

# 基于土壤水分承载力的林分密度计算与调控 ——以六盘山华北落叶松人工林为例

曹恭祥<sup>1</sup>, 王彦辉<sup>1\*</sup>, 熊伟<sup>1</sup>, 于澎涛<sup>1</sup>, 杜敏<sup>2</sup>, 孙浩<sup>1</sup>, 李振华<sup>1</sup>, 王云霓<sup>1</sup>

(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. 中南林业科技大学林学院, 湖南长沙 410002)

**摘要:**立地水分条件决定的植被承载力是干旱缺水地区森林合理经营的重要依据。考虑到干旱缺水地区的森林蒸散耗水在水分输出中占据绝对主导地位,其大小直接与叶面积指数(LAI)相关,将林冠LAI在生长季一段时间内的最大值( $LAI_{max}$ )作为植被承载力( $LAI_c$ )的量化指标,利用冠层分析仪(LAI-2000),在六盘山香水河小流域和叠叠沟小流域的44个华北落叶松人工林样地,实测了冠层LAI的季节动态变化,研究了生长季内 $LAI_{max}$ 与林分断面积、郁闭度、平均树高、密度等常用林分结构指标的关系。结果表明: $LAI_{max}$ 与林分不同结构指标均呈幂函数关系,其决定系数( $R^2$ )依次为0.84、0.82、0.56、0.47,说明能同时反映林分密度和树体大小的林分断面积与林冠LAI相关最紧密。将 $LAI_{max}$ 与林分断面积的幂函数关系嵌入了林分平均胸径与林分密度和林龄关系的模型,用以描述 $LAI_{max}$ 与林龄和密度的关系,并利用样地实测数据拟合了模型参数。拟合建立的模型对所有样地的 $LAI_{max}$ 的计算值与实测值的相对误差平均为8.6%(0%~20.4%),能较好地描述LAI与林龄和密度的关系。利用此模型,进一步导出了能依据给定的 $LAI_c$ ,简捷计算出不同林龄时的可承载林分密度的模型,从而为基于立地水分植被承载力的林分密度管理和森林多功能经营等提供技术支持。

**关键词:**宁夏;六盘山;华北落叶松人工林;植被承载力;叶面积指数;林分结构

图书分类号:S791.22

文献标识码:A

## Calculation and Regulation of Forest Stand Density According to Soil Water Carrying Capacity: A Case of *Larix principis-rupprechtii* Plantation in Liupan Mountains

CAO Gong-xiang<sup>1</sup>, WANG Yan-hui<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>1</sup>, YU Peng-tao<sup>1</sup>,  
DU Min<sup>2</sup>, SUN Hao<sup>1</sup>, LI Zhen-hua<sup>1</sup>, WANG Yun-ni<sup>1</sup>

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

2. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410002, Hu'nan, China)

**Abstract:** The vegetation carrying capacity is mainly determined by soil moisture condition is an important basis for the reasonable forest managements in dryland regions. Since the evapotranspiration of forest is directly related to the leaf area index (LAI) and it accounts for the absolutely dominant proportion in the water output from forestland in arid areas, it is proposed to use the maximum LAI ( $LAI_{max}$ ) during a period of growing season as the quantitative indicator of the vegetation carrying capacity ( $LAI_c$ ). In order to promote the related technology progress, the LAI of

收稿日期:2013-12-09

基金项目:国家林业局林业公益性行业科研专项(200904056);科技部“十二五”农村领域国家科技计划(2012BAD22B030102);国家自然科学基金项目(41230852);国家林业局宁夏六盘山森林生态站资助

作者简介:曹恭祥,男,博士研究生,主要从事森林水文、森林生态研究。E-mail:caogongxiang1984@163.com

\* 通讯作者:研究员,博士生导师,从事森林水文、森林生态、森林健康等研究。E-mail:wangyh@caf.ac.cn

stand canopy of 44 sample plots of *Larix principis-rupprechtii* plantation were monitored using Plant Canopy Analyzer (LAI-2000) during the growing season in two small catchments of Xiangshuihe and Diediegou at Liupan Mountains located at northwest China. The seasonal variation of canopy LAI and the relation among the LAI and other normal stand structure parameters, such as stand basal area, canopy density, mean tree height and stand density were analyzed. The result showed that a power function existed between the  $LAI_{max}$  and all the stand structure parameters mentioned above, with a determination coefficient ( $R^2$ ) of 0.84, 0.82, 0.56 and 0.47 respectively. It implies that the stand basal area, which is jointly determined by stand density and size of trees, is correlated with the canopy LAI at the best. Therefore, the power relation between the  $LAI_{max}$  and basal area was coupled into a model which describes the relations among the stand average DBH, stand density and stand age, for describing the relation among  $LAI_{max}$ , stand density and stand age. Then, the parameters in this model were fitted using the measured data from sample plots. The model precision test showed that the mean relative error between the simulated and field measured values of  $LAI_{max}$  was 8.6% (0–20.4%). This implies that this fitted model can well describe the relation among the forest canopy LAI, forest age and forest density. Hence, this model was used to deduce a new model for calculating the stand density at any given tree age under any certain  $LAI_c$  value. The result of this study could offer theoretical and technical reference for stand density regulation and multifunctional forest management based on vegetation carrying capacity.

