

六盘山叠叠沟华北落叶松人工林叶面积指数的时空变化特征

童鸿强^{1,2}, 王玉杰¹, 王彦辉^{2*}, 于澎涛², 熊伟², 徐丽宏², 周杨^{3,4}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 3. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建省部共建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏大学西部生态与生物资源开发联合研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 在具有半干旱气候的宁夏固原六盘山区叠叠沟小流域, 于2009年整个生长季内(5—10月)监测了典型阴坡坡面上的华北落叶松人工林不同坡位的7个样地的林冠层、林下灌木层和草本层的叶面积指数(LAI)的数量变化和季节动态。结果表明:(1)华北落叶松不同样地的林冠层LAI随坡位升高的变化趋势基本上是逐渐减小,从坡下部的1.52~2.95减少到坡顶部的0.15~0.27;林下灌木层LAI是先增加后减小,从坡下部的0.05~0.06增加到坡中上部的0.73~1.01后再减小到坡顶的0.19~0.30;草本层的LAI随坡位上升不断增加,从0.18~0.36增加到0.19~0.75。(2)林冠层和草本层的LAI季节变化趋势都呈先上升、达到最大值后再下降的单峰曲线。在生长季初期(5—6月),林冠层LAI的增长比草本的快,而在生长季中期(7—8月)却比草本层的慢,这是由温度和土壤水分条件及根系层深度差别共同决定的。(3)随着林冠郁闭度增加,林冠层的LAI几乎线性增大;灌木层LAI随林冠郁闭度增加先增大后逐渐减小,在0.5左右达到最大值,在0.9以后几乎为零;草本层LAI随林冠郁闭度增加缓慢线性减小,从0.74降到0.35;灌草层(灌木加草本)LAI在林冠郁闭度0.4~0.5时最高并超过林冠层的LAI,在0.6以后急剧减少并开始低于林冠层LAI;总LAI随林冠郁闭度增加先急剧增加,在郁闭度0.6~0.8之间保持最大且相对稳定,之后轻微下降。

关键词: 六盘山;华北落叶松;林冠;灌木;草本;叶面积指数

中图分类号:S791.22

文献标识码:A

The Spatio-Temporal Variation of LAI of the *Larix principis-rupprechtii* Plantation Ecosystems at Diediegou of Liupan Mountains of Northwest China

TONG Hong-qiang^{1,2}, WANG Yu-jie¹, WANG Yan-hui², YU Peng-tao², XIONG Wei², XU Li-hong², ZHOU Yang^{3,4}

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. United Research Center for Exploitation of Ecology and Biological Resources in Western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: From the observation of leaf area index (LAI) of 7 *Larix principis-rupprechtii* plantation plots at 3 layers (tree canopy, shrubs and herbage) on the north slope in the vegetation period (May-Oct.) of 2009, the change of LAI along slope position, the vertical composition of LAI and its seasonal variation were studied at the semi-arid watershed of Diedie-

收稿日期:2010-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(40730631,40801017,41071023);林业公益性行业科研专项经费(200904056,200904005);中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2010001-02);德国DFG项目(SCHW 1448/3-1);国家林业局六盘山森林定位站和森林生态环境重点实验室资助

作者简介:童鸿强(1985—),男,福建省三明市人,硕士生,研究方向森林生态水文。E-mail:lao_tong@126.com,联系电话:15201615006。

*通讯作者:博士,研究员,研究方向为森林水文;E-mail:wangyh@caf.ac.cn

gou, which locates at Liupan Mountains of Northwest China. The results showed: 1) The LAI of tree canopy decreased basically with rising slope position, from 1.52—2.95 at slope foot to 0.15—0.27 at slope top; the LAI of shrubs layer increased at first and then decreased with slope position, from 0.05—0.06 at slope foot to 0.73—1.01 at up-middle slope and 0.19—0.30 at slope top; while the LAI of herbage layer increased slowly, from 0.18—0.36 at slope foot to 0.19—0.75 at slope top. 2) The seasonal variation of LAI of tree canopy and herbage layers showed the same tendency, i. e. a one-peak curve of increase and then decrease with time. However, the LAI of tree canopy layer grew faster than that of herbage layer in the early vegetation period (May-Jun.) and slower than that of the herbage layer in the middle vegetation period (Jul. - Aug.), due to the integrated result of varying temperature and soil moisture as well as the root depth difference between trees and grasses. 3) With increasing tree canopy density, the LAI of each vegetation layer responded differently. The tree canopy LAI nearly linearly increased with canopy density; the LAI of shrubs layer increased at first and then decreased, with a maximum when the canopy density was about 0.5 and decreased to nearly zero when canopy density above 0.9; the LAI of herbage layer decreased gradually, from 0.74 to 0.35; the LAI of undergrowth (shrubs plus herbage) reached its maximum value and higher than tree canopy LAI when canopy density varied between 0.4—0.5, but decreased rapidly and lower than canopy LAI when canopy density above 0.6; the total LAI of all the 3 layers increased at first with rising canopy density, reaching its maximum and keeping relatively stable when canopy density was 0.6—0.8, and then slightly decreased with rising canopy density.

