

长白山红松阔叶林主要树种光谱 反射特征对光环境的响应

刘伟国, 范秀华*

(北京林业大学理学院, 北京 100083)

摘要: 利用光谱仪测量了长白山阔叶红松林主要树种在林隙、林下的光谱反射, 对比相同树种在林隙、林下环境条件下的光谱反射特征, 分析光谱指数的差异性, 同时对不同树种的光谱反射特征进行了比较, 以研究林隙、林下环境条件对植物生理的影响, 并推断对植物竞争能力的影响。结果表明, 其中林隙中植被归一化指数 (*NDVI*) 均高于林下, 叶绿素归一化指数 (*Chl NDI*) 也表现出相似的趋势, 而林隙中的光化学反射指数 (*PRI*) 则低于林下。研究发现, 林隙光照较为充足, 但树种所受胁迫可能并未降低, 所以光合速率并没有表现出明显升高。

关键词: 叶绿素; 光谱反射; 林隙

文章编号: 1000-0933(2009)09-4720-07 中图分类号: Q142, Q945, Q948 文献标识码: A

The effect of light on the spectral reflectance of six tree species of broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain

LIU Wei-Guo, FAN Xiu-Hua*

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4720 ~ 4726.

Abstract: Using a spectral analysis system, we measured the spectral reflectance of six tree species in both gaps and under-canopy condition of a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. We compared the characteristics spectral reflectance and spectral indices in different environments, and that of different species in gaps. The data were adopted to study the influences of different environments in gaps and shading on plants' physiological features, and to clarify the effect on plants' competitive ability. The values of *NDVI* in gaps is higher than that under canopy, and the values of *Chl NDI* had the same tendency. In contrast, the values of *PRI* is lower in gaps. Despite the relatively sufficient solar radiation in gaps, the stress from other factors may not be released, which was implied by the fact that the photosynthetic rate was not significantly higher than in shaded area.

Key Words: chlorophyll; spectral reflectance; forest gap

通常当光照射到叶片时, 一部分被叶片吸收, 一部分被反射, 还有一部分透过叶片。由于光谱反射特征与植物叶片的色素含量、叶片的含水量都密切相关^[1,2], 所以测量植物的光谱反射特征可以作为监测植物生长状况、光合作用、水分、受胁迫情况等的有效手段^[3,4]。由于光谱反射特征与叶片结构特征、植被特征等也同样有关系, 所以进一步应用推广有一定困难, 但国内外学者已进行了大量深入的研究和开创性的应用, 如植物色素与光谱反射的相关性、植物随海拔变化的生理适应^[5]、植物对于干旱条件及其它恶劣环境的适应对策^[6-8]、绿色植物生产力的估计^[9]、监测空间格局^[10]、生物多样性研究^[10]、监测植物病虫害情况^[12]及生物入侵格局、

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771716); 国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03A0804)

收稿日期: 2008-09-02; 修订日期: 2009-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bjfanxh@sina.com

用于火灾监测、应用于碳循环和水循环的监测^[13]、环境污染监测^[14]等等。

林隙是森林循环的一个重要阶段,通过改变林内的光照条件,进而改变植物群落的物种组成和群落结构^[15]。但林隙对物种更新的影响随林隙面积大小的不同而不尽相同,大的林隙有利于阳性树种更新,较小林隙更有利于耐阴性物种更新^[16]。对于长白山阔叶红松林已有大量研究,但利用光谱进行研究尚属首次。本研究的目的,一是试图通过植物叶片的光谱反射特征,来探讨林隙、林下环境条件对长白山阔叶红松林主要树种的影响。二是对不同树种进行比较,以期推断林隙、林下环境条件各物种种色素含量、光合速率和所受胁迫情况的差异。目前将光谱反射特征应用于不同物种仍有一定困难^[17],本文结合以前的研究结果^[18~20],在各个树种之间进行了光谱反射特征的比较。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在长白山林区白河林业局光明林场阔叶红松林内进行,海拔高度为 748m,地理坐标为 N42°21′、E128°08′,该区位于长白山北坡,属温带大陆性山地气候,其气候特点是春季干燥多风,夏季温暖多雨,冬季漫长寒冷。年平均气温为 3.3℃,8 月份平均温度 20.5℃,1 月份平均温度 -16.5℃,极端最高温度 32.3℃,极端最低气温 -37.6℃,年平均降水量在 600~900 mm 之间。土壤为山地暗棕色森林土,土层厚度 20~100cm,缓坡排水良好。林内乔木层主要以红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、色木槭(*Acer mono*)三者共同占据优势,还有其他树种如青楷槭(*Acer tegmentosum*)、山杨(*Populus davidiana*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、臭松(*Abies nephrolepis*)。中小乔木以槭属为主,生长繁茂。灌木层主要有东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、东北溲疏(*Deutzia amurensis*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、忍冬(*Lonicera japonica*)等。草本植物主要有山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)、舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)、透骨草(*Phryma leptostachya*)、苔草(*Carex* spp.)、水金凤(*Impatiens nolitangere*)等^[21]。