**Key words:** Ningxia; Liupan Mountains; *Larix principis-rupprechtii* plantation; carrying capacity of vegetation; leaf area index; stand structure

叶面积指数(LAI)是广泛用于森林结构和功能研究的冠层特征指标<sup>[1-2]</sup>,它直接影响森林的光合作用、木材生产、林下植被生长和天然更新等过程<sup>[3-4]</sup>及水土保持、固碳释氧等服务功能,同时也是森林生长及生产力模型、大气模型、水文模型等的重要输入参数<sup>[5-6]</sup>。国内外对 LAI 已研究很多,涉及 LAI 观测方法及对比<sup>[7-8]</sup>、特定林分的 LAI 动态特征<sup>[9-11]</sup>、基于遥感和模型的 LAI 估算与反演<sup>[12-14]</sup>等。由于 LAI 通过截持降水、蒸腾等水文过程直接影响水文循环和林地产流, LAI 也广泛用于生态水文影响<sup>[15-16]</sup>和环境响应<sup>[17-18]</sup>等研究。在我国西北缺水地区的森林植被建设中,需要基于土壤水分可承载植被的能力(简称植被承载力)进行森林植被的空间规划、组成设计、结构调控等,从而兼顾植被稳定及水分平衡<sup>[19]</sup>。林分密度作为林业生产和研究中最常用和最便捷的林分结构指标,曾被选用描述植被承载力<sup>[20]</sup>,但植被耗水量随林木密度变化的关系既有其适用性也存在局限性<sup>[21]</sup>,一是相同密度但个体大小不同的林分生物量、LAI 和耗水量可相差很大;二是改变密度影响蒸散的最直接作用是改变植被蒸腾量和截持量大小及其所占总蒸散的比例,但由于各蒸散组分间的复杂关系并不能直接决定植被总蒸散耗水量的大小<sup>[22]</sup>,这就使其作为植被承载力指标时在一些情况下并不适用。由于 LAI 能高度反映树叶的

水平覆盖及垂直分布特征<sup>[23]</sup>,并直接影响植物蒸腾、冠层截持、林地蒸发等水分输出过程,用其作为植被承载力指标会更合理<sup>[24]</sup>。已有研究基于多年水量平衡及植被耗水特征获得了在特定立地的水分条件下能承载的最大植被 LAI<sup>[25-26]</sup>,但 LAI 对林业生产人员来说较为抽象,且其与林分密度等常用结构指标的关系复杂,可随立地环境、林分年龄、经营措施等变化,使得 LAI 作为植被承载力指标在生产中推广应用困难。因此,深入研究并定量刻画冠层 LAI 与林分密度等林业生产常用结构指标的关系,并在此基础上提供简便易行的转换途径,是亟待解决的技术问题。

本研究在黄土高原重要水源地的宁夏六盘山区,选择当地主要造林树种并发挥着重要水文功能的华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)人工林,实测了生长季内林冠 LAI 的动态变化,建立 LAI 与密度等林分结构指标的数量关系,为基于立地水分植被承载力确定对应林分密度和开展面向多功能经营的林分结构调控等提供科技支持。

## 1 研究区概况

本研究在宁夏六盘山(106°09′~106°30′E, 35°15′~35°41′N)的叠叠沟和香水河2个小流域进行。叠叠沟小流域位于六盘山的北段西侧,海拔1975~

2 615 m,为典型的半干旱大陆性季风气候,年均气温 $6\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量 $425\text{ mm}$ ( $340\sim 520\text{ mm}$ ),集中于7—9月份,无霜期约130 d,土壤类型以灰褐土面积最大,黄土次之。由于干旱限制和历史上人为破坏,森林覆盖率低,历经20多年造林也才达到24.4%,自然植被以虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decne.)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* Linn.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)灌丛等为主;人工林主要是华北落叶松林,面积比例最大,其次是山杨(*Populus davidiana* Dode)林和沙棘灌丛。自20世纪80年代营造华北落叶松人工林以来,极少间伐抚育,目前存在大量1穴多株现象,密度偏高;小流域内草地面积比例最大,占50%以上,主要优势种为长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng)等。香水河小流域位于六盘山南部东侧的六盘山自然保护区核心地带,海拔 $2\ 040\sim 2\ 942\text{ m}$ ,属温带半湿润气候,降水相对充足,但热量较低。年均气温 $5\sim 5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量 $770\text{ mm}$ ( $600\sim 820\text{ mm}$ ),多集中于7—9月份,无霜期 $100\sim 130\text{ d}$ 。土壤类型主要为山地灰褐土。小流域的森林覆盖率高达72.9%,以天然次生林为主,组成树种主要有辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)、少脉槲(*Tilia paucicostata* Maxim.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、山杨和华山松(*Pinus armandi* Franch.)等;人工林主要是华北落叶松和油松(*P. tabulaeformis* Carr.)等纯林,自20世纪80年代大面积造林以来,很少间伐抚育,现有林分密度较高。灌丛主要有黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、华西箭竹(*Fargesia nitida* (Mitford) Keng f. ex Yi)、甘肃山楂(*Crataegus kansuensis* Wils.)、刺蔷薇(*Rosa acicularis* Lindl.)等;草本主要有叶苔草(*Carex hancockiana* Maxim.)、欧洲蕨(*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

在叠叠沟小流域共设置29个样地:2009年在典型坡面上从坡底至坡顶均匀布设(相互间隔30 m)的9个临时样地<sup>[25]</sup>、2011年根据密度梯度设置的7个临时样地<sup>[27]</sup>、2012年在选择的2条不同坡向坡面观测样线上各自布设的6个临时样地,所有样地大小均为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ ;另外,在2012年继续观测的大小为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的1个固定样地。

