

DOI: 10.5846/stxb201409301940

王云霓, 邓秀秀, 王彦辉, 曹恭祥, 于澎涛, 熊伟, 徐丽宏. 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, 2016, 36(12): - .
Wang Y N, Deng X X, Wang Y H, Cao G X, Yu P T, Xiong W, Xu L H. The slope scale effect of canopy LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation at the south side of Liupan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): - .

六盘山南坡华北落叶松人工林冠层 LAI 的坡面尺度效应

王云霓¹, 邓秀秀², 王彦辉^{1,*}, 曹恭祥¹, 于澎涛¹, 熊伟¹, 徐丽宏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 中南林业科技大学, 长沙 410004

摘要: 叶面积指数(LAI)是评价森林的生长、结构及众多服务功能的重要参数,受坡面上环境条件变化影响而有坡面变化与尺度效应,对此需要深入理解和精细刻画。本文在六盘山半湿润区香水河小流域选择了 33 a 生华北落叶松人工林的一个斜坡长 480.6m、水平长 398.2m 的东南坡向的典型坡面,在整个坡面上建立了宽 30 m 的调查样带,均匀分为空间连续的 16 个样地,在 2014 年生长季中期测定了林冠层 LAI,并分析其坡面变化规律。结果表明:林冠层 LAI 存在明显的坡面差异,其坡面平均值为 3.11,变化在 2.66—3.49,变幅为 0.83,变异系数为 0.09;LAI 总体上随着从坡顶向下的坡长增加呈波动性增大趋势,在坡面中部(水平坡长 188.45 m 时)达到最大,之后稍微减小。森林冠层 LAI 存在着坡面空间尺度效应,即冠层 LAI 的顺坡滑动平均值(Y_1)随水平坡长(X , m)增加而逐渐增大,平均每 100 m 升高 0.12,其回归关系式为: $Y_1 = -2 \times 10^{-8} X^3 + 8 \times 10^{-6} X^2 + 5 \times 10^{-4} X + 2.6523$ ($R^2 = 0.99$);各样地 LAI 与整个坡面平均值的比值(Y_2 , 小数)随水平坡长(X , m)增加呈现为波动性的非线性变化,其回归关系式为: $Y_2 = -9 \times 10^{-9} X^3 + 2 \times 10^{-6} X^2 + 1 \times 10^{-3} X + 0.829$ ($R^2 = 0.78$),可基于此式将特定坡位样地的实测 LAI 推算整个坡面的估计值。造成本文研究坡面上 LAI 坡位变化的主要原因是不同坡位(海拔)样地的气温与土壤含水量的差异。

关键词: 华北落叶松;叶面积指数;坡位差异;尺度效应;六盘山

The slope scale effect of canopy LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation at the south side of Liupan Mountains

WANG Yunni¹, DENG Xiuxiu², WANG Yanhui^{1,*}, CAO Gongxiang¹, YU Pengtao¹, XIONG Wei¹, XU Lihong¹

¹ Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China

² Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: The leaf area index (LAI) is an important parameter for the evaluation of forest growth, stand structure, and numerous ecological services. It is necessary to understand and quantify the LAI variation with site conditions and its spatial scale effect on slopes. In this study, one representative southeast-facing slope covered by 33-years-old *Larix principis-rupprechtii* plantation was selected in the small watershed of Xiangshuihe within the semi-humid region of Liupan Mountains, northwest China. This slope has slope length of 480.6 m and a corresponding horizontal length of 398.2 m. A survey transect with a width of 30 m was set up on the whole slope, and sixteen stand plots were set up continuously within this survey transect, this means that the plots covered all different slope positions from slope top to slope foot. The canopy LAI in the middle of growing season of 2014 was measured and the spatial variation of LAI on the slope was analyzed. The results

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230852, 41390461);科技部“十二五”农村领域国家科技计划(2012BAD22B030102)

收稿日期: 2014-09-30; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh@caf.ac.cn

showed that there is a remarkable difference in canopy *LAI* among the different slope positions. The mean *LAI* on the whole slope was 3.11, with a variation range of 2.66—3.49, a difference of 0.83, and a coefficient of variation of 0.09. The variation of *LAI* along lowering slope positions showed a trend of firstly increase, reaching its maximum at the middle slope (at the horizontal slope length of 188.45 m), and thereafter a slight decrease. The canopy *LAI* showed a slope scale effect, i.e., the moving average of *LAI* (y_1) increases gradually with the increasing horizontal slope length (x , m) from slope top, with an mean rate of 0.12 per 100 m. The corresponding relation to express this scale effect on the studied slope is $y_1 = -2 \times 10^{-8} x^3 + 8 \times 10^{-6} x^2 + 5 \times 10^{-4} x + 2.6523$ ($R^2 = 0.99$). The ratio of plot *LAI* to the whole slope average (y_2) varies nonlinearly along the horizontal length of plots from slope top (x , m), with the relation of $y_2 = -9 \times 10^{-8} x^3 + 2 \times 10^{-6} x^2 + 1 \times 10^{-3} x + 0.829$ ($R^2 = 0.78$). This relation can be used to estimate the slope mean *LAI* from the *LAI* measured at certain slope position. The slope variation of *LAI* mentioned above is mainly caused by the difference of air temperature and soil moisture among the plots with different slope position and elevation.

