519-524
29B28(117)

第17卷第5期 生 态 学 报 Vol. 17, No. 5
1997年9月 ACTA ECOLOGICA SINICA Sep., 1997

华北落叶松人工林放叶过程中的辐射特征*

刘志刚 马钦彦 潘向丽 谢征鸣
(北京林业大学,北京,100083) (广西南宁市效区林业局) (四川省林业干部学校,成都)

S791.229

摘要 根据河北省围场塞罕坝华北落叶松人工林放叶过程中6个典型晴天的实测材料,分析了放叶过程中太阳辐射在林冠中的反射、透过和吸收的特点及其变化规律。

关键词:华北落叶松,放叶过程,太阳辐射,辐射特征,人工林。

RADAIATION CHARACTERISTICS OF A *Larix principis-rupprechtii* PLANTATION DURING THE COURSE OF LEAF GROWTH

Liu Zhigang Ma Qinyan
(*Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China*)
Pan Xiangli
(*Suburbs Forestry Bureau, Nanning, Guangxi*)
Xie Zhengming
(*Sichuan Forestry Cadres School, Chengdu*)

Abstract The leaf growth course of a *Larix principis-rupprechtii* plantation located in North China is from the last ten-day period of April to the first ten-day period of June.

Based on the data of actual measurement of six-day typical sunny days in the period of leaf growth, the dynamic processes of light attenuation and light absorption in the different layers of forest canopy were determined and analyzed.

In sunny days, the observed daily mean values of *PAR* transmitted through the canopy range from 30.53% to 3.25% in transmittance, from 6.48% to 4.12% in reflectance, from 65.33% to 92.93% in absorptance and from 0.2787 to 0.4640 in extinction coefficient. During the deciduous period, approximate 65% of *PAR* energy of incidence is absorbed by the branches and boles of stand.

The dynamic status of light distribution in the forest canopy is not only related closely to the increase of leaf quantity, but also affected remarkably by the unfolding extent of the bunches of leaves. During the leaf growth, the radiation absorption equation of the canopy can be formulated as follow:

$$\Delta Q_{at} = 25.36170\exp(0.10715SAI), \quad r = 0.9821$$

* 国家自然科学基金资助项目(38970597)
收稿日期:1995-05-17,修改稿收到日期:1996-11-29。

维普资讯 http://www.cqvip.com

in which, ΔQ_a is the total daily absorption amount of PAR ($molm^{-2}d^{-1}$) transmitted through the canopy and SAI is the surface area index of stand(m^2/m^2).

The main absorption surface(i.e. acting surface) of the forest canopy and the contribution of the canopy below the averagy stand contact height to solar radiation absorption are closely related to the leaf quantity of stand. At the end of the leaf growth, most of incident light energy(over 78%) is absorbed by the forest canopy above two thirds of the average stand height. Only 8% or less of the energy, however, is absorbed by the canopy below the average stand contact height. The extinction coefficient is the lowest in the central canopy but the highest in the lower canopy.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*, leaf growth course, solar radiation, distribution dynamic.

森林生长源于林木的光合作用，依赖于林冠的光环境，寻求森林的最佳光结构在理论和生产上都有重要意义。太阳辐射与林冠的相互作用首先表现为林冠对入射辐射的反射、吸收和透射过程。由于林冠高大而不均匀致使实测困难，至今有关光结构模型的研究大都基于若干假设条件在较为均匀的农业草本群落内进行，对于森林群落则基本上还局限于理论上的探讨。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)分布于东经112°～117°，北纬38°～40°50′，海拔1600～2800m范围内，是华北广阔的半湿润少林地区针叶林的主要建群种之一。我国华北落叶松林面积约14万公顷，人工林占71%，人工林中84%为幼、中龄林，主要分布在河北和山西。试验林设在河北省围场塞罕坝机械林林场，该场位于东经116°51′～117°39′，北纬42°02′～42°36′，海拔1000～1940m，年平均气温－1.4℃平均年降水量450mm，全年日照2546h，日照率58%。该场华北落叶松人工林经营面积4.2万公顷，5～20年生的林分占63.5%，正处于抚育管理的关键时期。

本文依据林木实际空间配置和林分叶量增长的动态过程[1]，分层连续实测群体内典型单株和林木团群的受光状况，分析人工林的空间结构与实际光分布的关系，为寻求华北落叶松人工林的最佳光结构提供依据。