在香水河小流域共设置15个样地:2003年设置的1个固定样地和1个临时样地<sup>[28]</sup>、2009年设置的同一坡面不同坡位的5个临时样地<sup>[29]</sup>、2012年设置的5年前间伐后形成的不同密度的5个固定样地(密度分别为844、1033、1133、1556、1811株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ ),还有2012年继续观测的1个长期固定样地和2个临时样地,所有样地大小均为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。

在宁夏六盘山森林定位研究站,自2000年以来持续开展了华北落叶松人工林生态水文研究,本文所用的44个样地的数据来自多年观测积累及近年的专门观测值,基本信息见表1。

### 2.2 林分结构指标的常规调查

采用统一方法,在所有样地内常规调查林分结构指标。首先调查样地的海拔、坡度、坡向、土壤厚度等立地因子,然后每木检尺,调查株数、树高、胸径、冠幅、枝下高等指标,计算林分密度(株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ )、平均树高(m)和胸径(cm)及林分断面积( $\text{m}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ )等,并观测冠层郁闭度<sup>[30]</sup>。

### 2.3 林冠 LAI 测定

利用LAI-2000冠层分析仪(LI-Cor Co., USA)监测样地的LAI动态变化。LAI-2000的核心是LAI-2050光学感应器,通过“鱼眼”镜头(天顶角为 $74^{\circ}$ )将半球视野范围内的光线折射到光电感应器上,“鱼眼”视野的透镜能保证用于计算LAI的冠层样本尽可能大。应用LAI-2000仪器时采用标准的操作步骤,首先尽可能避免直射阳光,尽量在日出或日落时或阴天时测量;如避免不了则需选取适当的观察帽,背对阳光测量,遮住日光和操作人员本身。通过2次交叉获取开放天空和植物冠层底部的影像,解算出LAI及其误差。

在生长季初期和末期LAI变化快时每7~10 d观测1次,在生长季中期每10~15 d观测1次。每次观测时,沿蛇形曲线在30个随机布置的固定测点测定,记录整个样地的LAI平均值的仪器读数。考虑针叶簇生和枝条投影影响,仪器读数需乘校正系数1.42<sup>[31]</sup>。

### 2.4 最大 LAI 确定

以香水河小流域不同间伐强度的5个华北落叶松人工林为研究对象,确定林分最大LAI。2012年4月25日为第1次观测LAI的时间,当时树叶刚开始萌发。5个样地分别为0.86、0.64、0.67、0.61、0.58,将其视为初始值。在校正这几个样地的2012年生长季内LAI仪器读数时,首先减去各自样地

的初始值,使得起始  $LAI$  为零,然后乘以校正系数 1.42,得到生长季  $LAI$  动态变化的系列数据。为便于统一分析,需将 5 个样地  $LAI$  的测量值转换为相