Key words: Liupan Mountains; *Larix principis-rupprechtii*; forest canopy; shrubs; herbage; LAI

叶面积指数(leaf area index, LAI)作为一个能定量描述冠层结构及其动态的重要植被属性^[1],是由英国农业生态学家 Watson 于 1947 年提出的,它指单位水平面积上单叶面积的总和。LAI 是个无量纲的动态参数,随叶量多少而变^[2],多年来已成为全球变化研究中的一个关键植被特征^[3-5]。LAI 直接控制着许多植被生物、物理过程,反映了诸多影响因素对冠层结构的综合作用^[6],与初级生产、能量交换、元素循环等许多生态过程直接相关^[7],并对生态系统的水文过程(如降水截留、蒸腾等)起着极重要的控制作用。

西北地区的山地往往是当地重要水源地,在这里植树造林能提供保护土壤、生长固碳、水源涵养等生态功能,但同时也由于增加了植被叶面积而提高了蒸散能力,导致流域产流减少^[8-9],定量评价植被的蒸散耗水需求和土壤水分的植被承载力,是干旱地区实现水资源与森林植被综合管理的关键,也是相关学科的研究热点。在这方面,LAI 是比林木密度更好的评价指标^[10-11],可用以定量确定坡面的土壤水分承载力^[12]。因此,定量描述不同植被类型群落的 LAI 动态变化,是深入开展生态水文学研究的需要;然而以往相关研究多是仅考虑高大林木冠层的 LAI,不考虑林下灌草层,且考虑 LAI 动态变化不足,影响了生态学水文深入的研究。本文以自 20 世纪 60 年代引种到宁夏六盘山林区并已成为当地主要造林树种^[13]和对当地木材生产、水源涵养、水土保持起重要作用^[14]的华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)为对象,在叠叠沟林场典型阴坡的不同坡位设置了系列样地,于生长季内观测林

冠层及其林下植被 LAI 的动态变化,以便为深入开展林木蒸腾、林冠截留、土壤水分、降雨径流等坡面水文研究提供基本支持。

1 研究区自然概况

研究区位于六盘山北段西侧的叠叠沟小流域,属于六盘山外围土石山区与周边黄土区的交界地带,地理坐标为 106°4'55"~106°9'15"E, 35°54'12"~35°58'33"N,行政区划上归属宁夏回族自治区固原市原州区。该地为典型的半干旱大陆性季风气候,年均气温 6~7℃,无霜期约 130 d,年均降水量(432±87.2) mm,主要集中在 6—9 月份,年潜在蒸散量(1 050±180.5) mm。叠叠沟小流域测流堰以上的控制面积为 25.4 km²,海拔 1 975~2 615 m,最大高差 640 m;小流域呈南北走向,东坡和西坡是主要坡向;坡度较缓,多为 10~30°;流域形状系数为 1.58。叠叠沟小流域在植被水平带上位于温带草原地带、温带南部草原亚地带,是森林草原向典型草原的过渡区。小流域内乔木林面积比例为 6.07%,集中分布在水分条件相对较好的阴坡或沟底,主要是华北落叶松和少量北京杨(*Populus × beijingensis* W. Y. H su)人工林;灌丛面积比例为 18.32%,主要有虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decaisne)、绣线菊(*Spiraea* sp. L.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、沙棘(*Hippophae ramnoides* L.)等;草地面积比例最大,达 58.44%,主要优势种为铁杆蒿(*Artemisa vestita* Ledeb)、本氏针茅(*Stipa bungeana* Trin)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* Keng)等;在郁闭的华北落叶松林下,灌木较

少,草本多为铁杆蒿、细叶苔草(*Carex rigescens* Franch. V. Krecz)、野草莓(*Fragaria ananassa* Duch.)、凤毛菊(*Saussurea amara* (L.) DC.)、乌头(*Aconitum carmichaeli* Debx.)等。土壤类型以灰褐土面积居多,黄土次之,成土母质为页岩和灰岩风化的残积物和坡积物,土壤中石砾较多。

2 研究方法

2.1 试验样地的设置

选取阴坡(北侧)华北落叶松典型坡面,顺坡向

上至坡顶,每隔10~20 m设置1个20 m×20 m的样地,由7个均匀分布的临时样地形成了完整的坡面样地系列。在2009年生长季对各样地进行常规调查,记录经纬度、海拔、坡度、坡向以及林木密度、平均树高、平均胸径等(表1);根据各样地实际情况,在样地内设置1~2个5 m×5 m灌木样方,调查灌木的优势种、平均高度、平均地茎、平均覆盖度等(表2);同时在各样地内均匀设置3个1 m×1 m的草本小样方,调查林下草本的优势种、平均高度、平均覆盖度等(表3)。