Key Words: *Larix principis-rupprechtii* Plantation; *LAI*; slope variation; scale effect; Liupan Mountains

叶面积指数(*LAI*, Leaf Area Index)是描述森林冠层结构的重要指标之一^[1],它控制着冠层与大气间的物质和能量交换^[2-4],与植被蒸腾、光合、截留降水等紧密相关^[4-7],是研究植被相关过程的关键变量,如用于定量评价植被群落生长、健康、结构与功能^[8-11]等,也是许多森林生长及生产力模型、气候模型、生态模型和水文模型的主要输入项^[12-18]。因此,准确测量和估算森林冠层的 *LAI*,对进行从叶片到冠层结构^[19]、林分、坡面、小流域、流域、区域等多级尺度的能量和水分通量等研究均有很大帮助。

LAI 的主要测定方法有直接法和间接方法两大类。前者是一种传统的、具有一定破坏性、费时费力的方法,如分层收割法^[20]、落叶收集法^[21]、格子法等;后者是利用一些测量参数估算或光学仪器测定的间接方法,如光学仪器法^[22]、遥感法^[23,14]、经验公式法^[24]、消光系数法^[25]等,间接法测量 *LAI* 具有不破坏树木、可快速大面积测量等特点,但仍需采用直接方法所得结果进行验证。

尺度问题已成为国内外研究的热点和前沿问题。有关 *LAI* 尺度效应的研究也较多,但多是基于遥感技术和统计分析在较大空间尺度上进行的^[26-27],如,董莹莹等^[28]利用主成分分析 *LAI* 尺度效应;Gao 和 Huete^[29]用傅里叶变换和传感器的点扩散函数将 MODIS 权重响应函数直接应用到 ETM+影像频率域,实现了 ETM+向 MODIS 250m、500m 和 1000m 的地表反射率及 *LAI* 的尺度转换;Jin 等^[30]用主导覆盖类型的面积百分比来表征地表异质性,通过校正因子 *R* 建立各植被覆盖类型转换公式,实现了研究区 *LAI* 升尺度转换。在样地到坡面尺度上,*LAI* 的尺度变化迅速,可能是理解 *LAI* 尺度变化机理的关键研究尺度,但开展研究还比较薄弱。现有的森林样地和坡面上 *LAI* 变化的研究多集中在典型林分 *LAI* 季节变化^[31-32,21]和坡向、坡位等立地特征差异的简单比较上^[33-35],还缺乏对 *LAI* 坡面变化及其尺度效应的定量研究,限制着从具体样地(点)的测定值经尺度上推而可靠地估计坡面特征值,也就限制着森林资源抽样调查精度的提高和调查结果的可靠的尺度扩展。因此,需更多关注林冠 *LAI* 的坡面变化规律和尺度效应。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是宁夏六盘山地区的主要造林树种,其大面积的人工林在当地的水源涵养、水土保持、木材生产和风景游憩等方面发挥着重要作用。本文在具半湿润气候的六盘山香水河小流域的一个华北落叶松同龄人工林的东南坡向的典型坡面上,建立了空间连续的不同坡位样地,测定林冠层 *LAI* 的坡位变化并分析其坡面尺度变化规律,探讨从不同坡位样地的 *LAI* 测定值推求整个坡面特征值的尺度转化方法,以期作为坡面生态水文研究中的代表性样地选择、森林资源清查和森林经营管理中的抽样调查、森林生长和森林生态水文功能评价等提供科学基础,并促进森林生态和森林水文研究以及尺度效应及尺度转换理论研究的进展。

1 研究区概况

香水河小流域(E 106° 09'—106° 30', N 35° 15'—35° 41')位于六盘山南部东侧,海拔 2040—2931 m;土

壤以山地灰褐土为主;属半湿润气候,水分相对充足,年均气温 6.8 ℃,年均降水量 636.8 mm,多集中于 7—9 月份。小流域内的森林以天然次生林为主,主要树种有辽东栎 (*Quercus liaotungensis*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、少脉槲 (*Tilia paucicostata*);华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 林为最主要的人工林,占人工林总面积的 90%,以及小流域面积的 24%。灌丛主要有甘肃山楂 (*Crataegus kansuensis*)、箭竹 (*Fargesia nitida*)、蒙古荚迷 (*Viburnum mongolicum*)、刺蔷薇 (*Rosa acicularis*) 等;草本种类主要有铁杆蒿 (*Artemisa vestita*)、蕨 (*Pteridium aquilum*)、东方草莓 (*Fragaria orientalis*)、苔草 (*Carex gmelinii*)、艾蒿 (*Artemisa argyi*)、糙苏 (*Phlomis umbrosa*) 等。