1.2 研究方法

与以前林隙的调查方法不同^[19,22,23],本研究调查了 60m×100m 的样方范围内所有的林隙(所调查林隙见表 1,仅显示出现所选树种的林隙),此样方位于代表了我国东北针阔混交林典型特征的大样地内(5.2hm²)。选取林隙中常见的 6 种树,分别为蒙古栎、山杨、红松、色木槭、青楷槭、紫椴。主要选择出现在冠空隙及林下(林隙周围 20~30m 范围内)的高度小于 2.0m 的植株。数据采集是在 8 月 10 日、12 日、16 日、20 日、21 日、22 日进行。本研究使用 unispec-SC(美国 PPS 公司)测量叶片光谱反射,测量时卤光灯的光强设定为 100%,整合时间为 4ms,重复扫描次数为 3 次,叶夹上光纤探头与叶片表面成 60°夹角,每 10min 参比 1 次。各树种的取样数见表 2,针叶树每棵树选取成熟、健康并且位于所选样本冠层的叶子 10 针,针叶每针测两个位置,阔叶树每棵树选取成熟、健康并且位于所选样本冠层的叶子 5 片,每片叶子测 5 个不同的位置。由于叶片取下后 12h 内光谱指数变化非常小^[17],因此在叶子采下之后 4h 之内测定的(这段时间保证处于黑暗条件下)测定叶片光谱反射曲线,以便排除不同时间采集的样本所造成的影响。

表 1 所调查的林隙面积等级分布情况

Table 1 Distribution of gap area in this research

林隙面积等级 Gap area(m ²)	50 < M < 100	100 < M < 150	150 < M < 200	200 < M < 250
个数 Amount	8	3	3	4

M 代表林隙面积 M is the sign of gap area (m²)

1.3 数据处理

常用的标准指数之一就是植被归一化指数(NDVI, normalized difference vegetation index),这个指数与叶绿素的含量有很好的线性关系,公式为 $NDVI = (R_{750} - R_{675}) / (R_{750} + R_{675})$ ^[1]。同时利用叶绿素归一化指数(Chl NDI, Chl normalized difference index)对叶绿素进行反映,通过 $Chl\ NDI = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$ 计算 Chl NDI^[24]。一阶微分获得的红边位置(λ_{RE} , red edge)是叶片叶绿素含量较好的评价器^[25],利用公式 $\rho(\lambda) =$

$$(R_{i+1} - R_{i-1})/\Delta\lambda$$

求出光谱反射曲线的一阶微分,680 ~ 750nm 间曲线最大值的波长位置即为红边位置。出现红边位置是由于叶绿素 a 在 680nm 周围呈现荧光峰,并且随着叶绿素 a 浓度的增大,峰值向长波方向移动。结构不敏感植被光谱指数 (SIPI, structure-independent pigment index) 反映出类胡萝卜素与叶绿素含量的比值,因为类胡萝卜素在 445nm 处有一个吸收峰,通过 $SIPI = (R_{800} - R_{445}) / (R_{800} + R_{680})$ 计算^[26]。光化学反射指数 (PRI, photochemical reflectance index), 通过 $PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$ 计算^[22], 由于该指数和叶黄素循环中的色素有负相关,随着色素含量的波动,过多的辐射被叶黄素循环中的色素吸收,未能进行光合作用,所以当 PRI 低时,光合速率就低^[28]。

