

宁夏六盘山半湿润区华北落叶松林冠层叶面积指数的时空变化及坡面尺度效应

刘泽彬¹ 王彦辉^{1*} 刘宇² 田奥¹ 王亚蕊¹ 左海军¹

¹中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; ²北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

摘要 受立地环境条件的坡位差异影响, 叶面积指数(LAI)在坡面这个基本空间单元内往往具有很大空间(坡位、坡长)和时间(季节)变化, 因而存在着坡面空间尺度效应及其季节变化, 需对此加以深入研究、准确理解和精细刻画, 从而为准确描述森林的结构、生长和生态水文功能提供科学基础。在六盘山香水河小流域选取了一个34年生华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)人工林典型坡面, 均匀划分为空间连续的16个样地, 于2015年5–10月测定了各样地林冠层LAI, 分析其坡位变化及季节差异, 并以LAI的顺坡滑动平均值在水平坡长增加100 m时的变化值(LAI/100 m)表示坡面尺度效应。研究表明, 林冠层LAI具有明显的坡位变化和尺度效应, 且月份变化明显。在5月份, LAI随离坡顶距离增加(坡位下降)而逐渐减小, 坡面尺度效应是降低0.02/100 m。在6、7和8月份, LAI均从坡顶向下逐渐增大, 在坡中部达最大后又逐渐减小, 坡面尺度效应在离开坡顶的0–244.2 m和244.2–425.1 m范围内分别为升高0.15/100 m、0.16/100 m、0.18/100 m及降低0.09/100 m、0.08/100 m、0.07/100 m; 在9和10月份, LAI均为随离坡顶距离增加而逐渐增大, 坡面尺度效应分别为升高0.03/100 m和0.09/100 m。主要影响因素的季节变化导致了上述冠层LAI的坡位差异和尺度效应的季节变化。在5月份, 主导因素是地形遮挡引起的辐射和温度的坡位差异; 在6–8月份, 主导因素是土壤含水量限制; 在9–10月份, 地形条件(海拔(坡位)、坡度)、气象条件、土壤含水量及土壤水文性质(孔隙度、持水量)等因子共同影响林冠层LAI坡位变化。对生长季各月, 拟合了不同坡位样地林冠层LAI与坡面均值的比值随水平坡长增加的非线性关系, 可藉此由任意坡位样地的LAI测定值估算坡面均值, 以节省野外测定时间和工作量。

关键词 华北落叶松林; 叶面积指数; 坡面差异; 季节变化; 尺度效应

引用格式: 刘泽彬, 王彦辉, 刘宇, 田奥, 王亚蕊, 左海军 (2017). 宁夏六盘山半湿润区华北落叶松林冠层叶面积指数的时空变化及坡面尺度效应. 植物生态学报, 41, 749–760. doi: 10.17521/cjpe.2016.0288

Spatiotemporal variation and scale effect of canopy leaf area index of larch plantation on a slope of the semi-humid Liupan Mountains, Ningxia, China

LIU Ze-Bin¹, WANG Yan-Hui^{1*}, LIU Yu², TIAN Ao¹, WANG Ya-Rui¹, and ZUO Hai-Jun¹

¹Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; and ²College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Aims Leaf area index (LAI) is an important canopy structure parameter characterizing ecological and hydrological processes, such as forest growth, canopy interception and transpiration. Forest LAI is limited by both light and soil water availability, thus may vary with slope position and seasonality. This study is aimed at the spatiotemporal variation of LAI and its relationship with environmental variables.

Methods A 34-years-old *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* planted forest situated on a typical slope located in a small watershed of Xiangshuihe within Liupan Mountains was selected for LAI observations. Sixteen plots along a 30 m wide transect along the slope was surveyed from May to October of 2015 to measure the monthly canopy LAI.

Important findings It showed there was a remarkable difference of LAI among slope positions. The LAI in May decreased toward downslope direction with a scale effect of $-0.02/100$ m. Whereas for the period from June to August, LAI showed a nonlinear variation along slope positions: increasing from to top slope downward, reaching its maximum at the middle slope, and then decreasing to the slope foot. The scale effect of LAI was $+0.15/100$,

收稿日期Received: 2016-09-13 接受日期Accepted: 2017-02-28

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: wangyh@caf.ac.cn)

+0.16/100, and +0.18/100 m in the slope range (downward positive) of 0–244.2 m, but –0.09/100, –0.08/100, and –0.07/100 m in the slope range of 244.2–425.1 m for June, July and August, respectively. The *LAI* increased toward downslope in September and October, with a slope scale effect of +0.03/100 m and +0.09/100 m, respectively. The seasonal variation of *LAI*-slope relationship showed a shift from the light and temperature control in the early growing season, to the soil water resources control in the mid growing season, and then to an integrated control of many factors in the late growing season. In the early growing season when soil moisture and nutrients were abundant, terrain shading limited the leaf growth in middle and downslope. From early to the mid growing season, the soil moisture on the slope was quickly depleted due to fast evapotranspiration and poor moisture retention of the coarse soil. On the other hand, average solar height increased, and allowed direct light radiation to penetrate to the middle then downslope. The result is that the leaf growth in the middle slope was the strongest in the mid growing season. During the late growing season, the temperature decreased fast in the mountain top to incur earlier leaf fall than the mountain foot. Thus the *LAI* exhibited the increasing trend toward the downslope.

Key words *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation; leaf area index (*LAI*); slope difference; seasonal variation; scale effect

Citation: Liu ZB, Wang YH, Liu Y, Tian A, Wang YR, Zuo HJ (2017). Spatiotemporal variation and scale effect of canopy leaf area index of larch plantation on a slope of the semi-humid Liupan Mountains, Ningxia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 749–760. doi: 10.17521/cjpe.2016.0288

叶面积指数(*LAI*)是描述森林结构特征的重要参数,是森林生长和演替的重要驱动因子(Berterretche *et al.*, 2005; 姚丹丹等, 2015),与植被蒸腾、林下蒸发、降雨截留等水文过程和林木生长等生态过程密切相关(Granier *et al.*, 2000; Nasahara *et al.*, 2008; Behera *et al.*, 2010),因而是许多森林生长及生产力模型、气候模型和水文模型的主要输入项(Running & Coughlan, 1988; Cox *et al.*, 1999; Granier *et al.*, 1999),在关注森林动态结构影响水文过程的生态水文研究中被看作是重要的水文要素(Staelens *et al.*, 2006)。由于受林分结构(Bequet *et al.*, 2012)、立地环境(土壤水分、理化性质等)(王云霓等, 2016)、地形因子(海拔、坡度、坡向)(吕瑜良等, 2007)、气象条件(Maass *et al.*, 1995)等多种因素的共同影响,林冠*LAI*往往具有高度复杂的时空变异,即使在林分结构单一的同龄纯林中也是如此(Bequet *et al.*, 2012)。因此,准确理解冠层*LAI*的时空变异并进行定量描述,对多尺度精确评估森林生产力及开展从林分、坡面、小流域、流域到区域等不同空间尺度的能量和水分通量等的研究具有很大帮助。

目前已有一些*LAI*时空变异研究。如姚丹丹等(2015)利用空间统计分析方法定量描述了云杉(*Picea asperata*)针阔混交林局部尺度的*LAI*空间异质性; Burrows等(2002)利用地统计学分析方法在景观尺度上比较了山杨(*Populus davidiana*)林、硬阔叶林和针叶林的*LAI*空间分布特征,指出*LAI*空间相关性变程的大小主要由地形条件和人为干扰程度决定;

Bulcock和Jewitt (2010)基于遥感技术,利用*LAI*与归一化植被指数(*NDVI*)、土壤修正植被指数(*SAVI*)等植被指数间的关系,反演了南非夸祖鲁塔尔中部地区桉树(*Eucalyptus robusta*)林、松树林和金合欢(*Acacia farnesiana*)林这3种当地主要森林类型的*LAI*空间分布格局;吕瑜良等(2007)研究了亚高山暗针叶林*LAI*时空变化特征,认为海拔和坡度是影响*LAI*空间变化的重要因子。这些研究多是在较大空间尺度内或较大山体的海拔范围内进行的,在*LAI*随空间尺度增大而快速变化的坡面关键尺度上还研究较少,限制着对林冠层*LAI*变化机理的理解。