表1 华北落叶松不同样地的基本特征

样地号	距坡底相对 高程/m	坡度 /(°)	经度 (E)	纬度 (N)	坡向 /(°)	海拔 /m	土层厚度 /cm	平均林龄 /a	林分密度 /(株·hm ⁻²)	平均树高 /m	平均胸径 /cm	林冠 郁闭度
No. 1	0	11	106°08'54"	35°58'12"	NW30°	2 040	>200	22	967	10.4	10.4	0.95
No. 2	10	11	106°08'54"	35°58'11"	NW35°	2 050	>200	22	1 575	12.1	10.5	0.97
No. 3	20	13	106°08'54"	35°58'10"	NW32°	2 060	>200	22	1 275	11.7	11.2	0.96
No. 4	40	26	106°08'55"	35°58'9"	NW5°	2 080	>100	22	1 175	10.0	10.7	0.92
No. 5	60	31	106°08'54"	35°58'6"	NE5°	2 100	100	22	525	9.7	11.7	0.40
No. 6	83	25	106°08'55"	35°58'5"	NE35°	2 123	80	12	175	8.3	14.2	0.16
No. 7	110	10	106°08'54"	35°58'4"	NE20°	2 150	60	12	175	6.2	10.5	0.14

表2 华北落叶松不同样地的灌木特征

样地号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
优势种	沙棘	沙棘	--		绣线菊+黄刺玫		
平均高度/m	2.05	2.40	--	1.40	1.70	1.60	1.00
平均地径/cm	5.5	4.1	--	1.6	1.4	1.0	1.1
总覆盖度/%	3.9	4.1	--	18	64	25	20

注:样地3内没有灌木。

表3 华北落叶松不同样地的林下草本特征

样地号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
优势种	铁杆蒿+驴耳草+细叶苔草+野草莓			铁杆蒿+细叶苔草+凤毛菊		细叶苔草+野草莓+乌头	
平均高度/cm	18.9	22.8	17.0	24.5	35.6	28.9	26.5
总覆盖度/%	78	69	62	53	70	86	87

2.2 研究方法

2.2.1 气象观测 在华北落叶松人工林外和林内各放置1个美国LI-COR公司生产的LI-1401小型自动气象站,连续观测2009年5—10月的大气温度(°C)等气象数据。

2.2.2 土壤含水量测定 在生长季内,每隔半月利用土钻在华北落叶松各样地内测定不同深度土壤体积含水量(每层10 cm,一般取1 m深,不足1 m取到最深),每个样地3个重复,再换算成分层或一定土层的土壤蓄水量^[15]。

2.2.3 叶面积指数(LAI)测定 用LAI-2000冠层分析仪(LI-Cor Co., Nebraska, USA)测定林冠LAI。测定值需经过校正,具体方法是将仪器测定的LAI

读数乘以考虑针叶簇生和枝条投影影响的校正系数 $R^{[16]}$,本文研究的是针叶林,采用 $R=1.5$ 。在华北落叶松林的生长季初期(5—6月)和末期(9—10月)每隔7 d测定1次,在生长季中期(7—8月)每隔15 d测定1次。对于已郁闭或没有完全郁闭的林分,在样地内手持冠层分析仪沿固定路线走2步测1次,最后得出样地LAI平均值。对于特别稀疏的林分,在一些样树单株林冠下利用仪器测定LAI,求其平均值后乘以样地郁闭度,得到林分的LAI。灌木层LAI的测定方法与林冠层测定方法相同。

测定林下草本层的LAI时,利用网格绘图称质量法,每月测定1次。具体方法是:在样方附近选定与设定样方的林下光照、草本种类组成、植物高度、

草本覆盖度等相同的 1 m^2 草本样方,剪下草本样品,分成叶样和茎样,区分绿叶和枯叶,把绿叶平铺在硫酸纸上,用铅笔把叶子轮廓瞄下,剪下叶子所覆盖的硫酸纸部分称质量,其质量除以硫酸纸单位面积质量($50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)即为叶面积;再用叶面积除以取样面积(1 m^2),即为 LAI 。

2.2.4 数据处理 利用 SPSS 软件对数据进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 生长季内华北落叶松林分内外的气温变化

生长季内的林内外的气温(图1)都是一条先增大后减小的曲线:林内气温从5月的 $11.05 \text{ }^\circ\text{C}$ 升到6月份最大值 $17.81 \text{ }^\circ\text{C}$,之后随着叶面积增大、遮荫增强和降雨尤其是云量的增多,逐渐减小直到10月份的 $7.09 \text{ }^\circ\text{C}$;林外温度从5月的 $12.38 \text{ }^\circ\text{C}$ 升到7月份最大值 $20.49 \text{ }^\circ\text{C}$,之后随着降雨尤其是云量的增多,逐渐减小直到10月份的 $10.35 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