光谱仪测得的数据利用 Multispec5.1 软件处理,计算出光谱反射值 R_λ 和光谱指数,其中 R_λ 是叶片反射与参比反射的比值。同一树种的林隙、林下光谱指数差异性检验 (Mann-Whitney U) 及不同树种光谱指数间的多重比较 (Tamhane's T2) 通过 SPSS13.0 软件实现。

表 2 各树种的取样数
Table 2 The number of saplings sampled for each species

树种 Species	青楷槭 <i>A. tegmentosum</i>	蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	红松 <i>P. koraiensis</i>	色木槭 <i>A. mono</i>	山杨 <i>P. davidiana</i>	紫椴 <i>T. amurensis</i>
林隙株数 Number in gaps	11	5	13	13	9	10
林下株数 Number in understory	10	6	11	13	12	10

2 研究结果

2.1 各树种林隙、林下光谱反射曲线的比较

由图 1 中可知,可见光范围内,红松和蒙古栎 $R_{林隙}/R_{林下}$ 都大于 1。红松的反射曲线分别在 415nm 和 660nm 出现峰值,林隙内的红松光谱反射值比林下高出 8% ~ 32%。蒙古栎的反射曲线分别在 418nm 和 660nm 处出现峰值,这说明林隙的红松和蒙古栎的色素含量较林下的低些。波长超过 750nm 后,红松和蒙古栎的 $R_{林隙}/R_{林下}$ 值均趋向于 1。在可见光范围内,青楷槭、色木槭、山杨、紫段的 $R_{林隙}/R_{林下}$ 比值均小于 1 (变幅在 0.9 ~ 1 之间),波长超过 750nm 后, $R_{林隙}/R_{林下}$ 值均趋向于 1。色木槭的 $R_{林隙}/R_{林下}$ 值变化较明显,分别在 390nm 和 700nm 处出现谷值。林隙内色木槭的光谱反射值低于林下 5% ~ 20%, 进一步印证了色木槭的阳性树种特性,其在光照较为充足的条件下色素含量更高些^[18]。

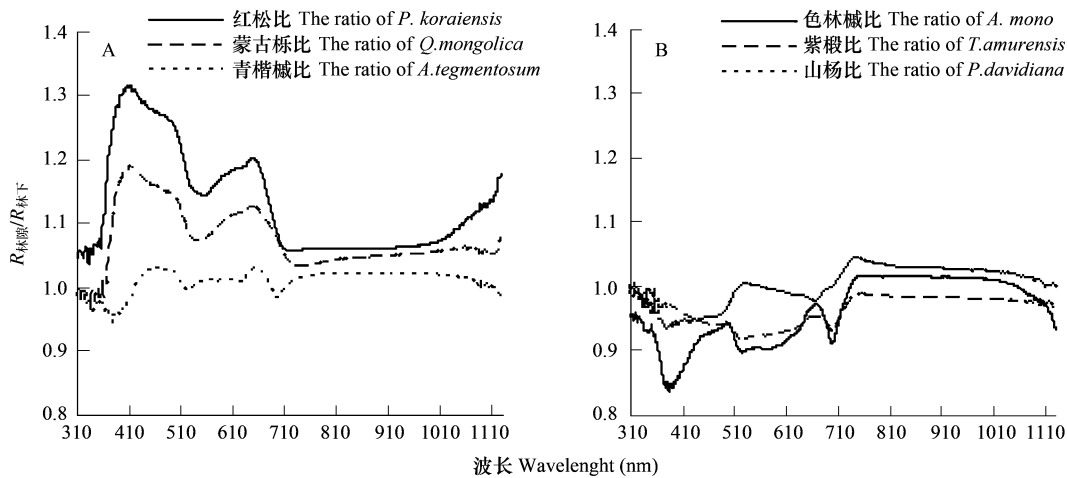


图 1 不同树种林隙/林下的光谱曲线比较
Fig. 1 The ratio of spectral reflectance of each species between gap and understory