六盘山是黄土高原重要水源地和泾河、清水河、葫芦河等多条河流的源头。华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)是该地区最主要的人工造林树种,在涵养水源、水土保持及维持生态平衡等方面发挥着重要作用。其林冠层*LAI*空间变化研究目前已有一些,如六盘山南坡生长季中期林冠层*LAI*坡面尺度效应及影响因素(王云霓等, 2016)、六盘山北坡林冠层*LAI*的时空变化(童鸿强等, 2011),但仍缺乏*LAI*坡面变化的季节差异及机理分析。

本研究选取六盘山南坡香水河小流域的一个华北落叶松同龄人工纯林典型坡面,建立空间连续的16个样地,于2015年5–10月,监测了各样地冠层*LAI*的空间差异和季节变化特征,分析主要影响因素,并探讨在不同季节将特定样地实测*LAI*上推估计坡面平均值的尺度转化方法,从而为森林资源清

查及经营管理中的抽样调查、森林生长和森林水文研究代表性样地选择等提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏固原市泾源县香水河小流域(106.15°–106.50° E, 35.25°–35.68° N), 其面积为43.7 km², 海拔2 010–2 942 m。气候类型属温带半湿润气候。土壤以灰褐土为主。年平均气温6.0 °C, 年降水量632 mm, 主要集中在7–9月。小流域的森林覆盖率为72.8%, 包括天然次生林和人工林; 天然次生林覆盖率为48.8%, 以华山松(*Pinus armandii*)、辽东栎(*Quercus mongolica* var. *liaotungensis*)、少脉槲(*Tilia paucicostata*)、白桦(*Betula platyphylla*)和红桦(*Betula albosinensis*)等树种为主组成; 人工林主要是华北落叶松林, 覆盖率为24.0%, 占小流域人工林总面积的90%, 另有少量油松(*Pinus tabulaeformis*)等树种的人工林。

1.2 典型坡面的选取与调查

研究坡面位于香水河小流域的分水岭沟子流域, 为东南坡向, 其斜坡长480.6 m, 水平坡长

425.1 m, 平均坡度27.8°。坡面上生长着华北落叶松人工纯林, 林龄均为34年生, 足以反映不同坡位立地的植被生长差异。

2015年5月, 对从坡顶到坡脚在空间上连续分布的16块斜坡长30 m、宽30 m的华北落叶松林样地(表1), 进行每木检尺, 调查胸径、树高、枝下高和冠幅等林分结构指标。因林冠郁闭度较高, 各样地林下灌木层均发育不良, 覆盖度15%左右, 种类主要是刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)、蒙古荚蒾(*Viburnum mongolicum*)、李(*Prunus salicina*), 林下草本层覆盖度均约40%, 主要为东方草莓(*Fragaria orientalis*)和点叶蓼草(*Carex hancockiana*)。

1.3 林冠层LAI的测定

在2015年5–10月, 于每月的上、中、下旬, 选取适宜天气下(均一天气, 即天气变化相对较小)的9:00–10:30, 利用LAI-2200c植物冠层分析仪(LI-COR, Lincoln, USA), 测定各样地的林冠层LAI, 测定时按固定的S形路线, 每个样地测38个点(图1), 取平均值作为样地林冠层LAI特征值, 为保证不测到样地外林冠层, 测点距样地上下边缘为3 m (斜坡长), 左右边缘为2.5 m。

表1 典型坡面华北落叶松人工林样地基本信息

Table 1 The basis information of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation plots on the study slope

样地 Plot	海拔 Elevation (m)	坡度 Slope degree (°)	水平坡长 Horizontal length (m)	坡位 Slope position	林分密度 Stand density (ind.·hm ⁻²)	林冠郁 闭度 Canopy density	平均胸径 Mean diameter at breast height (cm)	平均树高 Mean tree height (m)	枝下高 Clear length (m)	冠幅直径 Canopy diameter (m)	地上生物量 Aboveground biomass (t·hm ⁻²)
1	2 471.4	26.3	26.9	坡上 Upper	942	0.73	20.25 ± 3.46	16.71 ± 1.71	5.53 ± 1.03	3.22 ± 0.60	108.59
2	2 458.1	27.2	26.7	坡上 Upper	749	0.74	21.04 ± 3.91	17.04 ± 2.12	5.77 ± 1.06	3.58 ± 0.58	105.55
3	2 444.4	24.4	27.3	坡上 Upper	854	0.72	20.34 ± 4.22	17.04 ± 2.14	5.83 ± 0.94	4.31 ± 0.93	112.55
4	2 432.0	25.3	27.1	中上 Upper-middle	870	0.73	20.01 ± 5.00	17.40 ± 2.73	5.93 ± 0.90	4.07 ± 0.86	116.60
5	2 421.3	22.5	27.7	中上 Upper-middle	746	0.75	19.94 ± 3.65	17.54 ± 2.05	6.22 ± 0.95	3.22 ± 0.58	111.88
6	2 409.8	24.5	27.3	中上 Upper-middle	831	0.68	18.46 ± 5.60	15.72 ± 3.13	5.44 ± 1.19	3.53 ± 1.09	91.32
7	2 397.4	22.0	27.8	坡中 Middle	719	0.81	21.03 ± 4.56	17.94 ± 2.25	6.43 ± 1.24	3.41 ± 0.98	118.19
8	2 386.1	26.8	26.8	坡中 Middle	933	0.79	20.28 ± 5.65	17.12 ± 2.77	6.18 ± 1.30	3.37 ± 1.10	127.51
9	2 372.6	27.7	26.6	坡中 Middle	815	0.73	19.78 ± 4.70	17.87 ± 2.50	6.46 ± 1.13	3.29 ± 0.90	108.54
10	2 358.7	20.1	28.2	中下 Lower-middle	674	0.67	20.83 ± 4.64	18.24 ± 2.27	5.82 ± 0.88	3.76 ± 1.01	99.21
11	2 348.4	17.9	28.6	中下 Lower-middle	572	0.65	20.62 ± 4.68	17.75 ± 2.91	5.88 ± 1.10	3.46 ± 0.78	88.44
12	2 339.2	30.0	26.0	中下 Lower-middle	770	0.70	19.69 ± 5.68	17.04 ± 3.54	5.52 ± 1.03	3.23 ± 0.92	101.87
13	2 324.2	30.4	25.9	坡下 Lower	786	0.74	19.93 ± 5.08	18.07 ± 2.53	5.77 ± 1.11	2.81 ± 0.83	108.20
14	2 309.0	37.4	23.8	坡下 Lower	1 035	0.75	18.07 ± 5.08	16.57 ± 2.98	5.85 ± 1.25	2.93 ± 0.80	111.96
15	2 290.8	37.3	23.9	坡下 Lower	955	0.70	18.36 ± 5.43	15.97 ± 3.03	5.32 ± 0.95	3.38 ± 1.03	104.81
16	2 275.6	34.9	24.6	坡脚 Bottom	907	0.72	18.72 ± 4.06	16.19 ± 2.35	6.06 ± 0.93	3.33 ± 0.77	98.67

±后数据为标准误差。地上生物量指乔木层地上生物量, 单株华北落叶松地上生物量(W)计算公式为: $\ln W = 0.9100 \ln(D^2 H) - 3.2417$, D 为胸径(cm), H 为树高(m)(刘延惠等, 2011)。

The data after ± is standard error. The aboveground biomass was the aboveground biomass of *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii*, the formula for estimating aboveground biomass of single tree was: $\ln W = 0.9100 \ln(D^2 H) - 3.2417$, D is diameter at breast height (cm), H is tree height (m) (Liu et al., 2011).

doi: 10.17521/cjpe.2016.0288

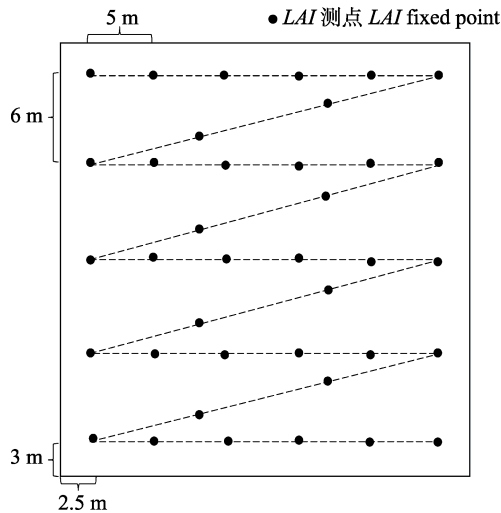


图1 华北落叶松样地内林冠层叶面积指数(LAI)测点布设图。
Fig. 1 The distribution of leaf area index (LAI) sampling point in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation plots.

