

DOI: 10.5846/stxb202112293706

王艳杰, 国庆喜. 吉林东部天然林林下光质分布特征. 生态学报, 2023, 43(3): 1185-1193.

Wang Y J, Guo Q X. Distribution characteristics of undergrowth light quality of natural forests in eastern Jilin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1185-1193.

吉林东部天然林林下光质分布特征

王艳杰, 国庆喜*

东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

摘要:天然林林下光质对乔木幼苗以及灌草的组成与更新具有重要的生态学意义。但目前对于林下光质的研究仍然有限。以吉林东部地区天然林为例,通过调查乔木数据和林下光质数据,基于移动窗口法分析不同空间尺度森林冠层结构与林下光质的关系。结果表明:不同林型下红光光子通量密度(R)与蓝光光子通量密度(B)存在差异。其中沙松-千金榆-花楷槭混交林林下蓝光光子通量密度最小,而沙松-紫椴-臭冷杉混交林和长白落叶松纯林林下最大。随着尺度的增大,天然林乔木胸高断面积与R/PFD(红光/光子通量密度比值)和B/PFD(蓝光/光子通量密度比值)的比值呈显著正相关($P<0.05$)。并且随着尺度的增加,相关系数总体逐渐增大,在35m处达到峰值。在此基础上在南向、东向和西向各延伸10m时呈现显著正相关($P<0.05$)。在该尺度下分析优势树种对林下R/PFD和B/PFD比值的影响时发现,R/PFD与B/PFD比值随着针叶林胸高断面积的增加而增加。相对于阔叶林来说,多数林型针叶林下的冠层结构与林下R/PFD和B/PFD比值之间显著正相关($P<0.05$)。在不同树种下,乔木冠层结构对R/PFD和B/PFD比值的影响不同。总体而言,冠层结构在尺度以及树种组成上存在的差异能在一定程度上影响林下R/PFD和B/PFD比值的分布。本研究结果将有助于我们了解冠层结构对林下光质分布的影响机制,从而为天然林的更新、演替、恢复以及合理经营提供理论依据。

关键词:天然林;光质;主要种;尺度;移动窗口法

Distribution characteristics of undergrowth light quality of natural forests in eastern Jilin

WANG Yanjie, GUO Qingxi*

Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: The understory light quality of natural forests has importantly ecological significance for the composition and regeneration of tree seedlings, shrubs and grass. However, the knowledge on the understory light quality is still lacking. In this study, taking natural forests in eastern Jilin Province as an example, by monitoring tree data and understory light quality data, the relationship between forest canopy structure and understory light quality at different spatial scales was analyzed based on the moving window method. The results showed that there were differences between the red light photon flux density (R) and the blue light photon flux density (B) under different forest types. Among them, the blue light photon flux density was the lowest under the mixed forest of *Abies holophylla*-*Carpinus cordata*-*Acer ukurunduense* mixed forest, while the mixed forest of *Abies holophylla*-*Tilia amurensis*-*Abies nephrolepis* mixed forest and *Larix olgensis* pure forest were the largest. As the scale increased, the tree basal area of natural forest was significantly positively correlated with the ratios of R/PFD (red light photon flux density ratio/photon flux density ratio) and B/PFD (blue light photon flux density ratio/photon flux density ratio) ($P<0.05$). With the increase of scale, the correlation coefficient increased gradually, reaching a peak at 35 m. On this basis, there was a significantly positive correlation ($P<0.05$) when it was extended 10 m to the

基金项目:科技基础资源调查专项(2019FY101702)

收稿日期:2021-12-29; 网络出版日期:2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gqx@nefu.edu.cn

south, east, and west, respectively. When analyzing the influence of the dominant tree species on the ratios of R/PFD and B/PFD under this scale, it was found that the ratios of R/PFD and B/PFD increased with the increase of the basal area of the coniferous forest. Compared with the broad-leaved forest, the canopy structure under most coniferous forests was significantly positively correlated with the ratios of R/PFD and B/PFD under forest ($P < 0.05$). Under different tree species, the tree canopy structure had different effects on R/PFD and B/PFD ratios. In general, differences in canopy structure in scale and tree species composition can affect the distribution of R/PFD and B/PFD ratios under forest to a certain extent. This study would help us understand the influence mechanism of canopy structure on the distribution of understory light quality, so as to provide a theoretical basis for natural forest regeneration, succession, restoration and rational management.

Key Words: natural forest; light quality; main species; scale; moving window method

光是植物进行光合作用并赖以生存的前提条件,也是林下最重要的环境因子之一^[1-3]。其主要通过光照强度、光照质量和光照周期的形式参与调节林下植物生长、代谢、发育和形态建成^[4-5]。相对于光照强度和光照周期来说,光照质量作为重要的光环境因子,近年来日益受到人们关注。光质是促进植物萌发、进行光合作用和有机物积累的重要因素之一^[6]。光质对植物的调控作用主要体现在植物光合色素的合成、叶绿体的形成、叶片伸展、气孔运动以及碳同化等方面^[7]。光谱中红光和蓝光是调控的主要波段^[8]。这是由于植物对光谱不同波段敏感度不同,在可见光光谱中,其光感受器所能感受到的波长主要是蓝色和红色。研究发现红光有利于紫背天葵的干物质积累并使可溶性糖含量显著增加,同时也增大植物叶片面积,提高叶片生长速率^[9]。蓝光可以增加苍耳叶片气孔开度^[10-11],此外还可以增加烟草叶片厚度以及叶绿素含量^[12]。