2 研究方法

2.1 典型坡面的选择

具体研究地点是香水河小流域的分水岭沟子流域,其华北落叶松人工林的面积比例占 43% 以上,且 72% 以上分布在半阳坡。因此,依据坡面完整、坡度相对均匀、林分起源和经营历史相似的原则,选择了一个东南坡向的华北落叶松林典型坡面(图 1),其水平坡长 398.2 m,平均坡度 33.7°;斜坡全长 480.6 m,海拔范围 2258.5—2524.8 m;整个坡面的坡度较均匀,无大的平台或凹地;土壤为山地灰褐土,厚度均在 1.0 m 以上。所有华北落叶松林均为 33 a 生的中龄林,足以能反映不同坡位立地的植被生长影响差异。

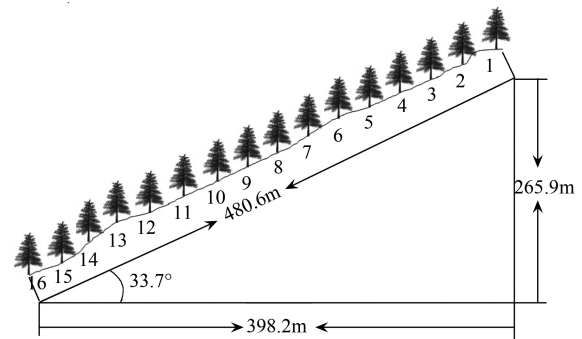


图 1 华北落叶松林典型坡面示意图

Fig. 1 Diagram of the representative slope covered by *L. principis-rupprechtii* plantation

2.2 样地设置与调查

2014 年 5 月在调查坡面上连续设立了 16 个坡宽 30 m 和坡长 30 m 的华北落叶松林样地,逐株调查胸径、树高、枝下高、冠幅等生长特征。该坡面上林分郁闭度较为均匀,平均为 0.74 左右。各样地的林下灌木发育不明显,覆盖度在 15% 左右,主要种类为刺翅峨嵋蔷薇 (*Rosa omeiensis*)、野李子 (*Prunus salicina*)、甘肃山楂 (*Crataegus Kansuensis*)、蒙古荚迷 (*Viburnum mongolicum*) 等。林下草本层发育明显,覆盖度约 40%。样地间的草本种类无明显差异,以东方草莓 (*Fragaria orientalia*) 和苔草 (*Carex spp*) 为优势种。有关样地基本信息见表 1。

2.3 乔木层 LAI 的测定

在 2014 年 7—8 月份,使用冠层分析仪 LAI-2000,在各样地测定林冠层 LAI。按照蛇形路线,每个样地测量 33 个点,其平均值为样地的林冠层 LAI 特征值。

2.4 土壤含水量和气象因子测定

在 7—8 月份,采用土钻法测定样地 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层的质量含水量,每个样地 3 次重复,每月测定 2 次。

在典型坡面的坡底和坡顶的空旷处,各安置一台自动气象站,中间样地通过插值法获得气温、降水等数据。

2.5 坡面加权平均值的计算

在得到坡面上不同坡位样地的 LAI 后,引入各样地所代表的坡段水平长度,进行加权平均,得到整个坡面的 LAI 平均值(式(1))。利用式(1)本文还将 LAI 从坡顶开始随着坡位逐步下降(即离坡顶距离的增大)计算得到了的 LAI 坡面滑动平均值。