1.4 土壤物理性质及环境因子的测定

在2015年5–10月,利用土钻每月3次在0–10、10–20、20–40、40–60、60–80和80–100 cm土层取样后烘干,测定土壤质量含水量,每个样地3次重复,测定时间与冠层LAI一致。

参照中华人民共和国林业行业标准中的《森林土壤水分-物理性质的测定》(国家林业局,2000),在2015年7月份,采用环刀法(体积200 cm³)于每个样地一侧的上、中、下部位,挖取3个土壤剖面,测定0–10、10–20、20–40、40–60、60–80和80–100 cm土层的容重、最大持水量和总孔隙度等土壤物理性质。

利用安置在坡面顶部和坡底空旷处的便携式自动气象站,记录生长季内气温、湿度、辐射和风速等,坡面中部样地的气象指标则根据海拔线性插值获取(王云霓等,2016)。

1.5 数据处理

在研究坡面上,各样地林冠层LAI的绝对值为各样地LAI的实测值;各样地林冠层LAI的相对值为各样地LAI测定值与整个坡面上平均值(所有样地测定值的代表坡长的加权平均值)的比值;林冠层LAI随坡位逐步下降(即水平坡长的增加)的滑动加权平均值按下面公式(1)计算,当 $n = 16$,即水平坡长增加至425.1 m时,为所有样地的代表坡长的加权平均值(坡面加权平均值)。

$$LAI = LAI_1 \cdot S_1 + LAI_2 \cdot S_2 + LAI_3 \cdot S_3 + \cdots + LAI_n \cdot S_n / \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

式中, LAI_1 、 LAI_2 ... LAI_n 指不同坡位样地的LAI测量值; S_1 、 S_2 ... S_n 指不同坡位样地的代表坡段的水平坡长(m)。

利用SPSS 19.0进行Pearson相关分析,分析各月冠层LAI与对应土壤水分、气象因子间的关系,分析各月冠层LAI与研究年份林分结构(树高、胸径和林分密度)、土壤物理性质、海拔、坡度等因子的关系。利用Excel 2010和Photoshop CS5软件制图。

2 结果和分析

2.1 生长季内各月的林冠层LAI绝对值及其坡面变化

由图2可知,各样地冠层LAI的生长季平均值有明显的坡位差异,变化范围2.68–3.27,变异系数为0.06,总体变化规律为“从坡顶向下渐增,在坡中部最大,然后又逐渐降低”。整个坡面的生长季冠层LAI的样地坡长加权平均值为2.90。

进一步分析发现,各样地冠层LAI坡面变化的季节差异明显(图3)。在5月份,坡面加权平均值为2.81,变异系数为0.05,总体表现为随离坡顶距离增加而逐渐减小。在6、7、8月份,LAI的坡面加权平均值分别为3.45、3.60和3.64,变异系数分别为0.10、0.08和0.07;其沿坡变化总体相对一致,即随离坡顶距离增加先增后减,最大值出现在距坡顶200 m处的坡中部。但6月份坡下部LAI (3.25)明显小于坡上部(3.41),至7月和8月这个差异才逐渐减小。在9、10月份,LAI的坡面加权平均值分别为2.88和1.01,变异系数分别为0.03和0.28,LAI的坡面变化表现为随离坡顶距离增加逐渐增大的趋势。

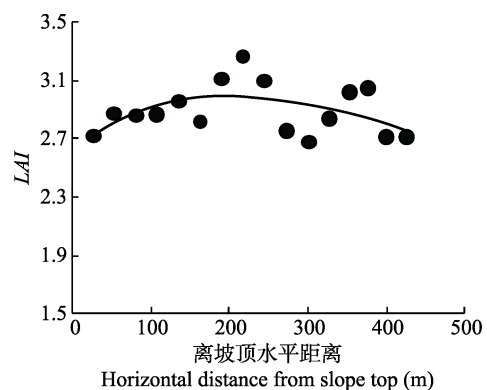


图2 华北落叶松坡面样地冠层叶面积指数(LAI)的生长季平均值随离坡顶水平距离的变化。

Fig. 2 The variation of mean canopy leaf area index (LAI) of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* during the whole growth season along the horizontal distance of plots from slope top.

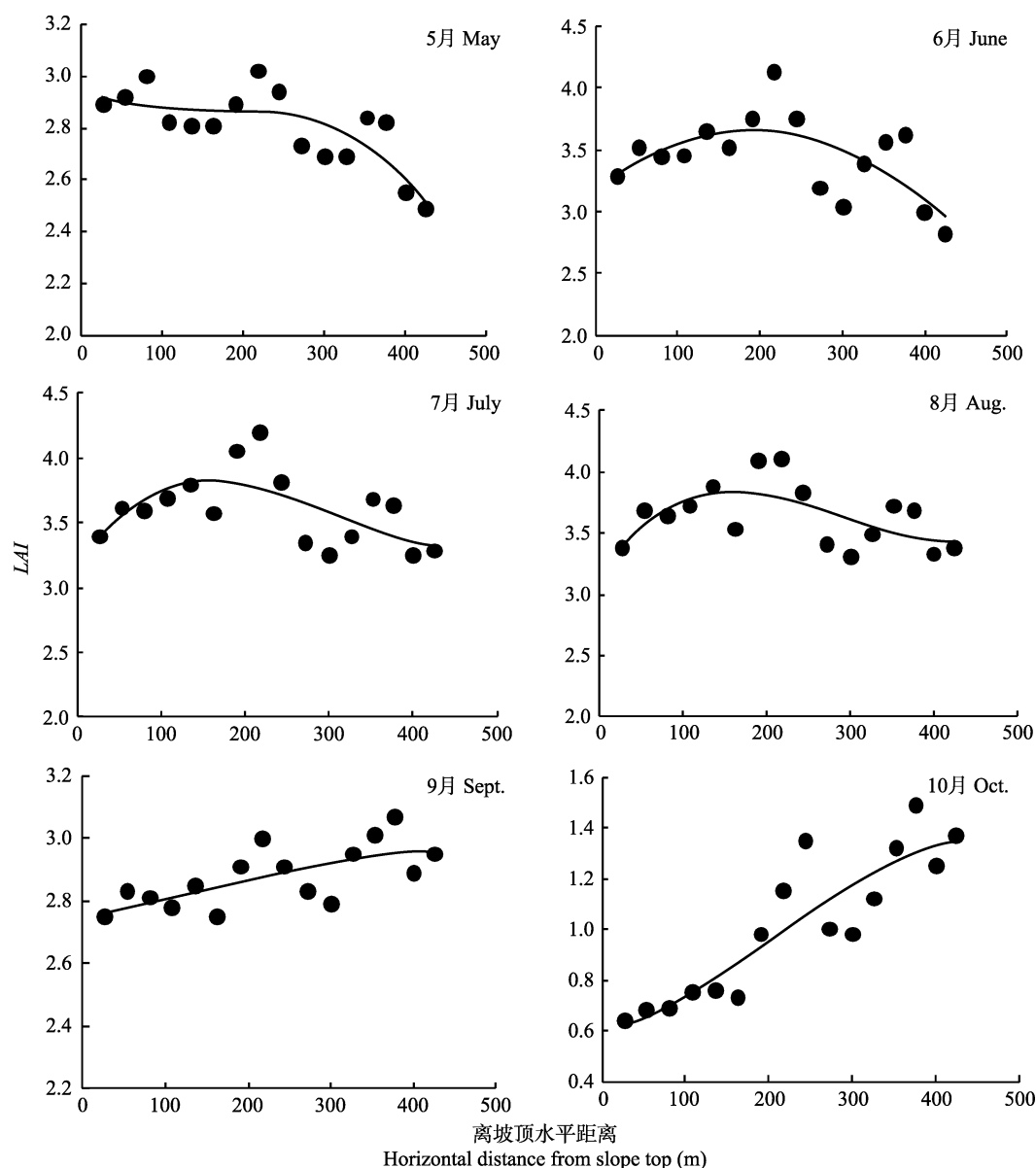


图3 生长季内各月华北落叶松样地冠层叶面积指数(LAI)随离坡顶水平距离的变化。

Fig. 3 Variations of monthly canopy leaf area index (LAI) of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* during growing season along the horizontal distance of plots from slope top.