当阳光透过森林冠层到达林下时,由于冠层的吸收、反射和透射,导致林下光质分布不均^[13]。研究表明,乔木冠层结构差异会在一定程度上影响林下光质^[14]。一方面,森林冠层的三维结构导致林下环境的复杂性,因此林下的光质具有高度的空间异质性^[15]。例如 Endler 等^[16]研究发现,当太阳光不被云层阻挡时,由于天空和植被的相对比例不同,林地、林缘和林窗这 3 种不同森林结构的特征光谱分别是黄绿色、蓝色和红色。另一方面,林型与组成树种不同也会显著地影响林下光质的分布^[17]。对于橡树、松树和云杉而言,在晴朗天空下,针叶林下光谱分布中蓝光部分较阔叶林下更多,橡树林下光谱分布中蓝光部分极低^[18]。但目前冠层对林下光影响的研究主要集中于林下光强^[19],对林下光质的研究并不深入。对于光质的研究主要集中于 LED 室内可控光源^[20],在尺度上则主要集中于景观格局^[21-22],而研究天然林下的光质既可以在明确不同冠层下光质的分布情况的同时又为未来预测林下光质分布及尺度研究方面提供理论支持。

本研究以吉林东部 5 种天然林为研究对象,采用移动窗口法研究不同尺度森林冠层结构对林下光质的影响,以期为天然林林下光质分布以及尺度方面提供数据支持,从而为探讨林下幼树以及灌草的更新机制、推测幼树以及灌草的适应策略以及未来的发展方向提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究地点选在吉林省图们江流域和龙市(41°59'44"—42°57'15"N, 128°21'42"—129°24'17"E, 海拔 250—1676m)。该地区位于吉林省东部,延边朝鲜族自治州南部,地处长白山东麓,图们江上游北岸,地势西南高东北低,山体坡度较大,一般在 15°以上。属温带大陆性季风气候,年均温 5.1℃,无霜期 125d,年降水量 800mm,降水主要集中在 6—9 月,土壤类型主要为暗棕壤。研究区域植被属于长白山植物区系,林分类型以针阔混交林为主。样地内主要树种为长白落叶松(*Larix olgensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、沙松(*Abies holophylla*)、千金榆(*Carpinus cordata*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、山杨(*Populus davidiana*)等,除此之外也有少量红皮云杉(*Picea koraiensis*)。

1.2 样地设置与光质指标测量

本研究于 2020 年 7 月 15 日至 8 月 7 日及 2021 年 7 月 5 日至 8 月 6 日经过踏查后选择地形基本一致的五种天然林类型(臭冷杉-紫椴混交林:ANT;沙松-紫椴-臭冷杉混交林:ATA;沙松-千金榆-花楷槭混交林:ACA;蒙古栎纯林:QMP;和长白落叶松纯林:LOP)为研究对象,同期测量样地数据与光质数据。每个林型设置 0.6hm^2 ($100\text{m}\times 60\text{m}$) 的长方形样地,每个样地区划为 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 的小样方 240 个,调查并记录每个小样方内胸径 $\geq 1\text{cm}$ 木本植物的种类、胸径等信息,同时记录样地内地理坐标、总郁闭度、海拔、坡度、坡位等参数。

光质数据的测量时间选在晴朗无云的 9:30—11:30,以保证光线充足。使用美国生产的 Li-180 便携式地物光谱仪(产地为美国内布拉斯加州林肯市)在每个与乔木数据对应的 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 小样方中进行测量,测量高度为 1.3m ,高于灌木层高度。每个小样方测量 3 次数据,同一样方取样时沿小样方南北向中线每 1.6m 测量一次,将 3 次数据进行筛选后取平均值作为一组数据进行计算。选取红光光子通量密度 RPF(波长范围 $600\text{—}700\text{nm}$,简称 R)、蓝光光子通量密度 BPF($400\text{—}500\text{nm}$,简称 B) 和光子通量密度 PFD(波长范围 $380\text{—}780\text{nm}$,简称 PFD) 表征林下光质数据。

1.3 数据处理

Whittaker^[23] 最早提出移动窗口法概念,用于分析植被沿水分梯度的变化,随后被应用于景观以及最小面积等方面的研究。本研究利用移动窗口法计算乔木冠层结构与林下光质之间的相关性。将窗口分别设置为边长 5m 、 10m 、 15m 、……、 50m 的正方形(如图 1,图中每个小正方形方框代表边长 5m 的正方形),以南向作为正上方,以样地左上角作为起始位置,统计窗口内红光、蓝光光子通量密度与乔木胸高断面积平均值并将其作为一组数据,然后依次将窗口向右移动 5m ,再次统计新窗口对应指标数据,当窗口右侧与样地右侧边界重合后自动向下移动 5m 并从左至右移动并继续该操作,直至窗口遍历整个样地。

考虑到周围乔木层对上述样方光质数据的影响^[24],在每个上述样方南向、东向和西向依次延伸 5m 和 10m ,计算每个未延伸窗口的红光、蓝光光子通量密度与延伸后整体窗口乔木胸高断面积平均值并将其作为一组数据,将新形成的窗口按照上述操作步骤移动,移动过程中始终保持整体窗口位于样地内,直至遍历整个样地。

相关研究表明,乔木胸高断面积与乔木树高之间存在线性正相关^[25],叶鹏等^[26] 的研究也表明,胸高断面积与郁闭度以及树冠面积之间存在显著正相关。利用乔木断面积这一指标可以在一定程度上解释乔木树高与树冠结构,因此本研究以胸高断面积表征乔木冠层结构进行计算。利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 23.0 软件对数据统计分析,R 3.6.3 计算 Pearson 相关系数以及显著性,使用 SigmaPlot 14.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同林型下红光与蓝光光子通量密度差异