1 测试仪器与方法

本研究所用仪器：ST-86S条形照度计(60cm长9感光探头)6套，测定的波长范围为400～700nm；DFY-2型天空辐射表7套；Li-6200光合测定仪2套。云量和日照状况用目测法，表示方法与气象站相同。

试验林标准地设置在河北省北部塞罕坝机械场长腿泡子营林区，标准地面积0.08hm^2，海拔1590m，坡度3°，林分郁闭度0.9，平均胸径9.75cm，平均树高8.03m，林龄17年生，未经间伐，林分密度3227株/hm^2。塞罕坝华北落叶松的叶生长过程从4月下旬起至6月上旬完成。放叶先后顺序从冠层的下部到上部，放叶过程中，叶长、叶面积、叶干重的增长曲线，以及叶面积指数、枝表面积指数和表面积指数随冠深的累积分布曲线均呈"S"型[2]。

1992年在华北落叶松林分内选定有代表性的包括7株标准木的团群，从林地向上于1.5、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5m高处及冠上(高出林冠表面2m)从7:00～19:00，观测各标准木东向和西向的入射辐射和反射辐射，每小时1次与此同时也在团状内相邻林木间追加的两个测点上进行同样的观测。考虑到林冠下光照的不均匀性，林冠透射光和林地反射光的测定是在标准地内沿两条对角线上机械布设84个测点，每隔1m一点进行观测。林冠上与林内同步测定，每次观测限定在10min内完成，所得数据均换算成光子通量密度[2]。本文只对放叶期间6个典型晴天的实测数据进行分析。

2 辐射特征量的定义

本文所用辐射特征基本物理量符号及定义如下：

维普资讯 http://www.cqvip.com

PAR 光合有效辐射 photosynthesis available radiation (observable light)，LAI 林分叶面积指数 leaf area index of a stand，$CLAI$ 累积叶面积指数 cumulative leaf area index(from top downwards)，SAI 林分表面积指数 surface area index of a stand，$CSAI$ 累积表面积指数 cumulative surface area index(from top downwards)，$CRAI$ 累积辐射吸收日总量 cumulative quantity of absorption in a day，CB_c 日平均累积吸收率 daily mean cumulative absorptivity by canopy，Q_c 冠上入射辐射通量 flux of incidence over canopy，R_c 冠上反射辐射通量 flux of reflection by canopy，R_g 林地反射辐射通量 flux of reflection by ground，Q_g 透过林冠层后的辐射通量 flux of transmission through canopy，Q_{ct} 冠上反射辐射日总量 total quantity of incidence over canopy in a day，Q_{gt} 林地入射辐射日总量 total quantity of incidence on ground in a day，R_{ct} 林冠反射辐射日总量 total quantity of reflection by canopy in a day，R_{gt} 林地反射辐射日总量 total quantity of reflection by ground in a day，ΔQ_{ct} 林冠辐射能吸收日总量 total quantity of absorption by canopy in a day，C 林冠透射率 transmittance through canopy：$C=Q_g/Q_c\times 100\%$，K 林冠消光系数 extinction coefficient by canopy：$K=\ln(Qg/Qc)/SAI$，$\overline{C}$ 日平均透射率 daily mean transmittance：$\overline{C}=Q_{gt}/Q_{ct}\times 100\%$，$\overline{K}$ 日平均消光系数 daily mean extinction coefficient：$\overline{K}=ln(Q_{gt}/Q_{ct})/SAI$，$A_c$ 林冠反射率 reflectance by canopy：$A_c=R_c/Q_c\times 100\%$，A_g 林地反射率 reflectance by ground：$A_g=R_g/Q_g\times 100\%$，$\overline{A_c}$ 林冠日平均反射率 daily mean reflectance by canopy：$\overline{A_c}=R_{ct}/Q_{ct}\times 100\%$，$\overline{A_g}$ 林地日平均反射率 daily mean reflectance by ground：$\overline{A_g}=R_{gt}/Q_{gt}\times 100\%$，$\Delta Q_c$ 林冠辅射能吸收通量 flux of absorption by canopy：$\Delta Q_c=Q_c-R_c-Q_g+Rg$，$B_c$ 林冠辐射吸收率 absorptivity by canopy：$B_c=\Delta Q_c/Q_c\times 100\%$，$\overline{B_c}$ 林冠日平均吸收率 daily mean absorptivity by canopy：$\overline{B_c}=\Delta Q_{ct}/Q_{ct}\times 100\%$