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

式中, $LAI_1, \dots, LAI_n$ 指在不同坡位样地的 LAI; $S_1, \dots, S_n$ 指不同坡位样地的坡段水平坡长 (m)。

表 1 华北落叶松人工林样地基本信息

Table 1 The basis information of sample plots of the <i>L. principis-rupprechtii</i> plantation										
样地 Plot No	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope degree	坡位 Slope position	土壤厚度/cm Soil depth	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	林冠郁闭度 Canopy density	平均胸径/cm DBH	平均树高/m Tree height	枝下高/m Clear length	冠幅直径/m Canopy diameter
1	2524.5	36	坡上	>100	948	0.74	20.21	17.07	2.38	3.91
2	2506.9	35.5	坡上	>150	914	0.76	19.50	15.65	1.56	5.06
3	2489.7	31.2	坡上	>150	922	0.72	19.94	16.63	1.41	5.15
4	2474.1	27.1	中上	>200	936	0.75	21.00	17.12	1.39	5.61
5	2460.4	26.5	中上	>200	931	0.78	21.29	17.59	2.60	4.91
6	2447.1	37.1	中上	>200	906	0.71	19.46	16.44	2.12	4.11
7	2429.0	35.8	坡中	>200	932	0.76	20.63	17.60	2.38	3.56
8	2411.4	35.0	坡中	>200	868	0.81	20.65	17.90	2.43	6.44
9	2394.2	35.6	坡中	>200	930	0.74	20.49	19.07	2.60	4.05
10	2376.7	27.5	中下	>200	704	0.62	21.20	18.57	3.15	5.08
11	2362.9	28.9	中下	>100	762	0.68	20.52	17.48	2.11	5.88
12	2348.4	36.8	中下	>200	805	0.71	18.71	15.72	1.84	5.37
13	2330.4	36.1	坡下	>200	935	0.80	19.36	14.76	2.76	3.81
14	2312.6	36.6	坡下	>200	941	0.74	18.28	16.92	2.50	3.75
15	2294.7	37.2	坡下	>200	893	0.72	17.74	15.15	1.80	4.94
16	2276.6	37.1	坡脚	>200	933	0.75	18.85	16.00	2.53	3.39

2.6 坡面尺度效应定量评价方法

本文仅考虑 LAI 的空间尺度效应,是指其随空间尺度变化而变化的现象,具体评价指标是 LAI 沿坡滑动加权平均值随水平坡长增加的变化速率,如水平坡长每增加 100 m 对应的 LAI 变化量的绝对值。

3 研究结果

3.1 样地林冠层 LAI 绝对值的坡面变化

坡面上各样地的 LAI 有明显的坡位差异,变化在 2.66—3.49,变幅为 0.83,变异系数为 0.09;利用各坡位样地的代表坡段长度加权平均得到的整个坡面 LAI 平均值为 3.11。

不同坡位样地的 LAI 总体上呈现随离坡顶距离增加而波动性增加的趋势。以离开坡顶的水平距离为 X 轴作图后(图 2)发现,林冠层 LAI 随水平距离增加先是逐渐增大,在水平坡长 188.46 m(相对坡长为 0.47,188.46 m/398.18 m)处的坡中部达到最高(3.49);在坡段 200.75—278.01 m 内, LAI 呈降低趋势;之后回升到水平坡长处 290.02 m 的 3.48;然后又呈略微降低趋势。

3.2 样地林冠层 LAI 相对值的坡面变化

为更清楚地评价不同坡位样地 LAI 对整个坡面的代表性及其随坡长的变化规律,计算了不同坡位样地 LAI 与坡面平均值的差值和比值,然后分析它们沿水平坡长(从坡顶向下)的变化(图 3)。

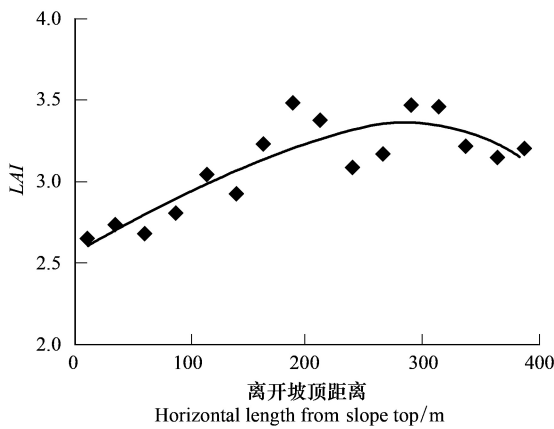


图 2 华北落叶松林冠 LAI 随离开坡顶距离的变化
Fig. 2 The variation of forest canopy LAI of *L. principis-rupprechtii* plantation along the distance from slope top