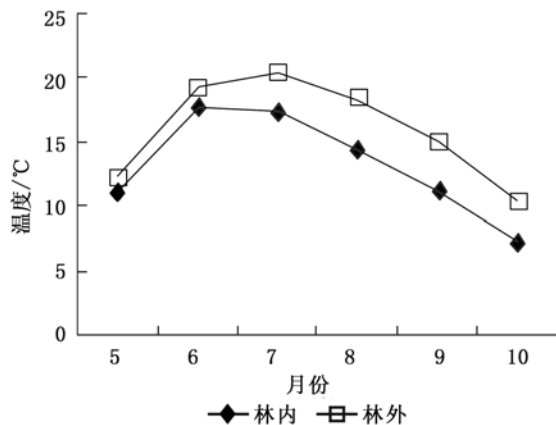


图1 华北落叶松林分内外气温的季节变化

3.2 不同深度土壤蓄水量对林冠叶面积指数(LAI)的影响

对林冠 LAI 与不同深度土壤蓄水量进行了相关分析,结果表明:林冠 LAI 与 $50 \sim 100 \text{ cm}$ (不足 100 cm 的样地取到最深)深度土壤蓄水量的相关最紧密,相关系数为 0.644 ;其次是 $40 \sim 100 \text{ cm}$,相关系数为 0.579 ;与 $30 \sim 100 \text{ cm}$ 深度土壤蓄水量的相关系数为 0.525 。各样地 $50 \sim 100 \text{ cm}$ 深度土壤蓄水量的季节变化(表4)略有不同:各样地在5月中旬总体处于较高值,随着气温升高以及乔木蒸腾作用的加剧有所下降,到6月下旬达到最低(除了样地3和样地4处于较高值,这可能与坡向及土壤较疏松有关,使得其能在最干旱的季节还能保存较多水分),之后有的样地随着雨季来临逐渐增加直到10月上旬达到最大,有的先增加后减少,也有的先减少再增大,而样地3和样地4则迅速减少,到了10月上旬又有所回升,10月下旬大部分样地随着雨水减少又有所减少。

对草本 LAI 与不同深度蓄水量的相关分析结果表明:草本 LAI 与各层土壤蓄水量的相关系数较高,其中与 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层的土壤蓄水量相关最紧密,相关系数为 0.751 ;其次是 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层,相关系数为 0.748 ; $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的相关系数分别是 0.704 、 0.685 。各样地 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 深度土壤蓄水量的季节变化(表4)不尽相同:在5月中旬大部分样地的土壤蓄水量都较高,在5—6月随着气温的升高所有样地的土壤蓄水量迅速减少并达到最低,此后有的样地在雨季的8—9月逐渐增加,而有的先增加再减少,大部分样地在10月份又达到最大值,只有少数样地有所减少。

表4 华北落叶松不同样地土壤蓄水量的季节变化

mm

样地号	土层深度 /cm	时间(月-日)							
		05-15	05-29	06-19	06-30	08-05	09-20	10-05	10-20
No. 1	0 ~ 30	52.93	46.12	35.17	30.12	39.58	64.33	45.39	57.51
No. 2		51.08	48.91	30.39	34.79	33.78	62.35	55.71	46.16
No. 3		61.10	51.40	34.56	42.94	38.11	44.41	51.02	60.96
No. 4		75.88	67.85	36.93	52.70	76.20	32.13	55.63	57.88
No. 5		74.24	72.55	35.59	25.18	55.43	46.61	70.04	74.73
No. 6		71.43	81.42	31.32	30.48	68.07	42.73	75.93	78.86
No. 7		83.45	81.77	53.34	35.22	71.95	60.23	90.79	87.56
No. 1	50 ~ 100	101.97	98.27	57.55	57.08	60.97	97.04	78.11	79.55
No. 2		104.70	104.59	69.42	67.58	60.99	81.56	95.41	79.27
No. 3		92.91	90.10	64.23	82.39	52.06	46.23	81.19	76.17
No. 4		117.01	110.65	73.28	88.13	87.64	49.01	80.54	84.73
No. 5		111.84	110.37	68.10	64.09	75.89	86.25	113.79	100.67
No. 6		79.82	67.24	60.20	38.90	40.04	38.90	71.65	66.78
No. 7		31.14	29.48	26.31	9.03	16.89	15.21	21.22	22.63

3.3 华北落叶松林分不同垂直层次的叶面积指数 (LAI)

根据森林的垂直层次,把样地植被分为林冠层、林下灌木层和林下草本层。这 3 层植被的叶面积指数大小及其比例既受由水分、养分等决定的 LAI 承载力影响,也受光照、肥力、温度、水分等因素的竞争关系影响,而且不同样地的主要作用因子有所不同。用这 3 层叶面积指数之和评价植被蒸散耗水需求和土壤水分承载力^[10-11]应比只用林冠层 LAI 更好。

由图 2 可以看出:随着 7—8 月(植物叶片已发育完整)林冠郁闭度的增加,林冠层的 LAI 呈线性增大,但灌木层的 LAI 先增大后逐渐减小,在林冠郁闭度 0.5 左右达到最大值,在林冠郁闭度 0.9 以后几乎为零;而草本层的 LAI 随林冠郁闭度的增加缓慢线性减小,从 0.74 降到 0.35;总的 LAI 随林冠郁闭度增加先是急剧增大,在郁闭度 0.6~0.8 之间保持最大且相对稳定之后开始轻微下降。在林冠郁闭度分别小于 0.3 和 0.4 时,草本和灌木的 LAI 分别比林冠的大,这可能造成林地生产力的浪费;只有当林冠郁闭度大于 0.4 时,林冠层的 LAI 才大于灌木层和草本层的 LAI,这时林冠的遮光作用格外增强。另外,从图 2 还可以看出:在林冠郁闭度为 0.4~0.5 时,灌草层 LAI(灌木 LAI 加上草本 LAI)维持在一个较高水平,超过林冠的 LAI;当林冠郁闭度超过 0.6 时,灌草层 LAI 急剧减少,开始低于林冠的 LAI。