从表 1 中可知,红光与蓝光光子通量密度平均值 $\text{LOP} > \text{ANT} > \text{ATA} > \text{QMP} > \text{ACA}$,五种林型中长白落叶松纯林中位数最大,沙松-千金榆-花楷槭混交林与沙松-紫椴-臭冷杉混交林的中位数在五种林型中最小。其中沙松-千金榆-花楷槭混交林的红光与蓝光光子通量密度平均值与中位数最小,说明其冠层对红光与蓝光部分吸收较多,而导致林下分布较少。沙松-紫椴-臭冷杉混交林偏度峰度最大,其林内红光与蓝光光子通量密度分布差异性较大;而长白落叶松纯林平均值、中位数与最大值都在五种林型中最大,且偏度和峰度在五种林型中最小,说明其林内红光与蓝光光子通量密度值稳定在一定水平,在林内分布均匀。

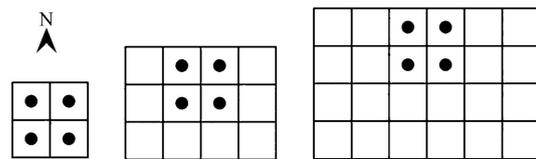


图 1 不同尺度窗口示例

Fig.1 Examples of different scale windows

表 1 五种林型的红、蓝光光子通量密度描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of light quality under five forest types

林分类型 Stand type	指标 Index	平均值 Mean/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	中位数 Median/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	最小值 Minimum/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	最大值 Maximum/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
ANT	R	23.62	9.35	1.98	311.26	3.68	19.44
	B	16.03	7.39	1.27	199.50	3.67	19.29
ATA	R	18.52	1.96	1.06	565.29	7.22	65.46
	B	12.43	3.47	0.58	376.44	7.25	66.20
ACA	R	13.16	5.09	0.68	325.29	4.99	29.55
	B	8.71	1.31	0.33	219.47	5.03	30.20
QMP	R	18.64	9.79	0.00	386.25	6.40	47.96
	B	12.60	7.33	0.01	232.73	6.19	44.92
LOP	R	99.12	40.79	5.36	781.31	2.92	8.12
	B	72.55	32.85	4.04	558.40	2.94	8.36

ANT:臭冷杉-紫椴混交林 *Abies nephrolepis-Tilia amurensis* mixed forest; ATA:沙松-紫椴-臭冷杉混交林 *Abies holophylla-Tilia amurensis-Abies nephrolepis* mixed forest; ACA:沙松-千金榆-花楷槭混交林 *Abies holophylla-Carpinus cordata-Acer ukurunduense* mixed forest; QMP:蒙古栎纯林 *Quercus mongolica* pure forest; LOP:长白落叶松纯林 *Larix olgensis* pure forest; R:红光光子通量密度 Red light photon flux density; B:蓝光光子通量密度 Blue light photon flux density

2.2 不同尺度下乔木层对 R/PFD 和 B/PFD 比值的影响

五种天然林不同尺度下乔木胸高断面积与 R/PFD 比值的相关系数变化如图 2 所示,图中各点代表乔木断面积与 R/PFD 比值在不同尺度下显著性 ($P < 0.05$) 时对应的相关系数。图中显示,随着尺度的增加,不同林型下乔木胸高断面积与 R/PFD 比值呈现正相关,在 25m 以上相关系数除长白落叶松纯林外均高于 0.5,在 35m 不同林型相关系数达到峰值,之后不同林型相关系数均有不同程度下降;各林型不同尺度胸高断面积与 B/PFD 比值的相关系数变化图中显示蒙古栎纯林胸高断面积与 B/PFD 比值呈负相关,而长白落叶松纯林在 5—15m 尺度下胸高断面积与蓝光占比呈负相关,在 20m 以上呈正相关,整体胸高断面积与 B/PFD 比值相关系数变化趋势与乔木胸高断面积与 R/PFD 比值的相关系数变化一致。

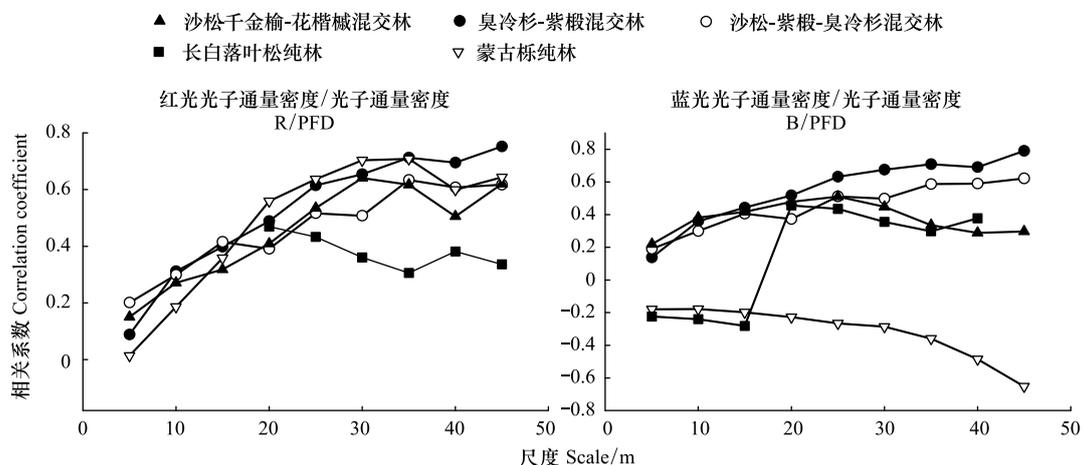


图 2 五种林型不同尺度下乔木胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值相关系数的变化

Fig.2 Changes in correlation coefficients between tree basal area and R/PFD and B/PFD ratio under five forest types at different scales
R:红光光子通量密度 Red light photon flux density; B:蓝光光子通量密度 Blue light photon flux density; PFD:光子通量密度 Light photon flux density