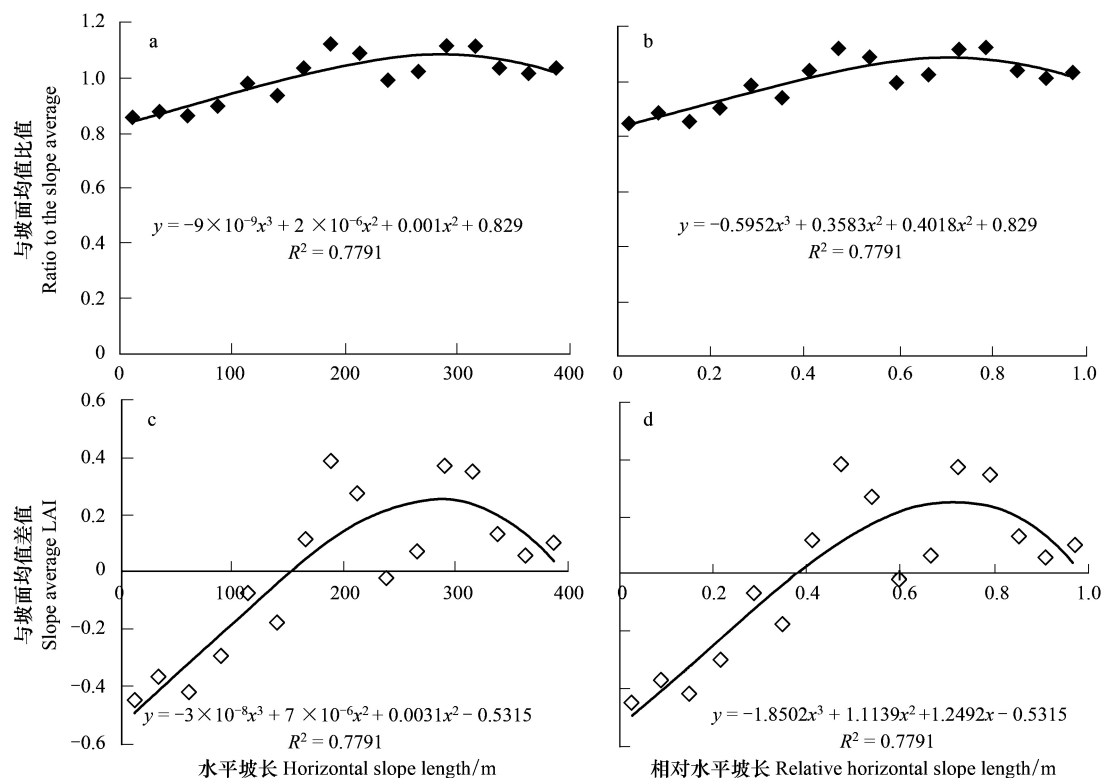


图3 华北落叶松林冠 LAI 与坡面平均值的比值差值和随离开坡顶水平距离的变化

Fig.3 Variations of the ratio to the slope average ((a), (b)) and the difference with the slope average ((c), (d)) of the canopy LAI of *L. principis-rupprechtii* plantation along the horizontal distance ((a), (c)) and the relative distance ((b), (d)) from the slope top

不同坡位样地 LAI 值与坡面平均值的差值基本上现出随水平坡长增加先增大后减小的变化趋势。结合各样地实测值与整体变化趋势的分析表明,在离坡顶距离小于 153.25 m 的坡段上,LAI 的差值为负值,从山顶的-0.57 持续增至 0;在离开坡顶 176.17—398 m 的坡段上,LAI 的差值为正值,且存在增大-减小-增大-减小的双峰波动变化;其中在 225.13—251.75 m 坡段样地的 LAI 差值为负值;在 188.46 m 处达到最大(0.38),在 290.02 m 处为次大(0.37),在坡脚处降到接近于 0。各样地 LAI 与整个坡面平均值的差值(Y_1)随离坡顶距离(X_1 ,m)、相对距离 X_2 增加均呈波动性非线性变化,其回归关系式为: $Y_1 = -3 \times 10^{-8}X_1^3 + 7 \times 10^{-6}X_1^2 + 0.0031X_1 - 0.5315$ ($R^2 = 0.78$)、 $Y_1 = -1.8502X_2^3 + 1.1139X_2^2 + 1.2492X_2 - 0.5315$ ($R^2 = 0.78$)。

不同坡位样地 LAI 值与坡面平均值的比值的随坡长的变化规律与 LAI 差值变化相类似。从坡顶到离开坡顶的 156.51 m 处,LAI 的比值从 0.85 持续增大到 1;且之后持续增加到最大值(1.12, 188.46 m 处),之后呈下降-增加-下降的波动变化趋势,在坡下及坡脚样地降到 1.02—1.04 的数值。

为从任意坡位处的样地 LAI 测定值推求坡面平均值,实现从“点”到“面”的尺度转换,统计分析得到了对应数量关系;各样地 LAI 与整个坡面平均值的比值(Y_2 ,小数)随离坡顶距离(X_1 ,m)、离坡顶的相对距离 X_2 增加的数量关系为: $Y_2 = -9 \times 10^{-9}X_1^3 + 2 \times 10^{-6}X_1^2 + 0.001X_1 + 0.829$ ($R^2 = 0.78$)、 $Y_2 = -0.5952X_2^3 + 0.3583X_2^2 + 0.4018X_2 + 0.829$ ($R^2 = 0.78$)。

3.3 林冠 LAI 的坡面空间尺度效应

对于整个坡面,冠层 LAI 的滑动平均值从 2.66 升高到 3.11,变幅为 0.45,平均每 100 m 坡长滑动平均值升高 0.12,表明存在明显的坡面尺度效应。但不同坡段的空间尺度效应是有差别的,由图 4 可知,在水平坡长为 0—74.35 m 时,LAI 滑动平均值变化较小;在坡长 74.35—225.13 m 时,LAI 滑动平均值急剧增加;坡长在 225.13—326.27 m 时,LAI 滑动平均值缓慢增加;之后,在坡长 326.27—398.18 m(坡脚)时,LAI 滑动平均值基本趋于稳定。基于各样地顺坡滑动平均 LAI 和坡面水平长度的数据,统计分析了林冠 LAI 滑动平均值(Y)随