2.2 生长季内各月的林冠层LAI相对值及其坡面变化

为定量评价生长季内不同月份的林冠层LAI坡面变化规律及不同坡位样地冠层LAI的坡面代表性,进一步分析了不同坡位样地LAI与各月坡面加权平均值的比值及其随离坡顶水平坡长增加的变化(图4)。依据各样地林冠层LAI相对值与其离开坡顶水平距离的拟合曲线可知,在5月份,LAI比值总体表现为逐渐下降,其中LAI的比值在0–306.7 m范围内基本都大于1,之后向下至坡底基本都小于1。在6–8月份,LAI比值表现为增加-减小-小幅增大-减小的波动变化趋势,但整体变化趋势呈现为增加-减小的变

化,其中6月份在0–62.9 m和320.6–425.1 m范围内小于1,在62.9–320.6 m范围内大于1;7月份在0–62.8 m和294.0–425.1 m范围内小于1,在62.8–294.0 m范围内大于1;8月份在0–65.4 m和290.3–425.1 m范围内小于1,在65.4–290.3 m范围内大于1。在9–10月份,LAI比值总体表现为随水平距离增加逐渐上升的趋势,但各坡段具体情况有异,9月份,LAI比值在0–221.1 m范围内均小于1,之后基本都大于1;10月份,LAI比值在0–224.3 m范围内均小于1,之后基本都大于1。由此可见,利用某坡位处(如坡面底部或中部)典型样地调查值作为整个坡面平均值会存在较大误差,且各月不同。

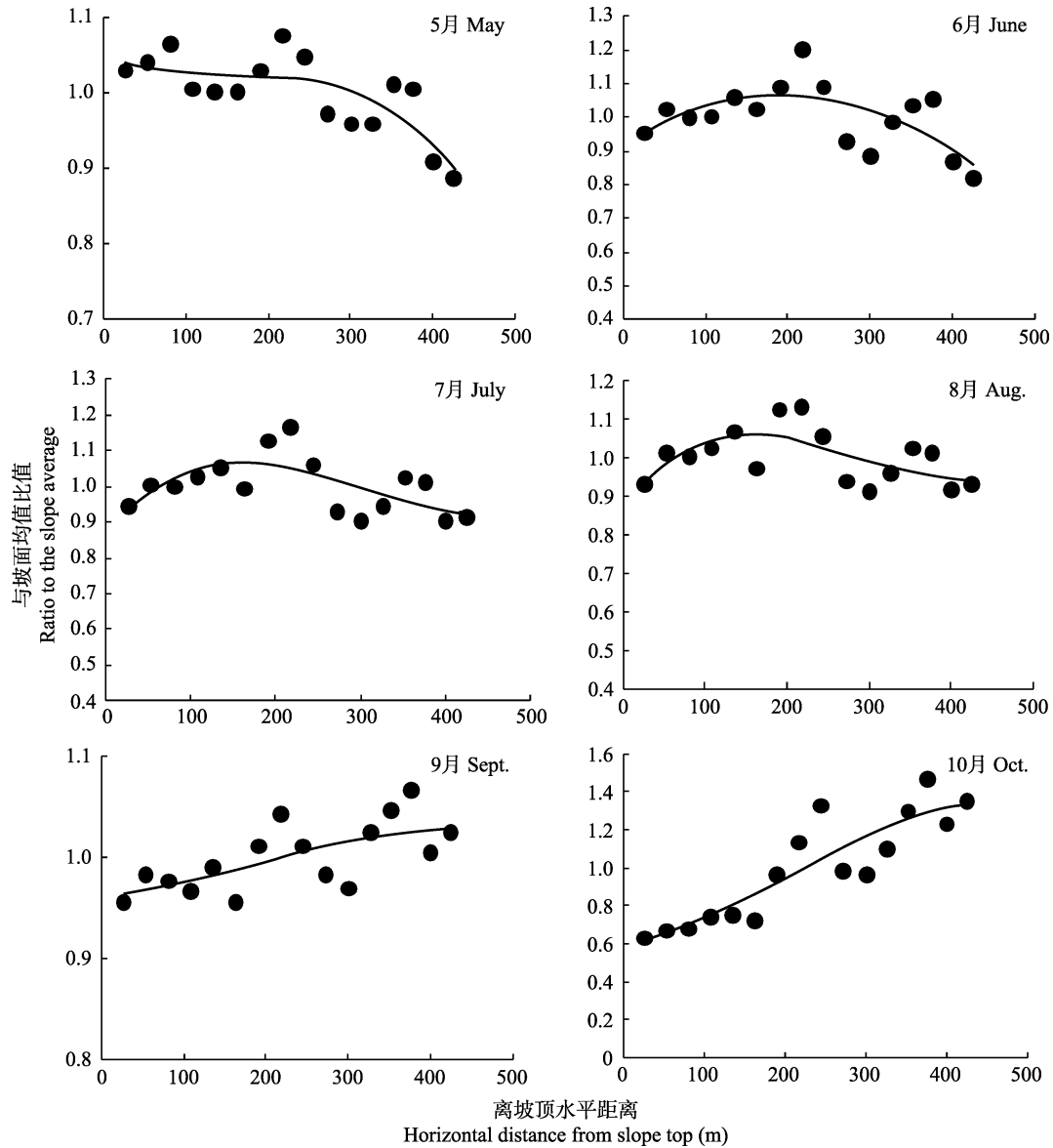


图4 生长季内各月华北落叶松林冠层叶面积指数(LAI)与坡面均值的比值随样地离坡顶水平距离的变化。
Fig. 4 Variations of the ratio of plot leaf area index (LAI) to the whole slope average of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* during different months along the horizontal distance of plots from slope top.

为从任意坡位处样地的LAI观测值推求坡面平均值,实现由“点”到“面”的尺度转换,按月建立了各样地LAI实测值与整个坡面平均值的比值随样地离坡顶水平距离而变化的非线性拟合方程(表2)。虽然相关系数不很高,但显著性均较高,5和10月份在0.01水平上显著,6–9月份在0.1水平上显著。因此,为节省测定时间和工作量,可基于这些方程由特定坡位样地的测定值估算整个坡面平均值。

2.3 生长季内各月林冠层LAI的坡面长度尺度效应

为定量理解林冠层LAI的坡面长度尺度效应,即坡面均值随坡长的变化,计算了LAI从坡顶向下随水平坡长增加(代表坡面长度增加)的滑动平均

表2 生长季内各月华北落叶松样地叶面积指数(LAI)与坡面平均值的比值(y)与离坡顶水平坡长(x)的关系

Table 2 Numerical relationship between the ratio of plot leaf area index (LAI) to the whole slope average (y) and the horizontal length (x) in different months