在图 2 基础上延伸不同距离下五种林型内乔木胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值相关系数对比图如

图 3,图中表示不同尺度基础上在东向、西向和南向分别延伸 5m 和 10m 情况下的对比。据图 3 可知,延伸后 5 种林型整体上与未延伸窗口(图 2)趋势表现一致,但较未延伸窗口相关系数整体增大,表明周围样地乔木层显著影响该样地 R/PFD 和 B/PFD 比值($P<0.05$)。延伸 10m 后的各林型胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值相关系数高于延伸 5m 尺度,说明林下 R/PFD 和 B/PFD 比值在周围 10m 尺度相比于 5m 尺度下对该样地产生更大影响。各林型相关系数在 35m 尺度上达到最大值。

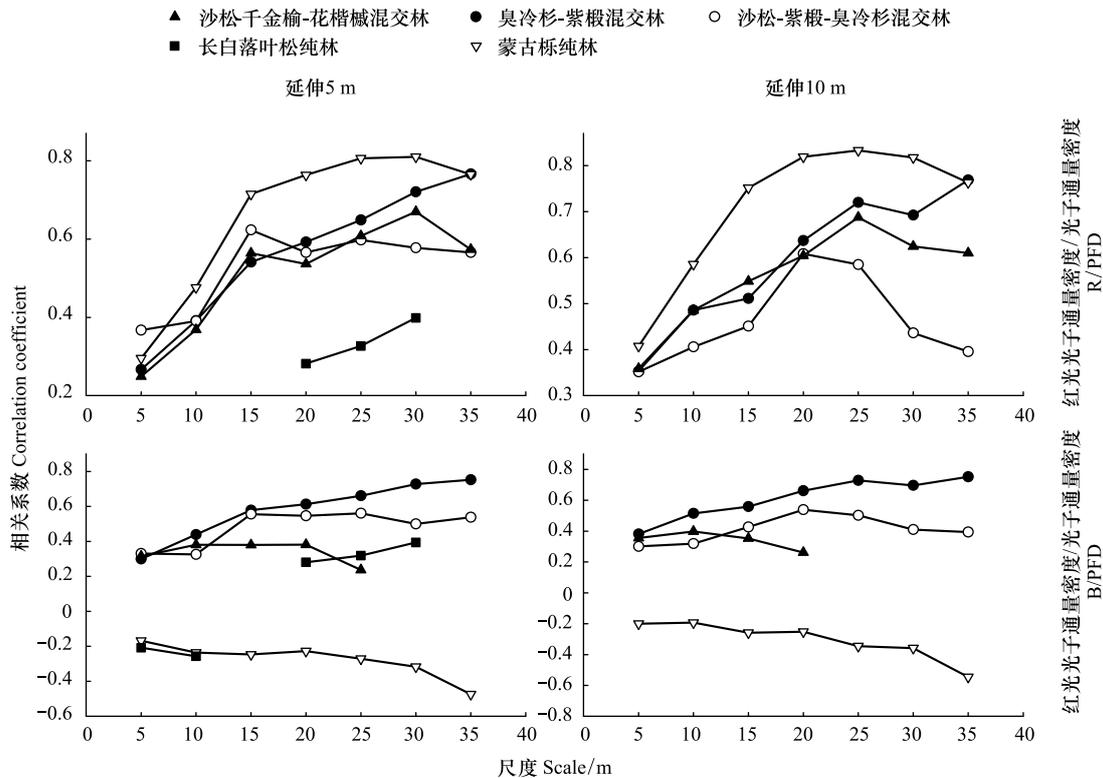


图 3 延伸不同尺度下乔木胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值 相关系数对比

Fig.3 Comparison of correlation coefficients between tree basal area at breast height and the ratio of R/PFD and B/PFD at different scales

2.3 不同林型优势种对 R/PFD 和 B/PFD 比值的影响

上述结果表明:在 35m 尺度基础上延伸 10m 时林下 R/PFD 和 B/PFD 比值与乔木胸高断面积的相关系数最大,相关性最强,因此以下研究基于此尺度。臭冷杉-紫椴混交林中主要树种胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值的关系如图 4。由图 4 可知,紫椴胸高断面积与 R/PFD 比值($P=0.290$)和 B/PFD 比值($P=0.247$)均呈现不显著的正相关,而臭冷杉胸高断面积与 R/PFD 比值呈显著正相关($R^2=0.417, P<0.001$),与 B/PFD 比值也呈显著正相关($R^2=0.417, P<0.001$)。

图 5 为沙松-紫椴-臭冷杉混交林中红蓝光在光子通量密度中所占比例与乔木胸高断面积的关系情况。在图 5 中沙松($R^2=0.395, P<0.001$)的胸高断面积与 R/PFD 比值呈现显著负相关;紫椴($P=0.425$)不显著;臭冷杉($R^2=0.355, P<0.001$)呈显著正相关。在图 5 中沙松($P=0.202$)和紫椴($P=0.363$)的胸高断面积与 B/PFD 比值均不显著,而臭冷杉($R^2=0.458, P<0.001$)显著正相关。