对值,即各样地生长季  $LAI$  动态数据除以生长季内实测到的 1 次  $LAI$  极端最大值。

表 1 六盘山华北落叶松人工林样地的特征

样地编号	间伐状况	海拔 /m	坡度 /( $^{\circ}$ )	坡向	坡位	最大叶面积指数	土壤厚度 /cm	林龄 /a	林分密度/(株· $hm^{-2}$ )	平均胸径 /cm	平均树高 /m	郁闭度	观测时间(年)
DDG-3-1	无间伐	1 997	11	西北 NW	坡底	3.02	150	20	1 650	8.9	8.2	0.62	2009
DDG-3-2	无间伐	2 020	12	西北 NW	坡下	3.11	136	20	1 375	9.4	9.9	0.65	2009
DDG-3-3	无间伐	2 050	15	西北 NW	坡下	3.31	130	20	1 111	9.2	9.5	0.62	2009
DDG-3-4	无间伐	2 078	22	西北 NW	坡中下	3.60	120	20	1 500	9.8	8.9	0.43	2009
DDG-3-5	无间伐	2 099	24	西北 NW	坡中	3.70	115	20	1 875	8.5	9.3	0.63	2009
DDG-3-6	无间伐	2 123	15	西北 NW	坡中上	2.24	110	20	625	6.8	5.8	0.10	2009
DDG-3-7	无间伐	2 135	14	西北 NW	坡上	1.46	100	10	950	5.6	4.9	0.15	2009
DDG-3-8	无间伐	2 147	14	西北 NW	坡上	1.46	80	10	750	5.4	4.4	0.05	2009
DDG-3-9	无间伐	2 165	12	西北 NW	坡顶	1.17	40	10	400	2.2	2.5	0.05	2009
DDG-1	无间伐	2 040	11	西北 NW	坡底	3.42	155	22	967	10.4	10.4	0.75	2011
DDG-2	无间伐	2 050	11	西北 NW	坡下	3.67	140	22	1 575	10.5	12.1	0.77	2011
DDG-3	无间伐	2 060	13	西北 NW	坡中下	3.00	130	22	1 275	11.2	11.7	0.76	2011
DDG-4	无间伐	2 080	26	西北 NW	坡中	3.07	110	22	1 175	10.7	10.0	0.72	2011
DDG-5	无间伐	2 100	31	东北 NE	坡中上	2.49	100	22	525	11.7	9.7	0.40	2011
DDG-6	无间伐	2 123	25	东北 NE	坡上	1.59	80	12	175	14.2	8.3	0.16	2011
DDG-7	无间伐	2 150	10	东北 NE	坡顶	1.41	60	12	175	10.5	6.2	0.14	2011
DDG-1-1	无间伐	2 068	34	西北 NW	坡下	3.51	150	24	2 050	9.3	7.7	0.75	2012
DDG-1-2	无间伐	2 082	38.4	西北 NW	坡中下	3.45	140	24	2 250	10.1	8.9	0.76	2012
DDG-1-3	无间伐	2 109	36	西北 NW	坡中	3.84	100	24	2 075	10.1	8.7	0.80	2012
DDG-1-4	无间伐	2 128	29	西北 NW	坡中上	3.96	100	24	2 525	10.0	8.1	0.82	2012
DDG-1-5	无间伐	2 153	22	西北 NW	坡上	3.60	80	24	1 775	9.2	7.0	0.79	2012
DDG-1-6	无间伐	2 172	16	西北 NW	坡顶	2.06	40	14	533	7.9	4.9	0.20	2012
DDG-2-1	无间伐	1 992	9	东北 NE	坡下	3.06	150	24	2 275	8.1	7.9	0.69	2012
DDG-2-2	无间伐	2 036	14	东北 NE	坡中下	3.63	140	24	2 650	9.2	9.2	0.77	2012
DDG-2-3	无间伐	2 081	31	东北 NE	坡中	4.47	125	24	2 700	8.5	8.3	0.86	2012
DDG-2-4	无间伐	2 127	43	东北 NE	坡中上	4.20	100	24	1 250	10.8	10.6	0.80	2012
DDG-2-5	无间伐	2 152	21	东北 NE	坡上	3.14	80	24	1 067	13.2	8.4	0.60	2012
DDG-2-6	无间伐	2 175	5	东北 NE	坡顶	3.27	60	24	1 689	10.4	7.1	0.72	2012
DDG-LYS	无间伐	2 055	11	西北 NW	坡下	4.04	170	24	1 867	9.4	9.2	0.73	2012
XSH-3	无间伐	2 180	32	东南 SE	坡下	3.34	85	21	1 725	11.2	13.7	0.85	2003
XSH-13	无间伐	2 286	45	东南 SE	坡下	2.62	70	21	1 175	12.2	13.6	0.60	2003
XSH-LYS-1	无间伐	2 494	32	东南 SE	坡上	3.39	120	26	1 025	17.5	13.1	0.55	2009
XSH-LYS-2	无间伐	2 453	33	东南 SE	坡中上	4.17	130	26	1 258	20.1	16.3	0.70	2009
XSH-LYS-3	无间伐	2 412	35	东南 SE	坡中	3.99	100	26	1 125	19.3	18.2	0.60	2009
XSH-LYS-4	无间伐	2 357	35	东南 SE	坡中下	3.67	120	26	825	17.3	14.8	0.65	2009
XSH-LYS-5	无间伐	2 300	32	东南 SE	坡下	3.99	130	26	1 175	17.8	14.1	0.75	2009
XSH-I	5年前间伐	2 271	37	东南 SE	坡下	4.84	170	29	1 811	16.3	14.3	0.89	2012
XSH-II	5年前间伐	2 302	39	东南 SE	坡下	4.52	165	29	1 556	16.0	14.1	0.83	2012
XSH-III	5年前间伐	2 284	37	东南 SE	坡下	4.16	170	29	1 133	16.4	13.8	0.75	2012
XSH-IV	5年前间伐	2 321	31	东南 SE	坡下	3.86	165	29	1 033	18.0	15.8	0.68	2012
XSH-V	5年前间伐	2 316	29	东南 SE	坡下	3.40	170	29	844	18.1	15.2	0.62	2012
XSH-1-1	无间伐	2 265	37	东南 SE	坡下	4.01	160	29	1 175	15.4	13.6	0.72	2012
XSH-1-2	无间伐	2 318	37	东 E	坡下	3.45	165	29	575	17.5	16.1	0.70	2012
XSH-1-3	无间伐	2 318	11	东 E	坡下	4.10	150	29	625	20.1	16.3	0.60	2012

注:样地编号中的 DDG 指样地位于叠叠沟小流域;XSH 指位于香水河小流域。

基于  $LAI$  生长季内动态变化特征,为了排除在观测过程中  $LAI$  下降或波动的影响,选择生长季内实测的  $LAI$  极端最大值和之前 1 次及之后 1 次实测值的平均值( $LAI$  最大值稳定期内的 3 个重复的平

均值),作为林分的生长季内最大  $LAI$ (记为  $LAI_{max}$ )。

## 2.5 数据整理与分析

应用 Excel 和 SPSS 16.0 统计分析软件进行数据处理。对所有样地分别进行生长季内  $LAI_{max}$  值与

林分的密度、平均树高、郁闭度、林分断面积等常规林分结构指标的关系分析。采用 SPSS 16.0 检验  $LAI$  与各因子的回归及平均胸径生长模型参数拟合值的显著性。

### 3 结果与分析

#### 3.1 林冠叶面积指数 ( $LAI$ ) 动态变化

在干旱缺水地区,计算基于土壤水分的植被承

载力的基本原则是维持水量平衡和保障植物稳定,植被蒸散作为最大的水分输出项与  $LAI$  有很大关系<sup>[32]</sup>。考虑到降水分布和土壤水分的年内变化,对植被承载力计算起关键作用的不是生长季的平均  $LAI$ ,而可能是生长季内一段时间的最大  $LAI$ 。因此,为确定林分最大  $LAI$ ,本文以香水河小流域不同间伐强度的 5 个华北落叶松人工林样地为例,分析  $LAI$  的生长季内动态变化。

