332.
- ZHANG Y Y, YU T, MA W B, et al. Physiological and morphological effects of different canopy densities on reintroduced *Acer catalpifolium*[J]. Biodiversity Science, 2020, 28(3): 323-332.
- [12] KATAHATA S I, NARAMOTO M, KAKUBARI Y, et al. Photosynthetic capacity and nitrogen partitioning in foliage of the evergreen shrub *Daphniphyllum humile* along a natural light gradient[J]. Tree Physiology, 2007, 27(2): 199-208.
- [13] LU D L, WANG G G, YAN Q L, et al. Effects of gap size and within-gap position on seedling growth and biomass allocation: is the gap partitioning hypothesis applicable to the temperate secondary forest ecosystems in northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 429: 351-362.
- [14] RONCO F. Influence of high light intensity on survival of planted Engelmann spruce[J]. Forest Science, 1970, 16(3): 331-339.
- [15] ARNOTT J T, MACEY D E. Effect of supplemental light intensity on white spruce, Engelmann spruce, and mountain hemlock seedlings grown under an extended photoperiod[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1985, 15(2): 295-300.
- [16] CHEN H Y H. Responses of some conifers to light availability: survival, growth, morphological characteristics, and physiological behavior[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1997.
- [17] JIA H J, INGESTAD T. Nutrient requirements and stress response of *Populus simonii* and *Paulownia tomentosa*[J]. Physiologia Plantarum, 1984, 62(2): 117-124.
- [18] 张新洁, 陆天宇, 孙海龙, 等. 氮磷添加对水曲柳化学计量特征和养分再吸收的影响[J]. 森林工程, 2019, 35(5): 16-21.
- ZHANG X J, LU T Y, SUN H L, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on nutrient stoichiometry and resorption of *Fraxinus mandshurica*[J]. Forest Engineering, 2019, 35(5): 16-21.
- [19] GULER M, KOVanci I. Relationship between wheat yields and the amount of available water and nitrogen in the soil[J]. Tarimsal Arastirma Dergisi, 1980, 2(3): 111-123.
- [20] CURTIS P S, ZAK D R, PREGITZER K S, et al. Above- and below-ground response of *Populus grandidentata* to elevated atmospheric CO₂ and soil N availability[J]. Plant and Soil, 1994, 165(1): 45-51.
- [21] WANG Q K, WANG S L, LIU Y X. Responses to N and P fertilization in a young *Eucalyptus dunnii* plantation: microbial properties, enzyme activities and dissolved organic matter[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 40(3): 484-490.
- [22] MAGILL A H, ABER J D, BERNTSON G M, et al. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests[J]. Ecosystems, 2000, 3(3): 238-253.
- [23] 赵春香, 宋维秀, 卿丽媛, 等. 集雨托盘在樟子松、云杉等树种抗旱造林中的应用[J]. 防护林科技, 2019(11): 17-19.
- ZHAO C X, SONG W X, QING L Y, et al. Application of rainwater collection tray in drought resistant afforestation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Picea* spp. [J]. Protection Forest Science and Technology, 2019(11): 17-19.
- [24] 张兰, 从建华, 刘官久, 等. 引种黑云杉容器育苗试验研究[J]. 林业勘查设计, 2019(2): 98-100.
- ZHANG L, CONG J H, LIU G J, et al. A study on introduction of *Picea mariana* container nursery[J]. Forest Investigation Design, 2019(2): 98-100.
- [25] Salahuddin, 董慧, 及利, 等. 落叶松人工林下红皮云杉和青海云杉的幼苗更新[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(3): 28-33.
- SALAHUDDIN, DONG H, JI L, et al. Regeneration of spruce seedlings (*Picea koraiensis* and *Picea crassifolia*) under larch (*Larix olgensis*) plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(3): 28-33.
- [26] 楚孔利, 郑秀云. 对红皮云杉造林和透光抚育技术的研究[J]. 林业勘查设计, 2002(2): 35-36.
- CHU K L, ZHENG X Y. Study on afforestation and translucency tending technology of *Picea oleracea*[J]. Forest Investigation Design, 2002(2): 35-36.
- [27] 尉建埔, 张洁, 王文娜, 等. 施氮肥对东北帽儿山云杉人工林土壤微生物生物量和群落结构的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(5): 52-56.
- WEI J P, ZHANG J, WANG W N, et al. Effect of nitrogen fertilization on soil microbial biomass and community structure of *Picea koraiensis* plantation in Mao'ershan Mountains of northeastern China[J]. Journal

- of Northeast Forestry University, 2016, 44(5): 52-56.
- [28] 于维君,吴殿新,刘显凤,等. 红皮云杉人工林生长与光照关系的研究[J]. 东北林业大学学报,1993,21(3):89-92.
YU W J, WU D X, LIU X F, et al. Study on the relationship between radiation and growth of *Picea koraiensis*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1993, 21(3): 89-92.
- [29] 吴昊,管英,张宝林. 光照对红皮云杉生长发育及更新效果的影响[J]. 林业科技,1998,23(6):20-21,23.