2.2 各树种林隙、林下光谱指数比较

如表 3 所示,林隙内青楷槭、色木槭、紫椴、山杨的 $NDVI$ 均大于林下($p < 0.05$),预示着林隙内的植株具有更高的叶绿素含量。林隙内蒙古栎 $NDVI$ 则小于林下,表明林下的蒙古栎植株可能含有更多的叶绿素^[1]。林隙与林下红松的 $NDVI$ 值无显著差异($p > 0.05$),但林下的 $NDVI$ 平均值高于林隙。所有树种在林隙与林下的 $Chl\ NDI$ 值均与 $NDVI$ 呈现出相似的变化趋势。除了红松和蒙古栎外,其它树种 λ_{RE} 值与 $NDVI$ 和 $Chl\ NDI$ 也具有相同的变化趋势。并且林隙内色木槭 λ_{RE} 值显著大于林下($p < 0.001$),说明林隙内色木槭叶片可能含有更多叶绿素。林隙内青楷槭的 PRI 值显著小于林下($p < 0.05$),而山杨的 PRI 值则显著大于林下($p < 0.05$),预示着林下的青楷槭具有更高的光合速率^[27],而山杨恰恰相反。蒙古栎、色木槭、紫椴林隙与林下的 PRI 值差异不显著。林下红松 $SIPI$ 值显著大于林隙($p < 0.001$),说明林下的红松植株应该受到更大的竞争压力或环境胁迫作用^[26]。

表 3 林隙与林下光合指数对比
Table 3 Difference of spectral indices of each species between gaps and under-canopy

树种名 Species	光谱指数 Spectral indices	对比关系 Contrast	显著性水平 Sig.	树种名 Species	光谱指数 Spectral indices	对比关系 Contrast	显著性水平 Sig.
红松 <i>P. koraiensis</i>	$NDVI$	$m1 < m2$	—	色木槭 <i>A. mono</i>	$NDVI$	$m1 > m2$	* * *
	$Chl\ NDI$	$m1 > m2$	—		$Chl\ NDI$	$m1 > m2$	* * *
	PRI	$m1 > m2$	—		PRI	$m1 < m2$	—
	$SIPI$	$m1 < m2$	* * *		$SIPI$	$m1 > m2$	—
	λ_{RE}	$m1 > m2$	—		λ_{RE}	$m1 > m2$	* * *
蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	$NDVI$	$m1 < m2$	*	紫椴 <i>T. amurensis</i>	$NDVI$	$m1 > m2$	*
	$Chl\ NDI$	$m1 < m2$	—		$Chl\ NDI$	$m1 > m2$	—
	PRI	$m1 < m2$	—		PRI	$m1 < m2$	—
	$SIPI$	$m1 < m2$	—		$SIPI$	$m1 > m2$	—
	λ_{RE}	$m1 > m2$	—		λ_{RE}	$m1 > m2$	—
青楷槭 <i>A. tegmentosum</i>	$NDVI$	$m1 > m2$	*	山杨 <i>P. davidiana</i>	$NDVI$	$m1 > m2$	*
	$Chl\ NDI$	$m1 > m2$	—		$Chl\ NDI$	$m1 > m2$	—
	PRI	$m1 < m2$	*		PRI	$m1 > m2$	*
	$SIPI$	$m1 > m2$	—		$SIPI$	$m1 > m2$	—
	λ_{RE}	$m1 > m2$	—		λ_{RE}	$m1 > m2$	—

$m1$ 和 $m2$ 分别为林隙和林下的光谱指数值; * $p < 0.05$ 、* * $p < 0.01$ 、* * * $p < 0.001$ $m1$ and $m2$ indicate spectral indices in gaps and in under-canopy respectively

2.3 林隙内不同树种光谱反射曲线比较

对所有树种林隙内的光谱反射曲线两两进行对比。得出的曲线中,有的在可见光范围内恒大于或小于 1,如图 2-A 所示,反映出色素含量的差异。其它的则如图 2-B,变化较大。叶绿素 a 和叶绿素 b 的强吸收带主要位于 400 ~ 450nm 的蓝紫光 and 650 ~ 700nm 的红光附近,如此变动,则很难从光谱反射中对比得出色素含量的差异。