月份 Month	拟合方程 Fitted equation	R^2	p
5	$y = -6 \times 10^{-9}x^3 + 3 \times 10^{-6}x^2 - 0.0005x + 1.0530$	0.609	0.008
6	$y = 3 \times 10^{-10}x^3 - 4 \times 10^{-6}x^2 + 0.0015x + 0.9213$	0.432	0.071
7	$y = 1 \times 10^{-8}x^3 - 1 \times 10^{-5}x^2 + 0.0027x + 0.8716$	0.421	0.078
8	$y = 1 \times 10^{-8}x^3 - 1 \times 10^{-5}x^2 + 0.0026x + 0.8722$	0.401	0.094
9	$y = -1 \times 10^{-9}x^3 + 6 \times 10^{-7}x^2 + 0.0001x + 0.9607$	0.452	0.058
10	$y = -1 \times 10^{-8}x^3 + 7 \times 10^{-6}x^2 + 0.0009x + 0.5828$	0.800	< 0.001

值。由图5可知,生长季各月的林冠层LAI均存在不同程度的坡面长度尺度效应。在5月份,随水平坡长

增加, LAI 滑动平均值总体呈下降趋势, 最大值出现在水平坡长80.9 m处(2.93), 最小值出现在坡脚(2.80), 变幅为0.13, 平均每增加100 m水平坡长滑动平均值降低0.02, 即坡面尺度效应为 $-0.02/100$ m。在6、7、8月份, 随水平坡长增加, LAI 滑动平均值均呈先增后减的趋势, LAI 滑动平均值最大值出现在水平坡长244.2 m处(3.61、3.74和3.76), 最小值在坡顶(3.28、3.39和3.38), 变幅分别为0.33、0.35和0.38, LAI 的坡面尺度效应在离坡顶0–244.2 m和244.2–425.1 m范围内分别为 $+0.15/100$ m、 $+0.16/100$ m和 $+0.18/100$ m及 $-0.09/100$ m、 $-0.08/100$ m和 $-0.07/100$ m; 在9和10

月份, LAI 滑动平均值均呈随水平坡长增加而增大的趋势, 变化范围分别为2.75–2.88和0.64–1.01, 变幅分别为0.13和0.37, 坡面尺度效应分别为 $+0.03/100$ m和 $+0.09/100$ m。由此可见, 生长季内各月的林冠层 LAI 坡面尺度效应明显不同, 且林冠层 LAI 的坡面滑动平均值随水平坡长增加均呈非线性变化。

为量化华北落叶松林冠层 LAI 的顺坡滑动平均值随水平坡长的变化, 拟合了二者的统计关系(表3), 其 R^2 均达0.82以上, 且均在0.01水平上显著, 表明拟合效果较好。

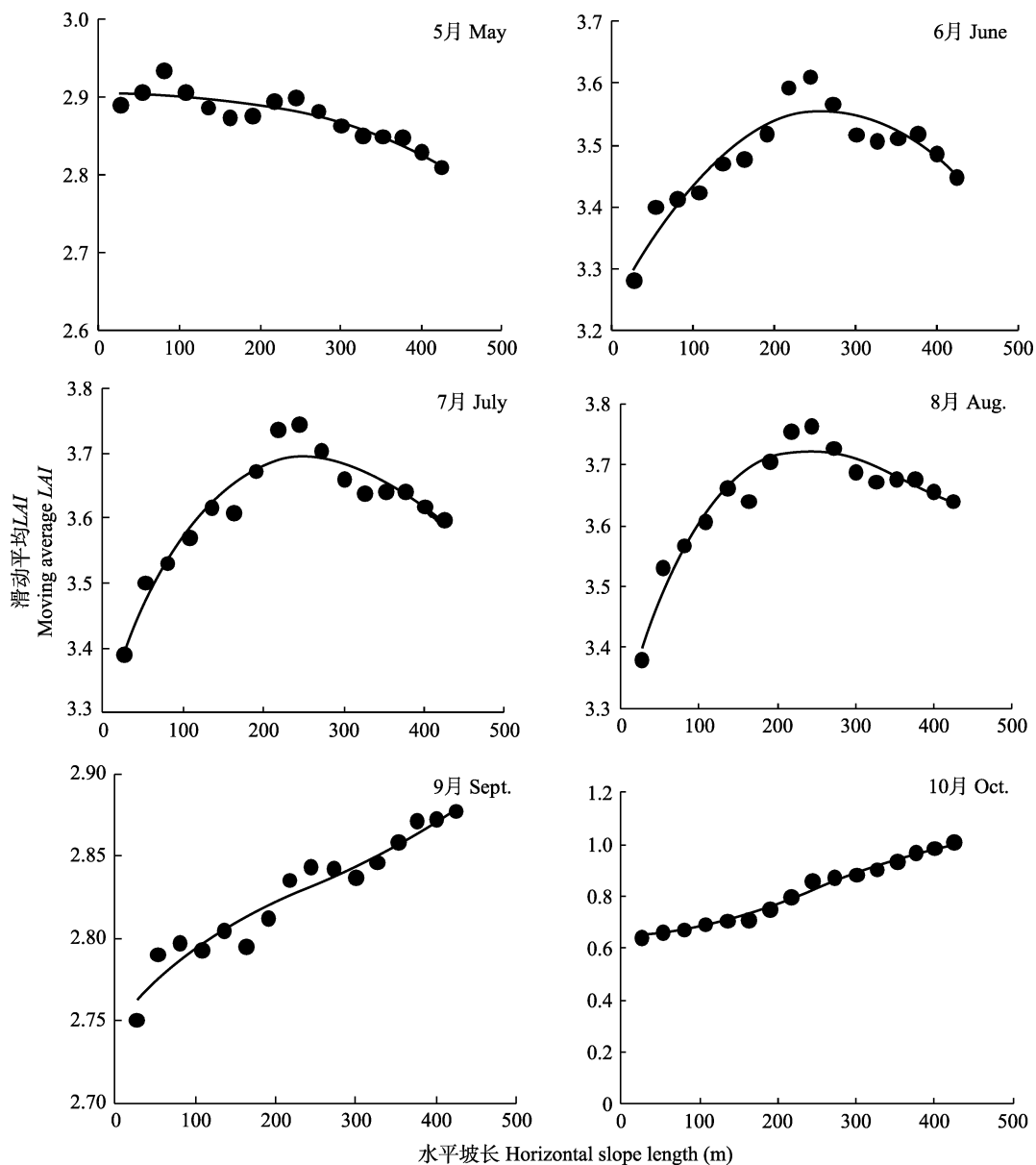


图5 不同季节华北落叶松林冠叶面积指数(LAI)滑动平均值随水平坡长增加的变化。

Fig. 5 Variations of the moving average of canopy leaf area index (LAI) of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* during different months along the horizontal distance from slope top.

表3 生长季各月华北落叶松林冠层叶面积指数(LAI)的坡面滑动平均值(y)随水平坡长(x)增加而变化的数量关系

Table 3 Numerical relationship between the moving average (y) of canopy leaf area index (LAI) of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and the horizontal length (x) in different months

月份 Month	拟合方程 Fitted equation	R^2	p
5	$y = -1 \times 10^{-9}x^3 + 4 \times 10^{-8}x^2 - 5 \times 10^{-5}x + 2.9057$	0.825	< 0.001
6	$y = 1 \times 10^{-9}x^3 - 5 \times 10^{-6}x^2 + 0.0025x + 3.2363$	0.872	< 0.001
7	$y = 6 \times 10^{-9}x^3 - 9 \times 10^{-6}x^2 + 0.0034x + 3.3118$	0.915	< 0.001
8	$y = 1 \times 10^{-8}x^3 - 1 \times 10^{-5}x^2 + 0.0042x + 3.2982$	0.932	< 0.001
9	$y = 2 \times 10^{-9}x^3 - 1 \times 10^{-6}x^2 + 0.0005x + 2.7492$	0.938	< 0.001
10	$y = -7 \times 10^{-9}x^3 + 5 \times 10^{-6}x^2 - 9 \times 10^{-5}x + 0.6438$	0.988	< 0.001

2.4 生长季内各月林冠层LAI与环境因子的关系

由表4可知, 生长季内各月林冠层LAI与环境因子的关系存在差异。5月份, 林冠层LAI与海拔及气温、辐射强度和风速等微气象因子呈显著正相关, 与林分结构、坡度和土壤物理性质不相关; 6–8月份, 林冠层LAI与土壤水分呈显著正相关, 与林分结构、海拔、坡度以及土壤物理性质不相关; 9月份, 林冠层LAI与海拔、辐射强度、风速、土壤总孔隙度和持水能力呈显著负相关, 与气温和坡度呈显著正相关, 与林分结构、土壤水分和土壤容重不相关; 10月份, 林冠层LAI与海拔、辐射强度、风速、土壤孔隙度、持水能力和土壤水分呈显著负相关, 与气温和坡度呈显著正相关, 与林分结构和土壤容重不相关。