WU H, GUAN Y, ZHANG B L. Effects of light on growth and regeneration of *Picea rubra* [J]. Forestry Science and Technology, 1998, 23(6): 20-21, 23.
- [30] 王燕,晏紫依,苏艳,等. 不同施肥方法对欧洲云杉生长生理和根系形态的影响[J]. 西北林学院学报,2015,30(6):15-21.
WANG Y, YAN Z Y, SU Y, et al. Effects of different fertilizing methods on growth, physiological characteristics and root morphological traits of *Picea abies*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(6): 15-21.
- [31] 任晓光,张士俊,才巨峰,等. 红皮云杉人工幼林施肥试验研究[J]. 吉林林业科技,2005,34(5):26-29.
REN X G, ZHANG S J, CAI J F, et al. A trial study on fertilizing after young growth plantation of *Picea koraiensis*[J]. Forestry Science and Technology, 2005, 34(5): 26-29.
- [32] 王婉茹,刘盛,田佳歆,等. 郁闭度对长白落叶松人工林下更新幼树生长的影响[J]. 北华大学学报(自然科学版),2020,21(6):724-729.
WANG W R, LIU S, TIAN J X, et al. Effect of canopy density on regeneration growth of young trees under *Larix olgensis* plantation [J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2020, 21(6): 724-729.
- [33] 刘从,田甜,李珊,等. 中国木本植物幼苗生长对光照强度的响应[J]. 生态学报,2018,38(2):518-527.
LIU C, TIAN T, LI S, et al. Growth response of Chinese woody plant seedlings to different light intensities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 518-527.
- [34] 周永斌,姜萍,王庆礼. 长白山不同针叶树耐阴性的形态适应及内源激素调控[J]. 应用生态学报,1999,10(5):525-528.
ZHOU Y B, JIANG P, WANG Q L. Morphological plasticity of shade tolerance of three conifers in Changbai Mountain and regulation of hormone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 525-528.
- [35] 李芳兰,包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应[J]. 植物学通报,2005,40(S1):118-127.
LI F L, BAO W K. Responses of the morphological and anatomical structure of the plant leaf to environmental change[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2005, 40(S1): 118-127.
- [36] ROACAAS G, SCARANO FLS F R, BARROS C F. Leaf anatomical variation in *Alchornea triplinervia* (Spreng) Mull. Arg. (Euphorbiaceae) under distinct light and soil water regimes[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2001, 136(2): 231-238.
- [37] 陈斌,李洪瑶,刘筱玮,等. 不同光照强度对新娘草叶片形态建成及超微结构的影响[J]. 草业学报,2019,28(7):175-185.
CHEN B, LI H Y, LIU X W, et al. Effects of different light intensities on morphogenesis and ultrastructure of *Gibasis pellucida* leaf [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(7): 175-185.
- [38] 陈铁群,王文娟,黄荣银,等. 热带次生林两种林下植物叶片生理特性对氮磷添加的响应[J]. 应用与环境生物学报,2019,25(3):626-633.
CHEN Y Q, WANG W J, HUANG R Y, et al. Response of foliar physiological characteristic within two understory plant species to chronic nitrogen and phosphorus addition in a secondary tropical forest[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(3): 626-633.
- [39] 潘月,张宪权,叶康,等. 不同八仙花品种对遮阴和强光处理的生理响应与评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(1):36-48.
PAN Y, ZHANG X Q, YE K, et al. Physiological responses of ten *Hydrangea macrophylla* cultivars to shading and evaluation of strong light tolerance[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 50(1): 36-48.
- [40] 岳泽伟,李成道,李磊,等. 骆驼刺叶形态和荧光参数对光照的响应[J]. 干旱区研究,2020,37(3):722-728.
YUE Z W, LI C D, LI L, et al. Responses of leaf morphology and fluorescence parameters of *Alhagi sparsifolia* in different light environments[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 722-728.
- [41] 黄俊,郭世荣,吴震,等. 弱光对不结球白菜光合特性与叶绿体超微结构的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(2):352-358.
HUANG J, GUO S R, WU Z, et al. Effects of weak light on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of non-heading Chinese cabbage [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 352-358.
- [42] 陈昕. 遮光与施肥对珍稀植物华木莲(*Sinomanglietia glauca*)光合生理的影响[D]. 南昌:江西农业大学,2017.
CHEN X. Effects of shading and fertilizing on photosynthetic characteristics of an endangered plant *Sinomanglietia glauca* [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.
- [43] VAZQUEZ DE ALDANA B R, BERENDSE F. Nitrogen-use efficiency in six perennial grasses from contrasting habitats[J]. Functional Ecology, 1997, 11(5): 619-626.
- [44] 周一平,张玉革,马望,等. 氮添加和干旱对呼伦贝尔草原5种植物性状的影响[J]. 生态环境学报,2020,29(1):41-48.
ZHOU Y P, ZHANG Y G, MA W, et al. Effects of nitrogen addition and water reduction on the traits of five plants in Hulunbeir grassland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(1): 41-48.
- [45] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. The Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441.