沙松-千金榆-花楷槭混交林中胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值如图 6 所示,三种树种在不同 R/PFD 和 B/PFD 比值下均呈显著正相关,随着乔木胸高断面积的增加,红光与蓝光所占比例逐渐增大。在图 6 中混交林胸高断面积与 R/PFD 比值的回归系数花楷槭>沙松>千金榆;在混交林胸高断面积与 B/PFD 比值的回归系数中沙松>花楷槭>千金榆。

图 7 与图 8 为蒙古栎纯林和长白落叶松纯林 R/PFD 和 B/PFD 比值随乔木胸高断面积的变化情况。图 7

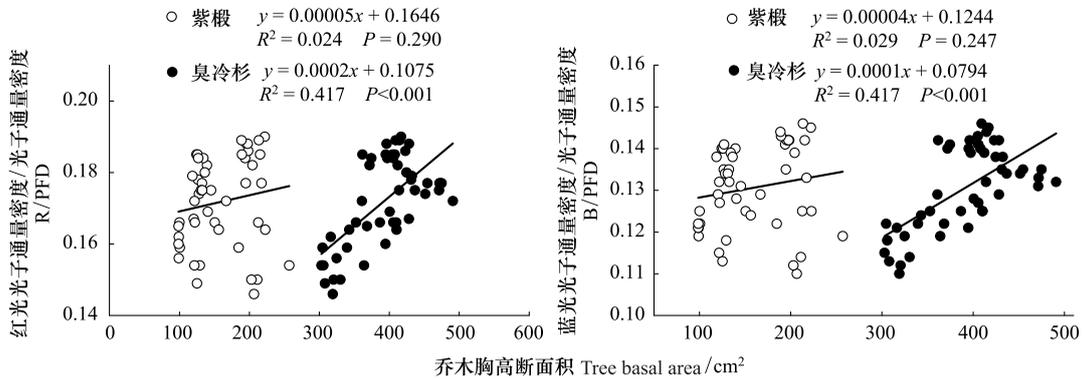


图 4 臭冷杉-紫椴混交林中乔木胸高断面面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值的关系

Fig.4 The relationship between tree basal area and R/PFD and B/PFD ratio in the mixed forest of ANT

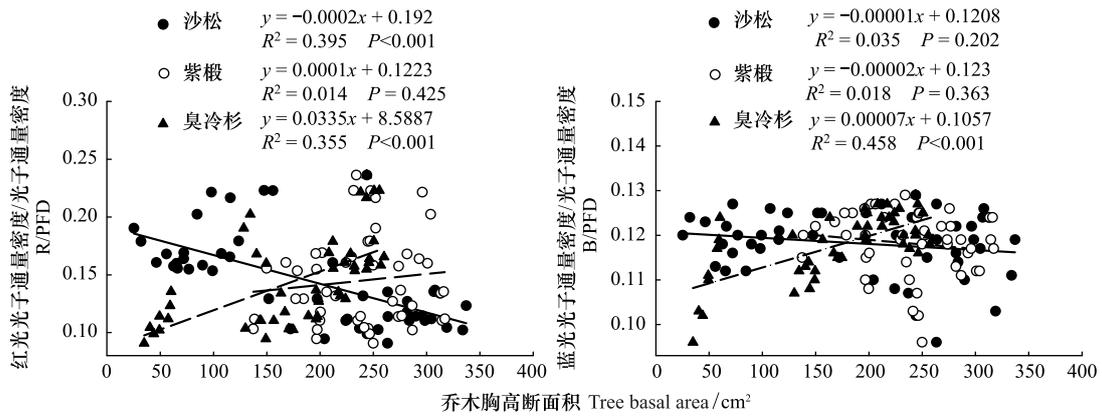


图 5 沙松-紫椴-臭冷杉混交林中乔木胸高断面面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值的关系

Fig.5 The relationship between tree basal area and R/PFD and B/PFD ratio in the mixed forest of ATA

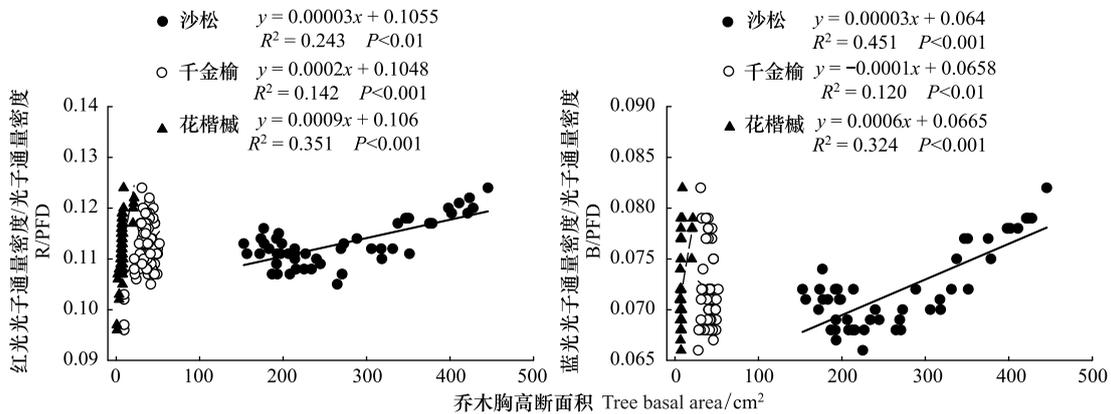


图 6 沙松-千金榆-花楷槭混交林中乔木胸高断面面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值的关系