2.4 林隙内不同树种红边位置比较

叶绿素会在 680nm 周围出现一个荧光峰,因此 λ_{RE} 值是叶绿素含量一个较好的量化指标^[20]。林隙中不同树种红边位置的多重比较分析表明,色木槭、紫椴、蒙古栎的红边位置不存在显著差异($p > 0.05$),平均值大小顺序为: $\lambda_{RE\text{色木槭}} > \lambda_{RE\text{紫椴}} > \lambda_{RE\text{蒙古栎}}$,且均显著高于青楷槭、山杨、红松的 λ_{RE} 值($P < 0.05$)。青楷槭、山杨、红松间的红边位置差异不显著($p > 0.05$),平均值大小顺序为: $\lambda_{RE\text{青楷槭}} > \lambda_{RE\text{山杨}} > \lambda_{RE\text{红松}}$ 。并且红边的形状也表现出一定的差异,红松的光谱反射一阶微分曲线较平缓,而山杨则要更陡些,说明红松的叶绿素含量可能更低些(图 3A)。

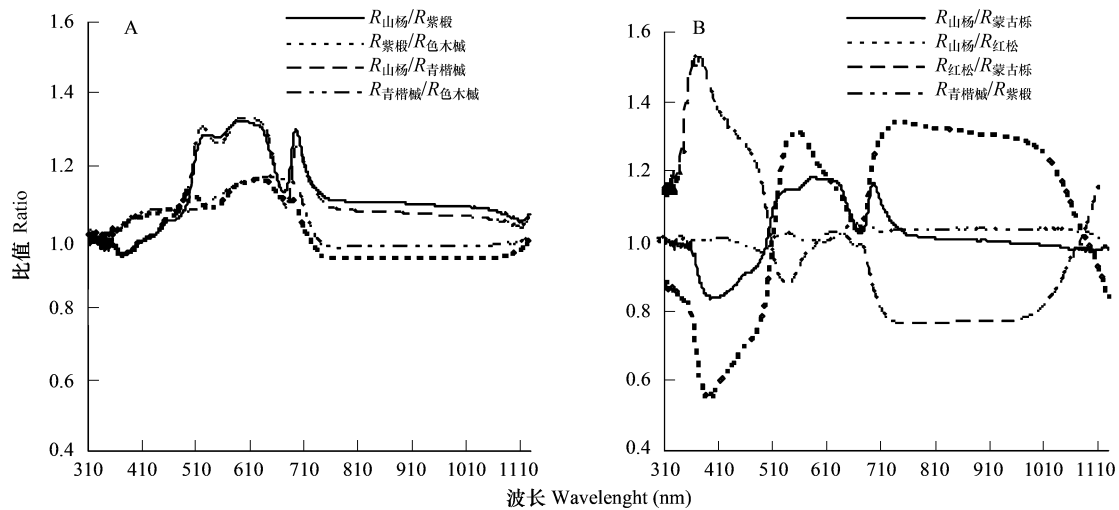


图2 各树种之间光谱反射曲线的对比

Fig. 2 Comparison of spectral reflectance among each species

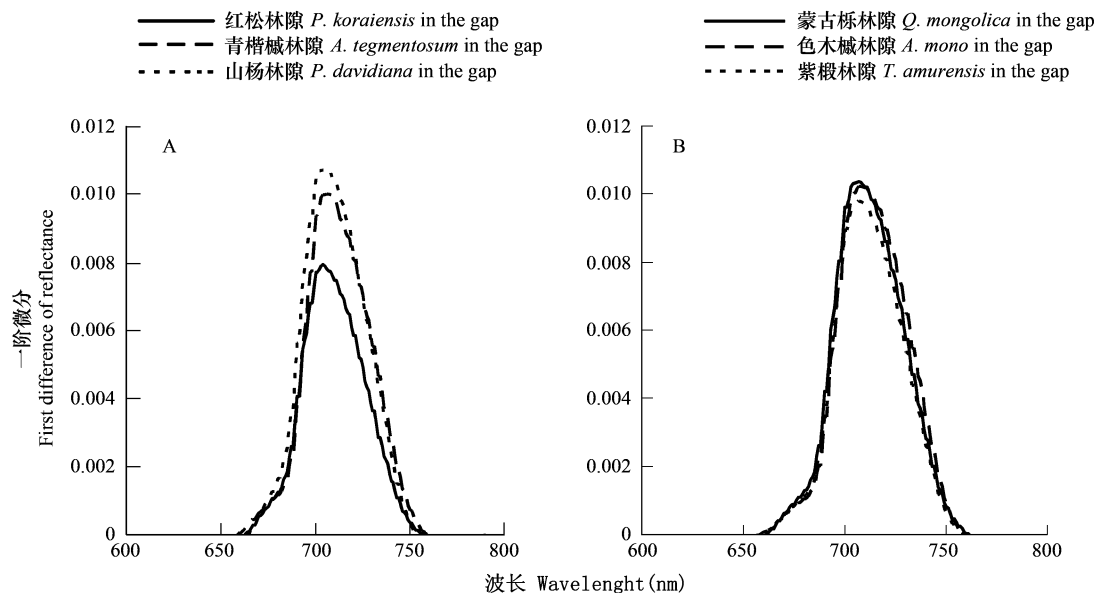


图3 林隙内各树种的红边位置

Fig. 3 The red edge of each species in the gap

2.5 林隙内不同树种其它光谱指数比较

多重比较分析表明,色木槭的 *NDVI* 和 *Chl NDI* 值最高,红松最低,其它 4 个树种间无显著差异 ($p > 0.05$)。红松与色木槭的 *PRI* 值无显著差异,但均显著高于其它种树 ($p < 0.05$),蒙古栎 *PRI* 值显著低于红松和色木槭的值,而显著高于另外 3 种的值。山杨和青楷槭的 *SIPI* 值显著高于其它树种,红松的 *SIPI* 值最低。*SIPI* 指数与叶片结构无关^[28],它能更好地反映出树种受胁迫状况,所以山杨、青楷槭可能面临着更大的环境胁迫。