3　结果与分析

3.1　太阳辐射在林冠中的透过、反射与吸收

5月2日～6月11日华北落叶松放叶过程中林冠的透过率随林分表面积指数(表面积指数＝叶面积指数＋枝表面积指数＋干表面积指数)的增加而减小，日平均透过率变动于30.53%～3.25%之间(表1)。5月17日以后，叶量增长迅速，日平均透过率从5月17日的27.55%降到5月25日的5.91%。林冠透射率随太阳高度角的增加而增加，日变化曲线呈凸形。这是因为太阳高度角增大，太阳辐射通过林冠的厚度相对变小，穿过树冠间隙到达林地的太阳辐射加大[3~6]。随着太阳高度角和方位角的改变林内各单木树冠沿入射方向的投影也相应发生连续的变化，其对林内光分布的影响有待进一步深入讨论。

林冠的消光能力随叶量的增长而增加，日平均消光系数变动于0.28～0.46之间(表1)。林冠消光系数，与透过率相反，日变化曲线呈凹形。华北落叶松的针叶丛生成束，束内平均包含49个针叶，叶束散开前，在束外针叶的包围下，绝大多数束内针叶处于暗区，针叶截获的光量并不随着叶量的增加而成比例增加。因此，试验林叶面积指数虽然由5月9日的1.19上升至5月17日的2.88，但平均到单位表面积指数上的消光能力则表明为5月17日低于5月9日。试验林叶束从5月19日起明显散开，林中见绿，针叶对整个林冠消光效应的贡献显著增大(图1)。消光系数是衡量林冠消光能力的重要指标，华北落叶松林的消光系数较小，叶子生长稳定后的6月13、17日平均消光系数为0.46，这与华北落叶松的枝条在树干上轮生、针叶小且丛生有关。

林冠反射率的日变化特点是早晚大，中午小，其随叶面积指数的增加而减小，日平均反射率变动在6.48%～4.12%之间(表1)，反射辐射通量随太阳辐射的增强而增大。放叶期间，林地反射日总量变动范围1.31～0.18mol $m^{-2}\cdot d^{-1}$，都不及林冠反射日总量的一半，所占比例分别为：5月9日36.02%、5月17日33.4%、5月25、26日(平均)12.87%和6月13、17日(平均)7.28%，林地日平均反射率大于林冠日平均反射率，这与太阳辐射透过林冠后光谱成分改变以及林下地被物少、枯黄的落叶层颜色浅有关。

光合有效辐射通过林冠的过程中，大部分被叶子、枝条和树干所吸收。5月9日，放叶过程前期，林分叶量较小，叶束尚未散开，枝条和树干对太阳辐射的吸收占据主导地位，日平均吸收率为65.33%(表1)。5月17日为68.27%，增长缓慢。5月19日以后，随着叶束散开，林冠对太阳辐射能的吸收显著增加。5月25日、26日平均为89.74%，6月13、17日平均为92.93%，分别是5月9日的1.37倍和1.42倍，Federer 在落叶阔叶林无

维普资讯 http://www.cqvip.com

表1 放叶过程中林内日平均辐射特征值的变化

Table 1 Change of daily mean radiated characteristics of a stand during the course of leaf growth

日期 Date	Q_{ct}	R_{ct}	Q_{gt}	ΔQ_{ct}	R_{gt}	A
	(mol $m^{-2}\cdot d^{-1}$)					
5月9日 May 9	56.20	3.64	17.16	36.71	1.31	2.94
5月17日 May 17	55.77	3.50	15.36	38.07	1.17	4.63
5月25、26日 May 25 & 26	58.39	2.92	3.45	52.40	0.38	6.47
6月13、17日 June 13 & 17	59.25	2.44	1.93	55.06	0.18	7.38

日期 Date	$\overline{Ac}$	$\overline{C}$	$\overline{Bc}$	$\overline{Ag}$	$\overline{K}$
	(%)				
5月9日 May 9	6.48	30.53	65.33	7.67	0.40
5月17日 May 17	6.28	27.55	68.27	7.69	0.28
5月25、26日 May 25 & 26	5.00	5.91	89.74	10.90	0.44
6月13、17日 June 13 & 17	4.12	3.25	92.93	9.21	0.46