水平坡长(X, m)增加的非线性变化关系(图4): $Y = -2 \times 10^{-8} X^3 + 8 \times 10^{-6} X^2 + 0.0005 X + 2.6523$ ($R^2 = 0.99$)。

4 讨论

4.1 林冠层 LAI 坡位变化的原因

林冠层 LAI 受植被、土壤、气候等因子的综合影响^[12,36],其坡位变化往往伴随着生物因子及非生物环境的变化。

在六盘山地区的前期研究认为,华北落叶松林冠层 LAI 与土壤厚度呈较明显的正相关(相关系数为 0.50)。但在本研究的具体坡面上,土壤厚度均大于 100 cm,而华北落叶松根系主要分布在 60 cm 以上土层;且土壤均为山地灰褐土,土壤物理性质的坡位差异不大,故土壤物理性质可能不是本研究坡面上林冠层 LAI 坡位差异的主要原因。此外,土壤水分会直接影响到树木生长及其冠层 LAI 的变化。土壤水分的坡面变化与多种因素有关,除了降水的海拔差异外,坡面的水分再分配会强烈改变土壤含水量的坡面格局和坡位差异。一般来说,径流和土壤水会顺坡流动,使较低坡面处获得更多的降水以外的水分输入^[37-38],进而深刻影响 LAI 的坡面格局,本文中 LAI 与生长季中期平均土壤质量含水量显著相关($0.48, P < 0.05$)。

在大的山体海拔变化范围内,海拔变化会引起气候条件的变化,从而影响到林冠 LAI 的变化。如在岷江上游研究表明,林冠层 LAI 随海拔升高先升高后减小,其转折点在海拔 3000 m 处^[33]。在本研究的典型坡面上, LAI 与海拔显著相关($0.73, P < 0.01$), LAI 随海拔升高先轻微增加、后明显减小(图5),与岷江流域的研究基本一致。此外,本研究坡面海拔差达到 266.3 m,存在着随海拔升高降水增加促进树木生长但温度降低不利树木生长的两种相互抵消的作用,本文中 LAI 与生长季中期的平均气温、总降水量的相关系数均达到极显著相关

($0.73, P < 0.01$)。为进一步分析 LAI 坡面变化的关键影响因素,本文应用逐步回归法分析了 LAI 与立地因子(海拔 h 、坡度 S 、土壤质量含水量 W)、气象因子(气温 T 、降水 P)和林分结构(胸径 D 、树高 H 、郁闭度 Y 、密度 d)的关系,最终得到 $LAI = 0.514T - 4.485$ ($R^2 = 0.53$),看来温度限制生长作用超过了降水促进生长作用,这可能是因研究地点地处半湿润区,海拔较高,降水相对较多,不是影响 LAI 的关键因子。

4.2 不同坡位样地的坡面代表性

从本文中不同坡位样地 LAI 与坡面平均值的比值随离开坡顶水平距离的变化(图3)来看,不同坡位样地的坡面代表性差别很大,因此难以基于较小固定面积的单个或多个样地调查做出整体估计,需确定一个基本调查强度或寻找简洁实用的尺度转换方法,并定量分析不同坡段样地的坡面代表性。

本文研究表明,不同坡位样地的 LAI 存在很大的差异和非线性变化。如要比较准确的估计坡面特征值估计,需要大量的样地调查。很显然,这在实际工作中是难以执行的。但是,利用本文建立的不同坡位样地 LAI

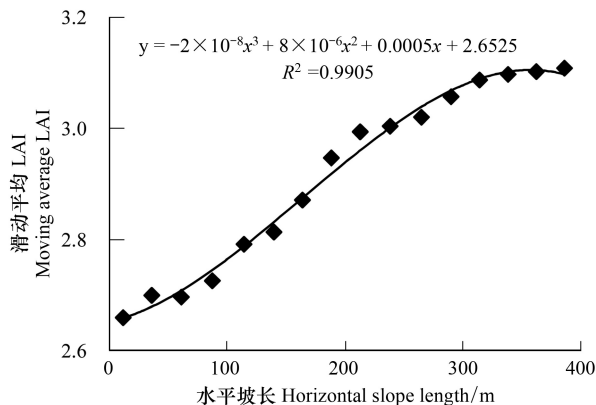


图4 华北落叶松林冠 LAI 滑动平均值随离开坡顶水平距离的变化
Fig.4 The variation of the moving average of forest canopy LAI of *L. principis-rupprechtii* plantation plots along the distance from slope top