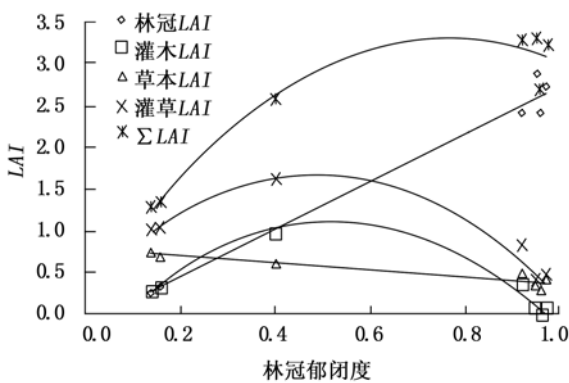


图 2 7—8 月份华北落叶松林内不同植被层的叶面积指数 (LAI) 与林冠郁闭度的关系

3.4 生长季内华北落叶松林林冠叶面积指数 (LAI) 的动态变化

从图 3 可以看出:在整个生长季内(5—10 月),7 个样地的华北落叶松林冠的 LAI 均呈现出 1 条先上升、到最大值后相对稳定、然后再下降的单峰曲线。从 5 月上旬到 6 月中旬总体上为 LAI 的迅速增

长期,此期间温度快速上升(图 1),地面 50~100 cm 土壤的蓄水量在初期较高但却因为干旱少雨而迅速下降(表 4),水分逐渐成为影响 LAI 增加的主要因子。由于乔木根系能够利用 50~100 cm 深度的土壤水分, LAI 随温度上升很快增大;6 月中旬到 9 月初为相对稳定期, LAI 变化缓慢;虽然此时气温较高,但 50~100 cm 土壤蓄水量有时不足,成为限制 LAI 增大的因子。8 月中旬大部分样地的 LAI 达到最大值,此时温度、水分均达到最佳;大部分样地在 9 月上旬到 10 月下旬为 LAI 下降期,即使此时土壤水分充足,但受温度降低的影响 LAI 下降较快,特别在 9 月下旬以后温度快速下降导致针叶迅速凋落。另外,样地 5、6、7 的林冠 LAI 总体偏低,尤其是样地 6 和样地 7,这是因为样地位于坡面中上部,由于林龄和林分密度较小(表 1),故林冠郁闭度低,样地叶面积指数值较低。

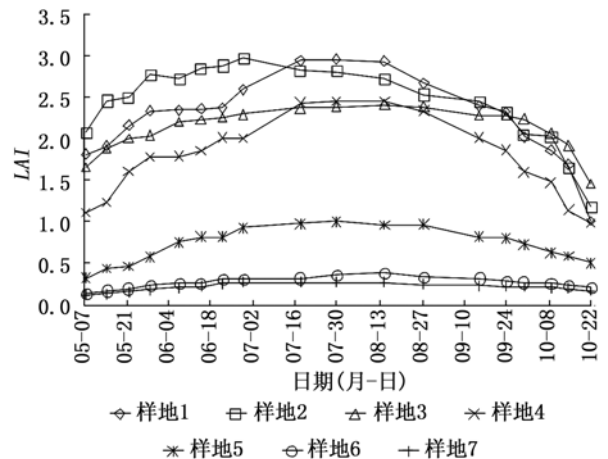


图 3 华北落叶松不同样地林冠叶面积指数 (LAI) 的季节变化

林下草本层 LAI(图 4)的季节变化趋势与林冠层基本相同,为单峰曲线,但是林下草本层 LAI 在生长季初期(5—6 月)增长较慢,这是因为草本根系较浅,无法利用深层土壤水分,其生长更多受到 0~30 cm 土壤水分(表 4)的限制,加之此时温度较低(图 1),导致草本不能迅速生长和草本 LAI 增长缓慢;在进入生长季中期(7—8 月)后,随着温度增加尤其是雨季到来,0~30 cm 土壤水分迅速得到补充,各样地的林下草本层 LAI 达到最大值。在 9 月上旬到 10 月下旬以后,虽然 0~30 cm 土壤水分充足,但随着温度下降, LAI 逐渐减小。

3.5 华北落叶松林分叶面积指数 (LAI) 随坡位的变化

从图 5 看出:阴坡华北落叶松林冠层的 LAI 基本是坡下部样地最高,然后随坡位升高逐渐减小,到

坡上部以后迅速减少,这与刘建立^[12]的研究结果比较一致,这和土壤水分、林分密度和林冠郁闭度有关。一般土壤水分随坡位的升高呈降低趋势^[17-18],加之土层变薄和石砾含量增加^[19],华北落叶松的郁闭度、树高、胸径、冠幅等随坡位升高而减小。坡下部林冠 LAI 最高(1.52~2.95),到坡中部相对高差 60 m 时减小达到 0.45~0.98,而后随着林分密度和林冠郁闭度迅速降低快速减少,只有 0.15~0.27,只是在 5、6 月时,林冠 LAI 随坡位升高迅速减小,这时坡下水分条件好于坡上部。