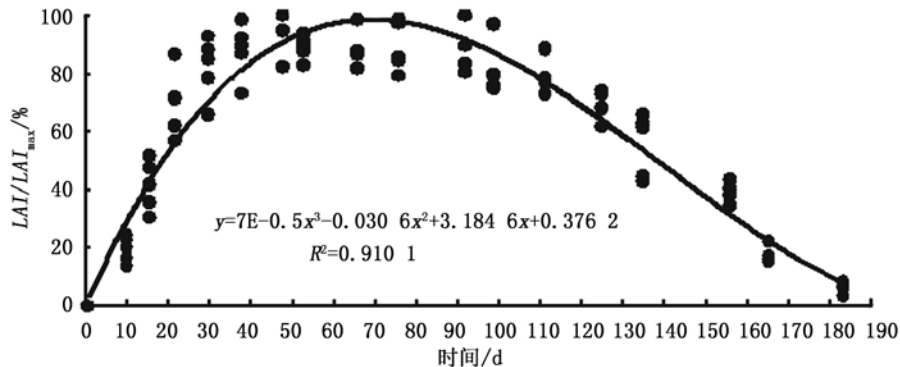


图1 2012年生长季内香水河流域5个不同密度的华北落叶松人工林叶面积指数相对值( $LAI/LAI_{max}$ )的动态变化

调查发现,华北落叶松林分的  $LAI$  在树叶萌芽开始后的第 0~38 d(4月25日—6月2日)急剧增大,平均每天增加 2.0%;在 6月2日(第48天)达到林分的最大值,至 7月26日(第92天)  $LAI$  保持相对平稳;之后,  $LAI$  逐渐减小,平均每天减少 0.5%。在  $LAI$  平稳期内,  $LAI$  观测值有所下降或波动,可能是天气条件影响了读数或环境胁迫导致树叶减少。图 1 显示了  $LAI$  相对值在生长季内的变化,采用一元三次方程( $X$  为天数; $Y$  为叶面积指数相对值( $LAI/LAI_{max}$ ))进行拟合,效果较优( $P < 0.01$ ),方程的峰值出现在树叶萌芽后的 48~92 d。由此得出,华北落叶松人工林树叶萌芽后 48~92 d 是林分最大  $LAI$  的分布时段。

#### 3.2 最大 $LAI$ 与其他常规林分结构指标的关系

从图 2 可以看出:生长季内  $LAI_{max}$  值与林分的密度、平均树高、郁闭度、林分断面积等的关系均可采用幂函数关系表达( $P < 0.01$ ),并且均呈非线性关系,但  $LAI$  与各指标的相关性存在明显差异,其中与林分断面积的相关性最好( $R^2 = 0.8394$ ),与郁闭度的相关性次之( $R^2 = 0.8223$ ),与平均树高和林分密度的相关性较低( $R^2 = 0.5605$ ;  $R^2 = 0.4761$ )。这说明林分密度只能反映树木多少,无法反映其他林分结构特征,因此,难以反映叶量多少,所以与  $LAI$  相关性最低; $LAI_{max}$  与树高呈正相关,一般冠层厚度

和冠幅将随树高的增加而增大,而冠层厚度大时  $LAI_{max}$  也大,但相关性不高;从幼林到中林随着林龄的增加树木生物量快速上升,叶量与林龄呈较好正相关,但受生境和林分结构特征影响,同龄林分  $LAI$  差异较大;林冠郁闭度主要受各株树木树冠垂直投影面积的影响,在六盘山地区林分结构简单、林龄较小、树冠垂直重叠不大的情况下,它能很好地反映叶量多少,因此相关性较高;林分断面积是林分密度和林木平均胸径的复合因子,能综合反映树木个体大小和株数多少的作用,因此相关性最高。

#### 3.3 基于土壤水分植被承载力的林分密度计算模型

鉴于以上分析,可确定能从植被承载力  $LAI_c$ (当  $LAI$  作为土壤水分植被承载力指标时,记为  $LAI_c$ ) 计算不同林龄时对应林分密度模型的基本途径,即首先确定  $LAI_{max}$  与林分断面积(可从林分平均胸径和密度计算得到)的关系,然后将其嵌入能反映林分平均胸径随林龄和密度变化的关系,形成表征它们之间复杂关系的 1 个模型,之后利用本文实测样地数据拟合模型参数,并依此导出依据植被承载力  $LAI_c$  计算不同林龄时对应林分密度的模型。

基于对图 2 的分析,得知生长季内林分  $LAI_{max}$  与林分断面积  $BA(m^2 \cdot hm^{-2})$  的关系为:

$$LAI_{max} = a' \cdot BA^b \quad (1)$$

前期研究<sup>[33]</sup>已较好拟合了六盘山地区华北落叶松人工林平均胸径随林龄和密度变化的生长模型:

$$DBH = \frac{DBH_{max}}{1 + a \cdot e^{-kt}} \cdot N^c \quad (2)$$

式中:  $DBH$  为林分平均木胸径 (cm);  $t$  为林龄 (a);  $N$  为林分密度 (株 · hm<sup>-2</sup>),  $c$  为表示密度效应的参数;  $DBH_{max}$  表示调查地区 (立地条件) 所能达到的林木直径最大极限值 (cm);  $k$  为表示树木生长速度快慢的参数, 其值越大生长越快;  $a$  没有明确的生物学意义, 但它影响生长曲线在时间轴上的位置。

利用林分平均木胸径和密度计算林分断面面积 ( $BA, m^2 \cdot hm^{-2}$ ) 的公式为:

$$BA = \left(\frac{DBH}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot N \cdot 10^{-4} \quad (3)$$