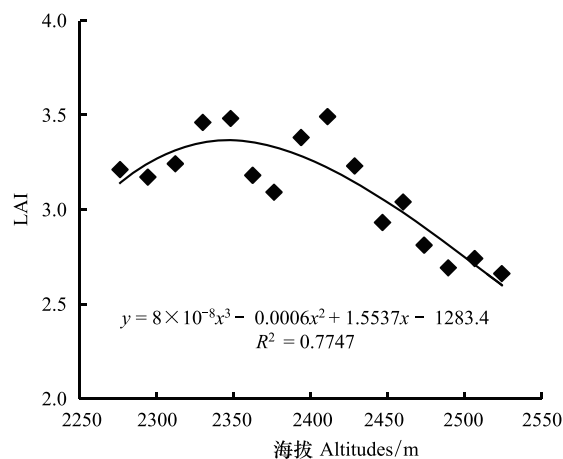


图5 华北落叶松林 LAI 随海拔的变化

Fig.5 The variation of LAI of *L. principis-rupprechtii* plantation with increasing altitude

与坡面平均值的比值或差值随离开坡顶水平距离而变化的统计关系,可将任意坡位样地的调查结果经尺度上推得到较可靠的坡面估计值,从而在降低调查强度的同时提高估计精度,这可能是将来实现坡面森林特征精确调查的一个可行途径。如将坡顶、坡脚样地实际观测的 LAI(2.66、3.21)值分别代入统计公式,得到的坡面均值为 3.16、3.23,与实测坡面平均值 3.11 相差仅 0.05、0.12。但 LAI 的坡面变化受各地气候、植被、立地、土壤等多因子影响,故还不能将本文的一个典型坡面研究结果随意推广,还需做大量调查和深入理解坡面尺度效应形成机理后才能得到具普遍性的研究结论与数量关系,推动相关尺度转换的理论发展和实际应用。

5 结论

在宁夏六盘山半湿润区的香水河小流域,调查了一个华北落叶松人工林的东南坡向的典型坡面上的林冠层 LAI 在生长季中期的坡面变化,结果表明:

(1)林冠层 LAI 存在明显的坡位差异。坡面 LAI 平均值为 3.11,变化范围在 2.66—3.49,变幅为 0.83,变异系数为 0.09。随着离开坡顶的水平坡长增加,林冠层 LAI 呈现波动性的增大趋势,总体来看时在坡面中部达到最大(离坡顶距离 188.46 m),随后稍微减小。样地间的 LAI 波动也比较明显。

(2)气温与土壤含水量差异是导致 LAI 坡位变化的重要原因。造成不同坡位样地的 LAI 差异的主要气象原因是随海拔降低导致的气温上升;由于研究地点地处半湿润地区,随海拔升高的降水增多对 LAI 坡面变化影响较弱。样地 LAI 与生长季中期土壤含水量显著正相关,坡面土壤水分再分配导致了样地土壤含水量差异,也是不同坡位样地 LAI 差异的重要原因。

(3)存在林冠层 LAI 的坡面尺度效应。不同坡位样地的 LAI 与整个坡面平均值的比值和差值均表现为随坡面长度增加的先增加后轻微降低的非线性变化关系,并有很好的数量关系。其坡面尺度效应表现为每 100 m 水平坡长对应的 LAI 坡面滑动平均值升高 0.12。可利用建立的统计关系式从特定坡位样地的 LAI 实测值推算出整个坡面的平均值。

参考文献(References):

- [1] Muraoka H, Saigusa N, Nasahara K N, Noda H, Yoshino J, Saitoh T M, Nagai S, Murayama S, Koizumi H. Effect of seasonal and interannual variations in leaf photosynthesis and canopy leaf area index on gross primary production of a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama Japan. *Journal of Plant Research*, 2010, 123(4): 563-576.
- [2] Sonnentag O, Chen J M, Roberts D A, Talbot J, Halligan K Q, Govind A. Mapping tree and shrub leaf area indices in an ombrotrophic peatland through multiple endmember spectral unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(3): 342-360.
- [3] Sprintsin M, Karnieli A, Berliner P, Rotenberg E, Yakir D, Cohen S. The effect of spatial resolution on the accuracy of leaf area index estimation for a forest planted in the desert transition zone. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(4): 416-428.
- [4] Behera S K, Srivastava P, Pathre U V, Tuli R. An indirect method of estimating leaf area index in *Jatropha curcas* L. using LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(2): 307-311.
- [5] Eriksson H, Eklundh L, Hall K, Lindroth A. Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129(1/2): 27-37.
- [6] Arias D, Calvo-Alvarado J, Dohrenbusch A. Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 2007, 247(1/3): 185-193.
- [7] Nasahara K N, Muraoka H, Nagai S, Mikami H. Vertical integration of leaf area index in a Japanese deciduous board-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6/7): 1136-1146.
- [8] Ewert F. Modelling plant responses to elevated CO₂: how important is leaf area index? *Annals of Botany*, 2004, 93(6): 619-627.
- [9] Weiss M, Baret F, Smith G J, Jonckheere I, Coppin P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination; Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 37-53.
- [10] 丹利, 季劲钧, 马柱国. 新疆植被生产力与叶面积指数的变化及其对气候的响应. *生态学报*, 2007, 27(9): 3582-3592.
- [11] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 徐程扬. 叶面积指数的研究和应用进展. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 537-541.
- [12] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 19-35.