3 讨论

3.1 林冠层LAI的坡位差异及影响因素

受植被组成、结构、立地条件、微气象等诸多因素的影响, 林冠LAI的空间差异往往较大(Asner *et al.*, 2003; Jonckheere *et al.*, 2004)。如吕瑜良等(2007)在较大山体海拔变化范围内的研究表明, 海拔和坡向等地形因子是影响川西亚高山暗针叶林LAI空间变

异的主要因素。Bequet等(2012)基于不同植被组成的研究表明, 林冠LAI与胸径、树高、冠长、冠幅等林分因子有关。鉴于对相对高差较小的坡面(本研究为239.6 m)及对人工纯林的研究还很少, 王云霓等(2016)在处于半湿润区的六盘山南坡(本研究的同一坡面)研究了生长中期林冠LAI的坡位变化及影响因素, 但没有涉及林冠层LAI坡位变化的生长季内月份差异及影响因素; 童鸿强等(2011)在处于半干旱区的六盘山北坡研究了华北落叶松林坡面林冠LAI的时空变化, 但没有揭示LAI时空变化的影响因素。

本研究表明, 华北落叶松林冠LAI的坡位变化有明显的季节差异。林冠层LAI随离坡顶水平距离的增加的变化在5月份表现为逐渐减小, 在6–8月份表现为先增后减, 在9–10月份表现为逐渐增大。产生这种坡位变化格局差异主要是因影响LAI坡面变化的主导因素在各月是不同的。这可由不同月份林冠层LAI与林分结构(密度、胸径和树高)、立地条件(土壤物理性质、土壤水分等)、地形因子(海拔、坡度等)及坡面微气象因素(温度、辐射和风速等)的相关分析结果(表4)得到证实。

在5月份, 海拔和微气象是影响林冠层LAI坡位变化的主要因素, 均与LAI呈极显著正相关; 海拔越高(同时风速越大)、坡位就偏上, 受地形遮挡影响就越小, 导致林冠层LAI增大; 作为生长季初期, 气温和辐射强度是影响植被生长的关键气象因子, 在本研究坡面上, 虽然坡顶和坡脚的气温相差不大(坡顶9.00 °C; 坡脚8.51 °C), 但日均辐射强度相差明显(坡顶152.57 W·m⁻²; 坡脚100.99 W·m⁻²), 也表明了坡面下部受地形遮挡遮阴更大。

在6–8月份, 土壤水分是唯一的显著或极显著地影响林冠层LAI坡位变化的环境因素, 且均为正

表4 不同月份华北落叶松林冠层叶面积指数(LAI)与林分特征、地形、立地及微气象因子的相关分析

Table 4 Correlation of canopy leaf area index (LAI) of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* with factors of vegetation, landform, exposure and microclimate in different months

月份 Month	胸径 Diameter at breast height	树高 Tree height	密度 Stand density	海拔 Elevation	坡度 Slope degree	气温 Air temperature	辐射强度 Radiant intensity	风速 Wind speed	土壤水分 Soil moisture	容重 Bulk density	持水能力 Water holding capacity	总孔隙度 Porosity
5	0.480	0.341	0.037	0.692**	-0.365	0.692**	0.692**	0.692**	0.457	-0.133	0.344	0.323
6	0.234	0.296	0.109	0.366	-0.163	-0.366	0.366	0.366	0.530*	-0.078	0.237	0.247
7	0.280	0.326	0.097	0.326	-0.177	-0.326	0.326	0.326	0.629**	-0.177	0.259	0.295
8	0.299	0.379	0.048	0.284	-0.157	-0.284	0.284	0.284	0.527*	-0.178	0.226	0.259
9	-0.325	0.069	0.356	-0.668**	0.622*	0.668**	-0.668*	-0.668*	-0.093	0.378	-0.601*	-0.611*
10	-0.495	0.009	0.290	-0.892**	0.641**	0.892**	-0.892**	-0.892**	-0.644**	0.483	-0.682**	-0.669**

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

相关, 进一步分析发现, 6–8月份 LAI 的总增加量与其土壤水分的平均值也显著相关($r = 0.511$, $p < 0.05$), 即 LAI 的增加量随土壤水分含量增加而增大(附录图1), 这表明了土壤含水量在几乎整个生长季的控制作用。土壤含水量变化一方面受降水和蒸散的相对大小影响而有时间变化, 另一方面受坡面水分再分配的影响而有坡位差异(附录图2)。在王云霓等(2016)的研究中, 也认为土壤含水量是影响该华北落叶松林生长季中期(7–8月)冠层 LAI 坡面变化的重要因素。

在9月份, 林冠层 LAI 的坡面变化同时受到海拔(极显著负相关)和坡度(显著正相关)等地形条件、气温(极显著正相关)和辐射强度(显著负相关)和风速(显著负相关)等气象条件以及土壤孔隙度和持水能力(显著负相关)等土壤物理性质的共同影响。海拔越高(风速越大)、气温越低, 树叶变黄时间越早, 风速大时又能加快树叶凋落。 LAI 与坡度正相关, 是因为坡面下部样地的坡度较大, 坡面上部样地的坡度较小(表1), 此外还可能因为坡度较大利于阳光在林分中穿透从而使树冠中下部获得更多阳光和利于树叶维持(Alves *et al.*, 2010)。在秋冬季节, 土壤温度是影响树木根系活动的重要因子(Körner, 1999; Dong *et al.*, 2011), 从而影响树叶的凋落及冠层 LAI 。由于仪器数量的限制, 本研究只监测3个样地的土壤温度, 没有分析土壤温度与 LAI 的关系, 但研究中9月份 LAI 与土壤总孔隙度和持水能力显著负相关, 这可能是因土壤结构对土壤温度有重要影响, 紧实(孔隙度小)土壤的保温性较好从而降温慢, 由附录表1可知, 在海拔梯度差基本一致的3个样地中, 土壤孔隙度小和持水能力弱的地段在9月份的土壤温度会明显偏高, 其差异远超出海拔的影响。

在10月份, 地形、气象、土壤物理性质对林冠层 LAI 的影响性质和9月份相同, 但影响强度(相关系数)随温度进一步降低而增强。此外, 土壤含水量也开始表现出显著影响(负相关), 这是因10月份土壤含水量较高会抑制根系呼吸, 从而加速树叶衰老。

在这个生长季内的各个月份中, 树高、胸径、林木密度等林分结构因子与林冠层 LAI 的相关系数虽然有变化, 但均未达到显著水平, 说明林冠层 LAI 的坡位变化主要是受地形因子、气象因子、土壤含水量的影响, 但直接影响因素是太阳辐射、温度(气温、土壤温度)和土壤含水量的时间变化和坡位差异。

3.2 冠层 LAI 的坡面尺度效应及尺度转换途径

在六盘山地区的前期研究(韩新生等, 2015; 邓秀秀等, 2016)表明, 受坡面水分再分配及土壤厚度和养分条件等坡位差异的影响, 华北落叶松林的树高、胸径和生物量均存在坡面尺度效应。本研究发现, 华北落叶松林冠层 LAI 同样存在坡面尺度效应, 即林冠层 LAI 的顺坡滑动平均值是随水平坡长增加而变化的, 或是说冠层 LAI 的坡面平均值受坡面长度的影响; 而且, 坡面尺度效应大小在生长季内有月份差异, 这主要是因影响树木生长的环境条件(气温、辐射、土壤水分、地形遮挡)及其坡位差异具有季节变化。有关土壤水分时空变异与其环境因子时空变化关系的研究也证实, 主控因子的时空关系因时间、空间和尺度而异是导致土壤水分时空变异的主要原因(邱扬等, 2007)。但是, 如何定量确定不同因子在冠层 LAI 坡面尺度效应形成中的作用, 还需深入研究。此外, 本研究限制在一个特定坡面上, 而环境条件的影响怎样随坡面特征变化, 也还有待研究。