Fig.6 The relationship between tree basal area and R/PFD and B/PFD ratio in the mixed forest of ACA

中蒙古栎胸高断面面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值均不呈现显著相关,山杨 ($R^2 = 0.525, P < 0.001$) 和长白落叶松 ($R^2 = 0.872, P < 0.001$) 胸高断面面积与 R/PFD 比值呈显著正相关且回归系数长白落叶松 > 山杨,其中山杨 ($P = 0.537$) 胸高断面面积与 B/PFD 比值不显著相关,长白落叶松胸高断面面积与 B/PFD 比值显著相关 ($R^2 = 0.167,$

$P < 0.001$)但远小于在 R/PFD 的回归系数值 ($R^2 = 0.872, P < 0.001$)。长白落叶松纯林胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值关系如图 8 所示,长白落叶松胸高断面积与 B/PFD 比值 ($R^2 = 0.023, P = 0.302$) 和 B/PFD 比值 ($R^2 = 0.029, P = 0.265$) 均不显著,整体 B/PFD 比值高于 B/PFD 比值。

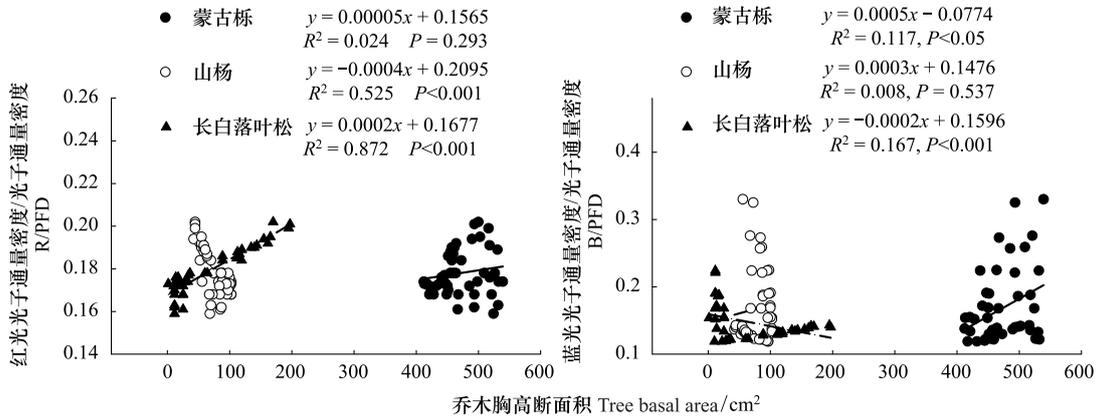


图 7 蒙古栎纯林中乔木胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值的关系

Fig.7 The relationship between tree basal area and light quality (R/PFD and B/PFD ratio) in QMP

3 讨论

通过对天然林林下红蓝光光子通量密度的特征分析可知,沙松-千金榆-花楷槭混交林下红蓝光光子通量密度最小,而沙松-紫椴-臭冷杉混交林和长白落叶松纯林最大。相关研究表明,针叶林林下 R/PFD 和 B/PFD 比值高于阔叶林^[27]。Leuhner 和 Menzel^[28]对云杉-山毛榉林下光谱中红光部分的分析发现,在山毛榉叶片脱落前对红光部分的吸收高于云杉,而在叶片脱落后,由于冠层对光质的吸收减少导致林下红光部分升高,与本研究结果一致。因尺度不同所形成的不同森林结构强烈影响林下光质的分布格局^[29-30]。不同的尺度条件下,森林冠层组成结构不同,导致林下光质分布存在差异^[31]。本研究显示 35m 尺度下乔木与 R/PFD 和 B/PFD 比值的相关关系达到最大值,与杨焕莹等^[32]的研究结果相符。此外,太阳直射的光谱组成中红光和蓝光部分强烈依赖于太阳仰角^[33-34],因此相邻样地对该样地 R/PFD 和 B/PFD 比值也具有一定程度的影响。本研究中,在窗口南向、东向和西向延伸 10m 尺度时相关性最强,表明随着尺度的增大,相邻样地对样地 R/PFD 和 B/PFD 比值的影响逐渐增大。但 Lavery 等^[24]研究发现,在柾木林中朝南、朝北边缘以及东西边缘 5 米对相邻的针叶林影响最大,这可能是由于经过冰冻影响的柾木林,树高从约 15 米减小到 10 米,因而对相邻针叶树的影响尺度减小。

国外学者对挪威云杉冠层林下光质的研究表明:在晴朗天空的条件下,随着太阳光照强度的减弱,林下 B/R 呈增加的趋势^[35]。本研究通过对天然林主要树种乔木胸高断面积与林下 R/PFD 和 B/PFD 比值相关关系的分析可知,针叶林整体胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值呈现正相关,而阔叶林相关性不显著,这可能是由于随着乔木胸高断面积的升高,PAR 的降低程度较红蓝光明显,从而引起 R/PFD 和 B/PFD 比值的增加。本研究显示不同树种下 R^2 都较低,可能是因为研究地为天然林而非人工林,天然林下不同树种冠层间存在