3 结果与讨论

林隙内红松和蒙古栎的色素含量低于林下,但由于 *SIPI* 值较低,因此林下的低光谱反射可能是由类胡萝卜素、叶绿素含量不同导致的。郭志华等认为红松在全光下无法生存,高光胁迫导致红松的光合作用严重受阻^[29],但本文中林隙内红松较林下表现出更高的光合速率。这可能与本研究所调查的林隙面积较小(表 1),

林隙中的红松受到林隙边缘木树冠的庇阴,并未完全置于强光环境下有关。而比林下稍强的光照使林隙内的红松有较高的光合速率。蒙古栎林下的光谱反射值低,其主要原因是色素含量要比林隙高。但由于林下光照强度较低,所以表现出林隙植株的光合速率只是略低于林下,并无明显差异。蒙古栎为典型喜光植物,但由于林隙的面积不够大,其光谱指数变化也不明显。林隙中色木槭的叶绿素含量高于林下,但光合速率却略低于林下,这可能是林隙内种内和种间竞争导致色木槭面临较大的竞争压力^[30]。紫椴虽多出现于林隙中,但其对光照强度的反应并不敏感^[21],光谱指数变化并不明显。青楷槭林隙的叶绿素光谱指数高于林下,林下的低光谱反射值则可能与类胡萝卜素增加有关。

林隙内树种的 *PRI* 值普遍低于林下,可从以下 3 方面加以解释:一是尽管随着林隙的发育,生态位重叠有减少的趋势^[22],但林隙内树种生态位重叠相对于林下仍然较大,所以林下植株面临更为严峻的竞争压力;二是林隙、林下的土壤中矿物质的含量有较明显的差别,林隙中 N、K 的含量较高,而林下 P 的含量较高^[21]。此外林下的淋洗作用亦不容忽视;三是林隙由于受较强的太阳辐射,容易丢失水分,使地面变得较为干燥,同时,温度的上升也加快了呼吸作用,所以林隙中植物的光合速率和生产力都不一定会明显高于林下的。