- [13] 邹杰, 阎广建. 森林冠层地面叶面积指数光学测量方法研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2971-2979.
- [14] 黄玫, 季劲钧. 中国区域植被叶面积指数时空分布——机理模型模拟与遥感反演比较. 生态学报, 2010, 30(11): 3057-3064.
- [15] Barr A G, Black T A, Hogg E H, Kljun N, Morgenstern K, Nesic Z. Inter-annual variability in the leaf area index of a boreal aspen-hazelnut forest in relation to net ecosystem production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126(3/4): 237-255.
- [16] Sonnentag O, Talbot J, Chen J M, Roulet N T. Using direct and indirect measurements of leaf area index to characterize the shrub canopy in an ombrotrophic peatland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 144(3/4): 200-212.
- [17] Thimonier A, Sedivy I, Schleppi P. Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. *European Journal of Forest Research*, 2010, 129(4): 543-562.
- [18] Propastin P, Panferov O. Retrieval of remotely sensed LAI using Landsat ETM+ data and ground measurements of solar radiation and vegetation structure: Implication of leaf inclination angle. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 25: 38-46.
- [19] Gower S T, Norman J M. Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology*, 1991, 72(5): 1896-1900.
- [20] 任海, 彭少麟. 鼎湖山森林群落的几种叶面积指数测定方法的比较. 生态学报, 1997, 17(2): 220-223.
- [21] 刘志理, 戚玉娇, 金光泽. 小兴安岭谷地云冷杉林叶面积指数的季节动态及空间格局. 林业科学, 2013, 49(8): 58-64.
- [22] 苏宏新, 白帆, 李广起. 3 类典型温带山地森林的叶面积指数的季节动态: 多种检测方法比较. 植物生态学报, 2012, 36(3): 231-242.
- [23] 席建超, 张红旗, 张志强. 应用遥感数据反演针叶林有效叶面积指数. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 36-39.
- [24] 马泽清, 刘琪璟, 曾慧卿, 李轩然, 陈永瑞, 林耀明, 张时煌, 杨风婷, 汪宏清. 南方人工林叶面积指数的摄影测量. 生态学报, 2008, 28(5): 1971-1980.
- [25] 关德新, 吴家兵, 王志安, 金昌杰, 施婷婷, 韩士杰. 长白山红松针阔叶混交林林冠层叶面积指数模拟分析. 应用生态学报, 2007, 18(3): 499-503.
- [26] 陈健, 倪绍祥, 李静静, 吴彤. 植被叶面积指数遥感反演的尺度效应及空间变异性. 生态学报, 2006, 26(5): 1502-1508.
- [27] 张万昌, 钟山, 胡少英. 黑河流域叶面积指数(LAI)空间尺度转换. 生态学报, 2008, 28(6): 2495-2503.
- [28] 董莹莹, 王纪华, 李村军, 杨贵军, 徐新刚, 王慧芳, 黄文江. 基于主成分分析的叶面积指数尺度效应. 农业工程学报, 2012, 28(11): 164-169.
- [29] Gao X, Huete A R. Validation of MODIS land surface reflectance and vegetation indices with multi-scale high spatial resolution data. *Geosciences and Remote Sensing Symposium*, 2000, 2: 533-535.
- [30] Jin Z, Tian Q, Chen J M, Chen M. Spatial scaling between leaf area index maps of different resolutions. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 628-637.
- [31] 陈夏, 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. 植物生态学报, 2007, 31(3): 431-436.
- [32] 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. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2049-2055.
- [33] 吕瑜良, 刘世荣, 孙鹏森, 张国斌, 张瑞蒲. 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, 2007, 43(8): 1-7.
- [34] 刘建立, 王彦辉, 于澎涛, 程丽莉, 熊伟, 徐丽宏, 杜阿朋. 六盘山叠叠沟小流域典型坡面土壤水分的植被承载力. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1101-1111.
- [35] 童鸿强, 王玉杰, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 徐丽宏, 周杨. 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, 2011, 24(1): 13-20.
- [36] 张佳宁, 袁金国, 张莎. 2002—2011 年河北省植被 LAI 时空变化特征. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 86-92.
- [37] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49(4): 723-750.
- [38] 潘成忠, 上官周平. 黄土半干旱区坡地土壤水分、养分及生产力空间变异. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2061-2066