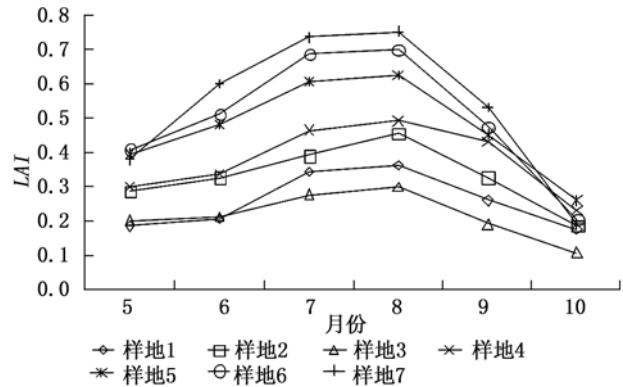


图4 华北落叶松不同样地草本叶面积指数(LAI)的月变化

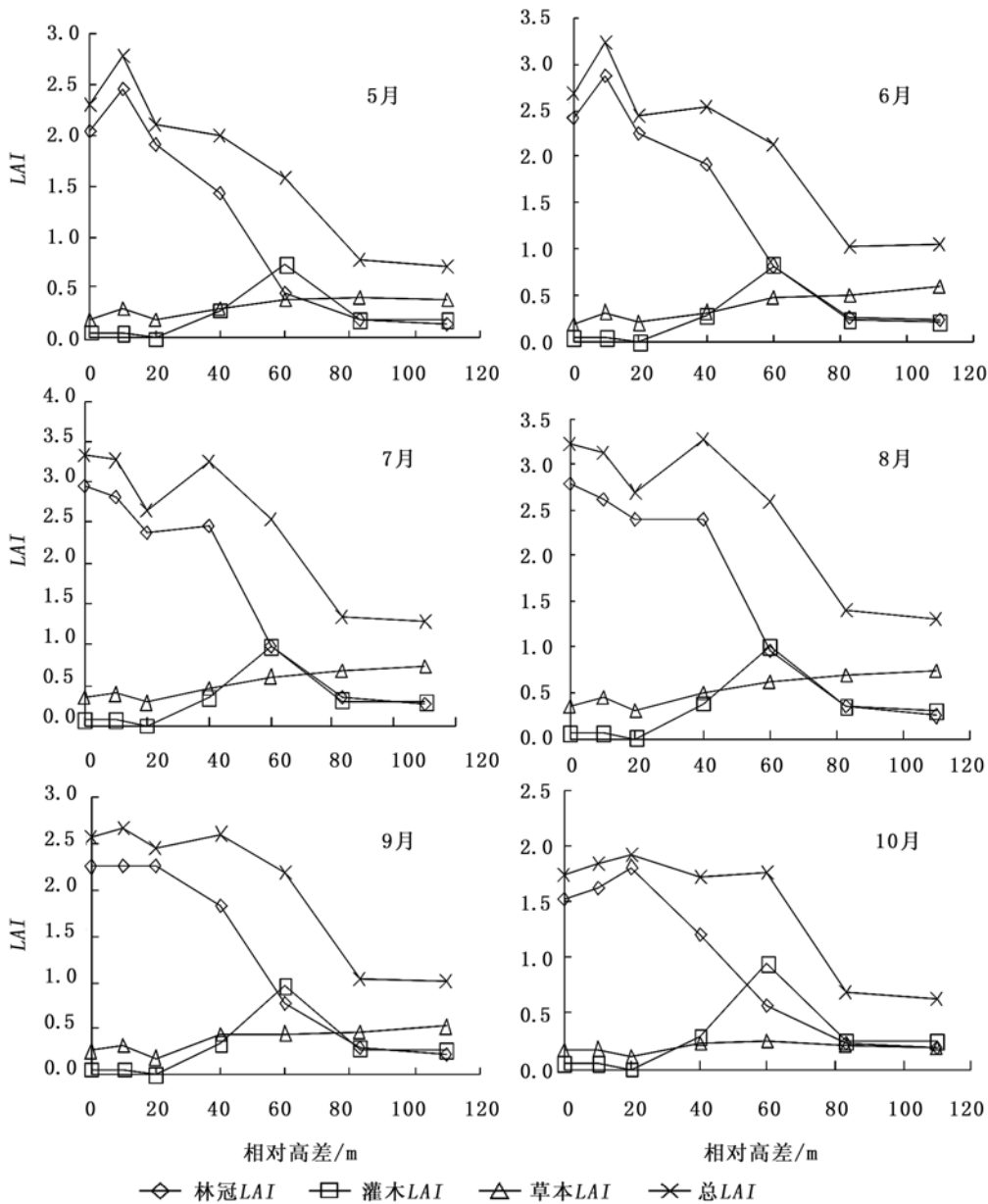


图5 5—10月不同坡位华北落叶松林分叶面积指数(LAI)的变化规律

灌木层 LAI 随坡位升高先是减小,到相对高差 20 m 时最小,此后开始增大,相对高差为 60 m 时达

到最大(0.73~1.01),这时灌木层所接受的光照和土壤水分都最佳,之后再缓慢下降。林下草本层的 *LAI* 随坡位升高增加的比较缓慢,这主要是由光照和土壤水分2个因素决定的。随着坡位上升,本来土壤水分条件应该变差,但由于林分密度和林冠郁闭度随坡位上升而不断下降,林冠层 *LAI* 也不断减小,使得林下草本所能接收的光照随坡位升高而增强,同时由于林木蒸腾耗水随坡位升高而减少,使得除了最干旱的6月份以外,其他月份内上坡位的土壤水分反而比下坡位更高一些,其结果是草本生物量和 *LAI* 随坡位升高而不断增加。

林冠、灌木和草本层三者的总 *LAI* 随坡位的变化趋势和林冠 *LAI* 相类似,因为灌木和草本层的 *LAI* 所占总 *LAI* 的比重较小,即总 *LAI* 在坡底样地最大,然后随坡位升高而逐渐减小,到坡上部以后迅速减少。

4 结论与讨论

华北落叶松人工林的总 *LAI* (林冠、灌木、林下草本 *LAI* 之和)为0.63~3.35(图5)。随着林冠郁闭度增加,林冠层的 *LAI* 呈线性增大;灌木层 *LAI* 随林冠郁闭度的增加先增大后逐渐减小,在0.5左右达到最大值,在0.9以后几乎为零;草本层 *LAI* 随林冠郁闭度增加缓慢线性减小,从0.74降到0.35;总 *LAI* 随林冠郁闭度的增加先急剧增加,在郁闭度0.6~0.8之间保持最大且相对稳定,之后轻微下降。在林冠郁闭度小于0.3和0.4时,草本和灌木层的 *LAI* 分别可以超过林冠 *LAI*,只有当林冠郁闭度大于0.4时,林冠 *LAI* 才大于灌木和草本层 *LAI*;灌草层 *LAI* (灌木 *LAI* 加草本 *LAI*) 在林冠郁闭度0.4~0.5时最高并超过林冠层 *LAI*,在0.6以后急剧减少并开始低于林冠层 *LAI*。另外,林冠层的 *LAI* 基本是坡下部的样地最高(1.52~2.95),然后随坡位升高和土壤水分逐渐减少,到坡上部以后随着林分密度和林冠郁闭度迅速降低而快速减少;灌木层 *LAI* 随坡位升高先是不断增加,到达坡中部时达到最大(0.73~1.01),之后缓慢下降;草本层的 *LAI* 随着坡位的上升而不断增加。