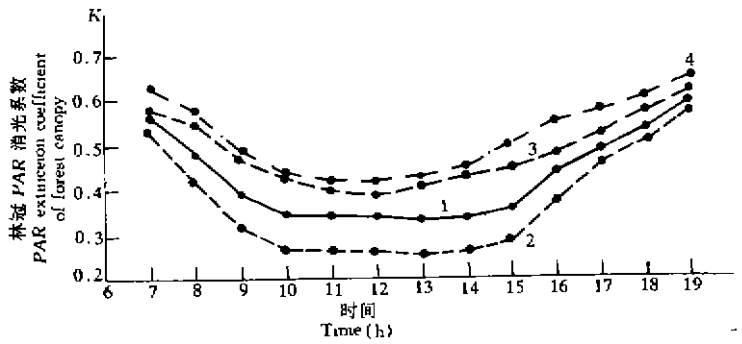

图1 放叶过程中林冠消光系数的变化

Fig1. Changes of forest canopy extinction coefficient

叶期也曾测得枝和干吸收大约65%的入射太阳辐射能[7]。这表明干、枝对林内光分布的影响不宜忽略。因此，本文在计算消光系数时采用林分表面积指数，而在计算林冠各层光合速率时采用叶面积指数(关于林分光合速率的研究另撰专文报道)。分析表明华北落叶松人工林放叶过程中林冠对 PAR 辐射吸收日总量 ΔQ_{ct}(mol $m^{-2}\cdot d^{-1}$)与林分表面积指数 SAI 呈紧密指数相关：

$$\Delta Q_{ct} = 25.36170\exp(0.10715 \times SAI) \qquad r = 0.9821,\ s = 2.0476$$

3.2 太阳辐射在林冠层中的垂直分布

从冠顶垂直向下，由于累积表面积指数的递增，入射辐射通量和反射辐射通量光速迅速减弱。放叶期间，随各层叶面积指数不断增加，相同层次的太阳入射辐射通量和反射辐射通量随叶生长期的递增呈明显递增趋势(图2)。

各晴日辐射能吸收日总量随冠层层位的降低递减。若用 $(\Delta Q_i / \sum \Delta Q_i) \times 100\%$ 表示第 i 层的吸收量(ΔQ_i)占林冠总吸收量($\sum \Delta Q_i$)的份额，则林冠最上面两层所占的百分比分别为：1992年5月9日50.4%，5

维普资讯 http://www.cqvip.com

月17日58.8%、5月26日72.0%，6月17日78.5%。最上面两层的下限高度（5.50m）接近林分平均树高（8.03m）的2/3。由此可见，在放叶过程的后期（5月26日）或放叶结束（6月17日），一天中绝大部分辐射能的吸收发生在林分平均树高的2/3以上冠层，这说明华北落叶松林的主要作用面是在2/3林分平均树高以上。放叶期间林冠主要作用面随着叶面指数的增长而逐步抬高。

林冠最下面3层的情况为：1992-05-09吸收量占总吸收量的27.6%，5月17日相应的22.4%，5月26日10.9%，6月17日7.7%。这表明，叶生长过程结束后林冠最下部的3层对光合有效辐射的吸收不足8%。其对应的上限高度（4.50m）与林分平均接触高（4.49m）吻合。前人把相邻林木接触高以上和以下的树冠分别划分为阳树冠和阴树冠是合理的。为了改善林分平均接触高以下冠层的光状况，提高光合生产效率，抚育间伐或修枝已势在必行。

冠层日平均辐射吸收率以中部冠层最大，上部冠层次之，下部冠层最小。而林冠垂直消光能力的分布则相反，从冠底向上，随着层位的上升，消光系数递减，在冠层中部达最小值，到冠层上部又有所回升。这种分布格局与华北落叶松林冠结构特征有关，冠层中部枝叶密度大，明显提高辐射吸收率，但枝叶拥挤相互阴蔽、平均到单位表面积指数上的消光量减少、消光系数降低。当然，冠层不同部位枝、叶光学特性的差异及太阳辐射进入林冠过程中光质的改变也都与吸收和消光有关。

放叶期间各晴日林冠累积面积指数$CLAI$、累积表面积指数$CSAI$、日平均透过率$\overline{C}$、日平均反射率$\overline{A_c}$（各层反射率均以冠上入射辐射日总量作为分母计算）、日平均累积吸收率$\overline{CBc}$、日平均消光系数$\overline{K}$和累积辐射吸收日总量$CRAT$的垂直分布及其相互关系如图2。其表明放叶过程中投射到林冠上的太阳辐射，经