联立式(1)、(2)和(3), 得林分生长季  $LAI_{max}$  与林龄和密度的计算公式:

$$LAI_{max} = a' \cdot \left(\frac{DBH_{max}^2}{4 \cdot (1 + a \cdot e^{-kt})^2} \cdot N^{2c+1} \cdot \pi \times 10^{-4}\right)^b \quad (4)$$

在本研究中, 取值  $DBH_{max} = 30.0$  cm, 然后利用 SPSS 16.0, 基于本文样地观测数据, 对式(4)中的参数进行拟合, 得到模型参数 (表 2),  $R^2 = 0.86$ 。

表 2 六盘山华北落叶松林分平均胸径生长模型的参数拟合值

参数	拟合值	标准误	95% 置信区间	
			下限	上限
$a'$	2.319	1.250	-1.812	2.696
$b$	0.224	0.005	0.122	0.329
$a$	35.686	2.593	32.112	37.154
$k$	0.151	0.008	0.125	0.155
$c$	-0.077	0.028	-0.037	-0.146

将所有拟合参数代入式(4)中, 经过整理得到:

$$LAI_{max} = 1.28 \cdot \frac{N^{0.19}}{(1 + 35.69 \cdot e^{-0.151t})^{0.448}} \quad (5)$$

将各样地的实测林龄和密度代入式(5), 得到  $LAI_{max}$  的模拟值, 并和其实测值做线性回归方程, 方程的方差分析 (ANOVA) 显示:  $F = 276.7, P < 0.001$ , 可认为变量  $X$  与  $Y$  之间有直线关系 (图 3)。在回归分析中的系数检验结果中, 回归系数的标准误差为 0.06, 回归系数  $t$  检验的  $t = 16.6, P < 0.001$  (与方差分析一致), 回归系数有显著意义, 方程接近 1:1 的直线,  $R^2 = 0.8691$ ; 且模拟值和观测值的相对误差平均为 8.6% (0 ~ 20.4%), 因此, 可认为式(5)是可靠的。

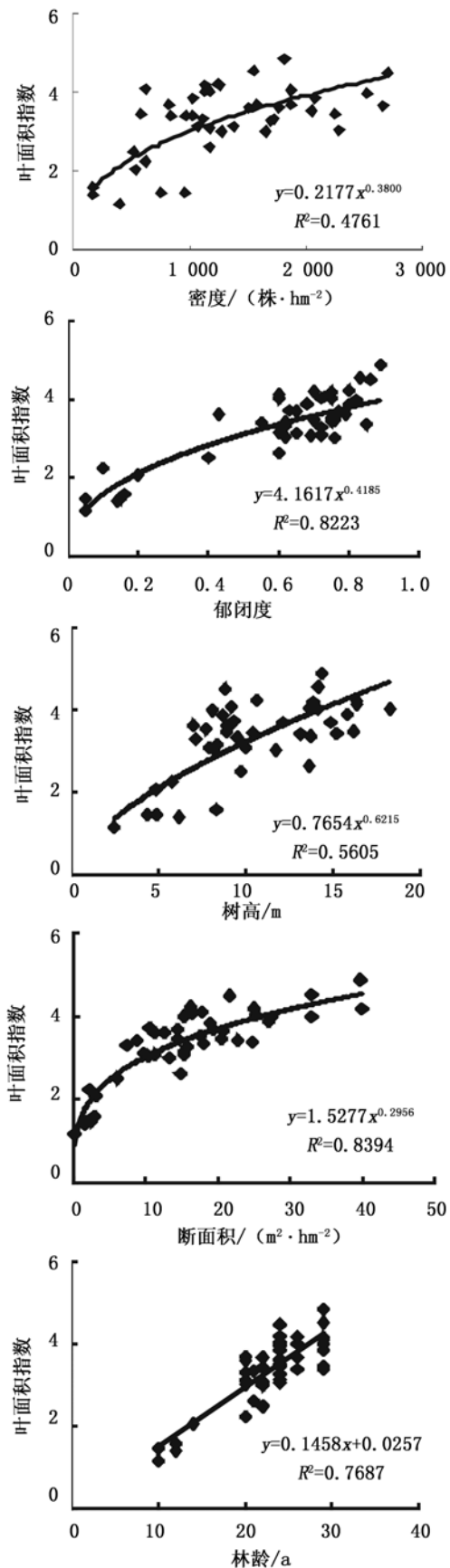


图 2 生长季六盘山华北落叶松人工林的最大叶面积指数与林分结构指标的关系

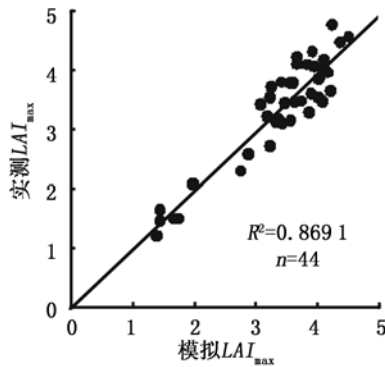


图3 六盘山华北落叶松人工林生长季最大叶面积指数( $LAI_{max}$ )的模拟值(利用式(5)计算)与实测值的比较

假设土壤水分植被承载力  $LAI_c$  为生长季内的最大  $LAI(LAI_{max})$ , 则从式(5)可导出由给定植被承载力指标  $LAI_c$  计算不同林龄对应的林分密度模型:

$$N = 0.2727 \cdot LAI_c^{5.26} \cdot (1 + 35.69 \cdot e^{-0.151t})^{2.3579} \quad (6)$$