本研究参照以前的研究结果,进行了各个树种的光谱指数的比较。一阶微分得出的红边位置 λ_{RE} 是叶片叶绿素含量较好的评价指数。 λ_{RE} 指标表明林隙中红松叶片叶绿素含量最少,但光合速率最高,这可能与红松叶片结构有关。Andrew 等人^[14]也得出类似的研究结果。色木槭 *NDVI* 在所有树种中最高,同时 *PRI* 值也比其它阔叶树种高,说明色木槭可能具有较高的光合速率,所以色木槭在林隙中分布数量应该较多,这与事实相符^[29]。山杨和青楷槭的 *SIPI* 值较高,这可能与山杨和青楷槭面临的竞争压力更大有关。林下的对比结果基本与林隙的相似,但光谱反射曲线的比值变动较大,不能得出类似林隙中的结果,各指数的差异性也没有林隙中的显著,所以林下各树种的光谱特征有待进一步的研究。但红松、色木槭仍然具有和林隙中相同的特性,这可能是由于前面所谈到的林隙,林下环境条件造成的。而蒙古栎的变动较大则可能是取样较少的缘故,这还需要更进一步的研究。对于各树种在林隙和林下的竞争能力的强弱,还需要其它方面数据,如利用水分的能力,利用矿质营养的能力,呼吸作用等,这还需要进一步的研究。

References:

- [1] Gamon J A, Surfus J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 1999, 143: 105—117.
- [2] Peng T, Li P M, Jia Y J, Gao H Y. Two Noninvasive Methods for Determining Pigment Content in Plant Leaves. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(1): 83—86.
- [3] Wang S D, Liu S H, Ding J L, Tang Y M, Li X. The response of spectra for the water content changing of leaves. *Arid Land Geography*, 2006, 29(4): 510—515.
- [4] Madeira A C, Mendonca A, Ferreira M F, *et al.* Relationship between spectroradiometric and chlorophyll measurements in green beans communication. *Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(5/6): 631—643.
- [5] Andrew D. Richardson, Shane P. Duigan. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New phytologist*, 2002, 153: 185—194.
- [6] Poulos H M, Goodale U M, Berlyn G P. Drought response of two Mexican oak species, *Quercus laceyi* and *Quercus sideroxyla* (Fagaceae), in relation to elevational position. *American Journal of Botany*, 2007, 94(5): 809—818.
- [7] Yiwei Jiang, Ronny R. Duncan, Robert N. Carrow. Assessment of low light tolerance of seashore paspalum and bermudagrass. *Crop Science Society of American*, 2004, 44: 587—594.
- [8] Josep Peñuelas, Sergi Munné-Bosch, Joan Llusà, Iolanda Filella. Leaf reflectance and photo- and antioxidant protection in field-grown summer-stressed *Phillyrea angustifolia* Optical signals of oxidative stress. *New Phytologist*, 2004, 162: 115—124.
- [9] Gamon J A, *et al.* Relationship between *NDVI*, canopy structure and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecology*, 1995, 5: 28—41.
- [10] Stylinski C D, Gamon J A, Oechel W C. Seasonal patterns of reflectance indices, catotemoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Ecophysiology*, 2002, 131: 366—374.
- [11] Karen L, Castro-Esau, G Arturo Sanchez-Azofeifa, Benoit Rivard, S Joseph Wright, Mauricio Quesada. Variability in leaf optical properties of Mesoamerican trees and the potential for species classification. *American Journal of Botany*, 2006, 93(4): 517—530.
- [12] Pietrzykowski E, Stone C, Pinkard E, Mohammed C. Effects of *Mycosphaerella* leaf disease on the spectral reflectance properties of juvenile *Eucalyptus globulus* foliage. *Forest Pathology*, 2006, 36: 334—348.
- [13] Fuentes D A, Gamon J A, Yufu Cheng, Helen C Claudio, Hong-lie Qiu, Zhiyan Mao, Daniel A Sims, Rahman A F, Walter Oechel, Hongyan