本研究中,华北落叶松林冠层 *LAI* 季节变化的单峰曲线与李根柱等^[20]、陈厦等^[21]、吕瑜良等^[22]、尹婧等^[23]的研究结果一致。关德新等^[24]将整个生长季的叶面积动态划分成上升期、相对稳定期和下降期3个阶段,本文研究的华北落叶松冠层 *LAI* 具

有同样的规律:林冠层 *LAI* 和草本层 *LAI* 的季节变化趋势相同,都是一条先上升到最大值后再下降的单峰曲线,这首先取决于温度的季节变化。不过林冠层 *LAI* 在生长季初期(5—6月)生长快于草本 *LAI*,在生长季中期(7—8月)生长慢于草本 *LAI*,这主要是由于乔木和草本的根系层深度差别所导致的土壤水分限制作用差别所决定的。

吕瑜良等^[22]在川西亚高山研究了暗针叶林 *LAI* 的空间变异,认为海拔是影响 *LAI* 的重要因子,不同海拔之间 *LAI* 差异极显著,并统计得到了暗针叶林 *LAI* 随海拔升高的线性回归方程。赵传燕等^[16]在祁连山区研究了青海云杉林 *LAI* 随海拔升高的变化,表现为先增大后减小,这可能是因林木生长的限制在低海拔处以水分控制为主逐渐转变为高海拔处的温度控制为主,因随着海拔升高,降水量先升后降,土壤水分不断增加,但气温逐渐降低,同时土层厚度变薄和质地变粗。在这些研究中,由于处于较高海拔地区,植被生长的温度控制作用比较明显,海拔作用突出,同时在干旱山地还有水分条件的限制;而本文选择坡面系列样地的海拔都没有超过2600m,相互之间的高差仅有110m,海拔高度及由此决定的温度对 *LAI* 的影响应该很小,土壤水分则是影响 *LAI* 变化的最主要限制条件。

刘志刚等^[14]、彭方仁等^[25]、刘晓东等^[26]都用 Beer-Lambert 方程对林冠结构与光辐射分布的关系有过研究,表明太阳辐射随累积叶面积指数的增加呈负指数递减。林冠下的灌木和草本的 *LAI* 之和同时受到土壤水分和林冠遮光的影响,但在多雨的7—8月份,林冠下灌草 *LAI* 主要受林冠遮光的影响。从维持林下植物多样性及促进林下自然更新的角度来看,维持0.6~0.7的林冠郁闭度可能比较合适,这也是近自然林业所主张的合理林冠郁闭度范围;但本研究限于试验条件,并未直接测定林冠结构与林下光照的关系以及由此对灌草生长的影响,需在以后的研究补充改进。