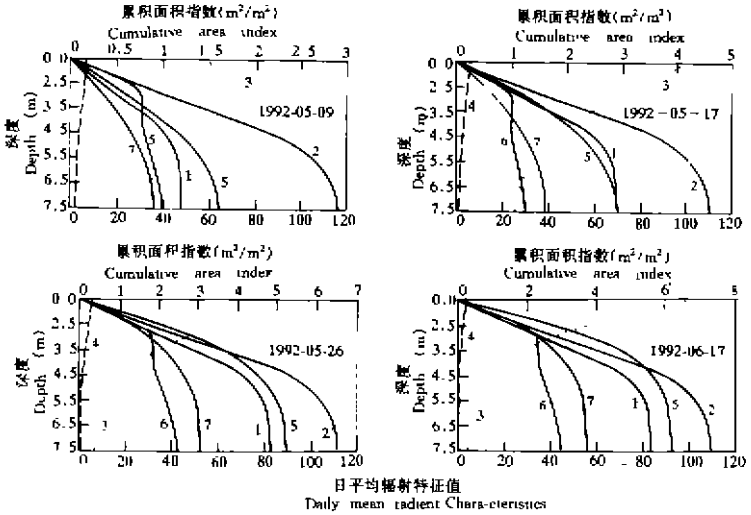

图2　放叶期间林冠累积面积指数和林内日平均辐射特征值随冠深的变化

Fig2. Changes of cumulative area indices and daily mean radiation characteristics with the canopy depth during the leaf growth period

1——$CLAI$　2——$CSAI$　3——$\overline{C}$　4——$\overline{A_c}$　5——$\overline{CBc}$　6——$\overline{K}$　7——$CRAT$

过林冠层的反射、吸收，从上到下呈指数递减规律（参见图中日平均透过率衰减曲线）。林冠的垂直消光能力在中部冠层明显下降使曲线扭曲。放叶期间林冠对光的累积吸收率曲线（曲线5）与叶面积累积分布曲线（曲线1）同步变化，而透射曲线（曲线3）与叶面积累积分布曲线近似相反，曲线3、5、7的下拐点大致位于冠深4.5m处附近与林分的平均接触高相一致。这一高度以下的冠层由于光照较弱，对光的吸收又甚少，致使较多的枝叶脱落而自然整枝，适量加大修枝和间伐强度将有利于林分生长。

维普资讯 http://www.cqvip.com

4 结论

4.1 华北落叶松人工林放叶期间，晴天林冠对光合有效辐射的反射率6.48%～4.12%，透过率30.5%～3.25%，吸收率65.33%～92.93%，消光系数0.2787～0.4640。林内的辐射特征不仅与林分叶量有关，还受到叶束展开程度的显著影响。放叶初期叶束展开前，枝条和树干大约吸收65%的入射光合有效辐射能。

4.2 放叶期间，林冠对光合有效辐射的吸收日总量 ΔQ_r(mol $m^{-2}\cdot d^{-1}$)与林分表面积指数(SAI)呈指数相关：

$$\Delta Q_r = 25.3617\exp(0.10715 \times SAI) \quad r = 0.09821,\ s = 2.0476$$

4.3 太阳辐射在林冠内垂直传递过程中按 Beer-Lamberl 律呈负指数衰减。消光系统在林冠中部最小。

4.4 林分平均接触高以下的冠层对光能的吸收和利用甚少，适量加大修枝和间伐强度将有利于林分生长。

参 考 文 献

1 刘志刚，马钦彦. 塞罕坝华北落叶松人工林的叶生长过程. 北京林业大学学报，1994，**16**(1)：13～19

2 库姆斯等主编. 邱国雄等译. 生物生产力和光合作用测定技术. 北京：科学出版社，1985

3 Landsberg J J，*et al*. The radiation regime of a spruce forest. In：Response des splantes aux factewrs climatiques. Unesco. Paris. 1973

4 Norman J M and Jarvis P G. Photosynthesis in sitka spruce(Picea sitchewsis(Bong) CARR)(Ⅰ) Measurements of canopy structure and interception of radiation. *J. Appl. Ecol*. 1974，**11**：375～398

5 Reifsnyder W E，*et al*. Spatial and temporal distribution of solar radiation beneath forest canopies. *Agric. Meteorol*. 1971，**9**：21～37

6 Ross J. *The radiation regime and architecture of plant stands*. W. Junk Publisher，The Hague-Boston-London，1981

7 Federer G A. Solar radiation absorption by leafless hardwood forest. *Agric. Meterol*. 1971，**9**：3～20