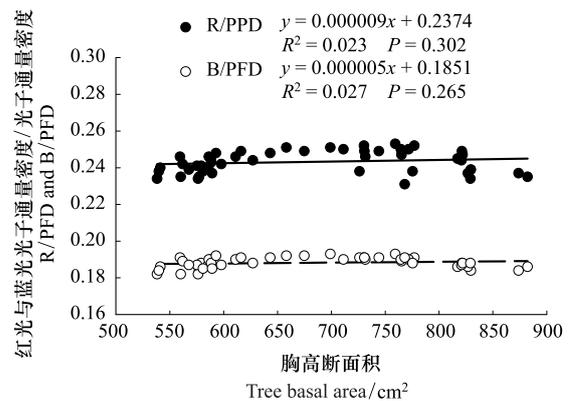


图 8 长白落叶松纯林中长白落叶松胸高断面积与光质 R/PFD 和 B/PFD 比值的关系

Fig.8 The relationship between tree basal area and light quality (R/PFD and B/PFD ratio) in LOP

一定程度的重叠导致对林下 R/PFD 和 B/PFD 比值存在一定程度的影响。

此外,研究表明树种间差异是影响其林下光质的主要因素^[27]。本研究结果的出现主要归因于针叶树与阔叶树冠层结构不同,针叶树林冠开度大,叶面积指数小,冠层结构与林下光质显著相关;而阔叶林林冠开度小,叶面积指数大,因而冠层结构与林下 R/PFD 和 B/PFD 比值相关性小或者不显著^[36]。因此阔叶树冠层对红光与蓝光的吸收远大于针叶树。在森林冠层上方光质相似条件下,针叶树吸收更多的红、蓝光,导致林下 R/PFD 和 B/PFD 比值大于阔叶树。最近研究发现林分光质变化还与叶片特性有关^[37-38],本研究通过对不同林型下不同树种胸高断面积与红蓝光占比的相关关系的研究发现:针叶林和阔叶林中,不同树种下 R/PFD 和 B/PFD 比值不同。在针叶林下,长白落叶松胸高断面积与 R/PFD 比值呈正相关,与 B/PFD 比值呈负相关,而臭冷杉胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值均呈正相关。在阔叶林中,山杨胸高断面积与 R/PFD 比值呈显著负相关,千金榆和花楷槭则呈显著正相关。这可能是由于不同树种枝叶的空间分布、大小、方向以及叶片质量都会影响乔木冠层对光的截获能力^[39],但仍需更多树种加以验证。

4 结论

通过对 5 种天然林不同尺度下的冠层结构以及林下光环境的研究发现:不同林型中沙松-千金榆-花楷槭混交林林下红光与蓝光光子通量密度最小,而沙松-紫椴-臭冷杉混交林和长白落叶松纯林林下红蓝光光子通量密度较其他林型大;随着尺度的增加,不同林型整体趋势呈现出乔木胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值之间的相关系数随之增加,在 35m 尺度下达到最大值,在东向、西向以及南向延伸 10m 时乔木胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值的相关系数达到最大。

天然林中乔木主要树种胸高断面积的增加使林下 R/PFD 和 B/PFD 比值发生变化。针叶树整体胸高断面积与 R/PFD 和 B/PFD 比值呈现正相关,而阔叶树相关性不显著,随着乔木胸高断面积的增加,针叶林通透性更大,R/PFD 和 B/PFD 比值高,而阔叶林下占比相对较低,R/PFD 和 B/PFD 比值在不同树种针叶林与阔叶林中表现也不相同。

综上所述,不同冠层结构对林下 R/PFD 和 B/PFD 比值的影响具有差异性,这在一定程度上影响林下乔木幼苗以及灌草的生长与更新。通过对林分冠层结构以及林下光质的研究,有助于我们解释林下光质的差异性,从而为了解林下森林幼苗的更新机制,推测林下植物的适应策略以及森林未来发展方向提供数据支持。同时为森林保护以及合理经营提供可靠的理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Freitas C R, Enright N J. Microclimatic differences between and within canopy gaps in a temperate rainforest. *International Journal of Biometeorology*, 1995, 38(4): 188-193.
- [2] Downs R J, Borthwick H A, Piringer A A. Light and plants: a series of experiments demonstrating light effects on seed germination, plant growth, and plant development. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, 1966.
- [3] Chazdon R L. Sunflecks and their importance to forest understorey plants. *Advances in Ecological Research*, 1988, 18: 1-63.
- [4] 黄慧敏, 董蓉, 何丹妮, 向运蓉, 张小晶, 陈娟, 陶建平. 冠层结构和光环境的时空变化对紫耳箭竹种群特征的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2129-2138.
- [5] 胡启鹏, 郭志华, 李春燕, 马履一. 不同光环境下亚热带常绿阔叶树种和落叶阔叶树种幼苗的叶形态和光合生理特征. *生态学报*, 2008, 28(7): 3262-3270.
- [6] 汪星星, 陈钢, 戴嘉豪, 曹光球, 曹世江. 光质对杉木幼苗新叶叶绿素荧光规律的影响. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(5): 624-629.
- [7] 吴芳兰, 李书玲, 杨梅, 庞伟灿, 黄靖杰, 李乾林, 樊容源. LED 光质及光周期对香樟楠幼苗生长和光合特性的影响. *广西植物*. DOI:10.11931/guihaia.gxzw202106035
- [8] Huché-Théliér L, Crespel L, Gourrierc J L, Morel P, Sakr S, Leduc N. Light signaling and plant responses to blue and UV radiations—Perspectives for applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 121: 22-38.
- [9] 巩彪, 靳志勇, 刘娜, 刘世琦, 王秀峰, 艾希珍, 魏珉, 史庆华. 光质对紫背天葵生长、次生代谢和抗氧化胁迫的影响. *应用生态学报*,