本文虽研究了华北落叶松的林冠层、林下灌木和草本层的 *LAI* 分布,但是其中灌木分布很不均匀,有时集中,有时分散,准确测定还较困难,这可能会在一定程度上影响研究结果。准确测定整个林分的乔、灌、草不同层次的不同植物的 *LAI* 的三维空间分布及时间动态,并建立受土壤水分、光照、养分等立地环境条件驱动的数量关系,是未来进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Lee K S, Cohen W B, Kennedy R E, *et al.* Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes[J]. *Remote Sensing Environment*, 2004, 91: 508 - 520
- [2] 吴伟斌,洪添胜,王锡平,等. 叶面积指数地面测量方法的研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26(2): 270 - 275
- [3] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, *et al.* The first LSLSCP field experiment (FIFE) [J]. *Bulletin Of the American Meteorological Society*, 1988, 69: 22 - 27
- [4] Sellers P, Schimel D. Remote-sensing of the land biosphere and biogeochemistry in the EOS era science priorities, methods and implementation [J]. *Global and Planetary Change*, 1993, 7(4): 279 - 297
- [5] Davi H, Aret F, Uc R, *et al.* Effect of thinning on LAI variance in heterogeneous forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 56: 90 - 99
- [6] Chen J M, Rich P M, Gower S T, *et al.* Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 29429 - 29443
- [7] Asner G P, Scurlock J M O, Hicke J A, Global synthesis of leaf area index observation: Implications for ecological and remote sensing studies [J]. *Globe Ecology and Biogeography*, 2003, 12: 191 - 205
- [8] Yu Peng tao, Krysanova V, Wang Yanhui *et al.* Quantitative estimate of water yield reduction caused by forestation in a water-limited area in Northwest China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L02406, doi:10.1029/2008GL036744
- [9] Wang Yanhui, Yu Pengtao, Xiong Wei, *et al.* Water Yield Reduction after Afforestation and Related Processes in the Semiarid Liupan Mountains, Northwest China [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1086 - 1097
- [10] Wang Yanhui, Xiong Wei, Yu Pengtao, *et al.* Study on the evapotranspiration of forest and vegetation in dryland [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 19 - 25
- [11] Liu Jianli. Study on the soil water vegetation carrying capacity on slopes in the small watershed of diediegou of Liupan Mountain [D]. Ph. D dissertation, Chinese Academy of Forestry, 2008
- [12] 刘建立,王彦辉,熊伟,等. 六盘山叠叠沟小流域典型坡面土壤水分的植被承载力 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1101 - 1111
- [13] 王俊玲,金红喜,杨占彪,等. 六盘山华北落叶松人工林多样性、生产力研究 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(1): 31 - 33
- [14] 刘志刚,马钦彦. 华北落叶松不同类型林木的冠结构与光的分布 [J]. *河北林果研究*, 1997, 12(2): 100 - 102
- [15] 段争虎,肖洪浪,宋耀选,等. 黄土高原西部兰州市郊地貌驱动的土壤水分变化及对植物的影响分析 [J]. *中国沙漠*, 2006, 26(4): 522 - 526
- [16] 赵传燕,沈卫华,彭焕华. 祁连山区青海云杉林冠层叶面积指数的反演方法 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 860 - 869
- [17] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, *et al.* Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the loess plateau [M]. *China: Journal of Arid Environments*, 2001
- [18] 王红梅,谢应忠,陈来祥. 黄土高原坡地土壤水分动态特征及影响因素 [J]. *宁夏农学院学报*, 2004, 25(4): 62 - 66
- [19] 杜阿朋,于澎涛,王彦辉,等. 六盘山北侧叠叠沟小流域土壤物理性质空间变异的研究 [J]. *林业科学研究*, 2006, 9(5): 547 - 554
- [20] 李根柱,王贺新,朱教君. 辽东次生林区主要阔叶林型叶面积指数季节动态 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2049 - 2055
- [21] 陈厦,桑卫国. 暖温带地区3种森林群落叶面积指数和林冠开阔度的季节动态 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 431 - 436
- [22] 吕瑜良,刘世荣,孙鹏森,等. 川西亚高山暗针叶林叶面积指数的季节动态与空间变异特征 [J]. *林业科学*, 2007, 43(8): 3 - 5
- [23] 尹婧,邱国玉,何凡,等. 半干旱黄土丘陵区人工林叶面积特征 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 440 - 447
- [24] 关德新,吴家兵,王安志,等. 白山红松阔叶混交林林冠层叶面积指数模拟分析 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 499 - 503
- [25] 彭方仁,黄宝龙. 板栗密植园树冠结构特征与光能分布规律的研究 [J]. *南京林业大学学报*, 1997, 21(2): 27 - 30
- [26] 刘晓东,朱春全,雷静品,等. 杨树人工林冠层光合辐射分布的研究 [J]. *林业科学*, 2000, 36(3): 3 - 6