- Luo. Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103:312—323.
- [14] Garty J, Kloog N, Wolfson R, Cohen Y, Karmieli A, Avni A. The influence of air pollution on the concentration of mineral elements, on the spectral reflectance response and on the production of stress-ethylene in the lichen *Ramalina duriaei*. *New Phytologist*, 1997, 137:587—597.
- [15] Watt A S. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology*, 1947, 35: 1—22.
- [16] Zhao X H, Zhang C Y, Zheng J M. Correlation between gap structure and tree diversity of mixed2broad2leaved Korean pine forests in northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12):2236—2240.
- [17] Andrew D Richardson, Graeme P Berlyn. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield, Vermont, USA. *American Journal of Botany*, 2002, 89(1):88—94.
- [18] Andrew D Richardson, Graeme P Berlyn. Spectral reflectance of *Picea rubens* and *Abies balsamea* needles along an elevational gradient, Mt. Moosilauke, New Hampshire, USA. *American Journal of Botany*, 2001, 88(4):667—676.
- [19] Zheng J M, Luo J C. Structural diversity of broadleaved2Korean pine forest in Changbai Mountain. *Biodiversity Science*, 2003, 11 (4):295—302.
- [20] An H J, Hui G Y, Zheng X X, Zhang T, Hu Y B, Meng Q W. Study on the spatial Structure of broad-leaved Korean pine forest in the different growth stage. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 2005, 36(6):714—71.
- [21] Zhang C Y, Zhao X H, Zheng J M. A study on soil properties in forest gaps and under canopy in broad-leaved *Pinus korienensis* forest in Changbai Mountain. *Forest Research*, 2006, 9 (3): 347—352.
- [22] Qian L W, Wu C Z, Hong W. Ecological niche in dominant species in *Tsuga longibracteata* forest gaps with different development stages. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2006, 14(1):69—74.
- [23] Wang Z P, Li X G, Shi S Y, Qi D H, He Z M, Xu W W, Deng X B. A comparison study on the species diversity between the gap and non 2 gap in Jinyun Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 4 (1): 7—10.
- [24] Giteson A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves: spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 143:286—292.
- [25] Josep P, John A G, Kevin L G. Assessing Community Type, Plant Biomass, Pigment Composition, and Photosynthetic Efficiency of Aquatic Vegetation from Spectral Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 46: 110—118.
- [26] Penñelas J, Filella. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Sciences*, 1998, 3: 151—156.
- [27] Gamon J A, Serrano L, Surfus J S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 1997, 112:492—501.
- [28] Demmig-Adams B, Adams W W. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Sciences*, 1996, 1:21—26.
- [29] Guo Z H, Zhang X D, Huang L L, Ju G S, Jiquan Chen. Solar energy and water utilization of *Quercus mongolica*, a deciduous broadleaf tree, in different light regimes across the edge of a deciduous broad-leaved forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):1047—1056.
- [30] Gloser J, Gloser V. Changes in spectral reflectance of a foliar lichen *Umbilicaria hirsuta* during desiccation. *Biologia Plantarum*, 2007, 51 (2): 395—398.

参考文献:

- [2] 彭涛, 李鹏民, 贾裕娇, 高辉远. 介绍两种无损测定植物活体叶片色素含量的方法. *植物生理学通讯*, 2006, 42(1):83~86.
- [3] 王树东, 刘素红, 丁建丽, 唐义闵, 李向. 叶片水分含量光谱响应变化研究. *干旱区地理*, 2006, 29(4):510~515.
- [16] 赵秀海, 张春雨, 郑景明. 阔叶红松林林隙结构与树种多样性关系研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12):2236~2240.
- [15] 郑景明, 罗菊春. 长白山阔叶红松林结构多样性的初步研究. *生物多样性*, 2003, 11(4):295~302.
- [20] 安慧君, 惠刚盈, 郑小贤, 张韬, 胡艳波, 孟庆伟. 不同发育阶段阔叶红松林空间结构的初步研究. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2005, 36(6):714~718.
- [21] 张春雨, 赵秀海, 郑景明. 长白山阔叶红松林林隙与林下土壤性质对比研究. *林业科学研究*, 2006, 9(3):347~352.
- [22] 钱莲文, 吴承祯, 洪伟. 长苞铁杉林林隙主要树种生态位初步研究. *热带亚热带植物学报*, 2006, 14(1):69~74.
- [23] 王周平, 李旭光, 石胜友, 齐代华, 何正明, 许文蔚, 邓先宝. 缙云山森林林隙与非林隙物种多样性比较研究. *应用生态学报*, 2003, 4(1):7~10.
- [29] 郭志华, 张旭东, 黄玲玲, 巨关升, Chen Jiquan. 落叶阔叶树种蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 对林缘不同光环境光能和水分利用. *生态学报*, 2006, 26(4):1047~1056.