在以往森林调查中, 主要是在坡面上设置数量有限的典型样地来反映坡面整体情况。但如同本研究结果表明的, 不同坡位样地 LAI 的坡面代表性存在很大差异, 且具有月份变化。这就是说, 要获取较准确的坡面特征值, 仅在坡面上设置数量有限的典型样地调查后推求坡面平均值是远不够的; 另外一方面, 花费大量时间进行全坡面调查也很难实施, 是不现实的。为此, 本研究定量分析了不同坡位样地的林冠层 LAI 与坡面平均值的比值在生长季内各月随离坡顶水平距离的变化, 发现均具有较好的非线性关系, 藉此可将任意坡位样地的 LAI 调查值经尺度上推得到较可靠的坡面平均值, 从而提高森林调查的效率与精度。然而, 由于本研究只在特定区域选取一个典型坡面进行了一个生长季的研究, 其研究结论还不具有广泛应用性, 未来还需在更多具有不同气候、地形、土壤、植被等特征的地点选取更多坡面, 进行不同降水丰富程度年份的长期监测, 在进一步理解相关影响因素及其作用的时空变化规律的基础上量化林冠层 LAI 的坡面变化规律, 努力得到普遍性规律, 用于指导科研和生产。

4 结论

在六盘山香水河小流域, 于2015年生长季

(5–10月), 选取一个华北落叶松林典型坡面, 逐月调查了林冠层LAI的坡面变化, 结果表明:

(1)林冠层LAI存在明显的月份变化和坡位差异。在5月份, 林冠层LAI的坡面加权平均值为2.81, 变异系数为0.05, LAI随离坡顶水平距离增加的变化趋势为逐渐减小。在6、7、8月份, LAI的坡面加权平均值分别为3.45、3.60和3.64, 变异系数分别为0.10、0.08和0.07, LAI的沿坡面变化均表现为“坡中较大, 坡上和坡下较小”, 但6月份坡下部LAI要明显小于坡上部, 这种差异在7和8月份逐渐缩小。在9、10月份, LAI的坡面加权平均值分别为2.88和1.01, 变异系数分别为0.03和0.28; LAI均表现为随离坡顶距离增加而逐渐增大。

(2)影响林冠层LAI的主导因素季节变化导致了LAI坡面格局的月份差异。在5月份, 由海拔(坡位)和地形遮挡共同引起的气温和辐射差异是引起冠层LAI坡位变化的主要因素; 在6–8月份, 土壤含水量的坡位差异是引起冠层LAI坡位变化的唯一主要因素; 在9–10月份, 林冠层LAI的坡位变化受到海拔(坡位)、气象条件(气温、辐射、风速)和土壤水文性质(孔隙度、持水量)及土壤含水量的共同作用, 其中在10月份的影响比在9月份增强, 尤其是土壤含水量的影响。

(3)存在林冠层LAI的坡面尺度效应且具有生长季内变化。在采用水平坡长每增加100 m对应的林冠LAI顺坡滑动平均值的变化值评价LAI的坡面尺度效应时, 5月份为 $-0.02/100\text{ m}$; 6、7和8月份在离开坡顶的0–244.2 m范围内为 $+0.15/100\text{ m}$ 、 $+0.16/100\text{ m}$ 和 $+0.18/100\text{ m}$, 在244.2–425.1 m范围内为 $-0.09/100\text{ m}$ 、 $-0.08/100\text{ m}$ 和 $-0.07/100\text{ m}$; 9和10月份为 $+0.03/100\text{ m}$ 和 $+0.09/100\text{ m}$ 。

(4)可实现林冠层LAI从任意坡位样地向整个坡面的尺度转换。拟合建立了生长季内各月的不同坡位样地林冠层LAI实测值与坡面均值的比值随离坡顶水平距离而变化的统计关系, 藉此可将任意坡位样地的LAI实测值上推得到较可靠的坡面均值, 实现尺度上推。

基金项目 国家重点研发计划项目(2016YFC-0501603)、国家自然科学基金(41390461、41230852和41471029)和科技部科技基础性工作专项(2014FY120700)。

致谢 本研究得到国家林业局宁夏六盘山森林生态站和宁夏回族自治区生态修复与多功能林业综合研究中心项目的支持, 特此致谢。

参考文献

- Alves LF, Vieira SA, Scaranello MA, Camargo PB, Santos FAM, Joly CA, Martinelli LA (2010). Forest structure and live aboveground biomass variation along elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). *Forest Ecology and Management*, 260, 679–691.
- Asner GP, Scurlock JMO, Hicke JA (2003). Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 191–205.
- Behera SK, Srivastava P, Pathre UV, Tuli R (2010). An indirect method of estimating leaf area index in *Jatropha curcas* L. using LAI-2000 plant canopy analyzer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 307–311.
- Bequet R, Campioli M, Kint V, Muys B, Bogaert J, Ceulemans R (2012). Spatial variability of leaf area index in homogeneous forests relates to local variation in tree characteristics. *Forest Science*, 58, 633–640.
- Berterretche M, Hudak AT, Cohen WB, Maierasperger TK, Gower ST, Dungan J (2005). Comparison of regression and geostatistical methods for mapping Leaf Area Index (LAI) with Landsat ETM+ data over a boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, 96, 49–61.
- Bulcock HH, Jewitt GPW (2010). Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on canopy interception. *Hydrology and Earth System Science*, 14, 383–392.
- Burrows SN, Gower ST, Clayton MK, Mackay DS, Ahl DE, Norman JM, Diak G (2002). Application of geostatistics to characterize leaf area index (LAI) from flux tower to landscape scales using a cyclic sampling design. *Ecosystems*, 5, 667–679.
- Cox PM, Betts RA, Bunton CB, Essery PLH, Rowntree PR, Smith J (1999). The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics*, 15, 183–203.
- Deng XX, Wang YN, Wang YH, Wang ZC, Xiong W, Yu PT, Zhang T (2016). Slope variation and scale effect of tree height and DBH of *Larix principis-rupprechtii* plantations along a slope: A case study of Xiangshuihe watershed of Liupan Mountains. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 36(5), 121–128. (in Chinese with English abstract) [邓秀秀, 王云霓, 王彦辉, 王忠诚, 熊伟, 于澎涛, 张桐 (2016). 华北落叶松人工林树高和胸径的坡位差异与坡面尺度效应——以六盘山香水河小流域为例. 中南林业科技大学学报, 36(5), 121–128.]
- Dong MY, Jiang Y, Zhang WT, Yang Y, Yang H (2011). Effect