利用本研究得到的模型,可较准确地指导基于土壤水分植被承载力的森林密度管理。例如,当立地的土壤水分植被承载力  $LAI_c$  为 4.0 时,利用式(6)可计算得到在不同林龄时的华北落叶松人工林的可承载林分密度(图4),比如林龄为 20、30、40 年生时对应的可承载林分密度分别为 3 710、850 和 460 株  $\cdot$   $hm^{-2}$ 。

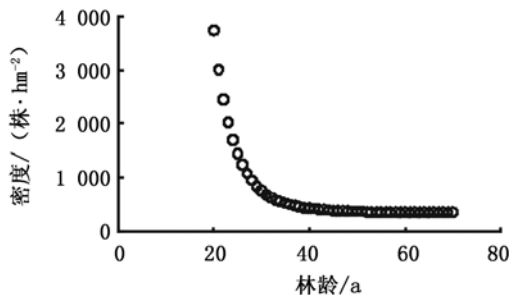


图4 利用式(6)计算的给定土壤水分植被承载力( $LAI_c = 4.0$ )条件下可承载的林分密度随林龄的变化

## 4 讨论

在我国西北半干旱缺水地区,土壤水分植被承载力的确定已成为土壤水分与植被生长关系调控、水资源合理利用和生态植被建设的核心问题之一<sup>[19]</sup>。以  $LAI$  作为土壤水分植被承载力指标已有较多研究,如,田有亮等<sup>[26]</sup>模拟计算了乌兰布和沙漠东北缘植被在不同叶面积指数下的土壤水分动态变化,以  $LAI$  为指标评价了该区土壤水分植被的承

载力。刘建立等<sup>[25]</sup>描述了六盘山地区坡面土壤水分和  $LAI$  随坡位的变化,并基于水量平衡原理,建立了以  $LAI$  为指标的土壤水分植被承载力计算公式;然而,林业生产实践中为便于指导生产,需将以  $LAI$  为指标的土壤水分植被承载力转换为特定林龄的林分密度等结构指标。目前,对  $LAI$  与其他林分结构指标间的关系已有一些研究报告,如 Will 等<sup>[34]</sup>的研究结果显示:火炬松(*Pinus taeda* Linn.)  $LAI$  与树干生长呈很好的线性关系( $R^2 = 0.67$ ),且  $LAI$  与林分密度和断面积之间呈正相关;项文化等<sup>[35]</sup>认为,杉木林(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)  $LAI$  随林分密度增大而增大,但最终趋于一定水平,本研究也得到相似结果。在陈厦等<sup>[36]</sup>的研究中,华北落叶松林  $LAI$  与林冠开阔度(1-郁闭度)的相关系数为 0.99,本研究中林冠郁闭度与  $LAI_{max}$  的相关系数为 0.91,结论一致。Davi 等<sup>[37]</sup>对 3 个研究地点欧洲水青冈(*Fagus sylvatica* L.)、地中海松(*Pinus halepensis* Mill.)和欧洲黑松(*Pinus nigra* Arn.)等多种森林的研究结果显示,林分  $LAI$  变化与减少的断面积相一致;朱春全等<sup>[38]</sup>得出:小叶杨树(*Populus simonii* Carr.)单株的叶面积大小与林木胸径成正比的结论,但没给出二者的数量关系。本研究给出了林分  $LAI_{max}$  与林分断面积的幂函数关系,形式简单,且相关性较好( $R^2 = 0.8394$ )。

在本研究中,将  $LAI_{max}$  与林分断面积的幂函数关系嵌入到反映胸径与林龄和密度关系的生长模型中,得到将植被承载力指标( $LAI_c$ )转换为计算不同林龄时对应林分密度的模型。为进一步检验本研究成果的可靠性,利用该模型计算得到的生长季  $LAI_{max}$ ,比苏宏新等<sup>[39]</sup>在北京东灵山华北落叶松林利用凋落物收集法得到的 7 月份实测最大  $LAI$  值仅高 5.9% 左右,比常国梁等<sup>[40]</sup>在青海大通县华北落叶松林实测得到的 8 月份  $LAI$  值高 11.2%,说明本研究成果模型的预测精度是较高和可接受的。虽然还需更多实例验证,但也有可能应用于其他气候条件类似地区。

基于前期研究<sup>[25]</sup>得到的六盘山叠叠沟小流域阴坡各个坡位在完全利用降水时分别可承载的  $LAI$  值,籍助本研究结果计算了表 1 中叠叠沟小流域的林龄在 20 a 以上的不同华北落叶松林样地可承载的林分密度,并与表 1 中给出的现有林分密度相比较,发现有 16.7% 的样地超出了可承载密度,可见水分承载力超载比较严重;但实际中不可能所有降

水输入都被植物利用,总有一部分降水会形成地表径流或壤中流或深层渗漏。因此,假设现有林分  $LAI$  的最大值(叠叠沟:4.47;香水河:4.84)为实际的最大土壤水分植被承载力,依据样地林龄计算了半干旱区叠叠沟小流域和半湿润区香水河小流域的林龄在20年生以上样地可承载的林分密度。与现有林分密度相比,叠叠沟小流域有43.5%的林分密度超载,其中21.8%在上坡,13.0%在中坡,8.7%在下坡;香水河小流域有13.3%的林分密度超载,主要是位于下坡的林分,而位于上坡和中坡的林分的密度相对较低,基本不超载。由此可见,为保障林分结构及其水文功能的稳定,在六盘山林区需对相当比例的华北落叶松林分进行必要的间伐管理,将密度调减到土壤水分植被承载力范围之内。