- 2016, 27(11): 3577-3584.
- [10] Sharkey T D, Raschke K. Effect of light quality on stomatal opening in leaves of *Xanthium strumarium* L. 1. *Plant Physiology*, 1981, 68(5): 1170-1174.
- [11] Zhu J J, Matsuzaki T, Lee F Q, Gonda Y. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182(1/2/3): 339-354.
- [12] 史宏志, 韩锦峰, 远彤, 官春云. 红光和蓝光对烟叶生长、碳氮代谢和品质的影响. *作物学报*, 1999, 25(2): 215-220.
- [13] Lee D W. The spectral distribution of radiation in two neotropical rainforests. *Biotropica*, 1987, 19(2): 161.
- [14] Casal J J, Sanchez R A, Deregibus V A. The effect of plant density on tillering: the involvement of R/FR ratio and the proportion of radiation intercepted per plant. *Environmental and Experimental Botany*, 1986, 26(4): 365-371.
- [15] Parker, G G. Canopy structure and light environment of an old-growth Douglas-fir western Hemlock forest. *NORTHWEST SCI*, 1997, 71(4): 261-270.
- [16] Endler J A. The color of light in forests and its implications. *Ecological Monographs*, 1993, 63(1): 1-27.
- [17] Russo S E, Zhang L, Tan S. Covariation between understorey light environments and soil resources in Bornean mixed dipterocarp rain forest. *Journal of Tropical Ecology*, 2012, 28(1): 33-44.
- [18] Federer C A, Tanner C B. Spectral distribution of light in the forest. *Ecology*, 1966, 47(4): 555-560.
- [19] Messier C, Puttonen P. Spatial and temporal variation in the Bight environment of developing Scots pine stands: the basis for a quick and efficient method of characterizing Bight. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, 25(2): 343-354.
- [20] 刘晓英, 徐志刚, 常涛涛, 郭世荣. 不同光质 LED 弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响. *西北植物学报*, 2010, 30(4): 725-732.
- [21] Rugani T, Diaci J, Hladnik D. Gap dynamics and structure of two old-growth beech forest remnants in Slovenia. *PLoS One*, 2013, 8(1): e52641.
- [22] Tabarelli M, Mantovani W. Gap-phase regeneration in a tropical montane forest: the effects of gap structure and bamboo species. *Plant Ecology*, 2000, 148(2): 149-155.
- [23] Whittaker R H. Vegetation of the Siskiyou mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 1960, 30(3): 279-338.
- [24] Lavery J M, Comeau P G, Prescott C E. The influence of red alder patches on light, litterfall, and soil nutrients in adjacent conifer stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(1): 56-64.
- [25] Oladi J. Developing diameter at breast height (DBH) and a height estimation model from remotely sensed data. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2005, 7: 95-102.
- [26] 叶鹏, 汤孟平. 基于 GIS 的常绿阔叶林郁闭度与树冠重叠度分析. *林业资源管理*, 2021(5): 70-79.
- [27] Ross M S, Flanagan L B, Roi G H L. Seasonal and successional changes in light quality and quantity in the understory of boreal forest ecosystems. *Canadian Journal of Botany*, 1986, 64(11): 2792-2799.
- [28] Leuchner M, Menzel A, Werner H. Quantifying the relationship between light quality and light availability at different phenological stages within a mature mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(1): 35-44.
- [29] Elkie P C, Rempel R S. Detecting scales of pattern in boreal forest landscapes. *Forest Ecology and Management*, 2001, 147(2/3): 253-261.
- [30] 段文标, 王丽霞, 陈立新, 杜珊, 魏全帅, 赵健慧. 红松阔叶混交林林隙大小及光照对草本植物的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 614-620.
- [31] 区余端, 苏志尧. 粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态. *生态学报*, 2012, 32(18): 5637-5645.
- [32] 杨焕莹, 宋建达, 周焘, 金光泽, 姜峰, 刘志理. 林分、土壤及空间因子对谷地云冷杉林叶面积指数空间异质性的影响. *植物生态学报*, 2019, 43(4): 342-351.
- [33] Kim H S, Palmroth S, Thérézien M, Stenberg P, Oren R, Niinemets Ü. Analysis of the sensitivity of absorbed light and incident light profile to various canopy architecture and stand conditions. *Tree Physiology*, 2011, 31(1): 30-47.
- [34] Stenberg P. Simulations of the effects of shoot structure and orientation on vertical gradients in intercepted light by conifer canopies. *Tree Physiology*, 1996, 16(1/2): 99-108.
- [35] Navrátil M, Špunda V, Marková I, Janouš D. Spectral composition of photosynthetically active radiation penetrating into a Norway spruce canopy: the opposite dynamics of the blue/red spectral ratio during clear and overcast days. *Trees*, 2007, 21(3): 311-320.
- [36] Rich P M, Clark D B, Clark D A, Oberbauer S F. Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 65(1/2): 107-127.
- [37] Xu D Q, Gao W, Ruan J. Effects of light quality on plant growth and development. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1217-1234
- [38] Baldini E, Facini O, Nerozzi F, Rossi F, Rotondi A. Leaf characteristics and optical properties of different woody species. *Trees*, 1997, 12(2): 73-81.
- [39] 李根柱, 王贺新, 朱教君. 辽东山区长白落叶松叶面积指数和林冠开阔度的月动态. *东北林业大学学报*, 2009, 37(7): 20-22.