- of alpine treeline conditions on the response of the stem radial variation of *Picea Meyer* Rebd. *Polish Journal of Ecology*, 59, 729–739.
- Han XS, Deng LL, Wang YH, Xiong W, Li ZH, Liu Q, Wang YB, Sun H (2015). Variation of aboveground biomass of *Larix principis-rupprechtii* plantation along slopes in the Diediegou watershed of Liupan Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(3), 132–139. (in Chinese with English abstract) [韩新生, 邓莉兰, 王彦辉, 熊伟, 刘振华, 刘千, 王艳兵, 孙浩 (2015). 六盘山叠叠沟华北落叶松人工林地上生物量的坡面变化. 林业科学, 51(3), 132–139.]
- Granier A, Bréda N, Biron P, Villette S (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269–283.
- Granier A, Loustau D, Bréda N (2000). A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 57, 755–765.
- Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 19–35.
- Körner C (1999). *Alpine Plant Life: Functional and Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Springer-Verlag, New York.
- Liu YH, Wang YH, Yu PT, Xiong W, Mo F, Wang ZY (2011). Biomass and its allocation of the main vegetation types in Liupan Mountains. *Forest Research*, 24, 443–452. (in Chinese with English abstract) [刘延惠, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 莫菲, 王占印 (2011). 六盘山主要植被类型的生物量及其分配. 林业科学研究, 24, 443–452.]
- Lü YL, Liu SR, Sun PS, Zhang GB, Zhang RP (2007). Seasonal and spatial variations of leaf area index of sub-alpine dark coniferous forest during growing season in western Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(8), 1–7. (in Chinese with English abstract) [吕瑜良, 刘世荣, 孙鹏森, 张国斌, 张瑞蒲 (2007). 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. 林业科学, 43(8), 1–7.]
- Maass JM, Vose JM, Swank WT, Martínez-Yrizar A (1995). Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. *Forest Ecology and Management*, 74, 171–180.
- Nasahara KN, Muraoka H, Nagai S, Mikami H (2008). Vertical integration of leaf area index in a Japanese deciduous broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1136–1146.
- Qiu Y, Fu BJ, Wang J, Zhang XL, Meng QH (2007). Spatio-temporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 100–107. (in Chinese with English abstract) [邱扬, 傅伯杰, 王军, 张希来, 孟庆华 (2007). 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 26, 100–107.]
- Running SW, Coughlan JC (1988). A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42, 347–367.
- Staelens J, de Schrijver A, Verheyen K, Verhoest NEC (2006). Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. *Journal of Hydrology*, 330, 651–662.
- State Forest Administration (2000). *Forestry Industry Standard Analytical Method of Forest Soil*. Standards Press of China, Beijing. (in Chinese) [国家林业局 (2000). 中华人民共和国林业行业标准——森林土壤分析方法. 中国标准出版社, 北京.]
- Tong HQ, Wang YJ, Wang YH, Yu PT, Xiong W, Xu LH, Zhou Y (2011). The Spatio-temporal variation of LAI of the *Larix principis-rupprechtii* plantation ecosystems at Diediegou of Liupan Mountains of northwest China. *Forest Research*, 24(1), 13–20. (in Chinese with English abstract) [童鸿强, 王玉杰, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 徐丽宏, 周杨 (2011). 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. 林业科学研究, 24(1), 13–20.]
- Wang YN, Deng XX, Wang YH, Cao GX, Yu PT, Xiong W, Xu LH (2016). The slope scale effect of canopy LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation at the south side of Liupan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 3564–3571. (in Chinese with English abstract) [王云霓, 邓秀秀, 王彦辉, 曹恭祥, 于澎涛, 熊伟, 徐丽宏 (2016). 六盘山南坡华北落叶松人工林冠层LAI的坡面尺度效应. 生态学报, 36, 3564–3571.]
- Yao DD, Lei XD, Yu L, Lu J, Fu LY, Yu RG (2015). Spatial heterogeneity of leaf area index of mixed spruce-fir-deciduous stands in northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 71–79. (in Chinese with English abstract) [姚丹丹, 雷相东, 余黎, 卢军, 符立勇, 俞锐刚 (2015). 云冷杉针阔混交林叶面积指数的空间异质性. 生态学报, 35, 71–79.]

责任编辑: 朱教君 责任编辑: 李 敏



扫码向作者提问

doi: 10.17521/cjpe.2016.0288

附录

Appendix

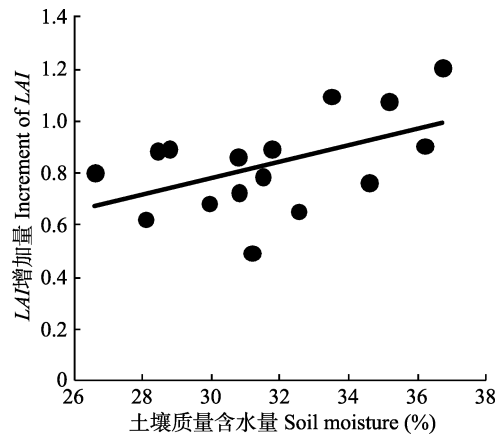


图1 6–8月华北落叶松林冠层叶面积指数(LAI)增加量与0–100 cm土层土壤含水量的关系。
Fig. 1 The relationship between the leaf area index (LAI) increment of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and soil moisture of 0–100 cm layer in June–August.

表1 1、9和16号样地0–100 cm土层的饱和持水量、总孔隙度和9月平均土壤温度

Table 1 The water holding capacity, total porosity and mean temperature in Sept. 2015 of the 0–100 cm soil layer of plot 1, plot 9 and plot 16

样地 Plot	海拔 Elevation (m)	土壤温度 Soil temperature (°C)	饱和持水量 Water holding capacity (%)	总孔隙度 Porosity (%)
1	2 471.4	8.3	65.8	59.0
9	2 372.6	8.5	66.1	58.9
16	2 275.6	9.3	61.3	56.3

土壤温度由布设在样地内的与EM50数据采集器相连接的5TE土壤温湿度探头获取。
Soil temperature was obtained by 5TE soil moisture, temperature, and electrical conductivity sensor, which is connected with the EM50 data logger.

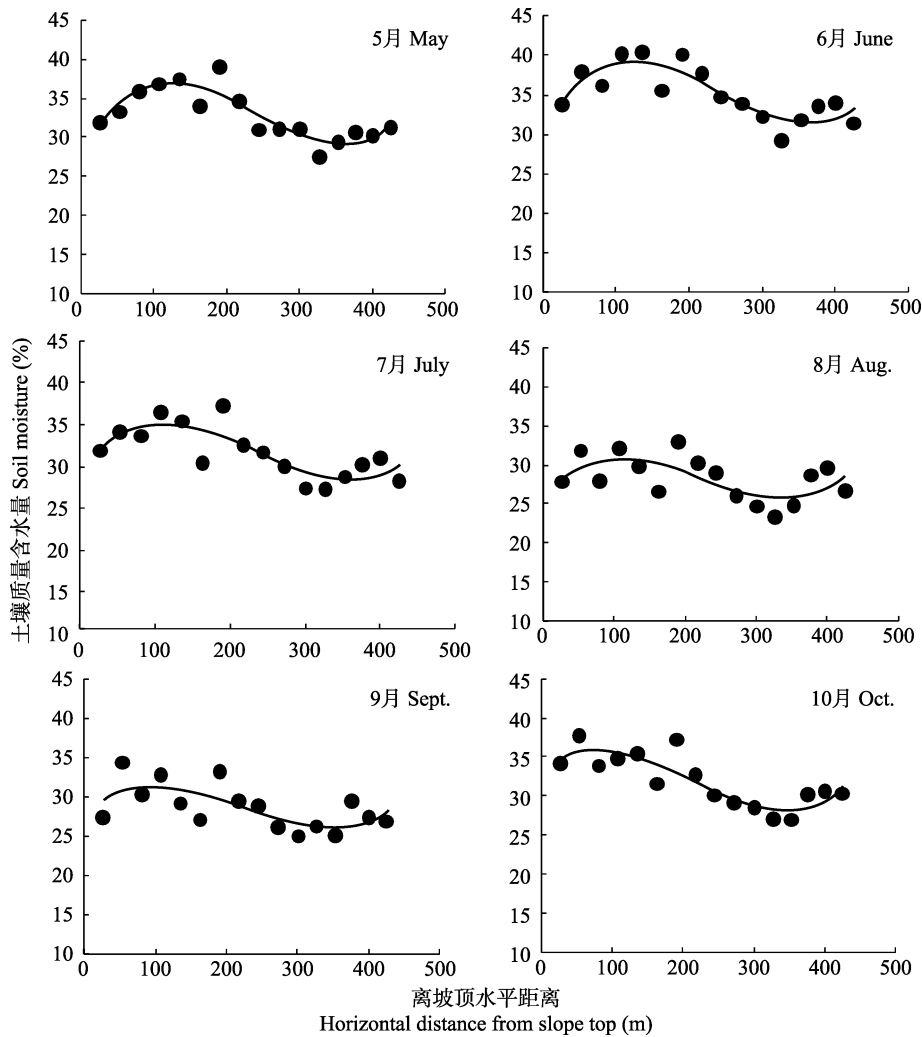


图2 生长季内各月样地0–100 cm土层土壤水分随离坡顶水平距离的变化。
Fig. 2 Variations of monthly soil moisture in 0–100 cm soil layer during growing season along the horizontal distance of plots from slope top.