考虑到受环境影响造成的林木个体差异,应用模型时应根据实际调查选择林木直径最大极限值,然后对式(4)进行参数拟合。此外,今后相关的研究应增加立地特征(坡度、坡向、土壤厚度等)和气象因素(降水、温度等)等变量,可进一步提高模型的普适性和模拟精度。

## 5 结论

六盘山地区华北落叶松人工林的生长季内最大  $LAI$  与林分断面积、林冠郁闭度、树高、密度等林分结构指标均呈幂函数关系,其与林分断面积的相关性最高( $R^2=0.8394$ ),其次是郁闭度( $R^2=0.8223$ )。将  $LAI_{max}$  与林分断面积的幂函数关系嵌入到林分平均胸径与林龄和密度的模型中,得到了以  $LAI$  表示的土壤水分的植被承载力与林龄和密度的关系模型,可依据将特定立地的植被承载力( $LAI_c$ )简捷地转化为不同林龄时的林分密度,从而定量确定林分结构调控中的间伐强度,促进实现基于土壤水分的植被承载力和面向流域水资源管理的森林经营。

### 参考文献:

- [1] Watson D J. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years[J]. *Annals of Botany*, 1947, 11:41-76
- [2] Weiss M, Baret F, Smith G J, et al. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121:37-53
- [3] 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[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 247:185-193
- [4] 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[J]. *生态学报*, 2007, 27(9):3582-3592
- [5] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121:19-35
- [6] 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[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11):2971-2979
- [7] Schleppi P, Conedera M, Sedivy I, et al. Correcting non-linearity and slope effects in the estimation of the leaf area index of forests from hemispherical photographs[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 144:236-242
- [8] 郭志华,向洪波,刘世荣,等. 落叶收集法测定叶面积指数的快速取样方法[J]. *生态学报*, 2010, 30(5):1200-1209
- [9] Chen J M. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 80:135-163
- [10] Nasahara K N, Muraoka H, Nagai S, et al. Vertical integration of leaf area index in a Japanese deciduous broad-leaved forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148:1136-1146
- [11] Sprintsin M, Cohen S, Maseyk K, et al. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151:565-574
- [12] Asner G P, Scurlock J M O, Hicke J A. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2003, 12:191-205
- [13] Ishihara M I, Hiura T. Modeling leaf area index from litter collection and tree data in a deciduous broadleaf forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151:1016-1022
- [14] 孙鹏森,刘世荣,刘京涛,等. 利用不同分辨率卫星影像的NDVI数据估算叶面积指数(LAI)——以岷江上游为例[J]. *生态学报*, 2006, 26(11):3826-3834
- [15] Hebert M T, Jack S B. Leaf area index and site water balance of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) across a precipitation gradient in East Texas[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 105:273-282
- [16] Molina A J, del Campo A D. The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 269:206-213
- [17] Wasseige C D, Bastin D, Defourny P. Seasonal variation of tropical forest LAI based on field measurements in Central African Republic[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 119:181-194
- [18] 张佳华,符淙斌,延晓冬,等. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(5):631-638
- [19] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. *生态学报*, 2003, 23(8):1640-1647
- [20] 郭忠升,邵明安. 雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力



- [J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 523-528
- [21] 熊伟. 六盘山北侧主要造林树种耗水特性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003
- [22] Iida S, Tanaka T, Sugita M. Change of evapotranspiration components due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 326: 166-180
- [23] Andersen J, Dybkjaer G, Jensen K H, *et al.* Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 264(1/4): 34-50
- [24] 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 等. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 19-25
- [25] 刘建立, 王彦辉, 于澎涛, 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
- [26] 田有亮, 何炎红, 郭连生. 乌兰布和沙漠东北部土壤水分植被承载力[J]. *林业科学*, 2008, 44(9): 13-19
- [27] 童鸿强, 王玉杰, 王彦辉, 等. 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[J]. *林业科学研究*, 2011, 24(1): 13-20
- [28] 时忠杰. 六盘山香水河小流域森林植被的坡面生态水文影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006
- [29] 段旭. 六盘山地区水文要素坡面变化[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011
- [30] 李永宁, 张宾兰, 秦淑英, 等. 郁闭度及其测定方法研究与应用[J]. *世界林业研究*, 2008, 21(1): 40-46
- [31] 郝佳, 熊伟, 王彦辉, 等. 华北落叶松人工林叶面积指数实测值与冠层分析仪读数值的比较和动态校正[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(2): 231-235
- [32] Hebert M T, Jack S B. Leaf area index and site water balance of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) across a precipitation gradient in East Texas [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 105: 273-282
- [33] 郝佳. 宁夏六盘山华北落叶松人工林密度对多功能的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012
- [34] Will R E, Narahari N V, Shiver B D, *et al.* Effect of planting density on canopy dynamics and stem growth for intensively managed loblolly Pine stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 205: 29-41
- [35] 项文化, 林柏, 吴迁芳. 杉木人工林叶面积指数的变化[J]. *林业科学*, 1997, 33(2): 139-142
- [36] 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
- [37] Davi H, Baret F, Huc R, *et al.* Effect of thinning on LAI variance in heterogeneous forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256: 890-899
- [38] 朱春全, 雷静品, 刘晓东, 等. 不同经营方式下杨树人工林叶面积分布与动态研究[J]. *林业科学*, 2001, 37(1): 46-51
- [39] 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: 多种监测方法比较[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(3): 231-242
- [40] 常国梁, 赵万启, 贺康宁, 等. 青海大通退耕还林工程区的林木耗水特性[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(1): 58-65